

第 1 章

照明和社会

1-1 照明简史

1-1-1 早期照明

人类从发现火到照明工程学的建立经历了一个漫长的历程。这也是人类历史发展的产物。它对现代照明工程学影响很大。上世纪出现电灯是照明工程学诞生的标志。

据说是人类远祖猿人（约在60~30万年前）发现了火，开始在生活中有目的地生火和用火。后来，现代人类（约在5万年前）的头脑逐渐发达，除继承了取火用火的知识外，还开始用火狩猎、煮食和打仗，当然也用火来照明。于是，火就成为社会发展的一个重要因素。在日本，从用松明、庭园灯火、篝火的原始状态到使用台式油灯、灯笼等照明器具是在国家形势逐渐稳定时期，特别是佛教传入之后。从发现火以来，人们很难预计以后长时间里的用火趋势，就是当时世界上各先进国家也是这些。经过漫长的历程，直到十九世纪后半世纪，其他自然科学领域蓬勃发展，使灯火技术以惊人的加速度发展起来，特别是最近的一百年里，可以说是从原始状况飞向现代。当然在十八世纪以前，人们在灯具设计方面作出过重大贡献，出现过许多艺术价值很高的珍贵作品，这在日本和国外都是一样。艺术是照明工程学的有趣课题。人们的艺术欣赏力，从古至今并没有什么变化。

在十九世纪末到二十世纪初，煤油灯和汽灯是当时有代表性的照明工具。特别是汽灯，在电灯问世后的很长一段时间里，具有强大的竞争能力，与电灯不相上下。

1-1-2 近代照明

随着白炽灯的发明和电气技术的发展，建立了照明工程学。电弧灯就是电能转换成光能的开端。

白炽灯出现之后，由于它具有能量供给稳定，操作简便，灯座适当，电路安全（有保险器件），以及用功率表计数方便等优点，因而在同汽灯的竞争中获胜。白炽灯的优点是以往的照明器具不可比拟的。但是，白炽灯的优点只有在电气技术发达，发电和供、配电系统的完善情况下才能获得。

白炽灯与汽灯竞争获得胜利之后，使它很快地得到普及，如表 1-1 所示；到二十世纪中期，再经不断改进，白炽灯便完全普及了。

同时，在十九世纪初期出现气体放电灯后，G. Claude 开发的霓虹灯在实用上得到普及。1920年左右，霓虹灯广告已广泛地为人们所知晓。后来，随着灯内充气种类的增多，色彩愈加丰富，至今仍广泛应用。到本世纪中期，放电灯开始用作一般照明。最早使用的放电灯显然是原始的荧光灯。特别是在日本，荧光灯已广泛应用在住宅、旅馆等与生活直接有关之处，大有取代白炽灯的趋势。这种传统的具有亲切感的照明器具和光线，深受人们的欢迎。

从上述发展过程，可以看出照明有赖于科学的发展和生产技术的进步。正如本手册的各

2 1-1 照明简史

个章节所阐述的内容，也都是因光源、灯具、测光技术和生产工具的进步而得到完善一样。同时，也是由于照明设计理论的发展，生理学、心理学等许多科学分支的出现和系统化，才导致今天照明工程学的建立和发展。

表1-1 照明发展史年表 (节译)

公元	照明技术	科学技术	历史
约60万年前	由猿人发现火，后来由现代人所继承		
公元前7世纪	希腊的泰勒斯发现摩擦生电和电的传导		
公元前509年			罗马共和政体建立
公元前1世纪		发现磁铁石吸铁现象	
公元前13年		维特鲁威在建筑方面积累了古代建筑的大成	罗马的全盛时期
公元前1世纪	发现琥珀带电、雷光和圣埃尔摩光现象	在欧洲出现水车	
4世纪			日耳曼民族大迁移
645年			大化革新
708年	发现庭园灯火和篝火等		
	在奈良朝以前出现了点油的油灯		
	平安、镰仓时期开始使用油脂烛	在11世纪，中国使用指南针	
12世纪		造纸术、风车等传到了欧洲	1192年成立了镰仓幕府
14世纪		发明步枪和火炮	
1492年		1455年期间完成了活字版印刷术	哥伦布发现了美洲新大陆
1600年		克伯特研究磁和电	1603年成立了江户幕府
1752年	弗兰克林发明了避雷针		英国进入了产业革命时期
1785年		发现了库仑定律	
1802年	在工厂照明中开始使用汽灯	1799年发明了伏特电池	
1808年	戴维发明了碳弧灯	1807年富尔敦发明了汽船 1809年莫美令发明了电报机	
1812年	英国建立了城市煤气公司		
1815年	英国成立了汽灯公司	史蒂文森制造出了蒸汽机车	
1820年		奥斯特发现电流的磁效应	
1824年		阿拉哥圆盘试验	
1826年		发现欧姆定律	发生最早的周期性经济危机

公元	照明技术	科学技术	历史
	在江户幕府末年,出现了新煤油灯和煤油灯		
1831年		法拉第发现了电磁感应现象	
1837年		法拉第观察了真空放电现象	
1858年	制造出真空放电管并发现了阴极射线	1861~64年提出了麦克斯韦电磁波基础方程式	1861年美国发生了南北战争
1867年		西门子等发现了自激原理	1868年日本发生明治维新
1876年	雅布罗契可夫发明了电炉		
1877年	山川健二郎用碳弧灯照明		
1878年	在工部大学的大厅里,在英国教师的指导下,中野初子、藤岡市助、浅野应辅用克罗夫电池点燃了法国出的德伯斯克式电弧灯。这是1878年3月25日,后来把这一天作为日本电气纪念日	斯旺发明了碳丝灯泡	
1879年	爱迪生研制出实用碳丝灯	建立了爱迪生中央发电所(1881年)	
1882年	在东京银座的大仓楼前,试点了2000烛光的碳弧灯	1881年在巴黎电气会议上,确定了电气的单位	
1883年	成立了东京电灯公司(现在的东京电力公司的前身)		
1884年	上野至高崎铁路通车,在通车典礼时,上野车站使用了碳棒灯和碳弧灯	○爱迪生发现了热电子效应 ○赫维塞德研究提出了送电理论	
1886年		成立了WH公司,并且头一次建造了交流发电站,在专利问题上同GE公司进行了争论	WH-美国威氏电气公司 GE-美国通用电气公司 (译注)
1887年	电灯公司开始供电		
1888年		赫兹的电波传送试验成功	
1889年	○光电管问世(J. Elster, H. Geitel) ○薄式光度计问世(L. Brodhum)	E. 汤姆逊发明了累计功率计	○召开了第一届国际度量衡会议 ○爱菲尔铁塔建成
1890年	三吉正一、藤岡市助研制碳丝灯泡成功	德利伯·多布罗沃里斯基进行了三相交流送电试验	
1892年		史坦麦兹系统地记载了交流电理论	纳伊阿加拉发电站的建立(1891~1895)
1895年	发现了X射线	进行了无线电通讯的试验	
1897年	布朗恩管的发明	J. J. 汤姆逊发现了电子	
1900年	R. Ulbricht研制出积分球光度计		
1901年	汞灯问世(Peter Cooper Hewitt)	乔治提出了MKS单位制的提案	设立了诺贝尔奖金

(续)

公元	照明技术	科学技术	历史
1903年		莱特兄弟完成了飞行试验	
1904年		弗赖明发明了二极管器件	
1905年	A. Just, F. Munna-man 发明了用拉制钨丝做的钨丝灯泡	爱因斯坦提出了特殊相对论	
1906年		德·费利斯特发明了三极管	
1908年	○克利希发明了钨丝引线灯泡 ○Ives研制出了三色色度计	1906年进行了传真试验 罗京提出了用布朗恩管制造电视机的建议(1907)	
1910年	日本制造出了拉制钨丝灯泡		
1913年	朗格姆研制了充气钨丝灯泡	柯利芝发明了X射线管	1912年进行了第二届国际无线联合
1914年	○日本制出了100V、200W以上的充氮气的灯泡 ○日本制造出竹形灯	朗格姆研究了热电子发射	第一次世界大战爆发
1915年	○麦克贝斯照度计问世 ○日本造出小电灯泡	1916年浦耳生提出电弧的无线方式	
1917年		○涡轮交流发电机问世 ○克贝尔滤波器制造成功	俄国十月革命
1918年	日本制造出巢鱼灯、充气日光灯	高频传送方式在各国普遍应用	
1919年	无触点真空螺旋灯丝灯泡问世	卢瑟福的人工分裂原子核试验成功	
1920年		在匹兹堡建立了世界上第一个广播电台	
1921年	日本发明了双螺旋灯丝灯泡	磁控管问世(贝尔)	
1924年	提出了标准视觉函数(明视觉)	提出世界各国大电力系统计划	
1925年	日本发明了内磨砂灯泡	纵横式自动电话机投入运行使用	
1929年	自动记录式分光光度计研制成功(A. C. Hardy) 闪光灯问世(J. Oslermeier)	○BBC电视开始播送节目 ○美国发明了雷达	爆发了世界性经济大危机
1930年	M. Dirain发明了钠灯 B. Lange发明了实用硒光电池	开始使用超短波通讯	
1931年	○荷兰、美国试制钠灯成功 ○德国研制出热阴极高压汞灯 ○提出(2°视场)的光谱三刺激值	三岛发明了MK磁铁	
1933年	高压汞灯在荷兰问世	发明光电摄像管	
1934年	J. Guild研制出直读刺激值色度计	发明了聚乙烯	
1935年	○氙灯问世 ○超高压汞灯研制成功 ○美国、日本研究出光电池照度计	○汤川提出了介子理论 ○建立了阿姆斯特朗FM方式	

(续)

公元	照明技术	科学技术	历史
1936年	<ul style="list-style-type: none"> ○Kreff研究出热阴极荧光灯 ○日本研制出一般照明用双螺旋灯丝灯泡 ○GE公司的杀菌灯研制成功 ○Destriau发明了EL灯 	建立了波导管理论	
1937年		柯拉乌泽研制出电子显微镜	
1938年	<ul style="list-style-type: none"> ○Imman的实用热阴极荧光灯研制成功 ○美国发明了点灯管 ○防爆灯具开始在市场出售 	<ul style="list-style-type: none"> ○雷达进入使用阶段 ○卡罗札斯、尼龙工业化 	
1939年	<ul style="list-style-type: none"> ○加热用红外线灯研制成功 ○日本研制出高压水银灯(1kW) 	发明了高灵敏度摄像管、速度变调管	第二次世界大战爆发
1940年	法隆寺壁画绘制时使用了136只20W日光色荧光灯(木制灯具)	伯德提出了反馈理论	
1941年	美国造出紫外线灯(黑光灯)	远距离无线电导航系统的实用化	
1944年	<ul style="list-style-type: none"> ○德国制出氙灯 ○日本废除了灯泡的触光制 ○美国造出环形荧光灯和细长管形的日光灯(~45) 	大型继电器计算机问世	
1945年		发明了同步加速器	第二次世界大战结束
1947年		制造了倍整流器	日本施行新宪法
1948年	日本制出水中捕鱼用灯泡	发明了晶体管	
1949年	<ul style="list-style-type: none"> 双螺旋丝灯泡的再生(在日本) 内磨砂灯泡(在日本)的再生 	开始使用塑料荧光灯灯具	<ul style="list-style-type: none"> ○中华人民共和国成立 ○日本召开第一届学术会议
1950年	美国发明了EL灯	提出了超导理论	
1951年	<ul style="list-style-type: none"> ○Philips的超高压水银荧光灯问世 ○京都车站中央大厅使用发光顶棚照明 ○提出暗视觉条件下的标准视觉函数 	出现商业电子计算机UNIVAC-1101型	
1953年	<ul style="list-style-type: none"> ○美国制造出快速启动荧光灯和附件(镇流器) ○日本制造出汽车用前灯 	<ul style="list-style-type: none"> ○2月1日NHK电视台开始播送(日本) ○美国试播NTSC彩色电视 	
1954年		量子振荡器研制成功	
1955年	<ul style="list-style-type: none"> ○国际比对用标准光强灯泡问世 ○荧光灯调光装置研制成功 		
1956年	密封光束型电车前照灯问世	扩散型晶体管出现	
1957年	日本制造出国际标准光强灯泡	<ul style="list-style-type: none"> ○发明二极管真空管 ○东海村原子反应堆发出日本第一束原子光 ○美国开始信息通讯 ○苏联500kV输电成功 	人造卫星上天, 人类开始了宇宙探索
1958年	<ul style="list-style-type: none"> ○超高压大光通荧光灯问世 ○造出高速公路灯具 		
1959年	Zubler的碘钨灯问世		实施EEC

(续)

公 元	照 明 技 术	科 学 技 术	历 史
1960年	红宝石激光器振荡成功	NHK开始播送彩色电视	
1961年	○美国造出高压钠灯 ○美国Rolling发明金属卤化物灯 ○管形红外线灯问世	○1960年外延型晶体管问世 ○出现平面晶体管	
1962年	发明发光二极管(GaAs)	发明He-Ne气体激光	
1964年	提出10°视场的光谱三刺激值	东海道新干线开始使用	
1965年	美国发明化学发光灯		
1966年	研制出激光和半激光型的照明灯具		
1970年	在大阪万国博览会上,大量地使用了金属卤化物灯照明		

注:本表的参考资料如下:

东京电气公司(东京芝浦电气公司、东京电材有限公司的前身)编的《日本灯光史》;

日本电灯工业公司编的《日本电灯工业史》;

日本照明灯具工业公司编的《日本照明灯具工业史》,日本照明界各协会和公司提供的资料,还有国内外的科学技术史(如欧姆社的《电气技术史》等)以及一般性历史书刊等。

1-2 照明工程的边缘科学

1-2-1 影响照明工程发展的自然科学

假若把照明工程学看作是实现照明的手段,那么和它密切相关的自然科学有电工学、机械工程学、化学工程学、建筑工程学、气象学、人类功效学等。然而,照明又为人服务,因而生理学、心理学等也是照明工程的不可缺少的学科。因此,这些学科也是照明工程的一个部分。如果把这些看作是照明的第一边缘科学,那么构成这些学科的基础科学就可以看作是第二边缘科学。

1-2-2 影响照明发展的人文条件

大家知道,工业或工程如不受到政治、经济、社会、文化等人文条件的影响,就不能存在和发展,而照明直接受到这些条件的影响就更明显了。以1973年开始的石油危机为例,照明界受到的冲击,在时间、数量、质量等方面都比其它任何部门严重。表面上是照明工程的最外缘的影响因素,但实际上却直接地影响到照明工程学的发展。

思想、文化的潮流对照明界的影响也是很大的。照明界和建筑界一样,超越科学的时髦风格是常见的。然而,这些是其它工程学科所没有的特殊风格。

1-3 影响照明发展的因素

1-3-1 照明与和平

自从人类出现以来,照明就深深地扎根于人们生活之中。在人们的居住地方除必须有天然光照明之外,还要有人工灯火。当初,供作原始的自给自足的生活,只限于以灯火进行炊

事、狩猎等是够用的。但同现在的照明相比，就差距很大。后来由定居的农业部落发展成国家，人们生活也富裕起来，并过着和平欢乐的日子，于是出现了人工照明器具，创造出工艺水平很高的艺术作品等。总而言之，在人们尚未很好地掌握自然科学的阶段，对照明本身还没有形成明确的概念，只是在和平的生活中热爱灯火，亲近灯火，崇敬太阳光，赞美月光。这些都是人们对灯火的感性的自发表示，而没有任何有意识的创造。也就是说，人们用火只是一种本能的表现。因此，人的本性是促进照明发展的第一因素，而和平对照明的发展的影响也是毫无疑问的。

1-3-2 照明工程学和电气工程

众所周知，在几十万年里，人们尽管使用灯火，但是照明理论和技术却几乎没有什么大的发展。到十九世纪，随着自然科学和其他工程技术的飞速发展，照明工程学在近百年之间得到了惊人的发展。现代照明工程技术是从将电能转换为光能开始的。今后的发展也是和它的边缘科学技术，特别是电工技术的发展有密切关系。关于它的发展将稍详细地加以阐述。

照明工程学是随着电灯的出现，并作为电工技术的一个分支而发展起来的。显然，照明本身在实质上是同电气工程学不可分割的。电在稳定供能、发光和控制、测试等方面和照明技术有着密切的联系，也是照明不可缺少的组成部分。照明的其它一些重要方面，如关于舒适、不舒适的生理、心理效果，还有同艺术有关的主观感觉效果，看来似乎同电气工程技术无关，其实不然。人们对外界刺激的反应，即作为人的信息处理系统，有什么信息，就有什么反应。要从理论上说明这一现象，除了电工理论外，其他工程技术是不大可能的。否则，照明的本质也难以解释。与人体密切相关的医学界，目前已用ME（电眼—译注）仪器迅速地处理许多生理方面的信息，在医疗中发挥了很好的作用，并推动着医疗技术的发展。今后，电工技术同照明的关系更为密切，并将继续发挥其主导作用。对于同照明有关的许多问题，其中也包括与艺术有关的问题，若不从原理上加以解释，就不可能解决更复杂的问题。因此，起主导作用的电工技术仍将继续在这方面发挥作用。然而，实现理想照明的日子还早，前进的道路也不平坦。因而，照明工程学正期待着电气工程技术的进一步发展。

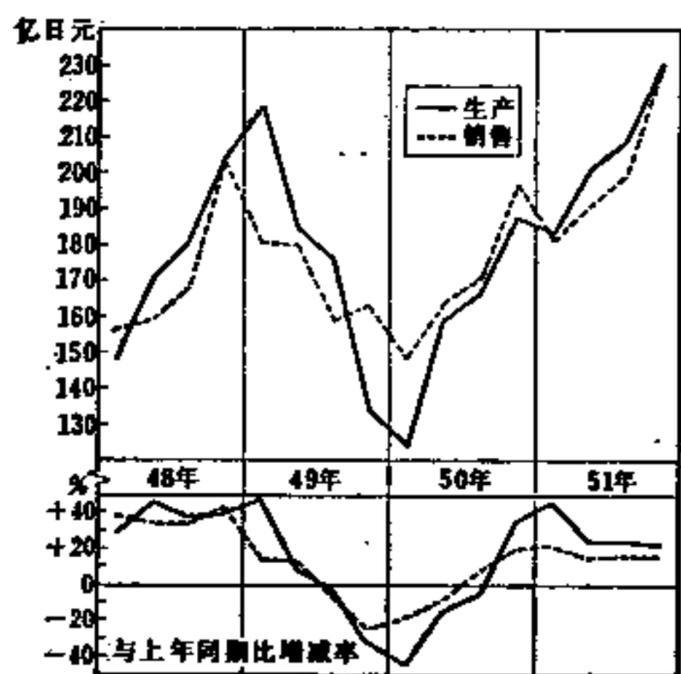


图1-1 照明灯具的半年月平均生产和销售总量的变化
(扣去汽车灯数)

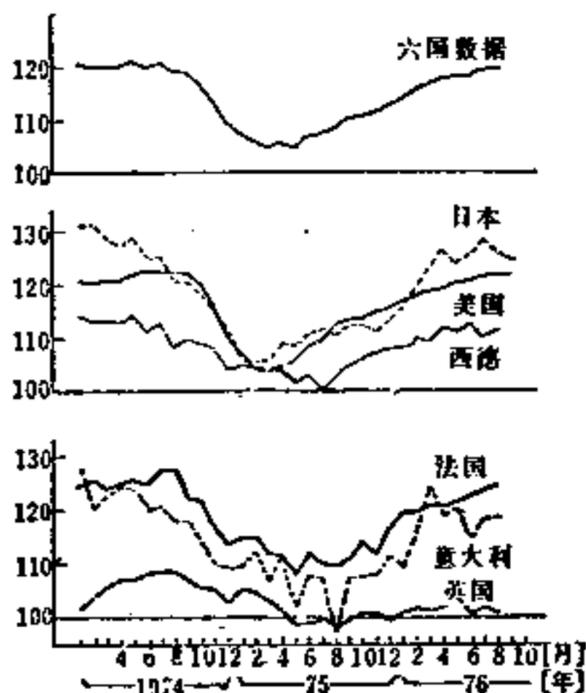


图1-2 世界上主要工业国的矿业生产动向
(1970年=100,按世界经济白皮书的各国资料整理)

1-3-3 照明和经济条件

在照明技术的进步和发展中，不可忽视的一个重要因素就是社会经济条件。前面已经阐述，和平是照明发展的最基本的因素，但是必须以富裕的经济条件为后盾。也就是说，照明界的活跃是以富裕的经济条件为前提的，再加上工程技术的进步而推动照明技术向新的阶段前进。这一点可从表 1-1 介绍的事实得到有力的证明。

照明灯具的生产、销售情况的变化，能很好地说明照明界的一般情况。现以日本照明灯具工业协会调查的资料为例（图 1-1），可以说明这个问题。1973 年开始的石油危机的影响是很明显的。能源问题成为当今世界的重要话题。图 1-2 所示为 1976 年度在世界经济白皮书中登载的主要工业国的生产情况。其中，石油危机对生产的影响与对照明灯具的影响情况显示出十分相似的趋势。由此，我们完全可以看出能源是社会富裕的基础和重要条件。这一点给人们以深刻的教育。与此同时，在社会中光能是不可缺少的基本能量，也是社会的最重要的物质条件。因为没有光，就等于没有眼睛，没有文化，没有人类的生活。

第 2 章

光的物理特性

2-1 基本概念

2-1-1 光的本质

(1) **光和辐射** 所谓辐射,是指以电磁波或光子的形式发射能量或传播能量的过程,通常是指辐射能量本身。当辐射波长约在 $380\sim 760\text{nm}$ 的范围内时,可在人眼里产生光的觉。

(2) 光的二重性

(a) **波动性** 电磁波在真空中传播时,它的波长 λ (m)、频率(或振动次数) ν (Hz)、传播速度 c (m/s) 之间具有下式的关系:

$$\lambda\nu = c \quad (2-1)$$

式中, $c = 2.997925 \times 10^8$ (m/s), 为光在真空中的传播速度。

光的振动频率不随所通过的媒质而变,而波长和速度则随所通过的媒质而变化。媒质的折射率为 n , 光在媒质中的传播速度 v (m/s) 由下式决定:

$$v = \frac{c}{n} = \nu \frac{\lambda}{n} \quad (2-2)$$

波长 λ 的倒数 $1/\lambda$ 称为波数。

辐射的电磁波波动理论,可以解释偏振、干涉、衍射等现象。但是,对于辐射和物质的相互作用,用光的波动学说却不能解释,必须根据下面的微粒说才能解释清楚。

(b) **微粒性** 我们知道,光的波动说不能解释光电效应现象,因此,爱因斯坦提出了光量子假说。这个假说认为,光能由称为光子或光量子的粒子流组成,一个频率为 ν 的光波的光子的能量为 E :

$$E = h\nu \quad (\text{J}) \quad (2-3)$$

式中, $h = 6.62559 \times 10^{-34}$ (J·s) 为普朗克常数。光子的动量为 P :

$$P = h/\lambda = h\nu/c \quad (2-4)$$

辐射具有上述波动性和微粒性的二重性,一般辐射频率越高微粒性越强,反之,频率越低波动性越强。

2-1-2 几何光学

几何光学是以宏观上能直接观测到的光的传播为基础,讨论光束的传播路线和成象原理的一门科学。几何光学中的法则是以波动光学(参照 2-1-3 节)中的无限小波长为极限,尽管光在空间中的传播是有形状的,但可把表示光能的路径线称为光线。

(1) **光的直线传播** 光在同一种均匀媒质里是沿直线传播的。从 A 点发出的光,经过几次反射、折射到达另外一点 B 所经过的路程,与这两点间任意其它路程相比,只用最少的时间 T , 或者说是这二点间的最短光程(费马原理),亦即:

$$\delta T = \delta \int_A^B \frac{dl}{v} = 0 \text{ 或 } \delta \int_A^B ds = 0 \quad (2-5)$$

式中, δ 是变分符号, dl 是线分要素, v 是媒质中的光速, $ds = n \cdot dl$ 为光程要素, n 是媒质的绝对折射率。

根据费马原理, 可推导出光的直线传播法则和逆进原理。

(2) 光的反射、折射和透射

(a) 折射率 在2-1-1(2)中给出的真空中的光速 c , 与媒质中的光的相位速度(参照2-1-3(2)) v 之比:

$$n = c / v \quad (2-6)$$

称为媒质的绝对折射率, 媒质2对媒质1的相对折射率 n_{21} , 等于媒质2和媒质1各自的绝对折射率 n_2 和 n_1 之比:

$$n_{21} = n_2 / n_1 \quad (2-7)$$

如果 $n_{21} > 1$, 则媒质2对媒质1来说是光密。

(b) 镜面反射 当光线射到两种媒质界面上时, 一部分光被反射, 另一部分光进入另一媒质中被折射。此时, 入射光线、界面的法线和反射光线在同一平面内, 而且入射角 i (入射光线和法线的夹角) 等于反射角 i' (反射光线和法线的夹角), 这种反射称为镜面反射或正反射(图2-1)。

(c) 斯涅耳定律 在两种媒质界面上, 入射角 i 和折射角 r 之间的关系, 符合斯涅耳定律:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (2-8)$$

式中, n_1 为媒质1中入射光的绝对折射率, n_2 为媒质2中折射光的绝对折射率, n_{21} 为媒质2对媒质1的相对折射率。

(d) 全反射 光从光密媒质1进入光疏媒质2时, 产生折射, 由于 $n_{21} < 1$, 所以折射角 r 一定大于入射角 i , 当 i 逐渐增大到 $r = 90^\circ$ 时的入射角为 i_c , 此时下式成立:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i_c}{\sin 90^\circ} = \sin i_c = n_{21} \quad (2-9)$$

当入射角 i 大于 i_c 时, 折射光不存在, 光在界面被全部反射。这种现象称为全反射, 入射角 i_c 称为全反射的临界角。玻璃对空气的折射率约为1.5, 所以, 全反射的临界角约为 42° 。在全反射中, 入射光束全部被反射, 所以, 在各种光学仪器中使用比反射镜更好的全反射棱镜。

(3) 棱镜 在图2-2所示的棱镜中, 将侧面AB和AC的夹角 α 称为棱镜的顶角。与棱镜的面(AB面、AC面、BC面)垂直的平面称为棱镜的主截面。在主截面内射入AB面的光线DE在E、F点折射以后, 向G方向射出。此时, 光线DE和FG的夹角 δ 称为偏向角。由图可知:

$$\delta = (i_1 - r_1) + (i_2 - r_2) = i_1 + i_2 - (r_1 + r_2) \quad (2-10)$$

又因为

$$\angle AEK = \angle AFK = 90^\circ$$

$$r_1 + r_2 = \alpha$$

所以

$$\delta = i_1 + i_2 - \alpha \quad (2-11)$$

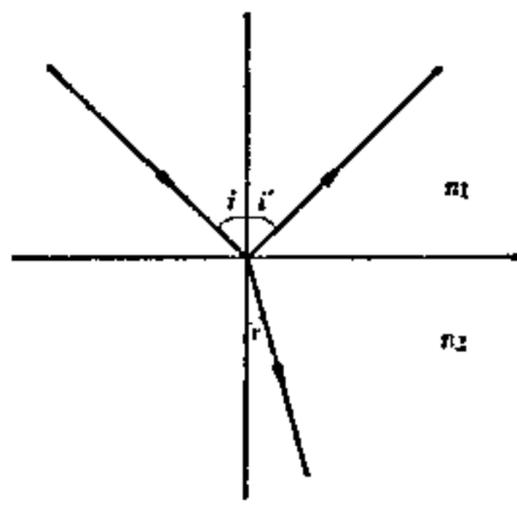


图2-1 界面上的反射与折射

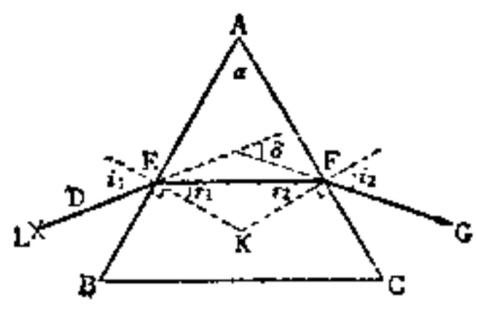


图2-2 棱镜

偏向角 δ 随入射角 i_1 变化，当 $i_1 = i_2$ 时， δ 的值最小。此时光源相对于棱镜的位置（入射线和出射线的位置对于棱镜成对称时——译者）称为最小偏向角位置，设最小偏向角的值为 δ_m ，则棱镜的折射率 n 可用下式求出：

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta_m}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2-12)$$

这个公式，亦可用于准确地测定玻璃的折射率。

(4) 透镜

(a) 透镜的种类 透镜的界面，一般为球面或平面，当为其它面时，则称为非球面透镜。

无限远处的物体，由于透镜而成象，按成象为实象或虚象，可分为会聚透镜或发散透镜。会聚透镜又可分为双凸、平凸、凹凸等三种透镜，发散透镜又可分为双凹、平凹、凸凹等三种透镜，如图 2-3 所示。

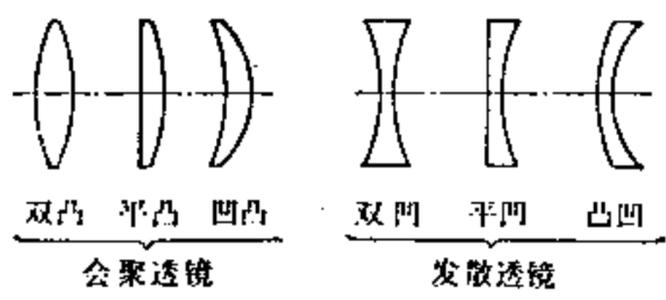


图2-3 球面透镜的种类

(b) 透镜的性质 如图 2-4 所示，当透镜的厚度 d 比两球面的曲率半径 R_1 、 R_2 小得多时，这个透镜称为薄透镜，不是这样的就称为厚透镜。对于近轴光线，薄透镜的焦距 f 可用下式表示：

$$f = \frac{1}{(n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)} \quad (2-13)$$

式中， R_1 和 R_2 的符号规定为^[1]，以各球面的曲率中心看各自球面的顶点（球面与光轴的交点），左侧为正，右侧为负。因而，用上式计算焦距时，双凸透镜的 $f > 0$ ，双凹透镜的 $f < 0$ 。 n 为透镜的折射率。

如图 2-5 所示，从透镜到物和象的距离分别为 s 和 s' ，物和象各自到光轴的高度分别为 y 和 y' ，则有：

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (2-14)$$

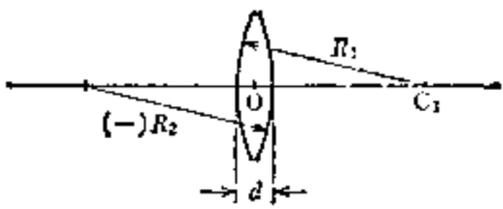


图2-4 透镜的曲率半径

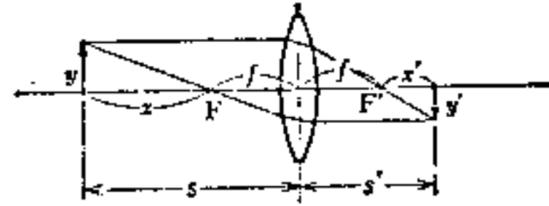


图2-5 透镜成象

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \quad (2-15)$$

式中, m 为象的放大率。另外, 从焦点到物和象的距离分别设为 x 和 x' , 则可得牛顿的透镜公式:

$$x \cdot x' = f^2 \quad (2-16)$$

在厚透镜的情况下, 一般按图 2-6 和图 2-7 所示的 6 个基点来定义它的特性[2, 3]。6 个基点为第一焦点 F_1 、第二焦点 F_2 、第一主点 H_1 、第二主点 H_2 、第一节点 N_1 、第二节点 N_2 。

在图 2-6 中, 当与透镜光轴平行的光线从左侧射入透镜时, 这个入射光线与折射光线的延长线形成的交点面, 称为第二主平面, 这个主平面与光轴的交点 H_2 称为第二主点。

折射光线会聚于光轴上一点 F_2 , 称为第二焦点。

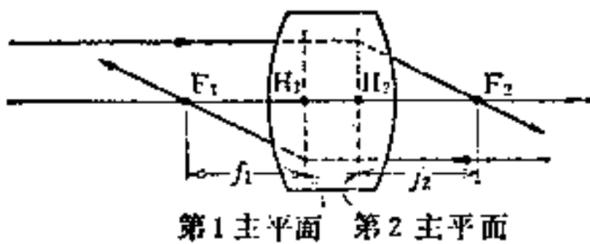


图2-6 厚透镜

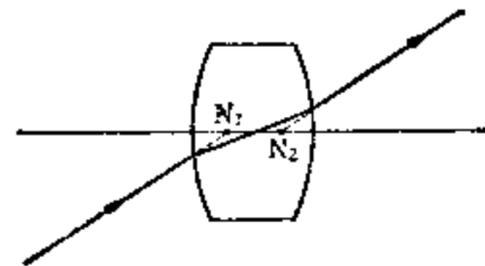


图2-7 厚透镜的节点

与此相对应, 当与透镜光轴平行的光线从右侧射入透镜时, 同样定义为第一主平面、第一主点和第一焦点。 H_1 和 F_1 、 H_2 和 F_2 之间的距离, 各称为焦距 f_1 和 f_2 。

在图 2-7 中, 向第一节点入射的光线, 由于透镜的折射作用, 通过透镜后的发射光线, 与向第二节点最初的入射光线相平行, 此即为节点的定义。在厚透镜的两侧都为空气的情况下, 各节点与各白的主点重合。

在空气中, 厚度为 d 的球面透镜的焦距可用下式表示:

$$f = \frac{1}{(n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{R_1 R_2} \right)} \quad (2-17)$$

式中 R_1 和 R_2 为透镜两面的曲率半径, 该符号的定义与薄透镜相同。

(5) 象差 非近轴光线或非单色光在光学系统中产生的象变形, 称为象差。象差主要分为几何象差和色象差, 几何象差又可分为球面象差、彗形象差、象散、畸变和象面弯曲等所谓的泽德尔 (ザイデル) 五象差。

在相机透镜中, 将消除象散的方法称为消象散, 对于波长为 λ_1 和 λ_2 的不同单色光产生的象差, 称为色象差, 用于消除球面象差的透镜称为消色差透镜。

2-1-3 波动光学

波动光学或称为物理光学,认为光是在空间中传播的一种电磁波。利用波动光学理论,可以解释光的干涉、偏振、色散以及物质的光学性质与它们的关系等。

(1) 电磁波 在电导率 $\sigma = 0$ 的媒质中传播的电磁波,可用下面的麦克斯韦方程记述:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} \mathbf{E} &= \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \text{div} \mathbf{D} = 0 \\ \text{rot} \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \text{div} \mathbf{B} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-18)$$

当物质各向同性时,可用下式表示:

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} \quad (2-19)$$

式中 \mathbf{E} 为电矢量; \mathbf{H} 为磁矢量; \mathbf{D} 为电场强度矢量; \mathbf{B} 为磁感应强度矢量; ϵ_r 为媒质的相对介电常数; μ_r 为媒质的相对导磁率; ϵ_0 为真空中的介电常数; μ_0 为真空中的导磁率。

解上式,求出媒质中电磁波的传播速度为:

$$v = 1 / \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0} \quad (\text{m/s})$$

在真空中,由于 $\epsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$, 所以

$$v = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \sqrt{\frac{4\pi c^2}{10^7} \cdot \frac{10^7}{4\pi}} = c \approx 3 \times 10^8 \quad (\text{m/s})$$

由实验可知,光在真空中的速度是不变的。这个事实符合光的电磁波学说的理论。

如果矢量 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 在直角坐标中是时间 t 的单一函数,这个电磁波就称为平面波。另外,如果 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 在单一频率上谐振,这个电磁波就称为单色波(或单色光)。对于既是单色波又是平面波的电磁波,则称为单色平面波。

如图 2-8 所示,沿 x 轴方向前进的单色平面波,当电矢量 \mathbf{E} 在 yox 平面内振动,而磁矢量 \mathbf{H} 在 zox 平面内振动时,这个单色平面波称为线偏振光, \mathbf{E} 的振动面称为振动面, \mathbf{H} 的振动面称为偏振面。

线偏振光的单色平面波的振幅 a , 用电矢量 \mathbf{E} 的绝对值的最大值 $a = |\mathbf{E}|_{\text{max}}$ 表示。

电磁波(光)的强度 I , 等于在单位时间内通过垂直于波的传播方向的单位面积内的能量,称为坡印廷(Poynting)矢量 $\mathbf{P} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$, 归纳为如下关系:

$$I = |\bar{\mathbf{P}}| = \frac{1}{T} \left| \int_0^T \mathbf{P} dt \right| = \frac{1}{T} \left| \int_0^T [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] dt \right| \quad (2-20)$$

(2) 色散 光在媒质中传播时,它的速度随着光波频率(或波长)的变化而引起变化的现象称为色散。

媒质中电磁波的传播速度,通常是以相速和群速来表示。所谓相速,是指在波动中等相面的移动速度,单色波在折射率为 n 的媒质中传播时,其相速用 $v = c/n$ 表示。实际上,电磁波在时间上和空间上都是有限的,并没有理想的单色波。

这样的波动可以用频率不同的多个单色波的合成波表示,即所说的波群、波连或波束。波群在媒质中传播时,在构成波群的单色波的相速都相同的情况下,波群的形状在传播过程中保持不变;各成分波的相速不同时,波群的波形就产生畸变。波群的波形变化不大时,其传播速度称为群速。

正弦波的相速 v ，一般为频率（或波长 λ ）的函数，群速 v_g 用下式表示〔4〕，

$$v_g = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda} \quad (2-21)$$

式中 v 和 λ 分别为各传送波的相速和波长。

光的色散，决定于媒质的绝对折射率 n 、光的频率或这个光在真空中的波长 $\lambda = c/v$ ，亦即：

$$n = f(\lambda) = g(\omega) \quad (2-22)$$

式中 $\omega = 2\pi\nu$ 。

随着光的频率增加，折射率只单纯增大时称为正常色散，反之，则称为反常色散（图2-9）。

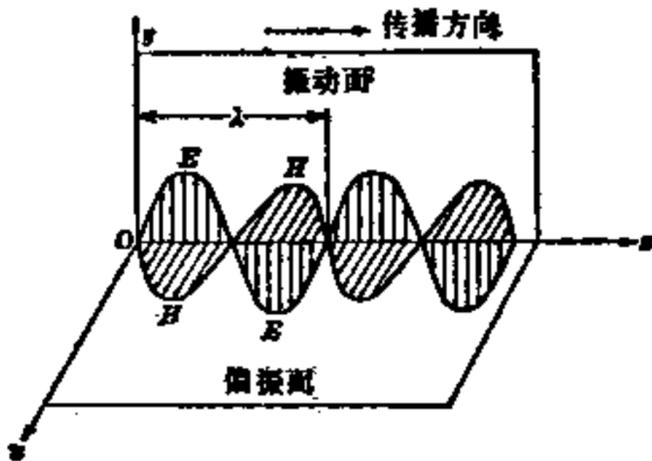


图2-8 平面电磁波

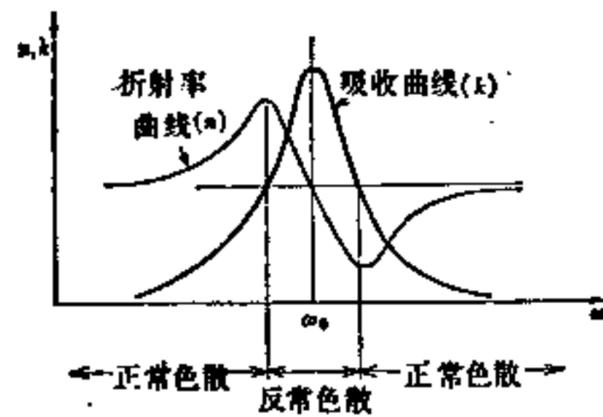


图2-9 色散曲线

光的正常色散，在离开由于媒质而产生的光波的吸收频带的地方产生，而反常色散，则在吸收频带处产生。

在古典电子论中，认为光的色散是由于被束缚的准弹性电子，在外加电场的强制振动下而产生的，而量子论则认为色散是由于分子（原子）中的电子状态间的跃迁而产生的。

(3) 电磁波的辐射 根据古典电气力学，电磁波是由作加速运动的带电粒子辐射而产生的。电荷 q 具有角频率 ω 和振幅 a ，在作线形谐振时，其辐射通量 Φ 为

$$\Phi = \frac{q^2 a^2 \omega^4}{12\pi\epsilon_0 c^3} \quad (2-23)$$

这种线形谐振子的能量，随着电磁波的发射而损耗，振幅逐渐减小的衰减振子，其振幅减小到初期值的 $1/e$ 的时间 τ （称为缓和时间）和在 τ 时间内的波数 N ，可用下式表示：

$$\tau = \frac{12\pi\epsilon_0 m c^3}{q^2 \omega^3} \quad (2-24)$$

$$N = \frac{6\epsilon_0 m c^3}{q^2 \omega^3} \quad (2-25)$$

式中， m 是带电粒子的质量。

原子发光时， $q = e$ ，缓和时间 τ 称为发射原子的平均寿命。将可见光的频率数值代入上式，可得 $\tau \approx 10^{-8}$ (s)， $N \approx 10^7$ 。

(4) 电磁波和物质的相互作用 根据物质结构学说，物质是由带电粒子组成的，当电磁波到达这个物质时，电磁波的高频电磁场，使物质的带电粒子作强制振动。电磁波对等方向性媒质中的电荷 q 的作用力 F 〔5〕，可用下式表示：

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q \left[\frac{\mathbf{v}}{v} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \right] \quad (2-26)$$

式中 \mathbf{v} 为电荷 q 的运动速度, v 为电磁波的相位速度, \mathbf{n} 为电磁波传播方向的单位矢量。通常, 因为 $|\mathbf{v}| \ll v$, 所以上式右边第二项比第一项小。因而, 作用在物质带电粒子上的力 \mathbf{F} , 主要是由电磁波的电场强度 \mathbf{E} 产生的。

(5) **偏振** 电磁波的 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 正交, 而且也 and 电磁波传播方向的单位矢量 \mathbf{n} 正交, 当 \mathbf{E} (或 \mathbf{H}) 的振动面仅为包含 \mathbf{n} 的一个平面时, 称这个电磁波 (光波) 为平面偏振或线偏振。对此, 光波的振动方向在与波的进行方向垂直的平面内, 作急速而且不规则的变化, 其振动强度的时间平均值, 由于方向的变化而产生差异, 称这种光为部分偏振。另外, 虽然振动方向和强度作完全不规则的变化, 但在任一方向上的平均强度相同, 则称这种光为非偏振或自然光。

一般的光波, 可以分解为振动方向互相垂直的二个线偏振光。部分偏振光, 可以认为是二个强度不同的线偏振光的合成。另外, 在光波传播方向的垂直面内的电场或磁场作有规律的振动, 例如 \mathbf{E} 的终点描绘成圆或椭圆, 这种光波分别称为圆偏振光和椭圆偏振光。

自然光在二个透明媒质 (电介质) 的界面以入射角 i 入射时, 在这个界面的反射率 R 可用下式表示:

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)} \right] \quad (2-27)$$

式中, r 为折射角。当 $i = r = 0$ (光垂直入射) 时,

$$R = \left(\frac{n_2 - 1}{n_2 + 1} \right)^2 \quad (2-28)$$

$$\text{式中} \quad n_{2i} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-29)$$

光波的电矢量 \mathbf{E} 的振动面和入射面平行的线偏振光 (P 波), 在界面入射时的反射率 R_p 如下式:

$$R_p = \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)} \quad (2-30)$$

\mathbf{E} 的振动面和入射面垂直的线偏振光 (S 波), 在界面入射时的反射率 R_s 如下式:

$$R_s = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \quad (2-31)$$

入射角 i 在 $0 < i < \pi/2$ 的范围内, $R_s > R_p$, 入射光即使为自然光, 在反射波和折射波中, 也有部分线偏振光。

入射角 i_0 满足 $\tan i_0 = n_2$ 条件时, $R_p = 0$, 反射光成为完全的线偏振光 (仅为 S 波), 称为布儒斯特 (Brewster) 定律, i_0 称为布儒斯特角。在布儒斯特角的情况下, $i_0 + r = \pi/2$, 此时反射光线和折射光线互相垂直。

具有偏振光的材料称为偏振光镜, 偏振光镜也作为检偏镜用作检查偏振光。尼科耳棱镜是典型的偏振光镜, 是将方解石的结晶体加工成一定形状而制成的。

(6) **光的干涉** 相同频率的二个光波的位相差不随时间而变, 这种光称为相干光 (可干涉性)。相干的二个光波叠加的结果, 在二个光波的位相关系上, 光的强度是强处极强, 弱处极弱, 这种现象称为干涉。

现在，设二个光波的振幅和位相分别为 a_1 、 a_2 和 ϕ_1 、 ϕ_2 ，合成波的光的强度 I 可用下式表示：

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2-32)$$

亦即，合成波的强度 I 随着位相差 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 而变化， I 的最大值 $I_{max} = (a_1 + a_2)^2$ 最小值 $I_{min} = (a_1 - a_2)^2$ 。

如果 $a_1 = a_2 = a$ ，则 $I_{min} = 0$ ， $I_{max} = 4a^2$ 。

相干光波在荧光屏上叠加时，出现的明暗条纹称为干涉条纹。

为了实际观测干涉条纹，二个光波在时间上一定要有位相差。早已讲过，只有从同一个光源，在大致相同的时间内发出单色光，这才有可能实现。而实际上，从不同的光源，即使同一光源，也不可能发出纯粹的单色光，所以观察不到干涉条纹。干涉的补充光称为不相干光。

(7) 衍射 在几何光学中，光是作为直线传播的，严密观测光的传播，可以发现在小障碍物的后方有许多光圈，这称为光的衍射。

衍射理论非常复杂，通常采用弗朗荷费衍射和非涅耳衍射。弗朗荷费衍射，光源和观测点到障碍物的距离无限大；非涅耳衍射，光源和观测点到障碍物的距离为有限量。

半径为 a 的圆形开孔的弗朗荷费衍射，其产生的衍射条纹的强度分布可用下式表示：

$$M = M_0 \left[\frac{2J_1(ka\theta)}{ka\theta} \right]^2 \quad (2-33)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ ， θ 是与圆形开孔中心法线的夹角， $J_1(ka\theta)$ 是一次贝塞尔函数。

这个衍射条纹，即所谓的虚 (Airy) 象，其同心圆状的明暗条纹的第一个暗部的方向角 θ ，可用 $\sin \theta \approx \theta = 0.61 \lambda / a$ 表示。

图2-10(a)所示的宽 $2a$ 、高 $2b$ 的狭缝，在距离为 f 的点产生的弗朗荷费衍射的光强，如下式所示：

$$M = M_0 \left(\frac{\sin kpa}{kpa} \right)^2 \left(\frac{\sin kpb}{kpb} \right)^2 \quad (2-34)$$

式中 p 和 q 表示衍射光的方向的参量。上式右边的括弧内，全用 $(\sin x/x)^2$ 的形式表示，其函数形状如图2-10(b)。

衍射光栅，是用大量等宽狭缝按等间距组合而成。

2-1-4 量子光学

量子光学理论认为光的辐射、光和物质的相互作用，都是光子的振动。

(1) 光的吸收 光的吸收是指光波在光学性能均匀的媒质中传播时，光波的能量，由于使物质的内能发生变化和变换成物质发光的能量，因而减少的现象。

在古典物理学中，根据朗伯-比尔定律，用下式表示光的吸收：

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (2-35)$$

式中 d 是媒质的厚度， I_0 和 I 分别为厚度为 d 的媒质的入射光强和透射光强， α 是媒质的吸收系数。

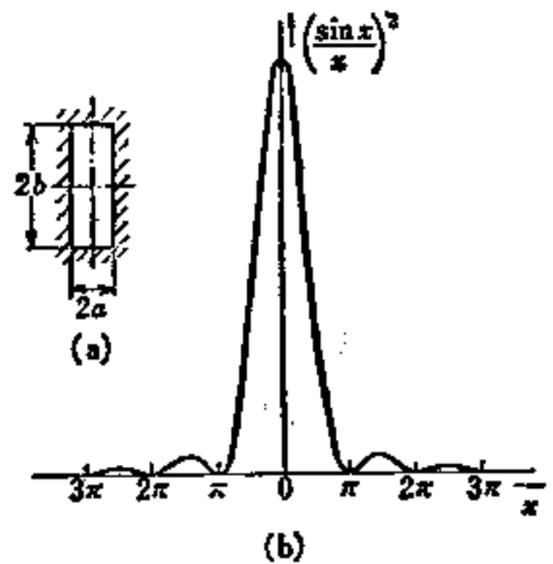


图2-10 矩形狭缝和衍射光强分布曲线

对于用非吸收性的媒质溶液稀释吸收物质的溶液，比尔定律即

$$\alpha = Ac \tag{2-36}$$

成立，代入上面的朗伯定律，可得：

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \tag{2-37}$$

上式称为朗伯-比尔定律。式中， c 是溶质的浓度， A 是依存于溶质和光波波长而与浓度无关的量，称为吸光系数。

(2) 光的散射 光在电子、原子等粒子或光学性质不均匀的媒质中传播，它的传播方向发生变化的现象，称为光的散射。按照古典理论的解释，原子中被束缚的电子，由于光波的电磁场的作用，而产生强制振动所发出的二次光，称为散射光。这个散射光的波长与入射光的波长相同。按照量子论的解释，处于量子状态的电子，在作二次迁移时产生散射，迁移的最初状态和最终状态相同时，与古典理论的散射相对应，散射光和入射光的波长的位相一致，即所谓的相干散射。当迁移的最初状态和最终状态不同时，散射光和入射光的波长亦不相同，成为不相干散射光。例如喇曼散射。

比光波波长小的微粒构成的不均匀悬浊液（含有微粒的烟雾、乳浊液、胶体溶液等）的散射，称为瑞利散射或泰托尔现象。在瑞利散射中，散射光的强度，与入射光波长的四次方成反比，称为瑞利散射定律。

(3) 量子跃迁 原子、分子等，一般都具有几个能级，现在分析其中的 E_n 和 E_m 二个能级（设 $E_n > E_m$ ）。设各能级单位体积中的数分别为 N_n 、 N_m ，原子系如在热平衡状态下， N_n 、 N_m 服从玻耳兹曼分布，它们的比为：

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{g_n}{g_m} e^{-\frac{(E_n - E_m)}{kT}} = \frac{g_n}{g_m} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \tag{2-38}$$

式中 g_m 、 g_n 是在能级 E_m 、 E_n 中的衰减度（全指统计的重复率）； T 是绝对温度； k 是玻耳兹曼常数， $k = 1.38053 \times 10^{-23} (\text{J/K})$ 。

根据这个公式，低能级的 N_m 常比高能级的 N_n 多。

一般情况下， E_m 能级的原子向 E_n 能级跃迁时，或反之， E_n 的原子向 E_m 跃迁时，波耳的振动数条件为：

$$E_n - E_m = h\nu \tag{2-39}$$

因而引起电磁波的吸收或发射。产生电磁波的吸收和发射的跃迁，称为辐射跃迁，不产生电磁波的吸收和发射的跃迁，称为非辐射跃迁。

E_n 能级的一个原子自然向 E_m 能级跃迁，此时如发光，这种光称为自然辐射，这种跃迁的几率称为自然跃迁几率（或自发跃迁几率），用 A_{nm} 表示。

自然跃迁几率为 A_{nm} ，则 E_n 能级的原子的寿命为 τ ， $\tau = 1/A_{nm}$ ，在光波带， $\tau = 10^{-7} \sim 10^{-9} (\text{s})$ 。

根据自然跃迁，自然辐射的过程如图 2-11(a) 所示，在其它频率下，具有辐射能量密度 $u(\nu)$ 的辐射（光波的）与原子系产生相互作用，如图 2-11(b)、(c) 所示，产生从 E_m 向 E_n 跃迁，或反之，从 E_n 向 E_m 跃迁。这种跃迁，如果都称为感应跃迁（亦称激发跃迁），则在图

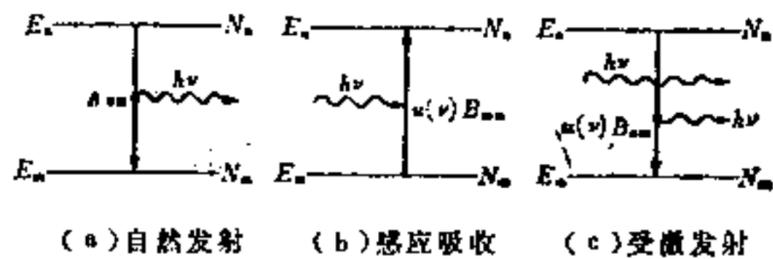


图 2-11 辐射的发射和吸收

2-11(b)所示过程中, 由于从辐射场产生原子系能量的吸收, 故这个过程称为感应吸收, 而在图2-11(c)所示的过程中, 由于原子系的辐射被发射, 故称为受激发射。

爱因斯坦将感应吸收和受激发射的几率分别定为 $B_{mn}u(\nu)$ 和 $B_{nm}u(\nu)$, B_{mn} 、 B_{nm} 即称为爱因斯坦的感应跃迁系数。

图2-11的双能级原子系, 不产生辐射能量密度 $u(\nu)$ 的辐射和相互作用, 在温度 T 时, 处于平衡状态, 在单位时间内, 从 E_n 能级向 E_m 跃迁的单位体积的原子数为 $N_n[A_{nm} + B_{nm}u(\nu)]$, 反之, 从 E_m 向 E_n 跃迁的原子数为 $N_m B_{mn}u(\nu)$ 。因为原子系处于平衡状态, 向两方面跃迁的原子数相等, 故下面的关系式成立:

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{B_{mn}u(\nu)}{A_{nm} + B_{nm}u(\nu)} \quad (2-40)$$

关于 N_n 、 N_m , 因为前述的玻耳兹曼分布的关系式成立, 由式 (2-38)、(2-40) 可用下式求出 $u(\nu)$ 。

$$u(\nu) = \frac{A_{nm}/B_{nm}}{\left(\frac{g_n B_{mn}}{g_m B_{nm}}\right) e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2-41)$$

$u(\nu)$ 为热辐射的辐射能量密度, 根据普朗克辐射公式:

$$u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2-42)$$

从式 (2-41)、(2-42) 可得:

$$A_{nm} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot B_{nm} \quad (2-43)$$

$$g_n B_{mn} = g_m B_{nm} \quad (2-44)$$

以波长代替频率 (振动数) 表示辐射能量密度 $u(\nu)$, 可得到后面的表示式子。

现在, 以 $\left(\nu + \frac{1}{2}d\nu\right)$ 和 $\left(\nu - \frac{1}{2}d\nu\right)$ 的频率在限定的频带内的辐射能量作为 $u(\nu)d\nu$, 对应于这些极限频率的波长如分别为 $\left(\lambda - \frac{1}{2}d\lambda\right)$ 和 $\left(\lambda + \frac{1}{2}d\lambda\right)$, 则

$$u(\nu)d\nu = -u(\lambda)d\lambda \quad (2-45)$$

$$\text{又} \quad \lambda\nu = c \quad (2-46)$$

对上式微分

$$\nu d\lambda + \lambda d\nu = 0 \quad (2-47)$$

将式 (2-47) 代入式 (2-42) 可得:

$$u(\lambda) = \frac{\nu}{\lambda} u(\nu) = \frac{8\pi}{\lambda^5} hc (e^{hc/\lambda kT} - 1)^{-1} \quad (2-48)$$

如果用一种方法, 使原子系的 N_n 、 N_m 与玻耳兹曼分布的关系 ($N_n > N_m$) 相反, 处于 $N_n < N_m$ 的状态, 此时, 受激辐射超过吸收, 外加辐射增强, 就可以达到所谓的光放大的目的。将这种分布称为反转分布状态。一般情况下, 如有放大作用, 再施以适当的反馈, 即可

制成振荡器。应用于光学方面，即为激光。

图2-12是激光的基本结构图，在激光媒质的外侧，设置半透明镜 M_1 和 M_2 ，由此使光波产生多重反射，并在激光媒质中传播。这种装置称为光谐振腔。

激光发振的条件〔6〕，要求光波在谐振腔内往复一次返回到出发点时，光波的振幅和相位，必须与发出时光波的振幅和相位相同。

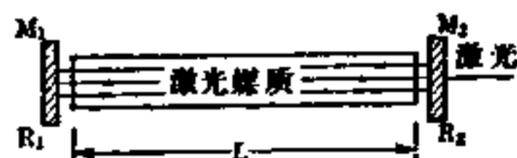


图2-12 激光谐振腔

2-2 原子、分子和固体光谱

2-2-1 原子光谱

关于原子光谱的知识，是籍以了解物质发光特性的最有力的手段。

原子的原子核具有的正电荷数，等于原子的序号 Z ，在核的周围有 Z 个电子围绕着核旋转。电子轨道从近核内侧开始，顺序称为 K 、 L 、 M 、……等。亦可用正整数 $n=1, 2, 3, \dots$ 表示，分别与 K 、 L 、 M 、……相对应，在各个轨道上分配的电子数等于 $2n^2$ 个（泡利不相容原理〔7〕）。当最外层受约束力较小的一个电子，向更外层轨道跃迁时，称为原子处于激发态。激发所需要的能量（ E_e ）用电子伏为单位表示，称为激发电位（ V_e ）。二个以上的电子也可能被激发，仅原子量轻的元素较难。一个或几个以上的电子完全脱离原子，称为电离，失去电子的原子称为离子。失去一个电子的原子称为1价离子（用 A^+ 表示），根据失去的电子数，分别称为2价、3价、……离子（ A^{++} 、 A^{+++} 、……）。电离所需能量，与前相同，称为电离电位（ V_i ）。当轨道充满电子时，电离电位就高，相反，只有一个溢出电子时，电离电位就低。因而，电离电位按原子序号排列，呈周期性的高低变化（图2-13）。

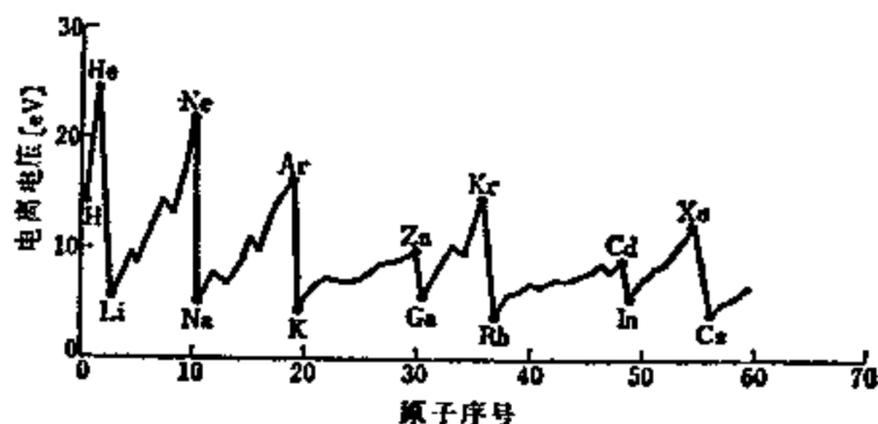


图2-13 原子序号和电离电位

电子轨道如设想的那样，按正整数 n 的规定排列，原子内电子的能量的跃迁呈不连续状态。 n 称为主量子数，按粗分类，是表示原子能态的重要量子数。按细分类，又有合成轨道角动量 L ，其不连续状态分为 S 、 P 、 D 、 F 、……等，对应于方位量子数 $L=0, 1, 2, 3, \dots$ ，等。按更细分类，又有电子的合成自转角动量 S （自旋量子数 S ），这样，电子的总角动量 J （内部量子数 J ）可为 $J=L+S$ 。这种分类方法称为卢歇尔（Russell）—多区域型（法）〔8〕。

许多原子都服从于这种形式。根据图2-14那样的分类，用图表示汞的能态，称为能级图，或称为格洛托利亚图。图中 6^1S_0 、 7^3P_2 等是用能项符号表示各能级的能态，最前面的数字表示 n ，中间的字母表示 L ，右下角的数字表示 J 。 S 不能直接表示，但根据 $r=2S+1$ 的关系，可用左肩的数字表示 r 。 r 称为多重度，用以表示能项的更细致的分裂数。除以上合理的标记法以外，还有培申标记法，但一般不常用。另外，由于标记法简单，在稀有气体激光的激发能级中被很好地采用。

外层电子在能项间跃迁时产生吸收和辐射，表现出线光谱。将它的振动数作为 ν ，则光量的能量 $h\nu$ 为：

$$h\nu = \Delta E \quad (\text{波阿的振动数条件}) \quad (2-49)$$

ΔE 是能项间的能差。

能项间的结合服从于选择定则，根据这个定则，仅在允许的能项间进行跃迁。选择定则中重要的内容是 $\Delta n = 0, 1, 2, 3, \dots$; $\Delta L = 0, \pm 1$; $\Delta J = 0, \pm 1$ 。关于 S ，当 $\Delta S = 0$ ，重原子对这个定律屡有违反，无论是从理论上或从实验中，都可证明。明显的例子如汞，由于三重项和一重项结合 $6^1S_0 - 6^3P_1$ ，而辐射出 253.7nm 。但是，与一重项间的结合 $6^1S_0 - 6^1P_1$ ，辐射出 185nm 相比，要远为衰弱。

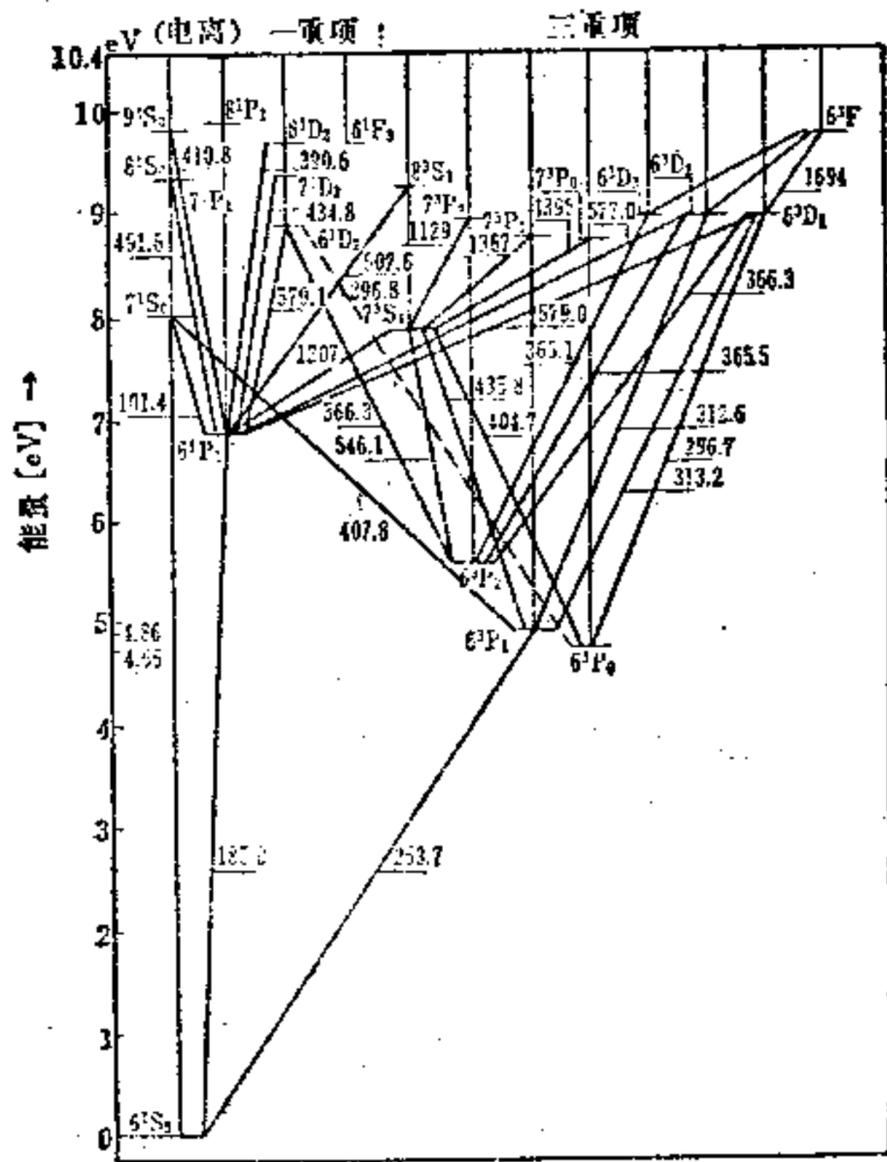


图2-11 汞原子的能级和主要谱线

用量子力学的电气偶极子（跃迁力矩） $P^{ab} = eX^{ab} \cdot \exp[-2\pi i(E_a - E_b)t/h]$ ，表示从 a 至 b 的时间内变化的原子系的状态，根据古典电磁学计算辐射强度的公式，由比例导出^[9]：

$$A^{ab} = 64e^2\pi^4\nu^3 |X^{ab}|^2 / 3hc^2 \quad (2-50)$$

A^{ab} 称为对 $a \rightarrow b$ 的自发跃迁几率。 X^{ab} 是跃迁矩阵要素，决定于关于两状态的固有函数。

$A^{aa} = 0$ ，即表示在选择定则中的跃迁禁制。对于以下的能级 A 为零，能级寿命极长，称之为亚稳能级，这在气体激光中有很重要的作用。光的吸收是对应于逆程跃进 $b \rightarrow a$ 。在热平衡状态下，跃迁几率 B^{ba} 为^[10]：

$$B^{ba} = c^3 g_a A^{ab} / 8\pi h \nu_{ab}^3 g_b \quad (2-51)$$

g_a 、 g_b 为各自能级的统计重复率（衰减率）。

光谱线的宽度是有限的^[11]。自然幅度随着能级自身的扩展而产生，多普勒宽度是由于发光原子的热运动而对观测者产生远近不同的发射。此外，发光原子与其它原子碰撞而产生碰撞宽度，由于邻近原子的电位影响，而产生压力宽度。

2-2-2 分子光谱

分子的能量状态，近似地分解为电子轨道运动 (E_e)、原子核间距离的振动 (E_v)、围绕分子轴的旋转 (E_r)。状态间的能量差顺序为 $\delta E_e > \delta E_v > \delta E_r$ 。对于一个电子状态中的各种各样的振动，以及包括旋转状态，由于它们相互之间的跃迁产生的分子光谱，具有极其复杂的结构，用分解低能分光镜观测，可以看到带状，称为带状光谱。图2-15为对应于双原子的

二个电子状态的核间电位曲线，从图中可以直观地了解电子跃迁以及相对应的振动状态的变化。

与原子的情况相同，根据总体轨道角动量 Λ ，区分为 Σ 、 Π 、 Φ 等状态，根据全自旋 S 决定于多重度 $r = 2S + 1$ 。选择定则也同样成立^[12]。

2-2-3 固体的电子结构

固体（结晶）内电子的量子状态全呈离散的结构，与单独的原子不同，它的能级具有宽度，几乎存在连续的量子状态，这称之为带状结构。图 2-16 分别是 (a) 绝缘体、(b) 金属、(c)、(d) 半导体结构。各能量状态的电子分配，服从于费密分布。假定在绝对零度下，电子从最低能级开始，依次充满，此时，最高能带是否充满，决定于这个晶体的电气和光学振动。

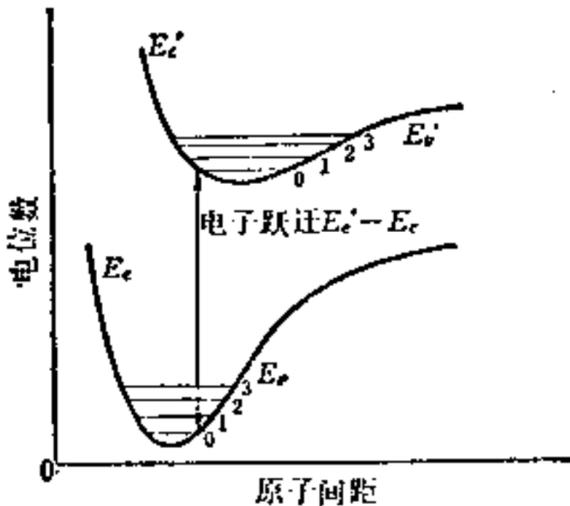


图2-15 双原子分子的原子核间的电位曲线

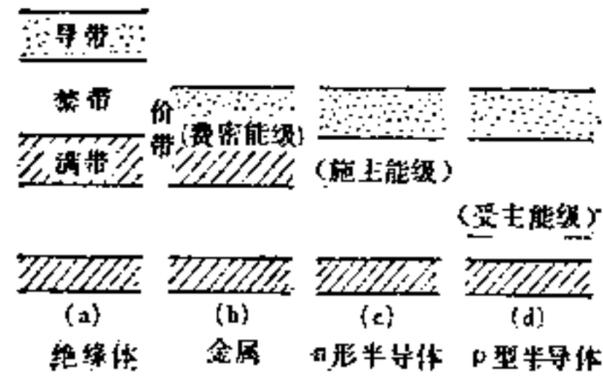


图2-16 固体的能带结构

在图2-16 (a) 中，最高状态由于已经充满电子（满带），只有从外界施加比较大的能量，才能超越禁带而激发到导带。与此相对应，由于光的照射而成为导通状态的光电现象。绝缘体在多数情况下能透过可见光，这可以从电子结构上来理解，在图2-16 (b) 中，电子仅能充满中途的费密能级，从外部吸收连续能量。金属不能透过可见光，但在常温下却有很好的导电性能。加热到高温时，所辐射的光能的分布，与上述带状结构有密切的关系。在晶体内掺入杂质，在禁带的中途就会产生新的能级（杂质能级），此外可接收电子，或向导带输送电子，所以，即使只给较小的能量，都可能导电。前者称为 P 型半导体，后者称为 n 型半导体。杂质能级在荧光体和磷光体的发光中，起着主要的作用。

2-3 热 辐 射

辐射体在绝对零度（-273.16°C）以上时，产生决定于其表面温度和状态的辐射通量。当温度较低时，辐射波长较长的红外线，当温度在 600~700°C 时，辐射红外线和红光，当温度更高时，则发出可见光。这称之为热辐射。白炽灯等就是利用通电加热灯丝，使其产生热辐射。

2-3-1 热辐射的诸定律

(1) 完全辐射体（黑体） 物体空腔内部的温度分布如图 2-17 所示，全都是完全辐射体，从那个小窗口辐射热能，称为完全辐射（黑体辐射）。下面叙述关于黑体辐射的诸定律。

(2) 普朗克辐射定律 普朗克引入能量的量子化概念, 在进行能量的释放和吸收时, 以普朗克常数和辐射的频率数相乘作为量子单位。在能量交换时, 以量子论为基础, 将从完全辐射体(黑体)的表面辐射出的光谱辐射发射度作为波长和温度的函数, 导出普朗克的辐射定律。

普朗克公式, 可由 2-1-4 节的公式 (2-48) 导出。从能量密度 $u(\lambda, T)$ 的空腔表面的单位面积 (m^2) 上, 以光速 c (m/s) 辐射的能量中, 在与辐射面垂直的方向上, 每单位立体角的单位波长 (m) 的光谱辐射能量, 即光谱辐射亮度 $L_e(\lambda, T)$:

$$L_e(\lambda, T) = (c/4\pi) u(\lambda, T) \quad (W/sr \cdot m^2) \quad (2-52)$$

因为空腔表面是完全的漫射面, 这个单位表面积的光谱辐射出度 $M_e(\lambda, T)$ 为:

$$M_e(\lambda, T) = \pi L_e(\lambda, T) = \frac{c}{4} u(\lambda, T) \quad (W/m^2) \quad (2-53)$$

将式 (2-48) 代入上式, 得

$$M_e(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{\lambda kT} - 1} \quad (W/m^2) \quad (2-54)$$

根据 c_1 为普朗克第一常数

$$c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^{-16} \quad (W \cdot m^2)$$

c_2 为普朗克第二常数

$$c_2 = ch/k = 1.4338 \times 10^{-2} \quad (m \cdot K)$$

上式可写为

$$M_e(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e \frac{c_2}{\lambda T} - 1} \quad (W/m^2) \quad (2-55)$$

图 2-18 表示完全辐射体在不同绝对温度下辐射的光谱辐射出度的分布曲线, 与在实验中所观测结果相一致。



图2-17 空腔型黑体的形状

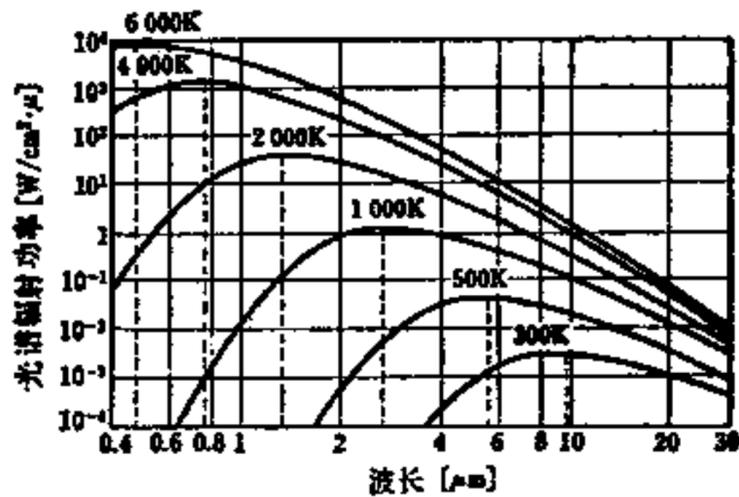


图2-18 不同绝对温度下完全辐射体的光谱分布

(3) 维恩辐射定律 维恩在普朗克之前, 对于在可见范围, 而且辐射体的温度又很高的情况, 提出了实用的近似公式:

$$M_e(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2-56)$$

如果 $\lambda T < 0.002 \text{ m} \cdot \text{K}$, 则精度可达 0.1%。

(4) **维恩位移定律** 式(2-55)的光谱辐射出度 $M_e(\lambda, T)$ 被波长 λ 微分, 令微分系数为零, 即可获得 $M_e(\lambda, T)$ 为极大时的波长 λ_m , 下面的公式(2-57)成立。这就是维恩位移定律。

$$\lambda_m T = \frac{c_2}{4.9651} = 2897.8 \quad (\mu\text{m} \cdot \text{K}) \quad (2-57)$$

随着绝对温度增高, $M_e(\lambda, T)$ 的最高值向短波方向移动, 将式(2-57)的 λ_m 代入式(2-55), 得到:

$$M_{e,\lambda_m} = 1.3T^5 \times 10^{-5} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^5)] \quad (2-58)$$

(5) **斯忒藩-玻耳兹曼定律** 从完全辐射体的单位表面积, 向半个空间辐射的辐射出度 $M_e(T)$, 可通过对光谱辐射出度 $M_e(\lambda, T)$ 从 $\lambda = 0 \sim \infty$ 进行积分而得到, 与完全辐射体的绝对温度的四次方成比例, 即

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} M_e(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2-59)$$

式中 σ 与斯忒藩-玻耳兹曼常数:

$$\sigma = 5.6696 \times 10^{-8} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$$

2-3-2 辐射率

从实际的热辐射体产生的辐射, 比同温度的黑体的辐射要小。热辐射体的辐射与同温度的黑体的辐射之比, 称为这个辐射体的辐射率, 辐射率随辐射体的表面状态和温度、波长而变。

(1) **光谱辐射率 $\epsilon(\lambda, T)$** 热辐射体的光谱辐射出度 $M'_e(\lambda)$, 与同温度的黑体的光谱辐射出度 $M_e(\lambda, T)$ 之比, 称为光谱辐射率 $\epsilon(\lambda, T)$ 。

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{M'_e(\lambda, T)}{M_e(\lambda, T)} \quad (2-60)$$

如果辐射体的光谱辐射率是一个不随波长而变的常数 ϵ_e , 这个辐射体就称为灰体。维恩位移定律同样适用于灰体的热辐射, 在式(2-55)和式(2-59)的右边乘以 ϵ_e 即可。光谱辐射率随波长而变的热辐射体很多, 这样的辐射体都称为选择性辐射体。

以钨的光谱辐射率^[13]为例, 如图 2-19 所示。

(2) **辐射率 (总辐射率) $\epsilon(T)$** 热辐射体的辐射出度 $M'_e(T)$ 与同温度的黑体的辐射出度 $M_e(T)$ 之比, 称为辐射率, 用下式表示:

$$\epsilon(T) = \frac{M'_e(T)}{M_e(T)} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon(\lambda, T) M_e(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_e(\lambda, T) d\lambda} \quad (2-61)$$

图 2-20 表示各种材料的辐射率^[14, 15]。材料表面经过研磨而光泽, 则辐射率低, 表面氧化、形状粗糙, 则辐射率高。

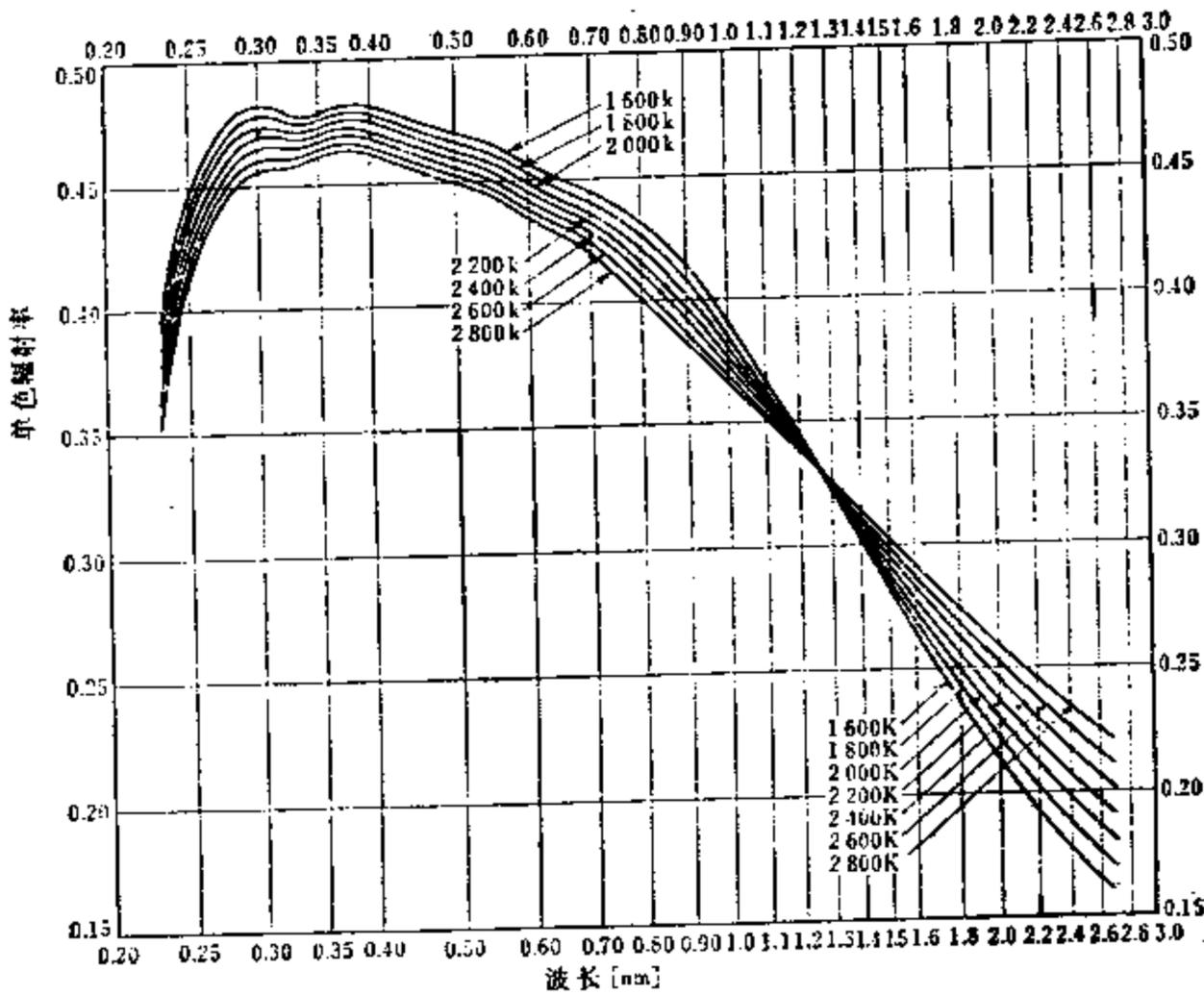


图2-19 钨的光谱辐射率

(3) 基尔霍夫定律 任一辐射体的光谱辐射率，与其同温度的光谱吸收率相等。

$$\epsilon(\lambda) = a(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad (2-62)$$

式中 $a(\lambda)$ ——光谱吸收率；
 $\rho(\lambda)$ ——光谱反射率。

在全辐射中，这个公式也近似成立。

2-3-3 等效温度

(1) 辐射温度 真实温度为 T 的辐射体的辐射出度，与温度为 T_r 的黑体的辐射出度相等时，称 T_r 为这个辐射体的辐射温度。

此时，这个辐射体的辐射温度和真实温度的关系如下：

$$\sigma(T_r^4 - T_c^4) = \epsilon(T) \sigma(T^4 - T_c^4) \quad (2-63)$$

式中 T_r 为辐射体的辐射温度，系用黑体校正过的辐射高温计的指示温度 (K)； T 为辐射体的真实温度 (K)； T_c 为辐射高温计测量端部的绝对温度 (K)。

$\epsilon(T)$ 是辐射体的辐射率，如辐射高温计采用水晶透镜，约能透过 $4 \mu\text{m}$ 的红外线，如采用玻璃，约能透过 $3 \mu\text{m}$ 的红外线，所以，按严格定义， $\epsilon(T)$ 应是在透镜能透过波长范围内的辐射率。

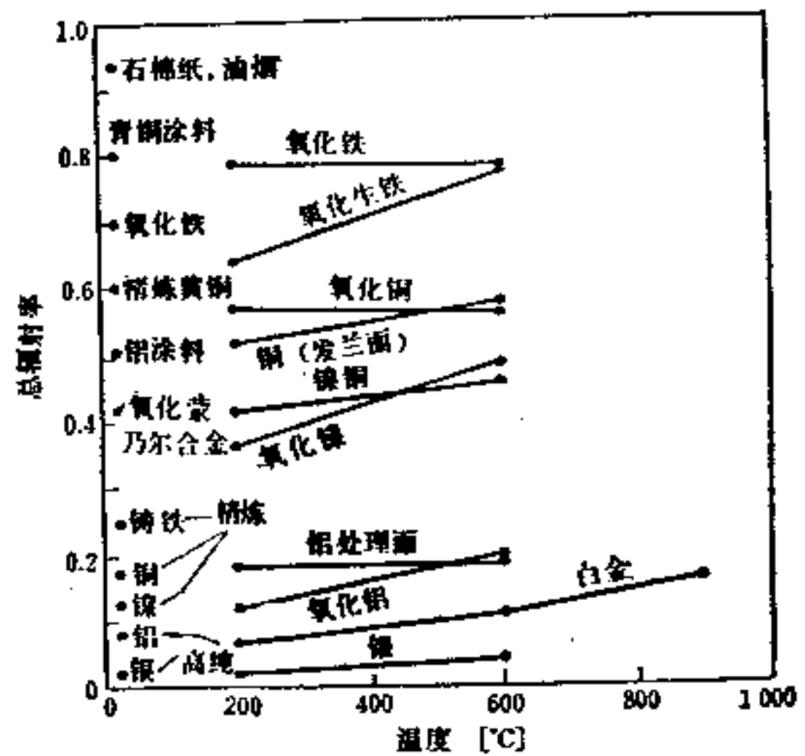


图2-20 各种材料在不同温度下的总辐射率

真实温度由下式求取:

$$T = \sqrt[4]{\frac{T_r^4 - T_0^4 [1 - \epsilon(T)]}{\epsilon(T)}} \approx \frac{T_r}{\sqrt[4]{\epsilon(T)}} \quad (\text{K}) \quad (2-64)$$

(2) **亮度温度** 在波长为 λ 的光谱辐射中, 真实温度为 T 的辐射体的辐射亮度, 与温度为 T_b 的黑体的辐射亮度相等时, 称 T_b 为该辐射体的亮度温度。用光学高温计测定亮度温度时采用的波长为 $0.65\mu\text{m}$ 。

辐射体的亮度温度和真实温度的关系如下:

$$\frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_b}\right) - 1 \right]} = \epsilon(\lambda, T) \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2-65)$$

式中 T_b 为辐射体的亮度温度, 系与黑体或光学高温计用标准灯校正过的光学高温计的指示温度 (K); T 为辐射体的真实温度 (K)。

按下式可求出真实温度:

$$\ln \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right] \approx \ln \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)$$

$$\ln \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right] = \ln \epsilon(\lambda, T) + \frac{c_2}{\lambda T}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon(\lambda, T) = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda}{c_2} 2.303 \lg \epsilon(\lambda, T) \quad (2-66)$$

使用上述各公式, 根据测定的辐射温度和亮度温度求得的真实温度, 要根据辐射率进行修正。通常这些温度的关系如下:

$$T > T_r > T_b$$

(3) **色温和光谱分布温度** 当辐射的色度, 与温度为 T_c 的黑体的色度相等或接近时, 称 T_c 为这个辐射的色温。

当辐射的可见范围内的相对光谱分布, 与温度为 T_s 的黑体的光谱分布相同或接近时, 称 T_s 为该辐射的光谱分布温度。

表 2-1 例举各种发光体的色温。

色温或光谱分布温度与真实温度的关系, 在波长减短、光谱辐射率相对提高的情况下, T_c 或 $T_s > T$ 。钨灯丝就符合这种情况。

表2-1 发光体的色温

发 光 体	色 温 (K)	发 光 体	色 温 (K)
蓝天光	11000~20000	照相用灯	3200
全阴天空光	6500	摄影卤钨灯	3050~3200
日光色荧光灯	6500	一般卤钨灯	3000
白色荧光灯	4200	充气白炽灯	2850
暖白色荧光灯	3500(3000)	红外线灯	2500
荧光汞灯	4100	高压钠灯	2000~2100
金属卤化物灯	3800~6000	蜡烛火焰	2000

2-4 发 光

2-4-1 放电发光

在放电中，激发原子或分子的运动过程可分类为：(1)电子碰撞；(2)与亚稳原子的第二类碰撞；(3)共振线吸收；(4)热激发。关于跃迁，原子和分子产生的光谱性质也不同。

跃迁能级如为连续状态，则当然辐射出连续光谱。关于激发和辐射，哪个过程为主，则随放电形式和介质的种类而不同。下面说明气体和介质的放电形式。

(1) 低压气体放电 以 $10^{-2} \sim 10^2$ 托压力下，在冷阴极间产生直流放电的情况为例说明之。由于原子间的相互作用较少，所以可得到很强的线光谱。电极间的电位分布和发光的概略关系，如图 2-21 所示。在放电电路中，亮度最高的部分为负辉光区，这是由于在高阴极位降下被加速的、能量分布比较集中的电子的轰击而产生的发光。因而，由高能级来的光谱线表现得相对的强，另外，含有离子线，所以呈现所谓的火花形。

高速电子从负辉光区的阴极侧向阳极方向运动时，被急剧地加热，从这部分发射出的光的光谱强度分布，由于位置不同而不同。法拉第暗区，是由于随着电子失去能量而形成的负的空间电荷区域，此处激发和电离都很少。因此发出的光也最弱，但未必是没有光，可以观察到由于电子和离子复合而产生的微弱的连续光谱。反之，当离子的纯度很高时，会充满强的深红色的 640.2nm 的光，这可能是由于亚稳能级 $1S_0$ 以下的能级 $1S_0-2P_1$ 的跃迁而产生的一种共振荧光。

在正柱区，电子能量达到稳定状态，近似符合麦克斯韦分布。将这个特性温度称为电子温度 T_e 。各种能级的激发与 $nN \int_{\epsilon}^{\infty} \pi Q^2 \cdot \epsilon \cdot f d\epsilon$ 成比例。式中， n 、 N 分别为电子密度和下一能级的原子密度， Q 为激发断面积， $f(\epsilon)$ 为麦克斯韦分布。 T_e 决定于气体的种类、压力、放电管的尺寸，在低压放电中，通常为 $10^4 \sim 10^5 \text{K}$ 。所以，正柱区的发光光谱，具有激发能量越低能级越强的倾向。

(2) 高压气体放电 令气体温度为 T_g ，电子和原子的质量分别为 m 、 M ，电子的平均自由程为 λ ，玻耳兹曼常数为 k ，正柱区内的电场强度为 E ，它们具有下面的关系式^[16]：

$$T_e(T_e - T_g) = 3(Ee\lambda)^2 M \sqrt{\pi} / 64k^2 m \quad (2-67)$$

很明显，气压上升， $Ee\lambda$ 值下降， T_e 和 T_g 逐渐接近（图 2-22）^[17]。 $T_e \approx T_g$ 表示近似的处于热平衡状态，各激发能级密度 N_i ，服从于玻耳兹曼分布：

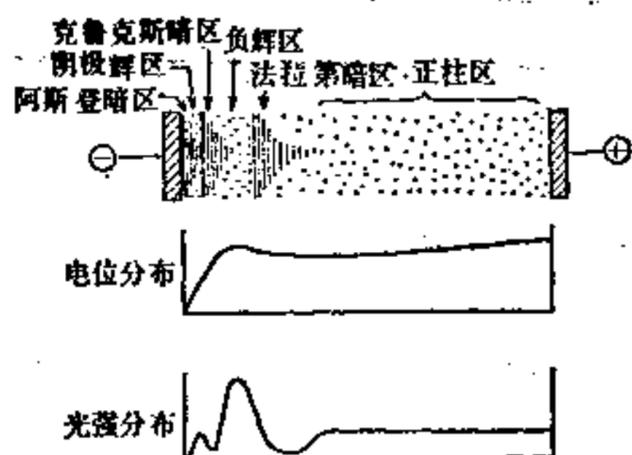


图2-21 辉光区放电各部的电位分布和发光

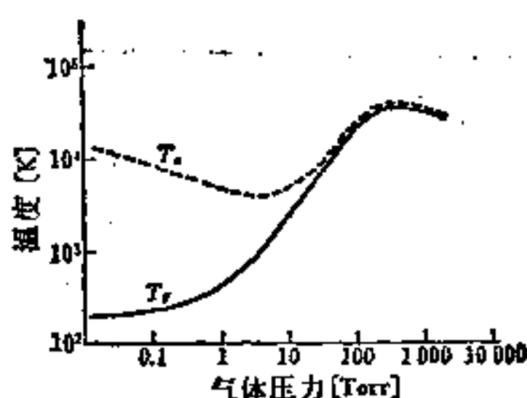


图2-22 气体压力与特性温度

$$N_k = N_0 (g_k/g_0) \cdot \exp(-eV_k/kT) \quad (2-68)$$

式中, N_0 为基态能级的原子密度; g_k 、 g_0 为各能级的统计重复率; V_k 为 k -能级的激发电位。光谱线的强度很容易从已知的跃迁几率求取。或反之, 也可以通过已知光谱线的强度计算温度。

以最普通的高压汞灯为例, 由于在 $7^3S_1(7.7\text{eV})-6^3P_1$ 间跃迁, 546.1nm 的输出为 $3.6 \times 10^{-10}\text{J}$, 如果这个跃迁几率为 10^9 , 则 $T \approx 5000\text{K}$ 。高压汞灯的工作压力在二个大气压时, 其光谱线的形状与低压汞灯的显著不同^[18], 即: (1) 不仅线幅宽, 而且波长向长的方向或短的方向移动。这个倾向随着压力增高而更加显著。线幅的增大, 是由于自我吸收, 其它原子和电子、离子等的碰撞, 压力效应, 多普勒效应等所致。偏移受发光原子周围的原子、电子、离子等电位的影响, 因为激发能级高会产生若干变化。由于能级的影响会有相当差异, 例如, 下面同一能级的两根谱线, $6^1P_1-7^1S_0$ 间的 1014nm 和 $6^3P_1-6^3D_1$ 间的 577nm 的偏移, 表示了完全不同的电流依存性。这是由于 6^3D_1 能级与 7^1S_0 能级相比, 电子或离子的影响要大得多的缘故。(2) 增加了连续光谱。线光谱的相对强度, 随着压力和电流密度的增加而加强。连续光谱部分, 是由于电子和离子的复合而产生的辐射, 这部分当然同时随着电流密度的增加而加强。另外, 线光谱强度几乎与电流密度无关, 所以两者的比, 随着电流密度的增加而增加。考虑到连续光谱的其它原因, 还有激发原子和基态原子的碰撞。这种碰撞的几率, 与基态原子密度 N_0 的平方成比例, 而线光谱强度与 N_0 的一次方成比例, 所以, 两者的比, 也随着压力增加而增加。(3) 由于自我吸收而产生的黑暗部分, 表现在共振线 253.7nm 和 185.0nm 的位置上, 它的幅度随着压力的上升而增加。

2-4-2 光致发光

所谓光致发光, 系指一种物质被光照射时, 辐射出另外一种光。这是因为这个物质中的电子, 吸收了照射光而处于激发状态, 当它返回到原来的热平衡状态时, 将它的能量以光的形式释放出来。此时, 由于吸收的能量, 仅一部分使物质的晶格振动, 另外部分则传递给其它电子, 所以, 通常发出的光的能量, 与激发光的能量相比要小, 这称之为斯托克斯定律, 具有这种性质的物质称为荧光体。图 2-23 表示各种发光模型。

这时的发光强度, 决定于激发态的电子密度和低能态的电子密度, 以及它们之间的跃迁几率的乘积, 而这个几率, 取决于基于两状态的量子力学的研究而得出的选择定律。因而, 在基体物质中掺加适当的杂质, 可控制基体结晶, 提高发光强度。但发光时间延迟, 特别是发停止后过早的衰减, 这在应用上还存在很大的问题, 有的荧光体存在第二次激发光的重叠现象, 最初的荧光强度的增加或减少, 波长的变化, 这些都是必须注意的问题。

首先叙述关于物质中的电子在导带激发向价带跃迁而产生的发光。此时, 发光光谱决定于它的能带形状和激发强度, 这种物质为间接跃迁型半导体的情况下, 导带的电子, 通常由于和放出声子的价带的空穴再结合, 与直接跃迁型半导体相比, 其发光几率要小。

在高纯物质中, 由于库仑引力的作用, 被激发的电子和空穴, 形成成对的激发子状态, 它们复合时, 发出峰值狭窄的光。特别是在低温下, 在直接跃迁型化合物的吸收端附近观察, 它的能量 E_s 可用下式表示^[19],

$$E_s = E_g - G/n^2 \quad (2-69)$$

式中, E_g 为频带间隙能量; G 为激发子的结合能量, n 为主量子数。在含杂质的物质中, 激发子被束缚, 束缚能量仅在长波侧产生狭窄谱线发光。其中, 尤其是等电子搜集器捕获的

激发子的发光效率高。

物质中的杂质，在禁带中形成能级，可提高发光效率。例如在布劳恩管中使用的 ZnS:Ag，施主电子和受主空穴再结合，可增加发光。另一例子如图 2-24 所示^[20]，此时放出的能量决定于电子和空穴间的距离 r ，如下式所示：

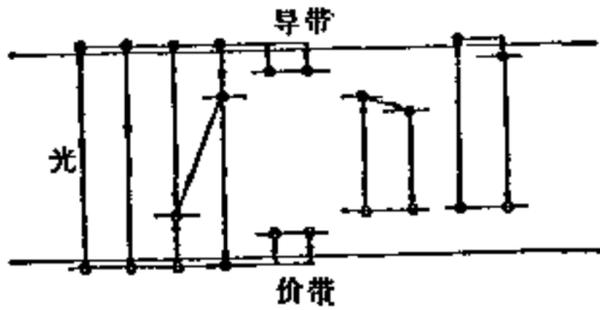


图2-23 发光机理

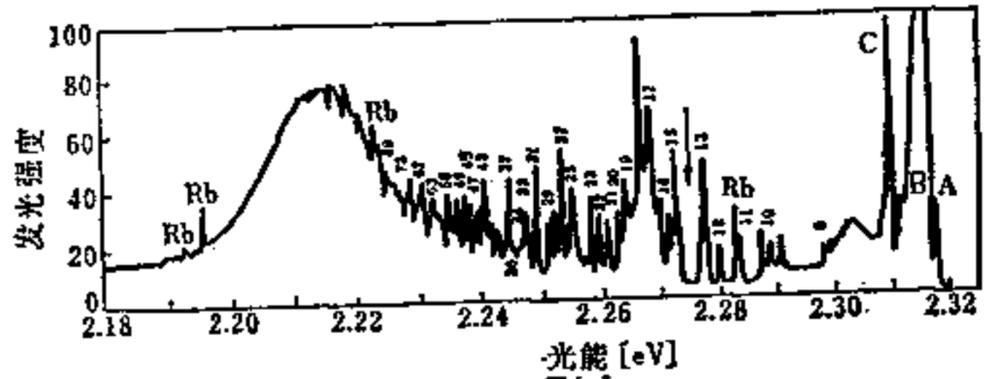


图2-24 GaP:Si, S 的施主、受主成对光谱

$$E(r) = E_g - (E_D + E_A) + e^2/\epsilon_0 r \quad (2-70)$$

式中， E_D 、 E_A 为孤立的中性施主能级和受主能级的能量； ϵ_0 为静介电常数。此时，发光的跃迁几率 $W(r)$ 与重叠的波动函数的二次方成比例，用下式表示：

$$W(r) = W_{max} \exp(-2r/r_s) \quad (2-71)$$

式中， r_s 为波阿半径。因而， r 越小，发光越在短波侧出现，衰减也快。但是，杂质能级加强，电子和晶格振动的相互作用也加强，如图 2-25 所示 ZnS:Cu, Al 的发光那样，光谱线加宽。而这个时间分解光谱，在 4.2 K 的高能侧的发光衰减很快，明显地表现出施主、受主成对光谱的特征^[21]。

另外，在物质中掺入跃迁金属离子，例如当掺入 Mn^{2+} 时，其发光产生偏移。 Mn^{2+} 通常发黄色光，这是由于被禁止的偶极子跃迁的 $d-d$ 跃进而产生的发光。因为只有在离子周围的晶场不存在反演对称的场合，宇称性选择定则才失效，才可以产生偶极子跃迁，所以吸收的振子强度小至 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ ，同由于直接激发产生的发光相比，在晶格中加入的其他离子的能量跃迁而产生的发光，要强得多。例如在荧光灯中使用卤磷酸盐荧光粉 $Ca_5(F, Cl)(PO_4)_3:Sb^{3+}, Mn^{2+}$ 的情况下， Sb^{3+} 吸收 Hg 的 253.7nm 谱线，将这个能量以非辐射移向 Mn^{2+} ，由于 ${}^4T_1 \rightarrow {}^6A_1$ 能级间跃迁而发出光效很高的黄光。

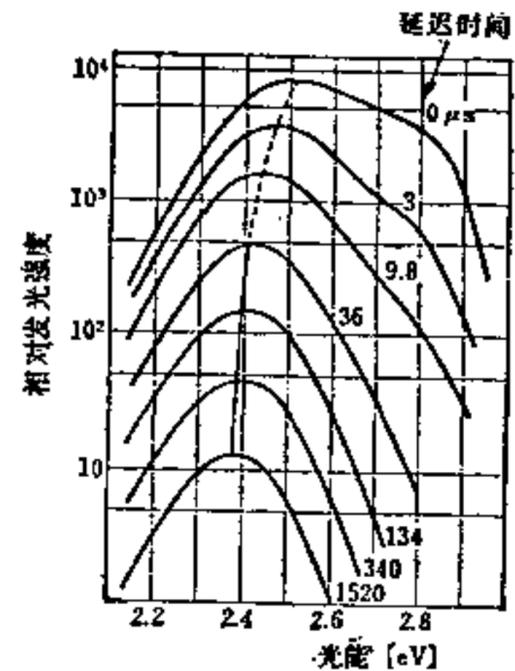


图2-25 4.2 K 的 ZnS:Cu, Al 的时间分解光谱

另外，稀土金属离子的发光，通常是由于不完全的 $4f$ 电子层内的跃迁而产生的， $4f$ 电子由于其外侧 $5s$ $5p$ 电子的屏蔽作用，不受物质中掺杂剂的结晶电场的影响，发光的线幅为 $0.5cm^{-1}$ 或狭窄些，由于基体产生的发光波长的差异不大，即使在高温下发光强度的衰减也不大。

但是，由于这个跃迁通常被抑制，所以直接激发 f 电子时的振子强度为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 或更小些。因此，激发在 $CaWO_4$ 或 YVO_4 那样的基体中有掺杂剂的基体结晶，或激发在基体

中同时有其它掺杂剂的杂质，激发 f 电子都要考虑到它们所吸收的能量。前者因为基体的传输效率高，后者因为杂质离子利用稀土类离子的能量的共振传输，所以效率也高。作为这个共振传输的条件，其离子间的距离要近，电偶极子和多重极子间的相互作用要大，双方传授的能量要合适。

其次，稀土类离子作为构成基体的一部分而掺入，使荧光粉产生若干变化。例如 NdP_2O_7 ，尽管加入晶体的 Nd 的浓度很高，发光还是很强。这是由于稀土类作为结晶基体的构成成分，结晶变形不大，与 Nd 离子相邻的 5d 轨道重合而产生 f-d 混合效应。这种荧光粉正引起注意。

关于利用这种跃迁金属和稀土类离子的激发状态的长寿命的固体激发，可参考 2-5 节。

最后提一下关于不发光的非放射再结合。其中重要的一种是通过错位和表面等的缺陷的再结合，另一种是将再结合能量传给第三粒子，即为放出多余的声子的奥格效率 (Auger effect)。因而，要提高发光效率，就要提高荧光粉的纯度，以及选择杂质时种类和含量等〔22〕。

2-4-3 阴极发光

所谓阴极发光，系指在激发时利用电子线的发光。利用激发能量的发光中心的跃迁机构而产生的发光光谱分布和效率，与光致发光不同。

阴极发光的典型的例子，是彩色阴极射线管的荧光粉，发出红、绿、蓝的三基色光，各种光的亮度随电子线密度的比例而增大，放射线的衰减要明显。

目前，作为三基色荧光粉使用的有 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{S}:\text{Eu}$ ， $\text{ZnS}:\text{Cu}\cdot\text{Al}$ ， $\text{ZnS}:\text{Ag}$ 。为了防止外来光的反射而采取了各种措施，最近，在荧光粉上染上吸收发光色以外的波长的颜色的产品，已有商品出售。

由于加速电压不同，电子线间物质的浸透度也不同，所以可采用在荧光面上涂敷如图 2-26 所示的二种荧光膜的方法，利用提高加速电压而使发光色从红向绿变化，还可将亮度特性因电流而异的二种荧光粉混合制成荧光面，利用电流的变化来改变发光颜色，这种方法被用于高清晰度的显象管中。

此外，作为特殊管用的，如适合于传真的高速发光管的荧光粉，则要求衰减快，如正在研制的 $\text{YAG}:\text{Ce}$ 那样的时间常数为 100ms 以下的荧光粉；相反，雷达等用的荧光粉，也有要求衰减慢的，如使用 $(\text{Zn}, \text{Cd})\text{S}:\text{Cu}$ 等。时间常数为数百毫秒的荧光粉，正在研制中。

最后，叙述由几十伏低电压电子线激发而产生的发光。为了用这种低电压激发而有好的发光效率，要求荧光粉不积存电荷且其电阻要适当的小。现在符合这个要求的 ZnO 荧光粉，用约 10V 的电压就可发出 $1400\text{cd}/\text{m}^2$ 的亮度，正使用于荧光指示管。另外，作为彩色显示用的变速荧光粉，也正在引起注意。

2-4-4 场致发光

在物质上直接安上电极并施加电场而使其发光的现象，在 pn 结注入电荷而发光的方式，由于局部高电场而产生电荷的碰撞激发以致发光的方式，都称为场致发光。

注入发光方式是用如图 2-27 所示 pn 结二极管产生顺方向偏流时，在 P 区域是电子，在 n 区域是空穴，通过接合部被注入，在和多数载流子再结合的过程中而发光，这种材料有 GaAs 、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 、 GaP 等，例如，在 n 型的基板上外延生长 P 型层，在各层接上欧姆电极而制成二极管。此时的发光强度与注入电流有关，由于电流是由施加电压产

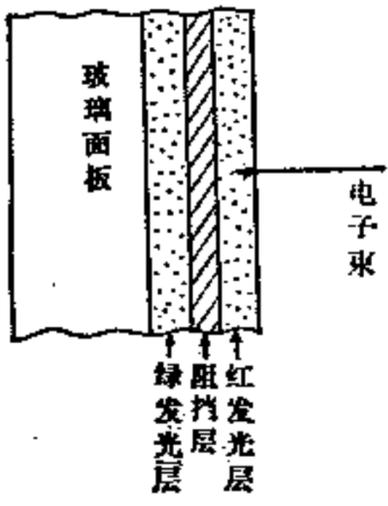


图2-26 穿透管荧光面的结构

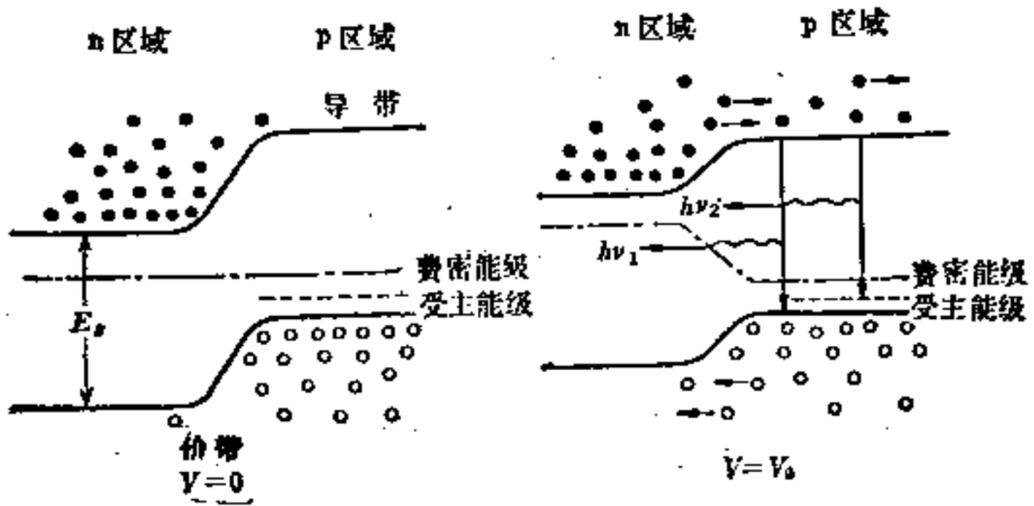


图2-27 pn结发光机理

生，所以发光也决定于施加电压。

其次关于发光波长，在 $GaAs$ 、 $GaAs_{1-x}P_x$ 、 $Al_xGa_{1-x}As$ 中，是P区域产生发光，通常发光光谱的峰值，因为频带间隙能量约低于 $30meV$ ，是由自由电子和被很浅的 Zn 受主所捕获的空穴的再结合所产生的。一方面， GaP 的发光光谱如图 2-28 所示，具有红外、红色和绿色部分的发光峰值，各自如图所示那样跃迁。其中，红色发光是由 $Zn-O$ 施主·受主线对产生的，掺加适量的 Zn 、 O ，可使红色发光的外部发光效率提高百分之几。可是，由于 GaP 是间接跃迁型半导体，在高电流下发光效率会下降。另一方面，绿色发光是以等带电体捕集器 N 作为掺加剂时得到的，近于直接跃迁型，亮度饱和少。在 $GaAs_{1-x}P_x$ 、 $Al_xGa_{1-x}As$ 中，通常对于 $x \leq 0.4$ 来说，由于是在直接跃迁型半导体的范围内接通，反应也快，所以达到高亮度时，电流-亮度特性尚未见饱和。

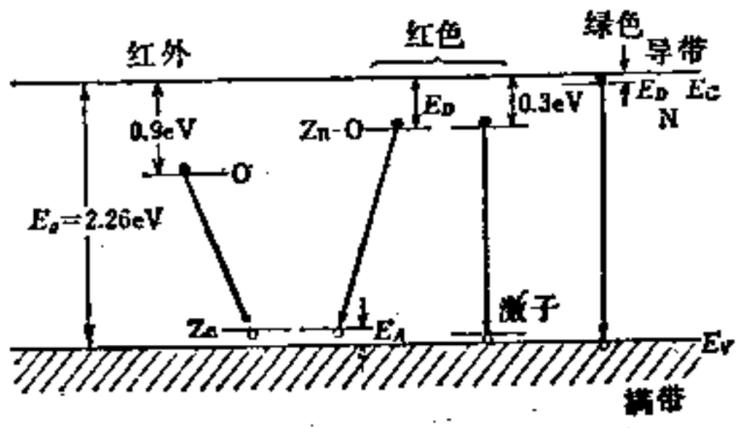


图2-28 GaP的发光机理

可是，由于象上述那样的半导体的频带间隙能量小，不可能发出蓝色光。用能量大的 ZnS 和 $ZnSe$ 、 GaN 那样的物质，制成 pn 结，或制成 $SiC-CdS$ 那样的异质结，试图得到蓝色光，但蓝色光的效率不高。下面叙述试用反斯托克斯变换，将发光效率高的 $GaAs:Si$ 的红外光变换成蓝色、绿色光。其原理是将 Tm 和 Er 混成一体的 $YOCl$ 或 YF ，那样的荧光粉涂在 $GaAs:Si$ 二极管的周围，如图 2-29 所示，用 $GaAs:Si$ 的 $940nm$ 的发光，使 Tm^{3+} 分三级、 Er^{3+} 分二级激发，分别得到 $470nm$ 的蓝色光、 $550nm$ 的绿色光、 $660nm$ 的红色光。在这里，加入 Yb 的红色吸收效率比 Tm 、 Er 有大幅度提高，而且将吸收的能量用 Tm 、 Er 的高效率进行谐振传输。可是，最终得到的蓝色发光效率并不十分高，只有约 0.1% 。

可是，由于象上述那样的半导体的频带间隙能量小，不可能发出蓝色光。用能量大的 ZnS 和 $ZnSe$ 、 GaN 那样的物质，制成 pn 结，或制成 $SiC-CdS$ 那样的异质结，试图得到蓝色光，但蓝色光的效率不高。下面叙述试用反斯托克斯变换，将发光效率高的 $GaAs:Si$ 的红外光变换成蓝色、绿色光。其原理是将 Tm 和 Er 混成一体的 $YOCl$ 或 YF ，那样的荧光粉涂在 $GaAs:Si$ 二极管的周围，如图 2-29 所示，用 $GaAs:Si$ 的 $940nm$ 的发光，使 Tm^{3+} 分三级、 Er^{3+} 分二级激发，分别得到 $470nm$ 的蓝色光、 $550nm$ 的绿色光、 $660nm$ 的红色光。在这里，加入 Yb 的红色吸收效率比 Tm 、 Er 有大幅度提高，而且将吸收的能量用 Tm 、 Er 的高效率进行谐振传输。可是，最终得到的蓝色发光效率并不十分高，只有约 0.1% 。

下面叙述关于由于碰撞激发而产生的场致发光。这是特殊的荧光粉内的被高电场所加速的电子，和碰撞激发的荧光中心再结合，而产生的发光。由于电场而产生的碰撞激发，可以看成是电子捕集器的一次电子，在 $5 \times 10^5 V/cm$ 程度的局部高电场下被加速所引起的。产生这种局部高电场的原因，是金属和半导体的接触所致。这种现象在 $ZnS:Cu$ 荧光体的场合下最显著。从粒子表面或内部析出的 Cu 或 Cu_2S 等的导电层，在 ZnS 的边界处产生厚约 100

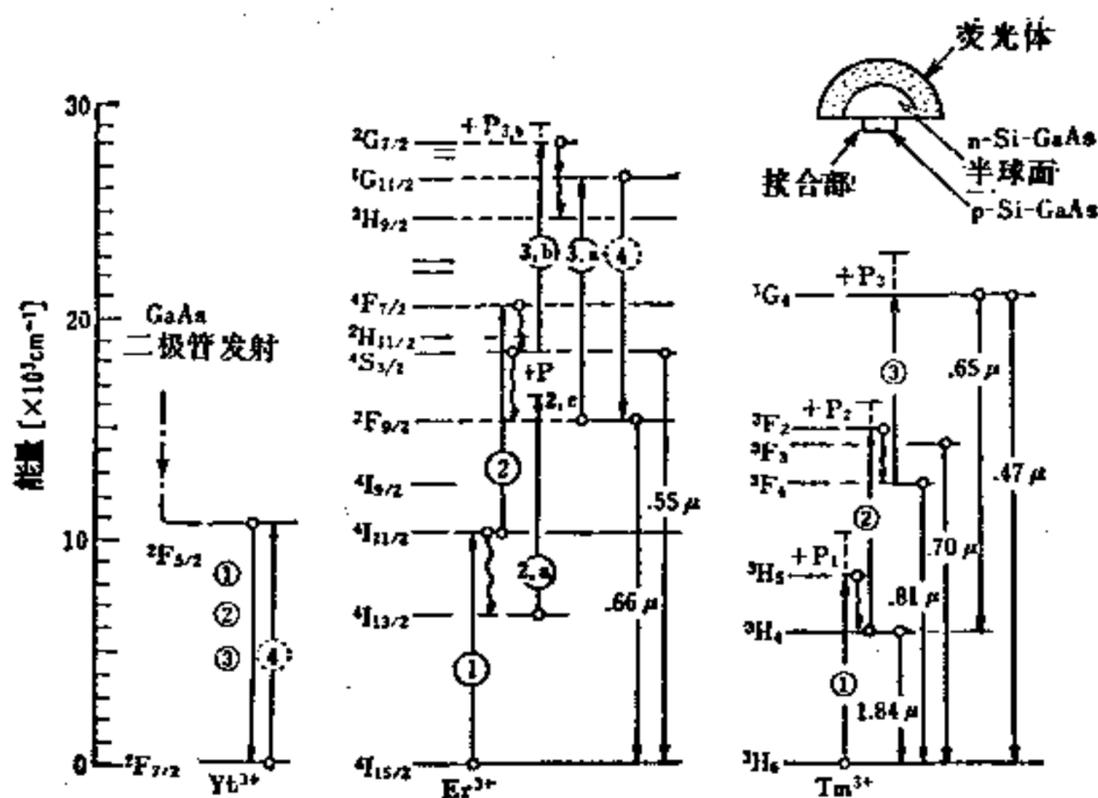


图2-29 将GaAs:Si发出的红外光变换成可见光的原理^[23]

nm 的莫特-肖特基 (Mott-Schottky) 型整流层, 在整流层上施加电压, 就会产生局部高电场。

因而, 将这种荧光粉末扩散在高介电常数的粘结剂中, 如图 2-30 所示, 在其两侧施加交变高电压, 即可看见发光。此时的发光强度 B 和施加电压 V 之间具有如下关系。

$$B = B_0 \exp(-C/\sqrt{V}) \quad (2-72)$$

式中, B_0 、 C 是常数。此时, 由于碰撞激发而产生离子化的发光中心和自由电子, 这些自由电子的一部分和空中心直接结合而发光, 大部分飞向阳极, 在阳极附近被捕获。而电压为零时, 由于内部电场的极化作用, 使阳极侧的电子返回阴极侧, 和空中心再结合而发光。因而发光亮度和施加的交变电场的频率成比例。但是, 由于这个现象滞后, 所以, 在高频下亮度产生饱和。另外, 如果包含二个种类的发光中心的亮度的频率特性不同, 改变频率即可改变发光颜色。

作为其它荧光体, 用 $ZnS:Mn$ 的蒸镀膜, 在其两侧为 Y_2O_3 电解质蒸镀膜, 构成三极型荧光体, 它具有高亮度、长寿命, 正被引起注意^[24]。但这种型式的荧光体的效率也不高。

2-4-5 其它发光

对具有新能级捕集器的荧光体, 用低温照射, 填充捕集器, 而后提高荧光体的温度, 在对应于捕集器能级的深度的温度下, 可以看见由于从捕集器的载流子的发射而产生的发光。把这种发光称为热发光。由于此时的发光量与捕集器捕获到的载流子的量成比例, 所以, 观察这个发光, 即可知荧光体中捕集器能级的分布及其密度。因而, 用这样的荧光体, 例如 $CaSO_4:Tm$, 可以测量其被照射的发射线量^[25]。

另外, 被这种捕集器捕获的电子, 由于碰撞而从捕集器放射, 产生发光现象, 在 CdS :

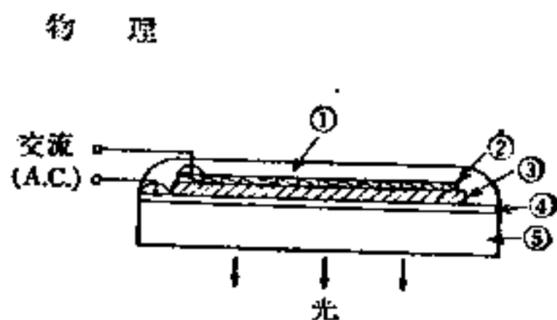


图2-30 本征电场发光板的结构

- ① 防潮膜(环氧树脂等树脂);
- ② 内电极(铝等的蒸镀膜, 要有高反射率);
- ③ 荧光层(荧光粉和树脂的混合物);
- ④ 透明电极;
- ⑤ 玻璃基板

Li 中观察到的强烈的绿色碰撞发光, 可以用压电体的局部电场来解释〔26〕。

最后, 附带提一下由于化学反应而产生的化学发光。这种现象一般多与氧的反应有关, 同时衰减快。但最近发现了长时间持续发光的物质, 正在引起注意〔22〕。

2-5 激光(莱塞发光)

2-5-1 气体激光

(1) **结构** 1958年, Schawlow 和 Townes 设想过光学范围的电磁波无放大振荡器的可能性, 在 1961 年被 Javan 所实现。取 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的头一个字母, 称为 Laser (莱塞)。与电波的情况相同, 激光振荡器也是由放大器和谐振腔组成的。图 2-31 表示气体激光的原理结构。

光在微波空腔中往返于两镜之间, 同时与其途中的放电等离子体中的激发原子相互作用而被放大, 于是产生振荡谐振波型 $TEM_{m,n,q}$ 。从便于使用出发, 制成横向单一波型 $TEM_{0,0,q}$, 由放电管和镜头的结构所决定。谐振腔的 Q 值主要决定于镜头和放电管的窗口的反射和吸收特性, 尤其是对于特定的直线偏振光要具有高 Q 值的, 通常是将放电管的窗口按布儒斯特角安装。

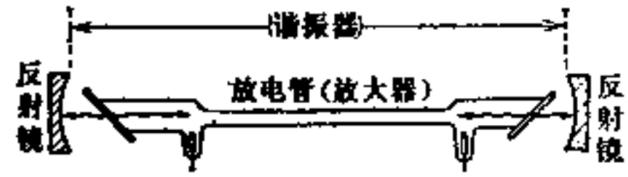


图2-31 气体激光振荡器原理图

(2) **激光机理** 频率为 ν 、强度为 I_0 的单色光, 在媒质中向 x 方向传播时的强度变化用下式表示:

$$I = I_0 \exp(\alpha x) \quad (2-73)$$

α 通常称为吸收系数, 是个常数, 如扩展其意义, 亦可理解为负数表示吸收, 正数表示放大。激光媒质和光的相互作用如视为谐振吸收, 则 λ 可用下式表示〔27〕:

$$\alpha = h\nu \cdot B(N_2 - N_1) / 4\pi \cdot \Delta\nu \quad (2-74)$$

式中, N_1 、 N_2 表示在媒质的单位长度中所含有的初始状态或激发状态的原子数, 而 $\Delta\nu$ 则表示光谱线幅。B 是爱因斯坦感应跃迁几率, 如相关能级的统计重复率相等, 则放射和吸收的 B 一致。为了得到放大, 则要 $\alpha > 0$, 因而必须 $N_1 < N_2$ 。这通常称为热平衡状态分布, 反之则称为负温度状态或反转分布状态, 把达到这个状态的手段称为激励。图 2-32 所示是典型的气体激光 He-Ne 激光的激励机理。在 He 为 90% Ne 为 10%, 全压为 1~3 毫的混合气体中放电, He 原子被激发到由于电子碰撞而产生的亚稳能级 2^1S_0 、 2^3S_1 能级。另外, Ne 原子处于与激发 He 原子的能级非常接近的 2S、3S 等激发能级, 由于二次碰撞产生的能量使 Ne 具有高效率, 所以产生反转分布。影响反转分布的因素有: (1) 向器壁的扩散, 电子和异种原子的二次碰撞而产生的缓和, 由于累积电离和光的自发放射等而产生的亚稳 He 原子和激光能级 Ne 原子的减少; (2) 在和电子直接相互作用中, Ne 的能级密度分布具有热平衡化的倾向。这是二个被考虑的主要因素。其中, 光的自发放射不好控制, 其它可通过选择最佳气体压力和电流密度的方法进行控制。不仅在原子能级间, 即使在离子和分子能级间也能产生负温度状态。前者称为离子激光 (如 A^+), 后者称为分子激光 (如 CO_2)。气体激光比固体激光的原子密度低, 因此具有放大率低的缺点, 而另一方面, 从基础能级看, 其激发能级都处于高能级, 容易产生反转, 因而具有容易产生连续振荡的优点。而媒质的均匀性也

比其它媒质好，所以相干性也高。

(3) 振荡频率 取镜的间隔为 L ，可能的谐振频率间隔为 $c/2L$ 。例如 $L = 100\text{cm}$ ，这个间隔为 150MHz 。取激光的中心频率为 $4.7 \times 10^{14}\text{Hz}$ ，在常温下的多普勒宽度大致为 1200MHz ，在这个范围内，同时可能有 10 根相近的谐振谱线。这时要获得单一谱线，必须采用图 2-33(a)、(b) 所示的方法。亦即 (a) 在长谐振腔的情况下，调节增益，使之正好与中心频率附近的损失平衡；(b) 采用短谐振腔波型间隔的二倍，大致等于多普勒宽度。总之，要稳定振荡频率，保持恒定的镜的间隔是很重要的。目前，在 He-Ne 激光的 $1.15\mu\text{m}$ 谱线上，在实验室内可以达到在一分钟偏移 10^{-11} 的程度，在实用中，达到 2~3 位数已经有困难。

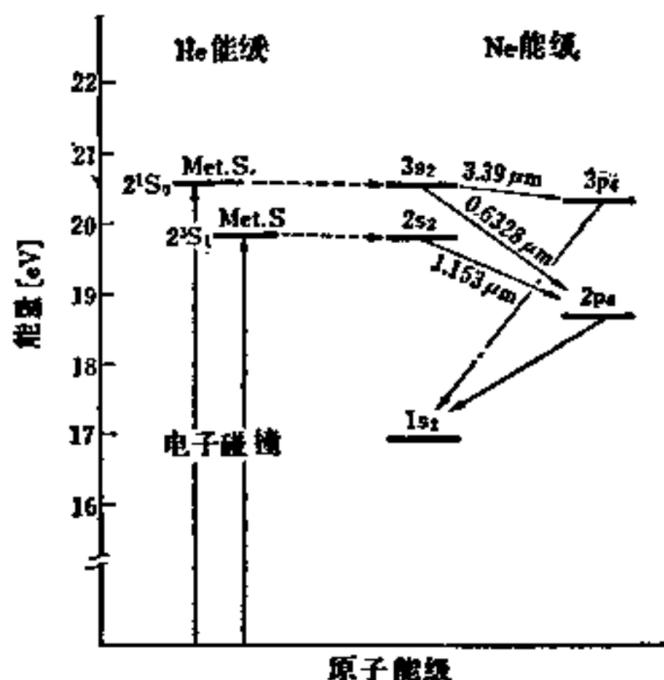


图2-32 He-Ne激光的激励机理

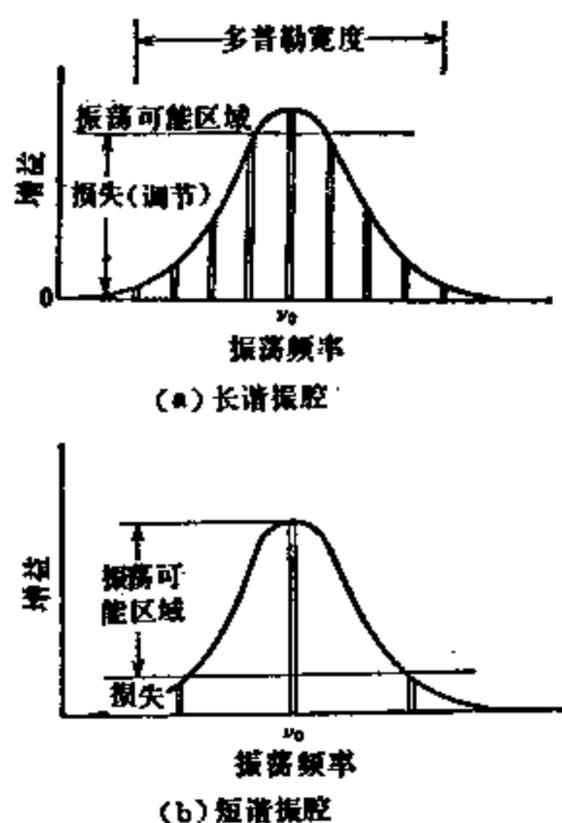


图2-33 获得单一振荡谱线的方法

(4) 激光光束的光学特性 激光光束具有时间、空间的相干性和可干涉性的特征。现在来分析向前进方向聚焦的理想的激光光束。这应该是一个球面波，向着焦点 ($Z = 0$) 传播，波面的曲率 R 随着传播方向增加 (图2-34)。

R 和 Z 的关系用下式表示：

$$R = Z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda Z} \right)^2 \right] \quad (2-75)$$

式中， ω_0 是在焦点位置的光束的高度。

由此可见，相干光束在自由空间传播时，具有保持其形状的性质，在光源侧的一点 R 决定于最小直径 ω_0 。因

而，在 Z 轴上任一点，都可能在极小的范围内将光能聚焦。与此相比，以非相干光束作光源，其电磁矢量无论在时间或空间上，因为都是不规则的传播波所合成，所以在长时间内或长距离内，都很难保持连续光束的形状。

(5) 杂音 本来，由于量子过程而产生的振荡，除了在进行放大时产生的量子杂音以外，由于激发原子的自发跃进而产生的杂音，在理论极限上并没有多大。所谓放大器的“实效温度” T_{eff} 用下式表示：

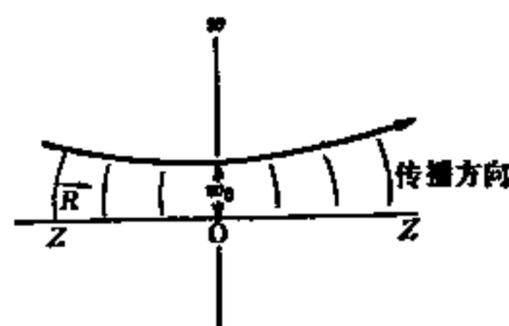


图2-34 相干光束的传播

$$T_{eff} = \frac{h\nu}{k} \quad (k: \text{波耳兹曼常数}) \quad (2-76)$$

以此来评价杂音, 在微波领域 (量子放大器) $T_{eff} \approx 10\text{K}$, 在可视区域 $T_{eff} \approx 10^4\text{K}$, 可见激光具有高杂音。

除了本质的杂音以外, 由于放电等离子体的宏观波动所产生的杂音往往混杂在一起。这种杂音, 在 $\text{kHz} \sim \text{MHz}$ 的频率范围内, 呈现锐光谱和大振幅的特征。如适当选择放电管的气体压力、电流密度和结构等, 能比较容易消除这种杂音。

2-5-2 固体激光

固体激光是用强光激发跃迁金属离子或含有稀土类离子的晶体, 使其产生诱导发光, 其基本装置如图 2-35 所示。

以红宝石激光作为典型举例, 其输出波长为 694.3nm , 在 Al_2O_3 晶体中加入 0.05% 的 Cr^{3+} 掺杂剂。如图 2-36 所示, Cr^{3+} 的基态电子被激励到 ${}^4\text{T}_1$ 、 ${}^4\text{T}_2$ 能级, 又非辐射跃迁到 ${}^2\text{E}$ 能级, 由于该能级的寿命长, 只有增大激励强度, 在 ${}^2\text{E}$ 能级和基态间产生反转分布, 才能产生激光振荡。

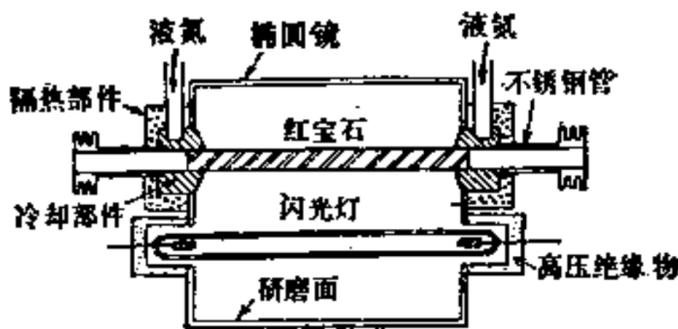


图2-35 红宝石激光振荡装置一例

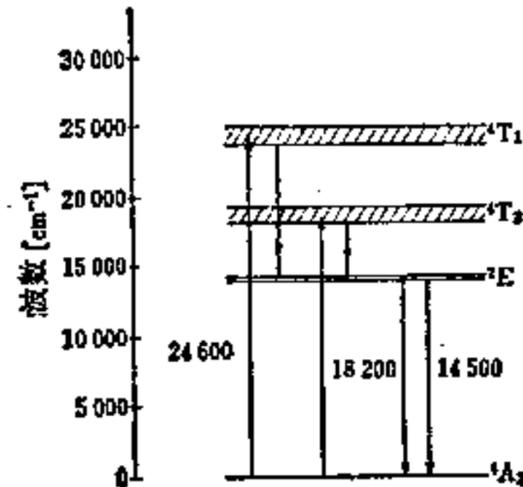


图2-36 红宝石内的 Cr^{3+} 离子的能级

可是, 在这种红宝石激光中, 激光跃迁的低能侧是基态, 处于热平衡状态的电子占多数, 由于进行激励需要大功率, 所以希望用激光跃迁不在基态的物质。采取的对策是在玻璃和 YAG 晶体中加入 Nd^{3+} , 利用 Nd^{3+} 激光, 如图 2-37 所示, 激光跃迁是在 ${}^4\text{F}_{3/2}$ 能级和 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级之间进行, 而不是在基态, 在激励时所需能量比红宝石约少二位数。

为了降低激光振荡的临界值, 要采用变形小的均匀晶体, 为要制作谐振腔, 必须安装反光镜等。

如此获得的激光, 具有光谱纯度高, 可干涉距离长的优点。而在完全平面波中, 相近光束的发散少, 用光学系统进行聚光, 可获得高放射密度。因而, 待反转分布持续一定时间以后, 使用棱镜的旋转和使用彩色软片物质的固体 Q 转换器, 进行瞬间振荡, 可以发射出 TW 以上的巨大能量。

最近, 作为一种新材料, 戊烷磷酸酯及其薄膜已引起重视⁽²⁸⁾。

2-5-3 半导体激光

用直接跃迁型发光二极管, 作成光的谐振腔, 增加电流密度, 在充满导带的电子和价带间的空穴之间产生诱导放射, 此时可得到具有被放大的峰值光锐的振荡谱线的半导体激光。

为了得到大的光增益, 要将 pn 结做得非常光滑, 通常用劈开面等代替反射镜。但在单一 pn 结激光的情况下, 临界值电流增加, 温度随之急剧增加, 故在室温下, 仅能产生脉冲振荡, 考虑充分散热, 采用如图 2-38 所示的 GaAs 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的双异质结构的激光。在这种结构中, GaAs 两侧的活性区域的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的频带间隙能量比 GaAs 的大, 而且由于折射率小, 注入的电子和空穴在 GaAs 部分结合, 随着再结合的几率升高, 发生的光全传过折射率高的 GaAs 部分。由于以上两者的晶格系数和热膨胀系数的差也小, 所以它们结合良好, 这样, 振荡的临界值大幅度降低, 在常温下就可能产生连续振荡。

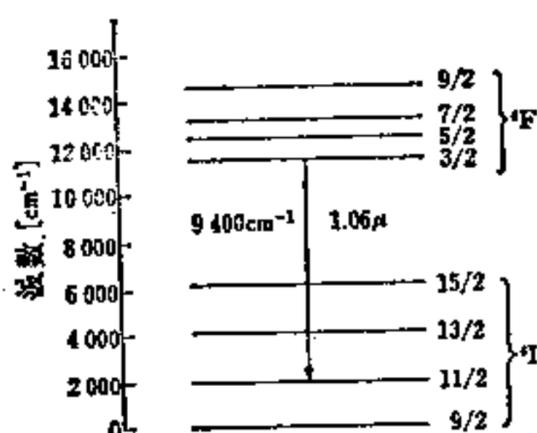


图2-37 Nd激光的能级和振荡波长

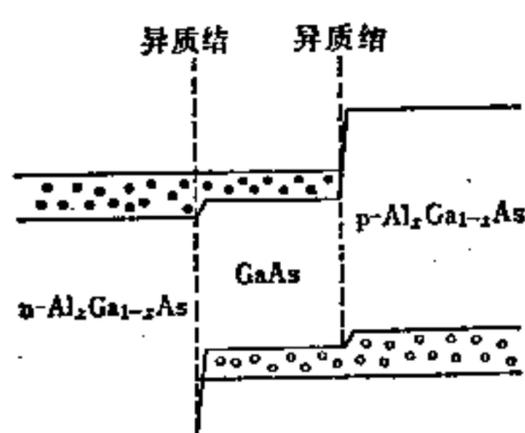


图2-38 双异质结激光的原理图

但存在寿命短, 振荡波型复杂, 工作电流大等缺点, 要进行种种改进。亦即, 采用带式结构, 限制光的射出范围, 在制造晶体和激光元件时要给予细心的注意, 所含无用杂质和内部变形、错位要尽量少等, 最近寿命可达数万小时。

这样的寿命正在延长, 利用其小型、高效率、高速调制性的特长, 作为光通讯用的光源, 距实用阶段已为期不远。而这时必须是单一波型、相对于光强的电流具有直线性、光束的扩散小等, 长轴·带式激光^[29]和埋入式异质结型激光^[30]已被开发。在光通讯方面正在考虑使用的石英纤维的光吸收损失小, 在 1.2μ 的波长范围内, 作为振荡的半导体激光, 正在使用 $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ 、 $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ 、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 和 $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ 、 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ 等的混合晶体进行试验。而考虑到和光 IC 的组合, 在活性层的边界作成周期性的凹凸状, 制成分布反馈型激光^[31]。这是一种单一波型振荡, 振荡频率的稳定性好, 由于不使用劈开面, 所以具有将其输出沿波导路线很易导出的优点。另外, 关于活性层和输出波导层之间的电磁连接的结构, 也有许多试作发表。

此外, 关于可见光激光 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-x}\text{As}_x$ ^[32], 红外激光 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ^[33] 等的应用研究开发, 也正在进行。

2-6 光电现象

2-6-1 光电效应的种类^[34]

当光照射到物质上时, 物质吸收了光能, 就会在电性能上产生变化。把这种现象称为光电现象, 利用光电现象, 将光能转换成电能, 这种变换称之为光电变换。典型的光电现象有: 光电放射效应, 光导电效应, 光致伏特效, 此外, 还有热电效应等。

2-6-2 光电放射效应

物质内的电子, 由于光能的作用而产生激发, 被激发的电子从物质表面飞出, 这种现象

称为光电放射效应。这个效应，是赫兹在 1887 年发现的。

光频率为 ν 的光照射到光电面上时，放射出的光电子的动能，如电子的质量为 m 、电荷为 e 、速度为 v ，根据爱因斯坦公式，可用下式表示：

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - e\phi \tag{2-77}$$

式中， h 是普朗克常数； ϕ 为光电面所使用的金属的逸出功。

在公式 (2-77) 中，如 $v = 0$ 时的频率为 ν_0 ，则

$$h\nu_0 = e\phi, \quad h(c/\lambda_0) = e\phi \tag{2-78}$$

式中， c 为光速； ν_0 、 λ_0 分别为临界频率、临界波长。从公式 (2-78) 可知，光的波长越短，光电子的放射能量越大。

另外，光电流与光的强度即光子数成正比。图 2-39 表示金属的逸出功与能级的关系。光一照射到金属上，它的能量就被金属内的晶格所吸收，金属内的电子达到激发态而放射出来。放射出的电子数量，决定于光子的能量和金属的逸出功。有的电子是从金属的深处放射出来，也有的电子是从金属表面放射出来，前者称为体积效应，后者称为表面效应。为了提高光电子的放射效应，在靠近金属的表面变换能量是有必要的。

在一般情况下，入射光的波长越短，金属的光电子放射能量也应越大。但是，在可见光范围内，有的碱金属和碱土类金属，其灵敏度如图 2-40 所示，从临界波长起，当波长短到一定程度，光电子放射的能量达到最大值。如果波长再短，能量反而下降。这种现象称为选择效应。根据选择效应而决定的光谱特性和临界波长，受光电面的材料和它的制造工艺的影响。

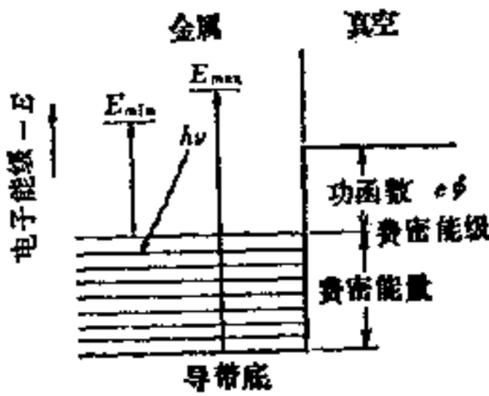


图2-39 金属的能级图

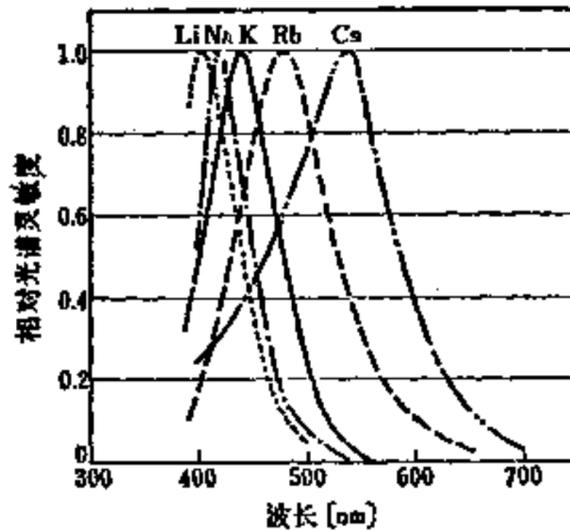


图2-40 碱金属的光谱灵敏度特性

利用这种光电子放射效应的光电变换元件，有光电管、光电倍增管，还有，作为光电变换器件，已知的有摄像管等。这种光电面，一般采用复合光电面。将铯、铷等碱金属薄膜镀在其它金属表面上，这样与单一金属相比，可降低逸出功，从近紫外区域到近红外区域，都可提高光电子放射效应。表 2-2 所列，为采用复合光电面的光电管的特性。

在光电倍增管中，为了获得比光电管更高的光电灵敏度，既采用光电子放射效应，又采用二次电子放射原理。因而，它的光谱灵敏度特性，与光电管一样，决定于光电面材料。

2-6-3 光电效应

光电效应，系指在物质上施加电场，并用光照射物质，使物质的电阻减小的效应，这是

表2-2 光电面的特性

光电面	光谱灵敏度的波长范围 (nm)	光谱灵敏度特性 (S编号)	最高灵敏度波长 (nm)	最高灵敏度的量子效率
Ag-O-Cs	400~1200	S-1	800	0.005
Sb-Cs	400~700	S-4	400	0.1~0.2
Ag-Bi-O-Cs	300~800	S-10	430	0.05
Na-K-Sb-Cs	300~850	S-20	420	0.15
双碱	185~700		340	0.2
多碱	185~850		350	0.15
Ga-As(Cs)	160~910		350	0.25

W. 史密斯在1873年发现的。

具有光电效应的物质，有硫化物、氧化物、硒化物等多种半导体和绝缘体。这个现象决定于由于光激发而在物质内产生的自由电子和空穴，沿电场方向移动的移动度和寿命。因而，移动度越大，寿命越长，光电导灵敏度越高。

在各种半导体和绝缘体中，照射光的能量大于该物质的禁带的能量，就会象图 2-41 所示，价带电子被激发到导带，在价带产生空穴。这个电子·空穴对的量，随着光子的能量而产生，它能改变该物质的电导率。当用光照射这种物质时，如设电导率的变化为 $\Delta\sigma$ ，电子和空穴的浓度的增加分别为 Δn 和 Δp ，则有

$$\Delta\sigma = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p) \tag{2-79}$$

式中， e 为电子的电荷； μ_n 、 μ_p 分别为自由电子和空穴的移动度。

如果由于光的照射，每秒产生 m 个电子·空穴对，则

$$\Delta n = m\tau_n, \quad \Delta p = m\tau_p \tag{2-80}$$

τ_n 、 τ_p 分别为自由电子和空穴的寿命。根据公式(2-79)、(2-80)，可得

$$\Delta\sigma = em(\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) \tag{2-81}$$

因而，为了提高光电导灵敏度，就必须选择 m 、 μ 、 τ 的乘积大的物质。图 2-42 表示由于光电导体的光子而产生的激光过程，激光方法分为本征激发和杂质激发。被激发的电子和空穴，在光电导体内向电极移动的途中，有的会被光电导体内的杂质或晶格缺陷所吸收。光电导体的光电灵敏度和响应速度，与光谱灵敏度有密切的关系。如果光电导体内作为激活中心

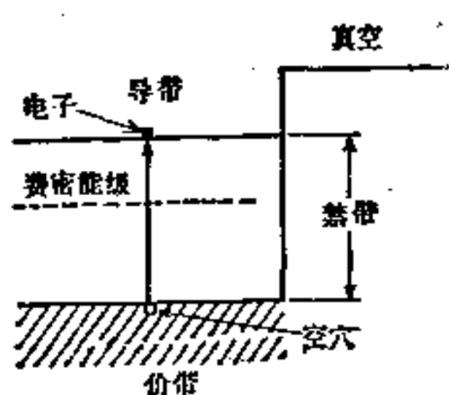


图2-41 光电导现象

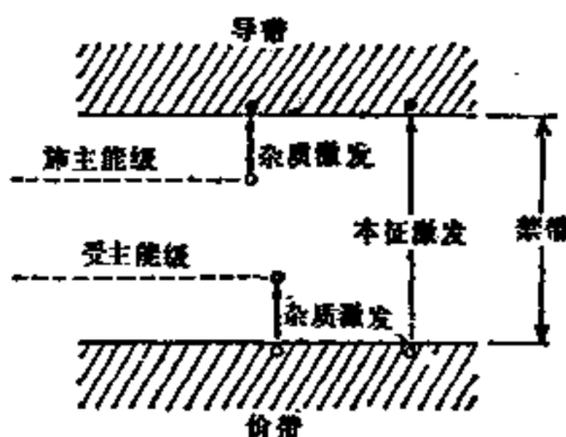


图2-42 激发过程

的结晶不规则，可得到高的光电灵敏度。但这样的不规则结晶，其响应速度却慢。不规则结晶，具有把极限波长向长波侧偏移的效果。通常，造成光电效应的光吸收的主要部分，相对于由于本征激发而产生的基础吸收，是不规则结晶，产生杂质激发，其极限波长比基础吸收更移向长波段。在近红外区域，具有高光电灵敏度的PbS，就是利用这个效应的例子。

表2-3 主要的光电导物质

硫化物	ZnS, CdS, PbS, As ₂ S ₃ , Cu ₂ S
硒化物	ZnSe, CdSe, PbSe, Cu ₂ Se, CuInSe ₂
碲化物	ZnTe, CdTe, PbTe, Cu ₂ Te
氧化物	PbO
金属间化合物	InSb, InAs, InP, GaAs, AlAs

具有光电效应的物质，已知的有周期表的第IV族、V族、VI族的非金属元素和它们的化合物，还有多种有机化合物。表2-3为具有光电效应的主要物质的一览表。光敏元件，是利用光电效应，获得对应于入射光量变化的电阻值的光电变换元件。其中CdS光敏元件，在可见区域有高的光电灵敏度，在日光型开关或穿孔卡片读出器等光电开关，和光电摄像管等光电面上，获得了广泛的利用。图2-43表示光敏元件的典型的光谱灵敏度特性。

光电导元件的电气特性，即使用同一种类的光电导材料，由于工艺原因也会不尽一样。其原因是为了改进元件的光电导特性，在添加杂质元素时，由于工艺原因，其组成比例很难正确调配，结果形成组成比例各异。

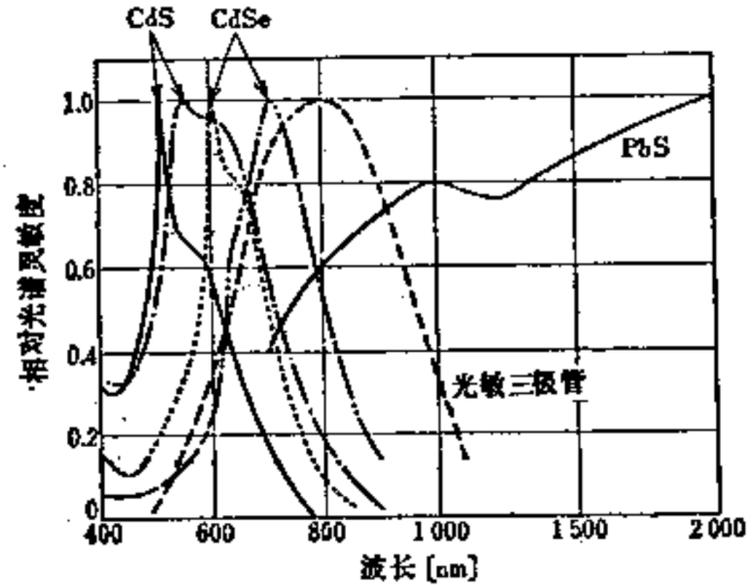


图2-43 光敏元件的光谱灵敏度特性

利用光电效应的光电变换元件，有CdS、PbS、光敏晶体（三极）管等，光电变换仪器有摄像管、固体摄像元件等。

2-6-4 光致伏特效应

用光照射物质，光能就在物质内产生电子·空穴对，它们相互向相反方向移动，由于聚集而产生电动势。这种现象称为光致伏特效应。1839年，Becquerel在电解溶液中的电极间用光照射，结果发现在电极间产生了电动势。现在的照度计使用的受光元件等的固体光致伏特效应，是在比发现溶液中的光致伏特效应约晚五十年的1887年，由Adams和Day发现的。利用光致伏特效应的光电变换元件，能够大致区分为二种，一种是像硒光电池那样的，利用半导体和金属的接触面的整流效应的势垒型元件，另一种是象硅光电二极管那样的，利用半导体的p-n结的p-n接合型元件。这种元件，与利用光电放射效应和光电效应的元件不同，不用外加电压。图2-44表示势垒型元件之一的硒光电池的结构。如图所示，在铁板(Fe)上有硒(Se)层，在硒层上有透明金属膜的电极。此时，Se成为P型半导体。在接触面的能量状态，如图2-45所示。无入射光时，费密能级和金属的能级一致，保持热平衡状态。因而，在接触面没有电流通过。当光一照射到接触面，由于光子的能量而产生空穴电流，在接触面产生电位梯度。结果，Se带正电荷，Fe带负电荷，在接触面产生电动势。硒光电池

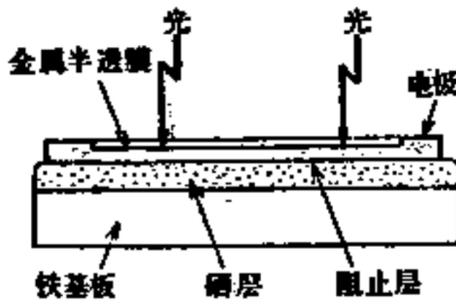


图2-44 硒光电池的结构

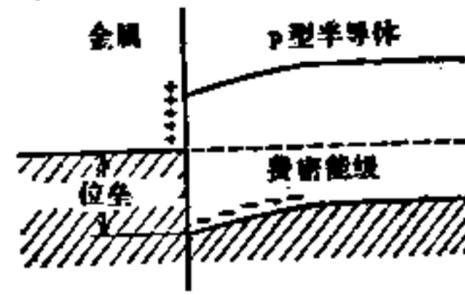


图2-45 金属和P型半导体的接触

的光谱灵敏度，如图 2-46 所示，在可见光波长范围内，如采用适当的滤光器，在能见度方面，具有很容易调节的特性。而对于入射光强度的光电输出特性，可通过外部负载而调节。短路光电流，与入射光的强度成比例，测光用受光元件具有很好的直线性。

p-n 接合型光致伏特元件，有硅光电池、硅光电二极管等。图 2-47 表示 p-n 接合型元件的电动势的发生原理。当无光照射处于热平衡状态时，费密能级保持一定，在 p-n 结附近存在内部电场，处于均衡状态。当用光照射时，因为被激发的载流子向接合部扩散，电子向 n 型区域移动，空穴向 P 型区域移动，n 侧带负电，P 侧带正电，于是产生电动势。如果接有外部负载时的输出电压为 V ，输出光电流为 I ，则

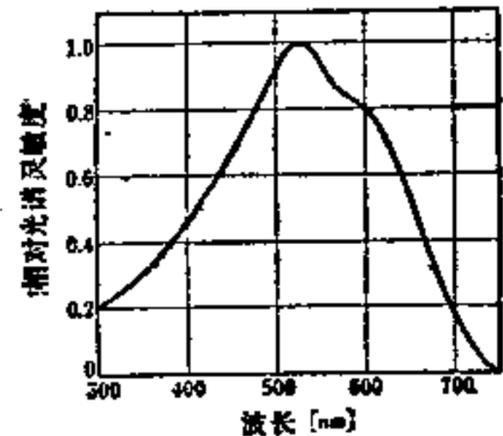


图2-46 硒光电池的光谱灵敏度特性

$$V = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_f - I}{I_s} \right) \quad (2-82)$$

$$I = I_f - I_s \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2-83)$$

式中， I_f 为由于光照而产生的空穴电流； I_s 为逆饱和电流； k 为玻耳兹曼常数； T 为绝对温度； e 为电子的电荷。根据公式 (2-82)、(2-83)，p-n 接合型光致伏特元件的短路时的输出光电流 I ，与空穴电流 I_f 成比例。另外，负载电阻变大，呈现非直线性。图 2-48 表示典型的 p-n 接合型光致伏特元件的光谱灵敏度特性。这个光谱灵敏度特性，与已经叙述过的光电变换元件相同，与光电面材料和制造工艺有很大关系。这个光谱灵敏度特性，随着受光表面到 p-n 结的深度而变。在用作测光受光元件的光致伏特元件中，利用这样的效应，有的元件在可视区域内得到光谱灵敏度的最大值。

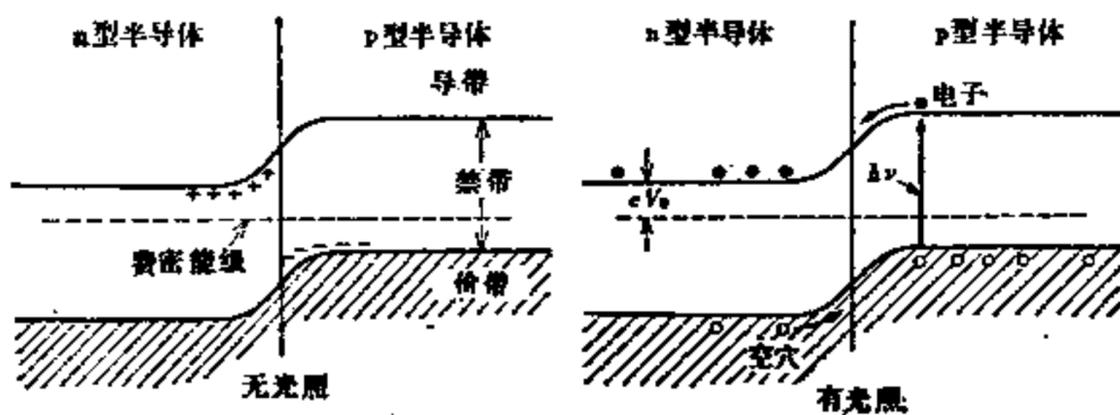


图2-47 P-n 结的能量状态

这样的光致伏特元件，可作为光电变换元件使用。如用于将太阳能直接变换为电能的电池，则称为太阳电池。太阳电池采用大面积的 p-n 接合面，构成具有大输出功率的结构。目前，最有实用性的优质材料是硅，被用作人造卫星上的仪器的电源。

2-6-5 其它的光电效应

除上述的光电效应外，有的物质，其加热冷却和自发极化的值，能改变极化方向，在正交面上产生电荷。如热电效应，作为红外线的检测元件，在实用化方面获得了进一步发展。具有这种效应的物质，有 BaTiO₃、PbTiO₃、LiNbO₃、KTN、TGS 等。此外，也有的物质，在入射光和正交方向上加上磁场，入射光和磁场就会在正交方向上产生电位差。

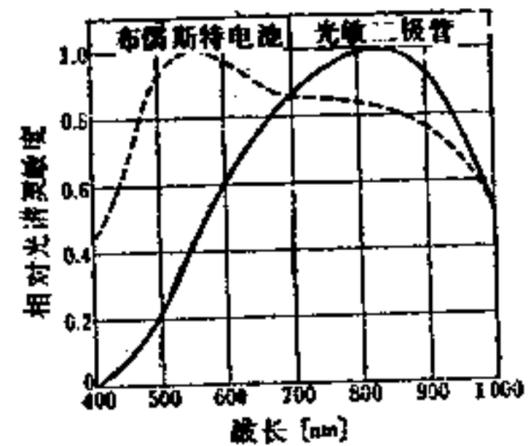


图2-48 硅光致伏特元件的光谱灵敏度特性

2-6-6 光电变换仪器 [35]

应用各种光电现象的光电变换仪器，有检象管、存储管、摄象管、固体摄象元件等。光放大器和电子照相等方面也有应用光电现象的例子。下面对与照明工程有关的摄象管和固体摄象元件的基本原理加以说明。

摄象管是将画象分解为系列的电信号的电子管，由具有光电面的光电变换部分和由电子束组成的扫描部分构成。分解画象时，取出对应于各画素的电信号的方式，有取出微分值的放电波型和取出积分值的储存波型。放电波型时，在扫描的短时间内，从各画素收到的光电信号得到图象，将下一次扫描时收到的光信号舍去。储存波型时，将舍去的光信号，作为电荷储存在光电变换部分，待下一次扫描时重新放出，作为电信号取出。这种方式，可能得到很高的光电变换效率。这种方式，作为储存原理，是在1933年由 V. K. Zworykin 发现的，使用这种储存原理的摄象管，对电视技术的发展作过很大的贡献。典型的摄象管种类和光电面材料如表 2-4 所列。

表2-4 光电面材料

摄象管的种类	光电面的材料	光电现象的种类
Image Orthicon(RCA)	Ag-Bi-Cs, (Cs)Na ₂ KSb	光电子发射
SEC管(WII)	Na ₂ KSb-Cs	光电子发射
SIT管(RCA)	Na ₂ KSb-Cs	光电子发射
Vidicon(RCA以外)	Sb ₂ S ₃	光导电
Plumbicon(Philips)	PbO	光导电
Chalnicon(东芝)	CdSe-As ₂	光导电
Si-Vidicon(NHK技研, Bell研)	Si	光导电
Satlicon(NHK技研, 日立)	Se-Te-As-Sb ₂ S ₃	光导电
Newvicon(松下)	ZnSe-Zn _x Cd _{1-x} Te(In)-Sb ₂ S ₃	光导电

固体摄象元件，是将由电子束组成的扫描机构置换成电气开关机构，在感光嵌镶幕储存各画素的电荷，该机构能顺序读出这个电荷量的变化。

固体摄像元件,大致分为自动扫描型光电二极管阵列(Self-Scanned Diode Array,SD-A)和电荷输送元件(Charge Transfer Device,CTD),电荷输送元件又可区分为电荷结合元件(Charge Coupled Device,CCD)和斗式传递元件(Bucket Brigade Device,BBD)。自动扫描型光电二极管阵列,一般如为MOS析象敏感元件,与CCD、BBD相同,基板为硅的单晶体。将MOS析象敏感元件与CTD作比较,它的结构和工作情况则大不相同。MOS析象敏感元件与光电二极管阵列的扫描回路,具有各自独立的能顺序取出光电二极管阵列的电荷的结构。CTD则具有通过MOS晶体管输送电荷的结构^[36]。通常,MOS析象敏感元件和光电二极管阵列,是由扫描回路的位移寄存器构成的。而光电二极管阵列由图2-49所示的光电二极管和MOSFET开关构成,相对于这一画素的部分,配置在图2-50所示的同一硅基板上。

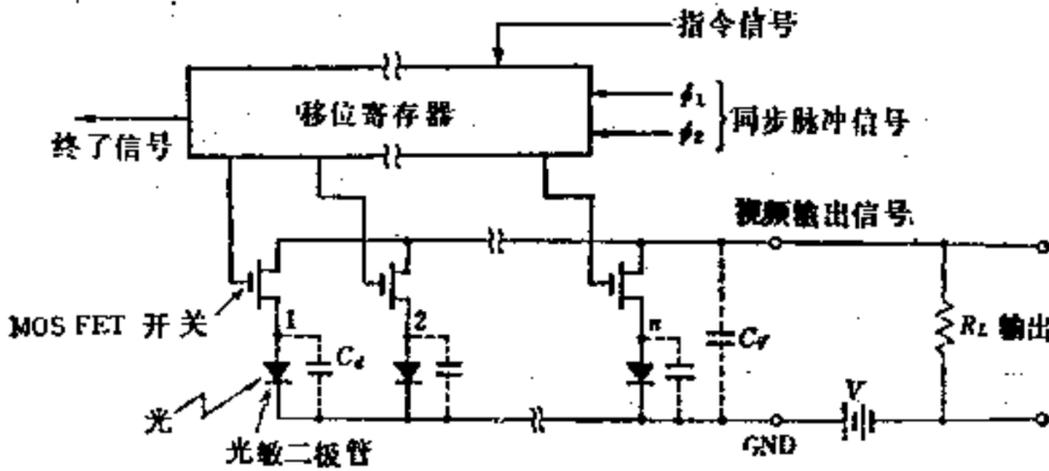


图2-49 MOS析象敏感元件的结构

MOS析象敏感元件的工作原理,可用图2-49的结构说明。给予MOS析象敏感元件的信号,通常有两相的同步信号(ϕ_1, ϕ_2)和扫描开始所必要的指令信号。而输出信号则有取出光电信号的视频输出信号和表示扫描終了时的信号。

当MOSFET开关导通时,光电二极管通过负荷电阻和MOSFET开关,获得与外部电源电压相反的偏压。光电二极管被施加反电压,与它并联的电容器 C_d 被充电至 V 。在MOSFET开关截止的状态下,如果用光照射,在理想状态下,充电电荷进行放电。因而,在下次扫描时,MOSFET开关重新导通,视频输出信号为零。

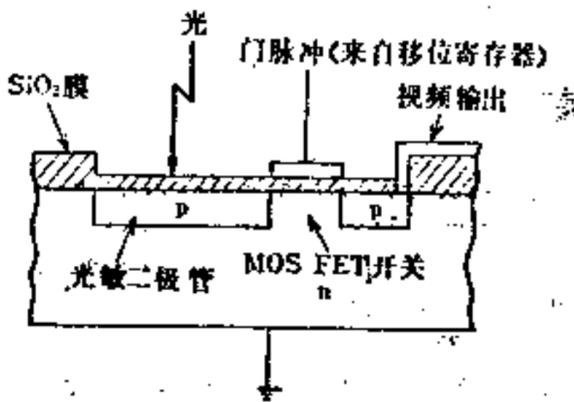


图2-50 MOS析象敏感元件一画素的结构

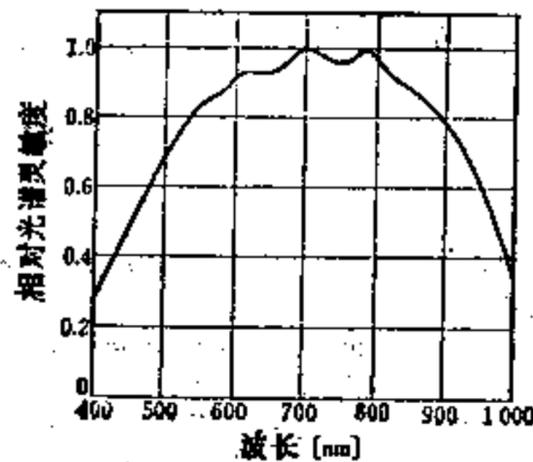


图2-51 MOS析象敏感元件的光谱灵敏度特性

但是,有时在光照射下,由于光子的作用,在光电二极管内产生再结合中心,通过这个中心失去充电电荷。在那里,当MOSFET开关重新导通时,从电源通过 R_L 向 C_d 充电,充进的电荷等于失去的电荷量。这时的充电电荷量,与光的照射量成比例关系,根据 R_L 两端

的电压波形，可以间接地读出入射光量。

MOS 析象敏感元件的光谱灵敏度特性，具有如图2-51所示的 $0.7\sim 0.9\mu\text{m}$ 的峰值，在可见区域和近红外区域的广泛的连续范围内，都有灵敏度。但是在这个曲线上，由于元件固有的光干涉，可以看到一些凹凸不平。由于这种元件是用多个光电二极管聚积在同一硅基板上制成的，所以在各画素间会产生一些模糊现象。这个现象，与光电二极管的间隔和入射光的波长有关，如果波长在 500nm 以下，这种光产生的空穴，几乎被光的入射部分的光电二极管所吸收。但随着波长向长波侧移动，入射光的一部分深深进入硅基板，空穴在到达邻近的光电二极管时，就产生模糊现象。

CCD 是 Bell 研究所的 W. S. Boyle 在1970年提出的^[37]。CCD 是在硅 MOS 电容器的金属电极和基板间施加电压，在半导体绝缘层的界面上产生反射层中，储存与入射光量成比例的象电荷。然后，从外部施加输送电压，使电势的最低位置顺序移动，使其输送到半导体表面，得到光电输出。

BBD 是菲力浦公司的 K. Teer 在1969年提出的^[38]。其工作情况与 CCD 完全相同，它们的差异在于，CCD 输送少量运载电荷，BBD 输送大量运载电荷。它们的原理图如图 2-52、图 2-53 所示。

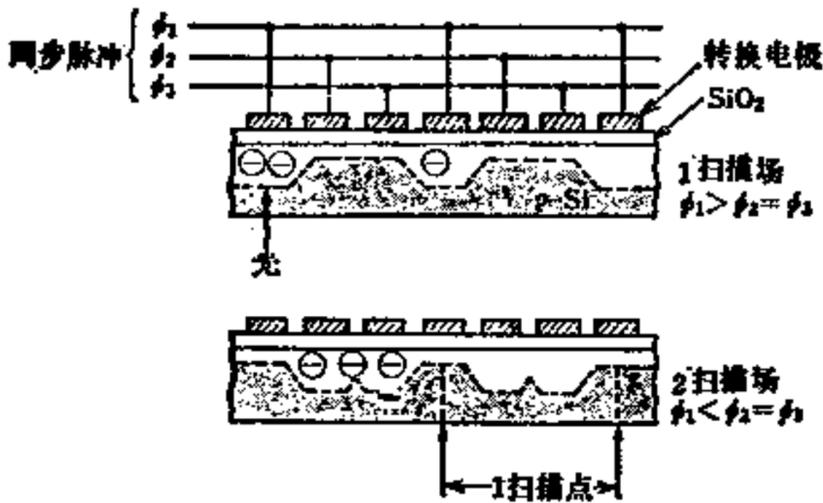


图2-52 CCD的构造和输送机构

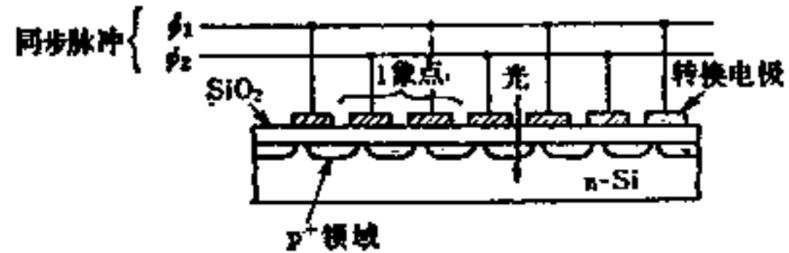


图2-53 BBD的构造和输送机构

以上，主要对固体摄象元件作了说明，这些元件都有光电变换、储存、扫描三种机能，并用 LSI 技术使之固体化。因此，可以做到小型、轻量，各画素的大小及其位置决定于其几何尺寸，具有硅光电二极管固有的优良的动态范围的特点。

参 考 文 献

<p>(1) M.V. Klein: Optics, John Wiley & Sons, Inc. (1970) 70</p> <p>(2) W.J. Smith: Modern Optical Engineering, McGraw-Hill Book Co. (1966) 18, 19</p> <p>(3) ヤヴェルスキー, ゼトラフ (豊田, 中川訳): 基礎物理学ハンドブック, 森北出版 (1975) 412</p> <p>(4) L. Levi: Applied Optics, John Wiley & Sons Inc. (1968) 46</p> <p>(5) 文献 (3) 381</p> <p>(6) A. Yariv (多田, 神谷訳): 光エレクトロニクスの基礎, 丸善 (1971) 107</p>	<p>(7) G. Herzberg: Atomic Spectra and Atomic Structure, Dover Pub., New York (1944)(日本語訳): 堀 健夫, 原子スペクトルと原子構造, 丸善 (1964) 124</p> <p>(8) 同上, 132</p> <p>(9) 杉浦隆勝: 光学 I 電磁光学, 産業図書 (昭23) 387, 光学 II 量子光学, 産業図書 (昭19) 427</p> <p>(10) 同上, 光学 II, 16</p> <p>(11) 同上, 光学 I, 389</p> <p>(12) G. Herzberg: The Spectra and Structures of Simple Free Radicals (Cornell Univ. U. S. A. 1971) (日本語訳): 奥田典夫, 分子スペクトル入門, 培風館 (1975) 38</p>
---	--

- (13) 鈴木：紫外・可視・近赤外領域における分光放射
パワー標準，電試調査報告第167号(昭45-1) 41
- (14) Hackforth: Infrared Radiation, McGraw-Hill
Book Company, Inc (1960) 18
- (15) International Critical Tables of Numerical
Data, Physics, Chemistry and Technology,
McGraw-Hill Book Company, Inc. V (1929)
244
- (16) A.M. Cravath: The rate at which ions lose
energy in elastic collisions, *Phys. Rev.*, **36**
(1930) 248
- (17) W. Elenbaas: Light Sources, Macmillan
London (1972) 130
- (18) 同上, 165
- (19) E.F. Gross et al.: *J. Phys. Chem. Solid*, **27**
(1966) 1647
- (20) J.J. Hopfield et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **10**
(1963) 162
- (21) K. Era et al.: *J. Phys. Chem. Solid*, **29** (1968)
1827, 1843
- (22) 伊吹順章: 光物性, 三省堂(昭49)
- (23) J.E. Geusic et al.: *J. Appl. Phys.*, **42** (1971)
1958
- (24) 猪口敏夫, 鈴木忠二: 日経エレクトロニクス, 11
月18日(1974) 84
- (25) 北原明治: 応用物理, **44** (昭50) 101
- (26) D.M. Warshauer & D.C. Reynolds: *J. Phys.*
Chem. Solid, **13** (1960) 251
- (27) A.L. Bloom: Gas Lasers, John Wiley &
Sons, New York (1968) 27
- (28) S.R. Chinn et al.: *Appl. Optics*, **15** (1976)
1444
- (29) H. Namizaki: *IEEE J. Quantam. Elect.*,
QE-1 (1975) 427
- (30) T. Tsukada et al.: *J. Appl. Phys.*, **45** (1974)
4899
- (31) M. Nakamura et al.: *Appl. Phys. Lett.*, **27**
(1975) 403
- (32) J.I. Coleman et al.: *J. Appl. Phys.*, **47** (1976)
2015
- (33) J.F. Butler & T.C. Harman: *Appl. Phys.*
Lett., **12** (1968) 347
- (34) 三宅清司: 光電素子とその応用, 朝倉書店(昭41)
- (35) 二宮輝雄: 撮像工学, コロナ社(昭50)
- (36) R.H. Dyck, G.P. Weckler: A New Self-
scanned Photodiode Array, *Solid State*
Technology, **14**, 7 (1971) 37
- (37) W.S. Boyle, G.E. Smith: Charge coupled
semiconductor devices, *BSTJ*, **49** (1970) 587
- (38) F.L.J. Sangster, K. Teer: Bucket brigade
electronics—new possibilities for delay, Time-
axis conversion and scanning, *IEEE J. Solid*
State Circuits SC-4 (1969) 131

第 3 章

光 和 视 觉

3-1 视觉系统的构造

3-1-1 视觉

光射入眼睛后产生的视知觉，是看见明暗（光觉）、看见物体的形状（形态觉）、看见颜色（色觉）、看见物体运动（动态觉）和看见物体的远近深浅（深度觉或立体知觉）等知觉的综合。

所有的生物，不仅靠光的刺激引起视觉而保护自己防止外来敌人侵犯、观察目标、判断环境的好坏以达到进化，而且对于建立了现代文明基础的人类来说，视觉比其它感觉有更重大的作用。但就引起视觉的刺激而论，无论如何不能忘记照明起着非常重要的作用。

3-1-2 视觉系统

为了形成视觉，首先必须有将光能转化为生理能的光接收器。识别物体的颜色和形状，要有大脑的活动。因此，对于视觉来说，大脑是最重要的器官，而从眼睛到大脑传送信号的神经纤维的作用也是很重要的。

图 3-1 表示了人的眼睛如同照相机一样，通过透镜在视网膜上成像。视网膜上大约分布着 11500 万个有感光性的视细胞。物体的像在感光细胞处被分解，借助于约 100 万条神经纤维，将信号送至大脑。在脑后边的大脑皮层上，把从眼睛送来的信号加工组合，使在眼睛上成了像的物体的形状和颜色等，在感知觉上发生作用，一部分作为记忆储存在脑细胞中，一部分消失或刺激其它脑细胞而引起行动。这种光刺激从眼睛到大脑变成生理信号，在大脑中引起了生理变化，而且作为行动表现出来，这就是视觉系统。必须注意，只有眼睛的活动是形不成视觉的。

3-1-3 眼睛的构造和机能

(1) **眼睑** 在上下眼睑中间露出眼球的前部。在眼睑的边缘上长有眼睫毛，以防止尘埃进入眼内，并遮挡上下方来的光线。眼睑时常眨动（眨眼），泪液湿润眼球前部。当外面有异物飞来，或有强烈光线时，眼睑无意识的形成一个细缝，或闭上起保护眼球、免受外来有害物损伤的作用。

(2) **眼球** 眼球的直径约为 24mm (21~25mm)。它的前部是透明的角膜，后部由坚固的巩膜包围着。从后边引出的、粗细约有 3mm 的束状物是视神经，它由约 100 万条神经纤维构成，其末端与头盖内的大脑相通。眼球的水平断面如图 3-2 所示。

人眼和照相机的构造相似，最不同之处是以变化晶状体前面的曲光度来对焦点。与前方空气接触的角膜，由坚固的表盘形透明膜组成，其厚度约 1mm。从角膜内侧到晶状体的前面充满了水状液体，称为房水。

相当于照相机透镜的晶状体，本来是球形的，但由于受睫状韧带的牵引而固定在睫状肌

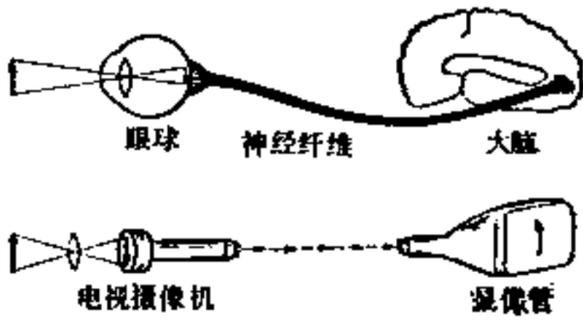


图3-1 眼睛和脑的关系

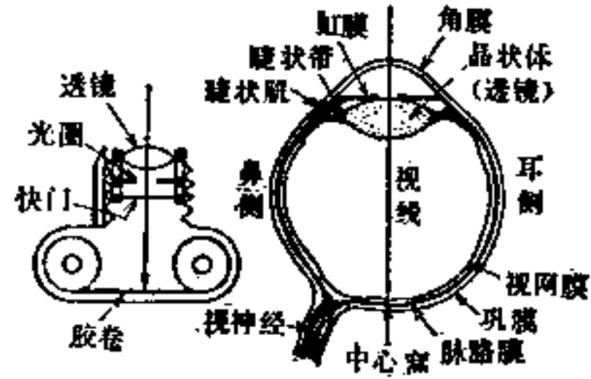


图3-2 眼球(右)和照相机(左)的断面图

上，形成透镜形状。环形的睫状肌把晶状体牵住。当睫状肌收缩时，牵引的韧带（如图3-3所示）一松弛，晶状体即靠本身的弹性成球形，增加了屈光度。这样就可以调节焦点，看见较近的目标。虹膜形成瞳孔，起相当于照相机光圈的作用。明亮时瞳孔缩小，反之则扩大，看近物时瞳孔也缩小。虹膜的颜色与其含有的米拉宁色素的含量多少有关，色素较多的日本人呈茶色，色素少的白种人，不是灰白色就呈青蓝色。

眼底上覆盖着感光的视网膜和与其进行新陈代谢的脉络网。晶状体和视网膜之间充满了凝胶状透明的玻璃体。

(3) 视网膜 约有2/3的眼球内表面覆盖着视网膜，它是厚度约0.3mm的透明膜，由具有感光性的视细胞、神经细胞及其神经纤维、色素细胞和血管等组成。从构造上视网膜可分为如图3-4所示的脑层和视细胞层二层。

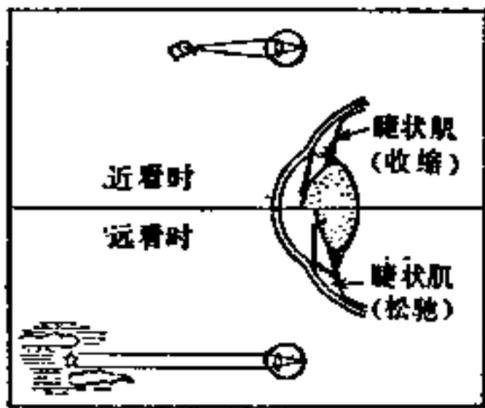


图3-3 眼睛对远近的调节

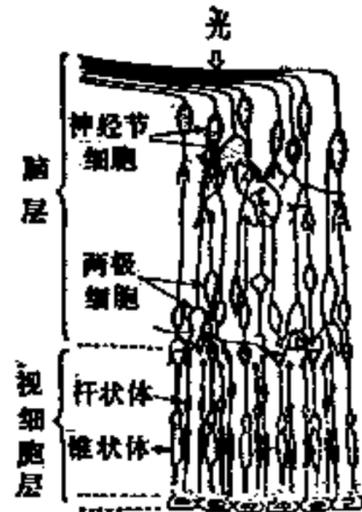


图3-4 网膜脑层和视细胞层

视网膜的脑层是由两极细胞、神经节细胞、水平细胞等神经细胞以及它们所属的神经纤维组成，由于其分布与脑神经细胞构造相似，故特称为脑层。如图3-5所示，它与视细胞层连接。视细胞层由二种感光视细胞（锥状体和杆状体）组成。与视线一致的视网膜中心处附近叫做黄斑，它含有黄色素。而在其中心点稍稍靠近中心的部位称中心窝。中心窝附近几乎仅由锥状体组成，越往视网膜的周边部位，杆状体就越多。

锥状体在明视觉条件下发挥其功能，可以识别物体的形状和颜色，而杆状体则在暗视觉条件下发挥作用，可以识别明暗。这些视细胞的总数约为11500万个，其中锥状体的总数不超过650万个。源于视细胞的神经纤维的通路，通过视网膜脑层用100万条视神经纤维组成的视神经束，穿过巩膜到达眼球的外部，与大脑连接。由于视神经穿过巩膜部分的网膜上没

有视细胞，而形成马利欧特盲点。该盲点如图 3-6 所示，在视线外侧 15° 的地方，约有 5° 的范围，通常自己感觉不到。

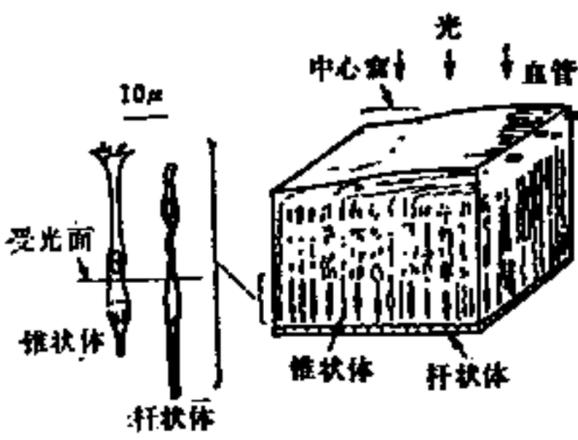


图3-5 网膜的构造

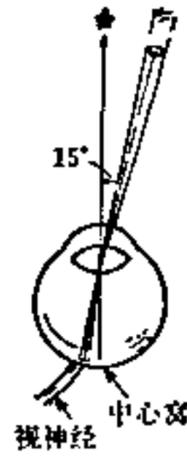


图3-6 马利欧特盲点

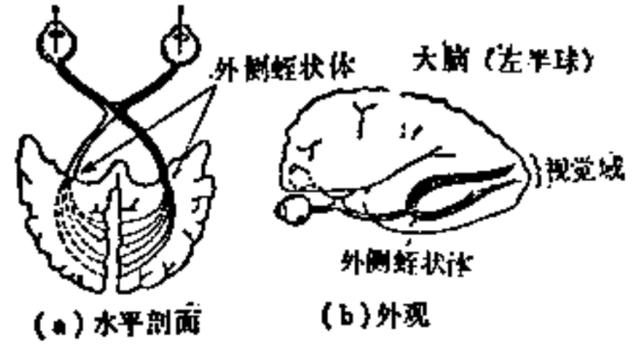


图3-7 视路

(4) 视路和脑 从左右眼球伸出的视神经在头盖内交叉，形成左右视路，然后分别到达各自的左右脑半球外侧的蛭状体处。图 3-7 中表示了人眼内并不是全部神经纤维交叉后分开，而只是从眼球内侧部分出来的纤维进行交叉。

在脑外侧蛭状体上，脑神经细胞被神经纤维连接。因为这些与视觉有关的细胞分布在大脑后叶深处的大脑皱纹周围，所以将此附近地方称为脑的视觉域。

(5) 眼肌 为了看清物体，就必须使物体的像集结在视网膜的中心窝处。由于眼球不断运动，使视线移动，为此在眼球的外部就有六根眼肌（内、外、上、下直肌，以及上、下斜肌）连接，能任意变换眼球的方向。眼球的转动中心，在角膜顶点向后约 13.6mm 处，在正面的移动范围约为 43° 。

3-1-4 光和眼睛

(1) 简化眼 把眼睛作为一个光学机械，确定其近似的光学常数，图 3-8 表示的就是简化眼，可应用于光学机械的设计等。左右瞳孔间距离为 62mm ，角膜的曲率半径为 8mm 。角膜的折射率为 1.37 ，晶状体的折射率为 1.43 ，房水与玻璃体的则为 1.33 ，这些是通常使用的数值。

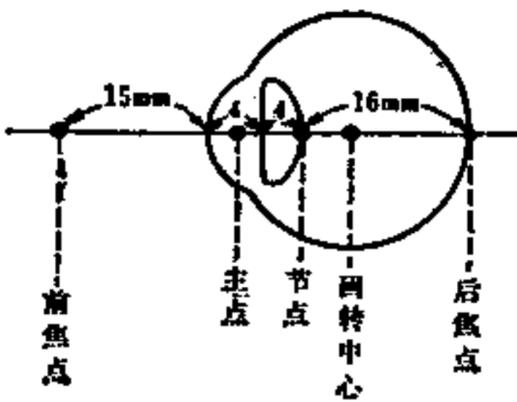


图3-8 简化眼

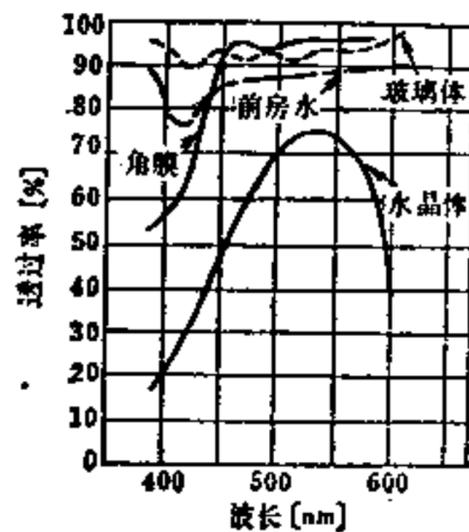


图3-9 眼球组织的分光透过率

(2) 眼睛的分光透过率 眼球内部各组织的分光透过率曲线如图 3-9 所示。晶状体的颜色和透过率随年龄而变化，青年人的峰值为 $520\sim 550\text{nm}$ ，呈黄色。随年龄的增加峰值向

长波方向移动，呈黄红色调，透过率下降。

角膜对短波紫外线吸收好，在 300nm 以下不透过。而且因为晶状体吸收长波紫外线，所以发出荧光。

(3) 光与瞳孔 瞳孔的大小随相应的亮度而自动地变化。瞳孔的大小除与亮度有关外，还受眼睛的调节和辐辏、近视等眼的屈光状态、年龄和精神状态等的影响。当瞳孔缩小时：(1)到达网膜上的光减少；(2)眼睛的像差减少；(3)造成焦点的深度加深等结果。

(4) 光和网膜 在视网膜上含有称为视紫质的红色素，在光照射下，颜色消失而变为白色。再到暗处，网膜又恢复成红色。这种视紫质吸收光波的最大值在 500nm 附近，与暗视觉时的相对光谱灵敏度曲线的峰值波长相近似，这与视网膜的暗适应过程有关。从生物化学方面看，由于光的照射，视网膜中形成磷酸，脂肪类分解就减少。另外，由于光的照射，引起视网膜上电的变化，对于鱼类来说，当视细胞的状态发生变化时，可认为是色素颗粒的移动。

(5) 光的伤害 要注意到光以及伴随着它的紫外线和红外线有伤害眼睛的可能。300nm 以下的短波紫外线可引起紫外线眼炎（紫外线角结膜炎），出现严重症状。还有，在短波紫外线的照射下会患皮肤癌。

由于职业上的原因而常年受红外线照射可产生白内障。还有当直视高亮度光源（如激光和太阳光）时，会引起黄斑烧伤，有造成不能恢复的视力减退的危险。为了预防上述的眼伤害，可带有适当透过率的墨镜。

3-1-5 视觉系统的异常

(1) 近视 看近物体时，看得清楚，看远的物体就有些不清楚。正常眼看远物时由于睫状肌的紧张，物像正好聚焦在视网膜上。但是，如果像图 3-10 所示的那样，眼轴的长度比正常的长些，或眼的长度虽然正常而角膜和晶状体的屈光力增强，或看远方时睫状肌不紧张，远处物体的像集结在视网膜的前方，而在视网膜上的像就模糊不清，这就是近视眼。近视眼在看近物时，由于像向后移动而看得清楚，即是说要使物体接近眼睛才能看得见，所以近视眼要配带凹透镜的眼镜，使远的物体正好成像在视网膜上。

由于睫状肌持续紧张而引起的近视，如果是早期，是可以治疗的。这样的近视称为假性近视。假性近视可以用观看夜晚天空的星来进行治疗，而对一般的近视就不适用了。

(2) 远视 与近视相反，眼轴的长度比正常的短，睫状肌放松时，远物体的像在视网膜后方聚焦，这就是远视眼（图 3-11）。在这种情况下，如果睫状肌紧张起来，就能在视网膜上成像，那么就可以看清物体。然而由于睫状肌经常紧张易产生视觉疲劳，也会提早形成老花眼。远视的人要配带有凸透镜的眼镜以进行矫正。

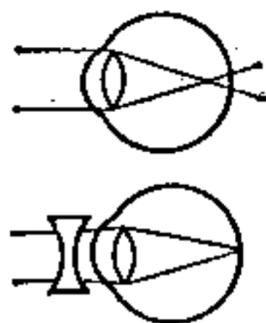


图3-10 近视

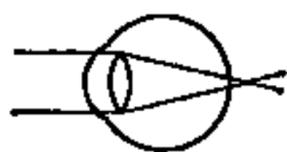


图3-11 远视



图3-12 散光

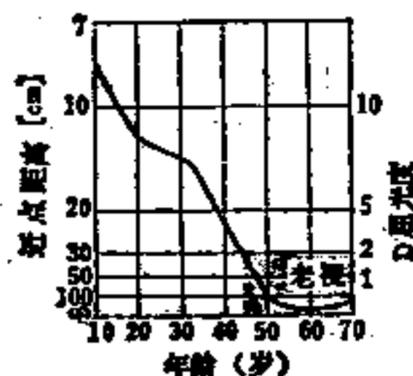


图3-13 年龄和近点距离

(3) 散光 眼球变形,特别是因角膜而引起的变形。如图 3-12 所示,由于物体的像不能聚焦而看不清,同时也易产生严重的视疲劳。散光要配带有圆柱形透镜的眼镜来矫正。

(4) 老花眼 看近物体时,由于水晶体收缩,睫状肌紧张,从而牵引了晶状体周围的睫状韧带放松,此时晶状体靠本身的弹性成球形而变厚了,从而也增强了屈光力。因此,晶状体弹性好的青年人,即使将眼睛移至十分接近观察物,成像焦点也不模糊。但随着年龄的增长,水晶体硬化,聚焦的近点距离变远。近点距离与年龄的关系示于图 3-13。大约年龄到 42 岁以上的人,聚焦点在 30cm 距离处,所以读报时必须带老花镜(凸透镜)。

3-2 照明生理

3-2-1 视力

视力是表示眼睛能识别细小物体形状到什么程度的尺度。二个点互相接近,到眼睛不能分辨出两个点,而看成一个点时,就是看不见了。若二个点处在刚刚能识别出的界限时,那

么这二个点到眼睛的连线夹角(视角) θ ,以分 $\left(\frac{1'}{60}\right)$ 为单位来测量,其倒数 $1/\theta$ 就为视力。

通常采用兰道尔环作为检查视力的标准视标。如图 3-14 所示,在 5m 远处观察直径为 7.5mm、环粗和开口均为 1.5mm 的兰道尔环,此时环的开口形成的视角为 1 分。如果在 5m 的视距,刚刚能识别这个开口的方向时,则视力为 1.0。若刚刚能识别比这大一倍的视标,则视力为 0.5。

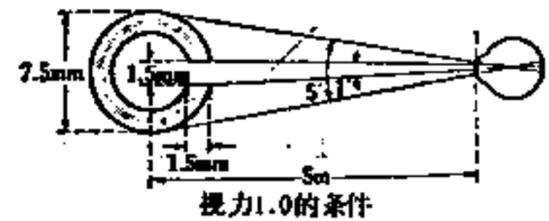


图3-14 兰道尔环

像上述这样的,以开口或环粗的 5 倍为直径的黑色环称为兰道尔环,作为视力测定的标准视标。有时,也可用与此有同样可见度的数字、文字或图形等来测定视力。

3-2-2 中心视力和周边视力

通常所说的视力,是所谓注视点的视力,是指视网膜中心窝处的视力,正确地说应称为中心视力。而在中心窝以外的视网膜周边处的视力称周边视力,以加以区别。

能鲜明地看清物体的范围,只是在注视点附近,而当离开注视点 2° 时,视力就下降约 $1/2$ 。而在周边处视力有显著的降低。按这种情况做成的模型图表示在图 3-15 的左侧。因为明视觉是锥体视细胞起主要作用,所以锥状体最密集的中心窝处,视力最好。暗视觉时,锥体功能消失,转化为杆状体视力,中心窝视力消失,离中心窝处 10° 的周边视力最好。在黄昏视觉时,锥状体和杆状体两种视力同时存在,其视力呈现如图 3-15 中间的模型图那样的情况。

如上所述,虽然周边视力比中心视力差,但是对于发现运动的物体等,周边视力非常锐敏,所以不能忘记它起着重要作用。并且,要使反映在眼睛里的整个物体鲜明可见,无疑还必须借助眼球的运动来经常变换注意点。这一点与大脑的记忆机构有关,而且也是尽可能正确地识别外界物体的缘故。

3-2-3 亮度和视力

视力随着亮度而显著地变化,在一般亮度情况下,随亮度的增加而提高。图 3-16 为亮度与视力的关系曲线。直至约 $3000\text{cd}/\text{m}^2$,视力都在上升,在此亮度以上出现峰值。而且,约从 1

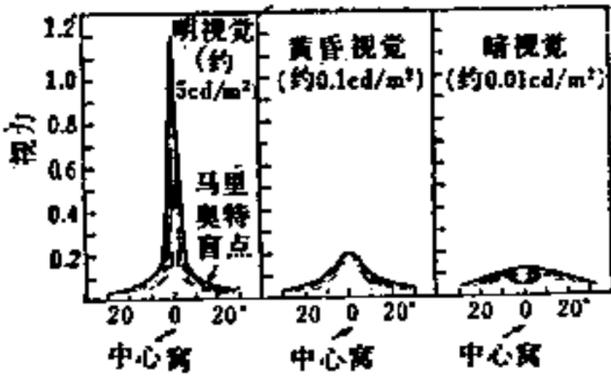


图3-15 中心视力和周边视力

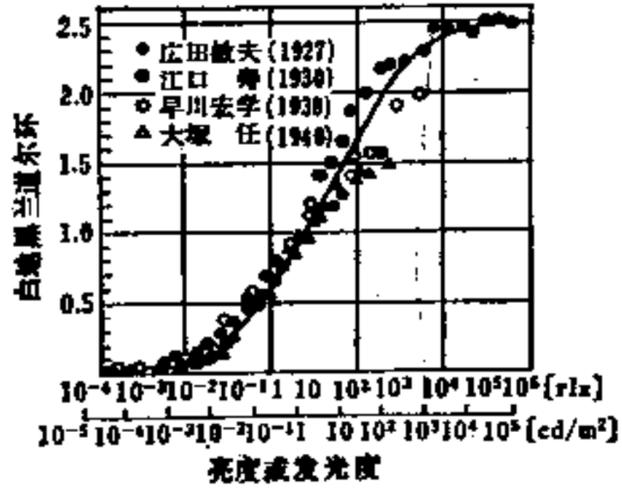


图3-16 亮度和视力的关系

至 100cd/m^2 的亮度范围内，视力与亮度的对数成直线关系，符合韦伯-费希纳定律。

3-2-4 环境亮度和视力

视力不仅受注视着的物体亮度的影响，而且也受周围环境亮度的影响。图 3-17 表示出由于周围亮度和中心亮度比率的变化而引起的视力变化曲线。当周围亮度与中心亮度相等时，或周围稍暗时，视力最好。若周围比中心亮，则视力显著下降。

3-2-5 亮度识别阈值（亮度差的识别）

如图 3-18 所示，当与亮度为 B 的面相邻的面的亮度为 $B + \Delta B$ 时，眼睛刚能识别其亮度差，则 $\Delta B/B$ 就是亮度识别阈值。 $\Delta B/B$ 随 B 值变化， B 值越高，亮度识别阈值越小。 B 值在 2cd/m^2 以上时， $\Delta B/B$ 大致一定，为 $0.01 \sim 0.02$ 。 B 的亮度值在 2cd/m^2 以下时， B 值越低，则 $\Delta B/B$ 越大。这种关系还受到亮度面积的大小和周围亮度的影响。

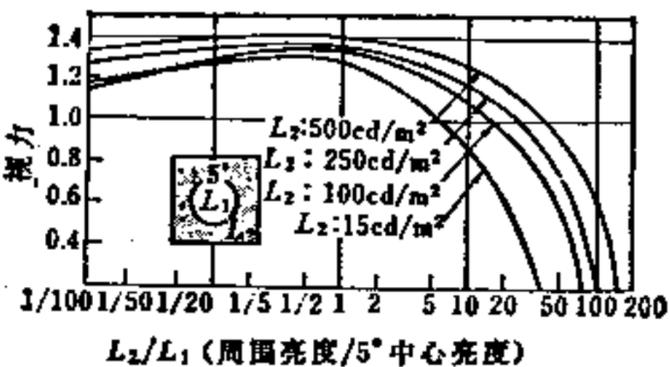


图3-17 周围与中心亮度比和视力的关系

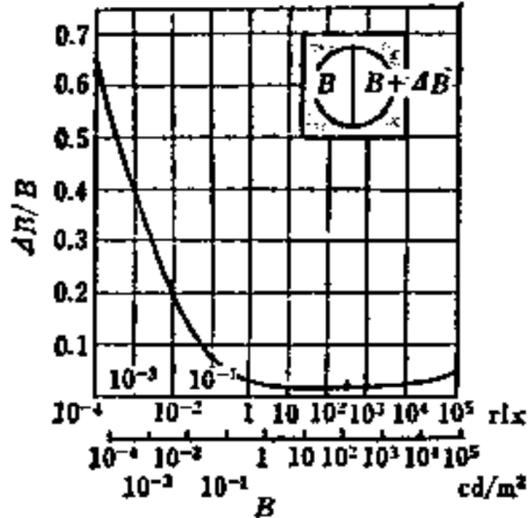


图3-18 亮度识别阈值

3-2-6 对比

被识别对象的亮度和其背景亮度之差与背景亮度之比称为对比。对比影响物体的可见度。对比通常按下式表示：

$$C = \frac{A - B}{A} \tag{3-1}$$

式中， A ——背景亮度； B ——识别对象的亮度； C ——对比。

当 $B > A$ 时，例如黑板上的文字等，用负号表示为宜。另外，常常是用 C 的 100 倍将对对比表示成百分数。

图 3-19 给出了对比的百分数、亮度和视力三者的关系。这种关系对于负对比也没有显

著的差异。

3-2-7 曝光时间和视力

为了清楚地看见物体，需要有一定的时间，如果视标显露给眼睛的时间不足，则视力下降。

图 3-20 给出了曝光时间、照度和视力的关系。如果照度提高，则要看清物体所需的时间就短。约在 1/10 秒的短时间内，视力受到曝光时间的影响。然而，比以上的曝光时间长时，尽管延长曝光时间，也不能改善视力。

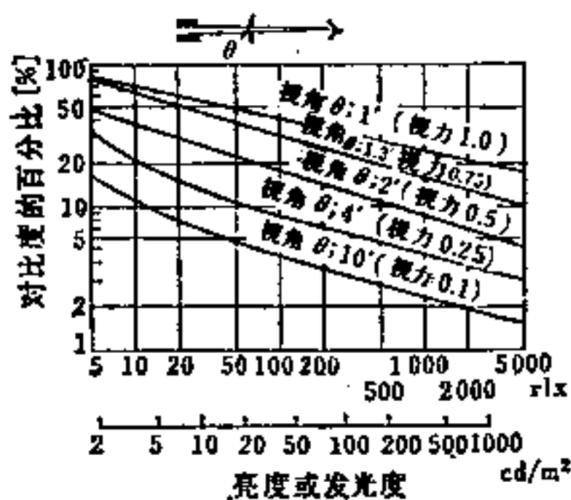


图3-19 对比、亮度和视力的相互关系

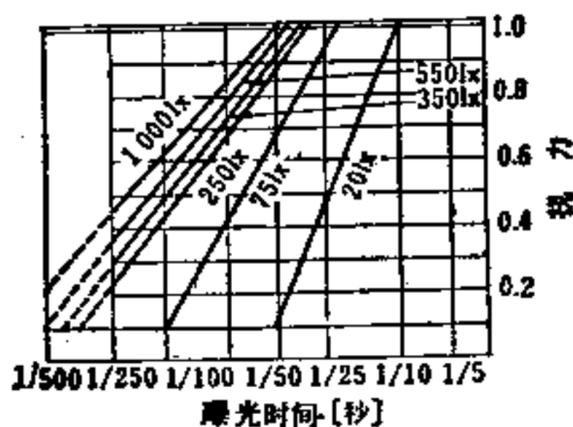


图3-20 曝光时间、照度和视力的关系

3-2-8 物体的运动和视力

被观察对象运动时，与视力的关系不在于物体的运动速度，而在于物体每秒钟相对于眼睛视方向变化如何的所谓角速度。图 3-21 给出了运动物体的角速度、亮度和视力的关系。

3-2-9 闪烁临界值

眼睛看运动物体时，物体在视网膜上成像一闪即失，接着进行下一次成像，这样反复的动作在眼睛上形成时亮时灭的不连续的光。用每秒亮灭的频率来表示眼睛能分清闪烁的界限。这个界限就是闪烁临界值（闪光融合频率）。闪烁临界值与亮度的关系如图 3-22 所示。

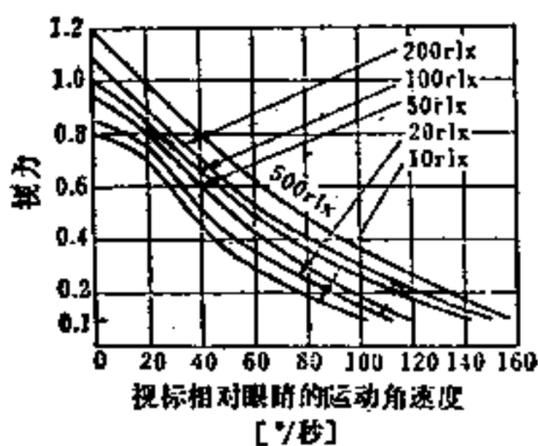


图3-21 角速度、亮度和视力的相互关系

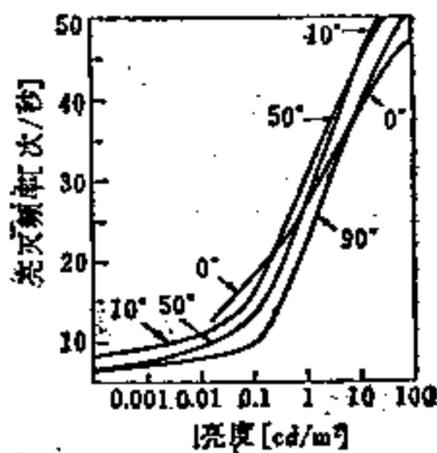


图3-22 亮度与闪烁临界值

由图可见，通常亮度增加，闪烁临界值提高，但随视网膜部位的不同，闪烁临界值也有差异。特别要注意的是在高亮度时视网膜周边部分的临界值比中心部分的临界值要高。

与在暗处闪烁临界值降低有关，对于运动物体的速度，在暗处看起来觉得快。例如记录盘等，在亮处转得慢，而在暗处看起来转得快。

3-2-10 视野

眼睛注视着正前方的某一点时，同时看见的范围称为视野。视野的大小除因亮度而变化

外，还随颜色、对比、物体的动或静与大小，以及人种等的不同而变化。图3-23是在黑背景白视标上测得的视野。

在通常亮度下，越亮则视野越宽广。但是在高亮度条件下，由于瞳孔缩小的影响而使视野变得窄小。

3-2-11 明暗适应

眼睛不但在直射日光下能看见物体，而且在月光下也能看清物体，这单靠变化瞳孔的大小来调节亮度是不够的。为此，要大幅度地变化视网膜的灵敏度，而在亮处时用锥体，在暗处时用杆体，使这两种视细胞分别起作用。

图3-24给出了由于进入暗处，引起光感觉的最小亮度随经过时间而变化的曲线，它由A和B二部分组成。A表示锥状体在暗适应中经5分钟达到界限值，B表示杆状体在暗适应中约经过30分钟达到界限值。相反，从暗处到亮处时，经过1分钟就可以恢复到原来的感光灵敏度。



图3-23 视野

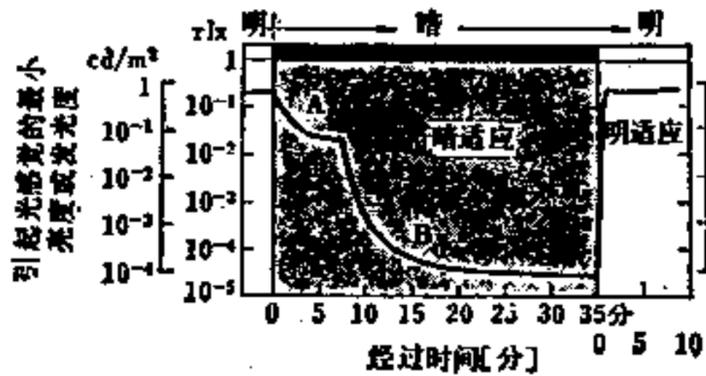


图3-24 暗适应和明适应

上述的明暗适应是含于视网膜上的视紫质等视物质光化学反应的结果，因此适应需要有相当的时间才行。

为了补充说明这个问题，在图3-25中给出了视神经机能引起的瞬间α适应和β适应。

3-2-12 布尔金现象

因为在亮处是视网膜的锥状体起作用，在暗处是杆状体起作用，所以在亮处和暗处对光谱的灵敏度曲线也不同。例如在亮处看起来亮度相同的红色与蓝色，在暗处红的看起来变暗而蓝的看起来变亮。这就叫做布尔金现象（参看5-1节图5-2）。亮度约在2cd/m²以上时的亮的光谱，最大相对灵敏度在555nm的黄绿色处，而亮度约在0.01cd/m²以下时的暗的光谱，最大相对灵敏度移到507nm处。这时光谱的色感觉消失了。

3-2-13 贝少莱得-布约克现象

虽然颜色相同，但由于亮度不同而对颜色的感觉也是变化的。通常亮度越高，色调有向黄色或蓝色偏移的倾向。这就称为贝少莱得-布约克现象。

图 3-26 给出了不同亮度条件下，看起来色调相同的波长连成的曲线。由于亮度不同，有的颜色有显著的色感变化，有的颜色则大体上没有什么变化。蓝色 (474~478nm)，蓝绿色 (503~507nm)，黄色 (517~575nm) 等，虽然亮度不同，但色调并不变化。这里所用的亮度单位称为托兰德[⊖]。

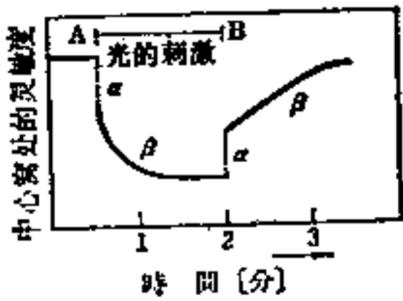


图3-25 α适应和β适应

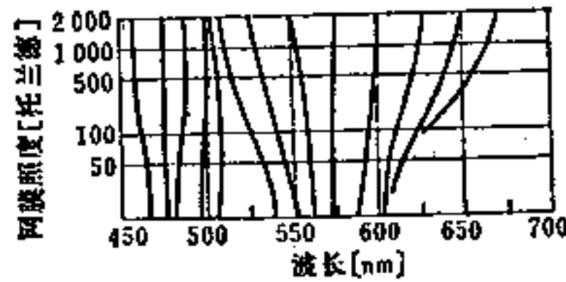


图3-26 贝少莱得-布约克现象

3-2-14 色觉学说

认为在视网膜上存在着对红、绿、蓝三种波长的光有特强反应的视细胞的杨格-赫尔霍兹三色学说 (1807, 1852)，在实际应用上是很有效的。但是也存在与三色说相对立的、赫林的对立色学说 (1878)，它在解释产生对抗色的残象和红绿色觉异常方面是方便的。对立色学说认为，在视网膜上有三种感光物质，由于光的作用而分解或合成，从而产生了颜色感觉。这些物质分解而产生红、黄、白的色感觉，这些物质合成而产生绿、蓝、黑的色感觉。由于对立色学说有红、黄、绿、蓝四种基本色感觉，因此也称为四色学说。

最近由于电生理学的进展，解释了一些更复杂的色觉机理。Granit (1947) 把极微小的电极放在动物的视神经内，研究因光的刺激而引起的视神经纤维的电位变化，结果认为有与色觉有关的调节细胞，有与明暗的感觉有关的控制细胞。与色觉有关的调节细胞有六种。Hartridge (1941) 提出了多色学说，他假定在视网膜上有 7 种颜色受容体。这 7 种色受容体的分布中，有的在视网膜中心密度较大 (红、橙、绿、蓝绿、蓝紫受容体)，有的是越接近视网膜周边越密度大 (蓝和黄受容体)，用来解释各种色觉现象。本川 (1953) 作了往人眼上通电引起光感觉的实验，确认在视网膜中心附近有红、绿、蓝受容体，在视网膜周边有黄和蓝受容体。还有富田等直接在视细胞上接入电极，得到了包含三色说的结果。

最近的色觉学说，认为在视网膜上存在多种颜色的受容体，根据以电生理学为主的实验研究，证明这些受容体在视网膜上的分布不是均匀的。

3-2-15 色觉异常

先天性的色觉异常者，对所有的颜色都没有色感觉的全色盲是比较少的。有一般红绿色觉异常者，日本男子占 5%，女子则极少。可区分为第一色觉异常 (红色盲，红色弱) 和第二色觉异常 (绿色盲，绿色弱)。图 3-27 中表示，第一色觉异常者特别在 495nm 附近没有色感觉并且在光谱的红端部分完全没有感觉，因此光谱的长波端缩短。

第二色觉异常特别是在 500nm 附近没有色感觉，但对于光谱的红端部分有感觉，因此光

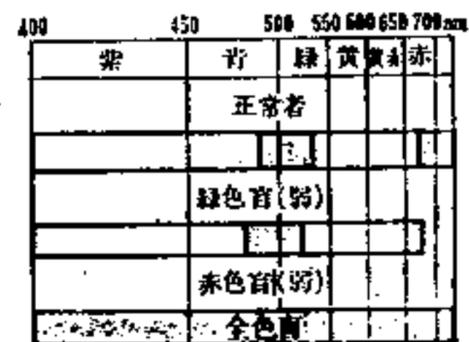


图3-27 各种色觉异常者的光谱色可见度模型图

⊖ 视网膜上的照度单位，瞳孔有效面积为 1mm²时，看 1cd/m²亮度时视网膜上的照度称为 1 托兰德。

谱不缩短。这是由同性的劣性遗传所引起的。

虽然也有第三色觉异常（蓝黄盲）的说法，但在日本还没有被确认。

3-2-16 眩光

若视野内有亮度极高的物体或强烈的亮度对比，则可引起不舒服或造成视觉降低的现象，称为眩光。这是影响照明质量的最重要因素。眩光按其评价的方法可分为失能眩光与不适眩光。

引起眩光的生理原因主要有以下几点：（1）由于高亮度的刺激，使瞳孔缩小；（2）由于角膜或晶状体等眼内组织产生光散射，在眼内形成光幕；（3）由于视网膜受高亮度的刺激，使适应状态破坏。

眩光的产生多数是因光源亮度的缘故。在这种情况下，眩光如图 3-28 所示；（1）周围暗，眼睛的适应亮度很低；（2）光源的亮度高；（3）光源靠近视线；（4）光源的表观面积越大，光源数目越多，则眩光越显著。

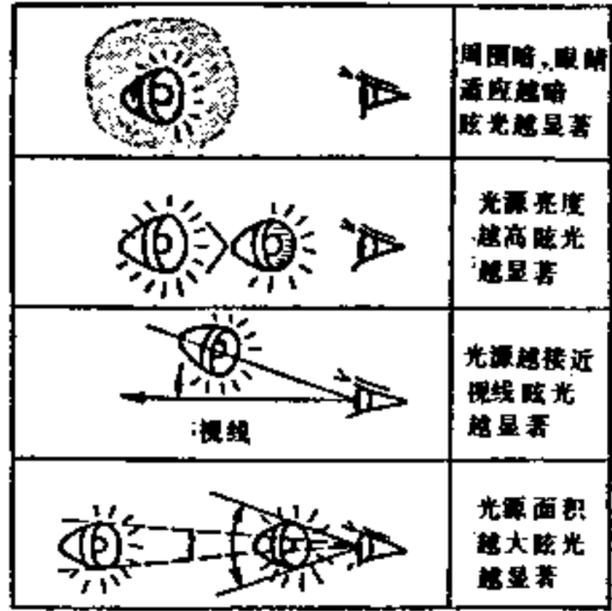


图3-28 影响眩光程度的条件

关于不舒服眩光，如图 3-29 所示，给出了注视光源时的舒适和不舒适的界限（BCD）。

3-2-17 亮度适应和明暗变化

当视野内明暗急剧变化时，由于眼睛的明暗适应不能立即跟着变化，从而引起视觉降低与不舒服。因为眼睛从暗到亮时亮度适应快，而从亮到暗时亮度适应慢，因此特别有问题的是隧道或地下道的入口处。对此，采用过渡照明的手法。图 3-30 中用曲线表示能在暗处继续保持一定视力的亮度界限。当从暗处转移到亮处时，引起视力降低的情况，一般是在 1 秒钟以内。

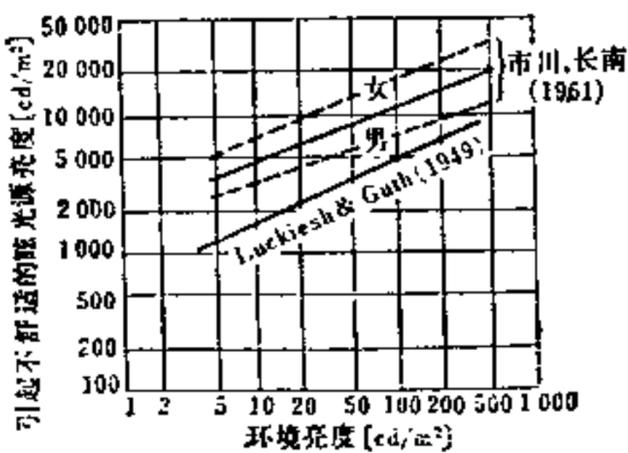


图3-29 注视光源时的BCD (Luckiesh和Guth)

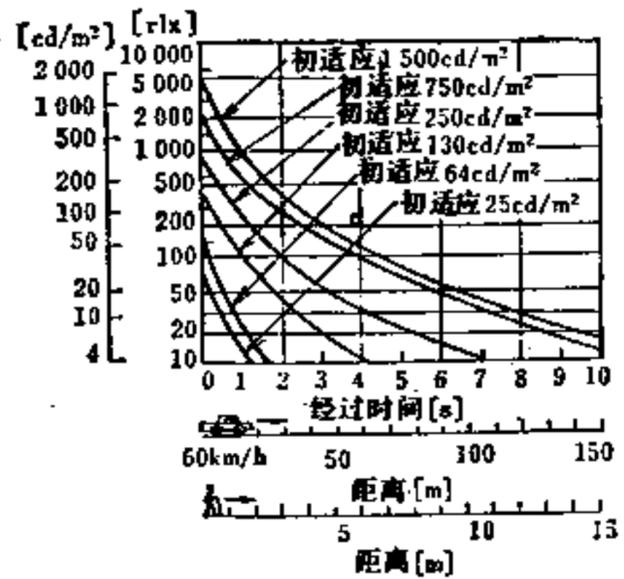


图3-30 过渡照明曲线

3-2-18 视疲劳和亮度

长时间持续在恶劣的照明环境下进行视觉工作时，易引起疲劳。疲劳可分为全身疲劳和眼睛局部疲劳。全身疲劳主要表现为以疲倦、食欲不振、肩上肌肉僵硬发麻等为主的自律神

经失调的症状。眼睛疲劳表现为眼痛、头痛、视力下降等症状。特别是作为调节筋的睫状肌的疲劳，也与近视的产生有关。

图 3-31 是在各种照度条件下，进行 30 分钟的精细抹消作业[⊖]后，由于睫状肌疲劳而测得的调节时间变动率数据（把作业前的调节时间作为 1.0）。图中（a）是使用对比良好的抹消用纸时的，（b）是使用对比小的抹消用纸时的结果。两组数据表明，500lx 是眼睛疲劳小的最低照度值，而 1000~2000lx 的照度是所希望的。

3-2-19 适宜照度

如前项所述，进行持续时间长的精细视觉工作时，1000~2000lx 的照度是需要的，一般的学习与办公等视觉工作，最低要有 500lx 的照度。

把文字的易读性作为心理学上的定量化指标，研究了铅字的大小、照度、易读性三者的关系，其结果表示在图 3-32 中。由此，根据文字的大小，就能在图上求出适宜照度。

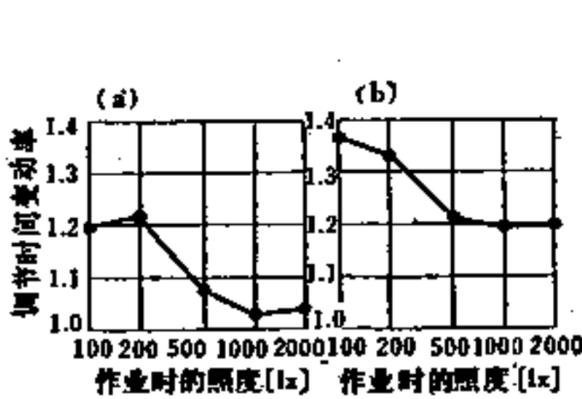


图3-31 30分钟抹消视作业后的视疲劳

- (a) 对比度大的抹消视作业视标纸
- (b) 对比度小的抹消视作业视标纸

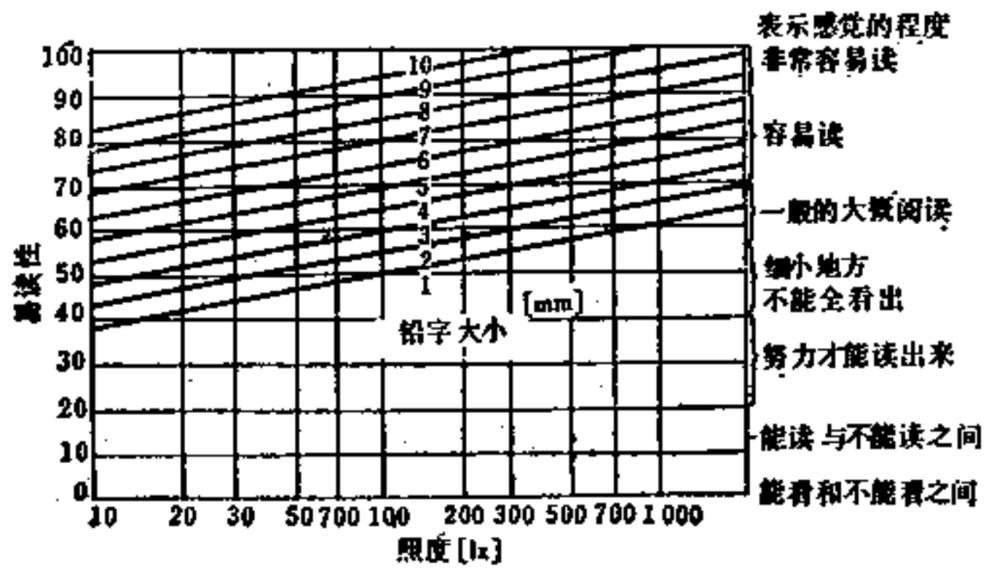


图3-32 照度与易读性的关系

3-2-20 明视觉的五个条件

为了使眼睛能清楚地看清物体，必须有适当的下列条件：（1）明亮度（照度或亮度）；（2）色（物体的颜色和色对比，光的颜色）；（3）对比（亮度对比）；（4）大小（取决于物体的大小和视距的视角大小）；（5）物体的运动和显现时间。为了能很好地看清物体，对上述五个条件中的每一项，均有研究的必要。

3-2-21 照明的数量和质量

照明分别从数量和质量来考虑时，数量就是照度 (lx)，质量则包括（1）眩光；（2）光色及分光分布；（3）阴影；（4）照明器具；（5）明暗变化等种种因素。对于可见度来说，最重要的是有无眩光，但通常如果照明质量良好，则数量 (lx) 高的就看得清楚。

3-3 照明心理

3-3-1 眼睛的绝对灵敏度

我们的眼睛对光具有非常好的灵敏度。Hecht 等测定了光被眼睛感觉的最小能量^[1]。

[⊖] 抹消作业即一种视觉劳动，观察者从许多视标符号中抹消掉其中的某种，让眼睛不停的注视和寻找至使视疲劳。
——译者注

从感觉到光的正确率为60%时的光能量 ($2.1 \sim 5.7 \times 10^{-17} \text{ J}$), 确定出光的量子数, 在波长为510nm时为54~148个。若考虑到角膜和晶状体的吸收和散射以及视网膜的吸收等等, 则使视网膜兴奋的最少光量子数约为5~14个。据理论研究, 一个柱状体如果吸收一个光子就能引起反应时。则就可以得到一个光子就能使眼睛感觉到光的结论〔2〕。

如上所述, 将眼睛刚刚能够辨认光的存在的强度(能量)称为光觉阈。这个光觉阈随波长、面积和呈现时间而变化。

在图3-33中的黑圆点表示视觉阈值随波长的变化〔3〕。此曲线是在暗适应时, 距视网膜中心窝 8° 视野角处测得的。在此曲线上的光强度, 不论哪个波长的光看起来都是无色的。并且, 在波长为505nm时灵敏度高。这是对杆状细胞的灵敏度曲线。其次, 在同一图上的白圆点表示暗适应时, 在视网膜中心窝处测得的阈值相对于波长的变化。实验中视野为 $1.5'$, 此视野只与锥状体有关, 而与杆状体无关。最高灵敏度在波长562nm处, 与杆状体灵敏度曲线相比, 灵敏度要低100~1000倍。在此曲线的各波长处, 能量高的地方是色感觉领域。

随着呈现时间 T 越长, 光源的面积 A 越大光觉阈 I_0 就越低。关于这个关系有如下两个定律:

普勒赫定律: $I_0 \times T = \text{常数}$

李克定律: $I_0 \times A = \text{常数}$

Karn 在视网膜中心窝处, 变化呈现时间 T 后, 求出了光感觉阈值 I_0 〔4〕。此结果在视角 $3'$, 呈现时间为0.1秒以下时, 普勒赫定律才能成立。在此定律成立的区域内, 呈现时间 T 越小, 阈值 I_0 越高, T 值越大 I_0 值越低。当呈现时间在0.1秒以上时, 阈值 I_0 不变, 与呈现时间 T 无关。普勒赫定律不仅在中心窝处成立, 而且在周边网膜上也成立〔5〕。至于在李克定律成立的区域内, 面积 A 越小阈值 I_0 越高, A 值越大阈值 I_0 越小。与此有关的实验结果将在3-3-8节中阐述。

3-3-2 客观亮度和主观亮度

当光线进入我们的眼睛时即感到“明亮”, 这个“明亮”感觉, 随光线增强而加大。光线强弱可用物理量来测量, 而用眼睛的视感觉来评价的是光的心理物理量, 但要与我们对光的“明亮”感觉的心理量区别开来。通常对应这种“明亮”的心理物理量用亮度表示。与亮度相对应的“明亮”感觉用主观亮度表示。亮度和主观亮度之间必须注意下面的事项〔6〕:

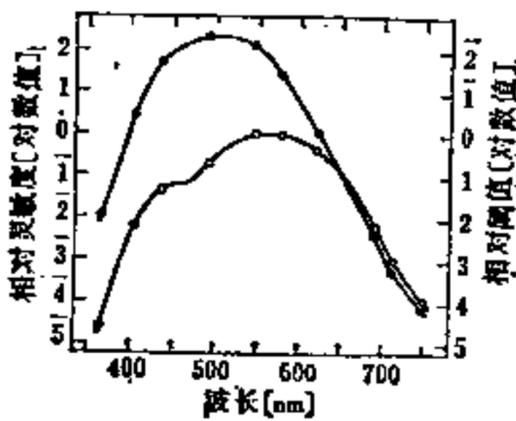


图3-33 光感觉阈随波长的变化
(据Wald资料)

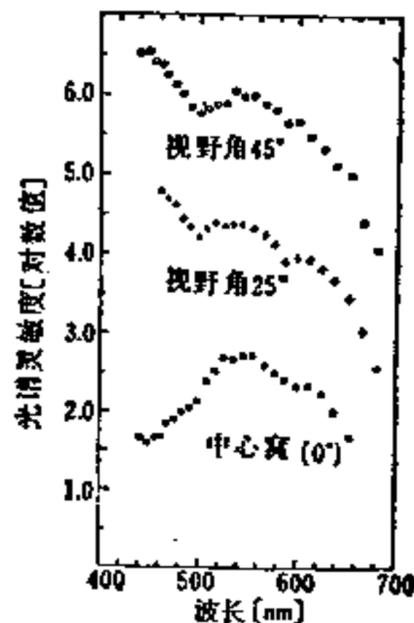


图3-34 视网膜上不同位置的光谱灵敏度变化
(据Wald资料)

(1) 心理物理量的亮度, 是假定一个标准观察者在明亮条件下, 把辐射能转换为光感觉的量度。但是由于每个人的光谱灵敏度与标准观察者的光谱灵敏度不同, 这是因为在每个人的眼球内由于散射、吸收等不同, 年龄也同时, 所以其绝对光谱灵敏度也有所变化。

(2) 物理量的亮度, 是以标准观察者视网膜中心(视野 2°)的光谱灵敏度(灵敏度的波长特征)为基准的。但是人们不一定总是限于用视网膜的中心看物体。人的视网膜周边部分的光谱灵敏度如图3-34所示, 与中心部分有相当的差异〔7〕。

(3) 人眼的灵敏度由于环境亮度和适应状态的不同而有很大的变化。心理物理量的亮度与这些状态无关。关于此内容在下一节详述。

3-3-3 眼睛的适应

眼睛的灵敏度, 依周围亮度的不同, 有很大的变化。通常在暗处灵敏度高, 在亮处灵敏度低。分别称此现象为暗适应或明适应。从亮处急速进入到暗处时, 或者相反从暗处急速到亮处时, 眼睛不能立即适应亮度的急剧变化。特别是暗适应需要相当长的时间。

图3-35中给出了暗适应时阈值变化的时间经过〔8〕。此曲线称为暗适应曲线。被试者在实验之前, 对 $1000\text{cd}/\text{m}^2$ 的光线亮度适应2分钟, 视野 2° , 在视网膜中心窝处(0°)和离开中心窝 2.5° 、 5° 及 10° 的地方测量。如图所表明, 因视网膜的位置不同曲线形状也不同。除在中心窝以外, 此曲线可分为两段。曲线的第一段变化快, 曲线也短, 是锥状体起作用。曲线的第二段变化慢, 是杆状体起作用。当视野为 0° 时, 只有第一段而无第二段。据推测在中心窝只有锥细胞。

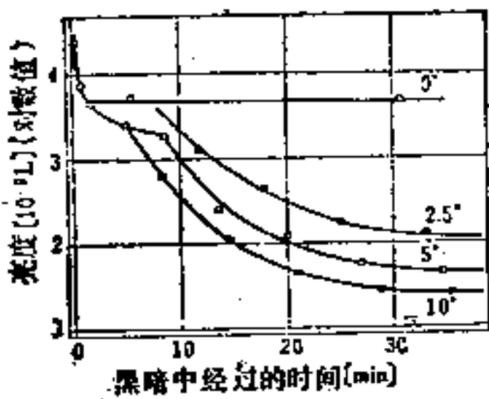


图3-35 视网膜上不同位置的暗适应曲线
(据Hecht资料)

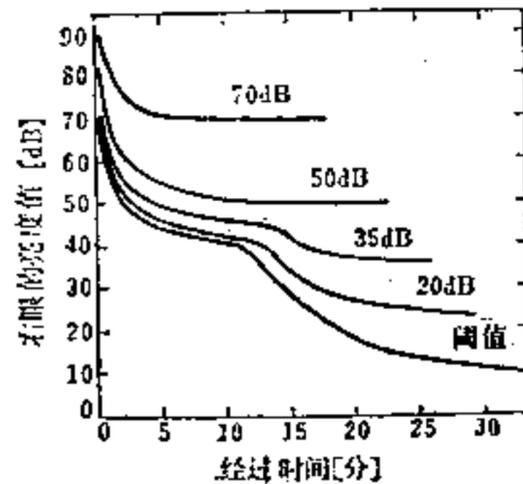


图3-36 各种亮度水平下的适应过程
图中参数为左眼的适应亮度(三名被试者的平均值, 据Van den Brink资料)

上述结果表示, 从亮适应状态到全暗适应止的光感觉阈值的变化经过。图3-36表示出在非完全黑暗的各种亮度水平下, 适应过程的灵敏度变化〔9〕。在此测定中, 左眼是在20, 35, 50和70dB (0.32×10^{-4} , 1.0×10^{-3} , 0.032 和 $3.2\text{cd}/\text{m}^2$)的亮度水平下持续适应25分钟。右眼是在106.5dB ($14000\text{cd}/\text{m}^2$)亮度水平下, 经2分钟明适应后, 与左眼有相同的亮度水平。这时由于左眼正处于暗适应, 所以比亮适应的右眼灵敏度高。这里为了研究右眼的暗适应过程, 使左眼的刺激亮度一定, 然后改变右眼的刺激亮度, 让左右都观察到相同的亮度。图中表示了把接近眼睛阈值的 $0.318 \times 10^{-6}\text{cd}/\text{m}^2$ 作为标准的 0 dB 亮度时, 纵坐标是左右眼视野亮度相同条件下, 达到阈限时的右眼亮度值(dB)。65dB 对应为 $1\text{cd}/\text{m}^2$ 。图中的光觉阈值和低亮度下的适应曲线, 约在10分钟后明显下降。这可认为除与锥状体有关外, 还与杆状体有关。

3-3-4 主观亮度的定量问题

人们感觉到的主观亮度与心理物理量的亮度之间的函数关系如果求出来了，这就是主观亮度的定量问题。

(1) 费西诺定律 主观亮度的定量问题是一种尝试，根据费西诺定律可以导出。用 L 表示主观亮度，用 I 表示亮度，则有：

$$L = k \lg I \quad (3-2)$$

式中 k 为常数。此定律表明主观亮度与（物理）亮度的对数值成正比。在照明中所用的照度等级为 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000lx 就是依此定律为基础的。尽管费西诺定律的特征只是单纯的对数关系，然而还是像上面那样的被应用。但是，作为基础的韦伯定律，由于在各种亮度条件下不是一定的，所以遭到批评。

(2) Stevens 的主观评价指标 采用 Stevens 的主观评价法测定物理亮度与主观亮度之间的关系，最初提出的标准主观亮度为 10，在以下的实验中，把感觉到的刺激亮度，让被试者用数字评价，其结果用下式表示：

$$\Psi = k(I - I_0)^\beta \quad (3-3)$$

此关系式称为 Stevens 定律。式中 Ψ 用布日尔 (bril) 单位表示。1 布日尔表示 10^{-8} 朗伯 ($0.318 \times 10^{-2} \text{cd/m}^2$) 的亮度刺激，在暗适应状态下，所能看见的主观亮度。亮度 I 的单位用朗伯 (L) 表示 \ominus ， 10^{-10}L ($0.318 \times 10^{-6} \text{cd/m}^2$) 作为 0 dB。例如 10^{-6}L 就变成 $10 \lg(10^{-6}/10^{-10}) = 40 \text{dB}$ 。 I_0 是光感觉的阈值。参数 k 、 I_0 、 β 随适应状态而变化，其值如表 3-1 所示^[10]。图 3-37 是用 Stevens 的主观亮度函数，将适应亮度作为参数，表示出的亮度与主观亮度的关系^[11]。图中白圆点虚线为适应亮度与刺激亮度相等时的主观亮度函数曲线。

表 3-1 各种适应水平下的 k , β , I_0 值(据纳谷的资料)

适应水平 (mL)	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3
k	10	9.7	8.4	7.2	5.5	3.6	2.0	0.94
β	0.33	0.332	0.335	0.34	0.36	0.37	0.40	0.45
I_0	2×10^{-5}	1×10^{-4}	3.6×10^{-4}	1.9×10^{-3}	7.8×10^{-3}	3.3×10^{-2}	1.7×10^{-1}	1.2

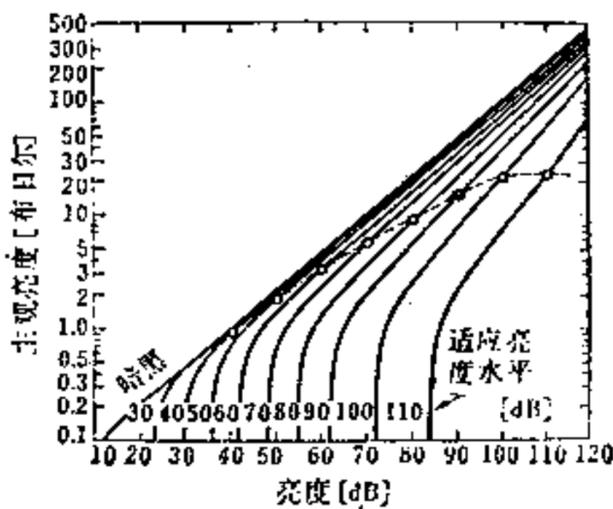


图 3-37 各种适应水平条件下的主观亮度 (据 Stevens 资料)

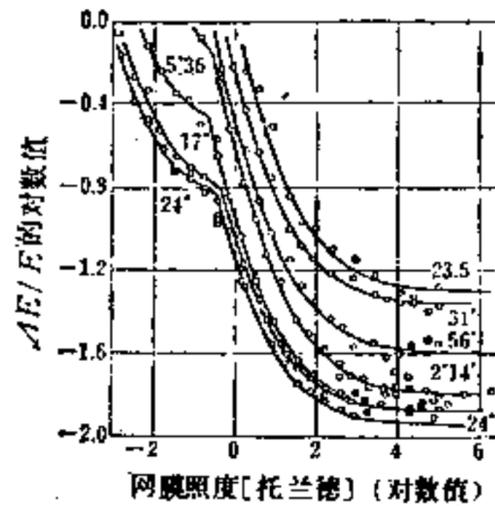


图 3-38 主观亮度差的辨别 (据 Steinhardt 资料)

\ominus 1 朗伯(L)为 $0.318 \times 10^4 \text{cd/m}^2$ 。

3-3-5 主观亮度差的辨认

亮度不同的二个面相邻近时, 我们的眼睛可以分辨怎样的亮度差别? 设一个面为亮度 I , 与另一个面之间形成的亮度差为 ΔI , 当这一亮度差可以分辨时, 则 $\Delta I/I$ 称为韦伯比。图3-38是其实验结果^[12], 并将视野的大小作为参数表示出来。横轴表示网膜照度 E (托兰德), 大的面积的亮度为 I , 瞳孔面积为 A (mm^2) 时, E 的定义为:

$$E = I \times A$$

在这个实验里, 采用直径为 2 mm 的人工瞳孔, 随横坐标亮度 I 的变化, 纵坐标有比值 $\Delta I/I$ 的相应的变化。

当网膜照度达到1000托兰德以上时, 比值 $\Delta I/I$ 几乎为一常数。而且当网膜照度低时, 曲线的倾斜变化靠近 -1 处。这样就与亮度 I 无关, 这意味着 ΔI 值不变。比值 $\Delta I/I$ 与亮度 I 的关系随视野的大小而异, 视野越大阈值越低。例如 24° 的视野与 $23.5'$ 的视野比较, $\Delta I/I$ 比值近于 $1/100$ 。 2° 以下的视野, 曲线的形式相类似。由于视野的大小不同, 使曲线的位置在垂直方向移动。对于 2° 以上的视野, 曲线约在 0.3 托兰德的地方不连续。这可认为是由于网膜上锥状体和杆状体的特性不同所致。

3-3-6 亮度对比

当注视面周围的亮度比注视面亮时, 与该面周围较暗时进行比较, 眼睛就感到前者的面较暗, 这称为亮度对比现象。此现象被认为是视网膜周围的生理抑制效果所致。

在圆形的试验视野周围放置一个环形诱导视野, 把此试验视野与放在黑暗中的有相同大小的比较视野进行比较, 调节比较视野的亮度, 使二者的亮度相同。图3-39中的各曲线, 表示出相应为各试验视野亮度值时, 比较视野的调节结果^[13]。当横坐标表示的诱导视野亮度增加时, 则开始看见的比较视野亮度感到稍有增加, 但是当诱导视野的亮度与试验视野的亮度相同时, 则所感觉到的试验视野的亮度急剧减少。

由于亮度对比的影响, 因诱导视野的面积增大而使试验视野的亮度减小^[11]。

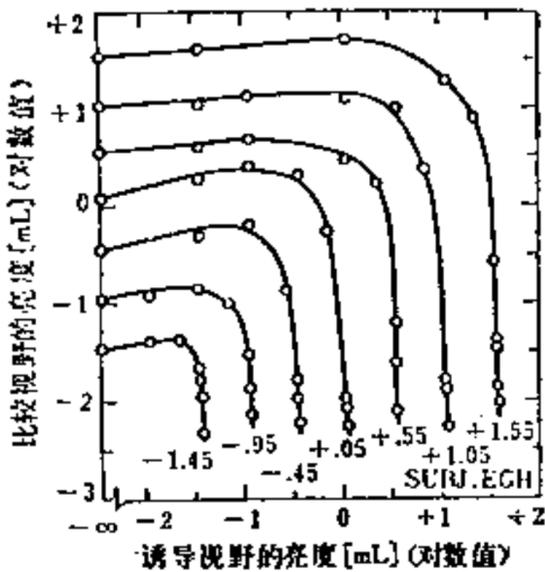


图3-39 亮度对比。图中数字是试验视野的亮度
(据Heinemann资料)

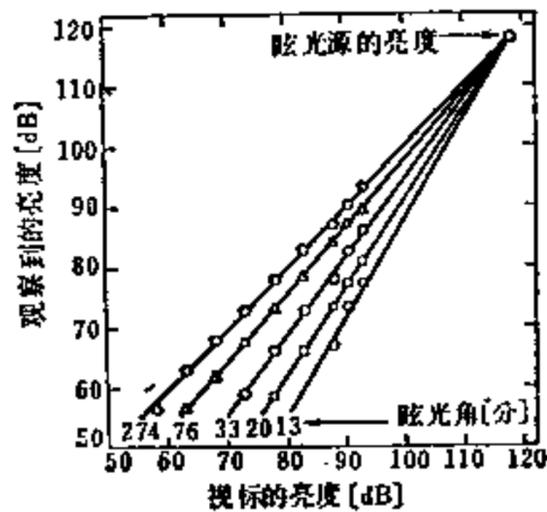


图3-40 强的眩光源对小的视标外观亮度的影响
(据Stevens和Diamond资料)

3-3-7 亮度和眩光效应

当视野内存在两种光刺激时, 弱的刺激不影响强光刺激的外观亮度, 而强光刺激却控制了弱光的外观亮度, 使外观亮度减小。这种现象称为眩光现象。图3-40中表示出强的眩光源

对小的视标亮度的影响的研究结果^[15]。横坐标是视标的亮度，以 $0.32 \times 10^{-6} \text{cd/m}^2$ 作为 0 dB 的标准值。纵坐标是所观察到的亮度 (dB)。图内的数字是眩光源与视标间的夹角 (眩光角，分)。由图可知，受眩光源影响的亮度函数是直线关系。眩光角大时 (例如 $274'$, 4.5°)，眩光源的控制能力小，直线斜率约为 1.0。眩光角小时，斜率陡。因为横坐标和纵坐标均为对数值，因此亮度函数为幂函数关系。这就意味着随眩光角按指数变化。而且全部直线汇集到一点，即眩光源它的亮度为 118dB (20000cd/m^2)

3-3-8 亮度的时间效应

图3-41表示，在明适应和暗适应条件下，光刺激的持续时间影响亮度的感觉效果^[16]。图中 (a) 是暗适应，(b) 是明适应 (95dB) 的结果。观察者把持续 1 秒钟的亮度分为 0.1~1000 毫秒短的试验光亮度。图中横坐标为试验光的持续时间，纵坐标为试验光的持续时间与峰值亮度的乘积。图中数字为试验光的峰值亮度。

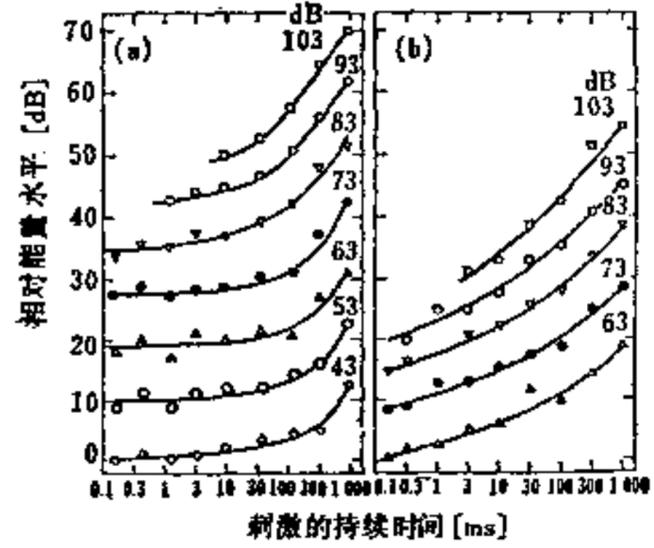


图3-41 刺激的持续时间对亮度感觉的影响

(据Aiba和Stevens资料)

如果该图的曲线是水平的，则意味着符合普勒赫定律。在暗适应时，对于短的时间符合普勒赫定律。然而明适应时，则不符合此定律。或者在明适应时，还不知道在更短的持续时间内符合普勒赫定律的范围。

3-3-9 亮度的恒定性

根据我们的经验，白纸与周围照度无关，总是白的，黑纸与周围照度无关，总是黑的，这种现象称为亮度恒定性。

如图3-42所示，把图 (a) 中五个正方形的不同外观亮度，和图 (b) 中与视野进行比较的亮度加以测定^[17]。各正方形的视角为 3° 。五个正方形每相邻的二个之间，或他们与其背景之间的亮度是不同的。五个正方形中最暗的一个 (下边的) 和最亮的一个 (中央的) 之间的亮度比为 27:1。由于亮度的增加，如果观察到的亮度不变，则亮度恒定性法则成立。如果亮度按比例增加，观察到的亮度也增加时，则网膜刺激法则成立。

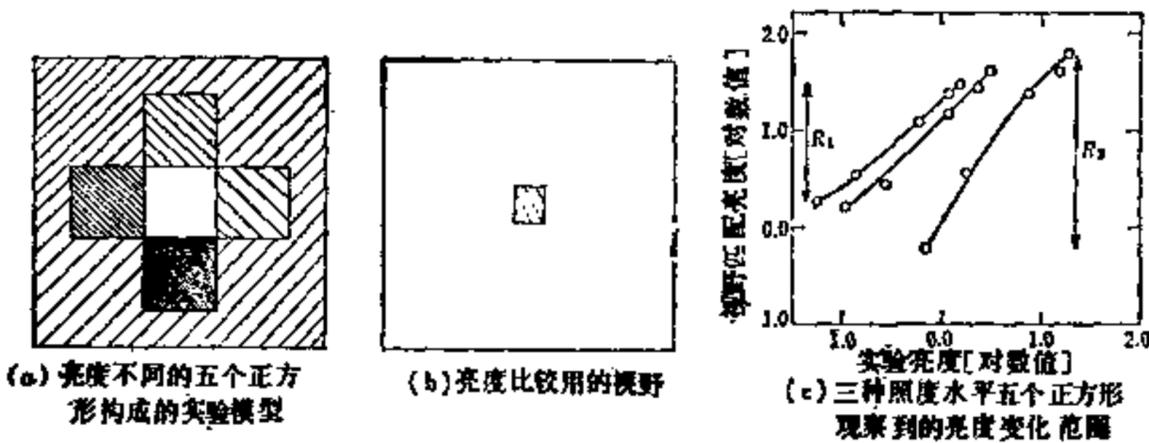


图3-42 亮度恒定性实验 (据Jameson和Harvich资料)

有三种照度水平，按 1.1 的对数单位变化时，五个正方形中较亮的中、右、上介于刺激法则和恒定法则之间。亮度稍差的左边正方形，其亮度近于恒定法则。最暗的下边的正方

形，所观察到的亮度的倾斜比恒定法则小。由此可见，由于照度增加，对于反射率高的物体，观察到的亮度增加。对于中等反射率的物体，观察到的亮度不变。而反射率低的物体，看起来变得更暗了。

图(c)中表示三种照度水平，五个正方形的亮度区域。表明了对于三种照度水平五个正方形所观察到的外观亮度变化范围各不相同。在这五个正方形的外观亮度变化范围内，最低照度水平为1.22(图中的 R_1)。最高照度水平为2.00(图中的 R_2)。由于照度水平增加，观察到的外观亮度变化范围也增加。

3-4 视觉信息

3-4-1 眼睛的亮度适应机理

人的眼睛能够适应从 $10^{-9} \sim 10^5 \text{lx}$ 这样非常广的照度范围。Werblin在鱼的视网膜上，参照这种适应情况，对各种神经细胞进行了深入的研究^[18]。固定背景光的水平，在5秒钟内，采用8种光的刺激等级，每一等级级差为0.5个对数单位，总共4个对数单位，其结果概略示于图3-43中。用实线表示的曲线是间歇性光刺激的响应函数。图中用垂直箭头表示二种不同的背景光水平。

图中用斜剖面线划的矩形部分，表示各种细胞的响应范围。按感受器细胞、水平细胞、双极细胞、阿马古林细胞和神经节细胞的顺序，其范围依次变窄，阈值也降低。这种倾向在全部的背景水平上由此图并未表示出来。例如在这个范围内，感受器细胞为4个对数单位，水平细胞为2.5个对数单位，双极细胞为1个对数单位，阿马古林细胞和神经节细胞为1个以下对数单位。

感受器细胞的响应，通常是一条曲线。当背景亮度增加时，从对间歇的光刺激开始点，将此曲线从上向右向下移动到接近饱和。其次是水平细胞，尽管背景亮度增加，由于间歇光刺激响应曲线大体按原来的形状向右平移，因此不易达到饱和。虚曲线表示因背景光线变化引起的水平细胞的直流变化。双极细胞也和水平细胞一样地动作，当背景亮度增加时，响应曲线相互平行移动[⊖]。

阿马古林细胞和神经节细胞，与双极细胞一样动作，当背景亮度增加时，其响应曲线向右移动，而且响应范围变得更窄。

这样，可以认为适应机构在双极细胞水平上就完成了。另外，用双极细胞的响应曲线测定其倾斜度时，大致可以认为是背景亮度的倒数。这样就使韦伯定律成立[⊖]。

视觉信息从感受器细胞、双极细胞、神经节细胞到视神经，顺序输送。对于这一点，水平

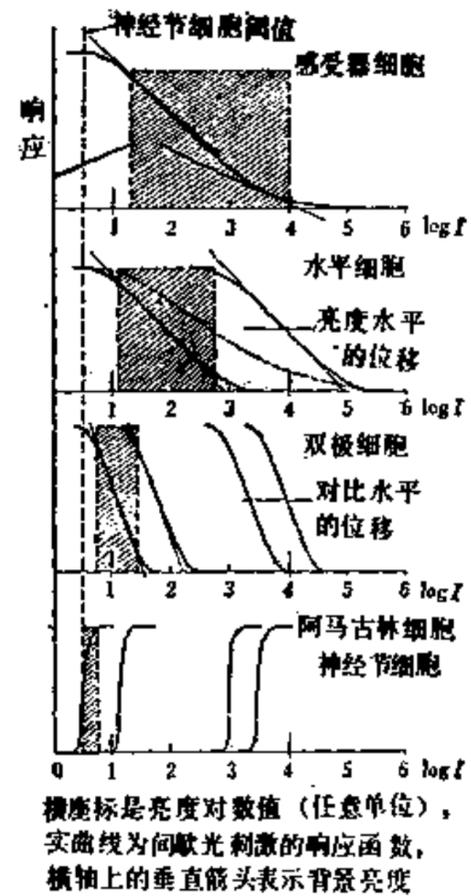


图3-43 鱼视网膜上各种细胞的动态响应范围的比较 (据Werblin资料)

⊖ 由于其感受野周边的亮度(亮度对比度)变化也引起其位置的左右移动。

⊖ 韦伯定律成立时， $\frac{\Delta I}{I} = \Delta R$ ，倾斜度 $\frac{\Delta R}{\Delta I} = \frac{1}{I}$ 。

细胞和阿马古林细胞作为信息的主要传导方向是在垂直的方向上传送信号。适应机构就是这样连接起来的细胞回路网。

3-4-2 侧抑制

Hartline 等在甲虫的眼睛上，发现其单眼之间的侧抑制作用。图3-44 是实验结果。记录出单个眼睛一条视神经纤维的活动电位〔19〕。如图 (a) 表示当强光照射在其中—个眼睛时，其视神经纤维产生的频率响应高；当弱光照射时频率响应低。而后在恒定的光线照射单个眼睛时，观测了其视神经纤维的神经脉冲。如图 (b) 所示，当照射观测中某个单眼附近的另一个眼睛时，在照射期间这个单眼的视神经脉冲数减少。这是从被光照射的另一个眼睛出来的细胞电位，干扰了正在观测中的这个眼睛，导致神经脉冲数减少。此效应称为侧抑制。用此侧抑制效应，可以说明在黑的和白的边界处轮廓突出的效果。

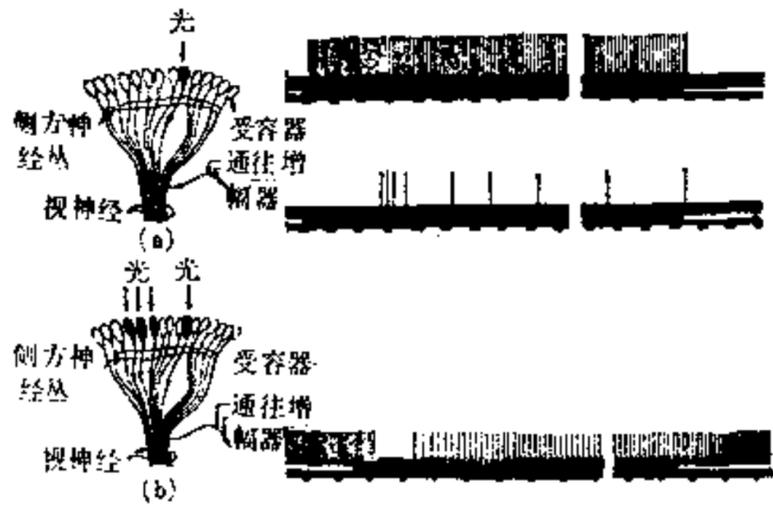


图3-44 甲虫的单一视神经纤维的测定布置 (左图) 及其活动电位 (右图)。单眼涂黑的部分为光照射的情况。

(a) 光照射时的响应。上方侧面记录的光刺激强度为下侧面记录的约 10000 倍，在 $\frac{1}{5}$ 秒的时间标记上，把白线涂黑的部分是光照射信号 (据 Hartline, Wagner 和 MacNichol 资料)

(b) 其它单眼照射时，产生的单眼活动抑制，在 $\frac{1}{5}$ 秒的时间记号上，白线涂黑的部分是其它单眼照射的信号 (据 Hartline, Wagner 和 Ratliff 资料)

3-4-3 中心—周边的感受野结构

在一根视神经上，存在着许多视细胞。Hartline 从青蛙眼睛的视神经实验发现了这样一个事实〔20〕。在一条视神经上所产生的响应的视细胞范围被命名为感受野。此范围在心理学上成为李克定律的基础。

Kuffler 进一步在猫的视网膜上，在直径约为 2 mm 的研究范围内照射光，记录其神经节细胞的放电情况。发现了在感受野的中心和周边处，放电图形不同的构造〔21〕。此结果示于图3-45。测量用的电极的端部放在中心位置上。当光线照射时，引起细胞放电，称此为“开”形放电。在周边部分划斜线的地方，当光线照射结束时引起放电，称此为“闭”形放电。在中间区域划有接近水平的斜线部分，光线照射时和照射结束时都引起放电，故称“开-闭”形细胞放电。当点光源照射时，具有这种构造的细胞称“开中心-闭周边”形细胞。与此相反，也发现了“闭中心-开周边”形细胞。

其次，当用两个点光源同时刺激“开”领域和“闭”领域时，“闭”领域控制“开”领域的放电。从这里 Hartline 等找出了与侧抑制相同的机构。在哺乳类动物的视网膜细胞上也存在着这种现象。这种感受野构造，是后来认识细胞构造的型式的基本要素。

3-4-4 识图细胞

在大脑皮层的视领域内，还存在比图3-45形式更为复杂的感受野细胞。这种细胞不能检出光的呈现与消失，却能检出图的形状和运动的方向等。Hubel 和 Wiesel 在猫的大脑皮层视领域内观测到了如图3-46那样的具有各种感受野的细胞〔22〕。他们把这种细胞命名为单纯形细胞。在该图的 (a) 和 (b) 内，中心部分较长，其两侧为周边部分，是轴对称的。(a) 是兴奋性领域；(b) 是抑制性领域。图 (c) 与 (b) 相似，周边部分是非对称的。(d)

虽然是轴对称的，但中心部分较宽。(e) 是以一条直线为界，在两侧分别为兴奋性领域和抑制性领域。

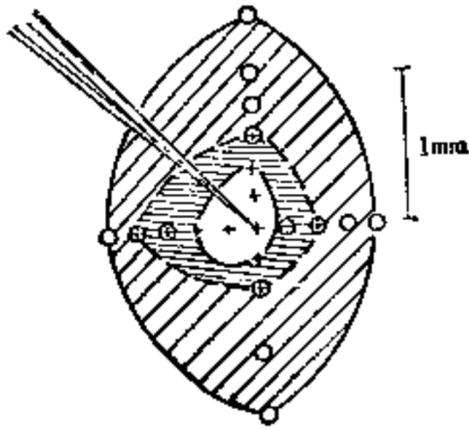


图3-45 神经节细胞的感受野内
放电分布

所用点光源的强度是受容野中心阈值的100倍左右中心区(印有+的部分)；“开”放电斜剖面区(印有O的部分)；“闭”放电中间区(水平剖面线部分，印有⊖的部分)；“开-闭”放电

在(a) 的场合，狭缝形的光与感受野的轴向相一致时，它的细胞响应就增强，与轴向相垂直时，响应减小。在(b)、(c) 和(d) 的场合，线状影与感受野的轴向相一致时，细胞的响应增大。在(e) 的场合，光和影的边界在这条直线上一致，既有兴奋性领域上的光，又有抑制性领域的影时，细胞响应就大。这种细胞是能检出狭缝形的光和线状的影，以及光和影的边界的细胞。

另外，这些细胞还能够说明上述的关于网膜上“开中心-闭周边”或者“闭中心-开周边”形细胞的综合作用(图3-47)。

在大脑皮层视领域里，也存在着只对其他特定方向的运动有响应的细胞，或者只对图形的特定性质有响应的细胞(复杂形和超复杂形细胞)。Gross 在猿猴的大脑皮层下侧叶上，找到了对五个指头那样普通手形状有良好响应的细胞^[23]。

3-4-5 视网膜上的色觉信息

Marks 等用微光分光法一个个地测定了人和猿猴的视网膜中心窝周围的锥状体的分光吸收曲线^[24]，其结果示于图3-48。被测定的10个锥状体的分光吸收曲线的最高吸收波长，从低的顺序开始分为2个、4个、4个的三组。最高吸收波长的平均值分别为445、535、570 nm。从这里可以确信，人和猿的感受器大概有三种。

富田氏等往密集的锥状体中放入微小电极，测量其活动电位的分光响应^[25]。波长从400nm 开始，每隔20nm 为一段，直到700nm 止，用等量子条件，对18个波长进行扫描，其结果示于图3-49中。图中横轴为波长，纵轴为电压，下方为负极性。此图中三个细胞的

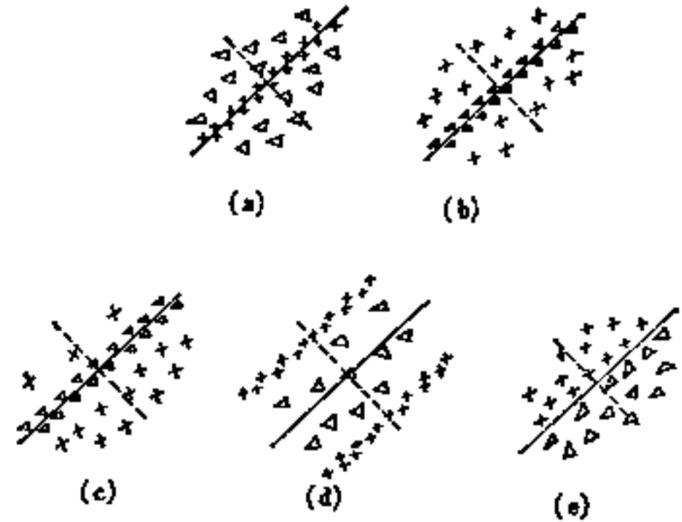


图3-46 猫的大脑皮层视领域内单纯形细胞
的各种感受野分布

(据Hubel和Wiesel资料)×—兴奋性响应领域；
△—抑制性响应领域；实线—感受野中心轴。虽然感受野的轴都是倾斜的，实际上各种方向都有。

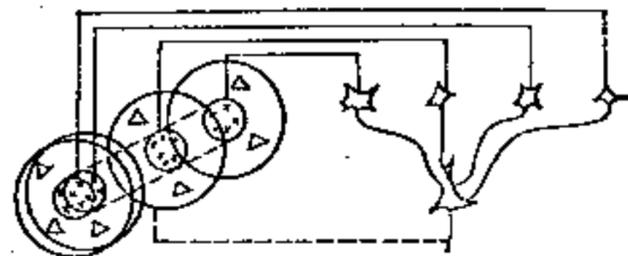


图3-47 单纯形细胞感受野构成的说明图

在图右侧的许多外侧柱状细胞中，有四个被记录下来，这些细胞保持在视网膜直线上的“开”中心感受野上。它们与一个大脑皮层细胞连接时，就变成在图左侧虚线所示那样的长“开”中心感受野上的细胞。

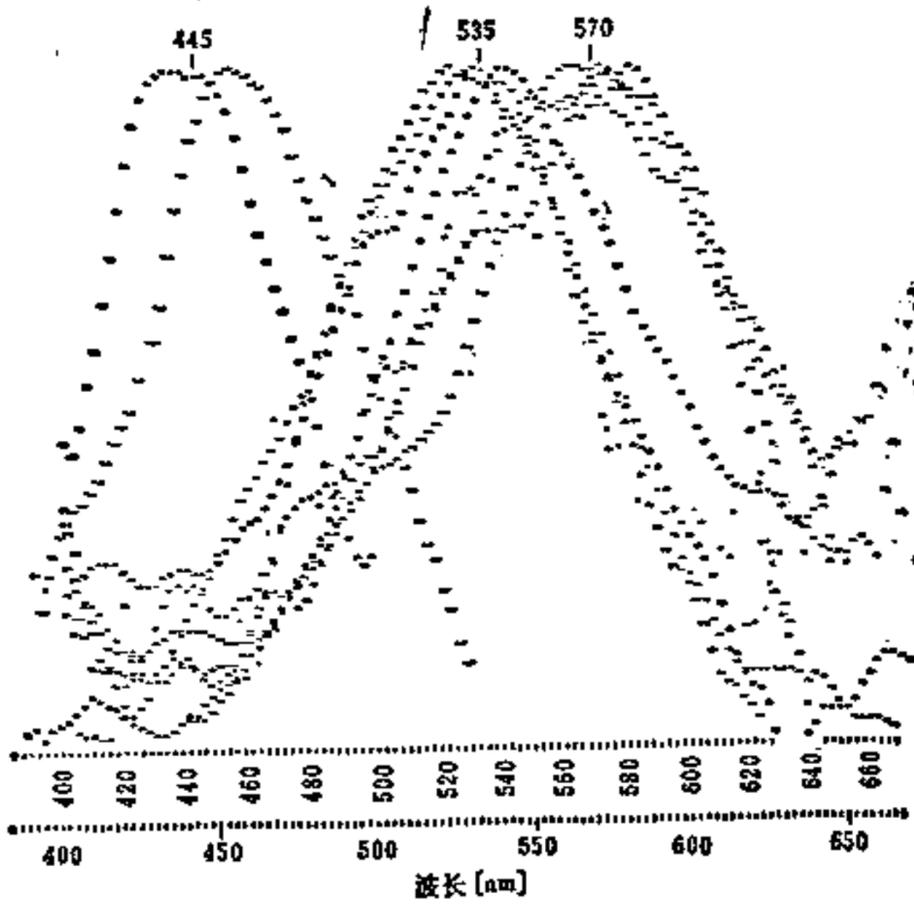


图3-48 人和猿的锥状体分光吸收曲线。猿的锥状体曲线用数字表示，人的锥状体曲线用括弧表示
(据Marks资料)

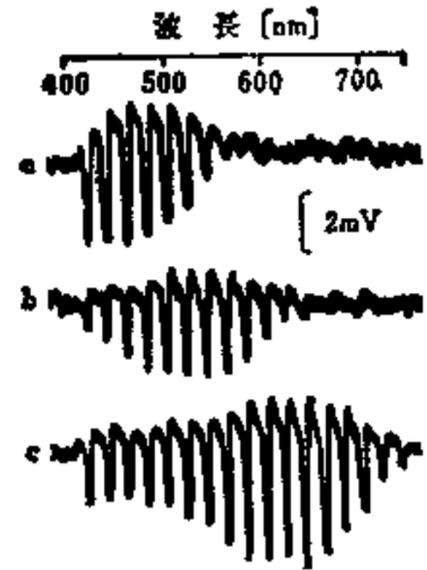


图3-49 密集锥状体的三种分光响应
(据富田氏等的资料)

记录 a、b、c，在蓝、绿、红的各区域里都具有电压峰值。对 142 个细胞的电压作成峰值波长的医学方直图时，分成 23 个、14 个和 105 个三组。这三组的平均波长为 462、529、611nm，与用金鱼视网膜微光法所得的结果一致[26]。

Mac Nichol和Svaetichin往各种鱼的视网膜上插入微电极，测定了S电位的分光响应[27]，其结果示于图3-50，得到了单相性和双相性的响应，表示出在可见区域中心部位单相性响应的最高值，称为L形响应。双相性响应在短波区域为负值，长波区域为正值，从峰值电位开始分为黄-蓝形和红-绿形响应。由这个结果可证明赫杯的对立色学说。

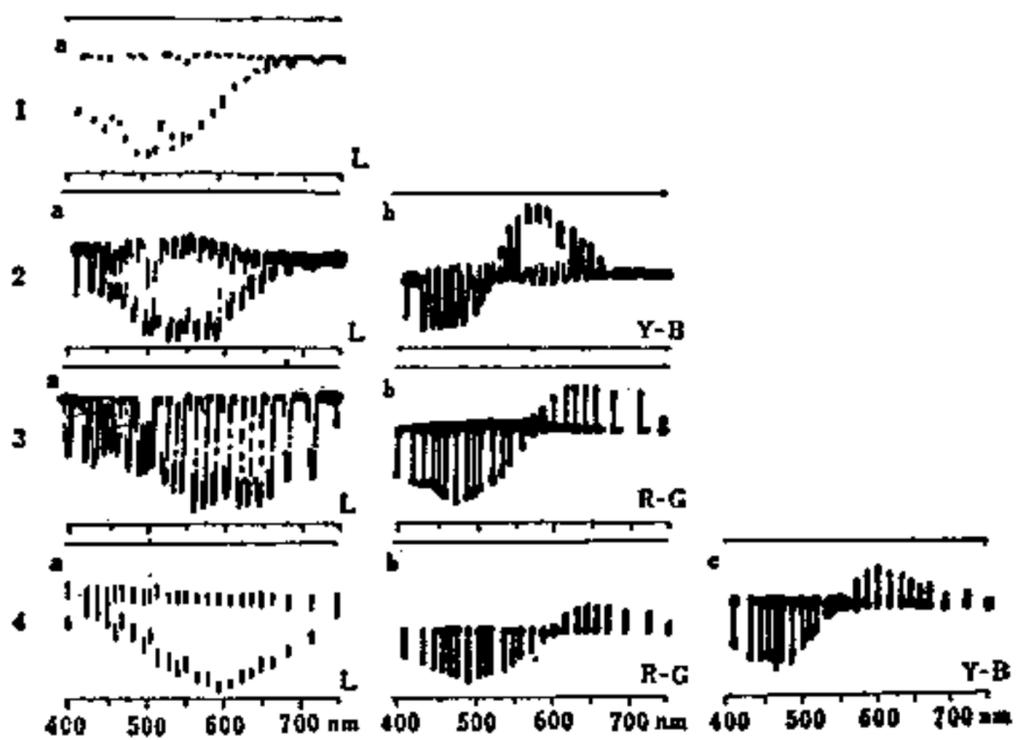


图3-50 各种鱼的S电位分光响应 (据 Mac Nichol和Svaetichin资料)

1. 无色性视觉，L形响应，Lutjanidae(30m以下深处的水鲷鱼)
2. 二色性视觉，L形响应和黄-蓝形响应(Serranidae)
3. 二色性视觉，L形响应和红-绿形响应(Centropomidae)
4. 四色性视觉，L形响应和红-绿形响应，黄-蓝形响应(Mugilidae)

根据 Marks、富田和 Mac Nichol 的结果和在下一节将要叙述的 De Valois

等的结果综合比较，认为在视网膜上有三种感受器。这种所谓的视网膜变换对立色响应的阶

段学说，正在得到很多的支持。

3-4-6 外侧蛭状体和大脑皮层视觉领域的色细胞响应

De Valois 等在猿的外蛭状体中插入微小电极，记录了用单色光刺激一秒钟时细胞的峰值信号数^[28]。在无光刺激状态下的细胞峰值数为自发激发水平。由于光的刺激，使峰值数增加的细胞称兴奋性细胞。使峰值减少的细胞称抑制性细胞。此外，由于光的波长不同，具有兴奋和抑制二种性质的细胞定义为分光对立细胞。在全部波长范围内，只产生兴奋性的或抑制性的细胞定义为分光非对立细胞。

分光对立细胞大致分二种：(1) 在长波长处兴奋而在短波长处抑制。或相反，(2) 在短波长处兴奋而在长波长处抑制。由下面作出的从各种兴奋性变换到抑制性交叉方直图看，这个交叉波长不是一个而是二个。将这些细胞命名为 + 红 - 绿，+ 黄 - 蓝，+ 绿 - 红，+ 蓝 - 黄型细胞。外侧蛭状细胞分类如表 3-2。

表3-2

外侧蛭状细胞分类

[据 De Valois 资料()内表示细胞个数]

分光对立细胞(103)	
┌ 长波长兴奋性细胞(54)	+ 红 - 绿(29)
└ 短波长兴奋性细胞(49)	+ 黄 - 蓝(25)
	+ 绿 - 红(31)
	+ 蓝 - 黄(18)
分光非对立细胞(44)	
┌ 兴奋性细胞(22)	
└ 抑制性细胞(22)	

De Valois 等的结果没有给出感受野构造等的空间信息。关于这一点 Wiesel 和 Hubel 以外侧蛭状细胞为主，分为 I 形、II 形和 III 形三组^[29]。I 形细胞具有中心一周边感受野，其中心和周边表示出不同的分光灵敏度（例如，中心为红色，周边为绿色）。II 形细胞虽然表示为分光对立响应，但是仅在中心，而不具有周边分布。III 形细胞是 De Valois 等所说的分光非对立细胞。感受野分为中心和周边部分。在中心部位上有兴奋性和抑制性细胞。

De Valois 提出了如图 3-51 所示的六种外侧蛭状体细胞和视网膜的三种感受野的连接模型^[30]。Marks 等将在视网膜上发现最高吸收波长为 445、535 和 570nm 的三

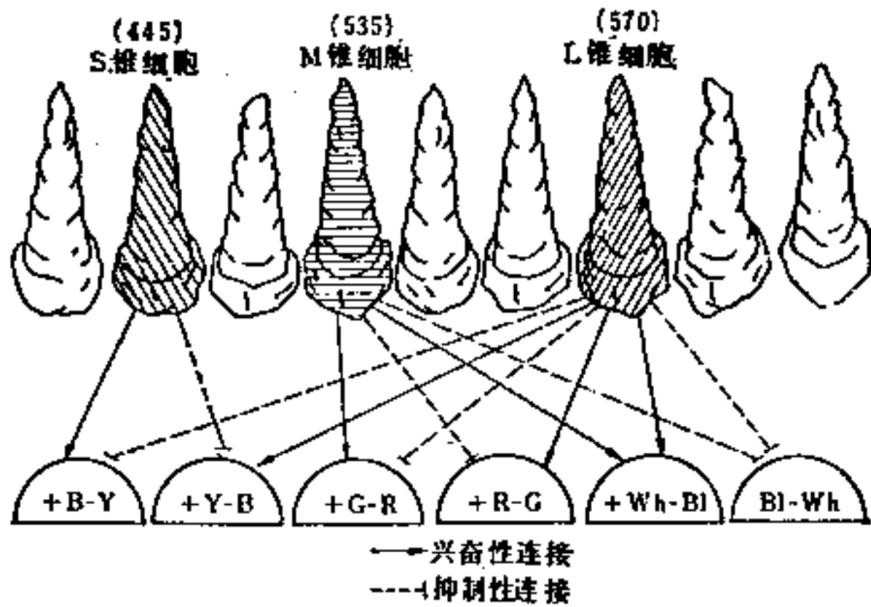


图3-51 锥状体-外侧蛭状体细胞的连接模型

(据 De Valois 资料)

种感受野，分别称为 S 锥状体，M 锥状体和 L 锥状体。表示出从这些锥状体与四种分光对立

细胞和分光非对立细胞的兴奋型 (+Wh - Bl), 抑制型 (+Bl - Wh) 细胞相连接的情况。

Dow 等在猿的大脑皮层的第一视觉领域用微小电极进行细胞记录, 将细胞分为如表 3-3 所示的三种^[31]。有数量更多的空间对立形细胞没有表示出色的特殊性, 其感受野是细长的。包含有静止的光狭缝响应和移动的光狭缝响应的细胞。这一组细胞相当于 Hubel 的复杂形和超复杂形细胞。色对立形细胞的特征是: (a) 锥状体的输入是对抗的, (b) 没有空间抑制。这种细胞相当于 Wiesel 所述的外侧蛭状细胞的 II 形。空间-色形细胞兼有色对立形的和空间对立形的二种性质。

表 3-3 Dow 和 Gouras 记录的大脑皮质细胞分类

1. 空间对立形细胞	52个	42%
2. 色对立形细胞	29个	24%
3. 空间-色形细胞	12个	10%
4. 其它	29个	24%
合 计	122个	100%

最近, Zeki 发表了猿大脑皮质前有线领域的第四次视领域细胞的响应特性报告^[32]。采用微小电极在这个区域记录了细胞全部色符号。发现只有一种颜色的光响应, 其他色的光或者白光均不响应。这个领域的特点是有继时色对比细胞, 这种细胞用光刺激, 由某种颜色变为其他颜色时, 响应增大。

山中氏等在人的眼睛上用网膜照度一定的单色光进行刺激, 测定和记录了后大脑视觉诱发的脑电波^[33]。对此结果进行主要成分的分析, 从视觉诱发脑电波中检出对立色学说的红-绿、黄-蓝两种成分。对于人来说, 除心理学的测定结果以外, 到目前为止, Marks 等用视网膜锥状体微小分光法测定的唯一生理结果, 可称为重要结果。

3-4-7 心理现象的生理学试验与说明

De Valois 试图用他的生理学实验解释视觉心理学的事实。根据在外侧蛭状体处得到的分光对立细胞和分光非对立细胞数据, 说明了色的三属性及其相互关系^[28]。其次根据测定猿的外侧蛭状体的四种分光对立细胞, 得到了波长不同的曲线^[34]。该曲线与心理实验结果甚为一致。可以理解为 490nm 处的最小值, 主要是 +黄-蓝形和 +蓝-黄形细胞, 590nm 处的最小值是 +绿-红形和 +红-绿形细胞。

另外, 调查测定了在不同颜色的边界处如何会产生马赫现象以及猿的外侧蛭状体的细胞放电^[35]。其结果是对于在背景亮度不同的图中, 显示出兴奋性细胞的边界强调。但是对于背景亮度相同, 而颜色不同的图中不引起边界的强调。

参 考 文 献

- (1) S. Hecht et al.: J. Gen. Physiol., 25 (1942) 819
- (2) 池田光男: 视觉の心理物理学, 森北出版(昭 50) 45
- (3) G. Wald: Science, 101 (1945) 653
- (4) H. W. Karn: J. Gen. Psychol., 14 (1936) 360
- (5) C. H. Graham: Vision and Visual Perception 170
- (6) 大山 正: 照学誌, 52 (昭 43) 20
- (7) H. Davson: The eye, 2 (1962) 88
- (8) S. Hecht et al.: J. Gen. Physiol., 19 (1935) 321
- (9) G. Van den Brink: Vision Res., 2 (1962) 495
- (10) 納谷嘉儀: 人間工学, 6 (1970) 250
- (11) J. C. Stevens and S. S. Stevens: J. Opt. Soc. Amer., 53 (1963) 375
- (12) J. Steinhardt: J. Gen. Physiol., 20 (1936) 185
- (13) E. G. Heinemann: J. Exp. Psychol., 50 (1955) 89
- (14) A. L. Diamond: J. Exp. Psychol., 50 (1955) 144
- (15) S. S. Stevens and A. L. Diamond: Vision Res., 5 (1955) 649

- (16) T.S. Aiba and S.S. Stevens: *Vision Res.*, 4 (1964) 391
- (17) D. Jameson and L.M. Hurvich: *Science*, 133 (1961) 174
- (18) F.S. Werblin: *J. Neurophysiol.* 34, (1971) 228
- (19) F. Ratliff: *Mach band*, (1965) 107
- (20) H.K. Hartline: *J. Gen. Physiol.*, 130 (1940) 690
- (21) S.W. Kuffler: *J. Neurophysiol.*, 16 (1953) 37
- (22) D.H. Hubel and T.N. Wiesel: *J. Physiol.*, 160 (1952) 106
- (23) C.G. Gross et al.: *J. Neurophysiol.*, 35 (1972) 96
- (24) W.B. Marks et al.: *Science*, 143 (1964) 1181
- (25) T. Tomita et al.: *Vision Res.*, 7 (1967) 519
- (26) W.B. Marks: *J. Physiol.*, 178 (1955) 14
- (27) E.J. MacNichol and G. Svaetichin: *Amer. J. of Ophthal.*, 46 (1958) 26
- (28) R.L. De Valois et al.: *J. Opt. Soc. Amer.*, 56 (1956) 966
- (29) T.N. Wiesel and D.H. Hubel: *J. Neurophysiol.*, 29 (1966) 1115
- (30) R.L. De Valois: *Investigative Ophthal.*, 11 (1972) 417
- (31) B.M. Dow and P. Gouras: *J. Neurophysiol.*, 36 (1973) 79
- (32) S.M. Zeki: *Brain Res.*, 53 (1973) 422
- (33) T. Yamanaka et al.: *Vision Res.*, 13 (1973) 1319
- (34) R.L. De Valois et al.: *J. Neurophysiol.*, 30 (1967) 415
- (35) R.L. De Valois and P.L. Pease: *Science*, 171 (1971) 694

第4章

颜 色

4-1 基 本 概 念^[1,2]

4-1-1 颜色的诸概念

(1) **色的显现方式** 光进入眼睛，通常产生色。其可见到的方式，由于所见到的对象不同就得出各种不同的印象。

光源色 由被观察对象本身发光而呈现出来的颜色。也就是光源本身与从光源来的光的镜面反射的颜色。还有由荧光、磷光等产生的颜色。另外，当被观察物的周围很暗时，反射或透射也产生颜色。例如夜晚所见到的月亮的颜色。

物体色 物体受到从其它地方来的光的照射而呈现出来的颜色。在这里，当照明条件或观察条件改变时，主观上是觉察不到太大的变化的，好象感觉到物体本身有颜色一样。物体色中，从物体表面漫反射而产生的色称为表面色，由漫透射产生的色称为透过色。

表面色 从天空或者单色仪所见到的颜色，它有距离感觉不定、柔和等特征。使物体色通过屏幕上的阑孔，不能看见物体本身，对物体不产生任何知觉，只看到表面的颜色。这种情况，特别称做阑孔色。

(2) **知觉色和心理物理色** 颜色可从感觉的观点与物理上的观点来看。前者抓住色的视感觉属性，把色用白、灰、黑、黄、橙、褐、红等名称表示出来，与此有关的概念称做色的心理概念。后者注意到引起色的光的性质，用称做三刺激值的量来表示。为了把心理概念上的色与物理概念上的色区别开来，我们把前者称做知觉色，把后者称做心理物理色。

(3) **色的心理概念** 关于色的心理概念的术语和数量，是用来表示每个人本身的颜色感觉的。但是要想用客观方法对它们进行测定是不可能的。

色调 用红、橙、黄、绿、蓝、紫等说明每一种色的范围，或判断两种相邻色融合后的颜色的视感觉上的属性。

亮度 是判断在某一领域中漫射、透射或反射的光有多少的视感觉上的属性。

明度 是判断在某一领域中被漫反射的部分有多少的视感觉上的属性。这一概念适用于表面色。白是明度为10的无彩色，黑是明度为零的无彩色。

彩度 判断在整个色觉中纯粹的有彩色所占比率的视感觉的属性。

色品 与无彩色的量无关，而是判断纯粹的有彩色量多少的视感觉的属性。对于同一亮度（或明度）、同一色调的颜色，一定间距的色品与一定间距的彩度相对应。彩度一定的颜色系列中，亮度（或明度）大的色，其色品度也大。

图4-1是以上述这些概念表示的色知觉空间的模式。

(4) **色的心理物理概念** 色的心理物理概念是从色光的合成导出的。用三色混合的方法产生合成色，把要测定的试验光放在视场的一方，另一方是三种色光混合而成的色光，三

种色光的强度可以调节 (图 4-2)。与心理物理概念有关的术语和数量是用来解决色的表示与色的光学性能的关系的。

色刺激 进入眼睛,能引起色感觉的辐射。

原刺激 三色混合成为合成色时的三个参考刺激。原刺激有三个是必要、也是充分的。但这三个刺激必须是独立的,也就是说,缺少了哪一个,另外的两个就不能混合成为相同的颜色。

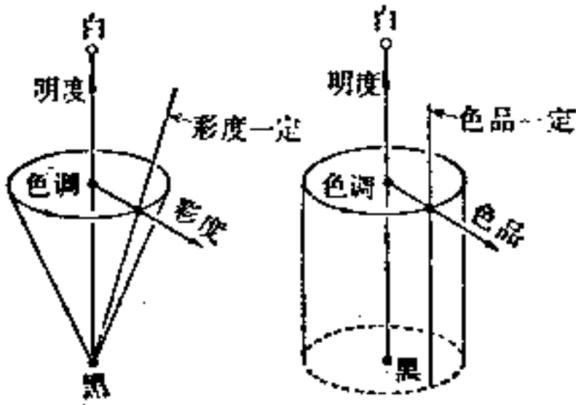


图4-1 色知觉空间的几何模式

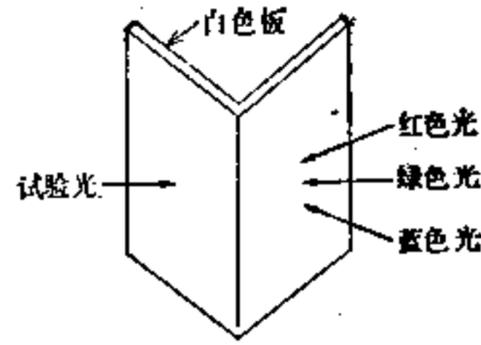


图4-2 按照三色混合的色的合成

三刺激值 用相加混合的方法与所观察的色刺激进行等色配比时所需要的三个原刺激的数量。

色 用三刺激值表示的色刺激。知觉上色的可见情况不仅与三刺激值有关,而且与色刺激的空间大小、形状、周围情况、观察者眼睛的适应状态等各种观测条件有关。但是,三刺激值相同的色,在相同的观测条件下,观察起来是相同的。

4-1-2 三色表色系统

(1) **色的矢量表示** 关于色合成的实验法则,可归纳成相加混色的一般法则。按照这一法则,要用三个独立的原刺激得出任意的试验色,采用下述三种比较方法都是可以的。

(1) 把三个原刺激用各种适当的份量进行相加混色,把合成色与试验色进行比较。(2) 把原刺激之一加到试验色中,再与剩下的两个原刺激的相加混色进行比较。(3) 把原刺激中的两个加到试验色中进行混色,再与另一个原刺激进行比较。根据比较法(1),只要选取适当的组合,大部分颜色都能混合出来。通常选取红、绿、蓝或红、绿、深紫组合成原刺激。

关于色的混合,还有下述的法则。(a) 比例法则:若两种颜色 (F_1) 与 (F_2) 是等色时,分别使各个色刺激的强度增加一定倍数 (α 倍),则色 $\alpha(F_1)$ 与色 $\alpha(F_2)$ 也成为等色。

(b) 相加法则:若色 (F_1) 与 (F_2) 是等色,色 (F_2) 与 (F_3) 也是等色时,则 (F_1) 和 (F_3) 的相加混合与 (F_2) 和 (F_4) 的相加混合所得的颜色也为等色。

从加法混色的一般法则出发,颜色是一个三维量,由比例法则和相加法则,颜色可用线性空间矢量来表示。如用色的(三维)矢量表示法,那么用矢量 F 表示的颜色的 α 倍的颜色便可用矢量 $F' = \alpha F$ 来表示。同样,由矢量 F_1 和 F_2 表示的两种颜色相加混合而成的颜色,便可用矢量 $F_3 = F_1 + F_2$ 来表示。相等颜色之间的关系也可用线性方程式来表示。这时,试验色用矢量 F 来表示,三个原刺激的单位量用矢量 R 、 G 、 B 来表示。若试验色与其量分别为 R 、 G 、 B 的原刺激按加法混色时是等色,则可用矢量方程:

2011

$$F = RR + GG + BB \quad (4-1)$$

来表示。 R 、 G 、 B 是试验色关于原刺激系统 R 、 G 、 B 的三刺激值。如用比较法(2)或(3)对试验色进行等色比较时,预先约定加于试验色一方的原刺激的量用负号,则此时的等色关系也可用式(4-1)来表示。例如原刺激之一的 R 有 R' 量与试验色 F 混合,它与 G 的 G 量和 B 的 B 量的混色有等色关系时,等色关系式为:

$$F + R'R = GG + BB$$

可以写成

$$F = -R'R + GG + BB \quad (4-2)$$

如 $-R' = R$,则式(4-2)与式(4-1)完全相同。

用矢量表示的颜色可以在单位矢量为 R 、 G 、 B 的三维矢量空间作图表示出来。即以矢量 F 表示的颜色可用坐标为 R 、 G 、 B 的点来表示(图4-3)。这种矢量空间称做(R , G , B)三刺激值空间。

(2) 色度 在三刺激值空间中,通过任一色光坐标点与原点的连线,可以看成是位于直线上的颜色的系列。只要改变这些色光的强度,这些颜色就可以达到一致。根据这种意义,这一直线上的色,如其矢量方向相同,则其性质也就相同。另一方面,由不同方向矢量所表示的色,改变其强度也不能获得一致,因为它们是不同的性质的色。这样的方向的特性称做色度。通常,在色度学上的色度指的是色 F 的空间点与坐标原点连成的直线和 $R + G + B = 1$ 的平面交点的坐标。这种坐标称做色度坐标。三刺激值就是色 R 、 G 、 B 的色度坐标 r 、 g 、 b 。它们可由下列方程得出:

$$\left. \begin{aligned} r &= R / (R + G + B) \\ g &= G / (R + G + B) \\ b &= B / (R + G + B) \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

r 、 g 、 b 之间有 $r + g + b = 1$ 的关系,因此,色度坐标只用其中的两个来表示即可。表示色度的二维平面图称做色度图(参见图4-3)。

由图4-4可知,色度不同的两种色相加混合而成的色,位于色度图上这两种色的坐标点的连线上。

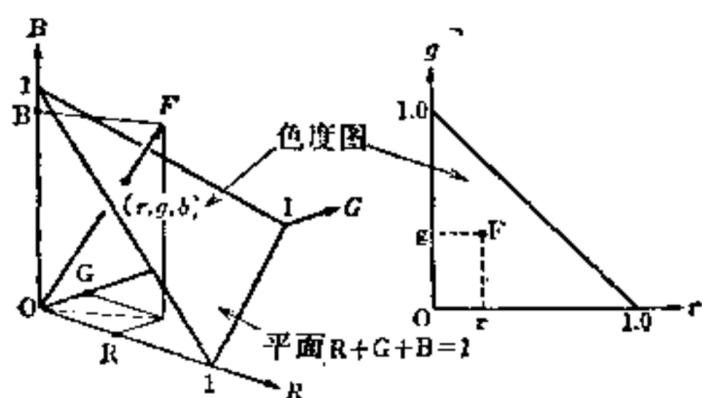


图4-3 三刺激值空间与色度图

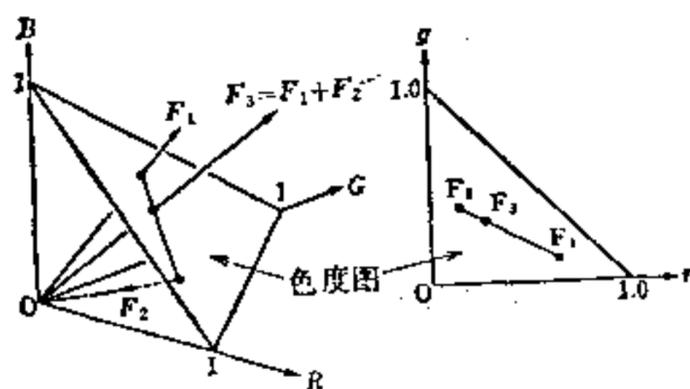


图4-4 相加混色的几何图解

(3) 光谱三刺激值 求出给定光谱分布的色刺激的三刺激值是光度学的基本问题之一。现在用 $\{P(\lambda)d\lambda\}$ 来表示色刺激的光谱分布如图4-5所示。因为光可认为是由单色光合成,所以这个光的颜色 F 可以看成由许多单色光分量 $P(\lambda)d\lambda$ 的色 $F(\lambda)d\lambda$ 的相加混色。因此,可得公式

$$F = \int F(\lambda) d\lambda \quad (4-4)$$

引进单位辐射通量的单色光色刺激所对应的光谱色 $f(\lambda)$ ，那么单色光 $P(\lambda)d\lambda$ 的色 $F(\lambda)d\lambda$ 就可以通过 $f(\lambda)$ 由 F 式表示：

$$F(\lambda)d\lambda = P(\lambda)d\lambda \cdot f(\lambda) \quad (4-5)$$

将式 (4-5) 代入式 (4-4)，得

$$F = \int P(\lambda)f(\lambda)d\lambda \quad (4-6)$$

这样，如果已知光的光谱分布 $\{P(\lambda)d\lambda\}$ ，则 F 就可以用 $f(\lambda)$ 根据 (4-6) 式求出。于是，其三刺激值 R 、 G 、 B 便可用下式计算出来：

$$\left. \begin{aligned} R &= \int P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G &= \int P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ B &= \int P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (4-7)$$

式中， $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 是光谱色 $f(\lambda)$ 的三刺激值，称做光谱三刺激值或等色函数。

图 4-6 是选取波长为 700nm(红)，546.1nm(绿)，435.8nm(蓝) 的单色光作原刺激，选取其亮度比为 1:4.5901:0.0601 作为单位量时的等色函数图。再者，按照上述的亮度比确定原刺激的单位量时，各单位量的混色与等能光谱分布的无彩色刺激就是等色，这样的无彩色刺激 (W) 的色度坐标就是 $r = g = b = 1/3$ 。

图 4-7 表示光谱色的 r 、 g 色度坐标。光谱轨迹两端的连接线段称做纯紫轨迹。由于任何光都可以看成是由单色光合成的，光谱轨迹与纯紫轨迹所包围的区域就表示现实存在的色的整个色度范围。

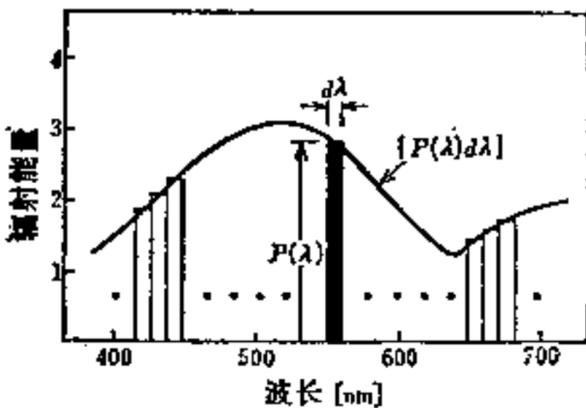


图4-5 单色光的综合辐射

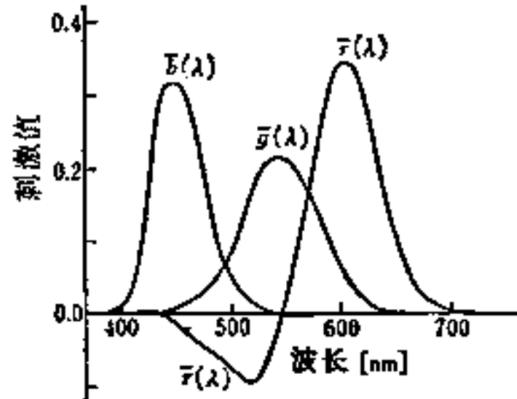


图4-6 RGB表色系的等色函数

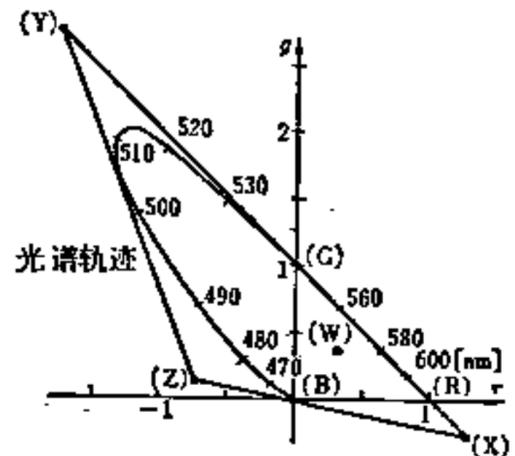


图4-7 r 、 g 色度图上的光谱轨迹与原刺激 X 、 Y 、 Z 的色度坐标

(4) 异谱同色刺激 光谱分布分别为 $\{P_1(\lambda)d\lambda\}$ 和 $\{P_2(\lambda)d\lambda\}$ 的两个色刺激如果满足下式：

$$\left. \begin{aligned} \int P_1(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda &= \int P_2(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ \int P_1(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda &= \int P_2(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ \int P_1(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda &= \int P_2(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (4-8)$$

则由式 (4-7) 可知，这两种分布的色是一样的。知觉色虽然依赖于光谱分布，但是决定知

觉色的更基本的量，是由式(4-8)用等色函数的关系把光谱分布重新积分计算出来的三刺激值。一种光谱分布对应着一组三刺激值，但是同样的一组三刺激值却对应着各种光谱分布。具有不同的光谱分布而有相同三刺激值的色刺激称做异谱同色刺激。图4-8的光谱分布就是异谱同色的一个例子。

4-1-3 表色系的变换

(1) 原刺激的变换 原刺激的选定，只要它们是独立的，就是任意的。为了实用，在有的情况下用原刺激 R 、 G 、 B ，而在另外的情况下则用另一组原刺激 R' 、 G' 、 B' 。在这种情况下要对两组数据进行比较时，必须由一种表色体系变换成另一种表色体系。其变换规则说明如下：

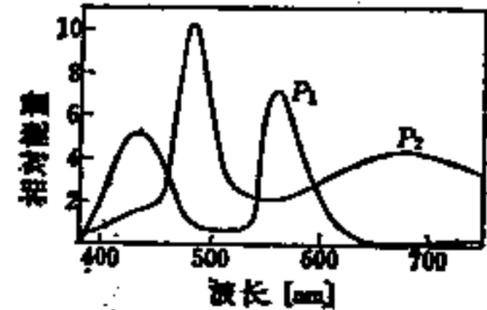


图4-8 异谱同色刺激的例子

用原先的原刺激 R 、 G 、 B 的混色可以作出原刺激 R' 、 G' 、 B' 的各自的等色。因此，存在着以下的关系，即

$$\left. \begin{aligned} R' &= a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B \\ G' &= a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B \\ B' &= a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B \end{aligned} \right\} \quad (4-9)$$

因为 R' 、 G' 、 B' 是独立的，由变换系数 a_{ij} 所构成的矩阵 A 必须满足 $\det A \neq 0$ 。因此， A 的逆矩阵也应该存在。

(2) 三刺激值的变换 与原刺激系统 R 、 G 、 B 有关的色 F 的三刺激值为 R 、 G 、 B ，随着原刺激体系变换成 R' 、 G' 、 B' ，其对应的三刺激值也要相应的变换成 R' 、 G' 、 B' 。

$$\left. \begin{aligned} F &= RR + GG + BB \\ &= R'R' + G'G' + B'B' \end{aligned} \right\} \quad (4-10)$$

比较式(4-9)与(4-10)，则容易了解两组三刺激值之间有以下的关系：

$$\left. \begin{aligned} R' &= c_{11}R + c_{12}G + c_{13}B \\ G' &= c_{21}R + c_{22}G + c_{23}B \\ B' &= c_{31}R + c_{32}G + c_{33}B \end{aligned} \right\} \quad (4-11)$$

这时，由变换系数所构成的矩阵 C 与矩阵 A 的逆矩阵的倒转矩阵 $(A^{-1})'$ 相等。反之， $A = (C^{-1})'$ 的关系也成立。就两个表色体系的等色函数来说，则有与式(4-11)完全相同的关系。

(3) CIE 表色体系的引进 由图4-6所示，以红、绿、蓝的单色光作为原刺激 R 、 G 、 B 表色体系的等色函数含有负值。这样，由色刺激的光谱分布和由等色函数计算色刺激的三刺激值时，总是有些不方便。而且，这也给直读式光电色度计的研制造成困难。更有甚者，在确定对于它的色刺激的测光量例如亮度时，不得不应用相对视觉灵敏度曲线 $V(\lambda)$ ，以其它方法计算，或对三刺激值进行线性加法运算。

为了克服这些不便，CIE 在1931年通过将按照原刺激 R 、 G 、 B 的表色体系变换成按照原刺激 X 、 Y 、 Z 的新的表色体系。这个原刺激 X 、 Y 、 Z 的假设，主要考虑到满足下面的两点要求：(1) 对应的等色函数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 没有负值，(2) $\bar{y}(\lambda)$ 与相对视觉灵敏度曲线 $V(\lambda)$ 一致。

要满足要求(1),可以这样地选取原刺激 X 、 Y 、 Z ,而使由 X 、 Y 、 Z 的色度点所形成的三角形包围整个光谱轨迹。

提出要求(2)的理由是测光基本原理的亮度相加法则。因此两个色刺激 $\{P_1(\lambda)d\lambda\}$ 与 $\{P_2(\lambda)d\lambda\}$ 亮度一致的条件是:

$$\int P_1(\lambda)V(\lambda)d\lambda = \int P_2(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (4-12)$$

即色度一致的色刺激,其亮度也应该是一致的。这就是通常称做异谱同色的所有色刺激。因此,函数 $V(\lambda)$ 必须是等色函数的线性结合。这样,从相互之间用线性关系连接起来的无限多个等效原刺激系中,选择一个等色函数与 $V(\lambda)$ 函数一致的原刺激体系是可能的。

图 4-7 表示 CIE 选定的满足上面要求的原刺激 X 、 Y 、 Z 的 r 、 g 色度坐标。还要考虑在选定这些时,用三个色度座标点作成的三角形要尽可能地小。如图 4-7 所示,这种色度坐标,都是在由光谱轨迹与纯紫轨迹包围的实际存在的色的色度领域以外。因此, X 、 Y 、 Z 是实际不存在的假想的色。但如果需要 XYZ 表色体系,也可由 RGB 表色体系变换得出。用这样的表色系统表示颜色也没有什么不合适。再者,对于 X 、 Y 、 Z 的单位量以及这些量的等量相加而混合的色,可以规定与等能光谱色一致。在图 4-9 中求出这样选定的与 X 、 Y 、 Z 原刺激系统有关的等色函数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$,是 CIE 1931 年测色标准观察者的光谱三刺激值。

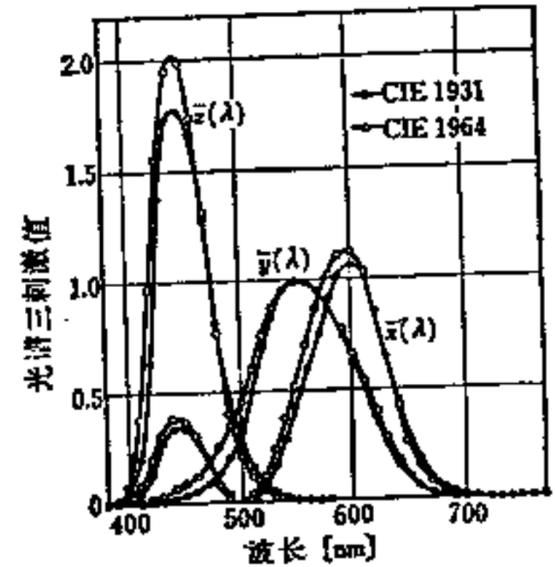


图4-9 CIE1931年测色标准观察者与CIE1964年测色辅助标准观察者的光谱三刺激值

4-2 表色的方法

定量的表示色或色彩的体系称做表色系。表色系有两大类。一类是用以光色即表面色为对象的心理物理学方法,以进行光的等色实验结果为依据的,由色刺激表示的体系。另一类是建立在对表面色直接评价基础上的,用构成等感觉指标的颜色图册来表示的体系。前者可用 CIE-XYZ 表色系为代表,后者则有孟塞尔表色系和奥斯特瓦尔德表色系等。

4-2-1 CIE 的 XYZ 表色系统

CIE 所决定的表色体系有 RGB 表色系和 XYZ 表色体系。XYZ 表色体系是现在 CIE 实际采用的标准表色系,它是以 RGB 表色系(基本刺激为等能光谱的白光,原刺激 R 、 G 、 B 为 700、546.1、435.8nm 的单色光)的等色实验为基础的,考虑到实用价值,由坐标变换而规定出虚构的原刺激 X 、 Y 、 Z 来表示的表色体系。

作为 CIE(1931 年)规定的 XYZ 表色体系的基础的等色实验视场的大小是 2° 。这样大小的观察视场作为实际判定色彩的视场是比较小的,而且用这一表色系所作的色的表示,与视感觉的判断并不一致,特别是在光谱三刺激值的短波部分的评价过低。因此,CIE 为了使色的实际判定的大小更加适当,使高的观察精度与视感觉判定很好地对应,在 1964 年又追加了 CIE(1964 年)辅助 XYZ 表色体系,这一表色体系是建立在 10° 视场的许多等色实验结

但是, $L_{\lambda} = x(\lambda)L_x + y(\lambda)L_y + z(\lambda)L_z$; 明度系数 $L_x = L_z = 0$, $L_y = 1$ 。

(2) 三刺激值与色度坐标

(a) 光源色的三刺激值 在 CIE(1931年) 的表色体系 XYZ 中, 光谱分布 $P(\lambda)$ 的光源三刺激值如下:

$$\left. \begin{aligned} X &= k \int_{380(\text{nm})}^{780(\text{nm})} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{380(\text{nm})}^{780(\text{nm})} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{380(\text{nm})}^{780(\text{nm})} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (4-14)$$

k 是使三刺激值的 Y 值与测光量一致的系数。对于 CIE(1964年) XYZ 表色体系, 采用 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ 为三刺激值, 原则上只用于计算色度坐标。而刺激值 Y_{10} 与测光量并不对应。

(b) 物体色的三刺激值 在 CIE(1931年) XYZ 表色体系中, 光谱透射率或光谱反射率为 $\rho(\lambda)$ 的物体用光谱分布为 $P_s(\lambda)$ 的光源照明时, 其三刺激值为:

$$\left. \begin{aligned} X &= K \int_{380(\text{nm})}^{780(\text{nm})} P_s(\lambda) \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda \\ Y &= K \int_{380(\text{nm})}^{780(\text{nm})} P_s(\lambda) \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda \\ Z &= K \int_{380(\text{nm})}^{780(\text{nm})} P_s(\lambda) \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda \\ K &= \frac{100}{\int_{380(\text{nm})}^{780(\text{nm})} P_s(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (4-15)$$

三刺激值的 Y 值与视感觉反射率或视感觉透过率一致。

(c) 色度坐标 由三刺激值用下列公式算出的量 x 、 y 、 z 称做色度坐标。通常用 x 、 y 来表示色度。

$$x = \frac{X}{S}, \quad y = \frac{Y}{S}, \quad z = \frac{Z}{S} \quad (4-16)$$

$$S = X + Y + Z, \quad x + y + z = 1$$

图 4-10 表示 CIE(1931年) 与 CIE(1964年) 的色度图。图中光谱轨迹及连接其两端的直线 (称做纯紫轨迹) 所包围的区域表示实际存在的色。图 4-11 表示在色度图上对于色度坐标 x 、 y , 按照对光的色刺激的感觉经验而得的色名划分^[5]。

(3) CIE 标准光 CIE 规定了测量物体色所用的各种标准光源。以前, 虽然主要采用标准光源 A、C, 但代表昼光的标准光源 C 的光谱分布与现实的昼光相比, 在紫外及可见区的一部分却颇不一致。因此, 为了实现标准光源 C 而采用了特殊的溶液滤光器 (戴维斯-吉伯

森滤光器)。而这种滤光器的光谱特性的再现性和稳定性并不十分好。为此,CIE于1966年在原来的标准光源的基础上又追加了新的标准光源 D_{65} 。它是根据多数自然昼光的光谱分布实测值经统计处理而来的。考虑到它们是由代表着任意色温度的昼光的光谱分布,就把它们称做 CIE 合成昼光。

标准光 A:是绝对温度为 2856K ($C_1 = 1.4388 \times 10^{-2} m \cdot K$) 的完全辐射体发出的光,现实的标准光源 A 是色温为 2856K 的充气钨卷丝灯泡。

标准光 B:以色温约为 4874K 代表平均阳光,现实的标准光源 B 是在标准光源 A 加上戴维斯-吉伯森滤光器 B^[4] 而成。

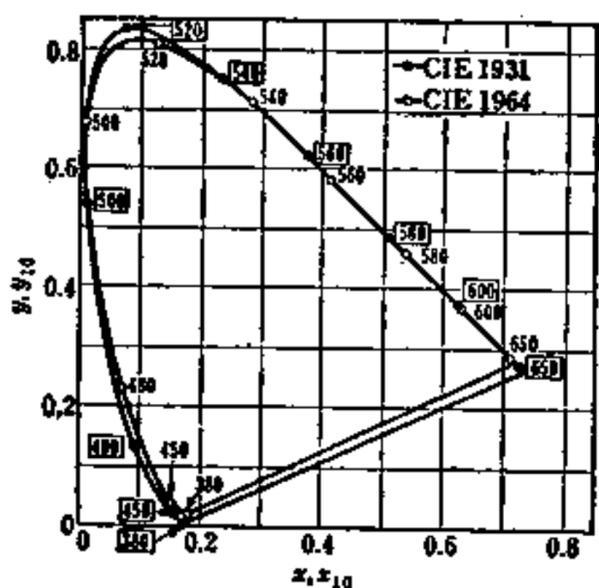


图4-10 CIE (1931年) XYZ表色体系与 CIE (1964年) XYZ表色体系的色度图

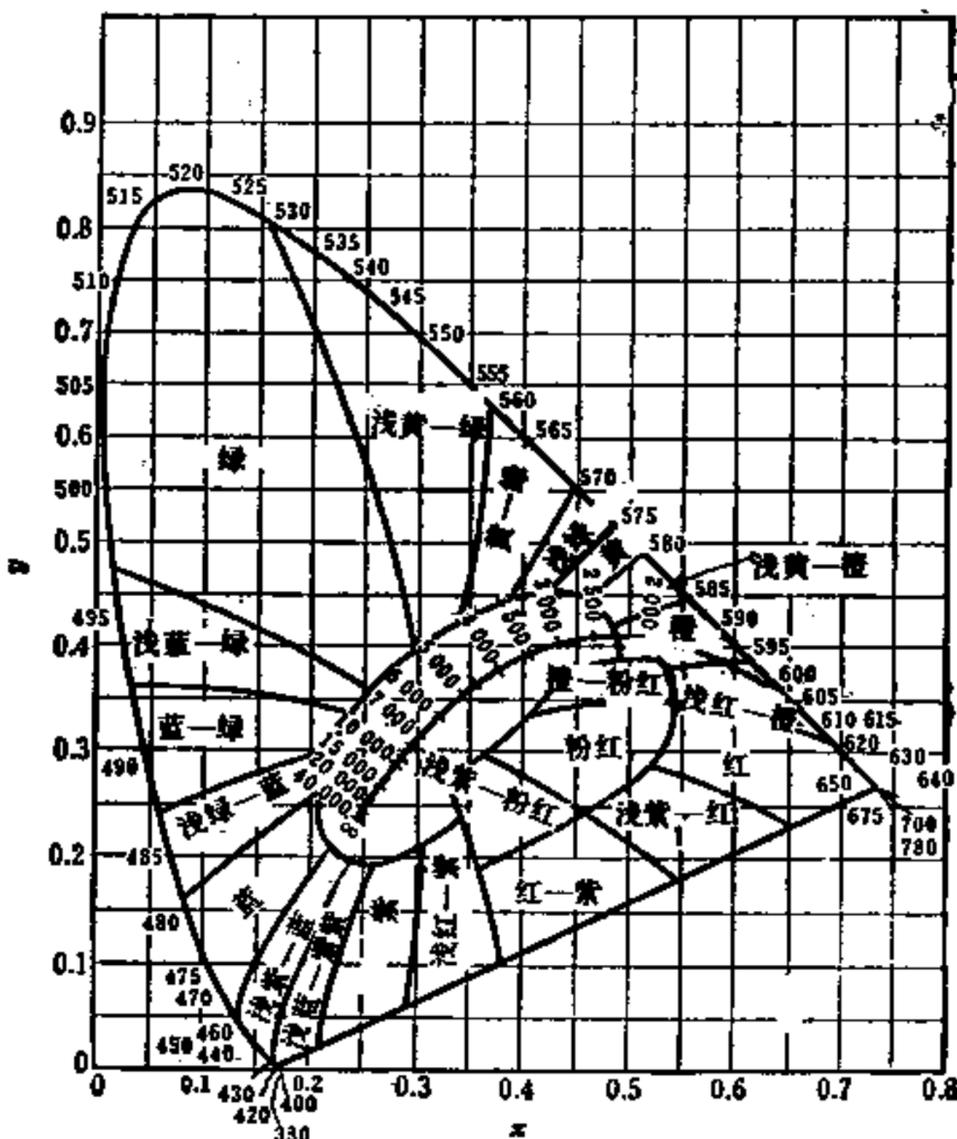


图4-11 CIE (1931年) 色度图与Kelly的光源色的色名

标准光 C:以色温约为 6774 K 代表平均昼光,实际的标准光源 C 是用标准光源 A 加上戴维斯-吉伯森滤光器 C^[4] 而成。但是标准光源 B、C 不用于由紫外区辐射能而激发出荧光的物体色的照明。

标准光源 D_{65} :与色温约为 6504K 的昼光近似的合成昼光。CIE 还规定了色温约为 5503K 的 D_{55} 和色温约为 7504K 的 D_{75} 等标准光源。

任意色温 T_c 的合成昼光的 CIE1931年色度坐标 x_p 、 y_p 与光谱分布 $S(\lambda)$ 用下式表示:当 $4000K \leq T_c \leq 7000K$ 时,

$$x_p = -4.6070 \frac{10^9}{T_c^3} + 2.9678 \frac{10^9}{T_c^2} + 0.0911 \frac{10^3}{T_c} + 0.244063$$

($C_1 = 1.4388 \times 10^{-2} m \cdot K$)

当 $7000K \leq T_c \leq 25000K$ 时,

$$x_p = -2.00064 \frac{10^9}{T_c^3} + 1.9018 \frac{10^9}{T_c^2} + 0.24748 \frac{10^3}{T_c} + 0.237040 \tag{4-17}$$

表4-3 计算CIE合成昼光光谱分布的 $S_0(\lambda)$ 、 $S_1(\lambda)$ 、 $S_2(\lambda)$

λ [nm]	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$	λ [nm]	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$
300	0.04	0.02	0.0	570	96.0	-1.6	0.2
310	6.0	4.5	2.0	580	95.1	-3.5	0.5
320	29.6	22.4	4.0	590	89.1	-3.5	2.1
330	55.3	42.0	8.5	600	90.5	-5.8	3.2
340	57.3	40.6	7.8	610	90.3	-7.2	4.1
350	61.8	41.6	6.7	620	88.4	-8.6	4.7
360	61.5	38.0	5.3	630	84.0	-9.5	5.1
370	68.8	42.4	6.1	640	85.1	-10.9	6.7
380	63.4	38.5	3.0	650	81.9	-10.7	7.3
390	65.8	35.0	1.2	660	82.6	-12.0	8.6
400	94.8	43.4	-1.1	670	84.9	-14.0	9.8
410	104.8	46.3	-0.5	680	81.3	-13.6	10.2
420	105.9	43.9	-0.7	690	71.9	-12.0	8.3
430	96.8	37.1	-1.2	700	74.3	-13.3	9.6
440	113.9	36.7	-2.6	710	76.4	-12.9	8.5
450	125.6	35.9	-2.9	720	63.3	-10.6	7.0
460	125.5	32.6	-2.8	730	71.7	-11.6	7.6
470	121.3	27.9	-2.6	740	77.0	-12.2	8.0
480	121.3	24.3	-2.6	750	65.2	-10.2	6.7
490	113.5	20.1	-1.8	760	47.7	-7.8	5.2
500	113.1	16.2	-1.5	770	68.6	-11.2	7.4
510	110.8	13.2	-1.3	780	65.0	-10.4	6.8
520	106.5	8.6	-1.2	790	66.0	-10.6	7.0
530	108.8	6.1	-1.0	800	61.0	-9.7	6.4
540	105.3	4.2	-0.5	810	53.3	-8.3	5.5
550	104.4	1.9	-0.3	820	58.9	-9.3	6.1
560	100.0	0.0	0.0	830	61.9	-9.8	6.5

$$y_D = -3.000x_D^2 + 2.870x_D - 0.275 \quad (4-18)$$

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D}$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \quad (4-19)$$

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (4-20)$$

$S_0(\lambda)$ 、 $S_1(\lambda)$ 、 $S_2(\lambda)$ 表示在表 4-3 中。各种 CIE 标准光源的光谱分布表示在表 4-4 中。另外，代表性的 CIE 合成昼光的光谱分布表示在图 4-12 中。与标准光源 D_{65} 相对应的现实的标准光源 D_{65} 现正处于研制阶段，还没有规定下来。然而在最近的研究中，用高压氙灯与特定的滤光器组合起来，得到了光谱分布与标准光源 D_{65} 很近似的光源。图 4-13 就是其中的一例。

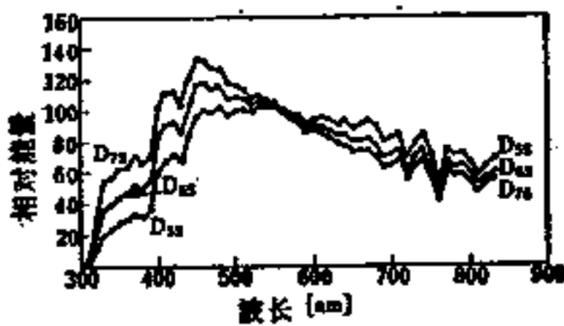


图4-12 CIE合成昼光的光谱分布

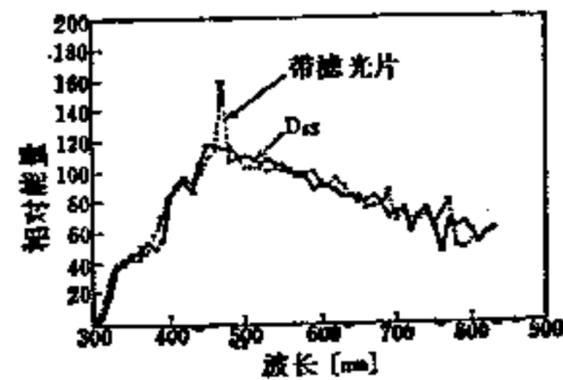


图4-13 与滤光器组合起来的氙灯光谱分布与CIE标准光源 D_{65} 的比较

表4-4

各种CIE标准光源的光谱分布

λ (nm)	$P_A(\lambda)$	$P_B(\lambda)$	$P_C(\lambda)$	$P_{Des}(\lambda)$	λ (nm)	$P_A(\lambda)$	$P_B(\lambda)$	$P_C(\lambda)$	$P_{Des}(\lambda)$
300	0.93			0.03	575	110.80	101.90	100.15	96.0
305	1.13			1.7	580	114.44	101.00	97.80	95.8
310	1.36			3.3	585	118.08	100.07	95.43	92.2
315	1.62			11.8	590	121.73	99.20	93.20	88.7
320	1.93	0.02	0.01	20.2	595	125.39	98.44	91.22	89.4
325	2.27	0.26	0.20	28.6	600	129.04	98.00	89.70	90.0
330	2.66	0.50	0.40	37.1	605	132.70	98.08	88.83	89.8
335	3.10	1.45	1.55	38.5	610	136.34	98.50	88.40	89.6
340	3.59	2.40	2.70	39.9	615	139.99	99.06	88.19	88.6
345	4.14	4.00	4.85	42.4	620	143.62	99.70	88.10	87.7
350	4.74	5.60	7.00	44.9	625	147.23	100.36	88.06	85.0
355	5.14	7.60	9.95	45.8	630	150.83	101.00	88.00	83.3
360	6.15	9.60	12.90	46.6	635	154.42	101.56	87.86	83.5
365	6.95	12.40	17.20	49.4	640	157.98	102.20	87.80	83.7
370	7.82	15.20	21.40	52.1	645	161.51	103.05	87.99	81.8
375	8.77	18.80	27.50	51.0	650	165.03	103.90	88.20	80.0
380	9.79	22.40	33.00	50.0	655	168.51	104.59	88.20	80.1
385	10.90	26.85	39.92	52.3	660	171.96	105.00	87.90	80.2
390	12.09	31.30	47.40	54.6	665	175.38	105.08	87.22	81.2
395	13.36	36.18	55.17	68.7	670	178.77	104.90	86.30	82.3
400	14.71	41.30	63.30	82.8	675	182.12	104.55	85.30	80.3
405	16.15	46.62	71.81	87.2	680	185.43	103.90	84.00	78.3
410	17.68	52.10	80.60	91.5	685	188.70	102.84	82.21	74.0
415	19.29	57.70	89.53	92.4	690	191.93	101.60	80.20	69.7
420	21.00	63.20	98.10	93.4	695	195.12	100.38	78.24	70.6
425	22.79	68.37	105.80	90.0	700	198.26	99.10	76.30	71.6
430	24.67	73.10	112.40	86.7	705	201.36	97.70	74.36	73.0
435	26.64	77.31	117.75	95.8	710	204.41	96.20	72.40	74.3
440	28.70	80.80	121.50	104.9	715	207.41	94.60	70.40	68.0
445	30.85	83.44	123.45	111.0	720	210.36	92.90	68.30	61.6
450	33.09	85.40	124.00	117.0	725	213.26	91.10	66.30	65.8
455	35.41	86.88	123.60	117.4	730	216.12	89.40	64.40	69.9
460	37.82	88.30	123.10	117.8	735	218.92	88.00	62.80	72.5
465	40.30	90.08	123.30	116.4	740	221.66	86.90	61.50	75.1
470	42.87	92.00	123.80	114.9	745	224.36	85.90	60.20	69.4
475	45.52	93.75	124.09	115.4	750	227.00	85.20	59.20	63.6
480	48.25	95.20	123.90	115.9	755	229.58	84.80	58.50	55.0
485	51.04	96.23	122.92	112.4	760	232.11	84.70	58.10	46.4
490	53.91	96.50	120.70	108.8	765	234.59	84.90	58.00	56.6
495	56.85	95.71	116.90	109.1	770	237.01	85.40	58.20	66.8
500	59.86	94.20	112.10	109.4	775	239.36			65.1
505	62.93	92.37	106.98	108.6	780	241.67			63.4
510	66.06	90.70	102.30	107.8	785	243.91			63.8
515	69.25	89.65	98.81	106.3	790	246.11			64.3
520	72.50	89.50	96.90	104.8	795	248.24			61.9
525	75.79	90.43	96.78	106.2	800	250.32			59.5
530	79.13	92.20	98.00	107.7	805	252.33			55.8
535	82.52	94.46	99.94	106.0	810	254.30			52.0
540	85.95	96.90	102.10	104.4	815	256.20			54.7
545	89.41	99.16	103.95	104.2	820	258.06			57.4
550	92.91	101.00	105.20	104.0	825	259.90			58.8
555	96.44	102.20	105.67	102.0	830	261.59			60.3
560	100.00	102.80	105.30	100.0					
565	103.58	102.92	104.11	98.2					
570	107.18	102.60	102.30	96.3					

(4) 单色表示法 可用主波长 λ_d 或补色主波长 λ_c 及刺激纯度 P 来直感地表示色度, 取代以色度坐标 x 、 y 表示的色度。

在图 4-14 的色度图上, 点 $\overline{W}(x_w, y_w)$ 是白色点, 当表示颜色的色度坐标的点 $S_1(x, y)$ 在 \overline{RW} , \overline{VW} 和光谱轨迹所包围的面积中时, 把 $\overline{WS_1}$ 的延长线与光谱轨迹的交点 $S'_1(x_1, y_1)$ 的波长称做主波长, 用 λ_1 表示。当表示色度坐标的点 $S_2(x', y')$ 在三角形 WRV 内时, $\overline{S_2W}$ 的延长线与光谱轨迹的交点 S'_2 的波长称做补色主波长 λ_2 。

刺激纯度 p_s 在点 S_1 的情况下是:

$$p_s = \frac{x - x_w}{x_1 - x_w} \quad (4-21)$$

或
$$\frac{y - y_w}{y_1 - y_w} \times 100[\%]$$

在点 S_2 的情况下是:

$$p_s = \frac{x' - x_w}{x_2 - x_w}$$

或
$$\frac{y' - y_w}{y_2 - y_w} \times 100[\%]$$
 (4-22)

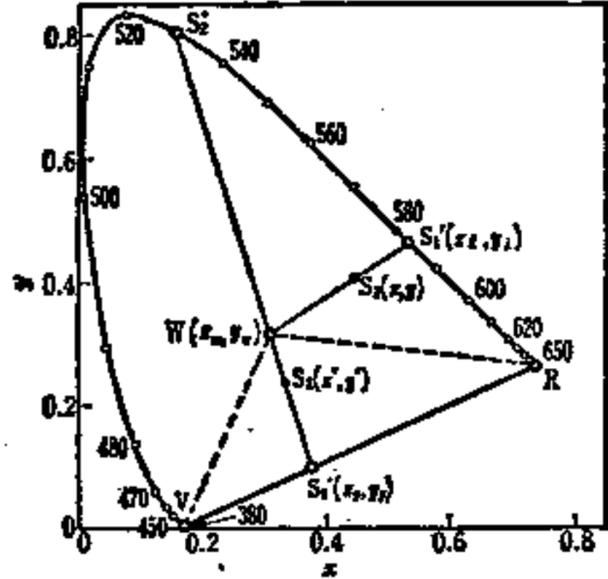


图4-14 在CIE1931年色度图上按单色表示法的主波长(补色主波长)和刺激纯度

对于光源色, 白色点就是像标准光 D_{65} 那样的白色光源, 对于物体色, 就是所用标准光的色度座标。

4-2-2 按色样的表色系统

(1) 孟塞尔表色系 由孟塞尔于 1905 年创立的采用颜色图册的表色系, 是把表示色的心理上的三个属性即色调、明度和彩度按照感觉上的等距指标排列起来的。后来美国光学学会(O.S.A.)对其颜色图册色样在CIE色度图上排列不很规则以及其他色调、彩度在感觉上是等距指标作了改进, 而成为订正的孟塞尔表色体系^[3]。这就是现在的孟塞尔标色体系, JISZ8721 (色的三属性表示法) 也是以它为根据的, 现正在发行无光泽版和光泽版色样作为 JIS 标准颜色图册。

明度 V (孟塞尔明度) 如图 4-15 所示, 理想的黑为零, 理想的白为 10, 在它们之间按感觉上的等距指标分成 10 等分来表示其明度值 V。

彩度 C (孟塞尔彩度) 色调和明度一定的颜色在图册排列中把无彩色作为零, 彩度按感觉上的等距指标增加。

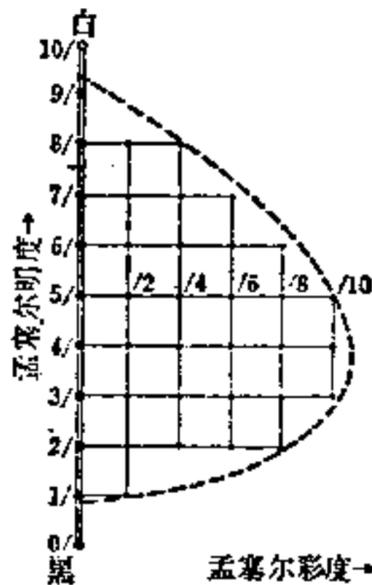


图4-15 孟塞尔颜色图册中一个色调面上的明度、彩度的组成

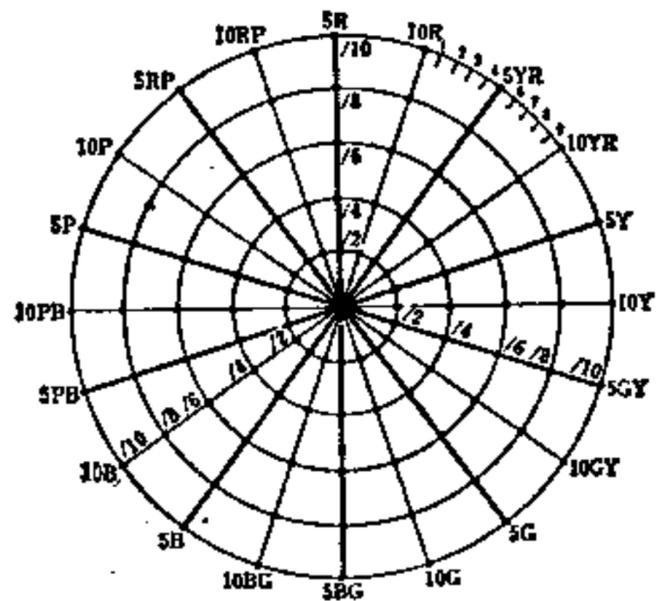


图4-16 孟塞尔颜色图册中一定明度的色调与彩度

色调 H(孟塞尔色调) 如图 4-16 所示, 按红 (5R)、黄红 (5YR)、黄 (5Y)、黄绿 (5GY)、绿 (5G)、蓝绿 (5BG)、蓝 (5B)、蓝紫 (5PB)、紫 (5P)、红紫 (5RP) 分成 10 个色调, 每一色调又各自分成从 0~10 的感觉上的等距指标。图 4-17 表示孟塞尔表色体系的色立体图的一部分。孟塞尔体系的表示对于有彩色用符号 HV/C , 对于无彩色用符号 N , 再标上明度值, 例如 5R4/10, N5 等。

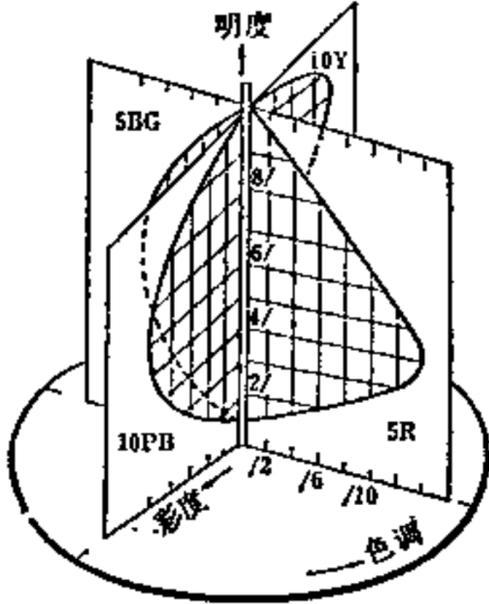


图4-17 孟塞尔表色体系的色立体的组成

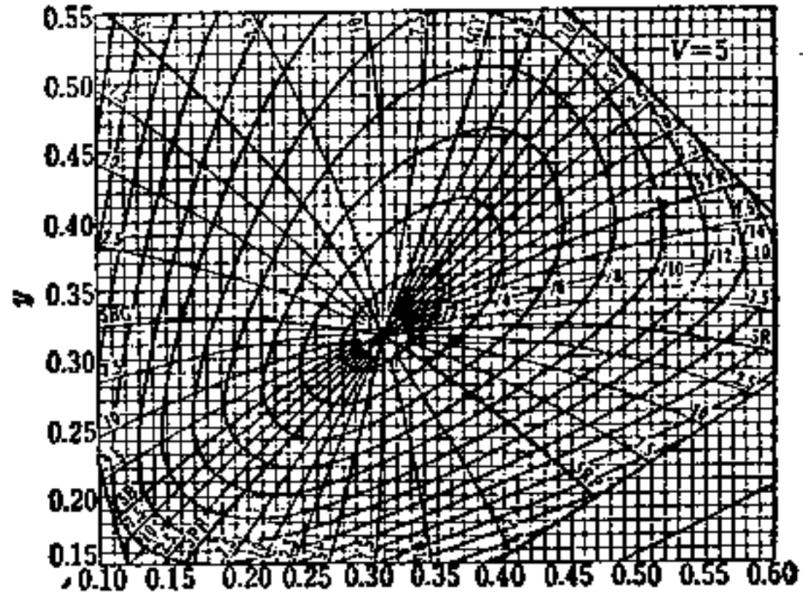


图4-18 在CIE1931年色度图上 $V = 5$ 、等色调、等彩度的轨迹

孟塞尔表色体系与 XYZ 表色体系有以下的关系。明度 V 与规约反射率 Y_n 有着下式的关系, 称做孟塞尔明度函数。

$$Y_n = 1.2219V - 0.23111V^2 + 0.23951V^3 - 0.021009V^4 + 0.0008404V^5 \quad (4-23)$$

同时还给出由色调、彩度变成 x, y 坐标的变换图^[5]。其中的一例是把 $V = 5$ 的等色调和等彩度曲线表示在 CIE1931年色度图上 (图 4-18)。必须注意到这种相互变换只有对应着一定的观测条件 (照明光源、观测环境的条件) 才能成立。

(2) 奥斯特瓦尔德表色系 这是奥斯特瓦尔德创立的表色体系。以纯色量 C , 对全波长的光完全反射的白色量 W 和完全吸收的黑色量 B 这三种成分的相对含量来表示表面色。假想 $W + B + C = 100$, 如图 4-19 所示, 就可以把同一色调的全部颜色排列在以 WBC 为顶点的正三角形内。边 \overline{WB} 是无彩色轴, 在与它垂直的方向上存在着色调一定的明度和彩度的变化, C 是纯色。与 \overline{WB} 平行的颜色系列, 纯色成分的含量相等, 纯度一定。与边 \overline{BC} 平行的颜色系列, 白色含量相等, 而与边 \overline{WC} 平行的颜色系列, 黑色含量相等。色调由 24 个色调环排列而成, 建立在赫林的四原色学说的基础上, 在色调环的相对的位置上配置着补色色调。图 4-20 表示奥斯特瓦尔德色立体的结构。这样的颜色图册有调色手册 (Color Harmony Manual) ^[7]。

4-2-3 色温度

试验用光源的色温用与这一光源的色度相等或近似的完全辐射体的绝对温度来表示。任意色温的完全辐射体的光谱辐射度由普朗克辐射定律得出。用色度坐标把色温系列表示在色度图上, 所得的曲线称做完全辐射体轨迹 (图 4-21)。试验用光源的色度坐标不在完全辐射体轨迹上时, 其色温可用等色温线得出。等色温线是在空间有感觉上等距离指标的 CIE 1960 年 UCS 色度图上, 与完全辐射体轨迹正交的直线。

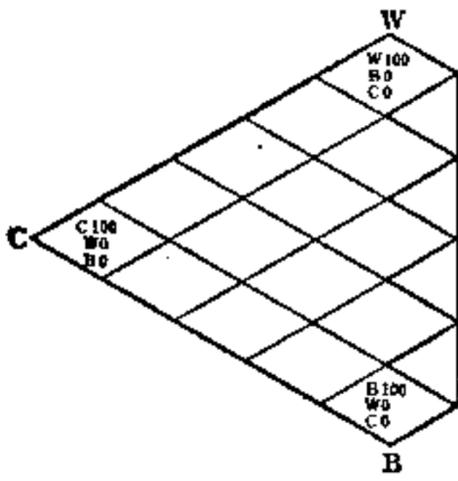


图4-19 奥斯特瓦尔德表色体系的一个色相面的组成

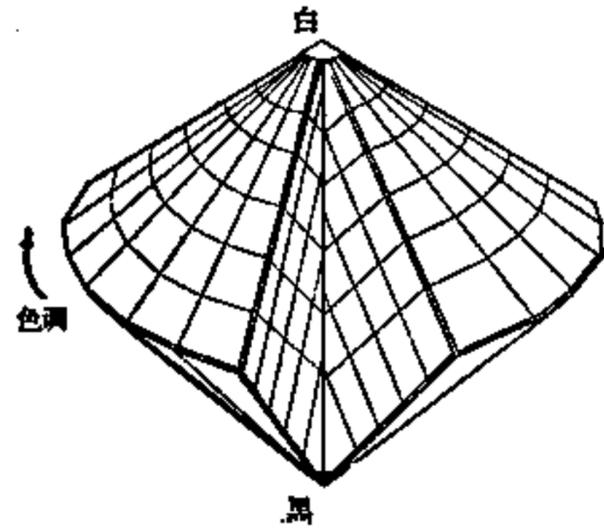


图4-20 奥斯特瓦尔德色立体

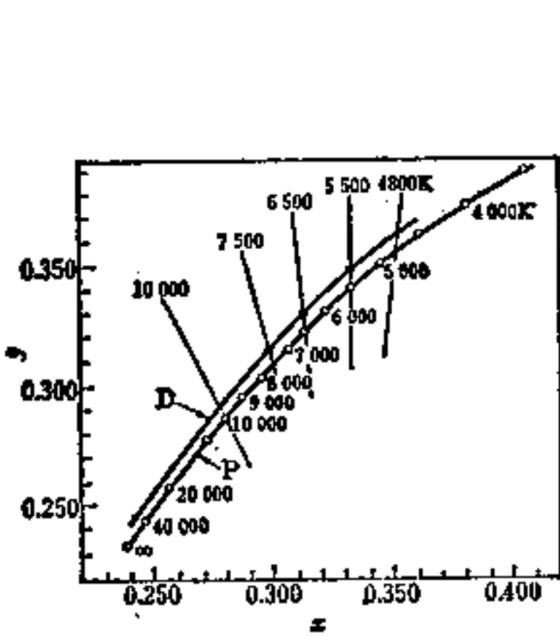


图4-21 CIE1931年色度图上的完全辐射体轨迹(P)与CIE合成昼光的轨迹(D)

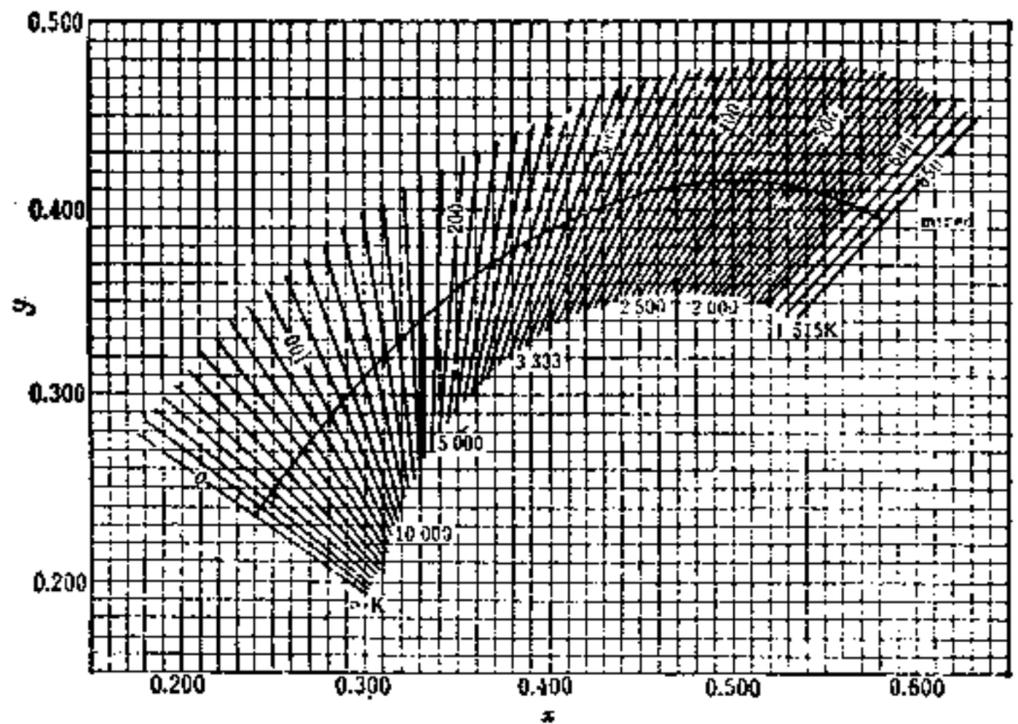


图4-22 CIE1931年色度图上的等色温线

色温有时用绝对温度倒数的 10^6 倍来表示，其单位称做“微倒度”(micro reciprocal degree) (图 4-22)。用这种色温倒数的表示法使之形成近似的均等色度空间，一个微倒度之差大致上与视觉上能辨认的最小色差相对应。另外，当光源加上滤光片以改变色温时，使用微倒度有适宜于表示滤光片改变色温能力等优点。

4-3 色 差^[9]

按照 4-1 节中所述采用三刺激值的表色系，有助于判断已知光谱组成的两种色刺激颜色一致或不一致。然而，我们还可以对两种色刺激之间色的不同程度进行定量的判断。因而，表色系仅仅提出色的一致或不一致的定性判断是不完全的。因此，对于已知三刺激值的任意两种色刺激，指出它们给予感觉上的色差量，乃是色度学的重要目的之一。

可是，为了确定这个量而作为实验基础的色差视感觉评价，与比色观测相比，精度都相当差。而且，要对色空间的整个领域作这样的评价，需要进行庞大的试验。由于这些困难，色差公式至今尚未像三刺激值表色系那样以固定形式达到国际标准化。现在 CIE 所建议

的色差公式仍然是暂定的。

4-3-1 线元

在三刺激值空间中两个色点之间的欧几里德距离并不与其感觉上的色差相对应。这很明显：它们的距离由于原刺激的取法如何，总是可能变化的。尽管如此，还是提出了在三刺激值空间中使通常的距离与色差相对应的方法，也就是应用线元处理的方法。这种方法是把刚刚能觉察到的两种色的差别的观测作为实验基础，并把这种刚刚能觉察到的差别作为色差单位。这样，两种色 F_1 与 F_2 之间的色差是通过判断用刚刚能觉察到的差别的倍数来表示的。

对已知的色点 F_1 来说，与它有刚刚能觉察到差别的关系的色点，假定是在以它为中心的椭圆体上。MacAdam^[10]曾作过证明，认为对于一定亮度的色有刚刚能觉察到差别的色的轨迹大体上是椭圆。图 4-23 表示对于各种色度的颜色这种椭圆的形状。

应用刚刚能觉察到差别的色的轨迹是一椭圆体的假设，三刺激值为 U_1, U_2, U_3 的色 F 与其附近的色 F' (三刺激值为 $U_1 + dU_1, U_2 + dU_2, U_3 + dU_3$) 之间的距离 ds (线元) 可用二次方程：

$$ds^2 = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 g_{ij} dU_i dU_j \quad (4-24)$$

$$g_{ij} = g_{ji}$$

来确定。使 $ds = 1$ 与刚刚能觉察到的差别相对应，并使式 (4-24) 中 $ds = 1$ ，则 F' 的轨迹就是以 F 为中心的椭圆体。系数 g_{ij} 称做计量张量，用式 (4-24) 确定距离所用的空间称做黎曼空间。 g_{ij} 是三刺激值的函数，因之，椭圆体的大小及指向随着颜色而异。

式 (4-24) 对刚刚能觉察到的色差及其数倍程度的色差都能适用。对于有限差别的两种色 (F_1 与 F_2) 来说，其色差可由线元 ds 沿着点 F_1 与 F_2 之间的最短途径 (测地线) 的线积分

$$S = \int ds$$

得出。

通常用线元处理的方法对于非欧几里德式色知觉空间的情况也有效。但是，对于有限色差的计算，确定测地线是繁琐的，并不实用。线元公式的代表式有 Stiles^[11] 公式和 Friele^[12] 公式。应用线元公式可以进行相对视觉灵敏度曲线、波长辨别、辨色椭圆、等色调轨迹、等彩度轨迹等的预测。对于这些的推导原理关心的读者，可以参阅 Stiles 的论文^[11] 或 Wyszecki 和 Stiles 的著作^[9]。

4-3-2 均匀色空间

在这种处理方法中，用与三刺激值空间不同种类的，称做“均匀色空间”的色空间来确

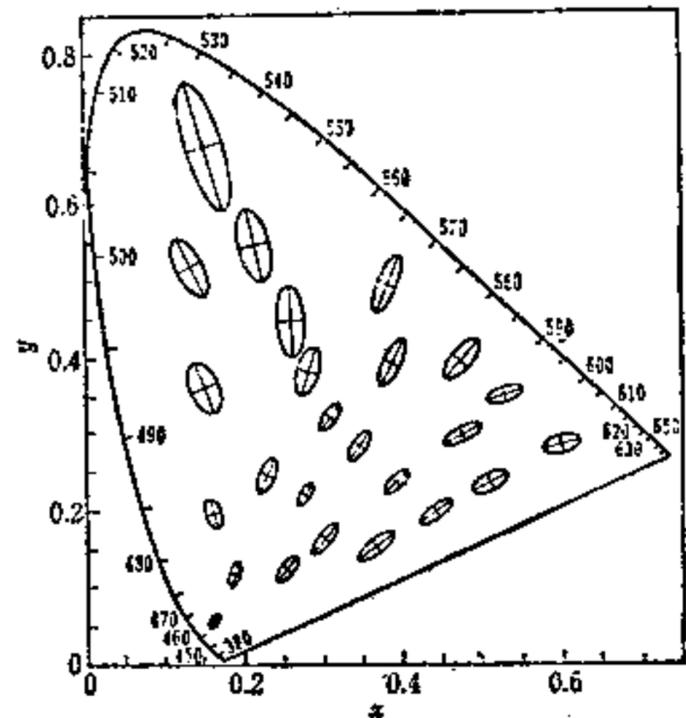


图4-23 MacAdam的辨色椭圆

定色差。这种空间是用与三刺激值有一定的非线性关系的三个变量作成直角坐标，而且在这种空间中表示任意两种颜色时，其坐标之间的欧几里德距离要形成与这两种颜色在知觉上的色差近似的对应。构成这种空间的背景是欧几里德色知觉空间的假设。对形成这种色空间的基础作观测时，要以大于刚刚能觉察到的差别的小色差为对象。

这类空间的典型目前有 CIE 建议的下述两个空间^[13, 14]。CIE 认为可以使用任何一种，而且都适用于表面色的色差。

(1) CIE1976年L**u***v**色空间 是用下式所确定的量L*、*U**、*v**作直角坐标的近似均匀色空间。

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16, & Y/Y_0 > 0.01 \\ u^* &= 13L^*(u' - u_0), & v^* = 13L^*(v' - v_0) \end{aligned} \right\} \quad (4-25)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} u' &= 4X/(X + 15Y + 3Z) \\ v' &= 9Y/(X + 15Y + 3Z) \\ u'_0 &= 4X_0/(X_0 + 15Y_0 + 3Z_0) \\ v'_0 &= 9Y_0/(X_0 + 15Y_0 + 3Z_0) \end{aligned} \right\} \quad (4-26) \ominus$$

X、*Y*、*Z* 等于观测对象的三刺激值，*X*₀、*Y*₀、*Z*₀ 是照明光源的三刺激值。*Y*₀ = 100。坐标为 (*L*₁^{*}, *u*₁^{*}, *v*₁^{*}) 与 (*L*₂^{*}, *u*₂^{*}, *v*₂^{*}) 的二种颜色的色差可由下式得出：

$$\Delta E_{uv}^* = [(L_1^* - L_2^*)^2 + (u_1^* - u_2^*)^2 + (v_1^* - v_2^*)^2]^{1/2} \quad (4-27)$$

图 4-24 表示孟塞尔明度为 5 的孟塞尔坐标在 *u***v** 图上绘出的曲线。

式 (4-26) 的坐标 *u**、*v**，是 *X*、*Y*、*Z* 三刺激值与由下式联系起来的、另一种原刺激系的三刺激值 *U*'、*V*'、*W*' 所对应的色度坐标。

$$\left. \begin{aligned} U' &= (4/9)X \\ V' &= Y \\ W' &= -\frac{1}{3}X + \frac{2}{3}Y + \frac{1}{3}Z \end{aligned} \right\} \quad (4-28)$$

把 *u*' 对 *v*' 绘出曲线的色度图称做 CIE 1976 年 UCS 图。它对同一亮度的各种色，判断其感觉差是方便的。图 4-25 表示光谱轨迹在 UCS 图上绘出的曲线。

(2) CIE1976 年 L*a*b*色空间 是由下式确定的量 L*a*b* 作直角坐标的近似均匀色坐标。

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \\ b^* &= 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}] \end{aligned} \right\} \quad (4-29)$$

式中 *X*/*X*₀、*Y*/*Y*₀、*Z*/*Z*₀ > 0.01。*X*、*Y*、*Z* 是被观测对象的色刺激的三刺激值，*X*₀、*Y*₀、*Z*₀ 是照明光源的三刺激值，*Y*₀ = 100。

具有坐标为 (*L*₁^{*}, *a*₁^{*}, *b*₁^{*}) 与 (*L*₂^{*}, *a*₂^{*}, *b*₂^{*}) 的两种颜色的色差由下式得出：

$$\Delta E_{ab}^* = [(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2]^{1/2} \quad (4-30)$$

图 4-26 表示绘在 *a**-*b** 图上孟塞尔明度为 5 的孟塞尔坐标的曲线。

⊖ 如在式 (4-26) 中 *u*'、*v*' 分子的系数由 9 变成 6，则所得公式就是 CIE1960 年 UCS 色度坐标，以它为基础而得的 CIE1964 *U***V***W** 表色系可以用于显色性评价。

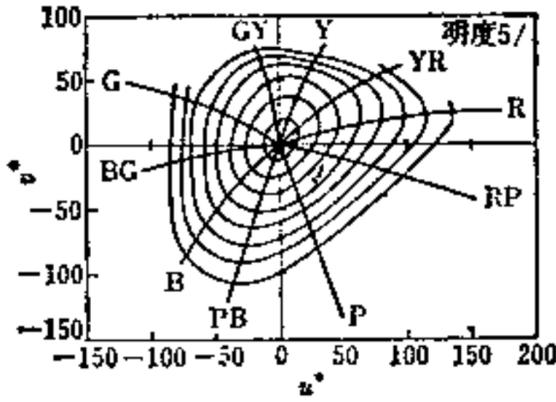


图4-24 绘在 u^*-v^* 图上的孟塞尔坐标的曲线

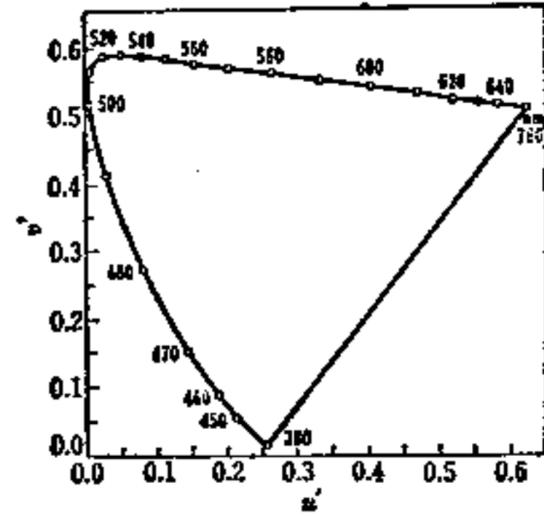


图4-25 1976年UCS色度图

(3) 色的计量心理量 是一种根据三刺激值函数来确定主要的色属性大小关系的量，以其等距指标表示作为观测对象的色属性的等感觉差而定出的近似量。在使用 CIE 1976 年 $L^*u^*v^*$ 色空间或 CIE 1976 年 $L^*a^*b^*$ 色空间时，与色属性的明度、色品和色调对应的计量心理量(公制明度, 公制色品和公制色调角)，可以参照的图 4-1 和图 4-27 由下列公式来确定。

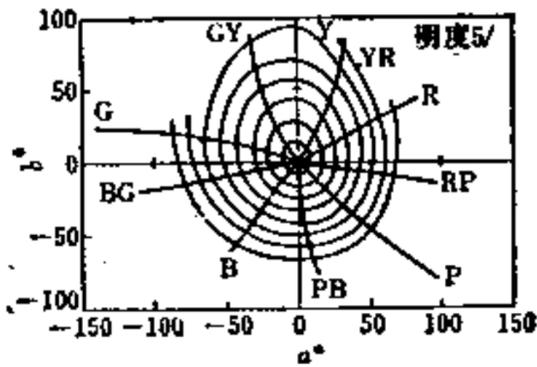


图4-26 绘在 a^*-b^* 图上的孟塞尔坐标的曲线

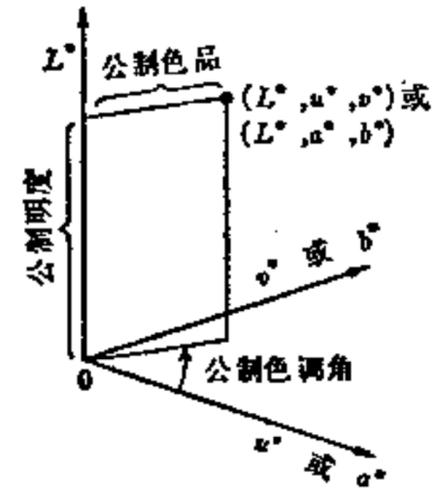


图4-27 色的计量心理量

(1) 公制明度

$$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \tag{4-31}$$

(2) 公制色品

$$C_{uv}^* = (u^{*2} + v^{*2})^{1/2} \tag{4-32}$$

或

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \tag{4-33}$$

(3) 公制色调角

$$H_{uv}^* = \tan^{-1}(v^*/u^*) \tag{4-34}$$

或

$$H_{ab}^* = \tan^{-1}(b^*/a^*) \tag{4-35}$$

这些量可以用来评价由若干程度的明度差、色品差和色调差造成的两种颜色的色差。例如，用公制明度差 ΔL^* 、公制色品差 ΔC_{uv}^* 或 ΔC_{ab}^* 分别评价两种颜色的明度差和色品差。另外，与色调差对应的色差分量的可用下述的公制色调差来评价。

(4) 公制色调差

$$\Delta H_{uv}^* = \{(\Delta E_{uv}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{uv}^*)^2\}^{1/2} \tag{4-36}$$

或

$$\Delta H_{ab}^* = \{(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2\}^{1/2} \tag{4-37}$$

式中两种颜色的色调差的方向可用公制色调角判定。

4-4 光源的显色性

4-4-1 显色的概念

由照明确定物体色的可见度来说明光源的性质称做显色性。通常由光源引起物体显色变化主要有以下两种原因。

(1) **色刺激值变化(色度学的偏移)** 如果光源的光谱分布不同,因而由它所照明的物体上的反射光的光谱组成也就不同,因此三刺激值发生变化。这一点作为色度计算的物理量可以正确处理。

(2) **适应性变化(适应性色偏移)** 眼睛习惯于照明的光或整个周围的色度变化。这时眼睛的灵敏度发生变化,见到的光色像是见到白色一样,对显色的感觉也就发生了变化。对此,虽然有各种测量结果,但要充分说明问题,在数量上还是不很够的。

我们感觉到的显色的变化,虽然就是色刺激值变化和色适应变化综合的结果(综合的色变化),但通常这两者的作用似乎是互相抵消的。虽然照明的光变化,但对物体色的色感觉并不发生变化,这样的色觉恒常的现象是存在的(图4-28)。例如,我们日常接触到天然光,由于其情况不同,其光谱分布不断发生变化,但是通常并没有因此而引起对物体的色感觉的变化。由于存在着这样的色觉恒常现象,像用柠檬黄或西红柿红那样的叫法,就是把色知觉看做物体的属性,这也是我们固有的记忆上的习惯。所以用色觉恒常不成立的光来照明物体时,感觉到显色不正常,这是显色性不良的光源等所造成的。

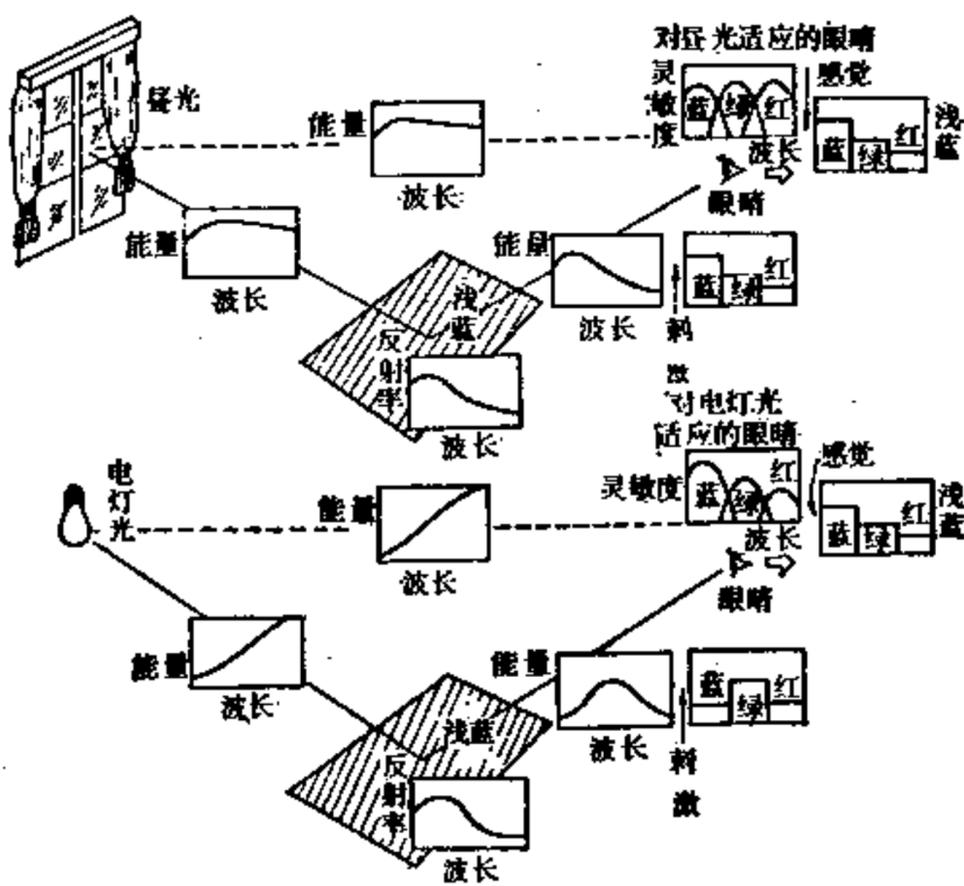


图4-28 色觉恒常

在对光色相同的光源的显色性进行比较实验时,可用同时比较的方法。但是当光色不同时,因为包含着适应性色变化,所以要用图4-29所示的(a)先后相继比较或(b)双眼(分开同时)观测比较等两种方法。

4-4-2 色适应

对色适应变化完整的预测理论虽然还没有确立,但是作为一级近似而采用的有生理三原色与 Von Kries 系数法则的方法。生理的三原色有各种各样的数据,如果采用由 Judd 从 Pitt 的色盲混同色求出的数据[xy 坐标是 $(0.748, 0.252)$, $(1.000, 0.000)$, $(0.178, 0.000)$],就可求得其基本三刺激值 R 、 G 、 B 与 X 、 Y 、 Z 的关系如下:

$$\left. \begin{aligned} R &= 1.00 Y \\ G &= -0.46 X + 1.36 Y + 0.10 Z \\ B &= 1.00 Z \end{aligned} \right\} \quad (4-38)$$

按照 Von Kries 系数法则，在适应光 (R_L, G_L, B_L) 作适应来观测被试光 (R, G, B) 时，三色感觉量可用 $R/R_L, G/G_L, B/B_L$ 表示。而若在另一适应光 (R_M, G_M, B_M) 作适应来对比较光 (R', G', B') 作观测，在这两种情况下产生同样的感觉时，则 R', G', B' 与 R, G, B 有以下的关系：

$$\left. \begin{aligned} R' &= R (R_M/R_L) \\ G' &= G (G_M/G_L) \\ B' &= B (B_M/B_L) \end{aligned} \right\} \quad (4-39)$$

通常用等亮度标准光源 C ($R_c = 1.000, G_c = 1.027, B_c = 1.181$) 和标准光源 A ($R_A = 1.000, G_A = 0.890, B_A = 0.355$) 作为适应光源，那么对标准光源 A 适应时所观测的试验色 (X, Y, Z) 与在标准光 C 之下产生同等感觉的三刺激值 X', Y', Z' 的关系可由下式求出：

$$\left. \begin{aligned} X' &= 1.154 X - 0.458 Y + 0.473 Z \\ Y' &= 1.000 Y \\ Z' &= 3.327 Z \end{aligned} \right\} \quad (4-40)$$

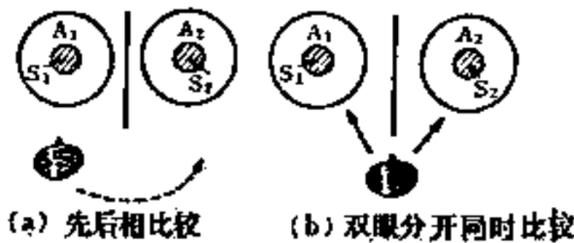


图4-29 显色性的比较方法

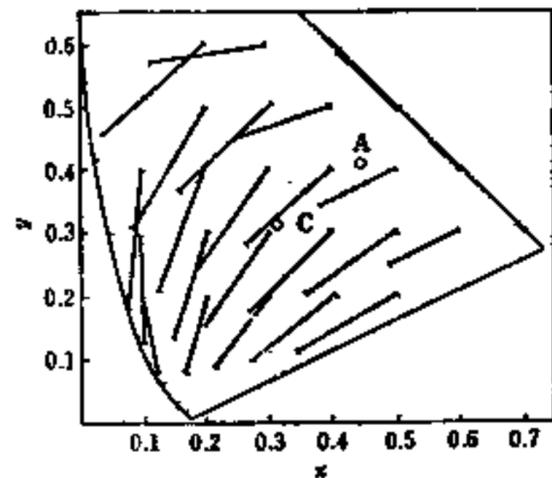


图4-30 由A光至C光的适应色变化

图 4-30 表示由此而计算出来的色适应变化的关系。

4-4-3 显色性的评价方法^[15, 16]

光源显色性的评价方法按考虑的着重点可分两大类。其一是以忠实性为基础的方法，另一类是考虑到人的爱好的方法。

(1) 以忠实性为基础的方法 这类方法有把光谱分布分成有限个数的光谱带而与基准光源进行比较的光谱带法，和确定试验色而将其试验效果与基准光源对试验色的效果进行比较的试验色法。CIE 在 1948 年推荐了暂定光谱带法，但在 1965 年出版了采用试验色法的第 13 号出版物《测量·表示光源显色性的方法，第一版》。日本在这基础上于 1968 年制定了 JIS Z 8726 (光源的显色性评价方法)。这种方法也是目前应用最广的方法。

CIE 于 1971 年对第一版加以补充、修订、刊出了第二版。其中采用了包括 CIE 1960 UCS 色度图的 CIE 1964 年 $U^*V^*W^*$ 表色系。后来 CIE 的 TC-1.3 提出了使用 CIE 1976 年 $L^*u^*v^*$ 体系的建议 (参见 4-3-2 节)，但尚未用于显色性评价及其相应的公式中。

(a) JIS 方法 (根据 CIE 第一版)

(续)

试验色 波长 [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
670	0.453	0.332	0.230	0.151	0.180	0.278	0.462	0.705	0.797	0.725	0.088	0.026	0.747	0.092	0.604
675	0.454	0.331	0.238	0.154	0.183	0.281	0.460	0.709	0.803	0.729	0.093	0.030	0.747	0.096	
680	0.455	0.331	0.251	0.159	0.186	0.283	0.468	0.712	0.809	0.731	0.102	0.035	0.747	0.102	0.614
685	0.457	0.330	0.269	0.162	0.189	0.286	0.470	0.715	0.814	0.735	0.112	0.043	0.747	0.110	
690	0.458	0.329	0.288	0.165	0.192	0.291	0.473	0.717	0.819	0.739	0.125	0.056	0.747	0.123	0.624
695	0.460	0.328	0.312	0.168	0.195	0.296	0.477	0.719	0.824	0.742	0.141	0.074	0.746	0.137	
700	0.462	0.328	0.340	0.170	0.199	0.302	0.483	0.721	0.828	0.746	0.161	0.097	0.746	0.152	0.634
705	0.463	0.327	0.366	0.171	0.200	0.313	0.489	0.720	0.830	0.748	0.182	0.128	0.746	0.169	
710	0.464	0.326	0.390	0.170	0.199	0.325	0.496	0.719	0.831	0.749	0.203	0.166	0.745	0.188	
715	0.465	0.325	0.412	0.168	0.198	0.338	0.503	0.722	0.833	0.751	0.223	0.210	0.744	0.207	
720	0.466	0.324	0.431	0.166	0.196	0.351	0.511	0.725	0.835	0.753	0.242	0.257	0.743	0.226	
725	0.466	0.324	0.447	0.164	0.195	0.364	0.518	0.727	0.836	0.754	0.257	0.305	0.744	0.243	
730	0.466	0.324	0.460	0.164	0.195	0.376	0.525	0.729	0.836	0.755	0.270	0.354	0.745	0.260	
735	0.466	0.323	0.472	0.165	0.196	0.389	0.532	0.730	0.837	0.755	0.282	0.401	0.748	0.277	
740	0.467	0.322	0.481	0.168	0.197	0.401	0.539	0.730	0.838	0.755	0.292	0.446	0.750	0.294	
745	0.467	0.321	0.488	0.172	0.200	0.413	0.546	0.730	0.839	0.755	0.302	0.485	0.750	0.310	
750	0.467	0.320	0.493	0.177	0.203	0.425	0.553	0.730	0.839	0.756	0.310	0.520	0.749	0.325	
755	0.467	0.318	0.497	0.181	0.205	0.436	0.559	0.730	0.839	0.757	0.314	0.551	0.748	0.339	
760	0.467	0.316	0.500	0.185	0.208	0.447	0.565	0.730	0.839	0.758	0.317	0.577	0.748	0.353	
765	0.467	0.315	0.502	0.189	0.212	0.458	0.570	0.730	0.839	0.759	0.323	0.599	0.747	0.366	
770	0.467	0.315	0.505	0.192	0.215	0.469	0.575	0.730	0.839	0.759	0.330	0.618	0.747	0.379	
775	0.467	0.314	0.510	0.194	0.217	0.477	0.578	0.730	0.839	0.759	0.334	0.633	0.747	0.390	
780	0.467	0.314	0.516	0.197	0.219	0.485	0.581	0.730	0.839	0.759	0.338	0.645	0.747	0.399	
785	0.467	0.313	0.520	0.200	0.222	0.493	0.583	0.730	0.839	0.759	0.343	0.656	0.746	0.408	
790	0.467	0.313	0.524	0.204	0.226	0.500	0.585	0.731	0.839	0.759	0.348	0.666	0.746	0.416	
795	0.466	0.312	0.527	0.210	0.231	0.506	0.587	0.731	0.839	0.759	0.353	0.674	0.746	0.422	
800	0.466	0.312	0.531	0.218	0.237	0.512	0.588	0.731	0.839	0.759	0.359	0.680	0.746	0.428	
805	0.466	0.311	0.535	0.225	0.243	0.517	0.589	0.731	0.839	0.759	0.365	0.686	0.745	0.434	
810	0.466	0.311	0.539	0.233	0.249	0.521	0.590	0.731	0.838	0.758	0.372	0.691	0.745	0.439	
815	0.466	0.311	0.544	0.243	0.257	0.525	0.590	0.731	0.837	0.757	0.380	0.694	0.745	0.444	
820	0.465	0.311	0.548	0.254	0.265	0.529	0.590	0.731	0.837	0.757	0.388	0.697	0.745	0.448	
825	0.464	0.311	0.552	0.264	0.273	0.532	0.591	0.731	0.836	0.756	0.396	0.700	0.745	0.451	
830	0.464	0.310	0.555	0.274	0.280	0.535	0.592	0.731	0.836	0.756	0.403	0.702	0.745	0.454	
405	0.254	0.116	0.073	0.121	0.315	0.464	0.555	0.416	0.052	0.067	0.121	0.068	0.313	0.039	0.166
436	0.232	0.122	0.073	0.140	0.341	0.539	0.550	0.471	0.047	0.074	0.104	0.169	0.366	0.044	0.197
546	0.247	0.277	0.400	0.352	0.340	0.290	0.257	0.251	0.034	0.638	0.244	0.040	0.493	0.155	0.275
578	0.332	0.333	0.321	0.254	0.264	0.228	0.254	0.276	0.056	0.700	0.130	0.017	0.668	0.122	0.284
589	0.385	0.310	0.287	0.217	0.234	0.221	0.267	0.292	0.096	0.704	0.107	0.016	0.714	0.107	0.363

(1) 试验色 表 4-5 中黑体字表示的是在 400 nm~700 nm 的波长范围内所给出的每 10 nm 间距的 (试验色的) 光谱反射率数据。第 1~8 号试验色用来求出平均显色指数 R_a ，它们是从明度为 6 的并有中等彩度的孟塞尔颜色图册中选出的。另外是为了求出特殊显色指数 R_i 的，第 9~12 号试验色是高彩度的红、黄、绿、蓝的代表色；第 13 号是皮肤色；第 14 号是与树叶绿相近的颜色；第 15 号代表日本妇女的皮肤色 (1YR 6/4)，是在 JIS 中追加的 (表 4-6)。

(2) 基准光源 从被试光源的色温选取在 5 个微倒度以内的光源，原则上当 $T_c \leq 5000\text{K}$ 时用完全辐射体，当 $T_c > 5000\text{K}$ 时用 CIE 合成昼光 (参见 4-2 节) 作基准光源。而对于荧光灯，色温到 5300 K 的也有用完全辐射体作标准光源的。

这样就要采用数量繁多的基准光源，原因是没有确定近似度很高的色适应计算式。因此，在显色性的评价结果上有必要标注基准光源的种类。

(3) 平均显色指数 即第 1~8 号色在 CIE 1960 年 UCS 色度图上的色度偏移平均值，可由下式计算出来。

表4-6

CIE试验色(第1号至第14号)

CIE的序号	近似的孟塞尔记号	昼光下看到的颜色
1	7.5R6/4	亮灰红色
2	5Y6/4	暗灰黄色
3	5GY6/4	浓黄绿色
4	2.5G6/6	中等程度的浅黄-绿色
5	10BG6/6	亮的浅蓝-绿色
6	5PB6/8	浅蓝色
7	2.5P6/8	浅紫色
8	10P6/8	亮浅红-紫色
9	4.5R4/13	浓红色
10	5Y8/10	浓黄色
11	4.5G5/8	浓绿色
12	3PB3/11	浓蓝色
13	5YR8/4	亮的浅黄-粉红色(人肤色)
14	5GY4/4	中等程度的橄榄绿色(叶绿)

$$R_s = 100 - 4.6\overline{\Delta E_s} \quad (4-41)$$

$$\overline{\Delta E_s} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \Delta E_{si} \quad (4-42)$$

$$\Delta E_{si} = 800 \{ [(u_{xi} - u_x) - (u_{oi} - u_o)]^2 + [(v_{xi} - v_x) - (v_{oi} - v_o)]^2 \}^{1/2} \quad (4-43)$$

式中, R_s 为被试光源的平均显色指数; ΔE_{si} 是把照明由基准光源变换成试验光源时对试验色(i)所感觉到的色度变化量; $\overline{\Delta E_s}$ 是试验色($i=1\sim 8$)的 ΔE_{si} 平均值; u_{xi} 、 v_{xi} 是用被试光源(K)照明时试验色(i)的UCS色度坐标; u_{ox} 、 v_{ox} 是由基准光源(O)产生的试验色(i)的UCS色度坐标。

其中包含着对 u_x 、 v_x 和 u_o 、 v_o 的折扣, 是对试验光源与基准光源间色差的色适应变化的粗略修正。

(4) 特殊显色指数 分别对各个试验色应用CIE 1964年 $U^*V^*W^*$ 体系色差公式计算出色差, 然后通过下式计算出特殊显色指数 R_i 。

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (4-44)$$

$$\Delta E = \{ (W_{xi}^* - W_{oi}^*)^2 + 169 [W_{xi}^* (u_{xi} - u_x) - W_{oi}^* (u_{oi} - u_o)]^2 + 169 [W_{xi}^* (v_{xi} - v_x) - W_{oi}^* (v_{oi} - v_o)]^2 \}^{1/2} \quad (4-45)$$

式中, W_{xi}^* 是被试光源K产生的试验色(i)的明度指数。

W_{oi}^* 是基准光源O引起的试验色(i)的明度指数。

$$\text{明度指数} \quad W^* = 25Y^{1/3} - 17 \quad (100 \geq Y \geq 1) \quad (4-46)$$

Y 是用百分比表示的视觉灵敏度反射率。

(5) 显色指数的意义 与基准光源完全相同的显色性用评价指标100来表示, 平均显色指数50相当于色温3000K的标准型暖白色荧光灯的显色性。因而这个评价指标没有绝对的数值。例如, 平均显色指数接近于100的6500K的日光色灯与3000K的暖白色灯就各有它们的基准光源, CIE昼光 D_{65} 与3000K的完全辐射体是有很大的不同的。将它们的基准光源进行相互比较, 其显色性也是不同的。即使平均显色指数相等, 也不能说两个试验光源有相

同的显色性。

(b) CIE 第二版方法的主要变动

(1) 试验色的光谱反射率在波长范围 360~830 nm 内, 以 5 nm 的间距给出。

(2) 完全辐射体的 C_2 的值作了变动 (C_2 值由原来的 1.4380 cm·K 变成 1.4388 cm·K)。

(3) 由于试验光源 K 与基准光源 r 之间色适应状态不同, 可用下式计算色适应偏移。

$$u'_{xi} = \frac{10.872 + 0.404 \times \frac{c_{xi}}{c_k} \cdot c_r - 4 \cdot \frac{d_{xi}}{d_k} \cdot d_r}{16.518 + 1.481 \times \frac{c_{xi}}{c_k} \cdot c_r - \frac{d_{xi}}{d_k} \cdot d_r}$$

$$v'_{xi} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \times \frac{c_{xi}}{c_k} \cdot c_r - \frac{d_{xi}}{d_k} \cdot d_r} \quad (4-47)$$

u'_{xi} 、 v'_{xi} 是对试验色 (i), 像把被试光源合并基准光上一样, 即使得 $u'_k = u_r$, $v'_k = v_r$ 并考虑到适应色偏移后的色度坐标。

c 、 d 是应用下式进行计算, 将试验光源 K 的坐标由 u_k , v_k 变成 c_k , d_k , 基准光源 (r) 的坐标 u_r , v_r 变成 c_r , d_r , 同时将试验色 (i) 在试验光源下的坐标 u_{xi} , v_{xi} 变成 c_{xi} , d_{xi} 。

$$c = \frac{1}{v} (4 - u - 10v)$$

$$d = \frac{1}{v} (1.708v + 0.404 - 1.481u) \quad (4-48)$$

(4) 在平均显色指数中使用三维均匀色空间的色差式 (CIE1964 色差式)。

$$\Delta E_i = [(U_{ri}^* - U_{xi}^*)^2 + (V_{ri}^* - V_{xi}^*)^2 + (W_{ri}^* - W_{xi}^*)^2]^{1/2} \quad (4-49)$$

(c) 显色指数举例 表4-7表示由图4-31的光谱分布代表的各种灯的显色指数。

表4-7 各种灯 (图4-31) 的显色指数

试验光源		1		2		3		4	
色度	x	0.312 _g		0.373 _g		0.347 _g		0.324 _g	
	y	0.342 _g		0.380 _g		0.366 _g		0.385 _g	
基准光源		D6500		P4200		P5000		D5800	
平均显色指数		JIS	CIE第2版	JIS	CIE第2版	JIS	CIE第2版	JIS	CIE第2版
		77	74	65	62	92	92	23	15
特殊显色指数	R_9	-50	-55	-89	-92	76	70	-322	-327
	R_{10}	60	56	43	40	81	85	-44	-55
	R_{11}	67	64	43	42	90	87	-14	-18
	R_{12}	74	70	50	47	92	84	-26	-26
	R_{13}	72	69	59	57	91	90	2	-3
	R_{14}	97	94	96	93	95	98	85	75
	R_{15}	58	—	45	—	90	—	-32	—

⊖ 在CIE第二版中, 基准光源用附注 r 说明。

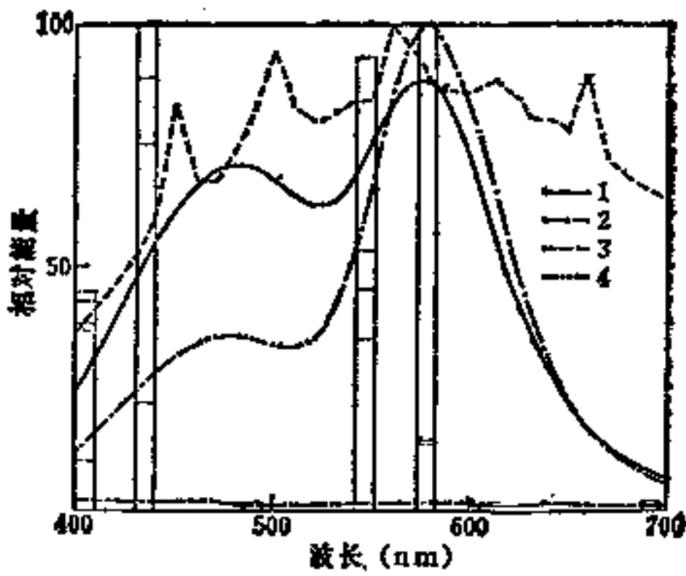


图4-31 各种灯的光谱分布

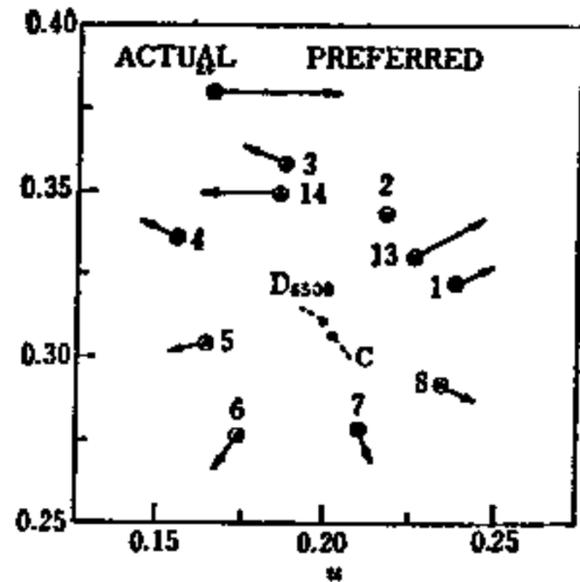


图4-32 用得意指数表示的试验色的色度坐标及对于喜爱色的修正量(箭头)(Judd)

(2) 考虑到人的爱好的评价方法 从实际应用考虑,在显色评价中把人的爱好因素考虑进去是有必要的,这方面的研究正在进行中。现在还没有规定出这方面的标准化的方法,这里只对特别有代表性的方法予以介绍。

Judd 根据喜爱色(preferred color)的再现量提出了以“得意指数”(flattery index)作为评价指数的方案^[18]。为了与CIE方法联系起来,采用CIE第1~8号、第13号、第14号等10种颜色作为试验色。同样,为使基准光源对于这些试验色获得令人满意的显色性,把它们在CIE1960年UCS坐标上的偏移 $\Delta u'_{f,i}$ 与 $\Delta v'_{f,i}$ 用原来的数据推算出来。用标准光源D₅₀作基准光源时,各试验色的坐标表示在图4-32中。特别对于全部试验色来说,只有削减表示光源爱好色的量,才能用100来表示最佳评价数,例如,基准光源的评价数用90表示。喜爱色的评价数可用下式来确定。

$$R_f = 100 - 4.6 \overline{\Delta E_{f,k}} \quad (4-50)$$

$$\Delta E_{f,i} = 800 \{ [(u_{o,i} + \Delta u'_{f,i} - u_o) - (u_{x,i} - u_x)]^2 + [(v_{o,i} + \Delta v'_{f,i} - v_o) - (v_{x,i} - v_x)]^2 \}^{1/2} \quad (4-51)$$

式中 $\overline{\Delta E_{f,k}}$ 是对色偏移 $\Delta E_{f,i}$ 的加权平均值。第2号(奶黄色)、第13号(皮肤色)和第14号(叶绿色)是日常生活中特别重要的颜色,因此也应比其它试验色加权更大。计算用的试验色修正值 $\Delta u'_{f,i}$ 、 $\Delta v'_{f,i}$ 以及对各种试验色的加权数表示在表4-8中。

由其它方法得到的指数有Pracejus的“接受度指数”(acceptability index)^[19]这种指数是对用各种灯照明的室内舒适性作主观评价的结果计算“得意指数”用的基准,而由与此有关的CIE方法的第1~8号试验色在色度图上所包围的八角形面积,由下式来确定。

$$I_a = C_a \cdot A_s / A_{s0} \quad (4-52)$$

式中, A_s 与 A_{s0} 是由第1~8号这八个试验色在CIE1960年UCS色度图上包围的八角形的面积(图4-33); A_s 是在试验光源下的面积; A_{s0} 是在等能白色光下的面积。 C_a 称做“接受度因数”(acceptability factor),是为使评价指数与实验结果相符而对光源色温所确定的系数,如图4-34所示。

Jerome证实Judd用“得意指数”表示喜爱色对于高彩度色有令人满意的结果,并提出对得意指数计算的修正公式^[20,21]。Thornton在Judd的喜爱色基础上提出“色喜爱指数”

(color-preference-index), 并由实验证实了 Judd 的方案^[22]。

表4-8 计算“得意指数”用的基准光源下试验色的修正量 (Judd)

试 验 色		试 验 色 的 修 正 量		加 权 数
序 号	孟塞尔记号	$\Delta v_{f,i}$	$\Delta u_{f,i}$	
1	7.5 R 6/4	0.0020	0.0008	3
2	5 Y 6/4	0.0000	0.0000	15
3	5 G Y 6/8	-0.0020	0.0008	5
4	2.5 G 6/4	-0.0020	0.0010	5
5	10 B G 6/4	-0.0020	-0.0004	5
6	5 P B 6/8	-0.0012	-0.0020	5
7	2.5 P 6/8	0.0008	-0.0020	5
8	10 P 6/8	0.0020	-0.0010	5
13	5 Y R 8/4	0.0040	0.0022	35
14	5 G Y 4/4	-0.0040	0.0000	15

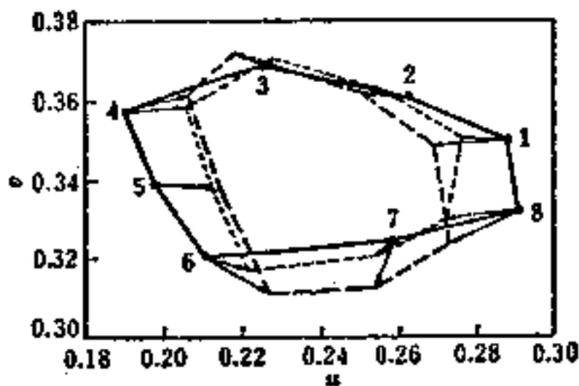


图4-33 在CIE1960年UCS色度图上8个试验色的坐标 (Pracejus)

实线—3500K标准光源 虚线—暖白色荧光灯
折线—荧光汞灯

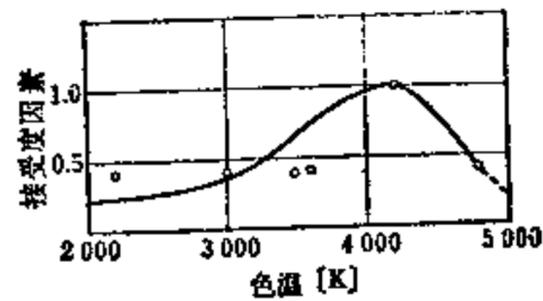


图4-34 Pracejus的接受度因素

渡会等人考虑到色的偏移方向, 并提出能够表现出彩度高低的色空间缩小率 (k), 显色温度 (T_s) 及残留色偏移 (ΔF_s) 的指标。这里, 由任意光源照射下8个试验色的色度八角形的形状, 与由某一色温的基准光源照射下八角形的形状大致相同。根据这一事实, 连各试验色的色偏移量也不加考虑, 由形成的相似形、基准光源的色温和图形的缩小率, 以及色偏移的残差平均, 就能评价包括喜爱程度在内的显色性。特别是 k , 与 Judd 的“得意指数” Pracejus 的“接受度指数”等有相同的概念。对于 Judd 的喜爱色, 相当于 $k = 123\%$, $T_s = 6000K$ ^[23]。

4-5 显色方式

在日常生活中颜色伴随着其外表的形式, 形成各种各样的印象。

Katz 把颜色分成平面色、表面色、空间色、透明色、透明平面色、透明表面色、镜面反射色、光泽、光辉和炽热等。

所谓平面色, 如天空色及单色仪中见到的颜色, 能产生距离不定、柔和等感觉。表面色如板材或色纸表面等的颜色, 有位置确定、坚硬的感觉。空间色如冷天的天空色, 似乎是充

满着一定限度的三维空间。

4-5-1 色可见度的心理现象

(1) **对比** 并列一起的两种色彩,并不表现一般客观性质的原状,而是强调在色彩感觉上的所谓综合显示的现象(同时对比)。

除了同时对比外还有继时对比。另外还有色相对比、明度对比、彩度对比。但是通常不存在单一属性的对比,多是几种属性同时存在而产生的对比。通常两种色彩中有一种面积越大,而且明度、彩度越高,对比也就越显著〔39〕。

(2) **恒常现象** 照明的性质与强度发生了变化,但对在它照明下的物体在感觉上没有感到有何变化。这称做色彩的恒常现象或色觉恒常。

在纯粹单色光照明下不存在恒常现象,但是 Helson〔29〕在单色光照明(720lx)中混进少量(3lx)的白色光就开始产生色彩恒常,加入48lx的白光就产生完全的恒常现象。Helson假设在单色光照明下所感觉到的表面色的色调与其反射率有关。在单色光照明下所见到的明亮表面与照明光呈现相同的色调,暗的表面呈现照明光补色的色调,因此中等亮度的表面就呈现出近于无彩色。

(3) **适应** 适应现象有明适应、暗适应和色适应(参看4-4节)。

在从黑暗到明亮的那一瞬间,物体看起来刺眼,但经过慢慢的适应后刺眼的感觉就有所减少,物体也看清楚了。相反,从明处到暗处开始也见不到任何东西,但是眼睛的感觉能力逐渐提高,也就看得清楚了。在这里,前者称做明适应,后者称做暗适应。明适应的过程极为迅速,只要1分钟以内即可,而暗适应在最初的5分钟进行得很迅速,以后就很慢了,要完全适应而达到稳定的状态至少要有30分钟。

暗适应受到其开始前适应了的条件的影响。例如,对长波处(红色附近)的光作过适应后,进行暗适应就较迅速了。

(4) **后像** 刺激消除之后仍在视网膜上残存着兴备的感觉,而且连续引起与原感觉像同质或异质的感觉,这种现象称为后像。有正后像(积极后像:与原先感觉有同质的亮度和色调的后像)和负后像(消极后像:与原先感觉的亮度或色调相反的后像),刺激消失后,两种后像起伏、交替出现。但是感觉到正后像的现象是较少的。通常,较长时间观察明亮的对象后,把眼睛从明亮处移开就经常出现负后像。观察有彩色之后,在无彩色面上见到的后像颜色大体上是原像的补色,但是与用相加混色所得到的补色稍有不同。在色度图上红的后像在蓝方面,蓝的后像则向红方向偏移〔41〕。

4-5-2 影响物理量判断的色效应

(1) **轻重的判断** 在这方面明度的影响很强。对明度高的颜色觉得轻,明度低的就感到重。以明度5~6为中心,在此以下的被认为重,高于它的就觉得轻,但是对于高彩度的颜色,明度4也有认为轻的。

至于从色序方面来考虑,虽然有按黑、蓝、红、橙、绿、黄、白的次序觉得越来越轻的效果,但单从色调本身来考虑,则不及明度的影响为大。轻重的感觉与明度和彩度的关系可用实验公式 $7.28V + C = \text{常数}$ 来表示。

(2) **温度感** 按红、橙、黄、绿、蓝的次序感觉越来越冷。

(3) **距离的感觉** 这方面与色调有关,像红、黄等长波的颜色有前进的倾向(看起来觉得近),而蓝、绿等短波的颜色有后退的倾向(看起来觉得远)。但是对于在房间中实际距

离很近的情况，即使房间面积很大也未必有这样的效果。

(4) 大小的感觉 与明度有关，明亮的颜色有大的感觉。于是黄色的东西看起来最大，其次是绿色，红色的、蓝色的看起来就小。

4-5-3 色的辨认性、诱目性和可读性

综合色彩所有功能上的各种特性，与视感觉概念有关的是辨认性、诱目性和可读性。

(1) 辨认性 所谓辨认性就是发现色彩物体的难易程度（时间的、距离的和光度上的）。在这里，当然以观察者的注意力向着预想的物体出现方向为前提。

在辨认对象是物体色的情况下，一般来说，对象与其背景的明度差别大的，其辨认性就高。

在辨认对象是色光的情况下，图4-35是与辨认性相当的不同波长的无色（感觉）阈，但在小光点情况下红光的辨认性是最高的（表4-9）〔24〕。显然，这与观察者的暗适应状态有关。

(2) 诱目性 本来观察对象是可以辨认出来的，但由于观察者只注意大的方面，由于疏忽而看漏了。然而，如果这时由于对象的色彩鲜明醒目，就能引起观察者的注意。这就是色彩的诱目性。虽然诱目性与色的三属性都有关，但是其中效果最显著的是彩度（色光的情况则是纯度）。就色调而言，黄、红、橙显示出高的诱目性（白色背景时红色最高）。与背景的明度差没有太大的影响。在单色光的情况下，纳谷等人提出的公式 $A = 2I + 3C$ 〔34〕颇为适合。（A：色彩的诱目性；I：与背景的色差〔由 Godlove 的色差式求出〕；C：对象的彩度。）

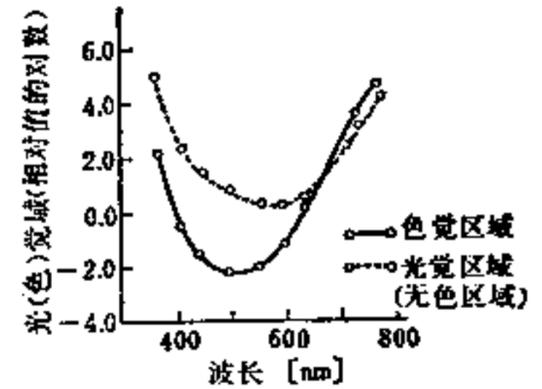


图4-35 色光的辨认性（以光度为指标）(Hecht和Hsia)

光觉阈是不能辨认出颜色，只能知道观察对象是否存在的界限。可否辨认出颜色来的程度也随对象物颜色的波长不同而异。图中表示对黄绿色的感受性是最高的。

表4-9 各种气候条件下色光的辨认性

——观察距离为5000英尺时辨认所需光度——

(Anon, 1944)

气候条件	红	琥珀色	白	绿
夜晚，晴	1.0	2.0	2.5	2.8
夜晚，小雨	1.2	2.1	3.0	3.2
夜，阴天，有雾	3.2	4.1	3.1	5.9
夜，大雨	8.9	33.5	132.0	33.5
夜，小雪	222.0	835.0	1656.0	567.0
白天，阴，有雾	2000.0	2111.0	3222.0	4000.0
白天，晴	4778.0	7556.0	11111.0	10000.0

注：基本单位为烛光。但是是以夜间晴天时辨认红色光的必要光度作为1.0，其它则是以它为准的相对量。数值大的表示难以见到。

(3) 可读性 文字、数字、图形等内容识别的难易程度也由于色彩的不同而不相同。这就是所谓的色彩的可读性。通常对于彩色的视觉对象，采用有色的底无色的图，比起无色的底有色的图有更高的可读性。这一事实在实验上具有很明显的结果。然而，因为通常表示简单的图形和文字等多是描绘出来的，所以要看得清楚就得描绘得很粗。可是如果图是白色，底是绿色或蓝色等配合起来，就能使可读性提高〔30, 31, 32〕（由于在这种情况下底有收缩性，

文字等有光渗现象而显得更加鲜明。但是对复杂的文字等，恰好相反，由于光渗现象而使轮廓线消失，可读性反而显得低了。）

4-5-4 色的感情效果和爱好

(1) 色彩的**感情效果** 使用语义差别法 (semantic differential) 调节色彩带来的感情效果，色彩感情就可分成独立的三个因素。即“感觉的良好程度” (或“评价的”) 因素 (它与“感觉良好”、“好”、“谐调”、“精炼”、“精粹”等各种情感有关)，“活动”因素 (它与“明亮”、“华丽”、“年轻”、“好动的”等各种情感有关) 和“增强”因素 (它与“坚强的”、“牢固的”、“干脆的”等各种情感有关)。(此外，还有单独提出“温和程度”因素的。)

衡量上述色彩感情的各种因素与色彩三属性的关系，凡与色调关系深的是“活动因素”，与明度关系深的是“增强因素” [40]。

关于单色组合的效果，当二色配色时，就可以得到活动因素与冷暖感情 [36] 之下单色效果相加平均的近似效果。

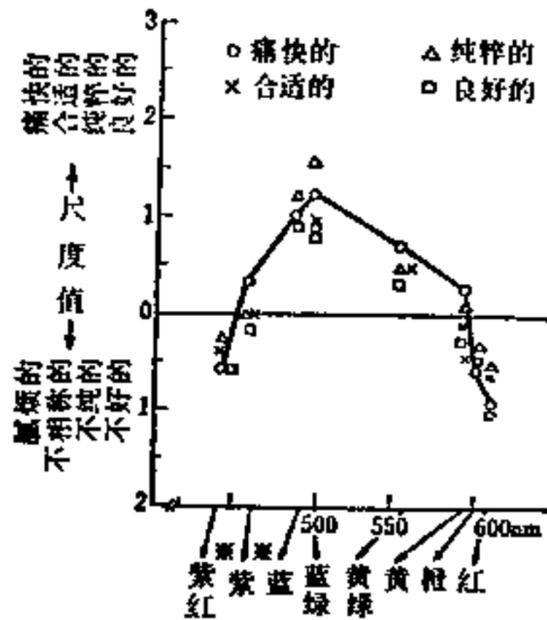


图4-36 色与情绪良好的感情的关系 (色光适应以前)

(神作, 福井1971年)

蓝绿色是表示“好的”、“纯粹的”、“合适的”、“愉快的”等感情最高的颜色。

* 采用补色主波长则与标度的间距适宜。

用彩色光照明时，也可提出与物体色大体相同的因素。波长与感情效果的关系，就“活动”或“温暖”的因素来说，蓝、绿等色有中等程度波长时，感情效果是“静的”、“冷的”，长短两波长则表示与其相反的感情效果。对“感情良好”的因素来说，与此完全相反，在中等程度的波长时才产生最舒适的感情 (参见图4-36) [35]。

(2) 色的**爱好** 色彩的爱好虽然也是包含在色彩感情的“情绪良好”因素之内，但是对它单独利用或论述的可能性都很大。在此，可以将它从其它的感情效果中分离出来观察。

关于对现代人色爱好的调查结果参见表4-10〔26〕。其结果与以前的爱好次序有所不同，而且有以下几个特点：（1）爱好原色调的色；（2）但50岁左右的人则与这种爱好倾向不同，爱好与原来的倾向相近的明淡色；（3）30岁左右的男女，其爱好没有太大的差别，而50岁左右的男女其差别就大。

表4-10 现代人对色爱好的次序（至第7位）

次 序 性别等	1	2	3	4	5	6	7
全 体	5YR 7/14 橙	5R 4/12 红	N9.5 白	5Y 8/12 黄	5GY 7/10 黄绿	5B 8/4 海蓝	5Y 9/4 奶黄
男 性	5YR 7/14 橙	5R 4/12 红	5Y 8/12 黄	5GY 7/10 黄绿	N9.5 白	5PB 4/10 蓝	5Y 9/4 奶黄
女 性	N9.5 白	5R 4/12 红	5Y 8/12 黄	5YR 7/14 橙	5B 8/4 海蓝	N1.0 黑	5RP 8/4 深紫红

男性与女性的爱好次序有些不同(千千岩1973年)

4-5-5 色的记忆和联想

（1）色的记忆 关于色的记忆有两个方面的问题。其一是与色的记忆的严密性有关的问题，已经找到对特定色调（例如暖色体系的色）作较为正确记忆等的事实。另一则是记忆中的色变成哪一记忆色的问题。通常，虽然那些色的彩度与明度通过强调记忆下来，但是对于熟知对象的色的选择性印象也有产生判断偏移的倾向。在色空间内表示记忆色的这些判断时，虽然有某些扩展性，但是在记忆中树叶所有的色调是狭窄的，而海滨的砂或石等所具有的色调却是宽阔的〔25〕。Newhall等人提出了记忆色的预测公式〔38〕。

（2）色的联想、象征 看见颜色就同时产生对各种各样事物或状态的感觉，这就是色的联想。联想有具体的联想（例如由红色联想到苹果，白色联想到云等），与抽象的联想（例如由红色联想到热情、革命，而由白色联想到清洁等）。抽象的联想具有多数人的共通性，与传统的想象结合起来就能一般化，某种色就会表示某些特定的东西。这也称做象征。例如，蓝色是幸福的颜色，它表示希望；而白色意味着纯真与洁白，是表示和平与神圣的颜色〔41〕。

联想、象征作为文化、宗教与个人的经验等，与各种因素有关。

4-6 色 调 节

4-6-1 色调节

以提高人们工作效率为目标的色彩设计技术称做色调节。

色调节可以分成与照明设计有直接联系的环境色彩和作为便利防灾措施的安全色彩两个方面来考虑。

4-6-2 环境色〔46, 47, 48〕

环境色设计的基本事项可以归纳如下：

(1) 把明度高的色配置在上方, 明度低的配置在下方。

- 〔例〕
- 顶棚 $V = 9.5$
 - 墙壁 $V = 8.5$
 - 护墙板 $V = 7.5$
 - 踢脚板 $V = 3.0$
 - 地面 $V = 6.5$

踢脚板兼有防污作用, 通常采用比地面暗的颜色。

(2) 面积越大, 彩度越低, 高彩度的形式多用在面积小的部分。

(3) 色调通常以同一种色调的配色为主, 为了区分开建筑物、机械装置、服装等各自采用的同一色调, 采用 2~3 种色调的情况也是很普通的。

- 【例】
- 建筑物内部装修的色调 10.0YR 5.0G
 - 机械装置类 5.0G 2.5PB
 - 服装 10.0YR 2.5PB

4-6-3 环境色和节能

在照明技术中考虑环境色的色彩时, 首先要考虑的色彩性能是明度, JIS (或孟塞尔) 明度的符号是 V 。

明度与反射率相对应。明度高的色彩, 其反射率也高, 对于光的利用就更有效。这对于节省能量来说是适合的。

表4-11表示明度与反射率之间的关系。

表4-11 明度与反射率的关系^{〔48〕}

明 度	反射率(%)	反射率(%)	明 度
9.5	90.01	90	9.5
9.0	78.66	85	9.3
8.5	68.40	80	9.1
8.0	59.10	75	8.8
7.5	50.68	70	8.6
7.0	43.06	65	8.3
6.5	36.20	60	8.1
6.0	30.05	55	7.8
5.5	24.58	50	7.5
5.0	19.77	45	7.1
4.5	15.57	40	6.8
4.0	12.00	35	6.4
3.5	9.00	30	6.0
3.0	6.56	25	5.5
2.5	4.61	20	5.0
2.0	3.12	15	4.4
1.5	2.02	10	2.7
1.0	1.21	5	2.6
0.5	0.58		

4-6-4 建筑材料的明度^{〔48〕}

常用建筑材料的明度如下:

绘图纸	9.0
亮白漆	9.0
杉木板	7.0~7.5
柏树板	8.0
层压板	7.0
柳桉木	6.0~7.0
柚木	4.5
桐木	8.0
桃木	5.0
混凝土	5.0~6.0
砖	4.0~4.5
铁平石	4.0~5.0
稻田花岗石	6.5
花岗岩原材	6.5
凝灰岩	7.8~8.0
铝	7.0
铜	5.0~6.0

4-6-5 安全色 [50, 51, 52]

在 JIS Z 9101 (安全色使用通则) 中对安全色作了如下规定:

(1) 红 7.5R 4.5/14

防火、停止、禁止、高度危险等的标志。

(2) 橙 2.5YR 6.5/13

危险、航空、船舶的保安措施 (国际通用橙色) 等的标志。

(3) 黄 2.5Y 8/13

表示“注意”。

(4) 绿 5.0G 5.5/6

安全、卫生、通行等的标志。

(5) 蓝 2.5PB 5.5/6

表示小心。

(6) 紫红 2.5RP 4.5/12

辐射能的标志。

(7) 白 N-9.5

通道、整洁的标志, 或作辅助色。

(8) 黑色 N-1.5

作辅助色。

4-6-6 管道色的识别 [53]

作为安全色更具体的使用通则, JIS Z 9102 (配管识别) 作了以下的规定:

水	蓝色	2.5PB 5.5/6
蒸汽	暗红色	7.5R 3/6

空气	白色	N-9.5
煤气	黄色	2.5Y8/13
酸或碱	灰紫色	2.5P5/5
油	暗橙色	7.5YR5/6
电器	淡橙色	2.5YR7/6

这里,把电器也作为流体来处理,实际上只会使对液体的识别造成困难。很多情况是附加文字和记号而不应用颜色。

参 考 文 献

- (1) G. Wyszecki & W.S. Stiles: Color Science, John Wiley & Sons (1967)
- (2) D.B. Judd & G. Wyszecki: Color in Business, Science and Industry 3rd ed., John Wiley & Sons (1975)
- (3) S.M. Newhall, D. Nickerson & D.B. Judd: Final Report of the OSA Subcommittee on the Spacing of the Munsell Colors, J. Opt. Soc. Amer., 33-7 (1943) 385
- (4) JIS Z 8720: 測色用の標準の光および標準光源 (1976)
- (5) K.L. Kelly: Color Designations for Light, J. Opt. Soc. Amer., 33-11 (1943) 627
- (6) 日本規格協会 JIS 色票委員会監修: 標準色票, 日本規格協会 (昭51)
- (7) E. Jacobson: Color Harmony Manual, Container corporation of America, (1968)
- (8) G. Wyszecki: Development of New CIE Standard Sources for Colorimetry, Farbe 19 1/6 (1970) 43
- (9) 文献 (1)
- (10) D.L. MacAdam: Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight, J. Opt. Soc. Amer., 32-5 (1942) 247
- (11) W.S. Stiles: A Modified Helmholtz Line-element in Brightness-Color Space Proc. Phys. Soc., 58-1 (1946) 41
- (12) L.F.C. Friele: Analysis of the Brawn & Brawn-MacAdam Colour Discrimination Data Farbe 10-1/4 (1961) 193
- (13) Supplement No.2 to CIE Publication No.15, Colorimetry (E-1.3.1) 1971, Bureau Central de la CIE, 1977, in press.
- (14) A.R. Robertson: The CIE Recommendation on Uniform Spaces, Color Difference Equations, and Metric Color Terms, Color Research and Application, 2-1 (1977) 7
- (15) JIS Z 8726: 光源の演色性評価方法 (1967)
- (16) 東莞, 森礼於: CIE演色性評価方法第2版, 日本照明委員会ニュースNo.18 (昭和47) 14
- (17) D.B. Judd, & G. Wyszecki: Color in Business, Science and Industry 2nd ed., John Wiley & Sons (1963)
- (18) D.B. Judd: A Flattery Index for Artificial Illuminants, Illum. Engng., 62-10 (1967) 593
- (19) W.G. Pracejus: Preliminary Report on a New Approach to Color Acceptance Studies Illum. Engng., 62-12 (1967) 663
- (20) C.W. Jerome: Flattery vs Color Rendition, J. of Illum. Engng. Soc., 1-3 (1972) 208
- (21) C.W. Jerome: The Flattery Index, J. of Illum. Engng. Soc., 2-4 (1973) 351
- (22) W.A. Thornton: A Validation of the Color-preference-index, J. of Illum. Engng. Soc., 4-1 (1974) 48
- (23) Y. Watarai: A New Method of Specifying Subjective Color Rendering Properties of General Light Sources, Acta Chromatica, 2-4 (1973) 192
- (24) Anon: Manuals in Pyrotechnics Visibility, USN, Air-Sea Rescue Agency, Bull. No.4 (1944)
- (25) C.J. Bartleson: Memory Colors of Familiar Objects, J. Opt. Soc. Amer., 50-1 (1960) 73
- (26) 千々岩英彰: 現代人の色の好み ①, 色彩情報 No. 41 (1973) 10
- (27) Committee on Colorimetry, OSA: The Science of Color, Thomas Y. Crowell (1953)
- (28) S. Hecht & Y. Hsia: Dark adaptation Following Light Adaptation to Red and White Lights, J. Opt. Soc. Amer., 35-4 (1945) 261
- (29) H. Helson, : Fundamental Problems in Color Vision, 1. The Principle Governing Change in Hue, Saturation and Brightness of Non-selective Samples in Chromatic Illumination, J. Exp. Psychol., 23-5 (1938) 439
- (30) 岩滝典生, 神作 博, 岩倉憲幸, 垣本由紀子: 航空標識の色彩に関する実験的研究(I)—標識の色彩が視認度におよぼす影響について—, 医実報告 5-2 (昭39) 49
- (31) 岩滝典生, 神作 博, 岩倉憲幸, 垣本由紀子: 航空標識の色彩に関する実験的研究(II)—標識の背景の色彩が視認度におよぼす影響について—, 医実報告, 5-2 (昭39) 60
- (32) 岩滝典生, 神作 博, 垣本由紀子, 横井清和: 試作滑走路距離標識の視認性に関する飛行実験—航空標識の色彩に関する実験的研究(N), 医実報告, 6-1 (昭40) 57~

- (33) 神作 博: 色彩の誘目性に関する実験的研究(8)―物体色による背景明度および3属性の効果検討―, 日本心理学会第36回大会発表論文集(昭47) 83
- (34) 神作 博: 色彩の誘目性に関する実験的研究(10)―背景の効果―, 日本心理学会第38回大会発表論文集(昭49) 292
- (35) 神作 博, 福井朋泰: 色彩照明の感情効果の分析(1)―均一色光の場合―, 日本心理学会第35回大会発表論文集(昭46) 241
- (36) 神作順子: 色彩感情の分析的研究, 心研, 34-1(昭38) 1
- (37) 納谷嘉信, 辻本明江, 池田潤平, 山崎勝弘: 単色感情におよぼす各種背景の影響, 第4回日本色彩学会全国大会講演論文集(昭48) 22
- (38) S. M. Newhall, R. W. Burnham & J. R. Clark: Comparison of successive with simultaneous Color Matching J. Opt. Soc. Amer., 47-1 (1957) 43
- (39) 大山 正: 照明心理, 照明学会編, 新編照明のデータブック, オーム社(昭43) 17
- (40) 大山 正, 田中清政, 芳賀 純: 日本学生における色彩感情と色彩象徴, 心研, 34-3(昭38) 109
- (41) 色彩科学協会編: 色彩科学ハンドブック, 南江堂(昭37)
- (42) 相馬一郎, 富家 直, 千々岩英彰: 色彩の感情効果に関する研究Ⅱ, 日本心理学会第28回大会発表論文集(昭39) 100
- (43) 相馬一郎, 富家 直, 千々岩英彰: 色彩の感情効果に関する研究Ⅲ, 日本心理学会第29回大会発表論文集(昭40) 101
- (44) 相馬一郎, 富家 直, 千々岩英彰: 色彩の感情効果に関する研究Ⅳ, 日本心理学会第30回大会発表論文集(昭41) 102
- (45) 和田陽平, 大山 正, 今井省吾編: 感覚・知覚, 心理学ハンドブック, 誠信書房(昭44)
- (46) 文献(41)
- (47) 建築学大系編集委員会編: 建築学大系 8, 音・光・空気・色, 彰国社(昭44)
- (48) 日本建築学会編: 建築設計資料集成Ⅱ, 丸善(昭35)
- (49) JIS Z 8721: 三属性による色の表示方法(1977)
- (50) JIS Z 9101: 安全色彩使用通則(1972)
- (51) JIS Z 9104: 安全色光使用通則(1977)
- (52) JIS Z 9106: けい光安全色彩使用通則(1972)
- (53) JIS Z 9102: 配管識別(1976)

第 5 章

光和辐射的测量

5-1 基础知识^{〔1〕}

5-1-1 辐射量和它的单位 (参照图 5-1)

(1) **辐射能量** 以粒子或电磁波的形式发射、传递或接收的能量。

辐射能量用符号 Q_e 表示, 单位是焦耳 (J) (参照第 3 章)。

(2) **辐通量** 在某个面上单位时间内通过的辐射能量。这个“通过”包含有辐射的发射、转移或接收的意思。

辐通量的符号为 Φ_e , $\Phi_e = dQ_e/dt$, 单位是瓦特 (W)。

(3) **辐照度** 在某个面上某点的辐照度, 是入射在包含着这个点的微小面积元上的辐通量, 除以这个微小面积元的面积。

辐照度的符号为 E_e , $E_e = d\Phi_e/dA$, 单位是每平方米瓦特 ($W \cdot m^{-2}$)

(4) **辐出射度** 在某个面上某点的辐出射度, 是从包含这个点在内的微小面积元发射的辐通量, 用这个微小面积元来除。

辐出射度的符号为 M_e , $M_e = d\Phi_e/dA = \int L_e \cos\theta \cdot d\Omega$, 单位是每平方米瓦特 ($W \cdot m^{-2}$)。

(5) **辐强度** 辐射源在给定方向的辐强度, 是在包含这个方向的微小立体角元内所发射的辐通量, 用这个微小立体角元来除。关于非点状辐射源, 是把通过某个微小面积元的辐通量, 用辐射元表面上的任意一点对于这个微小面积元所张的立体角来除而得的商, 当面与辐射源之间距离达到无限大时的极限。

辐强度的符号为 I_e , $I_e = d\Phi_e/d\Omega$, 单位是每球面度瓦 ($W \cdot sr^{-1}$)。

(6) 辐亮度

(1) 辐射源表面上的某点在给定方向的辐亮度, 是把包含着这个点的微小面积元在给定方向的辐强度, 用在这个方向的垂直平面上直角投影所得出的这个微小面积元的面积来除。

符号为 L_e , $L_e = dI_e/dA \cdot \cos\theta$ 。

(2) 从接受辐射点测量辐射源的辐亮度时, 是把在这个方向垂直平面上的这个点的辐照度, 用以这个点为顶, 以辐射源为底面所构成的锥体立体角来除, 并取立体角为无限小的极限值。

符号为 L_e , $L_e = dE_e/d\Omega$, 单位是每平方米每球面度瓦 ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)。

对完全漫射辐射源, (1) 和 (2) 在理论上给出相同的结果。

(7) **辐射量的光谱密度** 是把波长 λ 与 $\lambda + d\lambda$ 之间的辐射量 dX_e , 用这个微小波长宽度来除。即

$$X_{e,\lambda} = dX_e/d\lambda$$

例如当 X_e 分别为辐通量、辐照度、辐强度和辐亮度时，那么 $X_{e,\lambda}$ 就分别是光谱辐通量、光谱辐照度、光谱辐强度和光谱辐亮度等等。所谓光谱分布，是指 $X_{e,\lambda}$ 为波长的函数。

另外，波长 λ_1 与 λ_2 之间的辐射量以 $X_e(\lambda_1, \lambda_2)$ 来表示时，

$$X_e(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda} d\lambda$$

叫做复合辐射量（或叫积分辐射量，就是从 λ_1 到 λ_2 的波长范围内辐射的波长积分量）。

对于线光谱辐射，如果在波长 λ 处的辐射量为 $X'_{e,\lambda}$ ，那么把复合辐射量表示成：

$$X_e(\lambda_1, \lambda_2) = \sum X'_{e,\lambda}$$

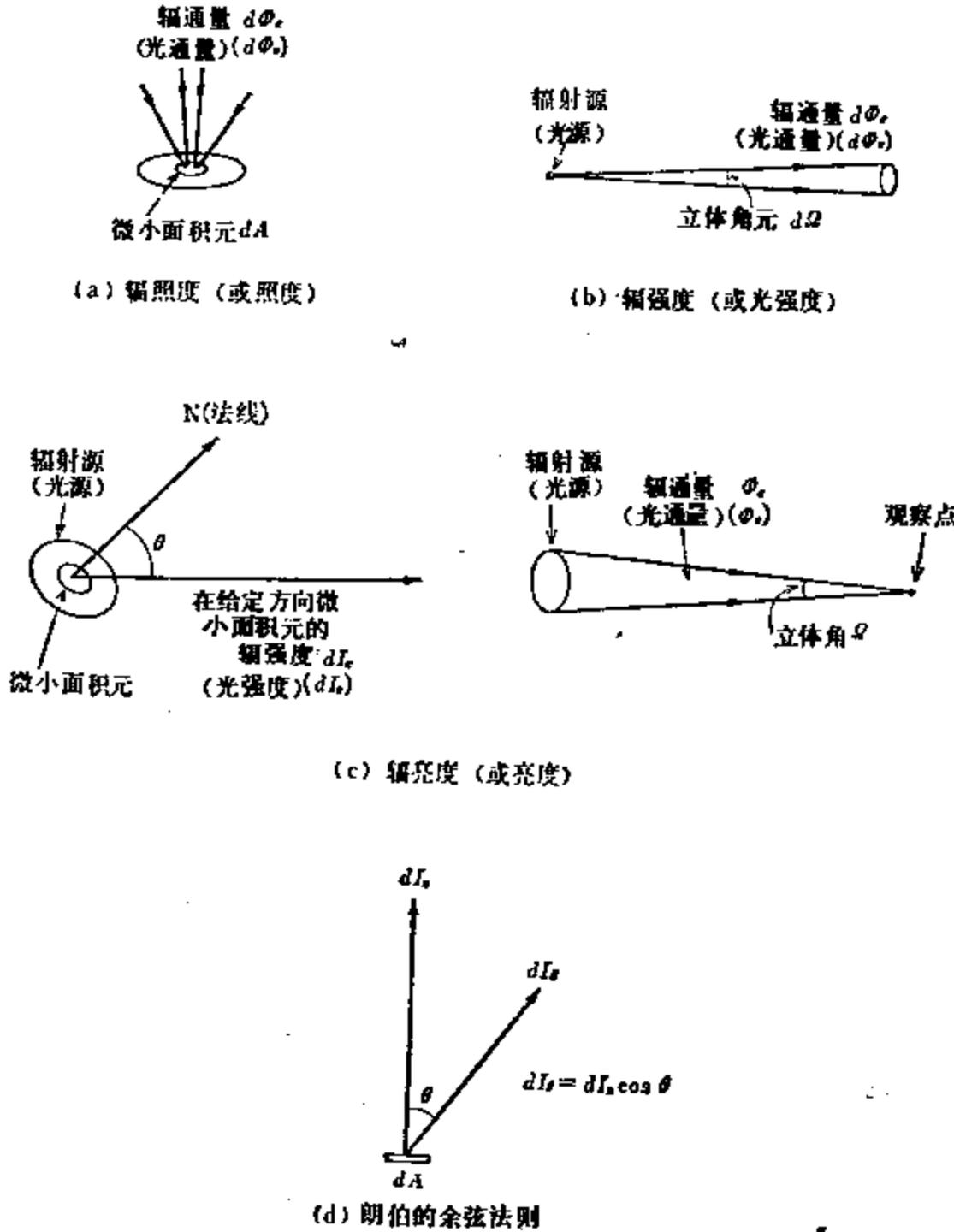


图5-1 基本的辐射量、光度量及朗伯余弦法则的图解

5-1-2 有关测光的国际规定 [2]~[4]

光是具有刺激视觉器官特性的辐射，可见辐射的光谱范围因人而异，无明确定义，但一般下限在 380~400nm 之间，上限在 760~780nm 之间。

在把光作为光度量使用的时候，要按照国际规定来评价。关于光度测量的国际规定，预先要由光度、辐射测量咨询委员会立案审查，经国际度量衡总会（或国际度量衡委员会）通过才能生效。

(1) **光度单位** 目前光强度 (参照 5-1-3) 的单位是光度测定的基本单位, 也是国际单位制 (SI) 的基本单位之一。为了复现光强度的单位, 光的基准器是从 1948 年 1 月 1 日起采用铂的凝固温度下的完全辐射体 (黑体), 目前的光度单位的定义为“光强度单位坎德拉 (cd), 是在 101325 Pa 下的铂凝固温度下, 完全辐射体的 $1/600000 \text{ m}^2$ 的表面在垂直方向上的光强度”。

(2) **标准光谱光视效率** 1933 年国际度量衡委员会采用了国际照明委员会在 1924 年推荐的光谱光视效率 $V(\lambda)$ 的值。这个值是波长从 400~760nm 的范围内以 10 nm 间隔给出 (参照图 5-2 和表 5-1)。

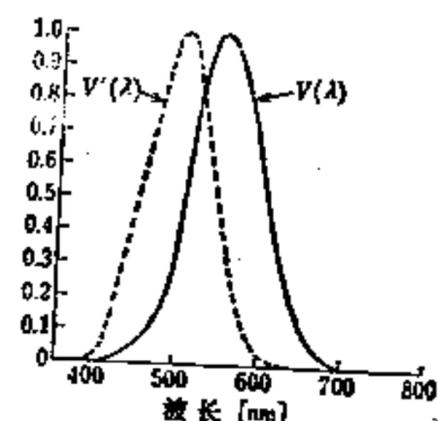


图5-2 标准光谱光视效率

$V(\lambda)$ 是波长 λ_m 的辐通量与波长为 λ 的辐通量之比, 波长为 λ 的辐通量在所给定的测光条件下产生的明亮感觉等于波长 λ_m 的辐通量所产生的。 λ_m 的选择是使这个比的最大值为 1, 实际上 λ_m 是 555 nm。1972 年国际度量衡委员会建议以上述的 $V(\lambda)$ 为基础, 把波长范围扩展为 360~830nm, 对每 1 nm 的波长间隔计算 $V(\lambda)$ 。

表5-1 对于CIE标准观察者的光谱光视效率

λ (nm)	明视觉 V (λ)	暗视觉 V' (λ)
380	0.0000	0.000589
390	0.0001	0.002209
400	0.0004	0.00929
410	0.0012	0.03484
420	0.0040	0.0966
430	0.0116	0.1998
440	0.023	0.3281
450	0.038	0.455
460	0.060	0.567
470	0.091	0.676
480	0.139	0.793
490	0.208	0.904
500	0.323	0.982
510	0.503	0.997
520	0.710	0.935
530	0.862	0.811
540	0.954	0.650
550	0.995	0.481
560	0.995	0.3288
570	0.952	0.2076
580	0.870	0.1212
590	0.757	0.0655
600	0.631	0.03315
610	0.503	0.01593
620	0.381	0.00737
630	0.265	0.003335
640	0.175	0.001497
650	0.107	0.000677
660	0.061	0.0003129
670	0.032	0.0001480
680	0.017	0.0000715
690	0.0082	0.00003533
700	0.0041	0.00001780
710	0.0021	0.00000914
720	0.00105	0.00000478
730	0.00052	0.000002546
740	0.00025	0.000001379
750	0.00012	0.000000760
760	0.00006	0.000000425
770	0.00003	0.000000241
780	0.000015	0.000000139

在通常的光度测量中, 用 10 nm 间隔的 $V(\lambda)$ 已能保证十分精确。当辐射探测器 (眼睛或物理探测器) 的光谱灵敏度与 $V(\lambda)$ 成正比时, 叫做光度测量标准观察者。

对于暗视觉光度测量, 是选用 1951 年 CIE 的暗视觉光谱光视效率函数 $V'(\lambda)$, 已由 1976 年国际度量衡委员会承认 (图 5-2, 表 5-1)。

5-1-3 测光量和它的单位 (参照图 5-1)

(1) **光通量** 是根据辐射所给与其光谱灵敏度与标准光谱光效率成正比的受光器的作用的大小来评价辐射的, 因此是辐通量的导出量。符号为 Φ_v , 单位是流明 (lm)。

光通量与辐通量之间的关系, CIE 1948 年选用下式:

$$\Phi_v = K_m \int \frac{d\Phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (5-1)$$

式中, $d\Phi_e/d\lambda$ 是在波长 λ 处的光谱辐通量, K_m 为最大光谱光效率, 上式适用于光的基准器并求得 K_m 值在 $680 \pm 41 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 的范围内 [5]。

光通量的单位为流明, 是相当于在所有方向上都等于 1cd 光强度的点光源在单位立体角 (1 球面度) 内辐射出来的光通量。

(2) **光量** 是光通量的时间积分量。符号

为 Q_v , $Q_v = \int \Phi_v dt$, 单位是流明·秒 ($\text{lm} \cdot \text{s}$)。

(3) **照度** 是把入射在包含给定点的微小面积元上的光通量, 用这个微小面积元的面积来除。符号为 E_v , $E_v = d\Phi_v/dA$, 单位是勒克斯 (lx) 或是每平方米流明 ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$), $1 \text{lx} = 1 \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(4) **光出射度** 面上一点的光出射度, 是从包含给定点微小面积元上发射出来的光通量, 用这个微小面积元的面积来除。符号为 M_v , $M_v = d\Phi_v/dA = \int L_v \cdot \cos\theta \cdot d\Omega$, 单位是每平方米流明 ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$) 或者辐射勒克斯 (rlx), $1 \text{rlx} = 1 \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

在完全漫射面的情况下, 亮度 L_v 在所有方向都是相同的。所以, 光出射度 M_v 的值, 等于 πL_v 。

(5) **光强度** 从光源出发, 进入到包含给定方向的微小立体角元的光通量, 用这个微小立体角元来除。符号为 I_v , $I_v = d\Phi_v/d\Omega$, 单位是坎德拉 (cd), $1 \text{cd} = 1 \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$ (参照 5-1-2(1))。

(6) **亮度** (1) 在光源表面上的某点对给定方向上的亮度, 是包含这个点的微小面积元在给定方向的光强度, 用这个微小面积元在这个方向的垂直面上的直角投影的面积来除。符号为 L_v , $L_v = dI_v/dA \cdot \cos\theta$

(2) 由接收面的某点测量光源的亮度时, 是这个方向的垂直平面上这个点的照度, 用这个点为顶点、以光源为底面所构成的锥体的立体角来除, 取立体角为无限小的极限值。符号为 L_v , $L_v = dE_v/d\Omega$, 单位是每平方米坎德拉 ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$), 或称为尼特 (nit ; nt)。

其它单位参照表 28-10。

(7) **分布温度** (分光分布温度) 在某个辐射源的可见光区域内的光谱分布 (作为波长函数的辐射量的光谱密度), 与在某个温度下的完全辐射体的可见光区域内的光谱分布相一致或者近似时, 即把这个完全辐射体的温度作为这个辐射源的分布温度。单位是开尔文 (K)。

(8) 关于测光量的各种重要法则

(a) 点光源的光强度 I_v 与总光通量 Φ_v 的关系 在所有方向上具有光强度 I_v 的点光源与总光通量 Φ_v 之间, 有如下关系:

$$\Phi_v = 4\pi I_v \quad (5-2)$$

(b) 照度的距离平方反比定律 具有光强度 I_v 的点光源, 在距离 l 处有一点, 垂直于这个方向的微小面积元上的照度 $E_v = I_v/l^2$, 这就是照度的距离平方反比定律。

(c) 有一定大小的光源的光强度测量中的修正系数 对不能看作点光源的光源, 若真光强度为 I_v , 表观光强度为 I'_v ($I'_v = E_v \cdot l^2$), 则有

$$I_v = I'_v \cdot C = C I_v \cdot l^2 \quad (5-3)$$

式中, l 是从光中心到接收器接收面的距离; C 是随着光源的大小、性质和光度测定距离而变化的修正系数。表 5-2 是 C 值的实例。

(d) 完全漫射面 对于各个方向亮度相等的表面, 叫做完全漫射面。如图 5-1 所示, 作为完全漫射面上的微小面积 dA 的法线方向的光强度和亮度, 分别为 dI_v 、 L_v , 与法线成角度 θ 的方向上, 分别为 dI_v 、 L_v , 则

表5-2 具有一定大小的光源光强度测量值的修正系数
(离光中心距离为 l)

等亮度光源	通过光中心与光源垂直方向的 C	C 的近似式	未经修正时的误差		
			0.5%	0.25%	0.1%
			测定时的距离		
完全透明直线 (长度 $2h$)	$\left\{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2\right\}^{1/2}$	$1 + \frac{1}{2}\left(\frac{h}{l}\right)^2 - \frac{1}{8}\left(\frac{h}{l}\right)^4$	$10h$	$14h$	$22h$
完全漫射直线 (长度 $2h$)	$\frac{2}{\frac{l^2}{h^2} + \frac{l}{h} \tan^{-1} \frac{l}{h}}$	$1 + \frac{2}{3}\left(\frac{h}{l}\right)^2 - \frac{7}{45}\left(\frac{h}{l}\right)^4$	$12h$	$16h$	$26h$
完全漫射圆板 (半径 r)	$1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2$		$14r$	$20r$	$32r$
完全漫射球 (半径 r)	1		距离不限制		

$$L_n = dI_n / dA$$

$$L_s = dI_s / dA \cdot \cos \theta$$

$$L_s = L_n$$

所以 $dI_s = dI_n \cdot \cos \theta$ (5-4)

式 (5-4) 表示, 任意方向的光强度, 等于法线方向的光强度乘上 $\cos \theta$, 这就是朗伯的余弦法则。

5-1-4 目视测光和物理测光

在物理受光器发展之前, 都用肉眼进行光度测量。国际上规定以标准光谱光视效率作为正常眼睛的代表性的相对光谱灵敏度, 因此, 正常眼睛就是代表性的标准观察者。在目视测光中, 用肉眼观察由标准光源和待试光源所照射的光学系统的比较视场, 分别调整两种光源与比较视场的距离, 使比较视场的亮度相等 (在目视测光中, 这叫做测光平衡) 来求得待试光源的测光量。在目视光度测量中, (1) 即使同色光度测量也难达到高精度的比较测量; (2) 在异色光度测量中光度测量误差显著增大; (3) 必须经常和标准同时作比较。因为有这些缺点, 现在几乎不使用了。

另一方面, 物理测光是使用光电池或光电管, 与颜色玻璃滤光器组合来调整接收器的光谱光视效率, 使它具有近似于标准光谱光视效率曲线, 用作光度测量。因受光元件及其输出测定装置的发展, 光度测量获得飞速发展。但通常仍然把不受 $V(\lambda)$ 限制的, 用肉眼来测量的叫做目视测光, 而用物理接收器测量的叫做物理测光。

5-1-5 按 CIE 标准观测者测光和分光测光的关系

举例来说, 放电灯的总光通量在测光用的积分球里同光通量标准灯作比较测定时, 标准灯与放电灯两者的光谱分布有显著的差异。如果测光系统 (包括测光用的积分球和接收器) 的光谱特性与 $V(\lambda)$ 完全一致, 那末放电灯的总光通量为 $\Phi_{d,s}$, 标准灯的总光通量为 $\Phi_{s,r}$, 接收器的读数分别为 i_d, i_r , 从下式求出 $\Phi_{d,s}$

$$\Phi_{vD} = \Phi_{vW} \times \frac{i_D}{i_W}$$

在一般情况下, 因为测光系统的光谱特性与 $V(\lambda)$ 不一致, 所以有必要乘以 5-6-1 所述的色修正系数 (k), 即

$$\Phi_{vD} = \Phi_{vW} \times \frac{i_D}{i_W} \times k$$

另一方面, 分光测光是在可见光区域的各个波长对放电灯和标准灯的光谱辐通量进行比较测定的方法, Φ_{vD} 用下式表示 (详细情况参照 5-5 节):

$$\Phi_{vD} = \frac{\Phi_{vW} \int V(\lambda) \alpha_\lambda \Phi_{v\lambda} d\lambda}{\int V(\lambda) \Phi_{v\lambda} d\lambda} + \frac{\Phi_{vW} \sum_{\lambda'} V_{\lambda'} \beta_{\lambda'} \Phi_{v\lambda'} \sigma_{\lambda'} W'}{\int V(\lambda) \Phi_{v\lambda} d\lambda} \quad (5-5)$$

式中, α_λ 是就放电灯和标准灯的连续光谱来说的在波长 λ 处的光谱辐通量的测定值之比; $\beta_{\lambda'}$ 是放电灯的波长为 λ' 的线光谱的辐通量测定值与标准灯的波长为 λ' 的光谱辐通量的测定值之比; $\sigma_{\lambda'}$ 是单色仪色散的倒数; W' 是狭缝宽度; $\Phi_{v\lambda}$ 、 $\Phi_{v\lambda'}$ 是标准灯的波长在 λ 和 λ' 处的光谱辐通量的相对值

由式 (5-5) 可以在与测量系统的光谱特性 (光谱反射率和相对光谱灵敏度) 无关的情况下, 求出放电灯的光通量。

由相对光谱灵敏度曲线比较接近标准光谱光效率曲线的受光器进行测定的结果, 再乘以色修正系数所得的值, 和由分光测光所得的值, 在这两种测光方式都是精密地进行的情况下, 是相当一致的。

5-2 光和辐射的标准

5-2-1 辐射标准器 [6, 7]

(1) 完全辐射体 (参照 3-3 节) 它是与波长、入射方向和偏振光无关的, 对所有入射辐射进行完全吸收的温度辐射体。因而在某个温度下, 与其它物体相比, 它是对所有波长都具有最大温度辐射 (在任何一个波长下也是具有最大光谱辐出射度) 的理想体, 也叫做黑体。

可以用温度相同的不透明壁围成一个空腔, 在其上开一小孔以获得辐射的方法, 来近似地实现完全辐射体。它的辐出射度 M_e ($W \cdot m^{-2}$) 是服从斯忒藩-玻耳兹曼法则:

$$M_e = \sigma T^4 \quad (5-6)$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 K^4}{15h^3 c^2} = 5.67032 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$$

式中 T ——为绝对温度 (K)。

关于光谱辐射标准的特性, 请参照 5-5-2。

(2) 黑体炉 (1) 金熔点黑体炉是用作国际实用温标的定标, 也可用作近红外部分的标准辐射源。如图 5-3 所示, 石墨制观察管, 被纯度为 99.999% 的金所包围, 装在水平管状电炉的炉心中央被间接加热。观察管的有效发射率为 0.998。

(2) 石墨高温黑体炉可使用到 2500 K 的高温, 在近紫外、可见光、近红外的波长范围内可以用作标准辐射源。其构造如图 5-4 所示。为了防止氧化造成的损耗, 有必要在惰性气体如氩气中加热。空腔的底和壁的温度, 用光学高温计测定, 在考虑制作黑体炉的时候, 把温度控制在 $2500\text{ K} \pm 2\text{ K}$ 以内是可能的, 图中空腔有效发射率为 0.997 以上。

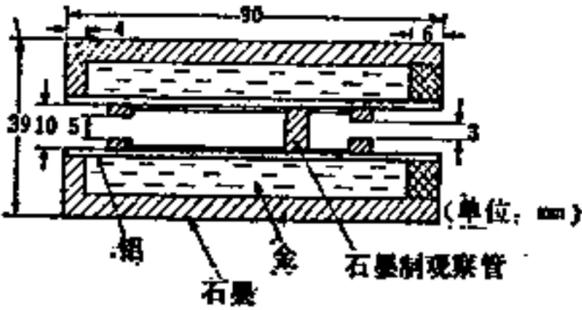


图5-3 金熔点黑体炉的构造

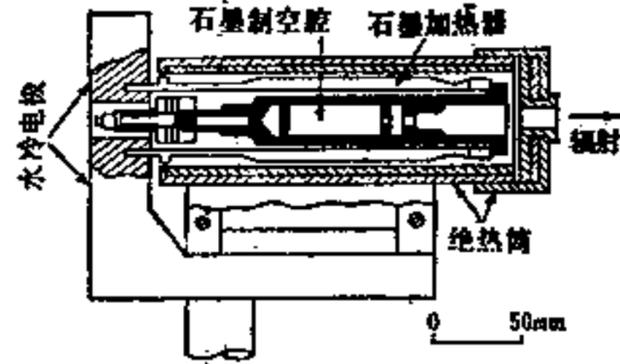


图5-4 石墨高温黑体炉的构造

(3) 复合辐照度标准灯^[8] 这种灯与在 5-2-2 (2) 中所述的光强度标准灯在形式上是相同的在距这个标准灯特定距离处而垂直于测光轴的面上, 可以标定把和测光轴的交点包含在内的微面元所接收的辐照度。在用这个标准灯来标定热电堆的绝对灵敏度时, 希望在加上能透过所要的波长带的某种带通滤光器的情况下标定辐照度的刻度。这是因为热电堆的光谱灵敏度不一定与波长无关。从灯的玻璃球壳来的二次辐射, 约占总数的 10%。当玻璃球壳的温度约为 200°C 时, 它的二次辐射的光谱分布的峰值波长约在 $10\mu\text{m}$ 处。红外区域内的大气吸收是必须充分考虑的。

(4) 光谱辐亮度标准灯 把黑体炉的光谱辐亮度作为基准, 用钨带灯与它比较测定所得的值, 叫做二次辐射标准。图 5-5 是带有石英窗的 GE 制钨带灯 (30 A/T 24/13), 额定值为 $35\text{ V } 30\text{ A}$, 在实用上也能耐 35 A 。光谱辐亮度是定标在灯丝中心部分极狭窄的面积上。

(5) 光谱辐照度标准灯 光谱辐照度标准灯采用溴钨灯。JPD-100-500-CS 是作为标准用的特制的溴钨灯, 有专用灯架与灯配套, 提高了精度。它的形状、尺寸如图 5-6 所示。在距这种灯的灯架前缘 50 cm 的垂直面上, 包含测光轴交点在内的微小面积元所接收的光谱辐照度 ($0.25\sim 2.5\mu\text{m}$ 的波长范围), 可以被定标。

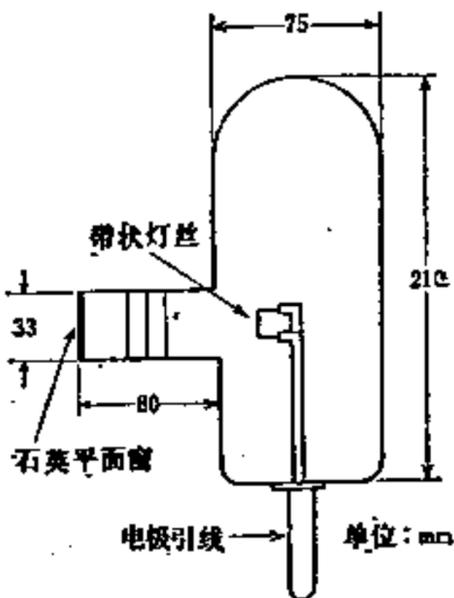


图5-5 带有石英窗的钨带灯
(GE30A/T24/13)

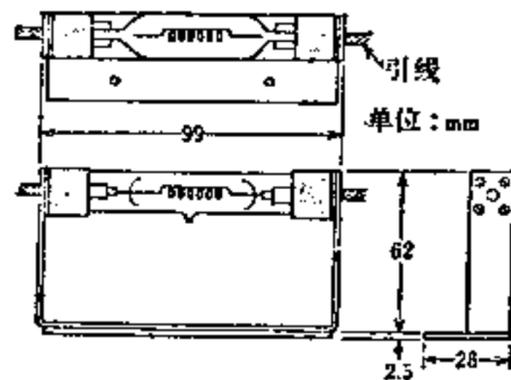


图5-6 光谱辐照度标准灯
(JPD-100-500-CS)

(6) 实用紫外辐射标准灯 (1) kreft 型汞灯^[9, 10]是用它的线光谱作为光谱辐射强度或光谱辐照度的标准的汞蒸汽放电管,由OSRAM 公司出售。日本产的也有性能与它完全相同的灯。它的形状、尺寸如图 5-7 所示。生产中对灯的构造和尺寸作了严密规定,消除了制造出来的每个灯的光谱辐照度值的相互差别,电流是 2A (直流)。

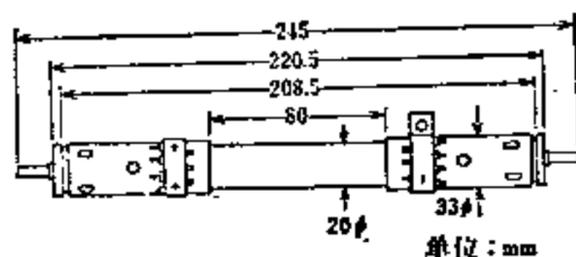


图5-7 kreft 型汞灯的构造

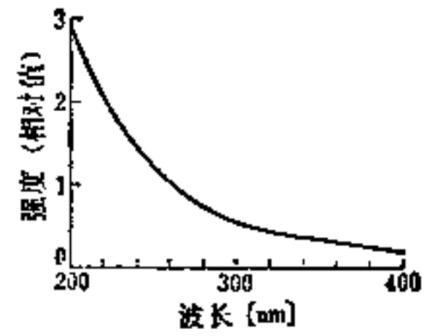
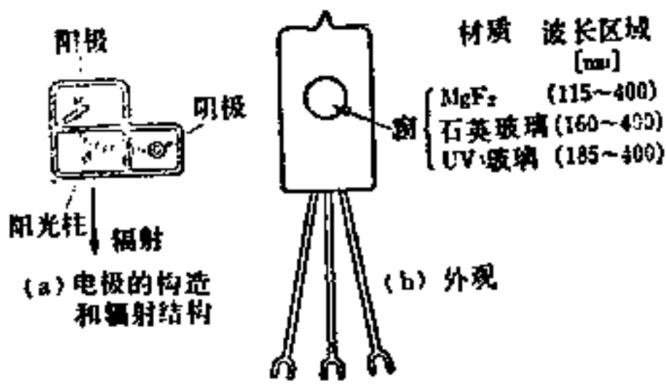
表 5-3 是日本产 Kreft 型汞灯的光谱辐照度的测定值。

(2) 杀菌灯^[11],是辐射 253.7nm 线光谱的低压汞灯,但是还没有制造出专用标准灯,建议在市场上出售的 15 瓦杀菌灯中选择标准灯。选择的标准灯其老化应在额定电压下点燃 500 小时以上(包含 50 次以上的点灭)。灯在点燃后约 15 分钟处于稳定状态,辐射强度的稳定性、重复性大体上是±1%。为了减缓风和周围温度变化的影响,必须把灯安装在灯罩内。253.7nm 的线光谱的辐照度,约占全波长区域辐射强度积分值的 88%。

表5-3 日本产kreft型汞灯的光谱辐照度的测定实例

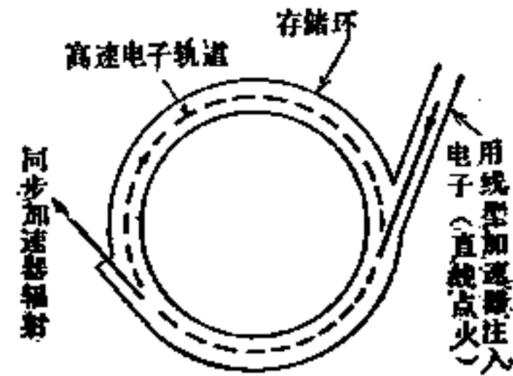
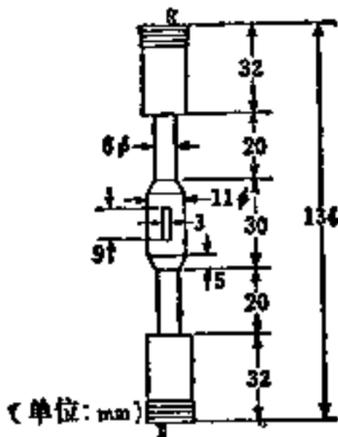
线光谱波长 (nm)	辐照度的 比值	在 1.5m 距离上的 辐照度 ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)	连续光谱的波长 (nm)	在 1.5m 距离上的 光谱辐照度 ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)
577.0	69.5	27.2	583.5	0.038
579.1			572	0.030
546.1	82.0		552	0.039
435.8	69.5		541	0.028
404.7	42.5		441	0.040
407.8			430	0.038
365.0	100		412.5	0.029
366.3			400	0.024
334.1	7.6		371	0.063
312.6	64.5		360	0.062
313.2			339	0.138
302.2	28.7		329	0.154
302.7			318.5	0.166
296.7	16.4		307	0.143
292.5	1.7		305	0.150
289.4	6.0		299	0.146
279.0	11.0		294	0.111
280.4			287	0.103
275.2	3.7		283.5	0.107
275.9			277.5	0.118
269.9	4.2	273	0.122	
270.0		267	0.233	
264.0	22.8	262	0.355	
265.4				

(3) 重氢灯^{[12]~[14]}是具有能透过直到 160nm 波长辐射的石英玻璃窗并且封入重氢的放电管,是波长小于 300nm 的短波紫外区的连续光谱的重要的辐射源。灯的形状和消耗电能等根据制造者的不同有各种差异,图 5-8 是一个实例,它的光谱分布的几个测定实例的平均形状,如图 5-9 所示。



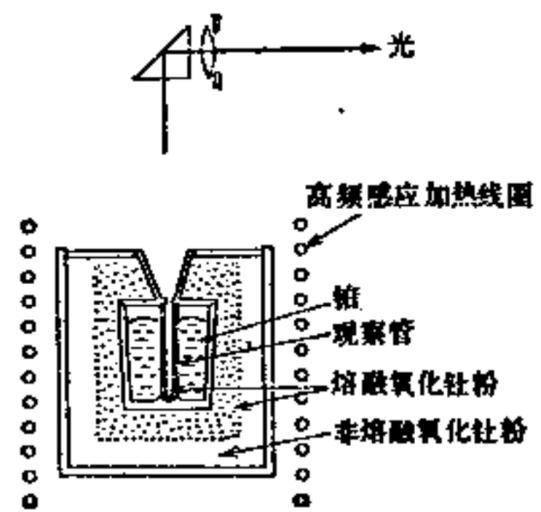
(7) **实用红外辐射标准灯** 空腔红外辐射源，是接近于红外黑体条件的辐射源，如图5-10所示，是具有成为辐射体开口的中空圆筒状的物体，在开口附近温度完全相同，只通过测定温度就可以决定空腔内的光谱辐亮度。如果以恒定的直流电功率($18A \times 26.4V = 475W$ ，这时约 $970^{\circ}C$)点灯，即使经过150小时其光谱辐亮度也几乎不变。

(8) **同步加速器辐射**^{[15][16]} 把电子放在圆形轨道上进行高速加速的装置就是电子同步加速器，正在加速的电子从它的轨道切线方向发射的辐射，叫做同步加速器辐射。在图5-11中表示出它的大概情况。因为同步加速器的辐强度可以通过理论计算得出，因此，它作为真空紫外区域的标准辐射源是独一无二的。在紫外，可见光区域内由黑体辐射引出的测定值与上述理论值进行多方比较，显示出相当一致。



5-2-2 光的标准器

(1) **光的一次基准器**^[17] 1937年的国际度量衡委员会把NBS的铂点温度黑体炉定为光的一次基准器，它的亮度定为 $60cd/cm^2$ ，从1948年开始实行。此后，光度单位的定义，在表示方法上进行过更改，而光的一次基准器直到现在还是继续不变。铂点温度黑体炉(坩埚)的构造如图5-12那样，把坩埚设置在高频加热器的中央，加热保持铂的凝固点。光是从内径约2.5mm、长约45mm、用高纯度氧化钍(ThO_2)作的观察管内壁发出，在底部装进熔融的氧化钍粉末约10mm高。把它装入内径约20mm的熔融氧化钍的坩埚内，在两者之间填充高纯度(99.99%以上)的铂。在坩埚上端用熔融氧化钍盖子盖好，在它的中心开有口径约为1mm的孔，



这个孔为光源。因为利用了铂的凝固点，所以不必要进行温度绝对值的测定，熔化点、凝固点的掌握，是通过对炉的辐射光的光亮度的变化进行连续记录来实现。并且为了使凝固状态长时间保持着，精密的温度控制是很必要的（测定方法参照 5-4-2 节）。

(2) 测光二次标准灯^[18] 测光二次标准灯的光度单位由光的一次基准器标定，是用来代替一次基准器而维持光度单位的标准灯。与一次基准器直接进行比较的光强度基准灯，为了能与一次基准器的光谱分布相似，是采用分布温度为 2042K 的白炽灯。二次标准灯的光强度的系列如图 5-13 所示，有分布温度为 2042、2353、2856 K 的白炽灯。白炽灯的光强度或分布温度，是通过光的中心，而在垂直于灯丝面的方向上进行定标。

另一方面，光通量标准灯，是把它的各个方向的光强度与光强度标准灯比较测定，由空间积分推导得出。作为这个系列的分布温度有 2042、2353、2788 K 的白炽灯。在图 5-14 中，表示分布温度为 2788 K 的白炽灯的形状。

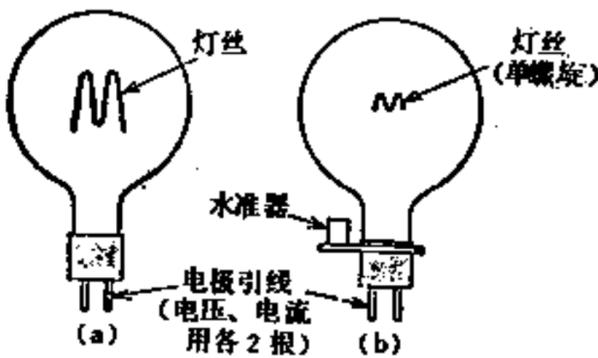


图5-13 二次标准灯(光强、温度分布用)
(a) 直线M形 (b) 线圈M形

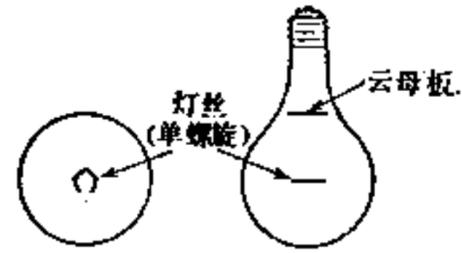


图5-14 二次标准灯(光通用)

为了让二次标准灯的光输出保持良好的稳定性和再现性，有关构造、材质、制造等都要进行全面、细心的考虑来完成，而且还要注意经过长期老化过程后才能应用。

(3) 工业测光标准灯 (1) 关于光强度标准灯，在表 5-4 中列出日本 JISC7526 所规定的一般种类，在图 5-15 中表示其中一部分的形状实例。一般标准灯的老化，用超过额定电压 20% 的电压进行 30 分钟，在额定电压下进行 4 小时。老化终了后，作为标准灯的有效寿命，对真空灯约 50 小时，对充气白炽灯约 150 小时，玻壳的黑化也是它的限制因素。

表5-4 光强度标准灯(一般用)[参照表6-22(1)]

类 型	玻 璃 球 壳		长 度 (mm)	光中心距离 (标准值) (mm)	灯 头	灯 丝 形 式	参 考	
	型 号	直 径(mm)					对 应 于 2856 K 时 电 压 (V)	耗 电 量 (W)
10cd	T 64	64±1	135±5	76	E26	C-8	6~8	8
40cd	T 64	64±1	135±5	76	E26	C-13或C-2V	28~32	30
150cd	T 64	64±1	135±5	76	E26	C-13	95~100	100
300cd	T 64	64±1	135±5	76	E26	C-13	95~100	200
800cd-E26	T 64	64±1	223±8	117	E26	C-13	80~100	500
800cd-E39			228±8	123	E39			
3000cd	G 152	152±3	254±8	167	E39	C-13	80~100	1500

白炽灯一般用恒定电压点灯，但从电气仪表和电源精度的观点出发，在精密光度测量时普遍用直流点灯。当点灯或息灯时，要慢慢升压或降压，以防止灯丝温度的激烈变化。关于光强度标准灯的测光轴旁边的光强度变化，在日本工业标准中在左右 2 度和上下 2 度的范围内分别规定为±1.5%和±3%以内。图 5-16 是配光实测的一个例子。

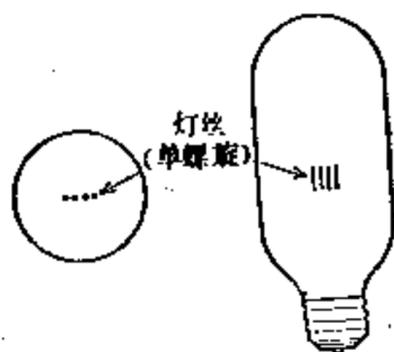


图5-15 光强度(分布温度)标准灯(一般用)

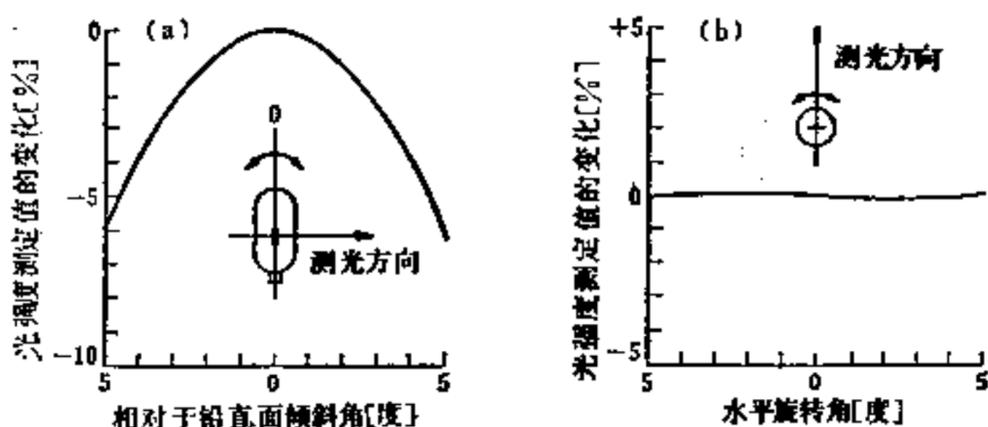


图5-16 由100V 200W光强度标准灯的给定角度变化而引起的光强度测定值的变化
(a) 由灯的倾斜而引起的光强度测定值的变化 (b) 由灯的水平旋转而引起的光强度测定值的变化

(2) 关于光通量的标准灯, 虽然没有日本工业标准, 但在表 5-5 中列出代表性的灯。构造上的要点是灯丝和吊钩线焊接, 或接触部分的灯丝部分没有螺旋, 对于充气白炽灯, 玻璃球壳的颈口部分加进云母片 (是为了使气体对流顺利)。灯丝的形式大体有三种如图 5-17 所示。因为配光曲线不同如图 5-18 所示, 所以使用光度测定用的积分球比较测量光通量, 在三者相互之间往往产生光度测量误差。关于光通量标准灯的分布温度, 在实用上是测定三个方向分布温度后求其平均值。

表5-5 有代表性的光通量标准灯〔参照表6-22(1)〕

额定	分布温度 (K)	光通量 (lm)	备注
100V 1000W	约2960	约 19000	充气
100V 500W	约2880	约 8750	充气
100V 200W	约2830	约 3400	充气
100V 60W	约2680	约 750	充气
100V 30W	约2600	约 255	充气
100V 10W	约2430	约 70	真空
12.5V 20W	约2850	约 300	充气
13V 10W	约2750	约 120	充气
13V 5W	约2536	约 50	真空
7V 1.8W	约2500	约 15	真空
6V 0.7W	约2500	约 5	真空

(4) 实用标准放电灯^[19] 测光标准用荧光灯和测光标准用高压汞灯等实用标准放电灯, 与以维持光度单位为目的的标准灯不同, 只不过是作为同种的放电灯的光通量基准用。一般放电灯比白炽灯的光通量再现性差, 不能列入基准器。标准放电灯, 是从一般生产灯中选择出经过 500~750 小时老化之后特性良好者。标准放电灯常常是与专门试验用的镇流器组成一组, 而为了要维持这种状态下的标准值, 希望点灯用的电源电压偏差在 3% 以内。



图5-17 光通量标准灯的灯丝形式 (灯丝都是单螺旋)

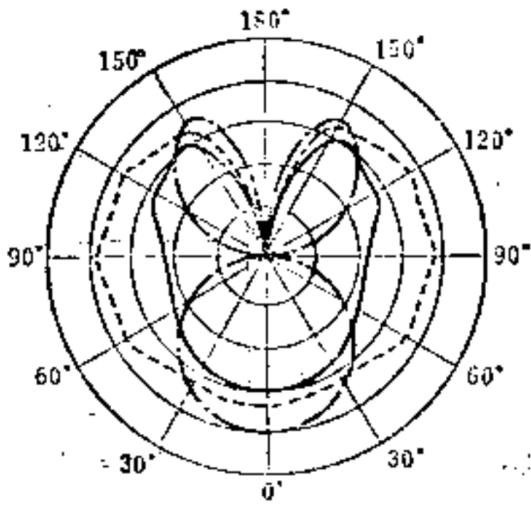


图5-18 光通量标准灯的配光
实线—环形灯丝 虚线—星形灯丝
点划线——根横线灯丝

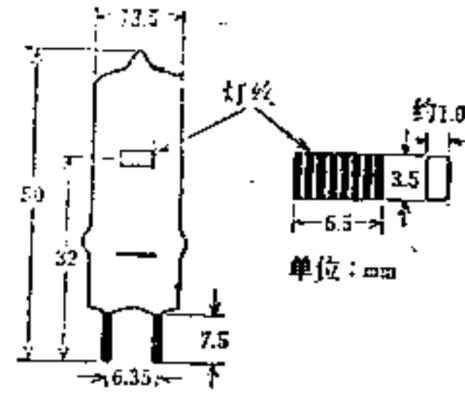


图5-19 JC24V150W卤钨灯

(5) 卤钨灯^{[20][21]} 作为标准光源却以消耗品为目的在使用着，卤钨灯正在逐渐普及。图5-19所示的JC型卤钨灯(24V 150W)，稳定性能良好，特别是充入了三溴化硼(BBr₃)后，即使在分布温度2856 K下点灯，也可以得到与普通光强度标准灯同等以上的动态特性。

5-3 接收器和它的输出测量

5-3-1 光接收器的种类和特性^[22] (有关光电转换机理等参照3-6节)

(1) 光生电型的光接收元件 (1) 磷光电池在可见光区域的长波段的相对光谱灵敏度比较接近光谱光视效率曲线，光谱光视效率的修正也比其它光接收元件容易，因此用于照度计接收部分。由于光入射的初期疲劳特性较大，所以必须做预照，作为精密光度测量用有困难。

(2) 硅光电二极管^{[23]~[26]}，有PN或PIN结合的二极管，结合面到达的深度越浅，短波的灵敏度则越高。负载电阻在10Ω以下时，在1:10⁵的范围内都显示出良好的线性。频率特性也是良好的，有效到几十kHz。光电转换效率随着温度的上升而减少，对应于常温附近的温度变化，也有输出变化非常小的元件。稳定性、再现性良好，主要是用在可见光的精密测量中。

(2) 光导型的光接收元件 关于CdS和CdSe，在图5-20中表示的是正在广泛使用的烧结型，其光谱灵敏度在400~900nm波长范围内。稳定性、重复性和线性差，不能用于精密光度测量中。关于PbS和PbSe，在图5-21中表示的是普通使用的薄膜型，其灵敏度从可见区域到3.5μm的波长范围，是近红外区域测定用的重要元件。它们通常是接收几个赫芝调制辐射的辐通量，用同步放大器测定输出。

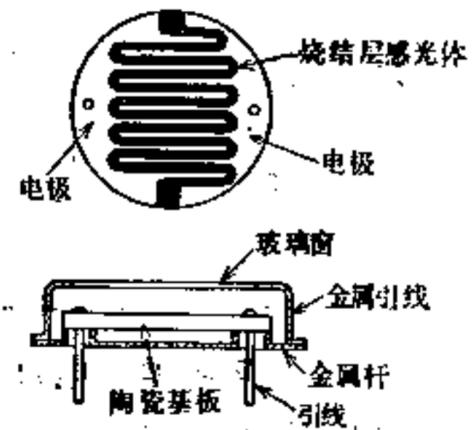


图5-20 烧结型硫化镉光导电元件的构造

(3) 光电发射型的光接收元件^{[27]~[30]} (1) 光电管具有以碱金属为主体的光电阴极面，有许多种类，通过这些可以在160~1100nm波长区域内进行测光，图5-22表示在精密测光中广泛应用的头顶型构造，使用的光电流应该在每1cm²有0.1μA以下，过大的入射光会造成灵敏度下降。精密光度测量时，希望把接收器的周

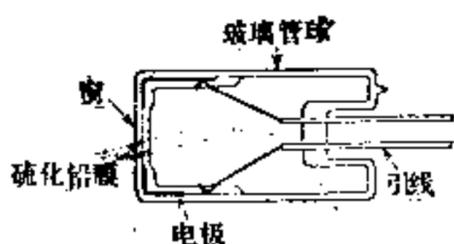


图5-21 硫化铅光导电元件的构造

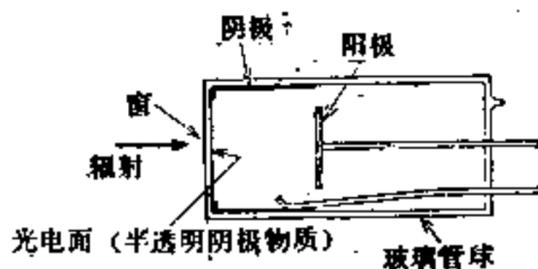


图5-22 头顶型光电管的构造

围温度恒定在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。

(2) 光电倍增管在用光电管无法测量的微弱光的测量中有效。光电倍增管的构造如图5-23所示。为了能使它稳定工作，除了周围温度要保持恒定，还要使用稳定的高压直流电源。光电管、光电倍增管都具有良好的频率特性(到几十千赫兹都有效)，减振型光电管更好。光电倍增管的暗电流，比光电管要大二个数量级，把周围温度保持在 $-20\sim-40^\circ\text{C}$ 的范围内，是减少暗电流和噪声的办法，在用光电子计数法时，冷却是不可缺少的手段。

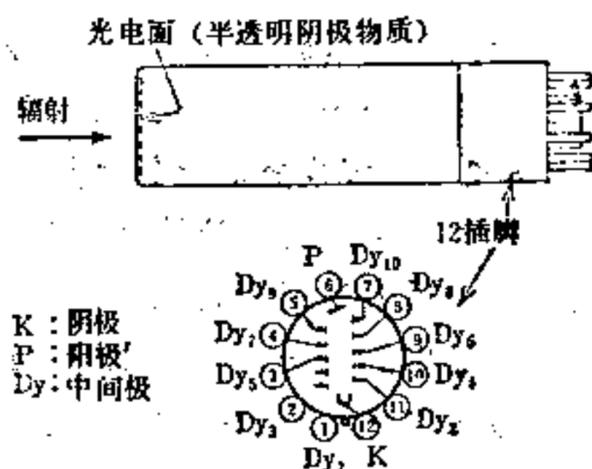


图5-23 头顶型光电倍增管的构造

(4) 热敏型光接收元件 [31][32] (1) 热电偶如图5-24所示，把黑化物蒸着在微小金属片上，在光接收板的背面上用二种金属做成的热电偶接触，保证其热接触良好，这个接触点就是热接点，它的另一端连接到保温瓶内成为冷接点，冷接点连接在外部测量回路上，也有用真空容器密封的真空热电偶。另外还有如图5-25所示的薄膜型热电偶。

(2) 热电堆 是把多个热电偶串联以提高热电输出总量，除冷接点浮动式的 Rubens 型外，还有像图5-26所示的把冷接点在热槽中固定的定温式 Moll 型。它们的输出经直流或交流放大后，用微安表、检零装置、数字电压表等读出。

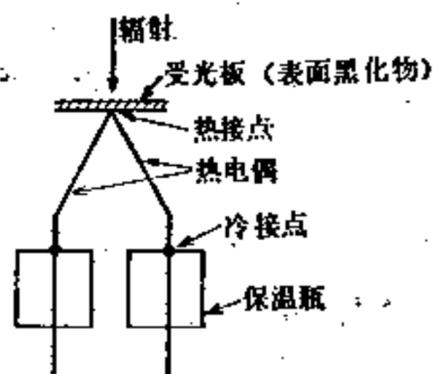


图5-24 热电偶检测器

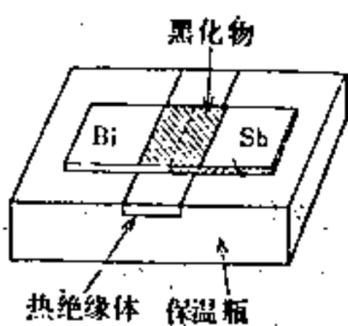


图5-25 蒸着薄膜型热电偶

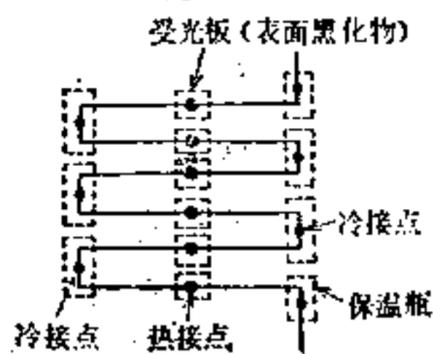


图5-26 热电堆

(3) 测辐射热计是利用金属或半导体的电阻由于吸收辐射、温度上升而产生相应的变化，金属测辐射热计现在已不太用。热敏电阻器(图5-27)是含有Ni、Mn、Co等的氧化物的混合半导体，电阻温度系数的大小，对热响应度有较大的影响，和放大器结合容易。构造上也是坚固的，但噪声较大，用二个相同的元件，把一个作为补偿能改善信噪比。

(4) 热电检测器是利用TGS(triglycine sulphate)(硫酸三甘肽)、SBN(strontium barium niobate)(铌酸锶钡)等的异极结晶，在温度作用下产生自发激化的热电效应的检测器。图5-28表示它的构造，采用热电效应大的强诱电体作成平板状电容器，吸收辐射产生自动分极的变化从电极的两端测出电压或电流。用 $100\text{Hz}\sim 1\text{kHz}$ 调制辐射入射。

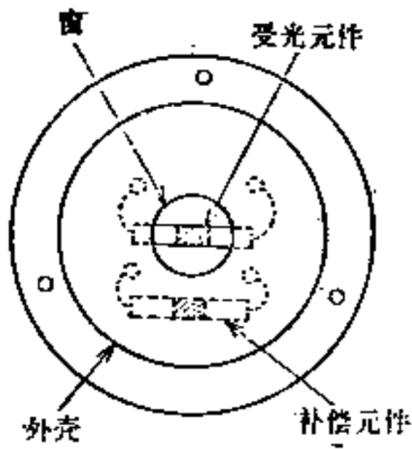


图5-27 热变电阻器的构造

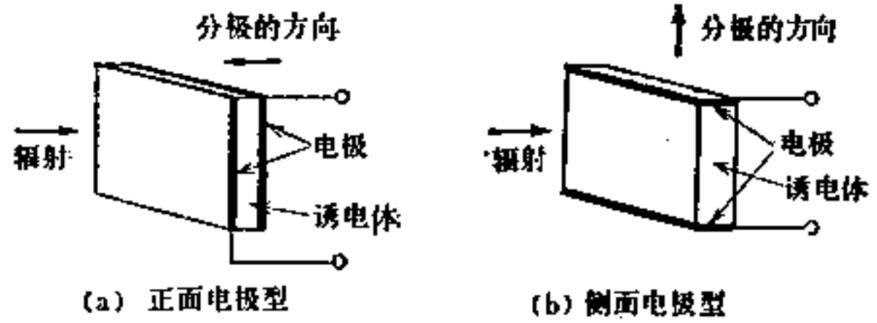


图5-28 热电检测器的构造

(5) 红外线指示器^[33]是红外辐射的检测器，其构造的主要部分如图 5-29 所示。入射到指示器的辐通量调制频率为 10Hz 左右。由于辐射产生气体膨胀，使镜子的位置移动而使入射到光电管的光通量发生变化。光电管输出的脉冲信号经放大测定。

5-3-2 光接收器输出的测量

测量大致可分为直流法和同步检测法(锁相放大)。前者是恒定辐射入射，取出直流输出测定的方法，后者是用旋转扇形面进行调制后，测定交流输出的方法。除此之外，最近也使用光电计数法。在图 5-30 中用方块图表示几种测定方法。

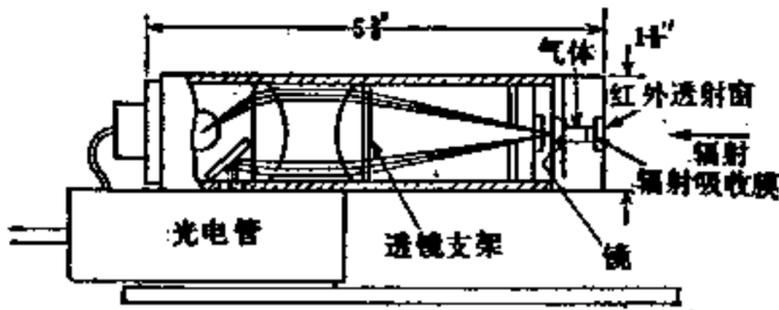


图5-29 红外线指示器

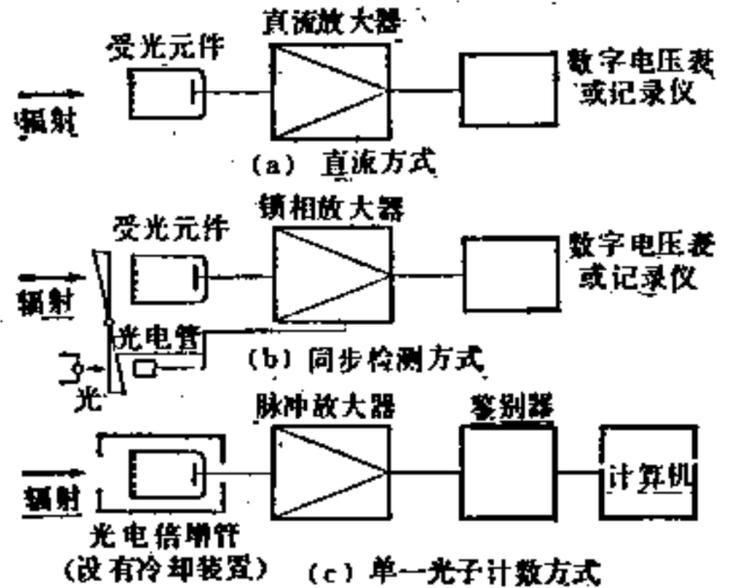


图5-30 三个有代表性的光强度测定方式

(1) 直流法

(1) 电流计直读式是直流法中最简单的方法，它把硒光电池和硅光电池的光电流如图 5-31 所示用微安表直读，如袖珍型照度计。由于仪表线圈的电阻不会太小，因此线性不好，调整刻度后，能够改善入射光与指示值的关系。这个方法难以进行精密测量。

(2) 用补偿回路来测定硒光电池和硅光电池的光电流。在图 5-32 中调节 R 使检流计 G 的偏转为零。在 (a) 的情况下，检流计 μA 读数大体上等于表的短路电流；在 (b) 的情况下，是 $R_0 \gg R$ 时的短路电流，大体上和 R/R_0 成正比。

(3) 运算放大器^[34]、^[35]有多种类型，作为光接收元件的光电流-电压的转换用，采用高输入阻抗型。特别在使用 FET 输入差动时，输入阻抗大到 $10^{13} \Omega$ 以上，输入漏电流在 $0.1 pA$ 量级。

在图 5-33 的运算放大器的输入端上连接图 5-34 的光电池、光电倍增管和光电管等。接光电管时，把负载阻抗 R_L 去掉。接光电倍增管时，对于放大器输出除图 5-35 的电流型连接外，还有电压型连接方法。放大器的输出端产生与光电流成比例的直流电压，把它用数字电

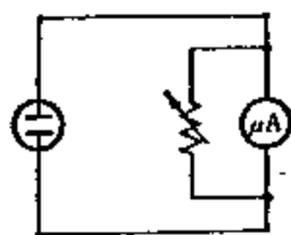


图5-31 电流计直读式

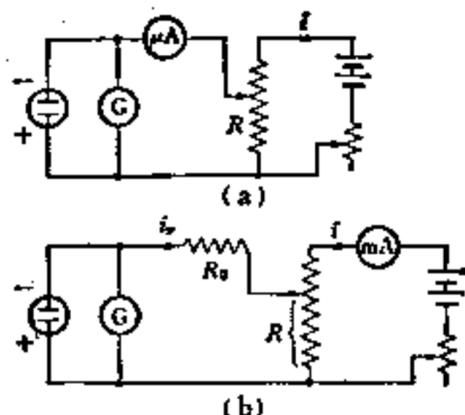


图5-32 补偿回路

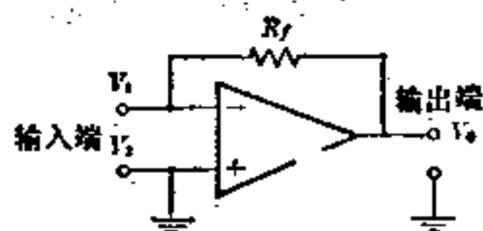
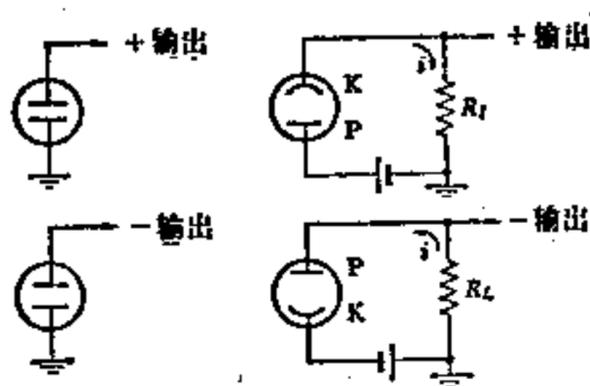


图5-33 运算放大器的基本接线
(电压-电压变换方式)



(a) 光电二极管

(b) 光电管

图5-34 基本动作回路

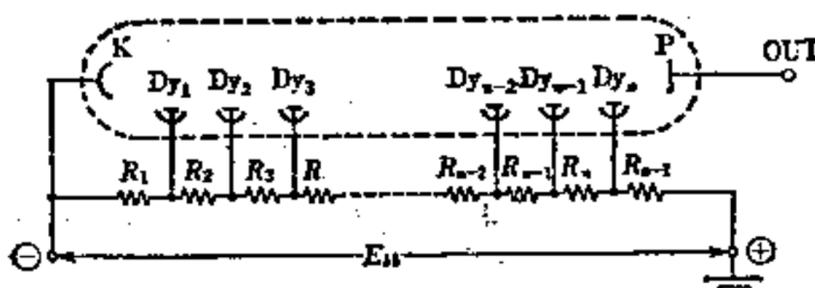


图5-35 光电倍增管的基本动作回路

压表等读出。光接收元件和运算放大器之间的连接方式和运算放大器的反馈方式，可能有多种方式，这要根据目的来采用。

(2) 同步检测法^[36] 在用同步检测方式的测定中，使用的锁相放大器，是包括由旋转扇形片把输入信号变成同步的调谐放大器，产生同一频率参考信号的相位回路，以及混频检波器和低通滤波回路所组成的。这种测量方式的特点，是可消除包含在光接收元件的输出信号上的热噪声等，只把信号取出。它的安排，是将经过调谐放大器的输入信号和经过相位回路的参考信号通过相位检波器，取出输入信号中的与基准信号同相同步部分，把它的输出通过积分回路取出直流平均值。有多种锁相放大器出售，例如，有信号输出满刻度为100mV，直流输出为±10V，基准频率为1.5Hz~150kHz可调等规格。

(3) 光电计数法^[37] 光电计数法是用光子计数器，以光是粒子的聚集这一概念来进行光度测量，光探测器用光电倍增管。入射在光电倍增管上的每个光子，在阳极上发生脉冲，把脉冲放大，通过鉴别器消除脉冲噪声后，对脉冲计数。计测脉冲数和入射辐通量之间的关系，与波长有关可预先由理论确定，也有可能用试验测定脉冲数与测光量之间的关系。以紫外的微弱辐射为对象的光谱光度测量，各种微弱发光，吸收散射光谱的测量，天文光度测量等正在广泛使用。

5-3-3 光学滤光器^[38]

光学滤光器是让所需要的波段通过，或把不需要的波段的辐射消除掉，或将所需要的辐射量的水平减低，或把辐射的光谱分布按使用目的变换成所要求的光谱分布的状态。

以下将分类阐述光学滤光器，图5-36表示它们光谱透过率的主要情况。

(1) 中性滤光器 这是为减弱可见光用的玻璃滤光器，它在整个可见光范围内的光谱透过率大体上一样。有混入吸收剂和表面蒸着铬米二种，也叫灰色滤光器。

(2) **锐截止滤光器** 这是以某一波长作为界限，吸收掉比它短的波长，让长波的光通过的玻璃滤光器。把界限波长称为截止波长。

(3) **紫外透过滤光器** 有透过可见光和不透过可见光的。后者在紫外辐射测定时是用来切断杂散光和黑光等的滤光器。

(4) **紫外线吸收滤光器** 用于照相的紫外截止和为修正光探测器的光谱光效率的紫外截止。

(5) **光谱光效率修正用的滤光器** 用作光探测器的光谱光效率修正。有棕色、绿色、蓝色和截止红外滤光器等，选择时要与光接收元件的相对光谱灵敏度相适应。

(6) **红外透过滤光器** 有透过可见光长波部分和不透过的两种。两者超过 $2.5\mu\text{m}$ 波长时，透过率渐减，到 $5\mu\text{m}$ 为零。

(7) **红外吸收滤光器** 这是用硼硅酸玻璃作的。它保证可见光的透过率很高，把红外线吸收。

(8) **色温变换滤光器** 这是在照相上为胶片的彩色平衡而采用，根据摄影条件有许多种类。

(9) **单色滤光器** 是只能透过某一带宽波长的滤色器。例如，在光电池等的光谱光效率修正中使用的绿色滤光器，就是这种。

(10) **干涉滤光器** 是利用光的干涉，有单色或带通的光谱透过特性或光谱反射特性的滤光器，在 $215\sim 1900\text{nm}$ 波长领域内，可以制成具有任意峰值波长的干涉滤光器。分色镜、无光镜、无色滤光器也是一种干涉滤光器。

(11) **其它滤光器** 把有机涂料分散在动物胶中，形成片状动物胶滤光器，用作相片色分解滤光器，塑料滤光器可以用作舞台照明灯光的彩色滤光器。

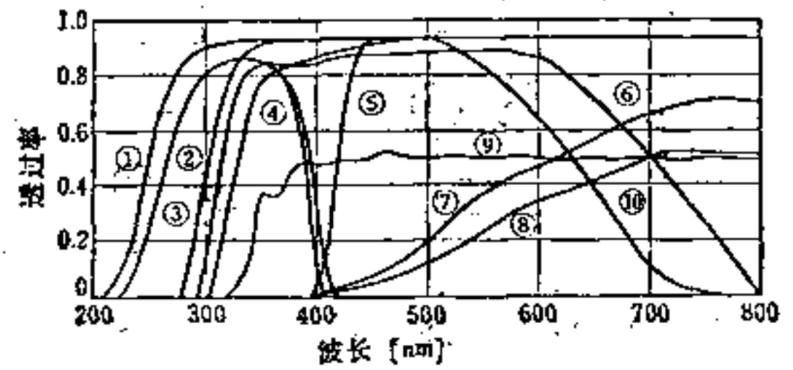


图5-36 各种光学滤光器的光谱透过率曲线
①、②、③、④ 紫外透过滤光器；⑤ 紫外线截止滤光器；⑥ 红外线截止滤光器；⑦、⑧ 棕色滤光器；⑨ 灰色滤光器；⑩ 蓝色滤光器

5-3-4 漫反射板

这是用来消除由于光探测器的接收面的灵敏度不均匀而产生的光度测量误差，和得到亮度、辐亮度均匀的面。它有透射的，也有反射的。

(1) **乳白玻璃漫反射板** 也叫乳白玻璃。用来防止正透射光时 2mm 的厚度就可以。透射光、反射光的配光如图 5-37 所示，与余弦配光相差小，而且在可见光区域的配光几乎与波长无关。光谱透过率和光谱反射率随着波长改变差别很大。在紫外区域不能使用。

(2) **石英磨砂漫反射板** 这是在紫外区域使用的漫反射板，是把石英板的一面或两面用通过大约为 200 筛孔的金刚砂磨制而成。在图 5-38 中表示在可见光范围内的透射和反射光的配光，在紫外区域内的配光和这个形状差不多。

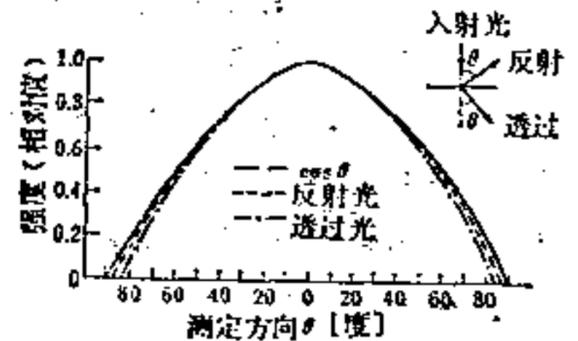


图5-37 厚度为 2.5mm 的乳白玻璃反射光、透射光的配光 (0° 入射)

(配光在可见光区域内大体上与波长没有依赖关系)

(3) **白色丙烯酸树脂漫射板** 作为可见光范围的漫透射板用。厚度为 2mm 左右是适当

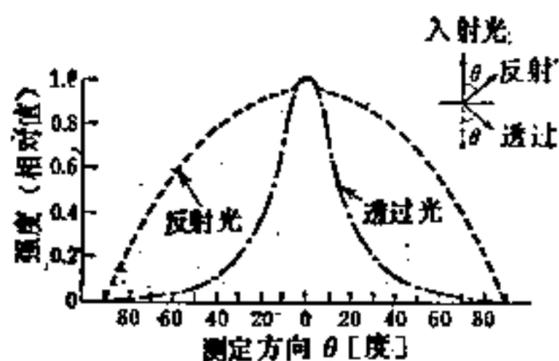


图5-38 200筛孔两面磨砂石英板的反射光、透射光的配光(0°入射)
(配光在可见光区域内大体上与波长没有依赖关系)

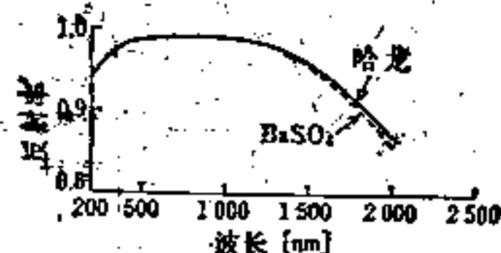


图5-39 哈龙粉末和硫酸钡粉末(柯达照像机公司制)压缩成型的光谱反射率(入射、测定条件: 0/d)

的。透射配光和乳白玻璃大体相同。

(4) **硫酸钡粉末压缩成型的白色板** 把硫酸钡试剂粉末放在200筛孔磨砂玻璃板上, 在每平方厘米上加压10kg以上挤压成型。依斯特曼柯达照像机公司的硫酸钡, 在整个可见光范围内大体上保持有0.99的光谱反射率(图5-39)。0°入射时, 在45°方向上的发光系数大约为1。

(5) **哈龙粉末压缩成型白色板**^[39] 把哈龙粉末(美国Allied Chemical公司制造)在每平方厘米上加压70kg挤压成型。和柯达照像机公司的硫酸钡有同样高的反射率(参照图5-39)。表面污染时可用肥皂水洗净恢复原状。有希望成为紫外、可见光范围内的标准反射板。

5-4 基本量的测量

在光度测量、辐射测量时的基本量包括光通量、照度、光强度、亮度、辐通量、辐照度、辐强度、辐亮度以及各量的光谱密度等。关于基本量的测量包括本节叙述的相对于标准器进行测量的情况和现场进行各种测量情况。前者主要是相对于基准器作精密比较测量, 后者主要是用校准仪器来进行实际测量。

关于光谱测量^[40], 将在5-5节中阐述。

5-4-1 辐射基本量的测量

(1) **辐通量的绝对测量**^[41] 绝对辐射计的主体构造, 和它的计测回路的一个例子, 在图5-40和图5-41中表示。把绝对辐射计保持十分稳定的状态下, 在离辐射计一定距离处放置标准灯。使灯的辐射几乎投射在受光板的中心, 由于它的吸收而温度上升, 铂丝的电阻变化用电桥读出。再把辐射切断, 增加电桥回路的电流时, 铂丝的电阻也增加, 受光板的温度上升, 铂丝的电阻又增高。仔细调节电流, 使得电阻变化等于因吸收辐射所产生的变化, 从那时的电流的增加量和铂丝的电阻值计算出在加热时所需要的电功率。这和吸收辐通量是等价的。

绝对辐射计的温度升高用热电堆形式检测也有利用箔型测辐射热计等形式。

(2) **复合辐照度的测量** 根据绝对测量, 测定从灯到一定距离处有一受光面接受的辐通量 Φ_e , 受光面的面积为 A , 则受光面上的辐照度为

$$E_e = \Phi_e / A$$

由此可定出复合辐照度的标准。

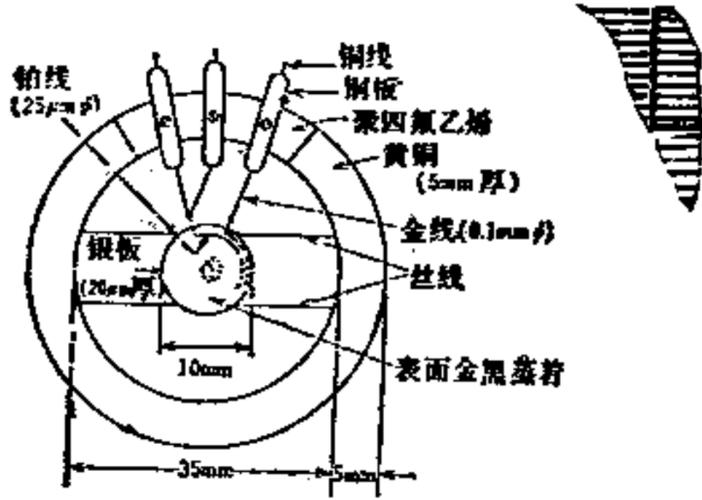


图5-40 绝对辐射计本体的构造

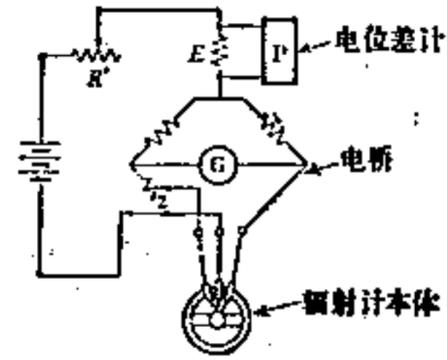


图5-41 绝对辐射计的测量回路

白炽灯复合辐照度值的定标，是用热电堆检测器。作为基准的标准灯，对在特定距离下辐照度值的定标，是在光度测量实验台上把热电堆与标准灯正对着保持一定距离。再把标准灯点燃，读出热电堆的 R_s ，再熄灯读出背景辐射 R_b 。灯的辐照度 E_s 所相当的热电堆的 $R_s = R_s - R_b$ 。对试验灯的测定也全部照样进行，求出对应于试验灯的辐照度 E_i 的 R_i ，求得 E_i 为：

$$E'_i = E_s \times \frac{R_i}{R_s}$$

标准灯和试验灯的分布温度不同时，由于热电堆的相对光谱灵敏度产生不一致性，热电堆的这种不同使得两灯的测量值之比出现了差距。其次，由于大气的吸收（主要是碳酸气、水蒸汽），在测量包括红外区域时，照度的距离平方反比定律不再适用。

(3) 复合辐照度的测量 为了求出灯的复合辐照度 I_s ，使用热电堆以复合辐照度标准灯为基准在特定距离 l 处测量复合辐照度 E_s ，用下式计算：

$$I_s = E_s l^2$$

5-4-2 光的基本量的测量 [42][43]

(1) 用光的一次基准器对光强度标准灯的光度测量单位的定标 [44] 保持铂凝固温度的一次基准器的光，在图 5-42 的装置下导入到光探测器。对光路中的棱镜和透镜的透过率，光栏的开口面积等预先正确测定。量值传递的二次标准灯，通称为分布温度 2042 K、M 型真空光强标准灯。

一次基准器的亮度为 L_s (60cd/cm^2)，光栏的开口面积为 A ，光栏到光探测器之间的距离为 l_s ，透镜和棱镜的总透过率为 τ ，则受光面上的照度 E_s 为：

$$E_s = L_s A \tau \times \frac{1}{l_s^2}$$

一方面，在二次标准灯（光强度为 I_w ）照射下，光探测器的接收面上的照度为 E_w ，灯和受光面之间的距离为 l_w ，则

$$E_w = I_w / l_w^2$$

现在，在光度测量实验台上调整二次标准灯的位置，使得 $E_w = E_s$ 。此时，用

$$I_w = L_s A \tau \times \frac{l_w^2}{l_s^2}$$

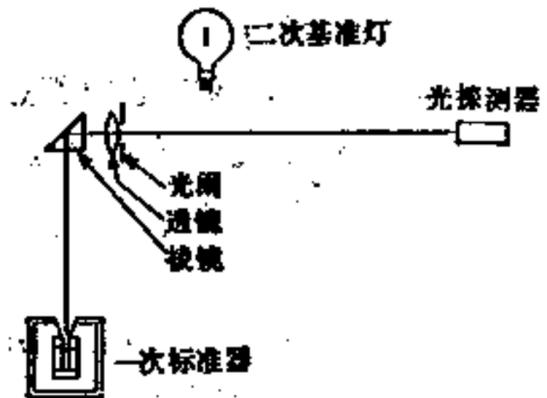


图5-42 传递到二次标准灯的光强度单位的定标

确定二次标准灯的光强度值。

在 1957 年实施了光的一次基准器的国际比较（实际上是对定标出来的光度标准灯作比较），参加的七个国家的值的最大偏差约为 1.4%。

（2）建立光通量标准 光通标准是利用光强度标准按配光法建立的。

配光，是把包含光源在内的某个面上的光强度作为方向的函数来表示，在图 5-43 中垂直角 (θ_1, θ_2) ，水平角 (ϕ_1, ϕ_2) 之间的光通量 $\Phi(\theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2)$ ，把 $I(\theta, \phi)$ 作为光源的配光，由下式给出：

$$\Phi(\theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2) = \int_{\phi_1}^{\phi_2} d\phi \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta, \phi) \sin\theta d\theta \quad (5-7)$$

光通量标准灯的配光，就各水平角 (ϕ_1, ϕ_2, \dots) 来说的垂直面上的配光 $I(\theta)$ 大体上是一样的，设从 $I(\theta)_{\phi_1}, I(\theta)_{\phi_2}, \dots$ 的测量值得到的它们的平均值为 $I_v(\theta)$ 。灯的光通量 Φ_v 用下式算出：

$$\Phi_v = \sum I_v(\theta) C(\theta) \quad (5-8)$$

式中， θ 是 θ_1 和 θ_2 之间的球带中心的垂直角； $C(\theta)$ 是这个球带的球带系数。

球带系数法是以光中心为中心的假想球分割成 n 个等角球带的方式，也有改变分割方式的罗塞法、山内法等。

（3）光强度测量 由二次标准灯经过几个阶段后，成为光强度值定标用的常用光强度标准灯。在以光强度标准灯为标准，测量灯的光强度时，应如图 5-44 所示，将台座导轨上的标准灯（或试验灯）、挡光板、探测器的测光轴（把光源的光中心与光探测器受光面的中心连接的直线）与导轨平行。灯面与测光轴垂直，在图中表示借助线（或其它装置）的帮助用目视调整。

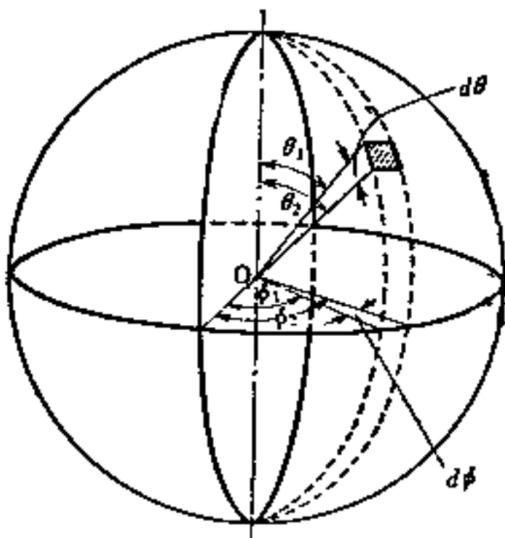


图 5-43 光源的配光和光通量的积分

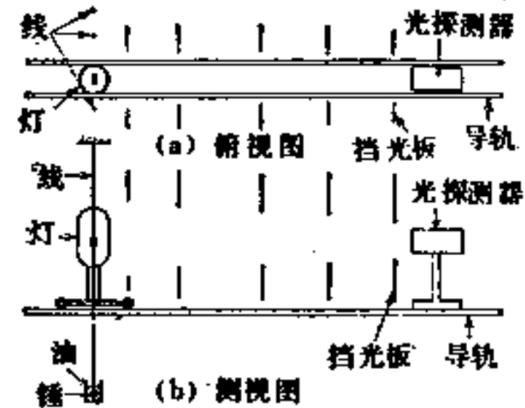


图 5-44 光强度测量的装置

现在很容易得到线性好的光探测器，建议用标准灯和试验灯在同一位置上交替放置，取光探测器的读数比作为光强度比的方法。

电源、电测仪表、光探测器等的精度，室内温度的波动幅度，要参照比较测量所要求的精度来调整。标准灯通常采用二只一组，在光强测量距离恒定的测量时，试验灯的光强度 I_1 用下式求出：

$$I_1 = I_2 \times \frac{i_1}{i_2} \times k$$

式中, i_t 是对应试验灯的光探测器读数, i_s 是对应光强度 I_s 的标准灯的光探测器读数, k 是色修正系数, 在必要时应乘上 k 。

(4) 光通量的测量 白炽灯的总光通量的测量, 通常是采用测光积分球的球形光通量计法。图 5-45 所示的为一般常用的积分球, 内径为 1.5 米。如果球的内面是完全漫反射面, 而且是完全封闭的球面, 只存在内部光通量 Φ_v 的理想状态时, 下式成立

$$E_v = \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot \frac{\Phi_v}{\pi D^2} \quad (5-9)$$

式中, E_v 是光通量; Φ_v 是由球的内表面多次反射后在球内表面上的照度 (不包括由光源直射光所产生的); ρ 是球内表面的反射率; D 是球的内径。

根据这个式子, 当测出球内表面的照度, 那么球内的光通量就知道了。在实用的积分球上, 球内表面的涂料 (BaSO_4 或 ZnO 的粉末在溶剂中溶解后喷涂) 不是完全漫射面, 以及测光窗、光源本身和它的夹具、挡光板等的存在等都不符合理想条件, 但在一般光源相互比较的测量中使用, 已经十分精确 (有时还要依靠若干修正)。

测光系统 (积分球、光探测器) 的总的相对光谱灵敏度 $S(\lambda)$ 用

$$S(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)} \cdot S_s(\lambda)$$

表示, $S_s(\lambda)$ 是光探测器的相对光谱灵敏度。 $\frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)}$ 的测定按如下方法进行, 例如选光谱分布完全相同的两个灯, 一个放在球内, 一个放在球外点燃, 对从测光窗射出的光和从球外面的灯射来的光, 用分光测量法对各波长进行比较测定。异色测光时, 希望 $S(\lambda)$ 尽可能近似于标准光谱光效率。当有差别时, 在测量值上乘以色修正系数 k 。

碰到要相互比较不同形式的灯时, 在试验灯的测量值上乘以由积分球内灯的自身吸收差异产生的修正系数 R 。

$$R = \frac{\text{在球内放置标准灯时的光探测器的读数}}{\text{在球内放置试验灯时的光探测器的读数}}$$

R 的测定是在一个稳定的灯照射球内壁的一部分, 标准灯、试验灯在熄灯状态下交替装在球的中心上时进行的。

让积分球内表面涂刷面干燥、稳定 (白炽灯在球内点燃 30 分钟至 1 小时) 之后, 开始测定。

试验灯的总光通量 Φ_t , 从下式计算。

$$\Phi_t = \Phi_s \times \frac{i_t}{i_s} \times R \times k$$

式中 Φ_s 是标准灯的总光通量; i_t 、 i_s 是分别对应试验灯和标准灯时光探测器的读数。

(5) 白炽灯的分布温度测量 分布温度的二次标准灯, 是把特定温度黑体炉的辐射和灯的辐射, 由分光测量法进行比较而定的。用分布温度标准灯, 采用分布温度计测量试验灯的分布温度。分布温度计如图 5-46 所示, 把二种色玻璃滤光器装配在二个光接收元件上, 其灵敏的中心波长分别保持在 460nm 和 660nm 上, 这样对辐射的红蓝比进行测定。在一个光接收元件上交替地放在红玻璃、蓝玻璃来测定红蓝比也是可以的。分布温度计的校正, 若分

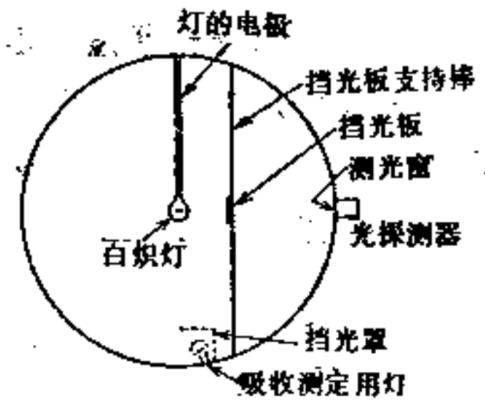


图5-45 光度测量用积分球

布温度在 2000~3000 K 之间, 是把几个分布温度标准灯点燃, 对应各分布温度把分布温度计的红蓝比测定后求出二者之间的关系, 用公式或图表示。

采用优良分布温度计进行精密测量, 对试验灯分布温度的定标, 可达到 ±1 K 程度的精度。在这样确定的分布温度下的钨丝灯的可见光区域的光谱分布, 与黑体辐射的光谱分布相差在 ±1% 以内^[45]。

(6) 照度计的刻度校正 光强度标准灯的光强度为 I_v , 在光度测量方向的距离 l 点和这个方向垂直的面上的照度为 E_v , 则有

$$E_v = I_v / l^2$$

因而把照度计的受光部分的受光面安置在同这个相一致的地方, 这样即可校正照度计的刻度。照度计刻度的校正, 通常采用分布温度为 2856 K 的光强度标准灯。

(7) 亮度计的刻度的校正^{[46]~[48]} 如图 5-47 所示, 从光强度为 I_v 的标准灯到在距离 l 位置上的白色漫反射板, 并使测光轴垂直通过它的中心, 在与测光轴成 45° 的方向上安装亮度计, 以便观测漫反射板的中心。调节亮度计的透镜的焦点, 把漫反射板的像在受光面上成像。漫反射板已在 5-3-4^[4] 中叙述过, 0° 入射 45° 观测的亮度系数如果是 1, 它的亮度 L_v 是:

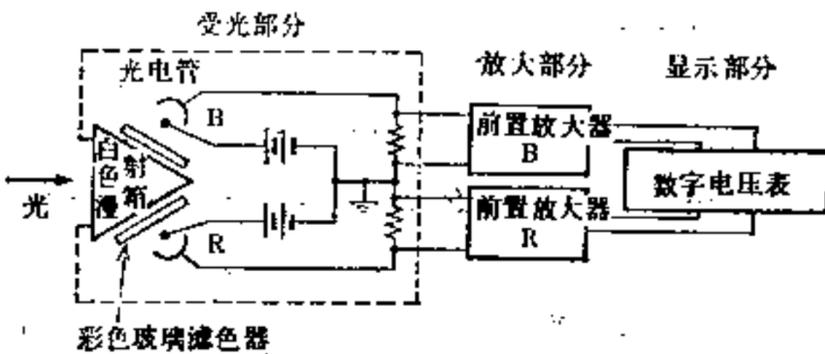


图 5-46 分布温度计

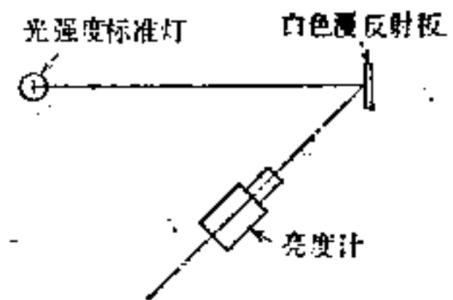


图 5-47 校正亮度计的装置

$$L_v = \frac{I_v}{\pi l^2} \tag{5-10}$$

若亮度系数是 β , 则有

$$L_v = \beta \cdot \frac{I_v}{\pi l^2} \tag{5-11}$$

根据式 (5-11) 就可以校正。

5-5 光谱测量

5-5-1 光谱辐射测量的目的^{[49], [50]}

光子 (辐射) 在物质中被吸收, 这种物质将会受到什么样的作用? 当然视觉作用也不例外。在物质方面, 通常由于波长的不同产生的响应度有差异 (波长选择性), 辐射的作用对于各种波长来说是不一样的。光谱辐射测量的目的在于评价辐射所给予的这种作用的大小和定量预测其作用效果。

辐射光谱测量的直接对象, 是辐射 P_\ominus 的光谱密度 P_λ 。光谱密度既然是辐射的微分量, 在实际上作为辐射功能的全积分, 无非是还原成总量 P 。

⊖ 本节把在 5-1-1 节中表示的各辐射量 (与功率相联系的量) 及其时间积分量 (与能量有关的量) 一起考虑, 称为辐射。

$$P_{\lambda} = \frac{\partial P}{\partial \lambda} \quad (5-12)$$

$$P = \int_0^{\infty} P_{\lambda} d\lambda \quad (5-13)$$

辐射的整个作用, 作为光谱密度积分也很实用。有关效应 W 的辐射有效作用 F_w , 以下面的加权积分来表示:

$$F_w = W_w \int_0^{\infty} w(\lambda) P_{\lambda} d\lambda \quad (5-14)$$

式中 $w(\lambda)$ 表示波长选择性的相对光谱作用函数; W_w 是包括 P 与 F_w 的单位换算关系的常数。

例如测光量之一的照度 $E_v(l_v)$ 是用辐照度 $E_e(W \cdot m^{-2})$ 的波长微分

$$E_{e,\lambda} = \frac{\partial E_e}{\partial \lambda} (W \cdot m^{-2}) \ominus \quad (5-15)$$

和常数 K_m 、权函数 $V(\lambda)$ 组合成

$$E_v = K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) E_{e,\lambda} d\lambda \quad (lm \cdot m^{-2}) \quad (5-16)$$

用来与辐射相联系。这样把照度计的 $V(\lambda)$ 滤光器置换成单色仪, 可以认为各波段体现了光谱光效率的作用。此外, 对各测色量 (参照 4-2 节和 4-4 节) 和各种光化学作用量 (参照 27-1 节) 进行评价等方面, 这种微分——积分的关系也没有什么变化。然而, 辐射的光谱测量, 是经实验操作波长的微分量 P_{λ} 和数据处理过程, 以及通过数值积分反算 F_w , 这就是实际测量的总的过程。求 P_{λ} 过程也实行分离时, 其测定的范围与 F_w 的准确性之间关系要有明确的规定。

5-5-2 光谱辐射测量的标准[⊙]

(1) 一次标准 根据基本的物理量和基础物理常数, 在理论上把光谱密度 P_{λ} 计算出来, 作为一次标准。现在完整意义上的一次标准, 只有空腔辐射源 (模拟黑体)。空腔辐射源在波长 λ 上的光谱辐亮度 $L_{e,\lambda}$, 根据热力学温度 T 用下式计算^{[51], [52]}:

$$L_{e,\lambda} = 2 \varepsilon(\lambda) c_1 / \{ n(\lambda)^2 \lambda^5 [\exp(c_2 / n(\lambda) \lambda T) - 1] \} \quad (\mu W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}) \quad (5-17)$$

式中

$$c_1 = c^2 h = 5.955310 \times 10^{21} \quad \mu W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^4$$

$$c_2 = ch/k = 1.438786 \times 10^7 \quad nm \cdot K$$

$\varepsilon(\lambda)$ ——关于波长 λ 辐射的空腔发射率;

$n(\lambda)$ ——对应于波长 λ 辐射的折射率。

实际上的准确度, 取决于: (1) 基于国际实用温标所决定的温度精度; (2) 空腔壁温度的均匀性, 以及由计算产生的发射率的评价精度, 在可见光波长区域内, 大约能得到 $\pm 1\%$ 的准确度^[53]。空腔辐射源能实现到高温 3000 K 左右, 可能利用的短波界限大致被限制到

⊙ 分光辐照度 $E_{e,\lambda}$ 的单位, 从实用方便出发, 用得最多的是 $(\mu W \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1})$ 。以下也是以实用单位作重点。

⊙ 参照 5-2-1 节。

250nm。在比它更短波长的紫外区域,各国正在进行利用电子同步加速器^[55],或者存储环旋转的电子轨道辐射(同步加速器的辐射)^[54],和各种等离子体的辐射作为标准的研究工作。同步加速器辐射达到软X射线区域,近年相继证明把它作为光谱辐射的标准是有效的,也确实与等离子体的辐射标准一致^[59]。

(2) 二次标准、实用标准 在250~2500nm的波长范围内,由空腔辐射源把量值传递给光谱辐亮度二次标准(带有石英窗的钨带灯)和光谱辐照度二次标准(双卷丝卤钨灯),由电子技术综合研究所(电综研)保持,并接受一般的检定^[53]⊖。以实用为目的,前者不太需要,而后者差不多适用于所有光谱辐射测量,是代表着实验室使用的主要标准。电综研的光谱辐照度定标,在可见光区域,用分布温度值和 $K_m = 680 \text{ Lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 来计算的结果与现行的光强度标准一致,因此对同一种灯,它的值也有可能简单地从光强度标准灯导出。如电综研正在实施,其方法如下式:

$$E_{\lambda} = \frac{E_s k(\lambda) P(\lambda, T_d)}{6.80 \int_0^{\infty} V(\lambda) P(\lambda, T_d) d\lambda} \quad (\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}) \quad (5-18)$$

式中 E_s 是由灯的光强度和距离计算出来的照度值(lx); T_d 是灯的分布温度(K); $k(\lambda)$ 是光谱辐照度标准卤钨灯与黑体辐射光谱分布比值^[61],是给定 $T_d \approx 3150 \text{ K}$ 和 $T_d \approx 3050 \text{ K}$ 下的值^[53]⊖; $P(\lambda, T_d)$ 是温度 T_d 的黑体辐射的相对光谱分布(任意单位)。

表5-6 透明真空白炽灯在波长560nm上的光谱辐照度(每1000lx照度)

分布温度 T_d (K)	光谱辐照度 $E_{\lambda}(560)$ ($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} / 1000 \text{ lx}$)
2800	1.359
2900	1.366
3000	1.372
3100	1.377
3200	1.381
3300	1.385
3400	1.388

还有,只限于关于可见光波长范围的测光测色为目的,使用一般的光强度标准灯(大约为3000K以下)和JP型、JPD型等的卤钨灯(大约为3000~3200K),按 $k(\lambda) = 1$ 根据上式计算光谱辐照度也得到同样的值^[61]。这样计算的波长560nm的值表示在表5-6中。也可以使用JC型卤钨灯(大约为3100~3300K),当作紫外~近红外的简易标准,很方便,但此值必须从光谱辐照度标准按波长求出。这些

灯的一般使用方法已在5-2节给出,紫外区域输出对电压的依赖性很大,对应电压变化1%,250nm的光谱辐照度的变化7%。因此,需要稳定电源和正确地控制电压。

在紫外区域,灯的辐射输出小,把它作为标准来测量有困难。作为在紫外区域输出大的连续光谱的光源,有短弧氙灯^[62],^[63]和重氢灯^[64],这些都曾经作为常用标准使用过。虽然从光谱辐照度标准求出的各个波长的值都必须被使用,但就重氢灯来说,有可能利用根据同步加速器标准定标的直到200nm附近的值^[65]。

还有使用二台单色仪结合辐射源的光谱分布和光探测器的光谱灵敏度的方法,采用热电堆有可能求出直到200nm附近的值^[66]。紫外用线光谱光源,是krefit型汞灯^[53],^[62],^[67]和杀菌灯^[62]。和类似光源比较,它们可以简单地评价谱线强度,从这点来说是方便的,但

⊖ 目前在可见光范围之外,在国际之间标准不大统一。

⊖ 紫外~可见光区域 $k(\lambda)$ 与分布温度没有关系。

不一定适用于一般的光谱辐射测量。

在大约 $2.6\mu\text{m}$ 以上的红外区域,石英失去透过性,因此不能用白炽灯。在这个领域,电总研在 SiC 的圆筒状烧结体[⊖]上开一个狭缝状的口,使其成为空腔辐射体,用它所产生的 $2\sim 20\mu\text{m}$ 区域建立起光谱辐亮度二次标准^[68]。在这个波长区域内,由于空气中的 H_2O 和 CO_2 的吸收,要想确定作为光谱辐照度标准的值是困难的,因此,在使用中必须考虑这点而使光路成双地进行比较测定。

5-5-3 光谱辐射测量的装置

作为真正的光谱辐射计装置还是少的,大多数是改装分光光度计的一部分,或根据使用的目的把适当的单色仪作为主体组成系统。装置必须具有的基本功能,有以下二点:

(1) 代表小区间的光谱密度的区间功率可按波长测量。

(2) 由标准光和试验光产生的二个功率,要正确地进行比较测量。

前者主要通过单色仪及其使用技术来实现,后者主要是通过单色仪的入射光学系统、光探测器及其使用技术来实现。

(1) 单色仪^[69],^[70] 杂散光[⊙]虽然水平低,但带宽大,在所通过的能量中它所占的比例可能不能忽视。光谱辐射测量,最终要使用相应波长的积分量,因此,它的影响是大的。

用包含有杂散光在内的数据,最后经过修正处理来消除的一般方法是没有的。最实际的办法是选用双光束单色仪,就往往可以不考虑杂散光。此时,重点放在分辨率上,加色散型(在同一平面内配置成串线形式,或在平面图中关于中间狭缝的点对称配置)还不如用零色散(关于中间狭缝面的面对称配置)的方法。

选用单光束单色仪时,可以认为色散元件用光栅还不如用棱镜,而 30° 反射型棱镜又不如 60° 透射型,在成像系统中反射镜不如透镜,而在反射镜系统中,反射机构不如 C-T 机构杂散光少。为了节省空间而把内部的往返光路设计成叠合的压缩形式,发生杂散光的可能性较大。通过外部光路使用截止的方法消除杂散光,比如不使用灵敏带宽过宽的光探测器,或者使用适当的带宽滤光器来截止。

作为色散元件,棱镜和光栅各有优缺点,必须根据使用目的来选择^[71]。棱镜通常可以包括 $1:5\sim 1:10$ 以上的宽阔波长区域,在无杂散光和没有无效通带这方面容易得到高质量,但是色散随波长变化大,因此在使用上费事。再有,棱镜的折射率随温度会有若干变化。光栅^[72]的色散变化小,通常用正弦板装置将波长按线性送给是方便的,使用波长范围为 $1:3$ 左右,但有高级次光、杂散光、幻影、畸形和长期变化等问题。最近,全息照相技术的光栅制造技术取得了进展,使用这种光栅的单色仪也开始普及。在分光光度计中也有用棱镜和光栅组合,具有两者特征的双光束单色仪。

当使用棱镜单色仪时,对波长进行严格校正是重要的。为此,要使用由低压放电产生的线光谱。在市场上出售的有 Na、K、Rb、Cs、Zn、Cd、Hg、Tl、He、Ne、Ar 等的小型放电管,在 $200\sim 1000\text{nm}$ 的波长精密值是已知的^[74]。在紫外区域,为了这个目的可以使用杀菌灯,Na-Tl-In 系列的金属卤化物灯,去掉玻璃外壳,用霓虹灯变压器点灯[⊙],能够利用

⊖ 称它为球形器(日本的硅碲石做),作为高温发热体用。

⊙ 在不打算接收通过区域之外所选特殊波长的辐射叫做杂散光。主要由于光学元件表面、支架、框体内壁等的杂散反射光而来。

⊙ 用一般的镇流器点灯时,因产生高压而引起线光谱起伏的情况不好。还有,用这种点灯方法紫外输出大,所以有必要保护眼睛和皮肤。

许多精细的谱线。在短波区域，棱镜的色散过大，线的确定有困难，可用光栅扫描记录数据或者光谱照片作参考。红外区域用 Na、Hg、Tl 等可以包括直到 $2.3\mu\text{m}$ 附近的谱线，在此以上的波长只有通过吸收光谱产生^①。

(2) 入射光学系统 如前所述，光谱测量装置不过是把照度计的滤色器部分换成单色仪^②，由于单色仪的构造复杂，所以在光路上产生的透过率的不均匀性和偏振光特性大。因为这种原因，入射部分的漫射光学系统的良好与否决定着精度。入射光学系统的作用在于通过光的漫射把光源几何尺寸的放大和光源的偏振特性与单色仪对它们的感受性分开^③，下面分别考虑这两种功能：

(1) 对于光源，作为具有余弦特性无偏振选择性的一次接收面。

(2) 对于单色仪狭缝口和色散元件开口，作为无偏振、均匀照射的二次光源。

为了实现这些功能，如图 5-48 所示，采用漫反射板或积分球。把经常使用的材料表示在表 5-7 中。漫反射板，必须在垂直入射—— 45° 观测的条件下使用。用通常所熟悉的单色仪，虽然在光源一侧使光入射角十分大时，必须有相当大面积的漫射板，但如把图 5-48(b) 所示的反射镜 M 做成凹面镜，使色散元件成像在漫射板上，则用小面积的漫射板就可以解决。

积分球最好使用直径为 5~20 厘米的，不过功率衰减很大。在标准光源和试验光源同时点灯的时候，从反方向一侧来的光不得混入，一定要很好地屏蔽。在短紫外区域，当功率不够又必须测定时，采用两面粗磨的石英板、二氧化硅的半透明烧结板和聚四氟乙烯板等作为透过漫射板来使用。

另外在红外区域，受到表 5-7 所示的那些材料中的 OH^- 吸收的影响，在 $2.5\mu\text{m}$ 以上时的反射率下降。作为红外区域用的漫反射面，用金蒸着的粗糙面^[79]为优，各种有机含氮碱也是很有希望的。但是，在光谱测定中，红外探测器的灵敏度不怎么够，因此往往是不能利用功率大幅度衰减的漫射入射系统。

(3) 光探测器 (参照 5-3 节) 在光谱测定中经常使用的光探测器表示在图 5-49 中^[80]，^[80]。光谱比较测定，通常是根据光探测器的线性进行。在应该测定的功率比很大时，应该使用透过率正确定标的减光器尽量把功率调到同一水平上。作为减光滤光器，在没

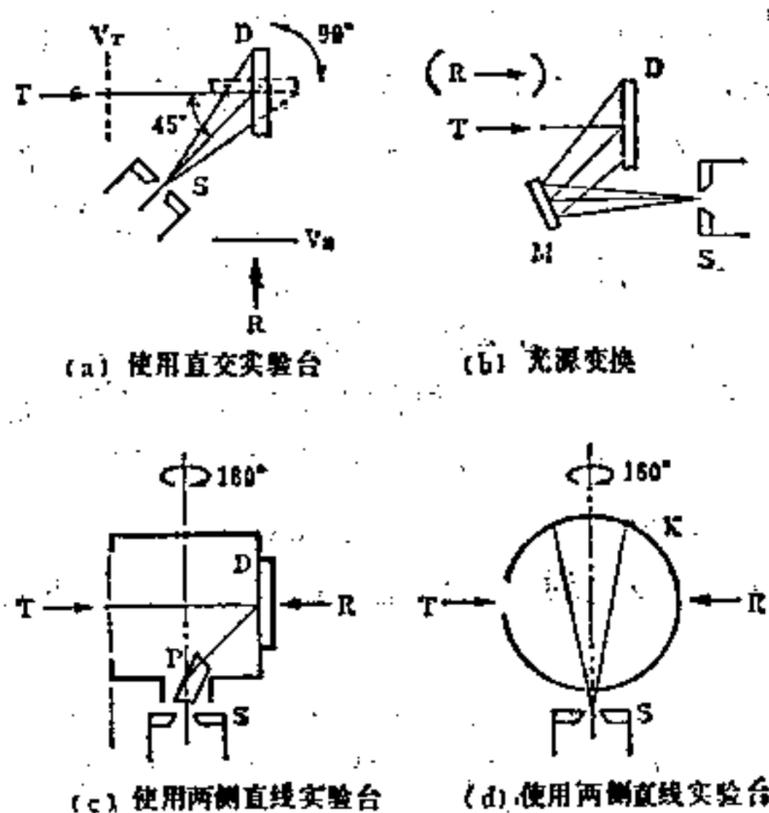


图 5-48 单色仪入射部分漫反射光学系统的例子

D—漫反射板 K—积分球 M—反射镜 P—棱镜
V—快门 S—单色仪入射狭缝 R、T—标准和试验光源光路轴系统

① 去掉高压钠灯的外管是为了观测 $4.04\mu\text{m}$ 、 $7.44\mu\text{m}$ 的线光谱，作者还不知道有过报导的实例。

② 光谱总辐射通量的测定是灯点燃在积分球内进行测定^[78]。这样就相当于把球形光通量计的滤光器部分变换成单色仪。

③ 如果把这个比作电路的阻抗匹配，那末就和用分压比较大的阻抗分压器作级间耦合来达到强迫匹配相似。后段(单色仪)的特性，不会受到前段(光源)的现在特性的影响，对任意光源被认为安全匹配。作为它的代价，不可避免地有大幅度的功率衰减。

表5-7 紫外~近红外用的漫反射板材料及其用法举例

材 料	作 漫 反 射 板 用	作 积 分 球 内 壁 用
乳白玻璃赛璐珞胶板	粗研磨面(用于可见光部分)	
MgO	燃烧烟雾附着	烟 熏
Al ₂ O ₃	压成低温烧结体	
BaSO ₄	压成低温烧结体油漆涂料	油漆涂料
氟树脂粉 ^① (78)(77)①	压 成	压 成

① 在短紫外照射下有荧光⁽⁷⁸⁾。

有波长选择性等方面来看, 筛孔滤光器是优越的。但是在实际测定中, 即使光电流之比超过1:100也照样要求直线性的情况较多。因此, 开头就预先做直线性试验是很重要的。光导电型以外最新光探测器, 如使用得当能达到非常好的线性, 大体上是在试验方法的精度之内, 确实适用。若存在一些非线性时, 要考虑元件的选择、使用范围、动作条件、回路等, 如果总是存在系统性的非线性时, 就应该进行修正。

5-5-4 光谱辐射测量的原理

在本节中, 将辐射的光谱密度 P_λ 作为波长的函数, 写成 $P(\lambda)$, 简称为光谱分布。试验光源的光谱分布为 $P(\lambda)$, 已知标准光源的光谱分布为 $P_s(\lambda)$, 通过光电流的比较测定, 用下式求出:

$$P(\lambda_s) = P_s(\lambda_s) i(\lambda_s) / i_s(\lambda_s) \quad (5-19)$$

式中, $i(\lambda_s)$ 、 $i_s(\lambda_s)$ 是对应单色仪给定波长为 λ_s 时的试验光源和标准光源测得的光电流; $P(\lambda)$ 、 $P_s(\lambda)$ 都是作为平滑的连续光谱。

试验光包含波长 λ_s 的独立线光谱时, 它的功率 $P_l \ominus$ 用下式求出^[82],

$$P_l = P_s(\lambda_l) \int_0^\infty i_l(\lambda_s) d\lambda_s / i_s(\lambda_l) \quad (5-20)$$

式中, $i_l(\lambda_s)$ 是试验光源的光电流中由线光谱引起的成分, 从测定值 $i(\lambda_s)$ 中减去由连续光谱引起的成分的内插值求得。光电流值对确定波长的积分, 就是对线面积的分段求和[⊖] 而得^[53], ^[67], 或者用时间扫描积分法而得^[83]。用分段求和法时, 把测定点的间隔定为狭缝宽度 s 的 $1/N$ (N 为整数), 那么用少数的测定点也经常可以得到正确的结果如图 5-50 所示。在原则上, 至少用 2 点 ($N = 1$) 求 i_l , 通常取 4~5 点 ($N = 2$) 就已经足够了。另外, 采用棱镜单色仪时, 最好是在等间隔机械刻度上取测定点, 式 (5-20) 分段求和形式即变为下式:

$$P_l = P_s(\lambda_l) \sum_j i_l(\mu_j) \Delta\mu / \{i_s[\mu(\lambda_l)] d\mu(\lambda_l) / d\lambda\} \quad (5-21)$$

⊖ 注意, 这里的 P_l 不是光谱密度。

⊖ 此时, 虽然也可采用各种数值积分法的公式, 但得不出比分段求和更好的结果。

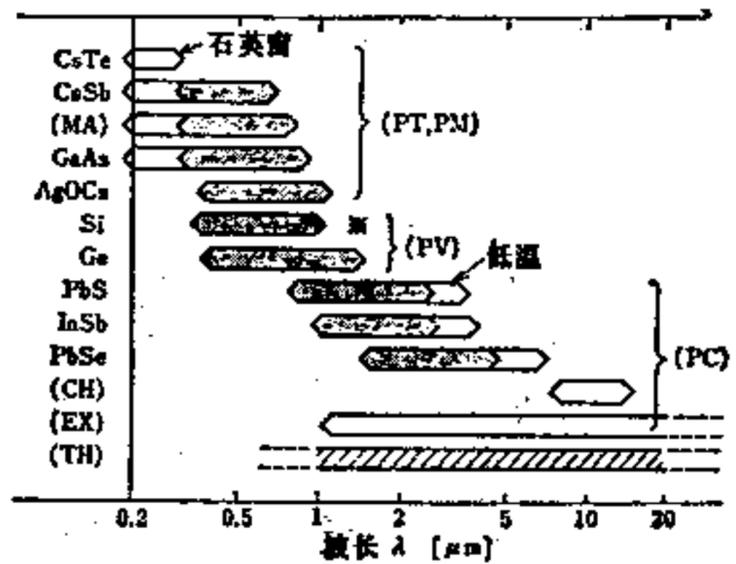


图5-49 分光用的各种光探测器和大致的使用区域

(MA) 多种碱 (CH) 各种复合的钙脂琥珀
(EX) 各种没有单个迁移的Si、Ge (TH) 各种受热体 (PT) 真空光电管 (PM) 光电倍增管 (PV) 光电元件 (PC) 光导电元件 ※Si 应用于光导摄像管、成像传感器的光谱

式中, μ 是单色仪波长刻度盘的机械刻度值的移动量; $d\mu(\lambda_i)/d\lambda$ 是波长校正曲线 $\mu = \mu(\lambda)$ 在波长 λ_i 处的微商。

式(5-20)、式(5-21)不仅对单一谱线, 而且对相互不能分离的复合线(汞的577、579nm线等) 和由于高压放电而产生的变宽到某种程度的谱线也成立, 只要它们分离到能够对连续光谱成分进行内插就可以。此时作为线波长 λ_i 的实际值的中心波长采用:

$$\lambda_i = \frac{\int_0^{\infty} \lambda_0 i_i(\lambda_0) d\lambda_0}{\int_0^{\infty} i_i(\lambda_0) d\lambda_0} \quad (5-22)$$

或者用下式代替式(5-20)

$$P_i = \int_0^{\infty} \{p_i(\lambda_0) i_i(\lambda_0) / i_e(\lambda_0)\} d\lambda_0 \quad (5-23)$$

为了适用以上各式求光谱分布, 有下面的条件:

(1) 单色仪狭缝的通带, 应在适当的有限区间内(如离带宽的中心为狭缝宽度的2~3倍的地方, 应该完全被遮挡)。

(2) 狭缝通带中心波长与设定的波长相一致(波长校正、设定的重复性)。

(3) 入射光学系统应具有5-5-3 [2]之(1)、(2)的功能。

(4) 光探测器的响应度, 应该不随时间而变, 应该不依赖于入射功率(稳定性、线性)。

5-5-5 光谱辐射测量的通用化 [49], [50], [82]

前面的方法是将平滑的连续的光谱和独立的线光谱分离后逐个求值的方法, 适用于白炽灯、普通荧光灯和汞灯等, 在最近的各种新光源中所看到的复杂光谱分布的测量中, 照原来的那个样子就难以适用了。根据已在5-5-1节中所述的目的, 以在式(5-14)中表示的有效作用 F_e 的评价精度作为标准, 那么对于任意的光谱分布以下面的方式表示往往能给出正确的结果。这就是说, 可见区域的测光测色可按如下方法进行。

(1) 把狭缝波长宽度定为2.5nm。

(2) 波长每隔2.5nm 在全部可见光区域内进行161点的比较测量, 包括线光谱和连续光谱, 照式(5-19)求出光谱分布。

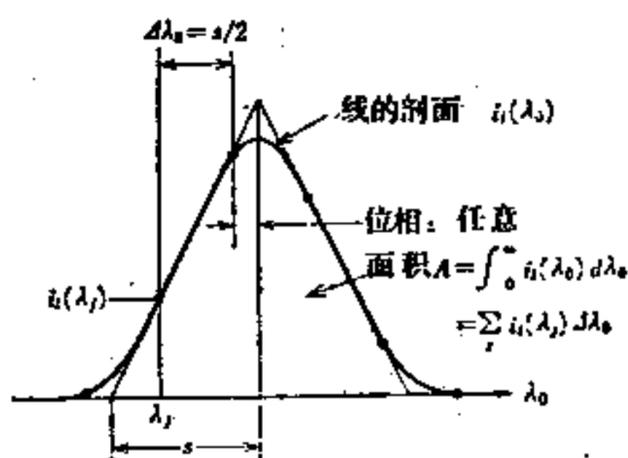
还有, 在使用棱镜单色仪的时候, 与上面的方式同样方便的方法如下:

(1) 可见波长区域(380~780nm) 机械刻度的范围分160等分, 对这样等分的每个分割区进行161点的比较测量。

(2) 狭缝宽度规定为同上述给出波长1个区间等价的恒定机械宽度。

这个方式的特征, 归纳如下:

(a) 方式本身所具有的系统误差的大小, 对应于大多数一般光源, 测量值 Y 有 $\pm 0.1\%$, 色度量 (x, y) 在 ± 0.00025 的程度以下, 很少有超过其二倍的。在包含复杂而密集的光谱分布时, 通常误差更小。



S: 波长间隔相当于入射缝的宽度或出射缝的宽度(哪一个大就用哪一个)

图5-50 用狭缝宽度的整数分割区分点取样作为分区求和

(b) 即使狭缝宽度和测量间隔比 200 等分还要小, 但由于数据波动产生的偶然误差占优势, 也不能提高精度。狭缝宽度和测量间隔大于上述间隔时, 与其二次方成比例的系统误差增大。

(c) 测定间隔是与狭缝宽度 (的整数分之一) 相等作为它的基本条件[⊖], 如果不一致, 将发生相当大的误差。

5-5-6 光谱比较测量的实施

光谱比较测量的实验操作, 是根据入射光学系统的变换和单色仪的波长移动按式(5-19) 求出必要的〔2 行 × n 列〕(n 为测点数) 的光电流矩阵的各因素。此时, 可按列测定, 也可按行测定, 有下面两种方式的选择。

(1) 逐点比较测量方式 把试验光源和标准光源在波长 λ_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 处作比较, 按各点顺序去决定 $i(\lambda_j)/i_s(\lambda_j)$ 。要作精密测量时, 对各波长点作交叉反复的测定。过去很难得到稳定的接收器, 在很多场合只把稳定光源作为测量对象, 以这种方式作为精密测量的标准方式。测量值的误差小, 表面上看来精度是好的, 但是重复测量仅考虑光源的短期变化, 而不能考察长期性变化, 为此在测量中间可以参照特定的波长的读数, 或用另外稳定的接收器进行非光谱输出的监视, 修正变化的部分。但是, 对于光源的一般波动, 用比例的修正效果有限。

(2) 扫描比较测量方式 对必须观察的每个光源, 在 $j = 1, 2, \dots, n$ 的全部波长位置连续进行测定, 在统一的整套数据中间求出光电流的比值。要作精密测量时, 可以进行扫描交叉反复测量 (往返测量)。与过去相比, 方法简便, 装置稳定, 而且现在已把不太稳定的一般光源作为测量对象了, 这一方式能给出比其它方法更为正确的结果。反复扫描有把总的波动因素平均减低的效果。使用多数试验光源进行实用的测量, 本方法都是非常合适的, 特别可与前项的一般测量方式组合成实用价值很高的测量方法。但是, 因为也受到光探测器的稳定性的限制, 所以, 不进行反复扫描, 只作单程测量 (例如只在早晨对基准光源进行一次扫描, 它的数据就适用于一天的测定的方式) 时, 只能限于在实验室的环境条件下进行粗略的测定。

5-5-7 分光测色

人的视觉, 有从辐射光谱分布中取出相互独立的三个特征的功能, 其结果是对发光面和反射、透射面有色的知觉。色是作为人的反应知觉 (效果), 而不是直接物理测量对象, 引起色感的物理刺激无非是辐射对于假想的三种感光灵敏物质的有效作用, 所以在色度测量标准观测者 (4-2 节) 的规定基础上可以严格测定颜色。所谓物理测色, 就是从辐射的光谱分布中取出三个特征 (三刺激值), 把这个辐射作为三维空间中的一点进行分类和布置操作, 而不是从它的刺激 (作用) 量空间转到知觉 (效果) 量空间的映象关系。

(1) 光源色的分光测色^[84] 辐射 P 的三刺激值 X, Y, Z , 是作为三种独立的光谱作用函数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 由式 (5-14) 求出的辐射的有效作用。即光源色的分光测色, 是在 5-5-1 节中叙述的光谱辐射测量目的的一个典型例子, 无非是把用于测定光源色的光电色度计 (5-6-6 节) 的路特滤光片替换成单色仪, 对各波长实现路特条件的操作。因而作为实验技术上的问题, 已在前面叙述, 按此操作即可。

⊖ 这样的条件称为匹配。

(2) 物体色的分光测色^[85] 物体以固有的光谱反射率 ρ 作为它的物理属性,而物体固有的色彩就是它的视觉效应。像这样的物体色可以理解成物体属性,如果追根到底的话,则是从光谱反射率得出来的特征。但是,为了产生物体色的知觉,必须有入射到物体,然后又从物体带回信息来的光,到达眼睛的辐射的光谱分布是照明光的光谱分布 P_λ 和物体的光谱特性 $\rho(\lambda)$ 的乘积 $\rho(\lambda) \cdot P(\lambda)$ 。因此,为了确定物体色在刺激量空间中的位置,必须规定照明光的光谱分布,为此可用标准光源C或D₆₅^[85]。其结果就是照明所产生的实际的物体色由反射光的光谱分布特性所决定。

作为物体色测量使用的光电色度计(5-6-6节),是属于测定物体反射光(辐射)的仪器,因此可根据不同的光源、接收器和标准光源,按式(5-30)计算出滤光器光谱透射率。在最近的照明光源中已经要求用D₆₅,但是不能够准确实现。

另一方面,物体色的分光测色,不是由到达眼睛的反射光的光谱分布 $\rho(\lambda)P_\lambda$ 求出,而只是对物体的光谱反射率 $\rho(\lambda)$ 进行测定,由此计算出任意照明光的反射光 $\rho(\lambda)P_\lambda$ 。反射光的三刺激值X、Y、Z仍然从式(5-14)中求出。像这样物体色的分光测色不能作为前述的辐射光谱测定的一个部门,而属于与辐射有关的物体的光谱特性的测定。

物体的反射、透射特性的测定,是用与已知光谱特性的物体进行光谱比较测定法;对于各种测定对象必须有合适的标准物体。对于有正透射特性的物体,如有色玻璃和溶液等,把空气和溶媒作为标准物体是比较简单的。对于漫反射性的物体,把假想的理想漫射体(反射率为1的完全漫射面)作为标准,对表5-7所示的各种材料的光谱反射率或光谱辐射系数进行标定,并以此作为标准。

在比较测定中,很重要的条件是要实现近似于实际使用目的的入射、出射的方向条件(照明—观测条件)。试样一般是放在单色仪和光探测器之间,通过单色仪的准单色光入射于试样上。试样前后的光学系统,配置成满足所希望的照明—观测条件。以下四种是CIE推荐的适用于漫反射物体的照明—观测条件^[87]。

(a) 45°入射—垂直接收(45/0): 给出光谱辐射系数 $\beta_{45/0}(\lambda)$ 。

(b) 垂直入射—45°接收(0/45): 给出光谱辐射系数 $\beta_{0/45}(\lambda)$ 。

(c) 漫射入射—垂直接收(d/0): 给出光谱辐射系数 $\beta_{d/0}(\lambda)$ 。

(d) 垂直入射—漫反射接收(0/d): 给出光谱辐射系数 $\beta_{0/d}(\lambda)$ 。

在采用垂直入射条件(b)、(d)时,因为正反射光由入射一侧返回而出现多次反射的影响,所以要把入射光轴从试样面法线倾斜几度。另一方面,在采用(c)、(d)漫射条件时,可以设置消除正反射成分用的保护罩。但是,由于这些照明—观测条件限制了测色仪器的规格,虽然是有利于提高数据的一致性的限制,但未必适合材料的实际使用条件。

光谱辐射计的测定对象是光源,所以它是一端开放的装置系统,而分光色度测定装置(或分光光度计),则把从光源到光探测器全部包括在它的内部,构成封闭系统。所以用扇形镜等进行双光束同时比较,如在标准一侧进行反馈控制使电输出成为恒定,由试验材料一侧的输出就可以直接读出各波长的〔试样/标准〕的比值,可以消去系统主要变动的大部分因素^[89]。为了进行如4-2节所述的测色计算,在分光测色装置上附加了模拟的或是数字的运算部分。

(3) 荧光色的分光测色^[88] 入射在荧光性物体上的光,除了产生由通常的反射过程

⊖ 或者是光谱透射率、光谱径向辐射系数(下同)。

所产生的波长没有改变的辐射外,还产生由激发—发光过程引起的波长发生了变化的辐射。因此,在荧光色的精密测定中,必须有把光谱灵敏度测定、光谱辐射测定和光谱反射率测定三者结合使用的技术。作为标准的方法,是在两台单色仪之间放置试样,按入射光各波长进行出射光的波长扫描。另外,也有提出上述操作的简化办法和采用一台单色仪的简便方法等几种方案,目前在技术上尚未解决的问题很多。

5-6 实用测量仪器

5-6-1 基本知识

实用的测量仪器,现在大部分只局限于物理测光(光电计测)。光电测量有测定与光探测器的入射光通成比例的光电流,叫直接法。也有用光探测器检测入射的二束光平衡,读出标定的可变减光器的读数,叫零位法。现在由于光电流放大回路技术有很大进步,大部分的实用仪器都是前者。

一般测光仪器要求有如下的性能:

- (1) 适合测量目的的光学系统;
- (2) 光谱光效率修正或其它的光谱灵敏度修正;
- (3) 对应于入射光,输出的线性和重复性;
- (4) 测光量的准确度。

若(1)~(3)是正确的,则通过校正来保证(4)的准确度,或者由于变换量程产生数值的差异,可以进行修正。因此希望对仪器进行定期(例如一年一次)校正。

(1) **光谱光效率的修正** 为了使光探测器的光谱灵敏度与标准相对光谱光效率 $V(\lambda)$ 相重合,把光谱光效率修正滤光器进行组合。测定弱光时,照度计也有不带修正滤光器的,希望能在全量程内使用。在精密测量中,计量法中已规定出色修正系数(表5-8②的范围之内)所必须达到的程度,如果要求更加准确,则要求测量受光系统的综合光谱灵敏度,对应各色光或各灯计算出色修正系数来修正测量值。色修正系数由下式得出:

$$K = \frac{\int P_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int P_r(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \times \frac{\int P_s(\lambda) S(\lambda) D(\lambda) d\lambda}{\int P_r(\lambda) S(\lambda) D(\lambda) d\lambda} \quad (5-24)$$

式中, $P_s(\lambda)$ 和 $P_r(\lambda)$ 是标准光源A(校正光源)和被测光的光谱分布; $V(\lambda)$ 和 $S(\lambda)$ 是标准相对光谱光效率和光探测器的光谱灵敏度; $D(\lambda)$ 是光学系统的光谱特性(若 $S(\lambda)$ 是光学系统的综合光谱灵敏度,则 $D(\lambda)$ 可以省略。若不测定综合光谱灵敏度,会产生误差),积分范围是 $V(\lambda)$ 和 $S(\lambda)$ 灵敏度所规定的某个波长范围。

标准光谱光效率暗视觉的数据也已经确定,可是现在尚未被实际的光度测量仪器所采用。对中间视觉的研究也在继续进行,也有关于实验装置方面的报告,但还没有达到实用化的程度。

(2) **斜入射光的修正(角修正)** 照度计由斜入射光产生的输出,必须满足对应于入射光角度的余弦法则,对光接收窗不进行修正,将要偏离 $\cos \theta$ 特性。为了进行这种修正,把乳白平板、乳白盘形板等装配在受光窗上进行修正,最近也有使用在乳白球面板的四周设

表5-8 由计量法规定的照度计的主要规格

项 目	法 定 规 格	其 它 试 验 条 件														
①仪表误差	检定允许误差, 为最大刻度的±4%以内 使用允许误差, 为最大刻度的±6%以内	20°C/50~60%和最大刻度的1/3以上的3个点照射5分钟后的指示值(各个档)														
②光谱光视效率特性	<table border="1"> <thead> <tr> <th>波长范围(nm)</th> <th>色修正系数范围</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>400~760</td> <td>0.98~1.02</td> </tr> <tr> <td>450~500</td> <td>0.60~1.40</td> </tr> <tr> <td>500~550</td> <td>0.90~1.10</td> </tr> <tr> <td>550~600</td> <td>0.90~1.10</td> </tr> <tr> <td>600~650</td> <td>0.80~1.20</td> </tr> <tr> <td>650~700</td> <td>0.50~1.50</td> </tr> </tbody> </table>	波长范围(nm)	色修正系数范围	400~760	0.98~1.02	450~500	0.60~1.40	500~550	0.90~1.10	550~600	0.90~1.10	600~650	0.80~1.20	650~700	0.50~1.50	$K = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda)}{760} \times \frac{\sum_{\lambda=400}^{760} E(\lambda) S(\lambda)}{\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)}$ <p>$V(\lambda)$: 标准光谱光视效率 $E(\lambda)$: 在2856K时黑体光谱辐射出度 $S(\lambda)$: 照度计光谱光视效能</p>
波长范围(nm)	色修正系数范围															
400~760	0.98~1.02															
450~500	0.60~1.40															
500~550	0.90~1.10															
550~600	0.90~1.10															
600~650	0.80~1.20															
650~700	0.50~1.50															
③减光滤色器的光谱特性	在460~660nm的范围内, 光谱透过率最大值为最小值的1.3倍以下	测定460~660nm内的每10nm波长, 共计21个波长间隔的光谱透过率														
④斜入射光特性	<table border="1"> <thead> <tr> <th>θ</th> <th>修正率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\theta = 30^\circ$</td> <td>±2%以下</td> </tr> <tr> <td>$\theta = 60^\circ$</td> <td>±7%以下</td> </tr> <tr> <td>$\theta = 80^\circ$</td> <td>±25%以下</td> </tr> </tbody> </table>	θ	修正率	$\theta = 30^\circ$	±2%以下	$\theta = 60^\circ$	±7%以下	$\theta = 80^\circ$	±25%以下	以测定基准面为中心, 在二轴方向的交点上旋转测定 $\frac{E - E_0 \cos\theta}{E_0 \cos\theta}$ 的值						
θ	修正率															
$\theta = 30^\circ$	±2%以下															
$\theta = 60^\circ$	±7%以下															
$\theta = 80^\circ$	±25%以下															
⑤耐湿特性	$\frac{\text{耐湿后} - \text{耐湿前}}{\text{耐湿前}} = \pm 3\%$	耐湿前50~60%任意温度 耐湿条件85~95%/3小时放置 试验照度最大刻度的2/3以上/5分钟以后														
⑥温度特性	$\frac{(\text{试验温度的指示值}) - (20^\circ\text{C指示值})}{(20^\circ\text{C指示值})} = \pm 3\%$ (不过要根据当时的试验温度从温度修正表中查出相应的修正值)	温度范围-10~40°C 试验温度-10°C, 0°C, 10°C, 30°C, 40°C 试验照度 最大刻度的2/3以上/5分钟后														
⑦指示值的重复性	$\frac{\text{最大的指示值} - \text{最小的指示值}}{\text{最大的指示值}} = 2\%$	试验条件: 放置在暗室之后, 在30分钟内来回往返五次 试验照度: 在最大刻度的2/3的照度下, 照射稳定时的指示值														
⑧光探测器的疲劳特性	$\frac{(\text{5分钟后的指示值}) - (\text{15分钟后的指示值})}{(\text{15分钟后的指示值})} = \pm 1\%$	试验照度: 最大刻度的2/3照度指示的微小变化														
⑨指示的静止时间	给出最大刻度(各档)约为1/2的照度处, 使指针在那里静止5秒以内															
⑩一般构造标记、标记	仪表编号, 照度测定范围(每个档的)的标记, 测定基准面的标记, 本体和受光部的组合编号, 法定计量单位和辅助单位, 法定略字的使用, 形式承认编号, 附加检定印章															

置挡光壁。离这个球面的垂直部分约60°左右, 由挡光壁把60°角以上的光进行修正特性也可以(图5-51)[89]。

(3) 测光电路 光电池内阻越低, 光电流和负载电阻就越大, 直线性越差。作为简单回路是把指示仪表(内阻约1kΩ)直接连接在光电池上, 在精密测定时, 希望回路的负载电阻接近于零, 可使用Campbell-Freeth测量电路(用补偿电源的补偿法)。现在大多数采用运算放大器进行电流电压的变换, 用 $Z_{in} \approx R_f/A_o$ (R_f : 负反馈阻抗, A_o : 开环增益)表示的视在内阻在10Ω以下, 如果光电流合适, 可以达到非常满意的线性放大。配上光电管等其它的优良光探测器就成为简单的稳定性好的放大回路。

5-6-2 照度计

正在使用的照度计中，光电池指针式照度计几乎占90%以上，有精密型和简单型二种。也有采用光电管或半导体作光探测器的照度计。在表5-9中表示市售照度计的实例。

(1) 法定照度计 照度计是作为法定计量仪器的。商业交易用或作鉴定用的光电池指针式照度计都必须在与计量法有关的部门所承认的试验中取得合格的资格。把法定的规格归纳表示在表5-8中。此外，为了保证精确度，也要有每年一次精确度检定的制度。从表5-8可以看到规定是相当严格的，也只有满足这些规定的照度计才能说是十分可靠的〔90〕，〔91〕。

特别是光谱光效率修正和角修正(斜入射光的修正)比目前所知道的照度计在这些方面的修正要严格得多，它们和温度特性一起已经在数值上确定下来了。与表5-10所示的光电池照度计的JIS C 1609比较一下，就知道法定标准较为严格。市销商品因为减光不好办，它的测量范围比0.2~3000 lx及其它品种都狭小。

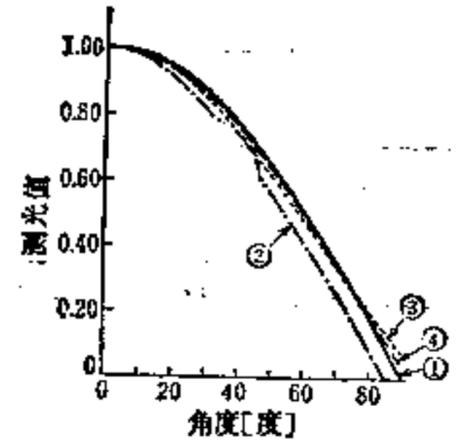


图5-51 斜入射光的修正
①余弦曲线 ②乳白平板 ③乳白盘形板 ④乳白球面板+挡光壁

表5-9 市售照度计的实例

分 类	法定照度计	精 密 型	精 密 型	精密的高灵敏度	简 易 型
光探测器	Se光电池	Se光电池	S-20光电管	光电倍增管	Se光电池
放 大	OA	OA	OA	OA	没有
测定范围	30~3000lx	10~3×10 ⁵ lx	1~9000lx	0.01~1×10 ⁵ lx	500, 5000lx
量程转换	3档	6档	6档	8档	2档
测量误差	±4%以下	±5%以下	±3%以下	±5%以下	±7%以下
电 源	9V×2	9V×2	9V×2	AC100V	不要

附注：OA：运算放大器。使用9V干电池电源。各种照度计均进行过视觉灵敏度修正。

(2) 计量法以外的精密型照度计 一般试验测定用的照度计，不受法规限制，不过如果采用法定照度计，或者使用符合那种规范的照度计，那么可靠性高，可用于精密测量。一般把光谱光效率和斜入射光进行过充分修正，直线性、重复性好，测光量的读取精度高的照度计叫做精密型。

这种型号，除光电池式外，还有采用光电管等各种光探测器的，高灵敏度和稳定的是光电管式，若要求有更高灵敏度时，则光电倍增管式为最好。半导体光探测器，使用的有PIN发光二极管等，但是因为近红外灵敏度高，所以光谱光效率修正困难。

(3) 简易照度计 把电流表直接连接在光电池上的小型照度计，因电流表的内阻高，直线性差些，灵敏度也低，作为简便测量问题不大。

也有为了增加灵敏度，没有光谱光效率修正用的滤光器的照度计，因此在测光值中应把色修正系数乘上。

表5-10 JIS C 1609规定的光电池照度计的特性

项 目	内 容
指示计可动部分 平 衡	满刻度的4%
指示计可动部分 零位摩擦	0.5mm
指示计可动部分 静止时间	5秒
角度误差	30度~3% 60度~10%
准 确 度	A级±7% B级±15%
疲 劳	±5%以下

5-6-3 辐射计

如果是以辐照度测量为目的的光电测量仪，可以用 mW/cm^2 或 $\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 等刻度。电路的结构和照度计一样，可以根据使用目的采用各种光谱灵敏度的光探测器和光谱灵敏度修正滤光器。

(1) 宽波段辐射计 如果采用热电堆做辐射计的光探测器，可以有平坦的光谱灵敏度让紫外、可见、红外通过。但是灵敏度低，时间常数大，阻抗也低，而且机械强度较弱，通常用作对太阳辐射和农作物试验人工光源等辐射量比较大的场所的测定。在光谱测光等采用的是灵敏度高、反应快的热电堆，为了减少受热片和异种金属等的总热容量，机械强度降低，价格也贵。以太阳辐射为目的的，有把圆球形玻璃窗安装在光接收部件上的，有装上计算机把辐射量按时间积分的，也有把热漂移用差动回路修正的等等。入射窗的材料有玻璃、石英、KBr、KRS-6 等，可以根据目的和光谱特性来选择。

(2) 特定波段的辐射计 为了特殊的目的，有限制在特定波段内测量辐照度的辐射计。有在可见区域、近红外区域具有平坦的光谱灵敏度的辐射计和用只在特定波长上具有光谱灵敏度的颜色滤光器结合受光器构成的专用辐射计。前者便于测量 LED 发光能量等，后者绝大多数是紫外辐照度测量仪，在杀菌线、保健线、有害的紫外线、(近) 紫外线等方面使用。定辐射量值，必须选择可靠的。

用于各种目的的组合光探测器的光谱灵敏度特性，表示在图 5-52 中。

5-6-4 亮度计^[92]

实用亮度计，几乎都是光电测定法。用与标准亮度面作目视比较的方法，以及用胶片感光量与标准亮度面进行比较的照相机现在已不实用了。但是，用电视摄像机来得到被测面的亮度分布的方法最近正在盛行起来。

光电的测量，大多数的构造是采用透镜和光阑，从光源的小面积出发把在一定的立体角内发出的光通量投射到光探测器上。

(1) 用透镜的方法 如图 5-53 (a) 所示，用透镜在测定面上成像，通过光阑 A 的光投射到光探测器上。像面照度 E 为：

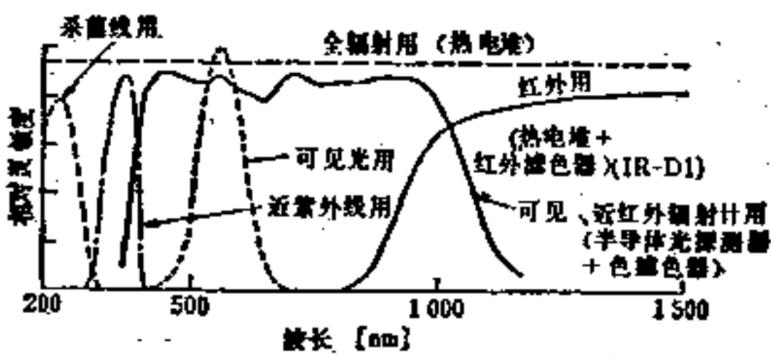
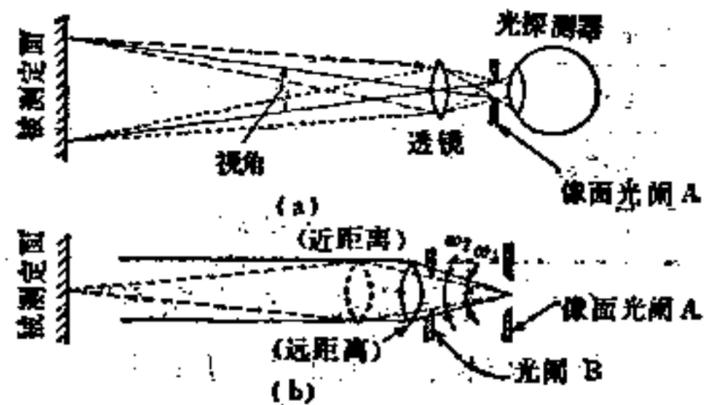


图 5-52 各种辐射计的相对光谱灵敏度



(b) 装配有光阑 B (固定光阑)

图 5-53 透镜式亮度计的原理图

$$E = \frac{\tau \pi L}{4} \cdot \frac{\left(\frac{\phi}{f}\right)^2}{(1+m)^2} = \frac{\tau \pi L}{4F^2} \left(1 - \frac{f}{l}\right)^2 \quad (5-25)$$

式中， τ 是透镜透过率； ϕ 是透镜的有效口径； f 是透镜的焦距； m 是放大倍数； F 是口径比 (f/ϕ)； l 是被测面到透镜之间的距离， L 是表示测定面的亮度。

根据此式，像面照度 E 不仅与测定面的亮度 L 成比例，而且也随透镜到被测面之间的距离 l 变化。为了预防距离 l 的变化，作为良好的构造要使入射在像面上光的立体角经常保持恒定，在图 5-53(b) 中，把光阑 B 加进去，由透镜的 F 值决定立体角 ω_1 ，由光阑 B 决定 ω_2 ，这时在测定距离内，最好是取 ω_2 比 ω_1 小。

此时，像面照度 E 是

$$E = \tau \pi L \omega_2 \tag{5-26}$$

或者像的亮度 $L' = \tau L$ 。市售亮度计的 光学系统如图 5-54 所示。 f : 200 mm, D : 采用 $\phi 60$ mm 物镜，光阑 A 为开有 椭圆孔 $\phi 35 \sim 7$ mm (短径) 的与光轴成 30° 的反射镜，通过孔的光与被反射的周围视野分开。除用孔径来变化，可以改变测定视野达到 $0.1^\circ \sim 2^\circ$ 外，还可以用近邻透镜来测定孔径直到 $\phi 0.35$ mm 时的面积的平均亮度。这种测量形式的特点，是可以从周围视场中确定出测定视野。在表 5-11 中表示出各种亮度计的一览表。

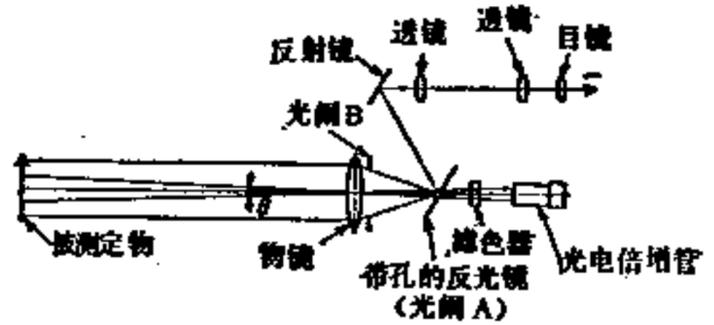


图5-54 市售透镜式亮度计实例

在测定微小面积的亮度时，达到 $\phi 0.05$ mm 也有可能的，但在测定微小面积时，亮度均匀性很差。例如测定 LED 的发光部分的微小面亮度与目视亮度感觉有差别，因此很不容易测准，所以对测光面积内亮度不均匀的微小面积的亮度测量，要非常注意。

表5-11 市售亮度计的实例

分 类	透镜式(1)	透镜式(2)	透镜式(3)	挡光筒式
视角(面积)	$0.1^\circ \sim 2^\circ$ (5档)	$2' \sim 3'$ (5档)	$0.5^\circ \sim 2^\circ$ (3档)	$\phi 48$ mm
测量范围	$0.01 \sim 4 \times 10^4$ cd/m ²	$10^{-5} \sim 10^7$ fL	$10 \sim 16000$ cd/m ²	$10 \sim 300$ fL (4档)
测量距离	1.2 m $\sim \infty$	1.2 m $\sim \infty$	1 m $\sim \infty$	紧贴着
光探测器	光电倍增管	光电倍增管	光电管	Se 光电池
测量精度	$\pm 5\%$	$\pm 4\%$	$\pm 5\%$ 以下	$\pm 5\%$ 以内
色度测量	CIE XYZ系色度	CIE XYZ系色度	没有	没有
近邻透镜	2种 $\phi 1$ mm	5种 $\phi 0.1$ mm	没有	没有
测量面积	和 $\phi 0.35$ mm	$\sim \phi 9.83$ mm	没有	没有

(2) 遮光筒式 在光探测器之前把遮光筒装上，确定入射光的立体角，可以测定出包含在这个立体角内的面平均亮度。

如图 5-55 在光探测器前面装着遮光筒，只把包含在角 θ [$\approx 2 \operatorname{tg}^{-1}(2a/D)$] 内的光投射在光探测器上。此时以角 θ' [$\approx 2 \operatorname{tg}^{-1}\{(a+b)/D\}$] 入射的光也被包含进去一些。因而在这种测定方式下，被测定面要大到充分满足角 θ' ，而且是亮度一致的完全漫射面，否则是不能测定正确的亮度值的。

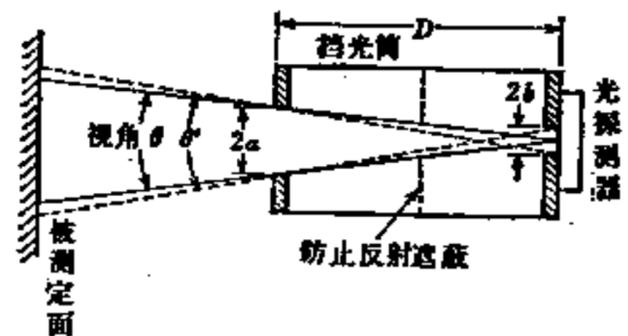


图5-55 遮光筒式亮度计的原理图

这种形式的亮度计，是经常用作电视接受像面的亮度测定。各种特性表示在表 5-11 中。

(3) 亮度分布摄像装置^[93] 把视野亮度的分布状况用摄像表示的, 有ITV式装置。举例来说, 用光导摄像机摄像, 随后把映像信号通过A-D变换, 变换成相当于4个亮度等级的脉冲信号, 通过可控电视变换成亮度分布图。在亮度分布图的黑白图像中, 正好象等高线一样把亮度面的明度区分出来, 因此好像查看地图那样就知道了亮度分布。在前面加上光谱光效率修正滤光器, 使它与目视一致, 用来得到道路照明、建筑照明等方面的设计数据。

5-6-5 透射率和反射率的测量

(1) 分类 除了按透射率、反射率测定的目的或者波长来分类外, 还可以按照照明和接收条件来分类。按波长分类有:

- 可见光透射、反射率
- 紫外或红外透射、反射率
- 全波段透射、反射率

等, 用在各特定波长域具有光谱灵敏度的颜色滤光器修正的受光器。

按照照明——接收条件来分, 有:

- 正透射(平行透射)率
- 漫射透射率
- 总透射率(正透射+漫射透射)
- 正反射(镜面反射)率
- 0°照明—45°反射 JIS I, CIE 0/45
- 45°照明—0°反射 JIS I, CIE 45/0
- 0°照明—漫反射 JIS II, CIE 0/d
- 0°照明—(包含正反射)漫反射 JIS III
- 漫射照明—0°接收漫反射 JIS IV, CIE d/0

注1: CIE 45/0, 0/45是和JIS I相同, 在JIS II和CIE 0/d时, 照明光的开口角度JIS II宽广些, 对应试验面法线的照明光倾斜度 CIE 0/d可以容许大一些。

注2: “45°/0°”条件, 是给出辐射系数 $\beta_{45/0}$ 。“0/45°”条件, 是给出辐射系数 $\beta_{0/45}$ 。“漫射/0°”条件, 是给出辐射系数 $\beta_{d/0}$ 。“0/漫射”条件, 是给出反射率 P 。

照明—接收条件, 是决定于试样的材料性质和使用的目的。试样的平面平整度对正透射率有很大的影响。

(2) 装置 在图5-56中表示出透射率或反射率测定装置的一个概况图。这种装置是用 JIS II, 在改用 JIS III时, 把试样约倾斜 7° ($\theta < 8^\circ$), 包括了正反射成分的测量。积分球、保护罩及标准白板和光谱测定时完全相同, 这一点要予以注意。

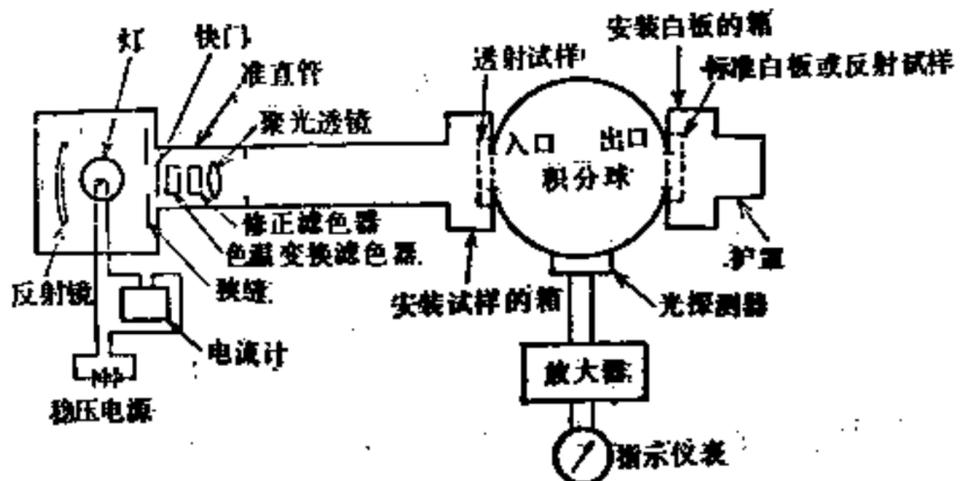


图5-56 透射率或反射率测定装置构造实例(0/d)
(JIS III时反射试件的倾斜约7°)

光电管、光电池、半导体等, 都是很好的光探测器, 但想要其光谱灵敏度符合光谱光效率, 必须用滤光器来进行修正。

(3) 测量 随目的的不同, 有表5-12所示那样的各种组合, 用试样和参照标准之间

表5-12 测定透射、反射时的光源、光探测器和修正滤光器

项 目	光 源	色温变换滤色器	光 探 测 器	修正滤光器
积分透射率 正透射(平行透射)率 积分反射率	标准 A 光源 标准 A 光源 标准 A 光源	没有 标准 C 光源用滤色器	光电管或半导体光 探测器	光谱光效率 用滤光器
紫外透射率	白炽灯	没有	光电管	紫外透射用滤光器
远紫外透射率	氢灯 汞灯	没有	远紫外用光电管	远紫外透射用滤光器
红外透射率	白炽灯	没有	半导体光探测器	红外透射用滤光器

的比较来进行透射率和反射率的测定。透射率 (τ) 或反射率 (ρ) 为

$$\tau (\%) = D_t / D_s \times 100 (\%) \quad (5-27)$$

反射时, 以 ρ 代替 τ 。

D_t 、 D_s 是分别由试样和参照试样 (标准) 产生的光电流。

正透射率 (τ_p), 是从总透射率 (τ_t) 减去杂散光修正后的漫射透射率 (τ_d) 的差。

$$\tau_p = \tau_t - \tau_d$$

$$\tau_d = [d_t - d_s (D_t / D_s)] / D_s \times 100 (\%) \quad (5-28)$$

式中, d_t 是把试样放入, 去掉白板时, 保护罩的杂散光; d_s 是把试样和白色板取走, 装上保护罩后装置的杂散光。

(4) 测量注意事项

(1) 发荧光试样, 如对装置不给特别的考虑, 则会产生误差。原理上, 在图 5-55 中改换 D_s 灯 (汞灯), 光探测器前面安装修正滤光器, 把色温度变换滤光器除掉。

(2) 在半透射试样的反射率测定时, 因为背面材料对反射率影响很大, 所以要用相同的材料来作, 或采用白色的, 或用保护罩 (暗黑的), 要根据试样的使用目的来选择。

5-6-6 测色

(1) 测色方法 通常以下列各种方法进行:

目视测色	$\left\{ \begin{array}{l} \text{与标准色样作目视比较} \\ \text{目视色度计} \end{array} \right.$
光电测色	

在这里, 不谈分光测色, 主要说明有关基本问题和刺激值直读型测色方法。

照明—接收条件

如象 (1) 所述, 在测色情况下, 是否把表面正反射成分考虑进去, 对彩度值有很大影响。在进行条件选择时, 应该考虑试样在使用时的照明—接收条件。也有这样的意见, 即一般目视情况是接近 0° 照明—漫射接收 (JIS II, CIE 0/d) 条件的。

(2) 测色仪器种类和条件的选择 透射色时, 是以分光测色最为正确, 而在反射色时, 不管是分光测色还是刺激值直读测色, 都受照明接收条件的影响。某测色装置测出试样的值, 当用别的测色装置再测定时, 大概由于条件、仪器的不同, 与前面测的色度值通常是会有差别的。因而在测色结果中, JIS 规定要说明一定条件和仪器名称等。

但是因为光电计测的重复性好，所以考虑到稳定性还是使用刺激值直读型色度计。

可是，若一般试样可以用眼睛定标，那么用 JIS 标准色卡目视比较测色也没问题。具有光谱特性的样本，试样的长期变化，制品的色管理等，若依靠这些资料仔细校正色度计，那么个人差别不大，可以达到稳定测色。而要求基本的准确度，则希望很好考虑照明接收条件进行分光测色。

(3) 刺激值直读型色度计 使光探测器的光谱灵敏度符合光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ ，直接测量 X 、 Y 、 Z ，求出光的色度 x 、 y 的装置，叫做刺激值直读型色度计。有应用于物体色和光源色的，应用于物体色的，可以根据照明灯使光探测器的灵敏度符合 C 光测色。此时，设 $P_A(\lambda)$ 、 $P_C(\lambda)$ 为 A、C 标准光的光谱分布， $\tau(\lambda) [\tau_x(\lambda), \tau_y(\lambda), \tau_z(\lambda)]$ 为 X、Y、Z 用的彩色滤光器的光谱透射率， $S(\lambda)$ 为光探测器的光谱灵敏度， $\rho(\lambda)$ 为试样的光谱反射率， $\bar{u}(\lambda) [\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)]$ 为光谱三刺激值， $k (k_n)$ 是与波长无关的常数，则

$$P_C(\lambda)\rho(\lambda)\bar{u}(\lambda) = (1/k)P_A(\lambda)\tau(\lambda)\rho(\lambda)S(\lambda) \quad (5-29)$$

对于彩色滤光器

$$\left. \begin{aligned} \tau_x(\lambda) &= k_1 P_C(\lambda)\bar{x}(\lambda)/[P_A(\lambda)S(\lambda)] \\ \tau_y(\lambda) &= k_2 P_C(\lambda)\bar{y}(\lambda)/[P_A(\lambda)S(\lambda)] \\ \tau_z(\lambda) &= k_3 P_C(\lambda)\bar{z}(\lambda)/[P_A(\lambda)S(\lambda)] \end{aligned} \right\} \quad (5-30)$$

上式叫做路特条件。

光源测色的路特条件为：

$$\left. \begin{aligned} \tau'_x(\lambda) &= k_4 \bar{x}(\lambda)/S(\lambda) \\ \tau'_y(\lambda) &= k_5 \bar{y}(\lambda)/S(\lambda) \\ \tau'_z(\lambda) &= k_6 \bar{z}(\lambda)/S(\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (5-31)$$

前者若用 A 标准光照明试样，由于测色可以用 C 标准光，称为 C 光路特滤光器，后者若用 A 光照明，则 A 光测色，把光源的光进行测色，可以得到光源的色度，也叫做光源路特滤光器。

市售的光电色度计，是用几种彩色滤光器叠起来的减色型的路特滤光器，因为不能正确满足路特条件，所以不能正确求出色度。但是这种光电测定仪的光探测器和放大系统要考虑了 5-6-1 节中所提出的问题则可获得高精度装置，在比较测定中提高可靠性，用于质量管理中。

准确测定时，希望用与被测试样光谱特性接近的校正标准板（光谱测色值）来校正装置。

(4) 光泽 在物体的反射色中，光泽的影响很大。和在 5-6-5 节中的照明—接收条件的问题一样，光泽也是涉及到正反射成分的大小的问题，用正反射光和漫射光的混合光的配光特性来评价光泽。总之，光泽在非常多的试样反射色的测色中，根据照明接收条件的不同可能造成非常大的测色值的差异。也由于这个原因，在测色值中必须注明一定的照明—接收条件。

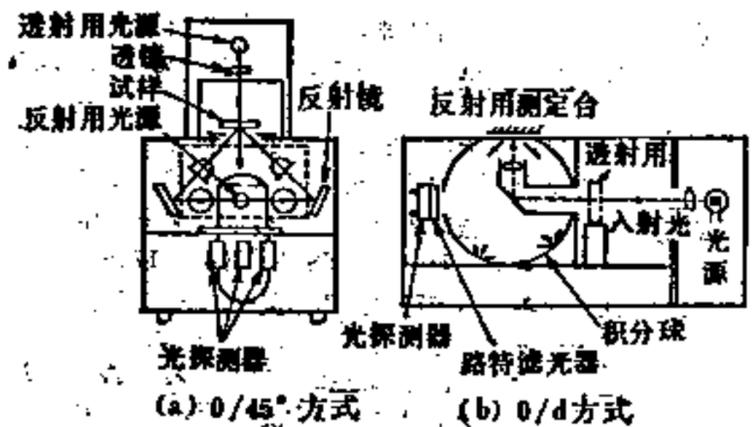


图5-57 市售色度计的光学系统示例

光泽的测定, 最好使用满足 JIS Z 8741 的规定的色泽计。

(5) 实用色度计 市售光电色度计如图 5-57 所示, 照明—接收条件有 $0^\circ/45^\circ$ (JIS I) 和 0° /漫射 (JIS II) 二种, 最好按照经常测定试样的光泽条件等进行选择。电气系统原来用模拟计算模拟表示, 正在向模拟计算数字表示的方向转变, 也把 A-D 变换器产生的数值信号, 传达给电子台式计算机, 进行各种计算实现数字表示的装置, 和用 LSI 计算机计算, 数字表示装置也正在发展。内装微型计算机的色度计也已出现, 在近几年内使所有色度计都内装微型计算机是有可能的。

计算内容, 从仅仅计算色度 x 、 y 、 Y 到计算 u 、 v 、 $U^*V^*W^*$, ΔE 甚至 L 、 a 、 b 的色度计, 已达到成品化的程度了。

又有把路特滤光器装在亮度计中, 就成为市售的不接触发光面 (彩色电视面、光源、反射面等) 的测色仪器 (表 5-11)。

参 考 文 献

- (1) 国策照明用語集: CIE 刊行物 No. 17 日本語訳, 日本照明委員会 (1970)
- (2) 光の測定の原理: CIE 刊行物 No. 18 日本語訳, 日本照明委員会 (1970)
- (3) 吉江 清: 測光単位の沿革と現状, 電気試験所彙報 15-8 (昭 26) 555~565
- (4) 吉江 清: 測光単位の統一に関する国際協力および国内における推進, 電気試験所記念論文集 (昭 38) 77~85
- (5) H. Katsuyama & H. Kikuchi: An Experimental Determination of the Maximum Spectral Luminous Efficacy of Radiation, Metrologia, 11 (1975) 165~168
- (6) 鈴木 守: 紫外・可視・近赤外領域における分光放射パワー標準, 電気試験所調査報告 167 (昭 45)
- (7) 鈴木 南条, 羽生, 長坂, 上田, 漢: 紫外・可視・近赤外域における分光放射輝度・照度標準の確立, 電子技術総合研究所研究報告, 742 (昭 48)
- (8) 佐土根範次: 熱放射標準の確立に関する研究, 電気試験所研究報告, 565 (昭 33)
- (9) 鈴木, 羽生, 長坂, 白石: クレフト形水銀ランプの放射測定, 照学誌, 58-3 (昭 49) 97~102
- (10) 河本謙太郎, 白石啓文: 国産 Kreft 形紫外標準灯, 「実用紫外線測定」テキスト, 照明学会 (昭 46) 79~87
- (11) 渡会吉昭: 紫外放射標準としての殺菌ランプの特性「実用紫外線測定」テキスト, 照明学会 (昭 46) 20~78
- (12) 岡垣 博, 岩崎敏勝: 分光用光源, 分光研究, 22-1 (1973) 29~32
- (13) 中川清夫, 大谷文雄: 短紫外分光放射照度標準光源としての重水素ランプ, 照学誌, 56-12 (昭 47) 678~681
- (14) 中川清夫, 大谷文雄: 波長 200 nm までの分光放射照度測定, 照学誌, 59-9 (昭 49) 462~467
- (15) 高田誠二: 標準放射としてのプラズマと電子シンクロトロン, 照学誌, 58-4 (昭 49) 172~178
- (16) 大場信英, 八百陸文, 西原英一, 平野正浩, 伊原英雄, 鈴木 守, 香原冬彦, 小貫英雄, 前田浩五郎, 崎原克彦, 平田正徳, 清水 隆, 森 一夫, 山川達也: シンクロトロン軌道放射とその利用, 電子技術総合研究所調査報告, 191 (昭 51)
- (17) D. Hahn & U. Schley: Zur Geschichte und Problematik der photometrischen Grundgrößen, Lichttechnik, 13-2 (1961) 58~63
- (18) 三嶋泰雄: 標準電球 (ランプ) とその取り扱い, 照学誌, 58-4 (昭 49) 152~158
- (19) 放電ランプの光束測定と常用標準としての校正法, CIE 刊行物 No. 25 (1973) (日本語訳) 日本照明委員会
- (20) 菊地久吉, 三嶋泰雄, 勝山 元, 斎藤一朗: ハロゲン電球による分布温度 2856K の光度標準, 照学誌, 59-8 (昭 50) 416~422
- (21) 菊地久吉, 勝山 元, 三嶋泰雄, 斎藤一朗: ハロゲン電球の経年変化, 電子技術総合研究所彙報, 40-7 (昭 51) 626~628
- (22) 三宅清司: 光電素子とその応用, 朝倉書店 (昭 41)
- (23) 才治 勉, 渡辺賢亮: 半導体受光器, 照学誌, 58-11 (昭 49) 605~610
- (24) 香取寛二: PIN 型ホト・ダイオードの直線性, 照学誌, 58-12 (昭 47) 673~677
- (25) 大谷文雄, 中川清夫, 向後義彦, 石橋正博, 田中秀夫, 鈴木誠次: Sb-Ca 真空光電管, PIN 形 Si ホトダイオードの高感特性, 照学誌, 58-4 (昭 50) 167~171
- (26) P. G. Witherell & M. E. Faulhaber: The Silicon Solar Cell as a Photometric Detector, Appl. Optics, 9-1 (1970) 73~78
- (27) 戸塚博美: 光電管, 光電子増倍管とその使い方, 照学誌, 58-11 (昭 49) 598~604
- (28) W. Budde: Ageing of S-10 Photocathodes Appl. Optics, 12-1 (1973) 2108~2114
- (29) 滝沢 清: 光電管, 光電子増倍管の回路設計 (1) (2), 電子技術, 9-5 (昭 42) 108~112
- (30) 滝沢 清: 光電管, 光電子増倍管の回路設計 (2), 電子技術, 9-6 (昭 43) 60~64
- (31) 伊藤和喜: 熱形検出器, 照学誌, 58-11 (昭 49) 589~597
- (32) 伊藤和喜: 熱形放射検出器, 電子技術総合研究所調査報告, 177 (昭 48)
- (33) M. J. E. Golay: A Pneumatic Infra-Red Detector, Review of Scientific Instrument, 18-5 (1947) 347~352

- (34) 石井弘允: 測光器用電子回路(1), 照学誌, 58-11 (昭49) 620~626
- (35) 石井弘允: 測光器用電子回路(2), 照学誌, 58-4 (昭50) 172~173
- (36) 竹内延夫: ロックインアンプとその応用, 計測と制御, 9-7 (昭45) 511~518
- (37) 雨条 基: 光電子計数法とその応用, 電気試験所調査報告, 162 (昭43)
- (38) 浅井孝夫, 杉山春夫: 光学フィルタ, 照学誌, 58-11 (昭49) 611~619
- (39) W.R. Venable, Jr et al: Optical properties of pressed Halon Coatings, NRS Information Sheet 6, (1976) 1~5
- (40) M. Suzuki & N. Ooba: An International Intercomparison of Spectral Irradiance Scales, Metrologia 12, (1976) 123~128
- (41) 大場信英: 放射線の絶対測定, 電気試験所研究報告 675 (昭42)
- (42) 三嶋泰雄: 測光の工学標準に関する研究, 電気試験所研究報告, 694 (昭44)
- (43) 鈴木 守: 精密測光法の研究, 電気試験所研究報告 678 (昭42)
- (44) J.W.T. Walsh: Photometry, Constable & Company LTD (1958)
- (45) 渡会吉昭, 中川靖夫, 三嶋泰雄, 大谷文雄: タングステンコイル電球の相対分光分布, 照学誌, 57-10 (昭48) 632~641
- (46) JIS 輝度測定方法: JIS C 7614-1970
- (47) 室井徳雄: 輝度 (Luminance) と Helios について, 照学誌, 50-2 (昭41) 70~74
- (48) D.E. Sencer & R.E. Levin: Some Characteristics of the Pritchard Photometer, Appl. Optics, 8-10 (1969) 2137~2141
- (49) 渡会吉昭: 分光放射測定の一一般化に関する基礎的原理, 照学誌, 61-7 (昭52) 376~387
- (50) 渡会吉昭: 光源開発支援システムとしての分光放射測定, National tech. Rep., 23-4 (昭52) 636~648
- (51) W.R. Blevin: Corrections in Optical Pyrometry and Photometry for the Refractive Index of Air, Metrologia, 8-4 (1972) 146~147
- (52) 中村 彬: 物理基礎定数の調整, 応物, 44-6 (昭50) 645~655
- (53) 鈴木 守ほか: 紫外・可視・近赤外線における分光放射輝度・照度標準の確立, 電子技術総合研究所研究報告, 742 (昭48)
- (54) 大場信英ほか: シンクロトロン軌道放射とその利用, 電子技術総合研究所調査報告, 191 (昭51)
- (55) 高田誠二: 標準放射源としてのプラズマと電子シンクロトロン, 照学誌, 58-4 (昭49) 172~178
- (56) D.L. Ederer et al.: The Use of Synchrotron Radiation as an Absolute Source of VUV Radiation, J. Res. Nat. Bur. Stand. A 79 A-6 (1975) 761~774
- (57) H. Kaase: Untersuchungen über die Eignung des PTB-Synchrotrons als Strahlungsnormal und Realisierung einer Skala für Bestrahlungsgstärke im UV, Optik, 46-2 (1976) 149~160
- (58) 西館誠ほか: SOR 可視・紫外光の絶対測定, 第23回応用物理学関係連合講演会, 27a-A-1 (昭51)
- (59) D. Einfeld et al.: Comparison of synchrotron radiation and hydrogen continuum radiation in the near VUV by means of a deuterium transfer standard, Zeitschrift für Naturforschung, A 31 A-9 (1976) 1131~1132
- (60) M. Suzuki, N. Ooba: An International Intercomparison of Spectral Irradiance Scales, Metrologia, 12-3 (1976) 123~128
- (61) 渡会吉昭ほか: タングステンコイル電球の相対分光分布, 照学誌, 57-10 (昭48) 632~641
- (62) 東 勇: 紫外線測定専門委員会報告, 照学誌, 57-4 (昭48) 196~202
- (63) 栗岡 豊ほか: キセノン標準白色光源の分光分布の確立, 照学誌, 58-2 (昭49) 58~67
- (64) 中川靖夫, 大谷文雄: 短紫外分光放射照度基準光源としての重水素ランプ, 照学誌, 58-12 (昭47) 678~681
- (65) 長坂武彦ほか: 重水素ランプの分光放射測定, 第17回照明学会東京支部大会, 25 (昭51)
- (66) 中川靖夫, 大谷文雄: 波長200nmまでの分光放射照度測定, 照学誌, 59-9 (昭50) 462~467
- (67) 鈴木 守ほか: グレフト形水銀ランプの放射測定, 照学誌, 58-3 (昭49) 97~102
- (68) 鈴木 守ほか: シリコネット空洞放射体を用いた赤外線標準放射源, 照明学会放射の応用研究会資料 AR-76-5 (昭51)
- (69) 吉永 弘編: 応用分光学ハンドブック, 朝倉書店 (昭48)
- (70) 南 茂夫: 放射測定機器としての分光器, 照学誌, 61-7 (昭52) 358~366
- (71) 中川靖夫, 大谷文雄: 測光用としてのプリズム, 回折格子モノクロメータの性能比較, 第4回照明学会全国大会 68 (昭46)
- (72) 嶋村輝郎: 分光学のための基礎技術, 第1講モノクロメータ, 分光研究, 26-1 (昭52) 29~45
- (73) M.C. Hutley: Interference (holographic) diffraction gratings, J. Phys. E: Scientific Instruments, 9-7 (1976) 513~520
- (74) G.R. Harrison: M.I.T. Wavelength Tables, The M.I.T. Press 1969ed. (1969)
- (75) G. R. Spears: Spectroradiometry Photometry, J. Illum. Engng. Soc., 3-3 (1974) 229~233
- (76) F. Grum, M. Saltzman: New white standard of reflectance, CIE 18th Session P-75-77 (1975)
- (77) 三嶋泰雄, 斎藤一朗: ハロンプレートの分光反射率, 第10回照明学会全国大会 70 (昭52)
- (78) R.D. Saunders, W.R. Ott: Spectral Irradiance Measurements: effect of uv-produced-fluorescence in integrating spheres, Appl. Optics, 15-4 (1976) 827~830
- (79) B.E. Wood et al.: Hemi-ellipsoidal mirror infrared reflectometer: development and operation, Appl. Optics, 15-4 (1976) 940~950
- (80) 河合敏昭, 星野安司: 半導体赤外線検出器, 照明学会放射の応用研究会資料, AR-76-6 (昭51)
- (81) 中川靖夫, 大谷文雄: メッシュスクリーンによる減光フィルタ, 第9回照明学会全国大会 75 (昭51)
- (82) 中川靖夫: 線スペクトルを含む放射源の分光放射測定と評価, 照学誌, 61-7 (昭52) 388~395
- (83) 中川靖夫ほか: 輝線スペクトル放射の精密測定の一方法, 照学誌, 58-5 (昭50) 241~244
- (84) JIS Z 8724 光源色の測定方法
- (85) JIS Z 8722 2度視野 XYZ系による物体色の測定方法

- JIS Z 8727: 10度視野 XYZ系による物体色の測定方法
- (86) JIS Z 8720: 測色用の標準の光および標準光源
- (87) "Colorimetry", Publication CIE No.15 (E-1.3.1) 1971
- (88) 馬場慶郎ほか: けい光色の測定(1) — 有彩昼光けい光色の分光測色 —, 照学誌, 53-4 (昭50) 150~158
- (89) F. Hartig 及 H. J. Helwig: Ein cosigerechtes Photometer, Lichttechnik, 7-5 (1955) 181~182
- (90) 松葉敏夫: 高性能照度計の開発, National tech. Rep., 17-3 (昭46) 319~325
- (91) 森 礼於, 杉山春夫, 石田義雄, 渡辺 彰: 計量法に適合した照度計, 第5回照明学会全国大会 77 (昭47)
- (92) 石田義雄, 渡辺 彰: 輝度計校正および輝度測定, 第6回産業計測標準委員会光熱部会予稿
- (93) 藤井克人, 高橋貞雄, 佐々木和治: ITV式輝度分布撮像装置とその応用例, 照学誌, 54-9 (昭45) 513~520

第 6 章

光 源

6-1 白 炽 灯

6-1-1 白炽灯的发展史〔1〕

白炽灯的历史，从 1802 年 Humphry Davy 用实验室显示白炽现象开始，在 1820~1840 年，De la Rue 首先采用白金线圈作为白炽体，试作了白炽灯泡，向实用化迈出了第一步。而后在十九世纪五十年代，德国的 Heinrich Goebel 将竹的纤维炭化制成发光体，制成了可供实用的炭素灯泡。

在 1878 年，Joseph W. Swan 利用那时发明的水银真空泵，制成了封有细长炭素纤维条的真空炭素灯泡。后来，采用硫酸处理过的棉丝代替炭素纤维条作灯丝，于 1880 年制成性能较好的炭素灯泡。爱迪生于 1877 年着手研究灯泡，1879 年春制成了用白金线圈作发光体的灯泡。爱迪生还和 Swan 同样利用水银真空泵，试制了用炭化棉丝作灯丝的真空炭素灯泡。这种灯泡，能够点燃 40 小时，从而进入实用化阶段。此后，爱迪生从 1880 年制成了碳化竹纤维的灯泡后，继续研究了 9 年。

另外，Swan 也在继续改良灯丝，于 1883 年用酸溶液处理纤维素，创造了细孔喷丝法 (Squinting Process)。

作为金属灯丝灯泡，是在 1897 年 Walter Nernst 发明了以氧化锆为主体，混合 15% 的氧化钇作为发光体的能斯特灯泡 (氧化钍白炽灯泡)。后来发明了使用钨、钽、钨丝的灯泡。

1906 年，Alexander Just 和 Franz Hanamann 发明了使用拉制钨丝制成的钨丝灯泡。但是，将钨拉制成细丝是很困难的，GE 公司的 Irving Langmuir 发现了使用螺旋灯丝，在玻壳内充入氮气可以抑制钨的蒸发，并于 1913 年，公布了充气灯的发明。最初充入氮气，而后发展到充入氩气。充入气体虽能减轻钨的蒸发，但在点灯中，由于充入气体的对流作用，使灯丝的温度下降，灯的光效降低。

1912 年，三浦顺一为了使灯丝和气体的接触面尽量减小，发明了由单螺旋灯丝发展而成的双螺旋灯丝的灯泡，使灯的光效更加提高了一步。

但这样一来，由于灯的亮度提高，产生了刺眼的眩光。为了减弱眩光，不破桔三和 Marvin Pipkin 于 1925 年分别研制成了内磨砂灯泡。1935 年，法国的 A. Claude 发表了充氩气和氙气的灯泡的发明。

后来，由于白炽灯具有许多的特长，实用范围获得了扩大。灯的光效随着灯丝温度提高而提高。由此而产生的问题是：在点燃过程中，蒸发的钨附着在玻壳内壁上，结果造成光效降低，灯丝寿命也随之缩短。因此，灯的光效和寿命的提高和延长是受到一定的限制的。1959 年，GE 公司的 E. G. Zubler，在石英玻璃管内装进钨灯丝，充进惰性气体和微量的碘 (I₂)，制成双端引出型碘钨灯，开始在实际中得到了使用。这种碘钨灯由于卤钨循环作用，

而能防止管壁发黑，使白炽灯的效率显著提高，改进了灯的工作特性。继碘钨灯之后，又在灯管内充进其它卤素物质，如溴 (Br₂)、氯 (Cl₂) 和它们的化合物等，发展成为卤钨灯。

6-1-2 白炽灯的结构和原理

(1) 普通照明白炽灯 白炽灯是将灯丝加热到白炽的温度，利用热辐射（温度辐射）而辐射出可见光的光源。一般照明用灯的结构如图 6-1 所示，系由灯丝、玻壳、灯头等组成。灯丝通常有单螺旋和双螺旋二种，经过导线将钨丝封入玻壳内。导线从灯头导入电流给灯丝，同时又担负支撑灯丝的作用。

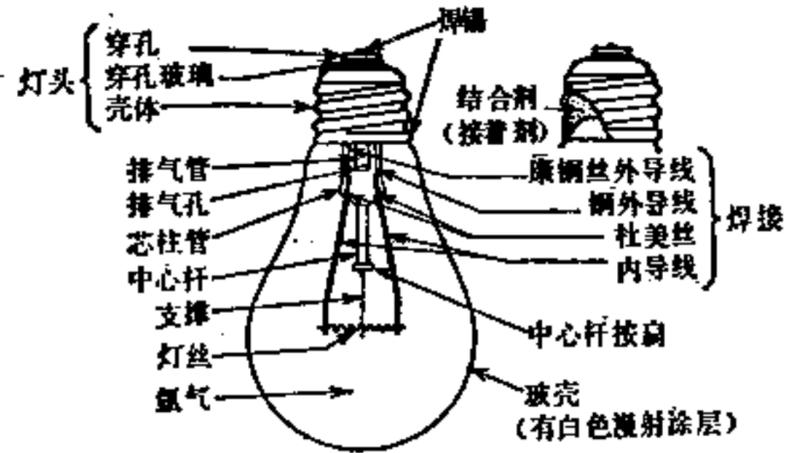


图6-1 普通照明白炽灯的结构和各部件名称

图 6-1 所示的内导线，通常使用线径适当的镀镍铜丝或镀镍铁丝。在芯柱的封接部分，使用杜美丝，外导线主要使用铜丝。普通照明白炽灯有二根外导线，其中有一根使用康铜丝，作为保险丝用。玻壳用钠系玻璃 (soda-lime silicate glass)，由吹泡机吹制成型。由于玻壳透明，灯丝亮度高，为了

使灯光柔和不刺眼，在玻壳的内表面，用氢氟酸进行化学处理，即内磨砂。最近还在玻壳的内表面涂以白色的无机粉末，以提高光的漫射性能，使灯光柔和。充填气体通常为氩气 (Ar) 和氮气 (N₂)，工作压力约为 760 毛 (1.01 × 10⁵ 巴)。氩气和氮气的比例，由额定电压和灯丝温度来决定，额定电压为 100V 的普通照明白炽灯，使用 86~98% 的氩气。如充填比氩原子量大、热导率低的氪 (Kr)，则抑制钨的蒸发速率的作用要比氩气更大。

(2) 卤钨灯 卤钨灯是在充填的惰性气体中另加有微量的卤素物质，利用充填气体中的卤素物质的化学反应的一种钨丝灯。卤素物质的作用很早以前就被人们所知，但只有当石英玻璃应用到灯泡中时，卤素灯才进入了实用化的阶段。在叙述白炽灯的发展史时提到，是 Zubler 首先在石英玻璃内充入碘，迈出了卤素灯的第一步。后来，又向使用碘以外的其它卤化物方面发展，使卤钨灯的性能获得了进一步的提高。

(a) 卤钨再生循环

在白炽灯点燃时，钨原子从灯丝表面蒸发出来，向管壁方向扩散，附着在灯管内壁上，而使管壁发黑。在卤钨灯中，蒸发出来的大部分钨和充填的卤素原子或分子，在管壁附近反应，生成卤化钨。卤化钨的蒸汽压较高，

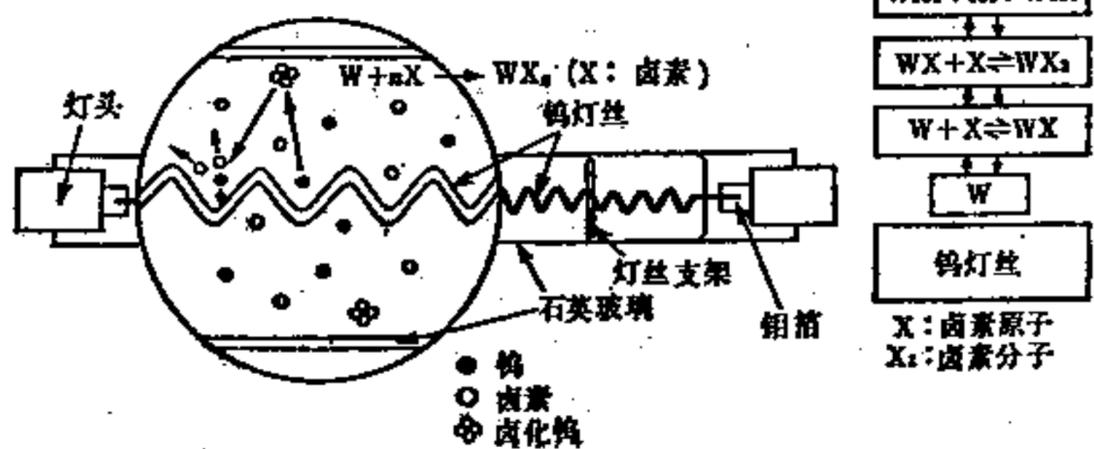
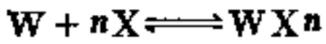
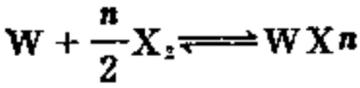


图6-2 卤钨灯的结构和卤素循环模型

因为管内壁具有相当的温度可使卤化钨不能附着在灯管内壁上，故能防止管壁发黑。卤化钨通过浓度扩散或对流，从管壁附近向灯丝方向扩散，部分卤化钨在灯丝的高温区被分解。分解出来的卤素，又和蒸发出来的钨反应，分解出来的钨则吸附在灯丝表面。把这样的循环称为卤钨再生循环，它的模型如图 6-2 所示。在一定的条件下，卤素和钨的反应



W: 钨原子



X: 卤素原子

X₂: 卤素分子

达到平衡状态, 管内壁就不会黑化, 当任一平衡条件 (管壁温度、灯丝温度、充填的卤素浓度) 被破坏了, 或者卤素和灯内的某一金属零部件产生反应, 管壁就会黑化。但是, 如果使管内壁保持一定的温度, 在此温度下, 生成的钨的卤化物不能附着在管壁上, 同时, 在管壁附近, 钨的卤化物不会被热分解, 管壁就不会发黑。一般的卤钨灯, 管壁温度设计在 250°C 以上。由于碘的化学活泼性弱, 不会腐蚀灯丝、支架等温度较低的部分, 所以, 在长寿命、低光效的卤素灯

表6-1 管壁负荷与充填卤化物举例⁽²⁾

管壁负荷 (W/cm ²)	寿命 (h)	卤化物
15~25	2000	I ₂ 或HI, BBr ₃
15~25	500~2000	CH ₃ Br, CH ₂ Br ₂ , CHBr ₃ , ICl ₃ , BBr ₃
15~30	25~500	CH ₂ Br ₂ , CHBr ₃ , HBr (I ₂ 除外) (PNBr ₂) _n
30~60	5~500	CH ₂ Br ₂ , CH ₃ Br, CHBr ₃ , CHCl ₃ , CH ₂ Cl ₂ , HBr, BBr ₃
60~120	1~100	Br ₂ , Cl ₂ , CHBr ₃ (O ₂ 添加)

中, 常采用碘作为充填的卤素物质。在高光效的卤素灯中, 常充入活泼性强的溴、氯或它们的化合物 HX、CH_nX_n、BX_n 等。根据设计寿命和灯丝的温度, 选择充填的卤素物质, 表 6-1 举例表示管壁负荷与卤化物的关系。

(b) 卤钨灯的结构 由于管壁温度必须达到使钨的卤化物不会附着在管壁上那样高的温度, 所以, 卤钨灯的玻壳比原来的白炽灯的玻壳小, 管壁负荷高, 故此使用耐高温的石英玻璃或高硅氧玻璃作玻壳。近来, 也有的卤钨灯使用硬质玻璃代替石英玻璃。和石英玻璃封接部分的金属导线, 使用代刃边的厚度为 20~30μm 的非常薄的钼箔, 与石英玻璃压封。卤钨灯的一般结构如图 6-2 所示。在石英玻璃内封入的金属, 采用不妨碍钨和卤素反应的高纯钨或钼。在灯内, 充入微量的卤素物质和 700~3000 毛 (9.33 × 10⁴~4.0 × 10⁵ 巴) 的惰性气体。在小型的温度较高的灯中, 工作压力约为充气压力 (冷压力) 的 1.3~7.0 倍。

(3) 钨丝的性质 灯丝的性质对于白炽灯的特性具有重要的意义, 为了提高光效, 灯丝的工作温度必须非常高。作为灯丝材料钨的温度特性, 具有特别重要的意义。钨的温度标志通常采用亮度温度、真实温度和颜色温度。

(a) 温度标志

(1) 亮度温度 关于波长 λ 的辐射, 当温度为 T 的物体的亮度与温度为 T_λ 的黑体亮度相等时, 称 T_λ 为物体的亮度温度。1948 年国际上规定金的熔点为 1336.15 K, 根据维恩公式, C₂ = 1438cm·度, 可用下式定标:

$$\frac{1}{T_{\lambda}} = \frac{1}{1336.15} - \frac{\lambda \lg(J/J_0)}{6252}$$

式中, J/J₀ 是波长为 λ 时, 钨的法线光谱辐射强度, 和在金的熔点下黑体的光谱辐射强度之比; T_λ 是波长为 λ 时的亮度温度 (绝对温度), 测 λ 通常用红玻璃滤光片, 它的实际波长为 0.660~0.665μm。

(2) 真实温度 用光谱辐射系数,按下式由亮度温度计算:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{s\lambda}} + \frac{\lambda \lg e_{\lambda}}{6252}$$

式中, T 为真实温度 (K); $T_{s\lambda}$ 为亮度温度 (K); λ 为波长 (μm); e_{λ} 为光谱辐射系数。

(3) 颜色温度 温度为 T 的物体辐射出的光的颜色, 和黑体在温度为 T_c 时辐射出的光的颜色相同时, 则黑体温度 T_c 称为该物体这时的颜色温度, 简称色温。物体各波长的可见光, 可使用光度计, 使物体视感色和黑体色相一致的结果来决定其色温。另外, 还可以用 $0.467\mu\text{m}$ 和 $0.665\mu\text{m}$ 的亮度比来对照黑体色温。色温 T_c 和亮度温度 $T_{s\lambda}$ 之间具有以下关系:

$$\frac{1}{T_c} = \frac{1}{T_{s\lambda}} - \frac{\lambda \lg e_c}{6252}$$

式中, λ 为波长 (μm), e_c 为以调色辐射系数的物体亮度及其与具有不同颜色温度的黑体的亮度比。

表 6-2 给出钨的真实温度、亮度温度、颜色温度和调色辐射系数值。

表6-2 钨的真实温度、亮度温度、颜色温度和调色辐射系数

真实温度 [K]	亮度温度 [K] (0.665 μm)	颜色温度 [K]	调色辐射系数 e_c	真实温度 (K)	亮度温度 (K) (0.665 μm)	颜色温度 (K)	调色辐射系数 e_c
1400	1330.8	1414.5		2500	2275.0	2557.4	0.3440
1500	1420.2	1517.0		2600	2356.3	2663.3	0.3418
1600	1510.1	1619.7		2700	2436.8	2769.5	0.3398
1700	1597.1	1722.7		2800	2516.6	2876.2	0.3375
1800	1684.6	1826.0		2900	2595.6	2984.0	
1900	1771.2	1929.6		3000	2673.9	3093.0	
2000	1857.0	2033.4	0.3531	3100	2751.4	3202.0	
2100	1942.1	2135.7	0.3516	3200	2828.1	3311.0	
2200	2026.5	2242.0	0.3498	3300	2904.1	3420.0	
2300	2110.1	2346.8	0.3479	3400	2979.4	3531.0	
2400	2192.9	2451.9	0.3460				

(1948年国际温度刻度 $C_2 = 1438\text{cm}\cdot\text{度}$)

表6-3 钨在各种温度下的光效和蒸发速度^[3]

温 度 T (K)	光 效 (lm/W)	蒸 发 速 度 (g/cm ² /s)	温 度 T (K)	光 效 (lm/W)	蒸 发 速 度 (g/cm ² /s)
1600	0.395		2600	14.34	8.79×10^{-8}
1700	0.724		2700	17.60	3.17×10^{-8}
1800	1.19		2800	20.53	1.12×10^{-7}
1900	1.94		2900	23.64	3.45×10^{-7}
2000	2.84	1.75×10^{-13}	3000	27.25	9.69×10^{-7}
2100	4.08	1.58×10^{-12}	3100	30.95	2.66×10^{-6}
2200	5.52	1.25×10^{-11}	3200	34.70	6.67×10^{-6}
2300	7.24	7.82×10^{-11}	3300	38.90	1.60×10^{-5}
2400	9.39	4.36×10^{-10}	3400	43.20	3.55×10^{-5}
2500	11.72	2.03×10^{-9}	3655*	53.10	2.28×10^{-4}

* 熔点

(b) 光效 表6-3表示钨在各种温度下的光效,表6-4表示黑体在各种温度下的光效。与黑体相比,钨具有更高的光效,具有选择辐射特性。正如图6-3所示的光谱分布比较,给予相同的可见区内的辐射量仅为黑体的76%。以上是设想所有输入功率都转变为辐射能量的理想状况,实际上,在灯内,不可能所有输入功率都转变为辐射能量,充填气体、引线、支架、玻璃、灯头等,都要消耗一部分功率,因而灯的光效必然要相应降低。

表6-4 黑体的辐射射度和光效⁽⁴⁾

温度 (K)	辐射射度 (W/cm ²)	光效 (lm/W)
1000	5.774	
1200	11.97	
1400	22.18	
1600	37.84	
1800	60.61	
2000	92.39	1.512
2200	135.3	3.183
2400	191.6	5.768
2600	263.9	9.331
2800	354.9	13.82
3000	467.7	19.10
3200	605.5	24.98
4000	1478.0	50.09

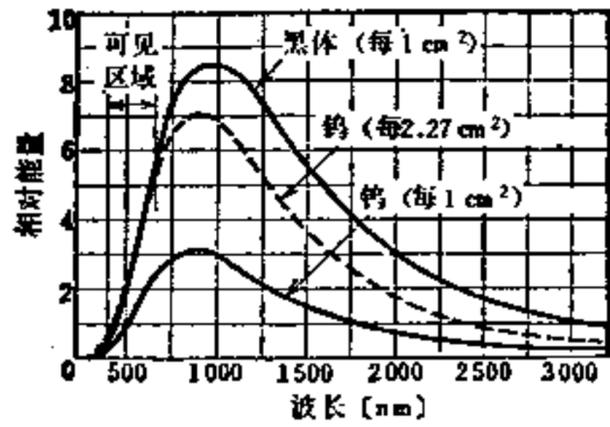


图6-3 在3000K时钨和黑体的光谱分布比较

(温度刻度金的熔点1336K, $C_2 = 1432 \text{cm} \cdot \text{度}$)

(4) 白炽灯的光谱辐照度 表6-5表示普灯100W和卤钨灯200W的光谱辐照度。

(5) 灯头 图6-4表示一般灯头的形状。灯头的种类是以表示形状的符号和表示直径标准值的数字(mm)来表示。

表6-5 白炽灯的光谱辐照度

波长 (nm)	一般照明用① 100W	卤钨灯② 200W	波长 (nm)	一般照明用① 100W	卤钨灯② 200W
350	0.030	0.242	700	1.31	5.72
400	0.098	0.647	750	1.47	6.32
450	0.238	1.26	800	1.60	6.69
500	0.435	2.04	850	1.70	—
550	0.660	2.96	900	1.75	6.94
600	0.89	3.94	950	1.80	—
650	1.12	4.91	1000	1.81	6.73

① 在距灯1m处的1cm²的面积上,每5nm长的入射波的辐射通量(μW)⁽⁵⁾。

② 灯丝温度为3000K时,在距灯丝43cm处的1cm²的面积上,每1nm长的入射波的辐射通量(μW)⁽⁶⁾。

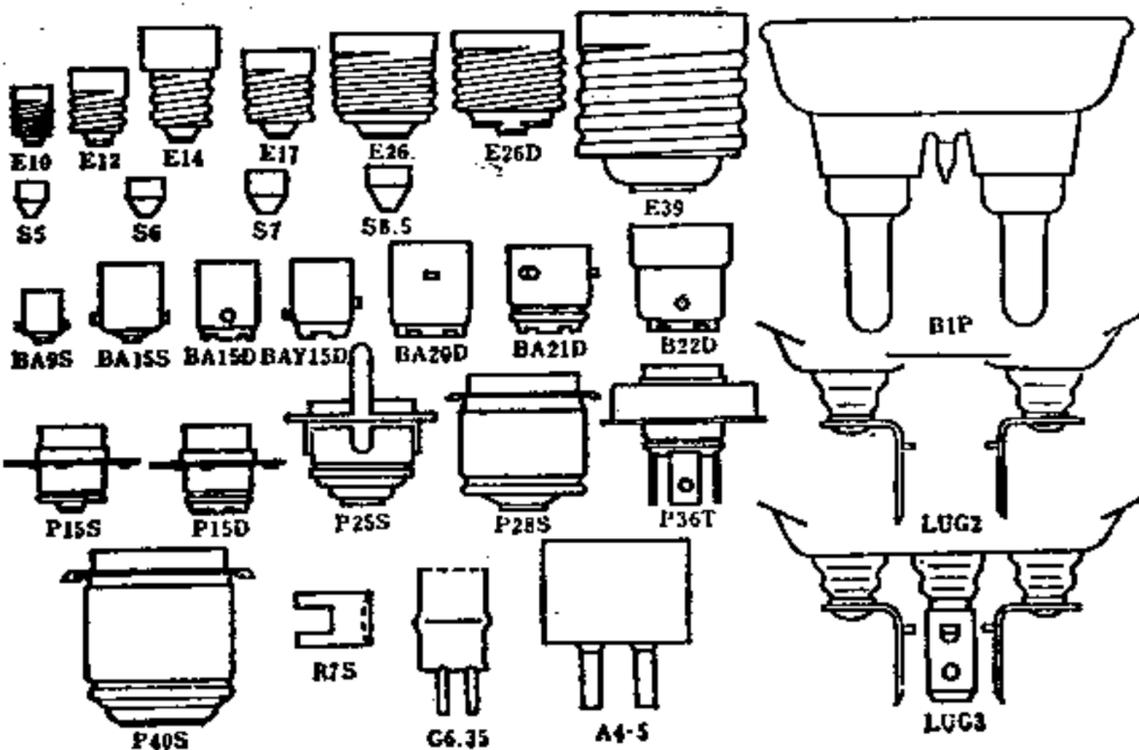


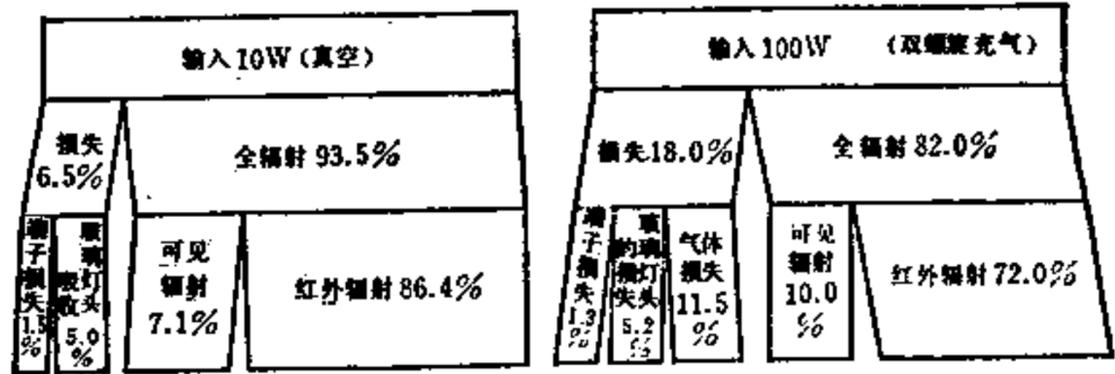
图6-4 灯头的种类和符号

(E, 螺口; BA, 卡口; P, 定焦式)

6-1-3 白炽灯的各种特性

(1) 能量特性 实际上, 灯的总功率不可能全部转变成辐射能量, 其中一部分被玻璃和灯头吸收, 另外, 由于充填气体和导线的热传导, 也会降低辐射能量。表 6-6 表示相对于普通照明灯功率的辐射能量、热损失的各种要素。

表6-6 相对于普通照明灯功率的辐射能量、热损失的各种要素



(2) 电压特性 将施加给灯的电压, 从额定电压开始变化, 灯丝的温度也随之变化, 电流、功率、光通量、光效、寿命也对应于电压的变化, 而呈指数函数的变化。由于灯的种类、形状、灯丝的形状等各有不同, 所以通常将以上这些变化用下面的公式表示, 将它们各自的指数称为特性指数。

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{F_0}{F}\right)^a = \left(\frac{E_0}{E}\right)^b = \left(\frac{V_0}{V}\right)^d = \left(\frac{A_0}{A}\right)^u$$

$$\frac{F}{F_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^k = \left(\frac{E}{E_0}\right)^h = \left(\frac{W}{W_0}\right)^s = \left(\frac{A}{A_0}\right)^y = \left(\frac{R}{R_0}\right)^z$$

$$\frac{E_0}{E} = \left(\frac{F_0}{F}\right)^f = \left(\frac{V_0}{V}\right)^g = \left(\frac{A_0}{A}\right)^j$$

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^t \quad \frac{W}{W_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n$$

式中, L_0 、 L : 寿命(h); F_0 、 F : 光通量(lm); E_0 、 E : 光效(lm/W); V_0 、 V : 电压(V); A_0 、 A : 电流(A); W_0 、 W : 功率(W); R_0 、 R : 电阻(Ω)。

表 6-7 表示真空灯泡 (10 lm/W) 和充气灯泡 (16 lm/W) 的各特性指数。图 6-5 表示充气灯泡的电压特性。

表6-7 白炽灯的特性指数

	a	b	d	u	k	h	s
充 气 灯	3.86	7.1	13.1	24.1	1.84	3.38	2.19
真 空 灯	3.85	7.0	13.5	23.3	1.82	3.51	2.22
	y	z	t	n	f	g	j
充 气 灯	6.25	7.36	0.541	1.54	0.544	1.84	3.40
真 空 灯	6.05	8.36	0.580	1.58	0.550	1.93	3.33

(3) 工作特性 工作特性受以下几方面的影响: 点灯中灯丝的变形、充填气体的纯度、灯内残余气体的成分、玻壳的尺寸。图 6-6 表示 100V 40W、60W、100W 普通照明灯泡的工作特性曲线。

(4) 燃点熄灭特性 从对灯施加电压到发出额定光通量为止, 需要数百毫秒的时间。这是因为灯丝为热辐射体, 达到一定的温度需要一定的时间, 在灭灯时, 只是相反而已。电流值愈大, 所需的时间愈多, 图 6-7 表示普通照明灯泡 40W、60W 的点灭特性。

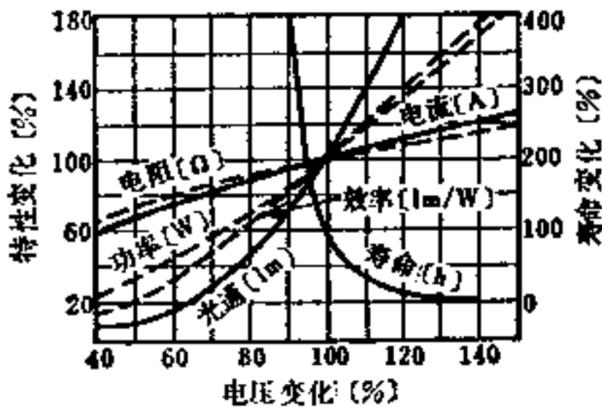


图6-5 随电压变化而变化的寿命特性

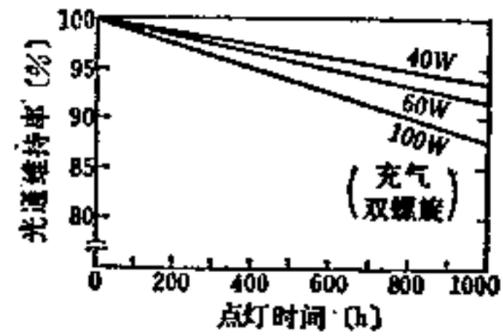


图6-6 普通照明灯泡100V 40W、60W、100W点灯中的光通量变化

(5) **过渡电流** 因为灯丝在常温下电阻值非常小，所以在施加电压的瞬间，流过灯丝的电流，理论上达到额定电流的13~16倍，但实际上由于回路阻抗等的制约，过渡电流约为额定电流的7~10倍。图6-8表示从施加电压的瞬间，至达到稳定电流时的特性，图中以普通灯泡100V 40W、60W为例。

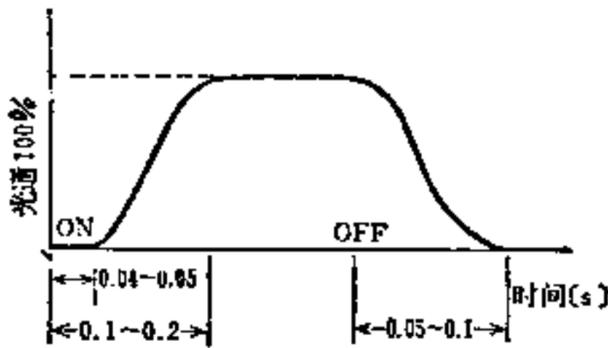


图6-7 普通照明灯40W、60W的点灭特性(充气双螺旋灯泡)

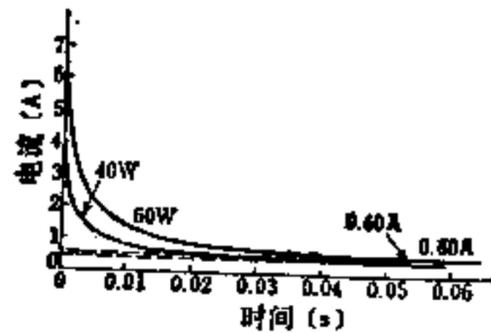


图6-8 普通灯泡100V 40W、100W施加电压瞬间的过渡电流特性(充气双螺旋)

(6) **寿命特性** 白炽灯的寿命，通常系指灯燃点到断丝为止，或指灯保持在规定的通量数值上的点燃时间。日本工业标准(JISC7501)对普通白炽灯规定，功率30W以上的灯，燃点750小时，光通维持率在85%以上。

对于长期生产的定型产品，将根据寿命试验决定的寿命平均值，作为灯的平均寿命，该方法考核灯的寿命，获得了广泛的使用。灯的寿命受以下几方面影响：灯丝温度、灯丝形状、充入气体的成分、充气压力、振动等。决定寿命有二大要素，一是由于蒸发而引起灯丝烧断，二是由于振动、冲击等而产生的机械断丝以及在灯丝以外的地方遭到破坏等等。灯丝烧断的机理，是由于灯在燃点中，灯丝处于高温状态下，不断蒸发，逐渐变细。点燃电流随着点灯时间加长而减小，灯丝温度也随之下降。由于钨蒸发而使玻壳发黑和灯功率减小，促使光通量下降。

这个特性在工作特性一节中已有叙述。实际上，灯丝各处减细的速度是不一样的，在局部地方蒸发加速，于是该处的温度也就加速提高乃至蒸发更为加速而烧断。

这有四方面的原因：(1) 灯丝局部有缺陷；(2) 表面辐射强度差；(3) 部分灯丝电阻不同；(4) 螺距不均匀。而且，由于灯丝的温度变化使灯寿命和光效产生变化。一般生产的灯寿命和光效有如下关系：

$$LE^{\alpha} = \beta$$

式中，L：寿命；E：光效； α ：寿命指数； β ：寿命常数。

图6-9表示，当 α 为7时，普通照明用灯的 β 值。

(7) 点灯条件的影响 由于电源电压的变化引起寿命的变化,如图6-5所示。在灯燃点熄灭时,不仅点灯瞬时的过渡电流,而且灯丝的形状、均匀性等也会对寿命产生影响,通常在数百毫秒至数秒内的燃点熄灭周期内,就大致可使寿命缩短2-8%。至于环境温度,由于灯丝本身温度很高,所以不会产生直接影响,但从玻壳放出的不纯气体,却能对灯丝产生影响。由于卤钨灯的充气压力比普通白炽灯高,所以寿命指数较低。影响卤钨灯寿命的主要因素之一,是封接部分的寿命。使用钼箔和石英玻璃封接,当封接部分的温度达到350~400℃以上时,钼箔急剧氧化,封接部分即被烧坏。图6-10表示封接部分的温度和钼箔烧坏时间的关系,当寿命要求为2000h以上时,封接部分的温度须在350℃以下。

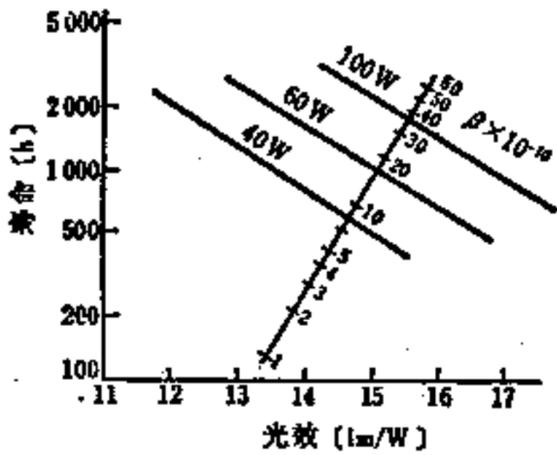


图6-9 寿命和光效的关系

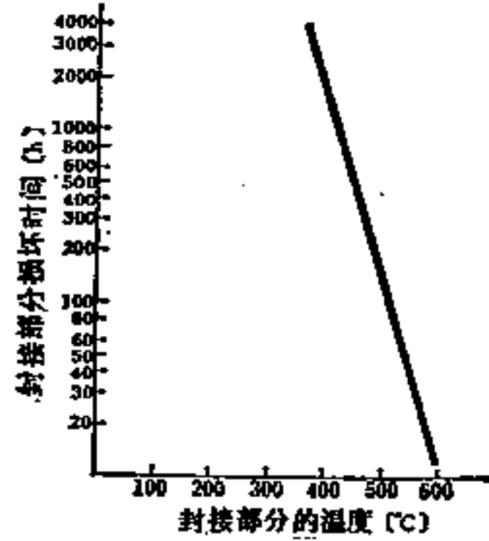


图6-10 封接部分的温度和钼箔烧断时间^[8]

(8) 充气压力的效果 图6-11表示在灯内分别充进氮气、氩气和氩氮混合气的比较,由于充气压力的变化,钨的蒸发比率也相应地变化。在普通照明灯中,当充气压力为600托(7.97 × 10⁴巴)时,对钨蒸发的抑制能力氩是氮的2倍以上。从Coaton^[9]的计算由图6-12表示充气压力和光效的关系。500W双螺旋卤钨灯,当充气压力达2500托(3.33 × 10⁵巴)时,其光效最高,可比充750托(1.01 × 10⁵巴)的光效高70%。如保持光效相同,则寿命就能大大提高。

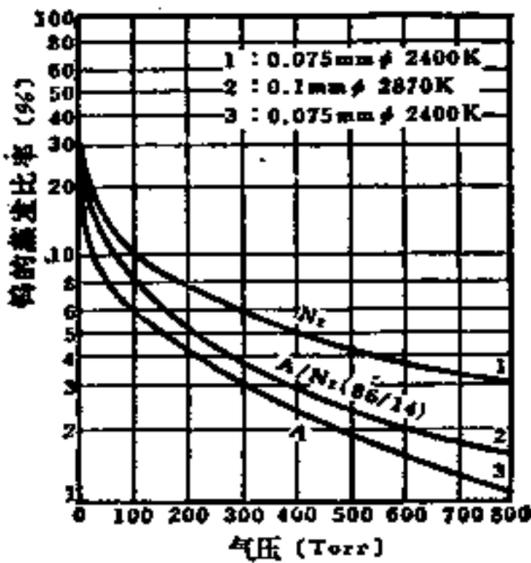


图6-11 不同气体压力下钨的蒸发

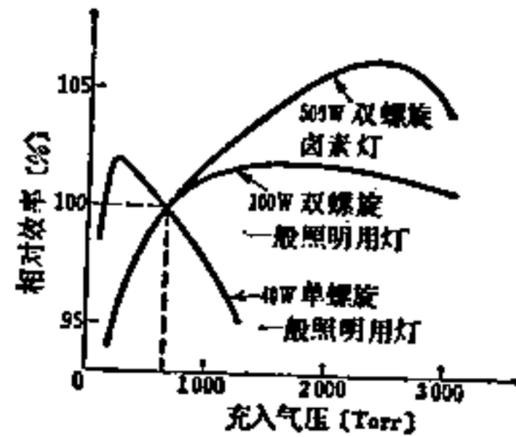


图6-12 充气压力和光效的关系

6-1-4 灯的种类和特性

(1) 普通照明用灯 普通照明用灯作为家庭、商店照明的主要光源,正在获得广泛的利用。1971年,对日本工业标准(JIS C 7501)进行了修订,以国际标准(IEC)为依据,

对以往的单螺旋、双螺旋灯的性能、寿命特性，作了统一规定。

在普灯方面，用以代替内磨砂灯泡的，是在玻壳内表面涂敷了漫射性能良好的白色涂层，即乳白色灯泡，正在成为主流。乳白色灯泡与透明玻壳的灯比较，具有95%的透过率。图6-13表示普通照明用灯的配光曲线。另外，充氮气的氩灯，与充氙气的灯相比，光效约能提高10%。其它装饰用灯，能产生白炽灯的暖色光，特别是白色球形灯泡，正在被广泛地应用。在透明玻壳上涂敷反射膜，以利用其间接光，还有各种蒸镀金属的薄膜，利用其金属外观以及透过的光色，以提高其装饰效果的大型灯泡等等，都可以通过照明来达到改善环境气氛的效果。

(2) 投光灯 投光灯是一种利用高亮度灯丝发出强度很高的光线，集中照射在建筑物、体育设施、商店陈列处等地的灯，并和具有反射面的灯具组合使用，或者在灯的玻壳的内表面蒸镀铝形成反射面，根据光束的散射角，可分为聚光型和泛光型。室内使用的反射型灯，要求前表面为未抛光的聚光型或泛光型。室外使用的灯，采用硬质玻璃，这样雨水滴直接接触时不致破裂。另外，也有将抛物面的反射面和透镜直接密封在一起的PAR型灯（光束灯），按透镜可分为聚光型和泛光型，这种灯比反射型灯的集光性更好，适合于重点照明。

图6-14为典型的配光曲线。这种灯小，结构紧凑，而且不必使用反射罩，使用方便，和使用灯具有同等效率，在商店的装饰橱窗照明、工厂现场照明中，正在获得广泛的应用。但是，这种灯的反射光温度很高，为了减少反射光中的红外成分，在PAR灯中，在透镜内表面涂敷红外线反射膜，或在反射面上蒸镀多层干涉膜，使可见光由前方透射出去，红外光经

反射面向后方透射出去。这种冷光灯，在手术灯、大厅、走廊等的投光照明中广泛应用。另外，在广场照明、体育设施照明中也还有将卤钨灯密封的密闭光束型灯。

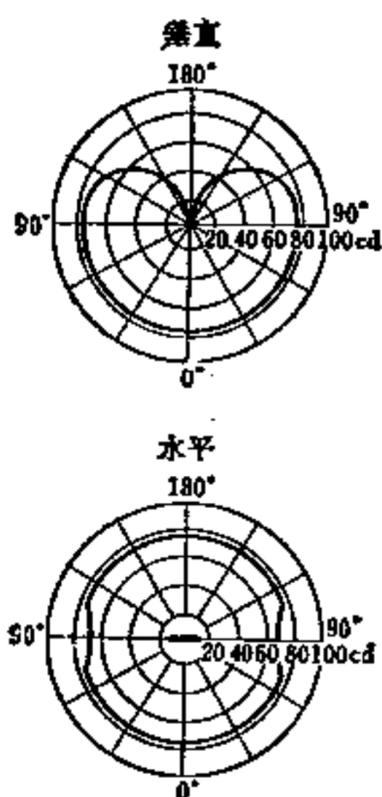


图6-13 100V 60W普通照明灯的配光曲线(乳白色灯泡)

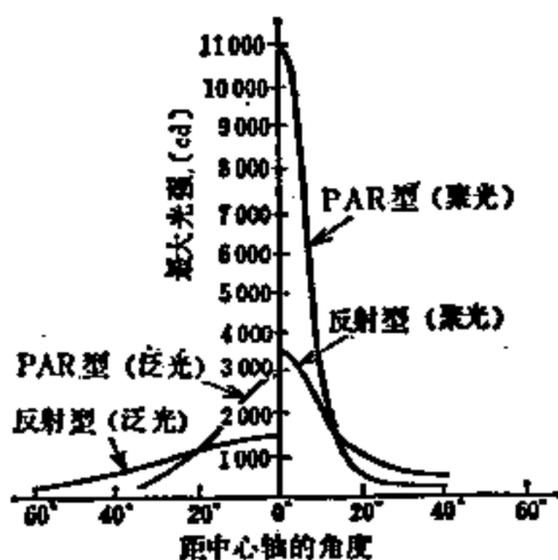


图6-14 PAR型灯和反射型灯的配光曲线(150W)

(3) 汽车灯

(a) 前照灯用密闭光束型灯 将玻璃内表面镀铝的反射镜，和相应使用目的的配光特性的前透镜密封在一起，制成密闭光束型灯，因为这种结构可使灯丝、反射面和透镜等的相对位置装配得十分精确，所以能得到合适的配光。因而，密闭光束型灯不仅可作为汽车前灯使用，而且还用作铁道车辆前照灯、信号装置用灯，成为在交通安全上的重要的交通照明

光源, 该光束配光特性, 既具有能准确看清前方障碍物所需的中心亮度, 又可作为运行时所必要的运行光束, 能将水平线以上的光束遮断, 从而保证错车时不刺眼, 可作为错车光束。也可利用其高亮度光源的特长, 将它用来作辅助前照灯、雾灯等, 如 12 V 的卤钨灯。

(b) 小型灯 小型灯有用于前照灯、室内灯、转向灯、尾灯、侧灯等多种类型。作为交通安全方面的重要的光源, 要可靠性高。指示光源要采用经过特殊设计的耐冲击性结构, 现普遍使用楔形, 可直接插入灯座。

(4) 放映、照相用灯 作为照相用灯, 实际使用的有色温 3200~3400 K 的反射形灯, 和 4500~6000 K 的蓝(青、绿)玻璃灯。但是这方面的灯, 正在被小型, 高亮度并且光通几乎不下降的卤钨灯所取代。卤钨灯的灯丝和玻壳很靠近, 它与光学系统组合, 调光十分容易。在 8 mm 和 16 mm 放映机中, 插脚的小型卤钨灯正被采用。为了降低 2 寸胶片热影响, 还有和镀多层干涉膜反射面组合的反射型卤钨灯。

(5) 红外线灯 由灯辐射出来的能量, 其中大部分为红外线, 而且由于近红外部分辐射的透过性很好, 所以广泛应用于房间取暖、美容医疗、农牧业、工业加热干燥等方面。红外线灯一般是反射型的。石英管形红外线灯, 体积小, 有高红外输出, 所以常作加热炉和电子复印机的定型光源而被广泛应用。

(6) 测光标准灯 CIE 色度测定用 A 光源, 规定必须使用分布温度为 2856 K 的钨丝灯。作为测光标准的标准灯的特性, 要有很好的一致性和稳定性。作为测光用标准灯, 大体分为光通测定用、水平光强测定用、光测高温计用等几种。光通测定用灯, 从 100 V 10W 到 1000W, 灯头为 E26、E39, 和普通照明灯外形相同。水平光强测定用灯, 从 8 W 到 1500W, 水平光强从 10 cd 到 3000 cd, 灯的灯丝为单螺旋平面型的。光测高温计用灯, 由于是检查光测高温计的标度的。为了减小由于温度而产生的特性变化, 采用钨带灯丝, 制成特殊形状, 以防由于玻壳反射而产生重影。

(7) 其他白炽灯 白炽灯的应用范围广泛, 品种极多。为了适应车辆、船舶使用, 能承受连续的振动, 除了使用钨作灯丝外, 同时增加支架的数量。在日本, 已将白炽灯用作集鱼灯使用, 为了充分发挥这种灯的小型、高功率的优点, 也有利用 1 kW 以上卤钨灯的。另外, 能快速点灭的高亮度的小型灯的应用范围也很广, 如电子装置的控制盘用、缝纫机灯、节日灯等品种繁多。

在电视演播室中, 使用小型、高功率的 1 kW、2 kW 卤钨灯, 正成为主流以替代以往的双端引出型灯。由于卤钨灯充分发挥了它所具有的小型、轻量、光通几乎不降低、寿命长等优点, 所以在某些特殊场合, 例如要求光源局部发光并在纸面产生均匀照度的电子复印机, 要求高亮度光源的机场跑道路标等获得广泛的应用。

6-2 荧光灯

6-2-1 荧光灯的概要

荧光灯与白炽灯并列, 成为照明的另一主要光源, 目前已经达到实用的稳定阶段。为了满足对它的庞大的数量要求, 各制灯公司都设置了高度自动化的大批量生产的机械系统, 是自动化设备方面的具有代表性的工业之一。

荧光灯与白炽灯不同, 需要点灯附属装置, 这是它的缺点, 但具有以下六方面的优点:

(1)光效高；(2)发出柔和的漫射光(亮度低)；(3)由于是线光源，所以亮度分布均匀，利用灯具可以作为面光源使用；(4)可以得到各种光色；(5)热辐射量小；(6)寿命长。

6-2-2 荧光灯的结构与原理

荧光灯是一种热阴极、低压汞蒸汽放电灯，利用放电产生的紫外线，通过涂敷在玻璃管内壁的荧光粉，转换成可见光。

(1) 结构和材料 图 6-15 表示荧光灯的典型结构。玻璃管通常根据灯的功率，选择适当的直径和长度，制成直管形或环形。

玻璃管的材料，直管形灯采用碱玻璃，环形灯通常采用加工性好的铅玻璃。在管的内部涂敷荧光粉。作为快速启动型灯的启动辅助电极，是在玻璃管内壁涂敷透明导电薄膜（主要是氧化锡），或是在玻璃管的内壁或外壁安装导电带（石墨加氧化铝等）。反射型灯涂敷反射膜（二氧化钛等）。在玻璃管的两端封接芯柱（铅玻璃），用导线（镍等）支撑双螺旋或三螺旋的钨灯丝，在灯丝上涂敷电子发射物质（以钡、锶、钙为主体的氧化物），作为电极。根据灯的种类和用途，在电极部分设置辅助阳极。管内通过排气抽真空后，封入汞粒和稀有气体。为了减小灯在报废时对自然环境的影响，其充汞量应控制在最低限度（几十mg）。封入钛-汞合金即是为此而采用的一种方法^[10]。另外，为了使灯点燃时管内能有最合适的汞蒸汽压（约 5×10^{-3} 托），特别是在超高功率的灯以及在高温下使用的灯中，而使用汞齐（汞加铟等）^[11]。灯内的稀有气体，通常是充进 2~3 托的氩气，也可以根据用途，充进氙、氪、氟、氙、氪或氙氪等混合气体。在灯的两端，用焊泥（酚醛树脂、石英砂等）将灯头固定住。灯头的结构根据灯的种类而异。快速启动型灯，可根据种类在玻璃管的外壁施加防水处理（涂敷硅树脂薄膜）。

(2) 荧光灯的放电现象 荧光灯的放电形式，是热阴极弧光放电。当灯的左侧电极作为阴极工作，在某一瞬时的轴向电位分布，如图 6-16 所示。图中所示条件是：在进行热电子发射的阴极前面，存在十几伏的阴极位降，在阳极前面，由于空间电荷的存在，产生阳极位降，在阳极和阴极之间为正柱区，正柱的电场强度约为 1 V/cm。在正柱区内的电子，由于正柱电场而产生加速，电子在平均自由程中，和汞原子碰撞，将动能传给汞原子，使汞原子电离和激发。在汞-氩混合气体中，被电离和激发的主要是汞原子，氩作为缓冲气体，它的任务是调整激动条件，即利用和电子的弹性碰撞，使电子的能量更多用于引起汞原子的电离和激发。

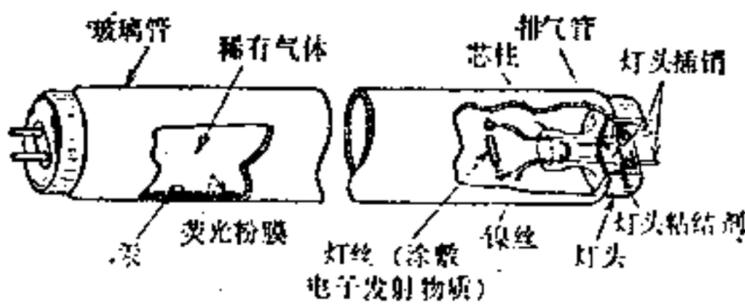


图6-15 荧光灯的结构

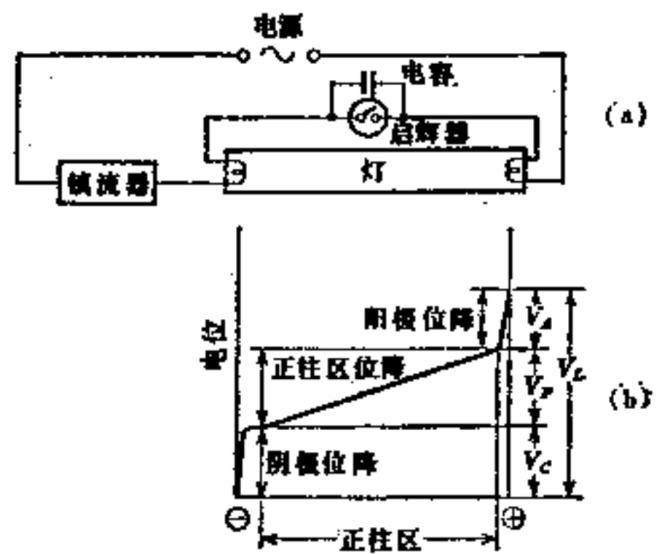


图6-16 轴向电位分布

在正柱区即所谓的等离子区中，电子和正离子的密度几乎相等 ($10^{10} \sim 10^{13}/\text{cm}^3$)。由于正离子的质量比电子大得多，所以，正柱区的电流主要是由于电子的运动而产生

的。如果电流增加，由于电子碰撞而产生的激发原子的密度也随之增加，形成累积电离，即由于电子、激发原子的碰撞而产生的电离，越来越增加。如果累积电离增加，那么生成的电子就会倍增。因此，由于带电粒子平衡而形成的抑制力的作用，正柱区的电位梯度则要下降。

也就是说，正柱区具有随着电流增加而引起电压下降，即所谓的负特性。如图6-16所示，灯电压 V_L 为阴极位降 V_c 、正柱区电压 V_p 与阳极位降 V_a 之和。通常由于荧光灯的正柱区较长，所以相对于 V_L 来说， V_p 所占比例一般都比较大。正柱区为负特性，因而整个灯电压也具有负特性，随着电流的增加，极间电压下降。

(3) 发光原理 在正柱区，被电场加速的电子和汞原子碰撞，汞原子吸收了碰撞电子的动能而被激发。激发原子在短时间 ($10^{-8} \sim 10^{-9}$ 秒) 内又回到低能量的基态。这时，原子以辐射的形式发射出由于碰撞而吸收的能量 (参照 2-2 节的图 2-14)。加速电子的能量在 4.67 V 以下时，电子和汞原子的碰撞为弹性碰撞，电子交给原子的能量很小。碰撞电子的速度达到 4.88 V、6.67 V 以上时，原子从最低激发能级 2^3P_1 、 2^1P_1 激发。当被激原子返回基态 1^1S_0 时，辐射出波长为 254 nm 和 185 nm 的谱线，为汞的共振线，在汞放电中是最强的谱线。当电子速度达 10.43 V 以上时，汞原子被电离。

二条汞共振线中，波长为 185 nm 的谱线，多数自我吸收，荧光粉对它的灵敏度很差，只占荧光灯发光的 10% 不到。波长 254 nm 的共振线，在荧光灯发光中起着主要作用，从开始发生到最后到达管壁的荧光粉膜层要有多次的重复的发生和吸收。为此，从 2^3P_1 能级激发的原子的有效寿命较长，在此期间，由于第二类碰撞而将激发能量转交给碰撞电子和其他原子产生了二次现象，所以共振线的辐射效率降低。总之，当放电电流密度小，汞蒸汽压低时，254 nm 共振线的辐射达到总辐射的 90% 以上，当电流密度增大，汞蒸汽压升高时，254 nm 共振线的辐射效率就降低 (图 6-17)，其他谱线就加强。在低压汞放电中，如能级图所示，除了二根共振线外，还产生其他汞谱线，如在紫外部分有 297、313、334、365、366 nm；在可见部分有 405 nm (紫)、436 nm (蓝紫)、546 nm (绿)、577~579 nm (黄) 等。

涂敷在管壁的荧光粉，接收共振紫外线的辐射，发出比共振线更长波长的荧光 (斯托克斯定律)。可以用图 6-18 的能级图说明荧光粉的发光机理，由于在荧光粉中加入了激活剂等杂质，所以在禁区产生了激活剂能级。A 是激活剂的电子所占有的最低能量的基态，B 是激发态之一，常态则是空位，C 是亚稳态。激活剂的原子吸收了共振紫外线，它的电子如 $1 \rightarrow 1'$ 因激发从基态 A 向 B 能级跃迁，再返回基态，由于这种位置的转换产生了能量差，就会发

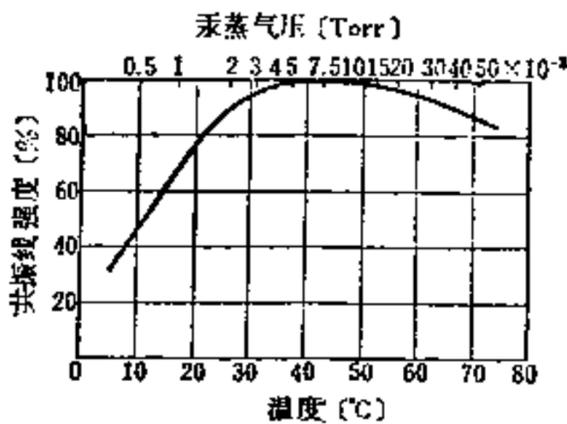


图6-17 随汞蒸汽压的变化引起共振线辐射强度变化

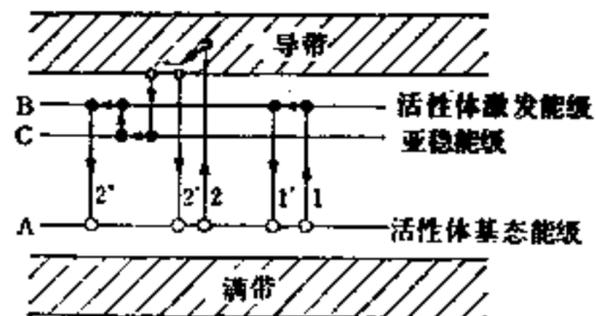


图6-18 荧光粉的电子能级图

出荧光。还有，在满带的电子，如 $2 \rightarrow 2'$ 上升到导带，立即折回到能量低的稳定状态，上升到如 $2 \rightarrow 2''$ 的上方位置的电子，被亚稳态能级 C 捕获，一定时间后，先向 B 能级迁移又返回到下面的状态，经过种种过程再返回到下面的能级的时候，也会发出荧光。在禁区的这些能级的位置，决定荧光的色调。因而，荧光的光谱能量分布是随着荧光粉的基质和激活剂而变化的。关于荧光粉，将在 6-10-3 中叙述。

(4) 能量分配^[12] 图 6-19 表示 40W 白色荧光灯的输入能量 (40W) 和消耗能量的关系。转换成可见光的仅 10W (输入功率的 25%)。而其余 30W (75%) 被荧光粉吸收、加热电极、管壁温升等所消耗，其中，12W (30%) 为红外线辐射，18W (45%) 为传导和对流所消耗。

(5) 发光效率 荧光灯的发光效率，大致由下面的 (a)、(b)、(c) 三阶段的效率的乘积所决定。影响各阶段效率的主要因素，如下所述。

(a) 相对于放电功率 254 nm 辐射的发生效率 254 nm 辐射的发生效率，约占放电功率的 60%，管长 (正柱区长度) 越长，电极损耗所占比例越小，效率越高。另外，管径^[13] (图 6-20)、充入气体的种类^[14] (图 6-21)、灯电流的选定也很重要。还有，与此有关的汞蒸气压 (管壁温度)、氙气的充气压力也有影响。

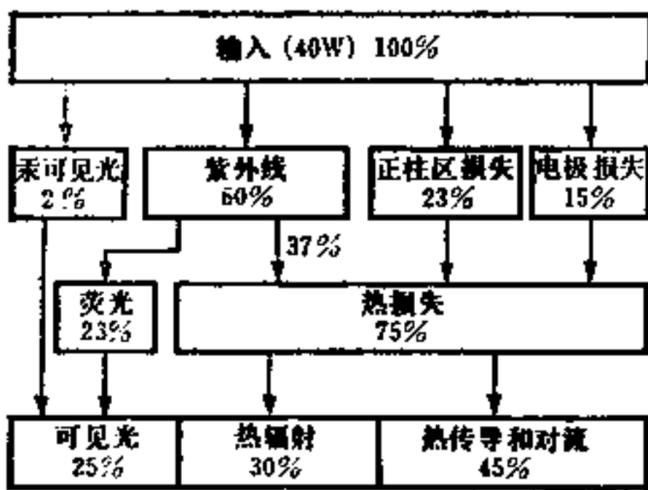


图6-19 荧光灯的能量分配

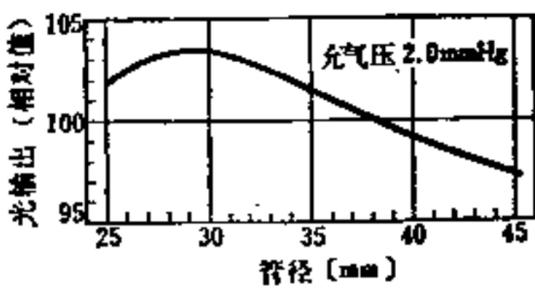
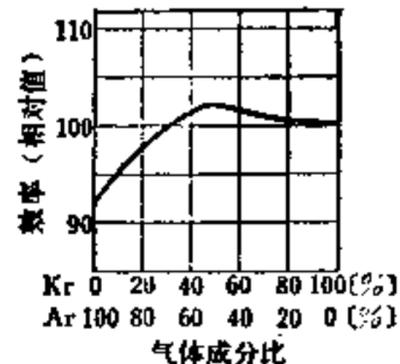
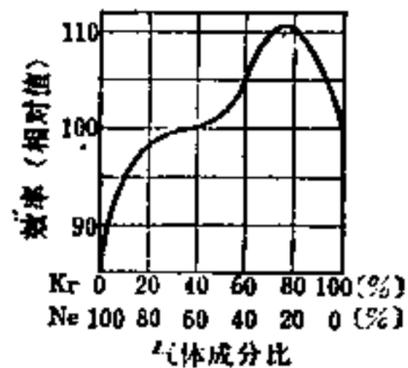


图6-20 管径和光输出的关系



(a) 氙-氩混合气



(b) 氙-氖混合气

图6-21 充入气体的组成和效率

(b) 荧光粉的能量转换效率 依存于各种荧光粉的各自固有的量子效率、量子比和发光系数。

(c) 荧光粉层、玻管的透过率 荧光粉的平均粒径过小，对 254 nm 辐射的反射就增大，降低了必要的吸收。对于光输出，荧光粉涂层的厚度则要有最佳值。由于荧光粉涂层而产生的损失，大致在 8~10%，玻管的吸收约为 1~2%。

现在，假定荧光粉的量子效率为 85%，量子比为 0.45，发光系数为 0.57，波长 555 nm 具有最大视感度的单色光，其辐射效率可达 680 lm/W，那么发光效率为：

$$680 \times \underbrace{0.60}_{(a)} \times \underbrace{0.85 \times 0.45 \times 0.57}_{(b)} \times \underbrace{0.88}_{(c)} = 78 \text{ lm/W}$$

如果在灯燃点 100 小时后，荧光粉的光衰为 4%，光效可为：

$$78 \times 0.96 = 75 \text{ lm/W}$$

这时再加上汞的可见光的光率 5 lm/W，就可得理论光效大约为 80 lm/W。

(6) 电极的工作原理 通常由于荧光灯是用交流电源燃点灯的，所以在电源的各个半周期内，电极交互为阴极或阳极工作。当电极为阴极相位时，其主要作用是产生热电子发射。加热阴极主要靠离子轰击，加热阳极主要靠电子轰击和电流流经而产生的焦耳热。热量是由电极通过热电子发射、热传导和热辐射而散失（电极损失）。

电极的电子发射，对灯的启动、寿命（也关系到管端黑化）和噪声等各特性都具有重要的影响。电子发射物质的逸出功越低，越好启动。但在寿命（黑化）方面，要求电极物质由于离子轰击而产生的溅散和蒸发要越少越好，为此往往采用较高的逸出功的物质。由于这两者具有相反的关系，所以如何选定电极发射物质的材料和制订合理的制造工艺，具有重要的意义。作为电子发射物质，主要采用钡、锶、钙的氧化物，详细内容将在 6-10-2〔1〕中叙述。

6-2-3 荧光灯的种类

(1) 分类和型号

(a) 按启动线路方式分类（参照 6-5-2）

(1) 预热式灯 这种灯的启动方式，有手动开关式和辉光启动器式。手动开关方式是用手动方法，在灯两端的电极上流过预热电流，利用镇流器的电感，给灯施加电感反冲电压。

在一般情况下，多采用辉光启动器方式，预热阴极和施加反冲电压，都是自动进行（参照图 6-22）。如图 6-22 所示，用双金属片制成可动电极，由于氙气的辉光放电的热量而使电极可动，当和固定电极接触时，灯管两端的电极才流过预热电流。此时，可动电极冷却 1~2 秒后，在离开固定电极的瞬间，电感反冲电压产生，灯被启动。另外，也有用电子元件预热、内装高压脉冲回路的电子启动器方式，已被实际使用。

(2) 快速启动式灯 在镇流器内附加灯丝加热回路，并且镇流器的二次电压，设计得比启动电压高，所以在电源电压施加后约 1 秒钟就可启动。

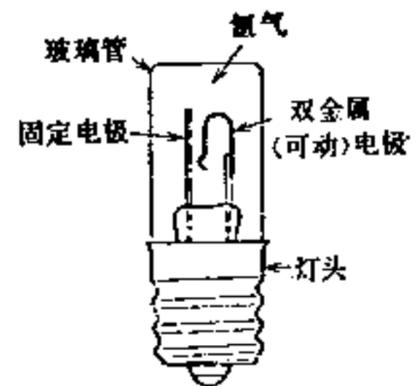


图6-22 E型辉光启动器的结构

在灯的管壁电阻非常低或非常高的情况下，都能使启动变得容易（参照 6-5-2）。实现前者的方法，是在管的内壁涂敷透明的导电薄膜，或是在管的内壁或外壁敷设导电条。涂敷导电薄膜的方法，与敷设导电条的方法相比，具有灯没有方向性的优点，但导电薄膜的电阻值或电阻值的分布，对灯的性能有影响。实现后者的方法，是在管的外面施加防水性膜如硅膜。这时，接近灯处必须安置金属导体（实际上是以照明灯具的反射板代替）。通过用这个金属部件的静电电容的作用，利用由感应而引起的微弱放电。

通常采用三螺旋灯丝作电极，在灯丝上长时期地保持着电子发射物质。

(3) 细管形灯 由于电极不需要预热，可以采用冷阴极的漏磁变压器产生的高压瞬时启动灯管（参照 6-5-2）。启动电压受湿度的影响较大。

(b) 按功率分类

(1) 标准型荧光灯 在标准点灯条件(环境温度 20°C, 湿度 65%以下)下,为获得应有的发光效率,将管壁温度设计在最佳值(约 40°C),管壁负荷为 0.3W/cm。

(2) 高功率型荧光灯 为了提高单位长度的光输出,而增加了灯电流的灯,管壁负荷设计为 0.5W/cm 左右。

(3) 超高功率型荧光灯 为了进一步提高光输出,管壁负荷设计为 0.9W/cm。为此,通常是充进氙、氩混合气。管壁负荷一旦达到这样程度,其它有关方面应保持不变。管内的汞蒸气压就会偏高,而使发光效率降低,对此,可采用二种方法,一是加长电极,在管端和电极间加隔热板,改进管端结构,以降低灯管冷端的温度,二是改充蒸气压低的汞齐等,以控制汞蒸气压。

高功率和超高功率型荧光灯,一般的点灯方式是采用快速启动式。此外,灯头与标准型灯所用的一般双插插脚不同,采用的是凹进双触点型灯头(图 6-23)。

(c) 其他荧光灯 除了一般照明用荧光灯以外,在形状、结构或性能上特殊的荧光灯种类很多,大多已实际应用,也有现在正在进行开发的。在日本,除了非常普及的环形荧光灯以外,还有U形和平板形荧光灯,还有一种用以代替白炽灯的单端的荧光灯[15]。改变管内结构,为改善性能而敷镀反射膜,可以制成能控制配光曲线的反射形荧光灯和带缝隙的荧光灯;敷设紫外线吸收膜,就可制成防止退色用的荧光灯。另外,为达到高效率、高功率的目的,还可制成非圆形断面的荧光灯等。

除此以外,作为特殊点灯条件用的,有直流电源用的直流荧光灯,在低温使用环境中仍然可靠启动的低温用荧光灯等。

(d) 类别和型号 荧光灯以启动方式、尺寸、额定消耗功率相同的灯类加以分类,同类灯中又以光色分类。关于型号[16],一般型灯是以灯的形状(直管或环形)、消耗功率、直径大小和光色来表示。快速启动型灯,除以上内容以外,再加上输出功率的大小和辅助启动的方式。细长管形灯,是以灯的长度、管径和光色来表示。

(2) 光色的类别

(a) 色和光谱分布 荧光灯可以通过选择或组合荧光粉,而发出具有各种不同光谱能量的光。

在一般照明用灯中,分为日光色(D)、白色(W)和暖白色(WW)三种。色温为:日光色 6500K,白色 4500K,暖白色 3500K 和 3000K 二种。

在 JIS[17]和 CIE[18]中,对色度图上的色度容许范围作了规定。图 6-24 的(a)、(b)、(c)表示这些荧光灯的光谱分布,(d)表示与白炽灯光色接近、色温为 3000K 的荧光灯

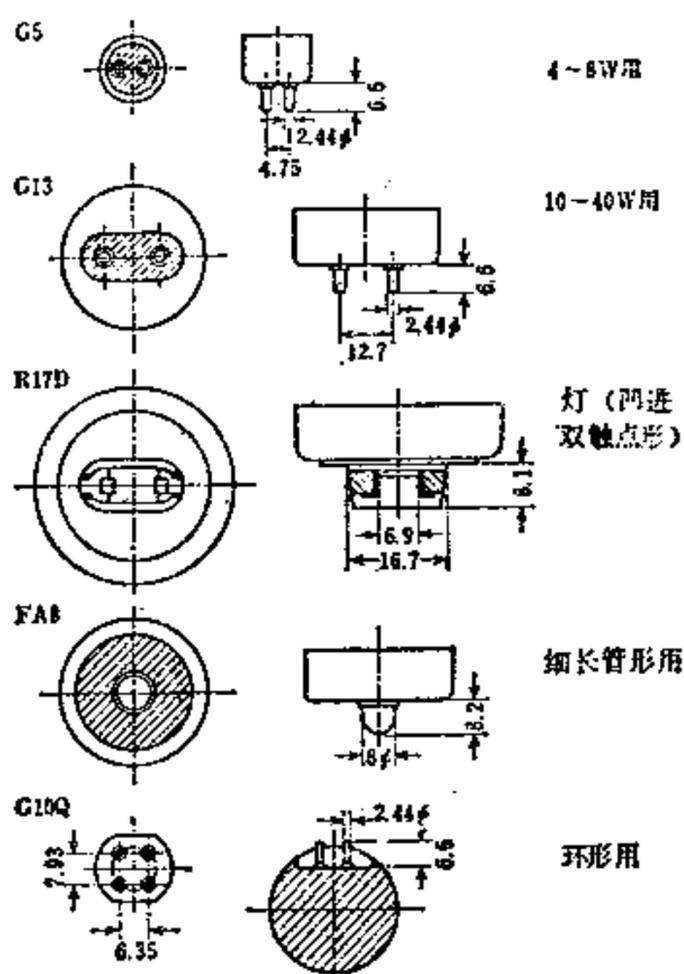


图6-23 荧光灯的灯头

的一例。

(b) 高显色性荧光灯 高显色性荧光灯根据其改进显色性的程度, 在灯型号中的光色符号如下: -DL, -SDL, -EDL。图 6-24 的 (e)、(f)、(g), 例举白色灯中各种高显色性灯的光谱分布。关于显色性, 在 JIS Z 8726 (光源的显色性评价方法) 的规定中, 以显色指数评价。表 6-8 例举了各种荧光灯的显色指数。一般情况下, 显色性好的亮度则偏低。

最新设想, 要制出一种灯, 比以往更能真实地再现颜色, 就是将灯的光色往好的方向偏移, 给人一种真实美的感受, 它的评价方法, 正提出建议[19]。另外, 由于合成了具有在蓝、绿、红狭带区域发光的三基色荧光粉(图 6-25), 完全可以随意制成平均显色指数 R_a 达 85、光通量 3250lm 的 40W 的灯, 该灯显色性好, 光效高, 色温已进入暖白色组成的日光范围, 有关报告已发表[20, 21]。

(c) 彩色荧光灯 表 6-18 表示的彩色荧光灯, 采用发各种光色的荧光粉, 它们能发出蓝、绿、红等单色光, 用作装饰照明或其他特殊用途。

另外, 为了获得比彩色灯更纯的颜色光, 在荧光粉和玻管内壁之间, 敷设一层颜料。根据使用颜料的种类, 可以获得蓝、绿、黄、红等各种颜色的涂色彩灯。有一种黄色灯, 几乎不发射 500nm 以下的短波, 可以作为防虫用或半导体工厂照明用, 也可作为安全照明使用。

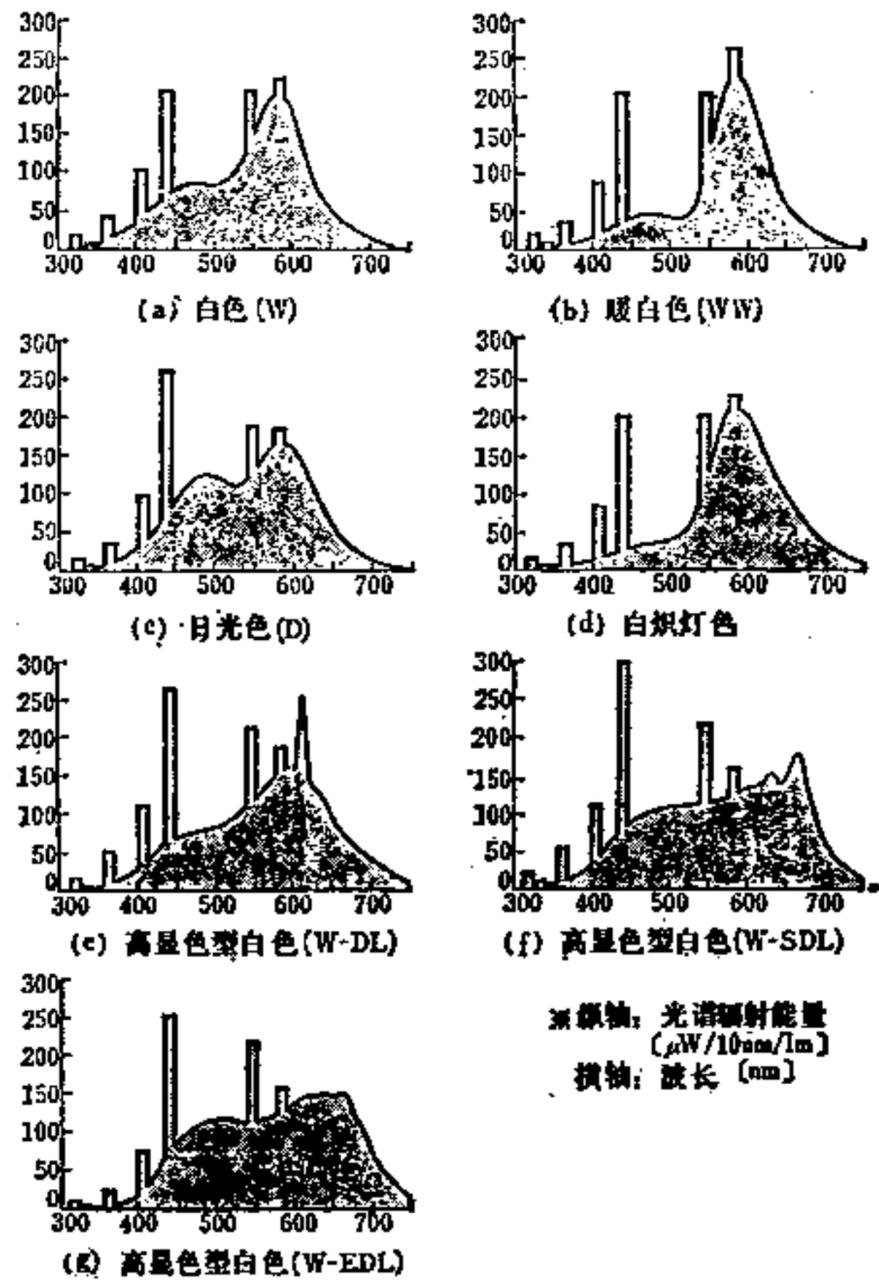


图6-24 各种荧光灯的光谱分布

表6-8

各种荧光灯的显色指数举例

灯的种类	色度		基准光源 色温度 (K)	平均显 色指数 R_a	特殊显色指数							效率 (40W灯) (lm/W)
	x	y			红 R_1	黄 R_{10}	绿 R_{11}	蓝 R_{12}	肤色 R_{13}	树叶 R_{14}	日本人的肤色 R_{15}	
白色W	0.373	0.384	P 4200	64	-95	41	41	49	58	97	43	81
高显色型白色W-DL	0.371	0.368	P 4200	82	15	64	74	71	81	92	78	69
高显色型白色W-SDL	0.345	0.347	P 5000	92	98	78	94	86	95	92	96	53
高显色型白色W-EDL	0.349	0.358	P 4900	96	95	90	93	92	97	96	98	50
日光色D	0.312	0.345	D 6500	77	-56	60	66	73	73	97	59	73
高显色型日光色 D-SDL	0.315	0.328	D 6500	96	92	86	96	92	97	96	98	53
暖白色WW	0.418	0.403	P 3350	59	-106	36	27	33	52	96	38	75
高显色型暖白色 WW-DL	0.411	0.380	P 3300	74	28	54	56	56	71	90	73	56

(3) 特殊用灯 与普通照明用途相距甚远, 而以特殊用途为目的的各种荧光灯, 如表 6-9 所示。

6-2-4 荧光灯的特性

(1) 电压特性 电源电压的变化, 会引起如图 6-31 所示的灯的各种特性的变化。电源电压增高, 使灯电流增大, 则会因电极过热而促使管端黑化, 寿命缩短。电源电压降低, 由于灯电流过小, 电极温度降低, 不易启动, 促使电极物质溅散, 使寿命缩短(参照6-2-2[6])。对荧光灯来说, 无论电压过高或过低, 都会缩短寿命, 所以要求使用的电源电压, 其波动范围必须在额定电源电压的±6%以内。电源电压变动对寿命的影响, 与镇流器的优劣有显著关系, 所以, 对镇流器的选择也是很重要的。

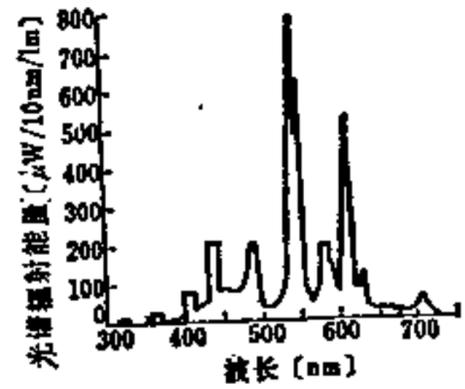


图6-25 使用三基色荧光粉的灯的光谱分布举例

表6-9 特殊用途荧光灯举例

用途	灯	光谱分布	特征	
生物产业用	栽培	植物培育用	以460nm和660nm为中心的荧光	符合叶面叶绿素的吸光曲线, 有效辐射蓝色光和红色光
	防治害虫	捕虫用	以360nm为中心的荧光	符合昆虫类的趋光性反应曲线
		防虫用	具有450nm以上发光区的黄色灯	不刺激昆虫的飞行或利用双眼的明适应性, 使昆虫向照明场所集中或抑制其夜间活动
	杀菌	杀菌灯	254nm的亮线(图6-26)	使用透紫玻璃(透过率约75%以上)
光化学用		健康线用	峰值在300nm附近的荧光(图6-27)	使用特殊透紫玻璃(不透254nm以下), 具有红斑作用和维生素D合成作用
		复印用(重氮)	以420nm为中心的荧光(图6-28)	与使用机器组合, 有各种尺寸的灯和多种超高输出型的灯
		电子照像用	510nm附近的荧光	缝像式
		光化学用(黑光灯)	以370nm为中心的荧光(图6-29)	光化学反应用(有机合成等), 紫外线硬化树脂用
检查、鉴别、装饰照明用	黑光灯 ^①	以360nm为中心的荧光(图6-30)	使用特殊着色玻璃, 完全截住可见光, 仅辐射近紫外光(300~420nm)	
色评价用	色评价用	色温为5000K的高显色性	$R_a > 95$ 抑制亮谱线	

① 亦称为蓝色黑光灯

(2) 寿命和灯的工作特性 荧光灯在燃点过程中, 电子发射物质从阴极徐徐飞溅出来, 只要有一个电极上的电子发射物质耗尽, 灯就不能继续燃点。由于在灯启动时, 电子发射物质的飞溅最为激烈, 所以, 灯的启动频率越高, 寿命就越短。在 JIS^[16] 中关于寿命试验条件规定, 灯的点灭周期约为 3 小时, 将在这种条件下点灯, 灯管由开始燃点达到不放电的时间, 或是总光通量下降到某一数值以下的最短时间, 作为寿命的定义。

随着点灯时间的延长, 荧光粉会老化, 由于管内残留不纯气体的作用, 会使荧光粉黑化, 由于电极物质的飞溅, 会使管端黑化, 由于玻璃的析钠黑化等都能使荧光灯的光通量下降。下降情况如图 6-32 所示, 在最初 100 小时下降很快, 以后就比较缓慢。总光通量下降到初始

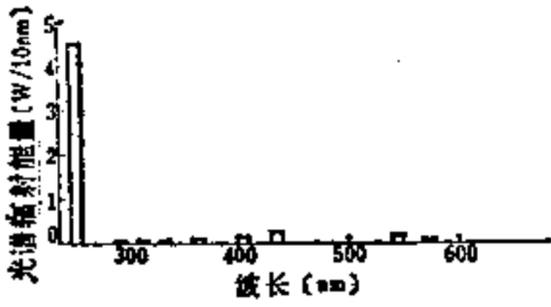


图6-26 杀菌灯(15W)

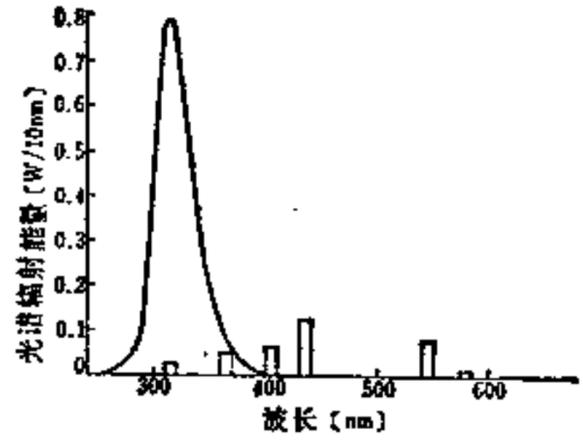


图6-27 健康线用荧光灯(20W)

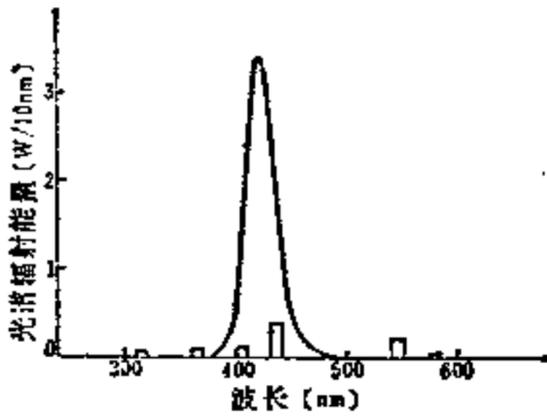


图6-28 复印灯(60W)

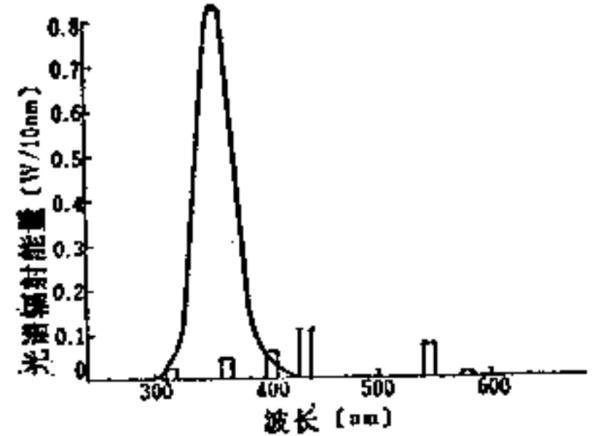


图6-29 黑光荧光灯(BL20W)

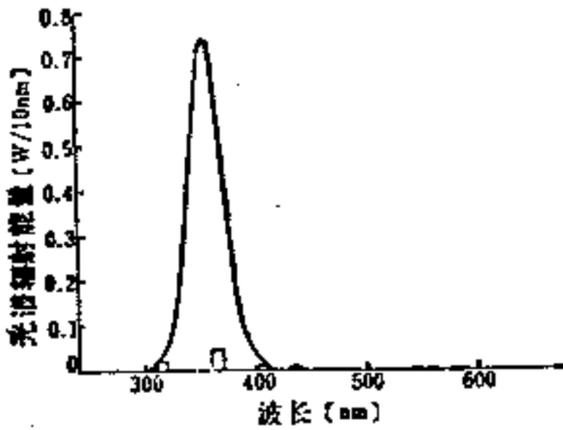


图6-30 黑光荧光灯(BLB20W)

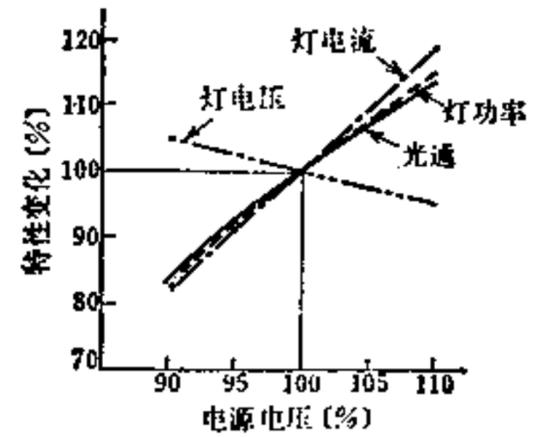


图6-31 荧光灯的电源电压特性(FL40 S)

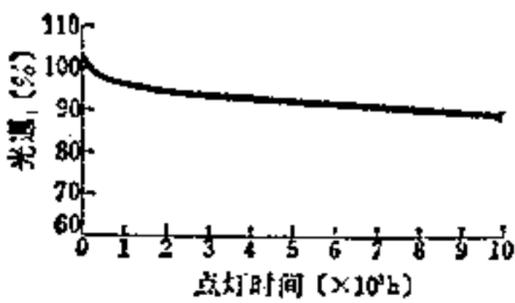


图6-32 光通的工作特性(FL40 S)

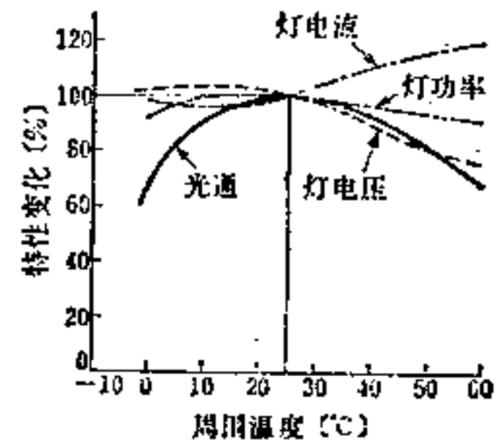


图6-33 温度特性(FL40 S)

总光通的70%以下(改进显色性型下降到60%以下)所经过的总的点灯时间,定义为灯的燃点寿命[16]。

(3) 环境温度的影响 荧光灯的各种特性,决定于管内汞蒸气压,因此受环境温度影

响(图6-33),特别是对启动特性和亮度的影响尤其显著。在低温下,相对于氩气的汞蒸气的分压降低,因此,汞原子的电离几率下降,启动电压上升^[22](图6-34)。

(4) 无线电干扰噪声 荧光灯的电极部分,是产生高频噪声的声源。目前使用的荧光灯中,最普遍的噪声,是由于用交流点灯而产生的。每当交流极性转换时,由于在阴极前面再现空间电荷分布,离子振动就产生噪声(图6-35)。但是,这个噪声可以通过适当地设计电极结构,即增大电极二次螺旋的直径和螺距,而减轻很多。目前市售荧光灯的噪声端子电压,用图6-36所示测定法测定^[23],当灯两端接入 $0.006\mu\text{F}$ 的旁路电容后,如图6-37所示,噪声约为40分贝(dB)左右。

关于其它类型的噪声,要看灯在寿命末期电极损坏的情况而定,当氧化物电极表面出现显著的不平整状态时,就会产生局部电场,加速电子束的发射,从而产生电离噪声(双子型噪声)。但是这种杂音,由于制灯技术的进步,在今日几乎是不会发生了。

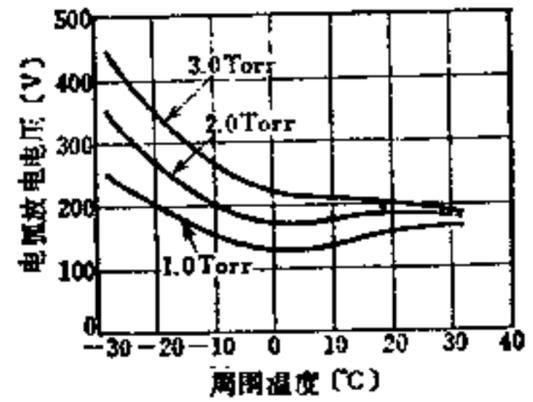


图6-34 充氩高功率荧光灯的启动特性(72W管径 $\phi 38\text{mm}$)

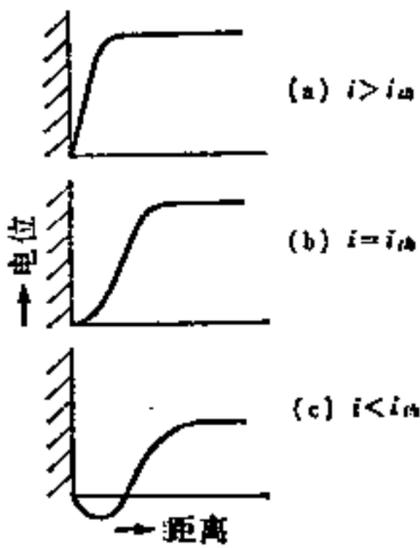


图6-35 放电电流(i)相对于电子发射(i_e)的阴极前面的电位图

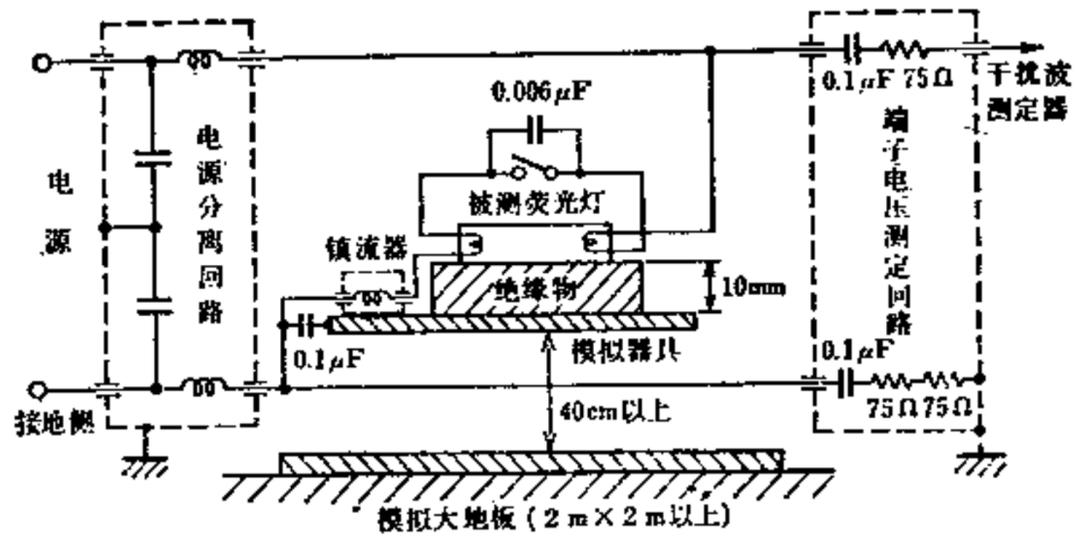


图6-36 噪声端子电压测定回路^[15]

(5) 闪烁效应 用交流燃点荧光灯时,在各半周期内,随着电流的增减,光通量发生相应的变化,因而引起灯光闪烁(频闪),其频率与电源频率成倍数,其闪烁程度,因荧光粉的余辉性能而异,日光色荧光粉的闪烁程度要比暖白色、白色荧光粉为重。

荧光灯正柱区的发光,通常在商用电源下,由于 100Hz 或 120Hz 的变化很快,一般人的眼睛不易感到闪烁,试验时,用荧光灯照射很快移动的物体,只能看到模糊的假象。这就是闪烁效应。在频闪严重的情况下,闪烁效应也显著。

在荧光灯的管端部分,由于交流电源产生的交变电流,在一周期内出现了如图6-38(b)所示的波形畸变的光的变化,其程度因电极的结构不同,此外也因阴极负辉光和阴极光的宽度和强度的不同而异。其结果,由于 50Hz 或 60Hz 的光的变化,人的眼睛会感觉到频闪。频闪的程度虽可用数值表示,例如:根据图6-38(b)的光波形状,一般可用以下公式计算,但考虑到波形,计算出的频闪指数可靠性会更高。

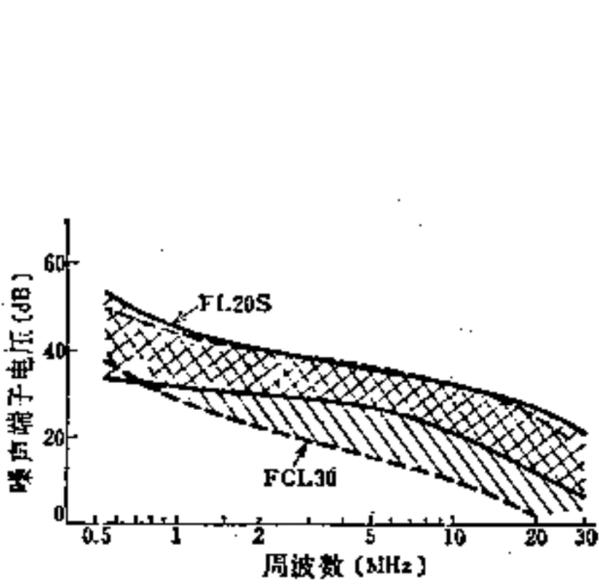


图6-37 荧光灯的噪声频率分布举例

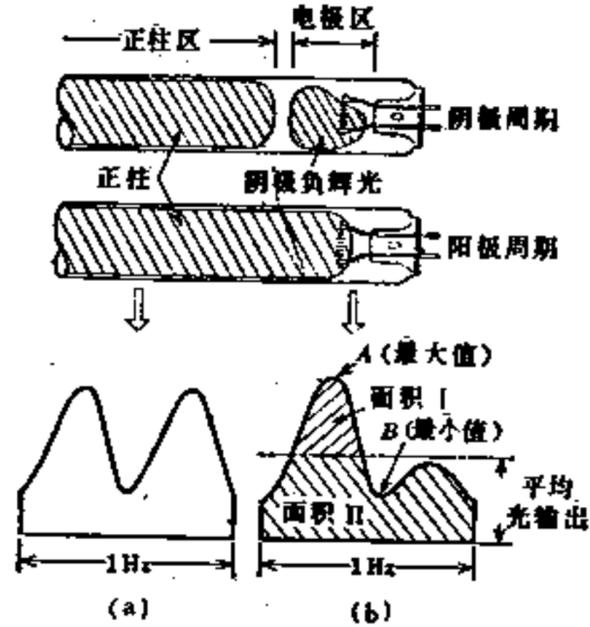


图6-38 荧光灯的中央部分(a)和管端部分(b)的发光波形

$$\text{频闪指数} = \frac{\text{面积 I}}{\text{面积 I} + \text{面积 II}}$$

$$\text{频闪百分率} = \frac{A - B}{A + B} \times 100(\%)$$

6-3 高压放电灯

6-3-1 高压汞灯(汞灯)

(1) 概要[24, 25] 高压汞灯, 自1906年Küch第一个制成后, 这种灯仅仅能用于医疗和研究方面, 到1930年, 发展到用于照明方面。这是由于石英封接技术的进步, 采用氧化物阴极, 充入稀有气体, 使灯的启动特性和稳定性得以改进, 使用也方便。尤其到了五十年代发明了适合于高压汞灯的荧光粉, 显色性有所改变, 1965年, 由于采用稀土荧光粉, 不仅显色性有了更进一步的改变, 灯的效率也获得了大幅度的提高[26, 27]。

高压汞灯是道路照明、工厂照明、运动场照明等的典型光源, 除在普通照明中获得广泛应用外, 在复印、光聚合和紫外线干燥等工业方面, 在光照栽培和集鱼灯集鱼等农业、水产方面, 在保健、医疗方面, 都获得了应用。

(2) 工作原理[24~28] 高压汞灯是利用汞放电时产生的高气压, 获得高的可见光发光效率高的一种光源。

汞蒸气压在常温下低于 10^{-3} 托, 放电开始后, 温度上升, 压力缓慢升高。在高压汞灯中, 当充入的汞全部蒸发时, 蒸气压的设计值可达 $10^3 \sim 10^4$ 托(图6-39)。

随着压力的升高, 电子和原子的碰撞频率增大, 气体的温度(T_g)接近并几乎等于电子的温度(T_e)。这时放电中心部分的温度约为6000K, 气体和电子间达到热平衡状态。

这时激发态的原子浓度, 可用下面的玻耳兹曼公式计算。

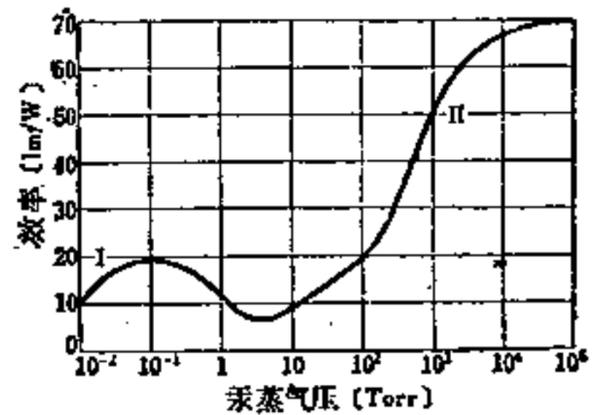


图6-39 汞灯的汞蒸气压与效率的关系

(汞蒸气压高, 光效上升。I: 低压汞灯; II: 高压汞灯)

$$n_k = n_0 (g_k/g_0) \exp(-eV_k/kT) \quad (6-1)$$

式中 n_k 、 n_0 是 V_k (eV) 能级和基态能级的原子浓度； g_0 、 g_k 是统计重量， k 是玻尔兹曼常数， T 是温度 (K)。

另外，关于电离，可用下面的 Saha 公式计算。

$$\frac{n_i n_e}{n_0} = 4 \frac{(2\pi m_e k)^{3/2}}{h^3} T^{3/2} \exp(-eV_i/kT) \quad (6-2)$$

式中， n_i 、 n_e 是离子和电子浓度； m_e 是电子质量， h 是普朗克常数， V_i 是电离电位。

观察高压汞灯，可以发现汞在发光管的中心部分发出强光，其温度分布如图 6-40 所示，中心部分 6000K，管壁部分降至大约 1000K 以下。象这样的收缩放电，由于扩散而产生的能量损失可以忽视，输入能量是通过辐射和从中心向管壁方向的热传导而散失。由于单位弧长的传导损失 P_c 可近似地视为定值，所以辐射能量 P_r (W/cm)，相对于输入能量 P (W/cm)，可大致符合下式：

$$P_r = 0.72(P - P_c); P_c = 10W/cm \quad (6-3)$$

从上式可见，总辐射效率仅为输入能量 P 的函数 (图 6-41)。

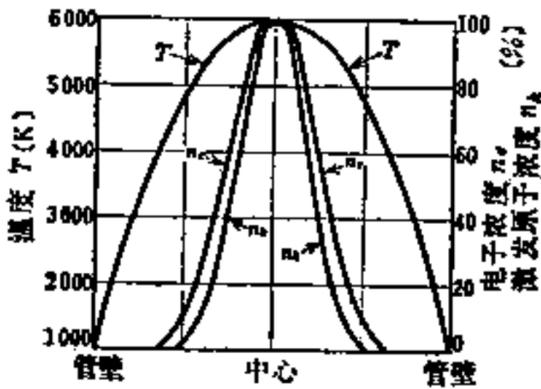


图6-40 高压汞放电的温度分布、电子浓度分布和激发原子浓度分布 (放电中心部分达6000K，管壁部分降至1000K)

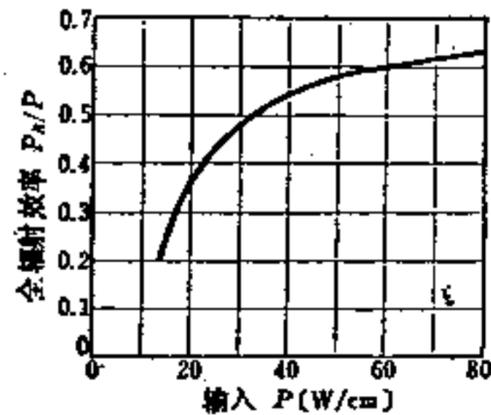


图6-41 相对于单位长度的输入功率 P 的总辐射效率 (由式(6-3)计算而得)

在式 (6-2) 中， n_e 是给定的，又因为电子的迁移率与汞密度成反比例，所以放电的电位梯度 E ，可以表示为输入功率 P ，汞量 m 和管径 d 的函数，在设计灯时，用以求得充汞量。

$$E \propto \frac{P^{1/2}}{(P-10)^{1/3}} \cdot \frac{m^{7/12}}{d^{3/2}} \quad (6-4)$$

汞的各能级的激发原子的浓度，由于用式 (6-1) 决定，如果给定温度和跃迁几率，各谱线的强度则可求出。在高压汞灯中，253.7nm 共振线被吸收，可见谱线的强度增加。主要可见谱线有：从 7.37eV 能级跃迁的 404.7nm、435.8nm、546.1nm 和从 8.85eV 能级跃迁的 577.0/579.0nm。

(3) 结构、材料 (参见图 6-42) 高压汞灯的发光管，必须采用耐高温、高压的透明石英玻璃。灯内充汞量要保证在灯工作时，能完全蒸发，并能达到所要求的灯管电压。同时充入 20 毫的氩气，充氩的目的，是为了降低启动电压并具有保护电极的作用。在发光管两端，采用铝箔封接电极。用钨作主

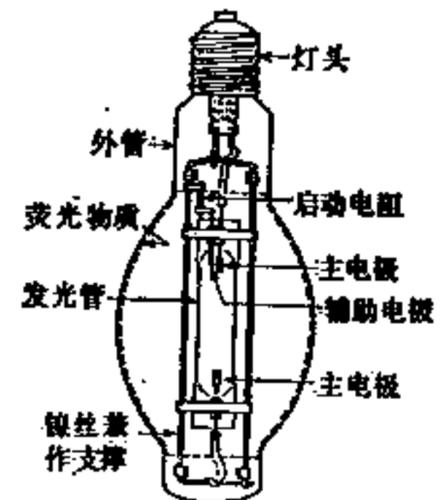


图6-42 高压汞灯的结构

电极，并在其中充填有碱土类氧化物等电子发射物质。另外，为了使启动容易，设置辅助电极。电极不仅决定灯的启动特性和寿命，也可能成为噪声干扰的原因，所以在设计、制造时要加以注意〔28, 29〕。

高压汞灯的外管，除具有保持发光管的工作温度，防止金属零部件的氧化，切断有害的紫外线的作用以外，还能作为涂敷荧光粉和反射型灯的反射膜的基底，也具有吸收特定波长的滤光器的作用。而且，加装外管，可使灯使用方便。通常在外管内充进数百毫的氮气。多数情况是利用在荧光汞灯的外管内涂敷的荧光粉，来补充汞谱线在红光区域发光的不足〔25〕。对于长波紫外线（以 365nm 为主）的激发，还必须保证即使在 250~350℃ 的高温下，仍能有良好的发光效率。目前，稀土类荧光粉（如 $YVO_4: Eu$ ）被广泛采用。

通常使用机械式的螺口灯头。

(4) 光电特性〔25〕

(a) 启动、再启动 给灯施加电压，立即在主电极和辅助电极间产生辉光放电，瞬时，即转移到主电极间，形成弧光放电。由于放电热量，汞徐徐蒸发，数分钟后，全部蒸发并达到稳定状态。随着汞蒸发，灯特性变化情况如图 6-43 所示。把达到稳定状态的时间称为启动时间。

当环境温度很低时，汞的蒸气压下降，所以启动困难。当给灯施加 200 V 电压时，若环境温度在 -15℃ 左右，仍有可能启动，若温度再低，则必须采取措施，即提高镇流器的二次电压，在主辅电极间或主电极间产生弧光放电，使灯管加热〔30〕。

当高压汞灯熄灭后，必须等到灯管冷却，汞蒸气压降下来，才能再点灯。把从熄灯到再点燃的时间，称为再启动时间，在 JIS〔31〕中规定，再启动时间为 10 分钟以下。如果施加高压脉冲，即使在高温下，汞蒸气压高的情况下，也能再启动，将这样的点灯装置和灯组合，能够瞬时（再启动）点灯的汞灯已经问世〔32〕。

(b) 电源电压变动的的影响 图 6-44 表示当电源电压变化时，灯特性变化的情况。这些变化因镇流器不同而异。因为高压汞灯是非饱和型灯，所以与后面所述的金属卤化物灯和高压钠灯相比，相对于输入功率变化的灯电压、光效、光谱分布的变化较小。

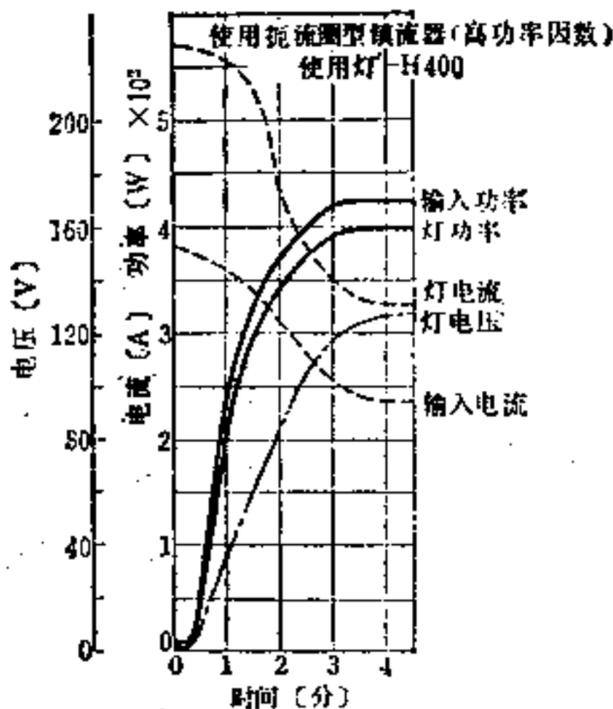


图6-43 高压汞灯的启动特性

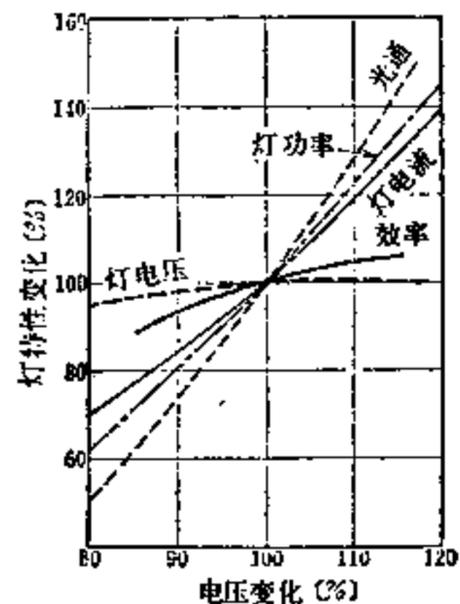


图6-44 用扼流圈型整流器点灯时电源电压变化的影响

(c) 光学特性 高压汞灯的发光效率, 随着单位弧长的功率的增大而提高。但是, 管壁负载过大会缩短寿命, 所以, 要根据电源电压、灯管的寿命和发光效率适当地选择灯管的管压降。使用荧光粉可以将紫外辐射转换为可见光, 有的还可以进一步提高光效, 如使用 $YVO_4: Eu$ 荧光粉, 光效就可提高10%。

涂敷荧光粉的主要目的, 是改进灯的显色性, 如使用 $YVO_4: Eu$ 荧光粉, 可以增加红光, 使显色指数从25提高到40~45。另外, 当和蓝绿色荧光粉混合使用, 可得到与白色荧光灯相同的光色; 当和深红色荧光粉混合使用时, 可得暖白色^[33, 34]。图6-45表示典型的光谱分布, 图6-46表示能量分配^[35]。

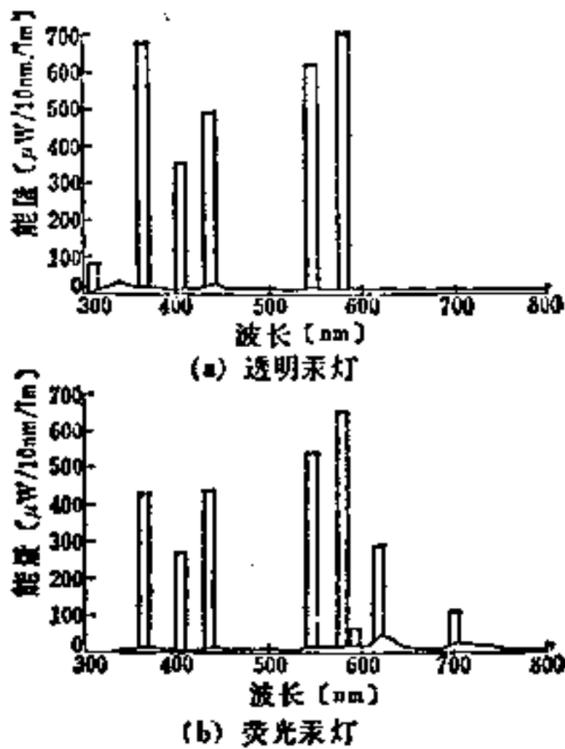


图6-45 高压汞灯的光谱分布

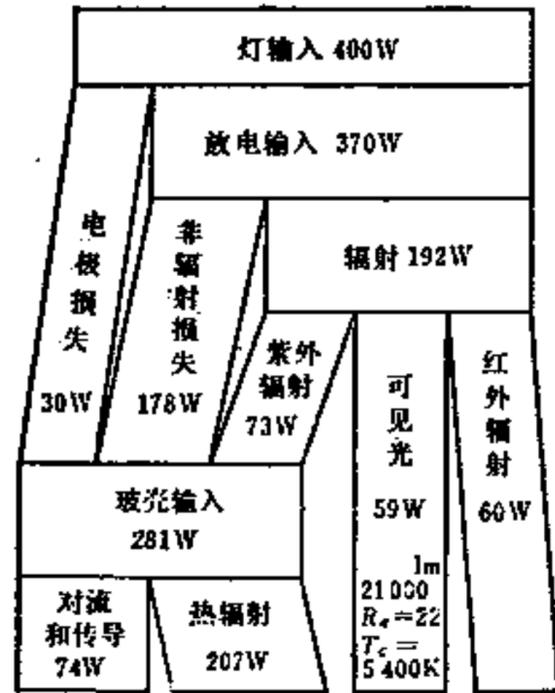


图6-46 高压汞灯的能量分配^[12]

(d) 寿命 高压汞灯的寿命, 取决于由于管壁黑化而产生的光衰和由于电极损耗而使启动电压的升高, 并与灯的点灭次数、发光管的设计、电流波形等因素有密切的关系。一旦电子发射物质损耗尽, 除引起管壁急剧黑化外, 同时也使启动电压升高, 直至灯不能启动。但是高压汞灯的寿命非常长, 可达12000小时, 是可靠性最高的光源之一。

(5) 种类

(a) 普通照明用高压汞灯 普通照明用高压汞灯, 主要根据有无荧光粉来区分(H型, HF型), 将涂荧光粉的称为荧光汞灯。根据荧光粉的种类, 又可作更细的分类。在BT型(或B型)外管涂敷稀土类荧光粉的灯(HF-X型)应用最广。

在外管上加有反射膜的反射型汞灯(HR型), 可作为简便的投光照明光源使用。涂敷荧光粉的反射型荧光汞灯(HRF)^[31], 根据光束的宽窄, 又有窄角N、中角M、广角W之分。

另外还有具有装饰效果的球型灯, 玻璃具有特殊吸收特性的黄色灯^[36]和钨灯^[37]等。按点灯方式, 又有能在低温下燃点的寒冷地区用灯^[30]和能瞬时燃点的灯。

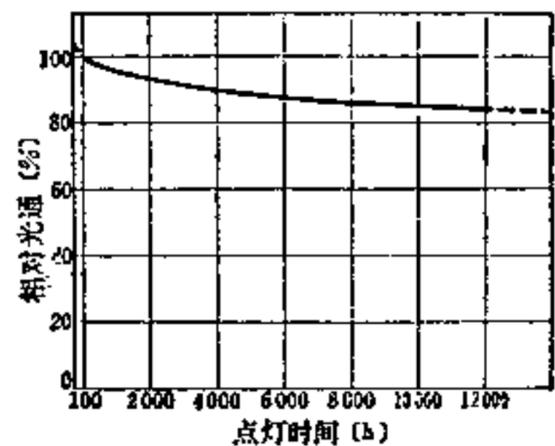


图6-47 高压汞灯的工作特性

(b) 普通照明以外的高压汞灯 [38, 39] 除普通照明以外, 高压汞灯也获得广泛的应用。如适合于300~500 nm 的重氮感光纸的复印用汞灯, 各种检查、广告、显示器用的黑光灯, 具有红斑效应的医疗用太阳灯, 作尼龙原料等的光合成用的光化学用汞灯, 在紫外线涂料、墨水等聚合干燥的紫外线硬化用的汞灯等。

(6) 自镇流汞灯 [40] 在外管内将灯丝和发光管串联的灯, 不必再用镇流器。这种灯的光效低于普通高压汞灯, 大致取决于灯丝和发光管的消耗功率的比例以及发光管的效率。灯丝也能发光, 在灯进入稳定工作时, 低于数流明/瓦, 对灯的光通作用率很小。这是因为, 为了降低启动时发光管的电压, 在灯丝上就要消耗过大的电压, 这点决定了灯丝的寿命, 所以, 即使牺牲光效, 也要降低灯丝的温度, 以延长其寿命。要提高发光管所传功率的比例, 就必须提高发光管的电压, 但电压过高, 灯就很容易坏。

图6-50表示自镇流汞灯的启动特性。在启动时, 灯丝发出较大的光量, 这也是自镇流汞灯的特点。

自镇流汞灯与普通高压汞灯一样, 也分透明型、荧光型、反射型、球型等多种类型, 象白炽灯那样按使用电压加以区别。200 V 级的, 与普通高压汞灯相同, 在启动时, 利用辅助电极放电, 100 V 级的, 用热阴极代替辅助电极, 与一个主电极相接, 通电加热后, 由于双金属的开放而启动。

自镇流汞灯使用方便, 寿命长, 在室内照明方面, 获得了广泛的应用。

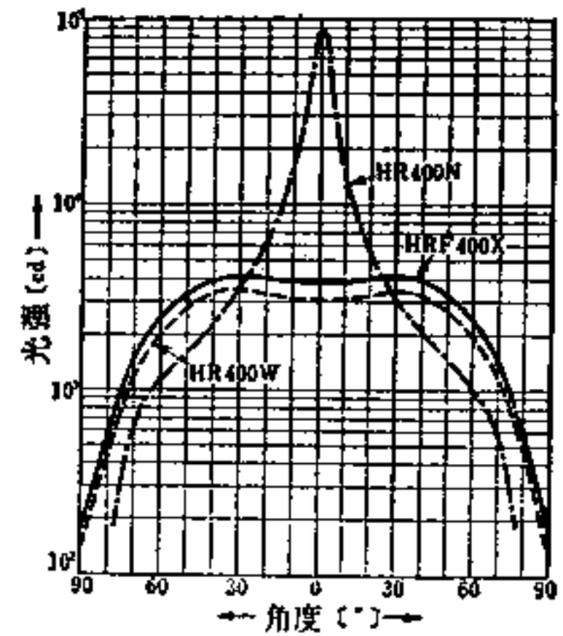


图6-48 反射型汞灯的配光曲线

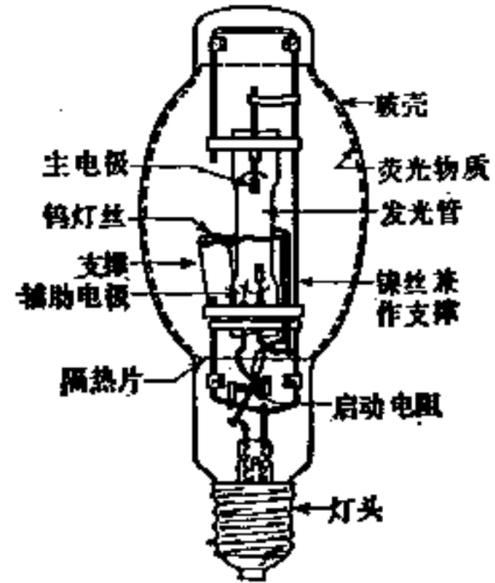


图6-49 自镇流汞灯的结构

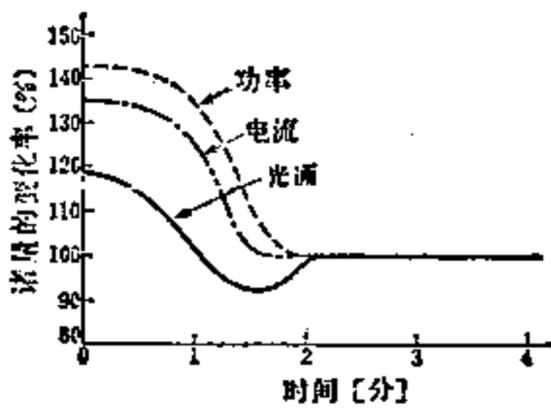


图6-50 自镇流汞灯的启动特性

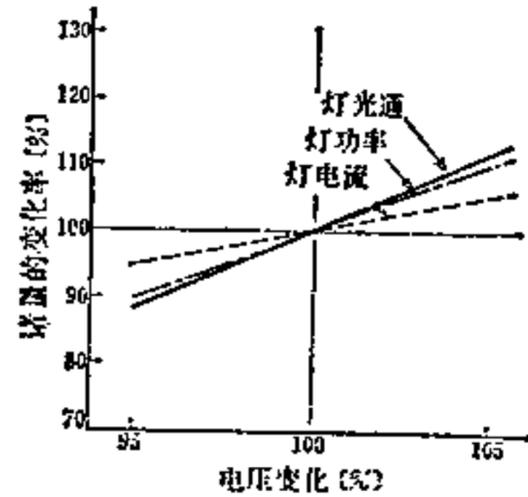


图6-51 自镇流汞灯的电压变动特性

6-3-2 金属卤化物灯

(1) 结构和工作 金属卤化物的结构, 与高压汞灯类似, 在发光管中, 除充填汞和稀有气体外, 还充填发光的金属卤化物 (以碘化物为主)。将发光金属制成卤化物的形式, 有如下优点:

(1) 为了使金属发光, 放电管内的金属蒸气压必须要高, 一般金属的卤化物的蒸气压

比金属单体要高得多。

(2) 一般金属也和碱金属一样,其单体在高温下极易和石英玻璃反应,而它的卤化物却能抑制这个反应。

灯在工作中,充入的金属卤化物的部分或全部蒸发,由于发光管内的放电温度分布不同,呈现着分解、化合的平衡反应,所以管内同时存在着卤化物分子、金属原子和卤素原子。在高温电弧的中心部分,几乎所有的金属卤化物都被分解成金属原子和卤素原子,由于金属原子的激发而产生光辐射。

正如图6-52所示,由于一般的金属卤化物比汞难蒸发,所以在灯工作时,金属卤化物的分压比汞的蒸气压要低,而且,电弧中心部分的发光金属原子的密度,同样也比汞原子的密度要小,但因为通常选择的发光金属,其激发电位比汞的激发电位要低,所以在放电辐射中,金属光谱辐射占支配地位。

在金属卤化物灯中,利用汞蒸气压,可以获得必要的放电电位梯度,同时还起到缓冲气体的作用。

图6-53为一般金属卤化物灯的结构。发光管与高压汞灯相同,采用石英玻璃,为了提高管壁的工作温度,玻壳设计成小型,在管端部分,为了控制最冷点温度,涂以保温膜。

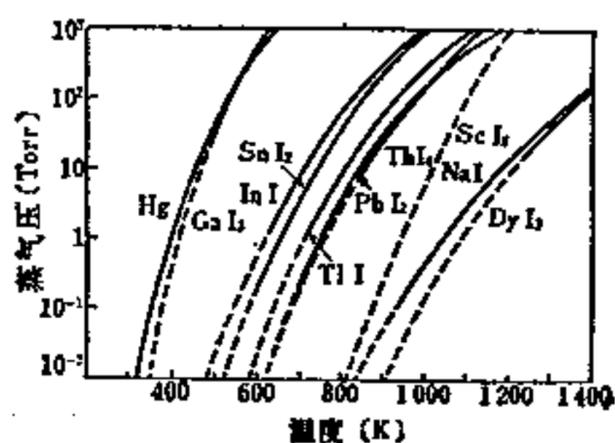


图6-52 金属卤化物的蒸气压^[41~47]

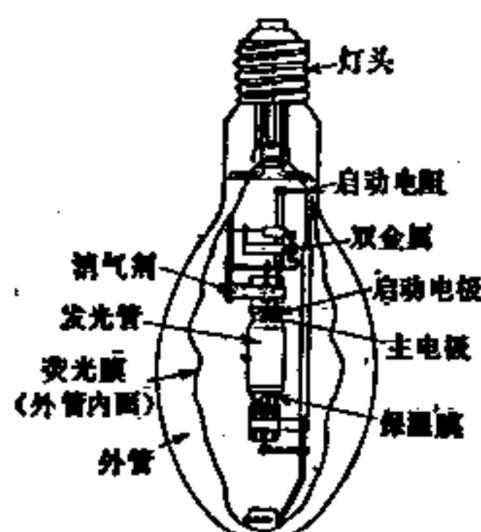


图6-53 金属卤化物灯的结构举例

在使用钠等碱金属的卤化物灯中,其发光管的封接部分,为了防止在主电极-启动电极间产生电解,可在灯工作时,将启动电极从电气回路中切断,或是配置可使启动电极与邻近的主电极具有相同电位的双金属片开关。

另外,由于从金属支架(导线)上发出的光电子,会吸附在发光管的外壁上,从而形成电场,在此电场作用下产生的钠离子,就会通过石英玻璃向外扩散,为了防止钠离子消失到发光管外面去,在外管内充入惰性气体,同时将与发光管平行的金属导线,穿上耐热绝缘套管,或是采取弯曲成与发光管远离的结构。

在不用碱金属的金属卤化物灯中,就没有必要作这样的考虑。为了防止电解,双金属片开关不设置在灯内。为了提高外管内的热绝缘性,使灯的外管保持高真空。

对于没有设置启动电极的灯,可设计能产生脉冲电压的启动灯的镇流装置。

作为普通照明以外用途的金属卤化物灯,例如投影机用灯和近紫外光化学应用灯,要结构小型、紧凑,可采用管状玻管或不用外管。后者,为了防止灯工作时产生臭氧,通常采用不透200nm紫外线的玻璃,即所谓无臭氧石英,作发光管材料。

(2) 光学特性 金属卤化物灯可以根据金属卤化物的组成来分类,普通照明用灯的代

表性的组成如下:

- (1) NaI-TlI-InI₃[⁴⁸]; (2) ScI₃-NaI[⁴⁹];
- (3) DyI₃-TlI-InI₃[⁵⁰]; (4) SnI₂-SnBr₂[⁵¹].

(1) 发出 Na(钠)(589nm)、Tl(铊)(535nm)和 In(铟)(411、451nm) 的强谱线, (2)和(3)各自发出 Na 和 Tl 的强谱线, Sc(钪)和 Dy(镝)在可见光波长范围内, 发出许多连续的弱谱线。

各种类型的金属卤化物灯, 其紫外辐射比高压汞灯弱, 而灯的光效却高, 因为在可见部分辐射均匀, 所以显色性也很好。(4) 是利用卤化锡分子发出的连续光谱, 尽管效率低, 但显色性非常好。

图6-54和表6-10表示各种灯的光谱分布和色温、平均显色指数。

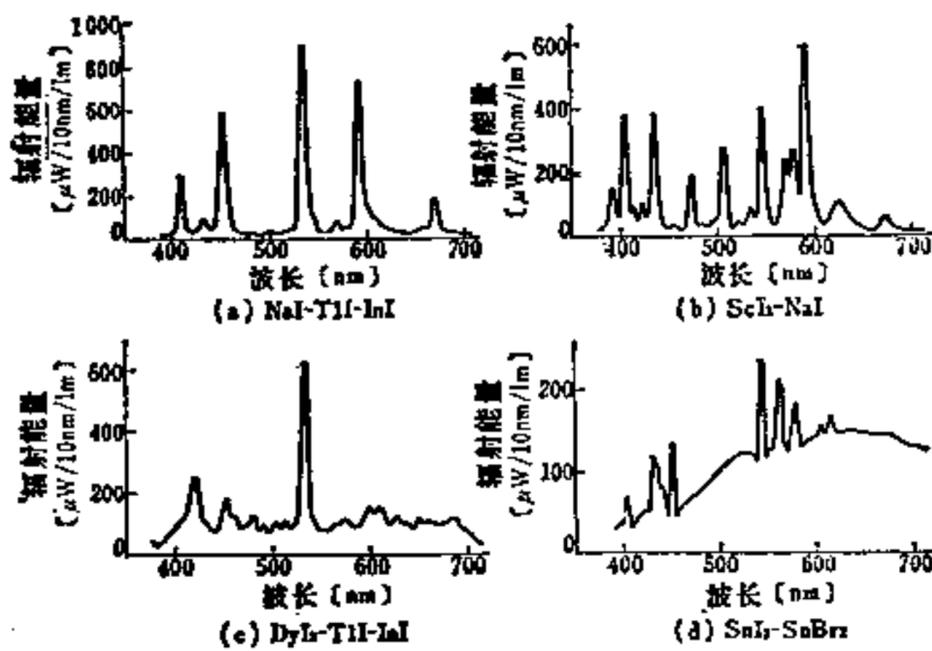


图6-54 普通照明用金属卤化物灯的光谱分布

表6-10 金属卤化物灯的色温和平均显色指数

	色温 (K)	平均显色指数 R _a
Na-Tl-In系	4200~5500	65~70
Sc-Na系	3800~4200	65~70
Dy-In系	6000	90
Sn系	5000	92

光化反应灯利用 Ca(钙)(403、417nm)和 Pb(铅)(364、368nm)的光谱, 近紫外光化反应光源的效率, 约为高压汞灯的2倍。图6-55和表6-11分别表示这种灯的光谱分布和能量分配。

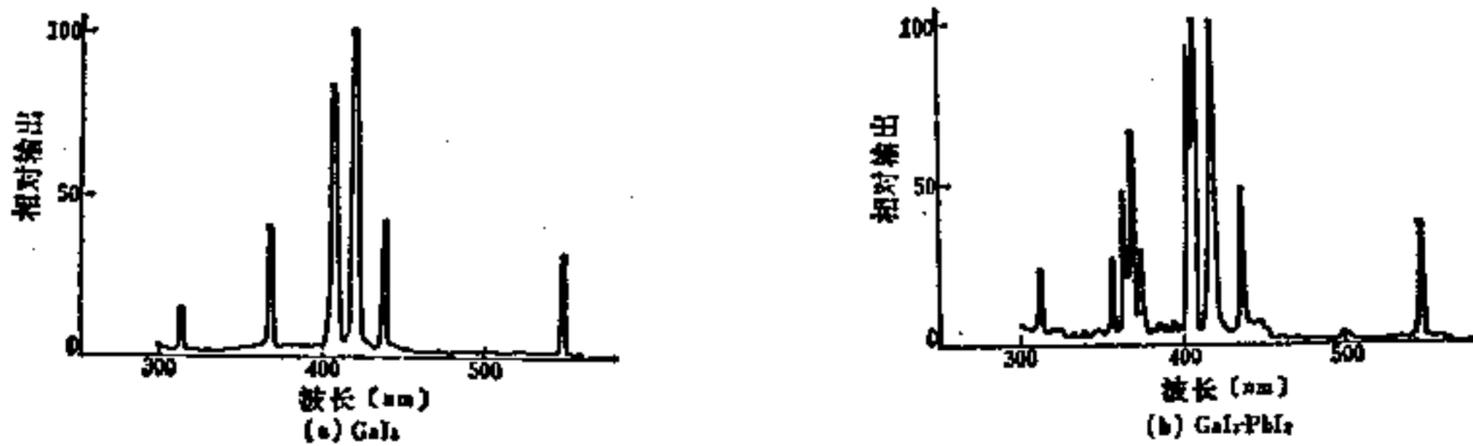


图6-55 光化反应用金属卤化物灯的光谱分布

(3) 启动特性 金属卤化物灯的启动电压从本质上就比高压汞灯高, 其原因如下:

(1) 在高压汞灯中使用的发射性能好的碱土金属氧化物, 很容易和卤素反应, 故不能使用。所以, 用作金属卤化物灯的电极发射材料, 通常为钪和稀土金属氧化物, 其逸出功比碱土金属高。

表6-11

高压放电灯的能量分配 (除去外管) (输入功率400W)

灯 的 种 类	电极损失 (W)	非辐射损失 (W)	辐 射 (W)			
			紫 外 380nm 以下	可 见 380~760nm	红 外 760~2600nm	
高压汞灯	30	178	73	59	60	
金属卤化物灯	Na-Tl-In系	36	154	15	97	98
	Sc-Na系	38	142	46	136	38
	Dy-Tl系	36	108	24	128	104
	Sn系	40	148	12	92	108
高压钠灯	24	176	2	118	80	

(2) 因为通常金属氧化物的吸潮性较强,所以在制灯时水分很容易被带进发光管内,由于水分的分解而产生的氢和氧,对灯的启动有很坏的影响。

(3) 金属卤化物分解出来的游离的卤素分子,同样对灯的启动有很坏的影响。

为此,对于金属卤化物灯的启动,采取了若干区别于高压汞灯的措施,即:

(1) 镇流器的二次空载电压,要设计得比高压汞灯高;

(2) 在镇流器中,设置产生高压脉冲的启动装置;

(3) 作为灯的启动气体,使用氩、氙等具有潘宁效应的混合气体,代替通常在高压汞灯中使用的氩气。

除此以外,对灯的启动电极,也要采取和高压汞灯不同的结构和方式,将各种方法组合使用,可以获得多种点灯方式。

在灯的启动方面的特性,特别是灯达到稳定工作状态的时间,和高压汞灯大致相同,但因为其发光管的管壁工作温度很高,在再启动时间上,由于点灯方式不同,比高压汞灯要长些。

(4) **寿命和工作过程** 金属卤化物灯的管壁工作温度高于高压汞灯,在工作时,石英玻璃中含有的水分等不纯气体很容易释放出来,还有金属卤化物分解出来的金属和石英玻璃缓慢地进行化学反应,游离的卤素分子等,都能使启动电压上升。所以,金属卤化物灯的寿命比高压汞灯短。

另外,因为在电极中使用的电子发射物质的性能不同,电极物质的蒸发、溅散也比高压汞灯严重,电极物质与金属卤化物之间也能起化合反应。所以,金属卤化物灯的工作特性就不如高压汞灯好。

(5) **点灯位置** 金属卤化物灯与高压汞灯不同,当灯的点灯位置变化时,灯的光电特性也有很大的变化。某种金属卤化物,在灯工作时,它的一部分以液态残存在发光管的最冷点部分,由于点灯位置的变化,最冷点的温度也跟着变化,与此相对应,它的金属卤化物的蒸气压也发生相应的变化,于是,引起灯电压、光效和光色也跟着变化。在灯工作时,即使金属卤化物完全蒸发,但由于点灯位置的不同,而使其在发光管内的密度分布发生变化,所以,仍然会引起特性的变化。为了解决这样的问题,在金属卤化物灯中,都指定有如灯头向上垂直、水平、灯头向下垂直的点灯位置,在结构设计时,要保证按指定位置点灯即可获得最佳的特性。

6-3-3 高压钠灯

(1) **结构和工作**^[54] 图6-56表示灯的结构。发光管本体使用对于高温、高压的钠蒸

气具有稳定的化学性能的半透明多晶氧化铝陶瓷管，或者是部分透明的单晶氧化铝管（蓝宝石管）。在管两端氧化铝陶瓷的端帽（也有用铌的）是用 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 系的胶合剂封接，而支持电极的铌管是在端帽部分封接。在管内，用作发光物质的钠和作为缓冲气体的汞，是以钠、汞齐的形式过量充入，氙作为辅助启动用，或是采用氙氩潘宁气体（仅低压启动型灯），充量约为15~25毛。成品灯是将这样的发光管置于真空硬质玻璃外管内。

通常的灯，为了获得最高光效，采用内径小的发光管（150W~1kW的灯约为4.8~11.5mm），灯工作时的钠蒸气压，设计在约30~100毛。但是，由于钠灯的蒸气压是由管端最冷点温度所决定，即所谓的饱和蒸气压型灯，所以，管内蒸气压也就是灯电压，很易随着点灯条件和衰老程度而变化。

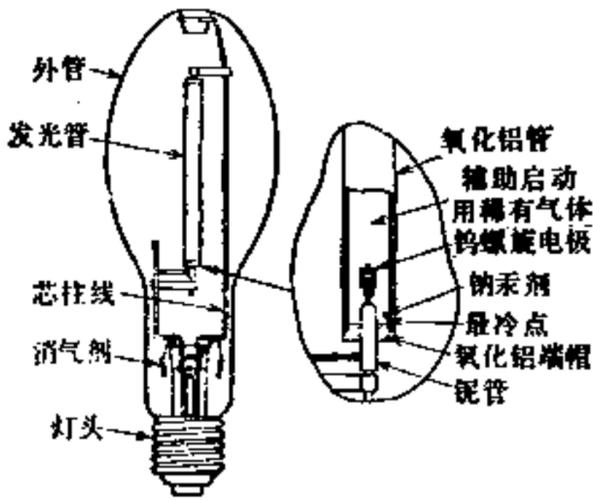


图6-56 高压钠灯的结构

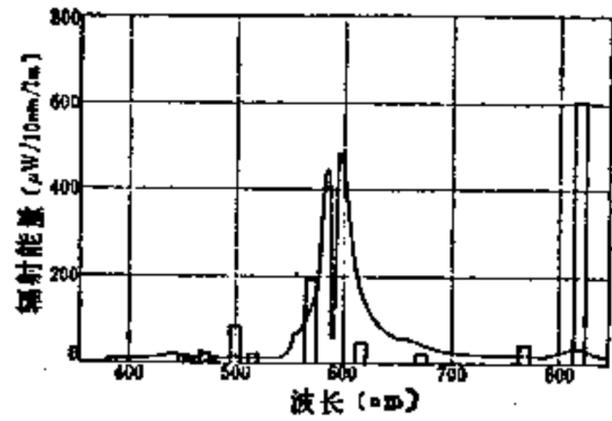


图6-57 高压钠灯的光谱分布

(2) 发光特性 图6-57表示光谱分布，在低压钠灯中，发光几乎由钠D线（589.0nm和589.6nm）构成，在高压钠灯中，由于自吸收而使D线近傍的发光减弱，可是，在D线两侧因为连续光谱而使发光加强，这个发光强度随着钠蒸气压和管径而增大^[55~57]，在这种情况下，放电电弧的辐射决定于到达管壁的钠粒子的吸收-再辐射过程。一般象这样的光谱加宽，是由于钠原子的相互碰撞而使共振加宽(resonance broadening)^[58]。但是，也有人指出在高气压状态下，分子状态的钠粒子，也能引起共振加宽^[56]。再者，充进管内的汞，在钠蒸气放电下，放电电弧的等离子区温度，在管中心轴上约为4000~4600K或稍低^[58,59]，并且汞的激发电位比钠高，所以几乎不存在汞谱线的辐射。但是，光谱分布也受汞蒸气压的影响，也就是汞蒸气压升高时，480~540nm的发光减少，另外，670nm附近的发光（与Na-Hg分子有关^[59]）加强，光色向粉红色区域偏移^[56]。

通常灯的显色性，色温约为2000~2100K，平均显色指数 R_a 约为15~30。但是，仅仅用数值是不能充分说明情况的。钠灯的光色与白炽灯色相似的较好的光源实际上除原来用于室外照明外，在工厂、体育馆等室内照明中也被应用。而且，它的显色性随着钠蒸气压和管径的增大而改善，在技术上，要达到色温2300~3000K、 R_a 80~88的指标也是可能的^[56,57]。

(3) 灯光效 高压钠灯的特点是高光效，如400W灯可达115~125 lm/W，其原因正如表6-12所示，与其他灯相比，其辐射视感效率 K 和可视辐射效率 η_v 都比较高。

分析灯效率和放电参数的关系。首先，正如图6-58所示，当钠蒸气压在30~100毛的范围内时 η 达到最高。这时，开始 η 随着蒸气压的上升而增多主要是由于热传导损失减小， η_v 增加，接着 η 降低，主要是由于光谱分布的宽度增加而使 K 值减小的缘故，另外，如提高输

表6-12 各种灯的灯效率和辐射效率

灯的种类	灯效率 η (lm/W)	可见辐射效率 η_e	辐射的视感效率K (lm/W)
高压钠灯	120	0.295	407
白色荧光灯	80	0.23	346
高压汞灯	53	0.14	376

(注: $\eta = K \cdot \eta_e$)

入功率(灯电流), η 会因为 η_e 增大而提高。另外, 增大灯管内径的灯, 在同一色温下, 当功率不变时, η_e 和K同时减小, 则 η 就会降低。当功率提高, 但不超过负载进行工作时, η 变化不大^[57]。总之, 灯光效 η 决定于钠蒸气压和管壁负载两个参数。而汞蒸气压主要是通过灯功率等来影响灯光效。

(4) 启动和工作特性 在通常的灯内充入辅助启动用的氙气, 可提高光效, 不过约需2000V的启动电压。启动方式有二种, 一是在镇流器内安装启动装置, 二是将产生反冲电压的快速开关设置在外管内。前者会使镇流器价格增高, 后者会使启动时间延长, 都是有缺点的。另一方法, 充入氙-氩潘宁气体, 以代替氙气, 并且在管外周设置辅助启动的线圈, 因此, 启动电压就可与汞灯相同, 降低到180V(正弦波有效值)以下, 在实际当中已被推广使用。采用这种方式的灯, 其光效与充氙气的灯相比, 降低约10~15%。为了省能, 适于用这种灯和以往的汞灯置换使用。

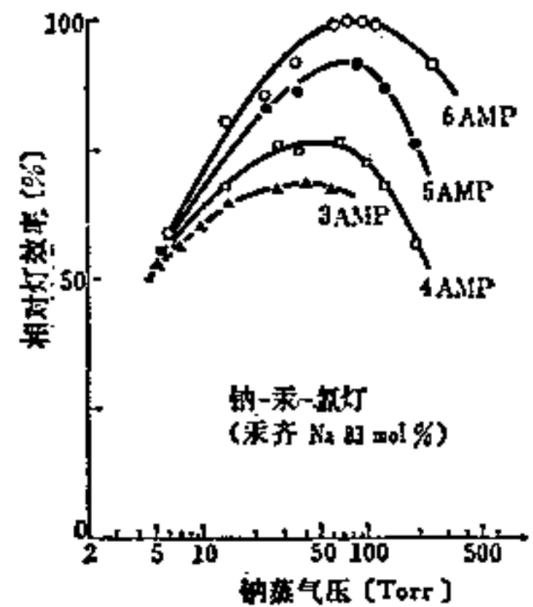


图6-58 灯效率和钠蒸气压及灯电流的关系

钠灯在研制初期, 由于发光管裂纹漏气和灯电压上升而不能燃点, 其寿命只有3000小时左右。后来, 由于氧化铝管和氧化物电极材料的改进, 以及发光管设计的改进, 其寿命可长达12000小时^[61]。由于钠灯采用氧化铝管, 与汞灯等相比, 具有光衰小的特点。

但是, 在使用氧化铝陶瓷管的灯中, 当管壁温度高达1200°C以上时, 从发光管上蒸发出金属铝和低价氧化铝, 使外管黑化, 同时, 充入的钠和氧化铝陶瓷反应, 生成β-氧化铝 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$), 使灯内的钠量大大下降。

因而, 灯的管壁温度应设计在约1150°C以下 (壁负载约为21W/cm²以下)。

6-4 其它放电灯

6-4-1 低压钠灯^[62, 63]

(1) 灯的结构 图6-59表示发光管的结构。发光管的玻壳系采用不怕钠蒸气侵蚀的特殊玻璃制成。在发光管内, 设置多个隆起的小窝, 充入的钠, 分散贮存在各个小窝中。这样, 点灯时管内各处的钠蒸气压就比较均匀, 同时, 钠在管壁上分布较广, 可以防止光衰。在发光管内, 为了辅助启动, 充进在氙里混进少量氩的潘宁气体。为了缩小灯的体积, 通常将发光管弯成U形。外管内装支架, 以支持发光管, 同时, 为了减少由于传导、对流产生的热损

失，对发光管保温，外管内保持高真空。为了防止辐射损失，在外管内壁涂敷具有良好的透可见反红外的氧化钨膜。这样，可以充分有效地利用从发光管本身发出的热量，并使管壁温度保持在约 260 °C。

使用插脚式灯头，以保证灯的方向性。

(2) 光学特性 低压钠灯的发光，如图6-60所示，是以波长589nm 的黄色D 线为主体。与其他光源相比，灯光效非常高，目前市售灯可达175lm/W。灯的光效受由管壁温度决定的钠蒸气压支配，当钠蒸气压为 4×10^{-3} 毛时，光效达到最高值，此时相对应的管壁温度为260°C。钠蒸气压低时，激发原子不足，过高时光的自吸收增大，随之光效下降。

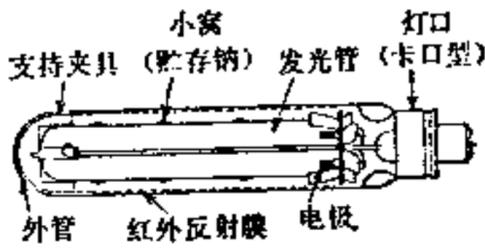


图6-59 低压钠灯的结构

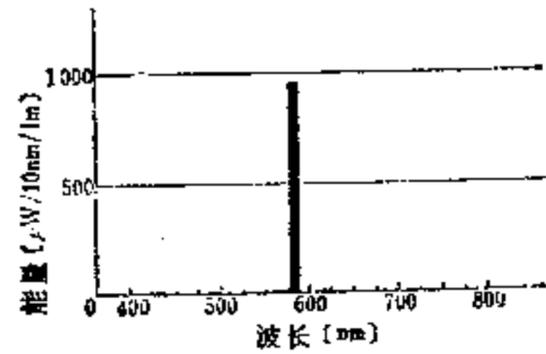


图6-60 低压钠灯的光谱分布

因为低压钠灯发出的光是单色光，所以显色性非常低，可以使人清晰地看出色差小的物体，而且，与其他光源比较，即使在烟雾中也难以生成光幕，透视性能非常好。结合高光效的特点，所以低压钠灯主要用于道路照明。

(3) 启动特性 低压钠灯的发光管内，充有钠、作为辅助启动的氖和少量的氩，利用潘宁效应设计成可使启动变得容易的灯。灯的亮度，如图6-61所示，在点灯后约10分钟即可大致达到额定值。

在灯刚点着后，由于辅助启动用氖气的放电，光色呈橙红色，待管壁温度上升，钠蒸气压上升，移向钠放电约7分钟后，就发出以钠发光为主的黄色光。

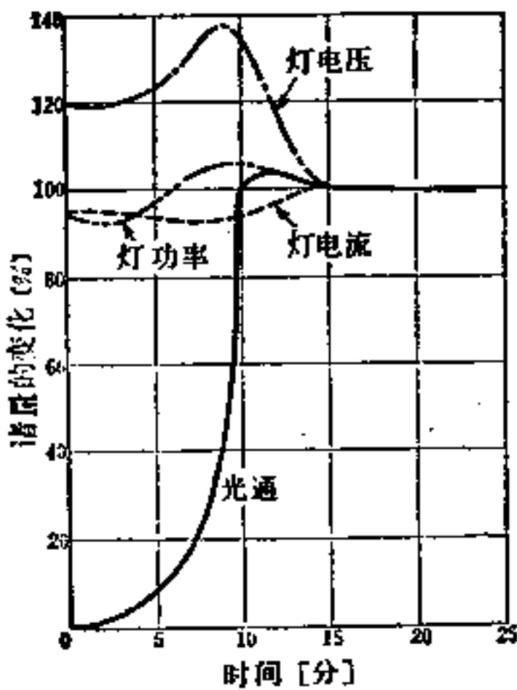


图6-61 低压钠灯的启动特性

(4) 寿命和工作过程 低压钠灯的寿命，因使用过程中的点灭次数不同而异，一般约9000小时，随着点灭次数增加而缩短。

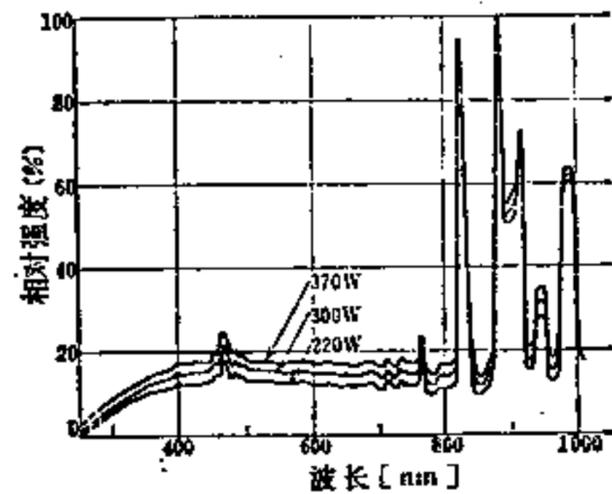


图6-62 功率变化时的光谱分布的变化

灯的光衰比其他光源小，在 9000 小时后，尚能维持 80~85% 的光通。

(5) 点灯方向 低压钠灯发光管较长，而且点灯中的钠的移动，对它的特性和寿命都有影响，所以要规定点灯方向，以防止钠的移动。即规定 NX35 以外，允许水平 $\pm 20^\circ$ 的范

围。因为Nx35发光管较短，所以允许水平±3%的范围。

6-4-2 氙灯

(1) 灯的特性 利用氙气放电的灯，具有以下的特点：

(1) 光谱分布如图 6-62 所示，从紫外到可见光，近似光的连续光谱，有近红外的强谱线；

(2) 连续光谱部分的光谱分布，几乎与灯输入功率变化无关，在使用期间，也几乎不变，色温约为6000K；

(3) 亮度非常高；

(4) 灯一燃点即可达到稳定的光输出，灭灯后，可瞬时再燃点。

氙灯可分为短弧氙灯、长弧氙灯和氙闪光灯（脉冲氙灯），如表 6-13 所示，应用范围很广。

表6-13 氙灯的用途

点灯方式		正常点灯		频闪点灯
电弧形状				
短弧	近似点光源 高亮度	复印机光源	制版光源	复印机曝光 定影光源 照像摄影光源 闪光仪光源 激光激发光源 信号光源 其他
		太阳模拟器光源 白色标准光源 分光计用光源	聚光灯 放大镜光源 其他	
长弧	不要镇流器 单灯 大光通量	广场、竞技场照明光源 环境试验器用光源 其他		

关于氙气放电灯的输入功率和输出功率的关系，通过实验求出从输入功率中减去电极位降的有效功率和等离子区的光强的关系（单位弧长），如图 6-63 所示。

光强 (I) 和灯电流 (I_L) 有如下关系：

$$I \propto I_L^n \tag{6-5}$$

$$n = 1.82 - 0.01P \quad (\text{短弧氙灯}) [64]$$

$$n = 1.90 \pm 0.03P \quad (\text{长弧氙灯}) [65]$$

式中，P 表示氙气的工作压力（单位 atm）

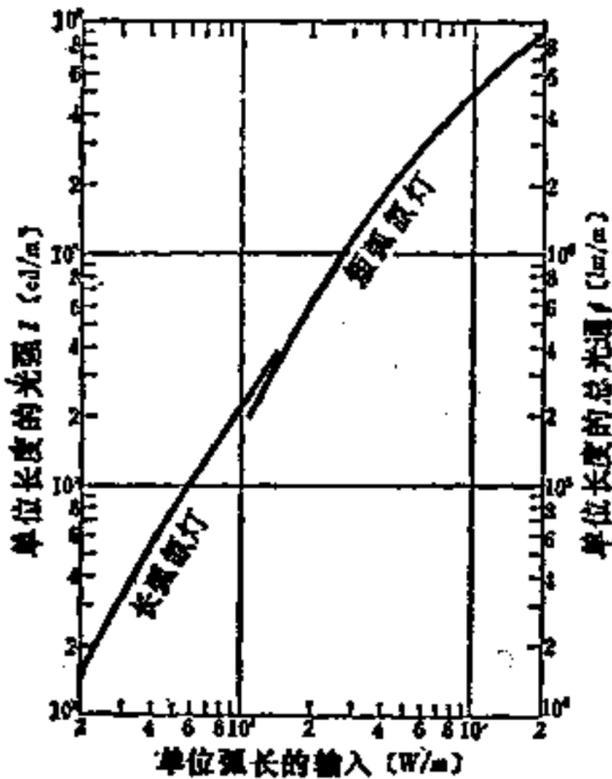


图6-63 氙灯的功率和光强、总光通的关系

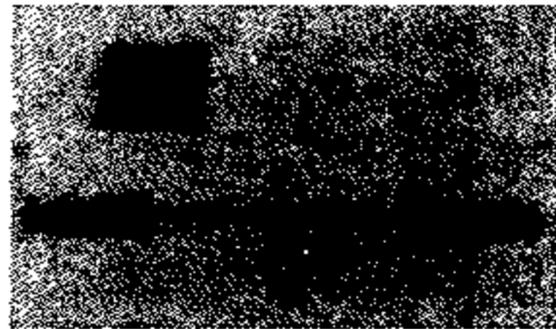


图6-64 短弧氙灯(1000W)

(2) 短弧氙灯 如图 6-64 所示，在石英玻壳中封进阳极和阴极（大的为阳极），极距几毫米。充进几个气压，工作气压可达 20~40atm。点灯中的亮度分布如图 6-65 所示。由

于在阴极前端附近,存在高亮点,故可作点光源使用,市售商品规格从30W~30kW。点灯方向,垂直或水平皆可,当垂直燃点时,阳极在上,置放于灯具内。

(3) **长弧氙灯** 长弧氙灯是在石英玻管的两端封接电极,充气压力在1atm以下。因而,与短弧氙灯相比,其连续谱线比线光谱部分弱。

这种灯的特点是功率可以做得很大,具有正特性,所以,只要启动装置,不必使用镇流器就可以点灯。

(4) **氙闪光灯** 这种灯大体上像长弧氙灯,是利用短时间(几毫秒以下)的放电发光。根据使用目的,其玻管可为直管形、环形、螺旋形,在石英管内充入几十至几百毫的氙气。

6-4-3 超高压放电灯

(1) **超高压汞灯** 短弧超高压汞灯,工作时的汞蒸气压达到10~50atm。这是一种高亮度光源,如图6-66所示,极距在0.2至几毫米之间,平均亮度达到几千 cd/m^2 。其规格从50W~1kW,已系列化,用于光学仪器、光刻、照相、制版等方面。

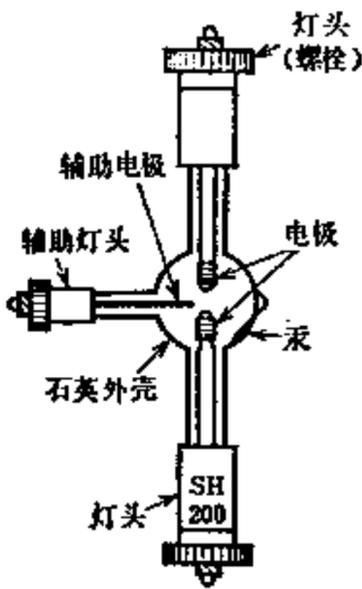


图6-66 超高压汞灯(SH200·空冷)

(2) **超高压金属卤化物灯** 短弧金属卤化物灯,采用小型玻壳,极距小,由于灯的壁负载大,所以在灯工作时,金属卤化物的蒸气压很高。因而,灯的效率,显色性好,寿命可达数百小时至1000小时。

这种灯在多数情况下,配合光学系统使用,为缩小灯的尺寸,通常不用外管。图6-69表示短弧金属卤化物灯的结构[67]。近来,将单端形的发光管,装配在密闭光束型用的玻壳内,充以稀有气体,以保护发光管[67]。

短弧金属卤化物灯,通常

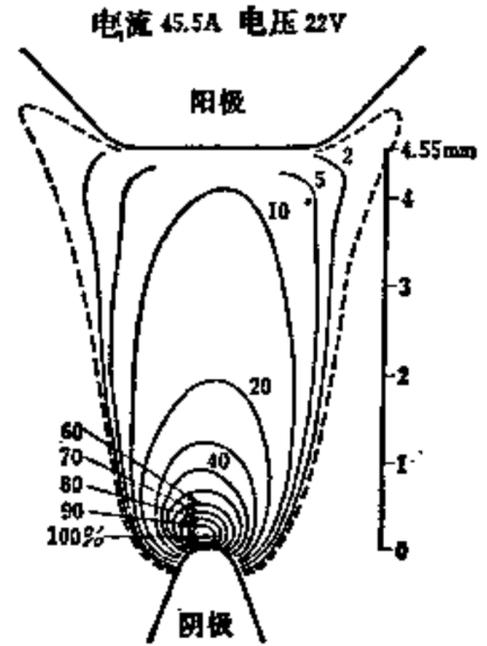


图6-65 1000W短弧汞灯的亮度分布

直管形超高压汞灯,工作时的汞蒸气压达50~200atm。这种灯如图6-67所示,发光管采用厚壁石英玻璃管制成双重管式,发光管分为直接水冷式或风冷式。2~4kW的超高压汞灯,主要用作照像制版用光源。

超高压汞灯的光谱分布,取决于汞蒸气压。当汞蒸气压愈高,谱线愈宽,连续光谱则愈强。图6-68表示由于汞蒸气压升高而引起光谱的变化。



图6-67 超高压汞灯(SH1200L·水冷)

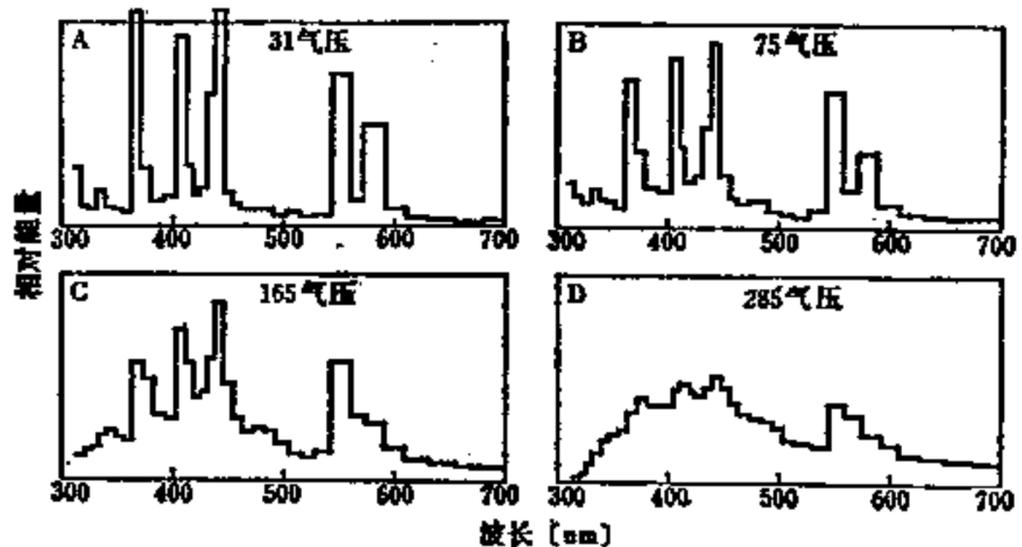


图6-68 汞蒸气压和光谱的关系

充填以下几种碘化物：(1) Na-Tl-Ga；(2) Dy-Ho-Tm；(3) In。

(1) 充 Na-Tl-Ga 的灯，效率约为 90lm/W，具有很好的显色性。如图 6-70 所示，

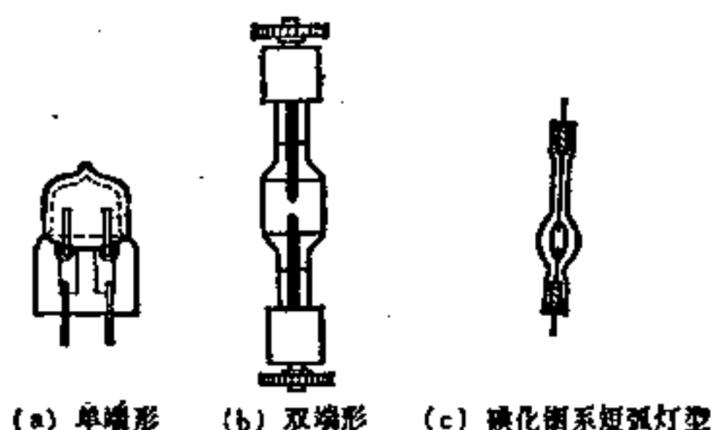


图6-69 短弧金属卤化物灯的结构图

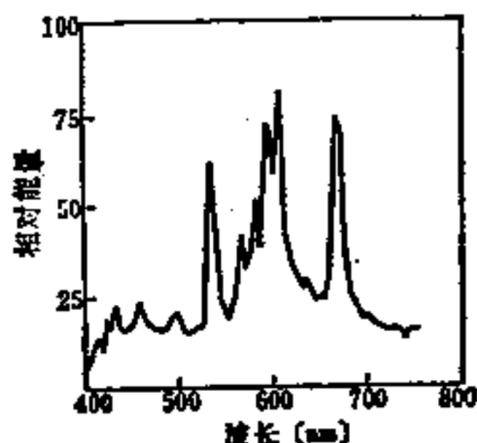


图6-70 Na-Tl-Ga短弧金属卤化物灯的光谱分布

因为金属碘化物的蒸气压高，所以连续光谱很强，钠发光的谱线很宽。

(2) 充 Dy-Ho-Tm 的灯，因为依靠稀土金属离子发光，所以它的光谱是由好多线光谱组成。但因为金属碘化物的蒸气压高，所以仍给人一种如同连续光谱的感觉。这样，灯的显色性非常好，光效也很高〔68〕。

图 6-71 表示典型的 Dy-Ho-Tm 灯的光谱

(3) 充 In 的灯，是以碘化铟分子发光为主，图 6-72 表示铟灯的连续光谱〔69〕。

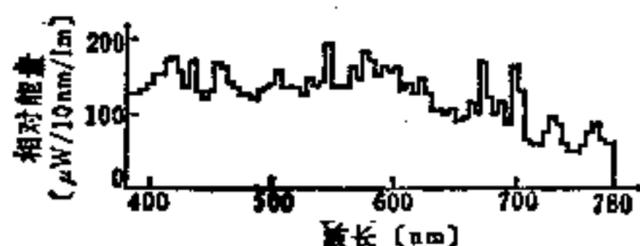


图6-71 Dy-Ho-Tm短弧金属卤化物灯的光谱分布

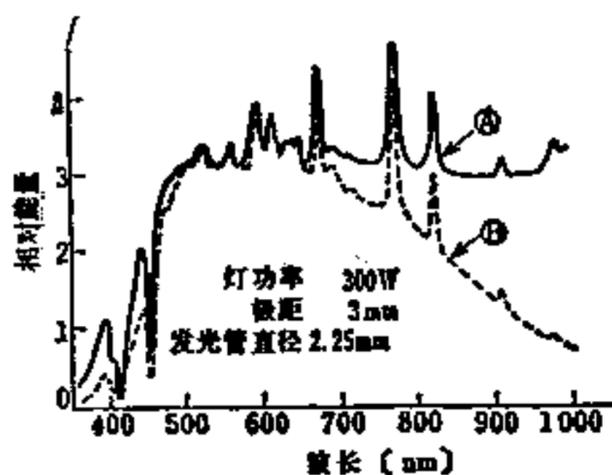


图6-72 铟灯的光谱分布
①灯的发光光谱 ②用光学系统截去红外后的光谱

6-4-4 氖辉光灯〔70〕

作为指示灯用的辉光灯，具有低功率、长寿命的特点，因而光效低，只有 0.31lm/W。其光色决定于充填气体的种类，通常氖辉光灯发橙色光，充氦气时，发出 360nm 的紫外光，与荧光粉组合可制成荧光辉光管。当与绿色荧光粉组合时，其亮度约为以往氖辉光灯的10倍左右。另外，改变荧光粉，可获得各种颜色，故可制造各种彩色指示灯。

氖辉光灯与其他放电灯一样，都必须串联限流电阻。通常使用爱迪生灯头，电阻装在灯头内，当使用小型无灯头型时，必须外接电阻。

6-5 点灯回路基础〔71~73〕

在荧光灯、高压放电灯等的点灯回路中，为了使放电稳定，都加有弧光放电所特有的负特性电阻，称为镇流器。镇流器的工作，对灯的稳定放电和启动都很重要，镇流器的特性，不用说对放电灯的性能，即使在配线设计上也有影响。

6-5-1 放电的稳定

放电灯的电气特性，如 6-2-2 所述，主要有阴极位降、正柱区、阳极位降，其中阳极位降对总的特性影响不大，几乎可以忽略不计。图 6-73 表示放电灯的直流伏-安特性。正柱区显示负特性，这个特性与阴极位降特性无关。从微小电流开始增加电流，在辉光放电区域电压稳定，这时进一步增加电流时，则呈电压也随之增加的正特性。到达 P 点，阴极开始热电子发射，由于电子碰撞而产生气体离子，累积到一定程度，则呈负特性。通常的放电灯，工作于弧光放电区域的 A 点。

图 6-74 表示典型的弧光放电的伏-安特性。给放电灯施加足够的电压，灯就开始放电，此时灯电压为 V_{10} ，灯电流为 I_{10} 。如果电流仅仅增加微小电流 ΔI ，则端子电压也就只降低 ΔV 。但供给的电压仍为 V_{10} ，但这时电流已保持在 $I_{10} + \Delta I$ 以上，而且还陆续增加，这就会引起电流成加速度增加，从而达到可使灯破坏的程度。因而，为了限制这个电流的增加，使工作点保持在 A 点上，在回路内就必须设镇流器。

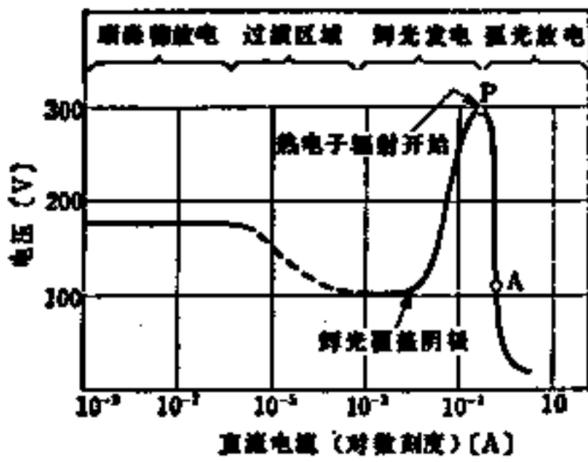


图6-73 连续放电的V-A特性^②

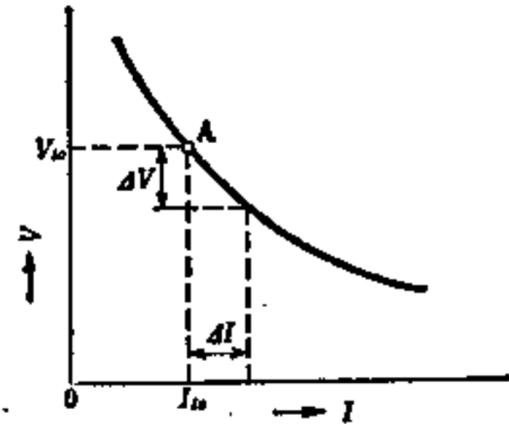


图6-74 弧光放电的伏-安特性

镇流器通常是由电阻、电感、电容等构成，或是由它们组合而构成。在直流电源中，使用电阻作镇流器，功率损耗大、效率低，为了防止产生由于放电空间的阳离子移动而产生的阳极暗端效应，要求极性反转，但仍有很大一部分使用电阻作镇流器。

在交流情况下，最普遍采用电感型镇流器，也就是用扼流线圈。将扼流圈当作理想的纯电感，假定回路的各波形为正弦波 \ominus ，就得到如图 6-75 所示的向量关系， $V^2 = V_i^2 + V_L^2$ 成立。在平面坐标（横坐标为电流，纵坐标为[电压]²）上描绘出灯特性和扼流圈特性曲线，如图 6-76 所示，它们的交点 B 满足方程 $V^2 = V_i^2 + V_L^2$ ，则 B 点即为稳定工作点。实际上放电

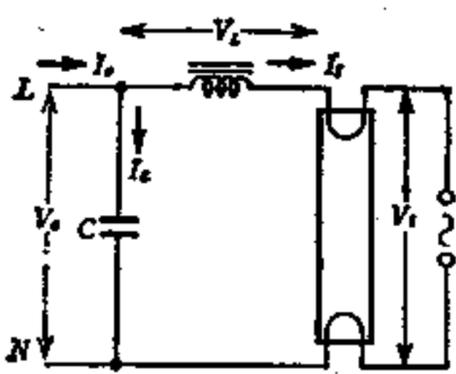


图6-75 扼流圈点灯回路的向量图

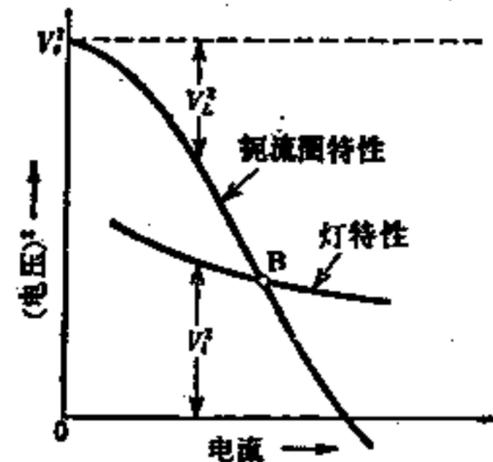


图6-76 扼流圈点灯的稳定工作点

\ominus 因为灯为非直线负特性，实际上差异很大，这样假定，只是为了更容易理解概念。

灯回路，不会象图 6-75 那么简单，因为通常商用周波电源， i 如图 6-77 所示，为一正弦波，又因为灯的固有的非直线特性，所以，流过灯的电流为一正弦波电流，但灯电压波形却不是正弦波，而是畸形的矩形波。图 6-78 表示扼流圈点灯回路的实际波形。

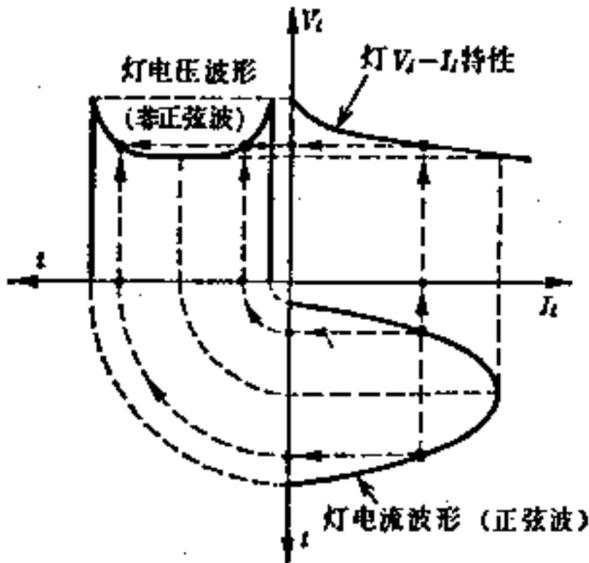


图6-77 灯电压波形畸变说明图

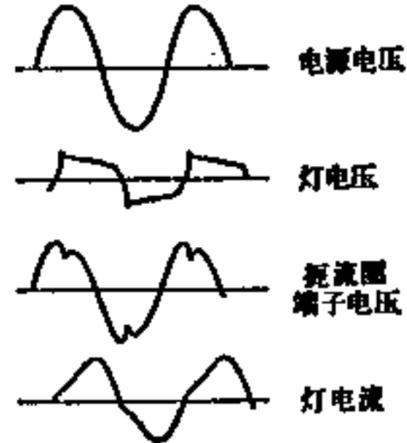


图6-78 荧光灯用扼流圈点灯的波形

对于电源电压的变动，为了控制灯电流、功率、光通的变动，对应于工作点的灯电压 V_L ，选择适当的电源电压 V_0 ，使其满足 $V_0/V_L = 2.0$ 。图 6-79 表示对应于 V_0/V_L 的灯电流、光通的变化示例。

6-5-2 放电的启动

放电灯的启动电压，要超过图 6-73 V-A 特性曲线中 P 点所示的灯电压的最大值，使灯稳定放电，灯则必须在弧光放电区域中稳定工作点之上工作。为此，要使用包含灯在内的几个方面构成的辅助启动机构。通常采用的手段如下：

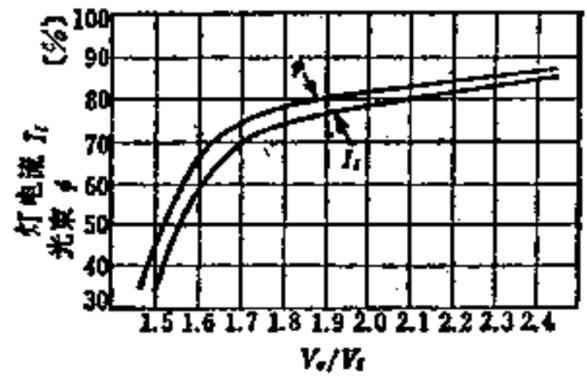
- (a) 为了使阴极容易发射电子，要预热阴极（如预热型和快速启动型荧光灯）；
- (b) 在放电灯的表面或内面设近接导体，或代之以导电薄膜，产生电场（如快速启动型荧光灯）；
- (c) 在放电灯的内部加入辅助电极，使其和一个主电极之间产生局部的辉光放电（如汞灯）；
- (d) 在电源电压上叠加高脉冲电压，降低必要的回路电压（如高压钠灯）；
- (e) 在放电灯内加入放射性物质，以帮助电离和启动。

根据灯的特性，采用其中某一手段，或将二种以上的手段混合使用。

预热启动型荧光灯，利用辉光启动器等开关，当开关接通时，预热阴极〔手段 (a)〕，当开关断开时，利用扼流圈产生的感应高电压（反冲电压）〔手段 (d)〕。

快速启动型荧光灯，利用降压变压器线圈加热灯丝，同时，在电极间施加由升压变压器产生的高电压。在灯玻壳内面，涂敷透光导电薄膜，提高极间电场〔手段 (b)〕。

图 6-80 表示荧光灯的阴极预热电流和启动电压的关系，阴极的电子发射或是局部放电，都给启动电压很大的影响。图 6-81 表示快速启动型荧光灯的灯玻壳的表面电阻和启动电压的关系，表面电阻过高或过低，启动电压都下降，当表面电阻为中间值时，启动电压则提



纵轴表示电源电压低10%时的值
(额定电源电压值作为100%)

图6-79 对应于 V_0/V_L 的光通、灯电流的变化关系⁽¹⁾

纵轴表示电源电压低10%时的值
(额定电源电压值为100%)

高。这是因为受环境湿度或表面污染等的影响。

汞灯、金属卤化物灯等高压放电灯，从启动到稳定需要几分钟到十几分钟，这是因为放

电灯内的蒸气压的上升决定于由电流产生的温升，而电流又决定于镇流器供给的功率。金属卤化物灯等充填各种金属的灯，启动需要能量，如从辉光放电转向弧光放电的能量不充分，就不可能产生稳定的放电。对此，最近有有关的研究报告〔120〕。

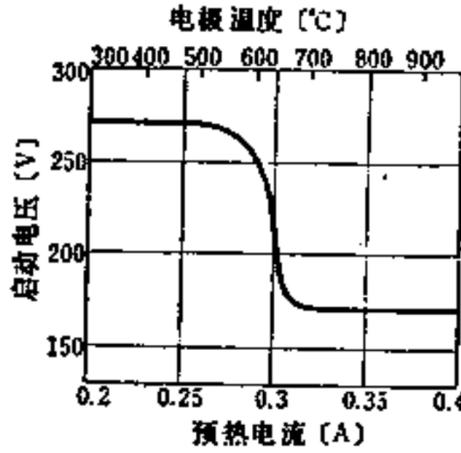


图6-80 40W荧光灯的阴极预热电流和启动电压的关系〔1〕

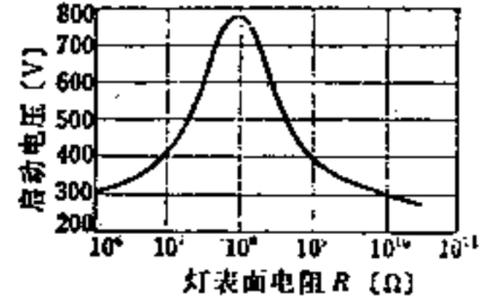


图6-81 灯的表面电阻和启动电压的关系〔118〕

6-5-3 典型的基本回路

(1) **电阻镇流器** 电阻镇流器最简单，但功率消耗大，发热，所以总效率显著降低。在交流电源的情况下，各半周的再启弧点滞后，在电流休止期间，波形产生显著的畸变。

在自镇流汞灯中，将灯丝装于灯内作为镇流器使用。因为钨灯丝具有正温度特性，所以电源变动时，输入功率的变动很小，灯丝温度变化太大会缩短寿命。

在直流 100 V 电源中使用的荧光灯，使用镇流电阻管（镇流灯），这对于特殊的直流用荧光灯尤其必要，另外，近年来，通过直流-交流的变换，使用交流的扼流圈镇流器的也日益增多。

(2) **扼流圈·电感镇流器** 这种镇流器在交流电源中，能使放电灯在启动时获得足够的电压，作为一种最简单的镇流器，得到广泛的应用。

扼流圈具有二种作用，即供给灯适当的电流和功率，必要的电极预热，必须流过适当的短路电流（在汞灯等高压放电灯中，通过该电流达到稳定点灯的时间不同）。

扼流圈的功率损耗非常低，效率可达80~90%。功率损耗主要是由于线圈电阻产生的铜损，以及铁芯的磁滞损耗和涡流损耗，从而使温度上升。扼流圈的设计，取决于其形状、尺寸、特性、价格等。尺寸和重量决定于功率。扼流圈的阻抗（电抗部分和等效电阻部分），因灯的非线性特性，用简单的计算方法无法求出。现在，用实验的方法，假定灯电压波形为矩形波或梯形波等，采用傅里叶展开法〔121〕，或建议按灯特性建立微分方程式，用电子计算机求取。实用上，还是以实验数据决定。

(3) **电容镇流器** 使用商用周波电源，是不能用电容作镇流器的。这是因为在交流电的各半周的开始阶段，由于灯的放电而产生电容的充电电流，会以脉冲形式流向灯，使灯寿命缩短，而且灯的光输出闪烁也严重。

在高频电源中，如后面所述，灯电流的波形近似为正弦波，就没有以上的缺点，可采用损失小、体积小的电容镇流器。

(4) **LC 串联镇流器** 串接有电容 (C)，并接有电感件 (L) 的 LC 串联镇流器有好多优点，应用广泛。如果容抗为感抗的二倍，电流接近正弦波，即为综合容抗。这时电容器的端子电压叠加在电源电压上，犹如在电感（扼流圈）和灯的串联回路上加了一个电压，与通常在扼流圈镇流器必要的电源电压相比，即使是相当低的电源电压也能使灯稳定工作。因而，镇流器的二次电压可降低。

这种回路具有稳定电流的特性，当电源变动时，具有灯电流、功率不变的特点。

(5) **漏磁变压器型镇流器** 此种镇流器，当电源电压不能充分使灯启动和燃点时，可通过变压器将电源电压升高，同时变压器又起到扼流圈的作用。

扼流圈的作用，是在变压器的初次级间，具有和通常变压器不同的结构，利用它的漏磁抗成分，产生漏磁通。这种变压器的特性，是利用铁芯结构和线圈如图 6-82 所示改变漏磁系数（耦合系数的倒数），而适当选择灯电流值作为额定值。在变压器的次级串联电容器，也能具有 LC 串联镇流器的特性。

(6) **反馈控制型镇流器**^[122] 由于最近电子技术的发展，正在研究用电子回路承担镇流器的工作。

在放电灯点灯回路中引进反馈控制的设计，在串接控制元件的同时，通过串联的灯电流检波电路输出信号的控制，ON-OFF 控制（或连续控制）点灯。当电流增大时，检波电路的输出信号切断控制元件（阻抗增大），当灯电流流不过去（减小）时，控制元件被自动接通（阻抗减小），如此反复进行。图 6-83 表示原理图。但它目前仍处在研究阶段，尚不能实用，今后，由于技术的进一步发展，相信镇流器的电子化、小型化是有希望的。

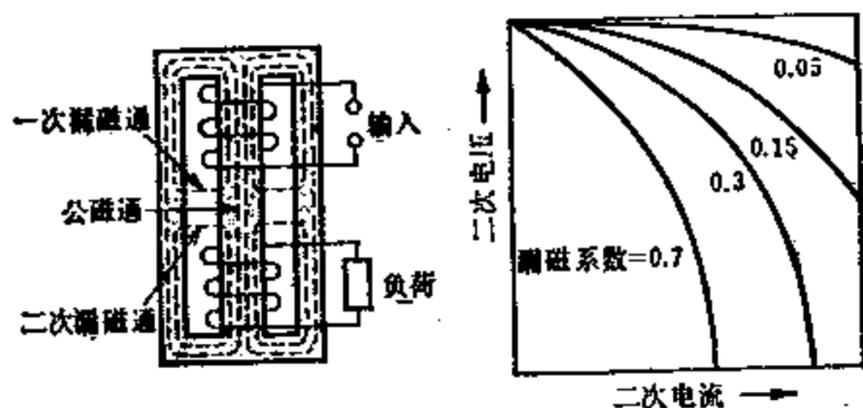


图6-82 漏磁变压器型镇流器结构和特性的原理图^[2]

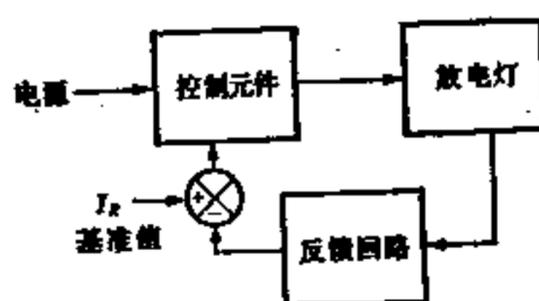


图6-83 反馈控制式镇流器的原理图

6-5-4 点灯回路的各种问题

(1) **对灯特性的影响** 镇流器的特性，对放电灯的效率 (lm/W)、寿命影响很大。因而，在选择镇流器时，必须要根据放电灯的特性，同时，要适应使用条件和目的，兼顾尺寸、重量、价格等。

回路的主要特性，有灯电流波形、启动电压、电极加热、电源变动特性等。例如，荧光灯的灯电流峰值因数和灯寿命的关系如图 6-84^[1]所示，由于汞灯的灯电流波形的差别而产生光衰的变化。图 6-85^[4]表示关于峰值因数的大小，在 JIS 和 IEC 等关于镇流器的标准中，规定在 1.7~1.9 以下。

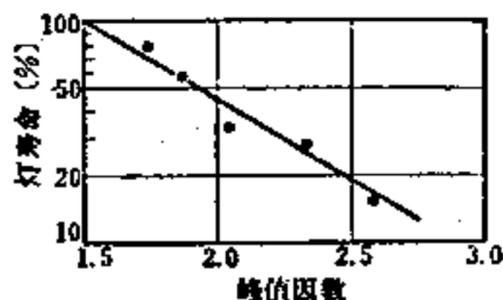


图6-84 荧光灯的灯电流峰值因数对寿命的影响

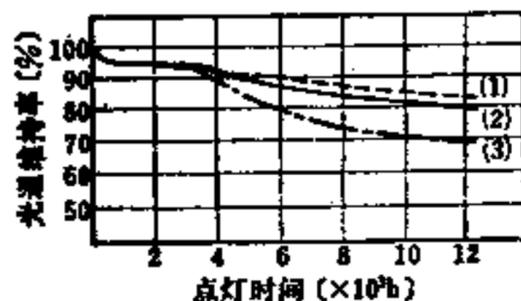


图6-85 汞灯的灯电流峰值因数的大小和光衰的关系^[123]

(1) 高功率因数型镇流器(峰值因数1.47) (2) 扼流圈式定功率型镇流器(峰值因数1.52) (3) 漏磁变压器式功率型镇流器(峰值因数1.70)

(2) 对电源回路的影响 在放电灯回路中, 由于灯的非线性而产生的含有高次谐波成分的电流, 也流过镇流器的初级, 所以会对通讯有影响, 同时由于三相四线制配电方式中的中线电流也会随之增大, 所以在配电系统的分离和配线上, 以及镇流器回路本身的结构上, 都要加以必要的注意和考虑。

放电灯回路中的高次谐波分量, 以第三高次谐波为主, 在某些情况下也含有五次、七次、九次等高次谐波。这里面, 特别是三的倍数的高次谐波分量, 在三相四线制配电方式的中线上相加, 得到异常大的电流。在通常的放电灯回路中, 有 20% 的第三高次谐波分量, 在三灯星形负荷下, 在中线中流过 60% 的高次谐波分量。

关于通讯干扰, 主要是由放电灯产生的无线电频率以上的噪声所致。一方面要尽量使灯自身无噪声化, 另一方面要抑制回路的噪声。通常在荧光灯回路中, 在灯的两极间接入小容量的电容器, 就是一例。

高次谐波对电源电压的畸变也有很大的影响。在高次谐波成分多的场合, 会引起电源电压畸变。在回路电源侧并联改善功率因数用的电容器, 相对于高次谐波来说, 回路呈电容性。由于功率因数下降, 会使输入电流增大, 所以在分支回路的配线设计时要给以必要的注意。在这种情况下, 没有并联电容的回路, 或者是 LC 串联的超前相位回路, 相对于高次谐波来说, 呈现电感性的高阻抗, 输入电流的增加是不适宜的。

(3) 在高频情况下的灯特性和镇流器 图 6-86 表示荧光灯的灯电压、电流、总光通随频率而变化的情况^[5], 图 6-87 表示随着灯电压、灯电流的 lissajou's 图形的频率而变化的情况^[2]。

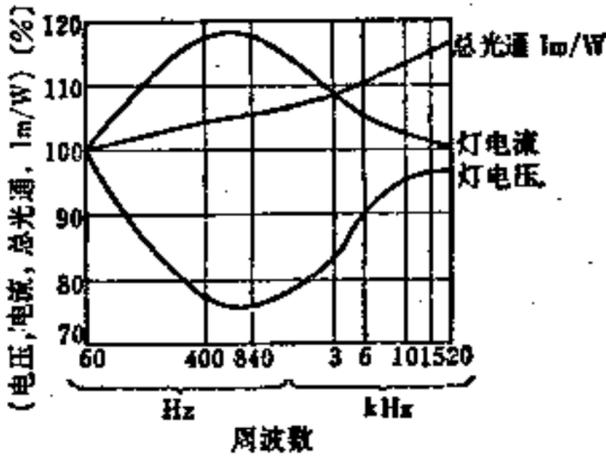


图6-86 荧光灯的特性随频率变化的情况^[2,4]

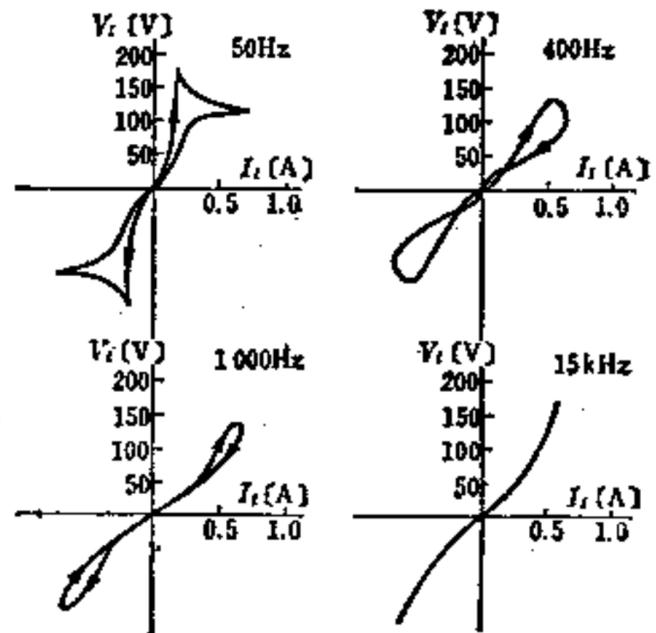


图6-87 灯电流-灯电压的 lissajou's 频率特性 (对40W荧光灯用扼流圈镇流器点灯时的情况)

这些特性适用于在正弦波电源中使用扼流圈的情况。一般荧光灯随着频率的增加 (达到 800Hz 左右时) 灯电压下降, 灯电流增加。这时, 灯电压波形接近正弦波, 灯的功率因数 \ominus 在数百赫以上时几乎达到 100%。这样, 灯电压显著下降, 主要是因为电极位降大幅度下降。因而, 灯管越短, 光效越高。为产生高频, 使用半导体倒逆变器, 在应急灯、太平灯中使用半导体倒逆变器的实例最多。

在高压放电灯中, 由于高频的波长和内管的尺寸的共振现象而产生弧飘, 致使灯灭弧, 所以不能实用。

\ominus 灯的功率因素 = 灯功率 / (灯电压 × 灯电流)。

(4) 镇流器的标准 为了保证对放电灯镇流器的性能等质量达到应有水平, 以及保证安全, 需要制定标准, 主要标准有以下几种;

- (a) JISC 8108 (1971) 荧光灯镇流器
 - C 8110 (1966) 高压汞灯镇流器
 - C 8114 (1967) 钠灯镇流器
- } 修订审议中

(b) 电气用品取缔法、实施法令、实施规则, 部颁电气用品技术标准 (别表第六)。

(c) IEC Standard

- Pub 82 (1973) Ballasts for tubular fluorescent lamps.
Amendment No. 1 (1976)
- Pub 262 (1969) Ballasts for high Pressure mercury vapour lamps.
Amendment No. 1 (1974)
Amendment No. 1 (1976)
- Pub 458 (1974) Transistorized ballasts for fluorescent Lamps.
- Pub 459 (1974) Ballasts for Low-pressure Sodium Vapour Lamps.

6-6 各种放电灯的点灯回路和装置

6-6-1 荧光灯的点灯回路

(1) 启动器型点灯回路 这种电路主要是 30W 或 40W 以下的预热型荧光灯回路, 它用于电源电压为 100V 或 200V 扼流圈型点灯回路。在图 6-88 中, 当 S 闭合时, 流过约为灯电流的 1.5 倍的电流, 以预热阴极。经过 0.5~2 秒钟后, S 断开, 扼流圈 L 产生的浪涌电压使灯点燃。S 采用普通的辉光启动器 (也有使用热控启动器、手控启动器的), 当施加电压 V_1 时, 辉光启动器放电, 产生热量而使金属接点闭合, 放电随之消失, 双金属片的温度下降, 接点断开。如灯未被点燃, 上述过程重复数次, 灯点燃后, 电压 V_1 下降, 启动完毕。在点灯中, 流过滞后相位电流, 功率因数降至 50~60%。为提高功率因数, 将电容 C 并联于电源上, 可以降低输入电流。

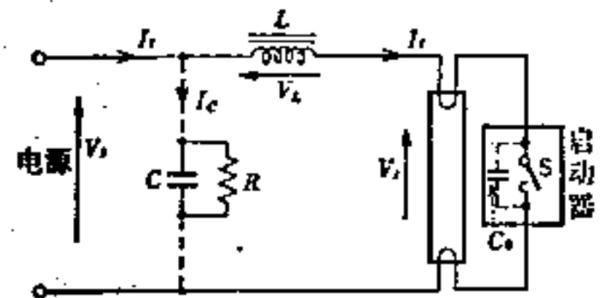


图6-88 扼流圈型点灯回路
 C_0 —0.005~0.02 μ F 电容, 用以吸收灯在正常燃点时产生的无线电干扰波, 并能提高启动器工作时的浪涌电压以帮助启动; R—在关灯时, 作为 C 的放电电阻; C—改善功率因数用电容

这种方式点灯, 当电源电压变动 $\pm 10\%$ 时, 灯功率的变动率约为 $\pm 20\%$ 。

40W 以上的灯在电源电压为 100V 的线路中燃点时, 通常采用漏磁变压器型点灯回路 (图 6-89)。当灯未点燃时, 变压器产生电压 V_{20} , 与扼流圈具有相同的工作。

用半导体型启动器代替辉光启动器, 可以无接点化, 并能缩短启动时间。在图 6-90 中, 设定闸流晶体管 Q 的转折电压比电源电压的峰值低, 比点灯时的灯电压的峰值高。

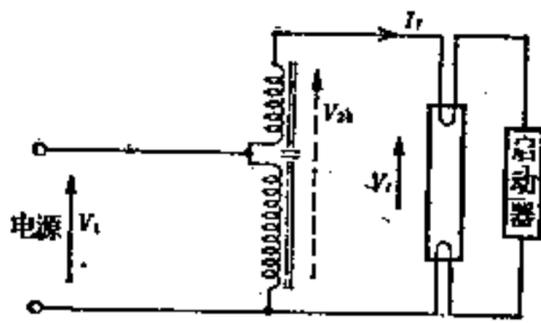


图6-89 漏磁变压器型点灯回路

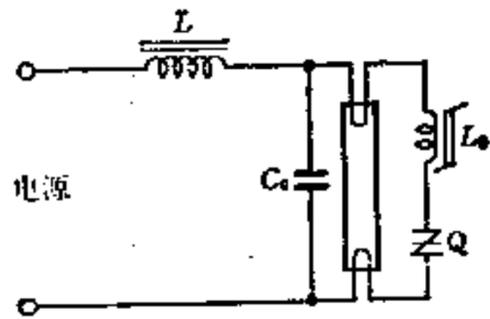


图6-90 半导体启动器点灯回路
由晶闸管Q和 L_1 、 C_0 产生的振荡电压施加在灯上。振荡电流也能增加预热电流,帮助启动

在商用频率的超前相位的点灯回路中,必须用电感和电容串联,以控制灯电流的峰值。将前述的滞后相位电路与这个超前相位电路组合,组成双灯高功率因数无闪烁型点灯回路(图6-91)。因为超前相位侧和滞后相位侧的点灭相位产生偏移,所以光的闪烁很轻微。还有,如输入电流的高次谐波分量,则不太受由于有 L_1 而产生的电源波形变化的影响。图中 L_2 为补偿线圈,是为增加启动时的预热电流而设。

在超前相位点灯回路中,当电源电压在 $\pm 10\%$ 的范围内变化时,灯功率的变化只有 $\pm 10\%$ 以下,这一点比滞后相位回路优越。

高照度型点灯回路,可以在灯设计不变的情况下,将灯电流提高到额定灯电流的约1.8倍,而且寿命不受影响,在图6-88的点灯回路中,灯在燃点时电极的阴极亮点(热电子发射最活泼的高温部分),出现在电极的最高电位侧(这时也最接近电源侧),如果 L 的阻抗很小,灯电流就会很大,于是亮点的温度上升,灯寿命缩短。所以如图6-92所示,将扼流圈分成四部分,阴极亮点可分布在电极的两端,尽管亮点的温度几乎不变,但却能获得高照度。FL15型灯可以提供22W的灯功率。

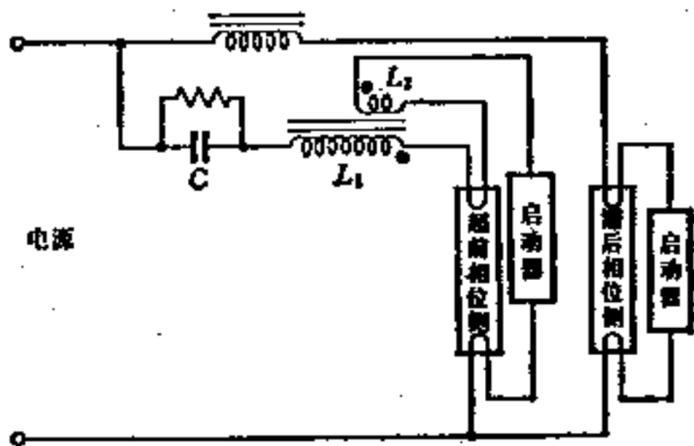


图6-91 无闪烁型(高功率因数)点灯回路

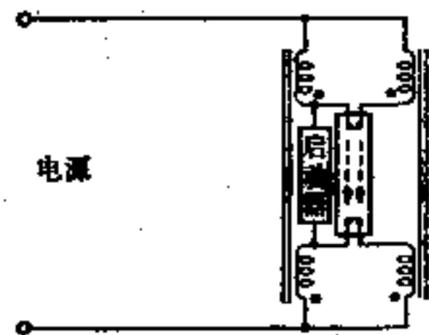


图6-92 高照度型点灯回路

(2) 快速启动型点灯回路 图6-93表示漏磁变压器型快速启动点灯回路,用于快速启动型荧光灯^[74]。由于在给灯施加启动电压的同时,也给电极以预热电压,所以在1~2秒钟内,灯即能点燃。还有高功率因数型和无闪烁型点灯回路,它们与启动器回路大致相同,仅仅是增加了电极预热线圈。

将电容与漏磁变压器串联,用于超前峰值型高功率因数点灯回路(图6-94~图6-96)。在二次线圈的铁心部分设有缝隙(空隙),由于这部分铁心的局部磁饱和,所以无负荷时的二次线圈的电压有效值较低,在灯启动时,可以得到基本按匝数比的峰值电压。为此有效值 V_{20} 可以变小,故可使用小型变压器,而且超前相位点灯回路的电压变动特性较好。还有,

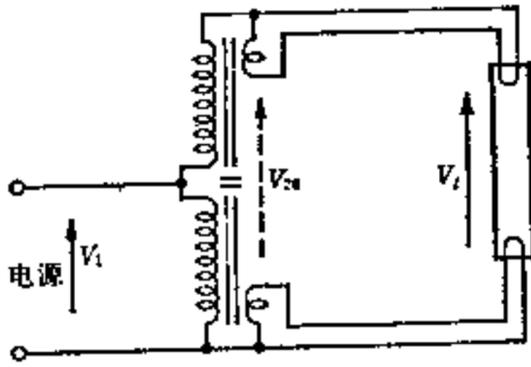


图6-93 漏磁变压器型快速启动点灯回路
快速启动型用约4V电压预热电极(不用辉光启动器等), 施加比相同尺寸的预热型灯更高的启动电压 V_{20} , 用以启动快速启动型灯

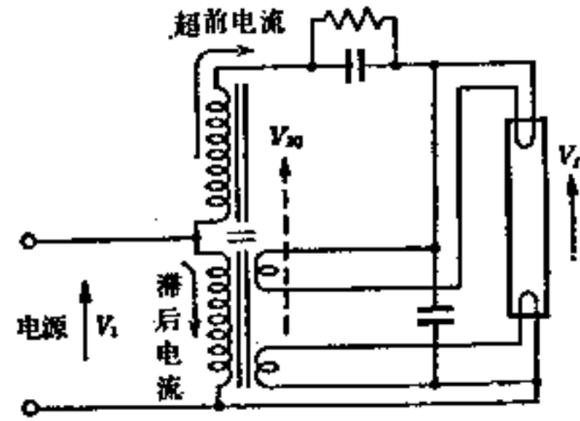


图6-94 超前峰值型高功率因数点灯回路

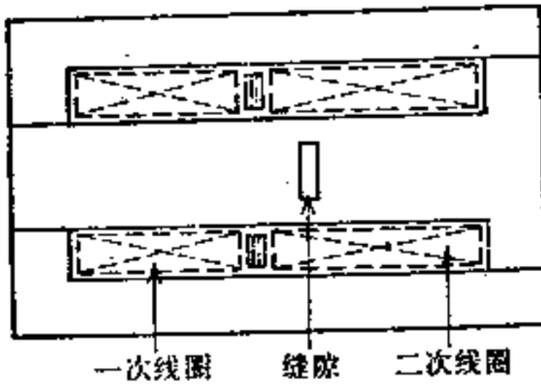


图6-95 超前峰值点灯用漏磁变压器
缝隙的效果: ①可使 V_{20} 在有效值较低的情况下获得较高的峰值; ②起到增加励磁电流, 改善功率因数的作用; ③避免点灯中二次侧铁芯过饱和

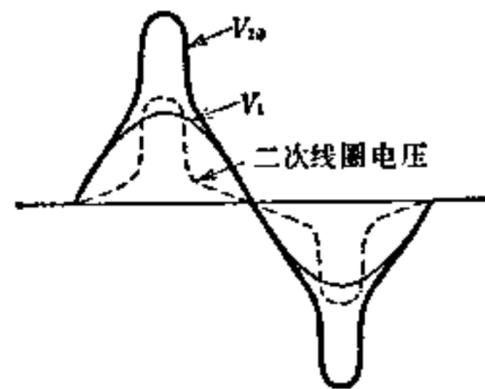


图6-96 峰值变压器的无负荷二次电压波形

这种回路可以获得高功率因数, 并不易受电源波形变化的影响。

如改为双灯串联依次启动型点灯回路(图6-97), 由于可以降低每一支灯的二次电压, 所以从经济角度上考虑, 这种线路获得了广泛应用。这是因为, 在B灯上并联了高阻抗元件, A灯首先微放电启动, 采用这个电流和高阻抗产生的电压使B灯启动, 因而, 不必要求电压 V_{20} 达到1支灯的启动电压的2倍。通常, 超前峰值型高功率因数点灯回路, 就采用双灯串联依次启动型点灯回路。

当灯的启动电压比电源电压高得多时, 可采用谐振型高功率因数点灯回路, 不用启动器亦可将快速启动型或预热型灯点燃。图6-98中的 N_1 和 N_2 的圈数大致相同, 由于采用减极

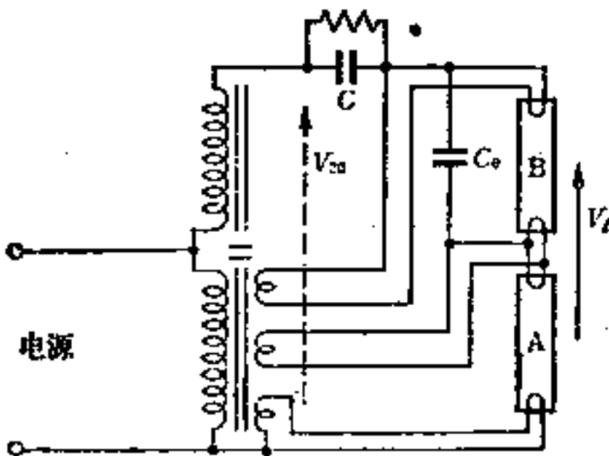


图6-97 双灯串联依次启动型点灯回路
电压 V_{20} 首先通过 $C_0(0.03\sim 0.1\mu F)$ 使A灯处于微放电状态。这时 C_0 的端电压接近 V_{20} , B灯启动。用比 V_1 低的 V_{20} 即可使灯点燃

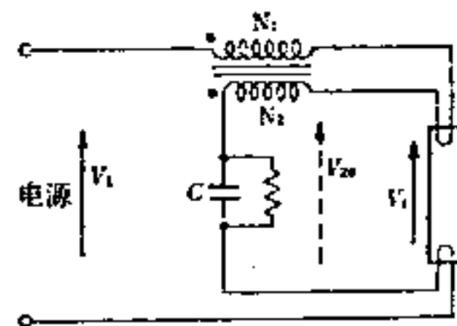


图6-98 谐振型高功率因数点灯回路

性连接，在灯启动时，大致按 C 规定的电流预热电极，同时，由于 N_1 和 N_2 的若干差异而产生电感，通过 C 的谐振现象，使 $V_{20} > V_1$ ，于是灯就被启动了。灯点燃后，通过 N_1 的灯电流和通过 N_1 、 N_2 、 C 的电容电流流过，使输入电流的功率因数得以改善。对于电容来说， N_1 和 N_2 是反极性的，所以这种连接法和与电源直接连接大致相同，但对于灯来说，则必须通过串联扼流圈与电源连接。这种回路，限于 $200V 40W$ 、 $100V 20W$ 等灯，由于这种回路结构简单，所以比其它快速启动型装置更加小型化。

(3) 瞬时启动型点灯回路 细管形的单插脚式灯^[75]，由于不必预热电极，仅施加启动电压就能使灯点燃，所以采用瞬时启动型点灯回路，只要一接通电源，灯立即启动。这种点灯回路，一般使用漏磁变压器或超前峰值型线路（图 6-99）。因为需要较高的启动电压，所以点灯装置比预热型的要大，灯的寿命也短。另外，因为这种回路需要较高的二次电压，所以只有在极特殊的情况下才采用。

(4) 调光用点灯回路 在荧光灯的调光点灯中，一般使用快速启动型灯，在灯电极上施加一定的电压，预热电极，控制灯电流进行调光。

控制灯电流的方式，可在灯回路中采用阻抗可变式线路（图 6-100），或用调压器改变电压，适当降低二次电压就可缩小调光范围。它是用半导体控制元件控制相位，以改变灯电流的导通角，该装置小型，操纵简单（图 6-101），目前主要使用这种电路。

(5) 高频点灯回路 用直流电源燃点荧光时，以半导体逆变器产生的高频点灯为最合适（图 6-102），在应急灯、太平灯、公共汽车的车厢灯等方面，正在获得实际应用。

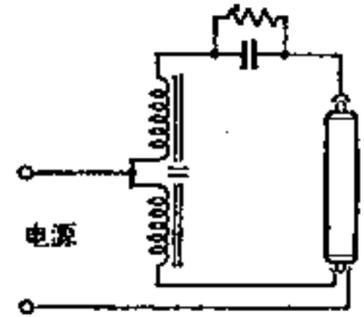


图6-99 瞬时启动型点灯回路
灯座应与灯避开，采用联锁装置，使二次电压不能影响灯座

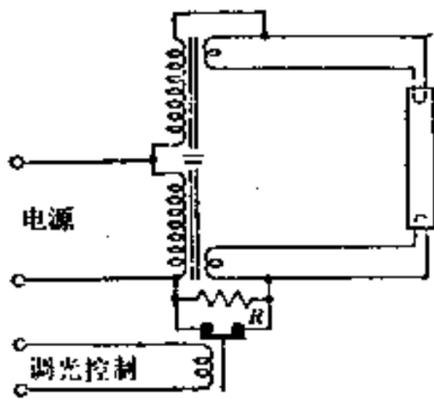


图6-100 阻抗可变式分段调光点灯回路

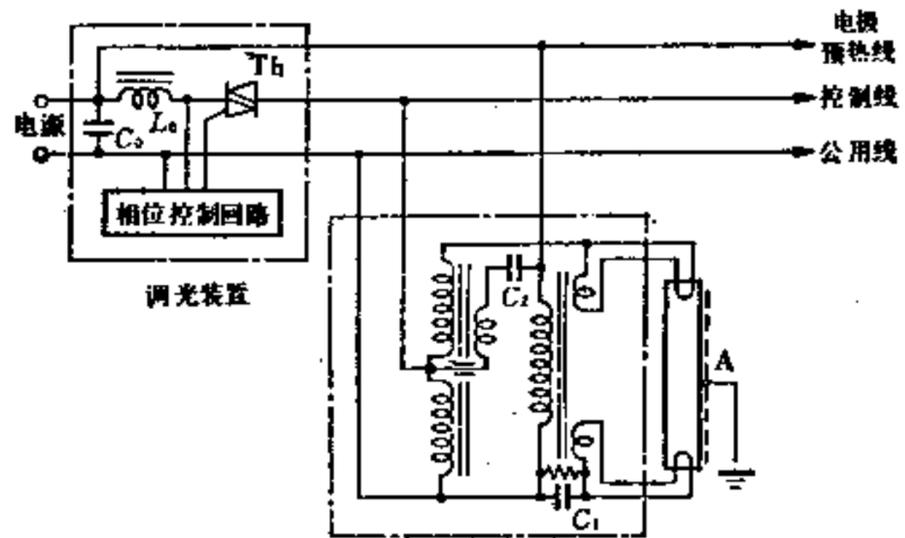


图6-101 相位控制方式的高功率因数型调光点灯回路
Th—半导体控制元件(triac); L_0, C_0 —防止干扰波用的滤波回路;
 C_1 —超前相位电容; C_2 —减小光通时改善调光特性的电容; A—启动时的辅助导体

目前，作为一般照明用，因为是商用频率电源，故采用逆变器等手段以高频点灯，尚存在经济上的问题。因此，目前盛行对转换效率高的半导体点灯回路的研究，对这种回路的商品化寄予很大的希望。

6-6-2 汞灯点灯回路

(1) 一般型（图 6-103，图 6-104）汞灯的启动电压，除部分汞灯以外，通常在 $180V$ 以下，因而要求点灯回路的二次电压必须在 $200V$ 以上。当电源电压在 $200V$ 以上时，采用

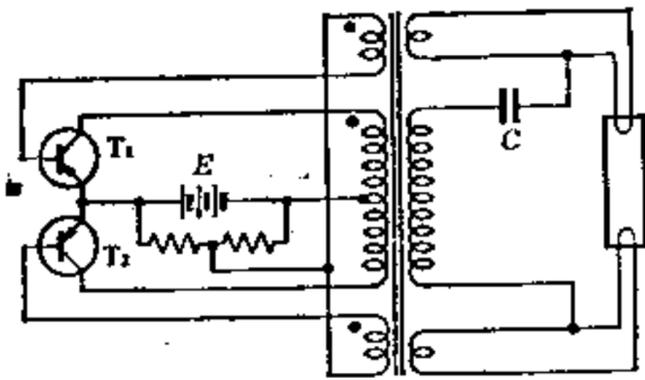


图6-102 荧光灯高频点灯回路
(半导体倒相器基本回路) 晶体三极管 T_1 和 T_2 反复交互导通和切断, 从直流电源 E 获得高频功率, 通过变压器升压, 点燃荧光灯。点灯时的频率为 $15\sim 30\text{kHz}$, 电容 C 是放电灯的电流控制元件

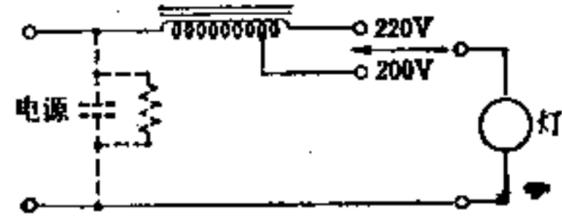


图6-103 一般型(扼流圈型)
($200\text{V } 40\text{W}\sim 1\text{kW}$) 虚线回路表示高功率因数型

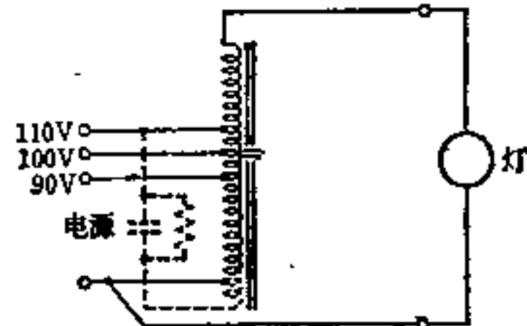


图6-104 一般型(漏磁变压器型)
($100\text{V } 40\text{W}\sim 1\text{kW}$) 虚线回路表示高功率因数型

扼流圈型, 当电源电压为 100V 时, 采用漏磁变压器型。输入功率分低功率因数型和加补偿电容的高功率因数型。

汞灯在正常燃点时具有较高的汞蒸气压, 由于从启动到稳定燃点的过程中, 汞蒸气压较低, 所以灯电压在启动过程中比正常燃点时要显著降低, 为此, 输入电流在灯刚启动时就比灯正常燃点时要大。另外, 相对于电源电压的变动, 灯电流的变动率能达到 $15\sim 25\%$ 左右, 所以要求电源电流容量要有富裕。这种点灯回路, 一般应用在电源电压变动较小的场所, 例如工厂、街道、庭园等处的照明。

(2) 定功率型 (图6-105, 图6-106) 将可饱和铁芯产生的非线性电感与电容串联组成的超前相位回路, 与灯串联组成定功率型点灯回路, 当电源电压在 $\pm 10\%$ 的范围内变动时, 灯功率的变化可以控制在 $\pm 5\%$ 以内。由于灯功率变化较小, 所以灯电流的变化也随之减小, 这种回路, 具有启动时的输入电流比正常燃点时的输入电流还小的优点 (图6-107)。因为可以有效地利用电源的配线容量, 所以这种回路适合于路灯等使用大量灯泡的场合使用。

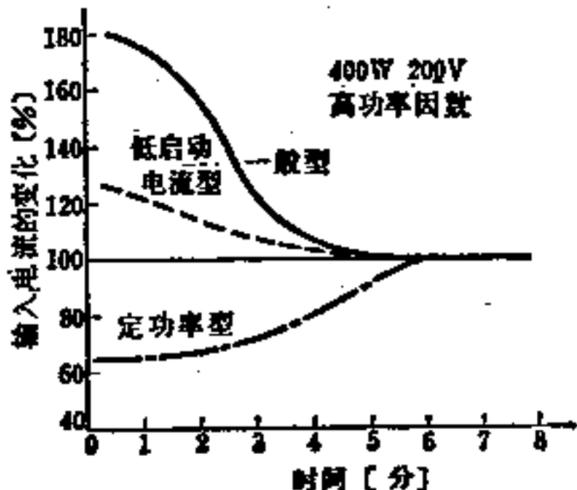


图6-107 启动特性示例

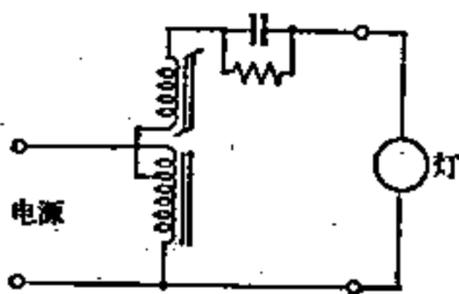


图6-105 定功率型
($100\text{V}, 200\text{V}, 100\sim 1000\text{W}$)

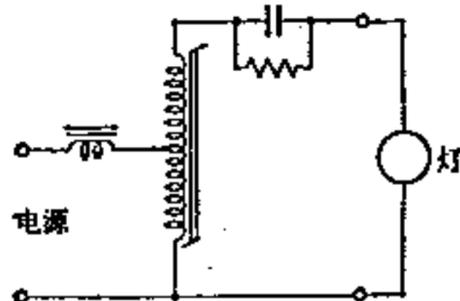


图6-106 定功率型
($100\text{V}, 200\text{V}, 100\sim 1000\text{W}$)

(3) 特殊回路 作为其他回路, 还有低启动电流型、调光用定功率型 (图6-108)、多灯点灯型、无闪烁型以及瞬时点天型等多种。

调光用定功率型点灯回路, 是在夜间为了节电要将灯减光, 而将与灯串联的电容的静电容量用继电器转损, 使输出在二个阶段上分段调光的特殊电路。在这种回路中, 减光时的输出, 大致控制在 50% 的范围内。另外, 在工厂、道路等使用大量灯泡照明的场合, 采用多

灯点灯型回路。这种回路分并联型(图6-109)和串联型(图6-110),它们各有优缺点,可根据用途选用。

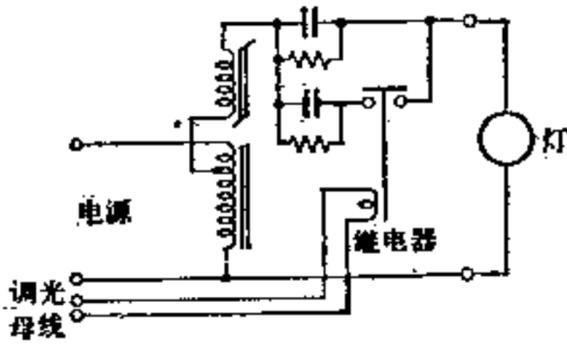


图6-108 调光用定功率型
(100V、200V, 200~1000W)

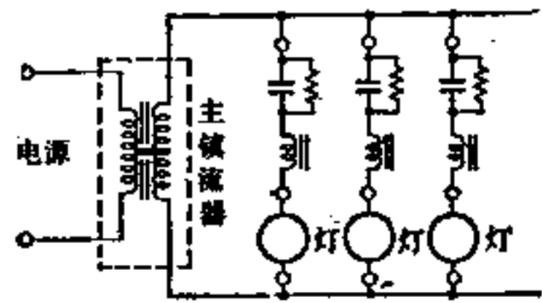


图6-109 多点并联点灯型
(100V、200V, 200~1000W)

汞灯一旦灭灯,在灯管冷却、管内蒸气压下降的5~10分钟内不能再启动。为了在灭灯后能立刻再启动,必须给灯施加高压脉冲。在图6-111的回路中,高压脉冲发生装置通过延时继电器回路控制,在电源接通后的一定时间,给灯施加高压脉冲。使用这种回路的灯,由于在电极间施加脉冲电压,所以无辅助电极。另外,这种能承受高压的电极,制成由灯管两端突出的特殊结构。

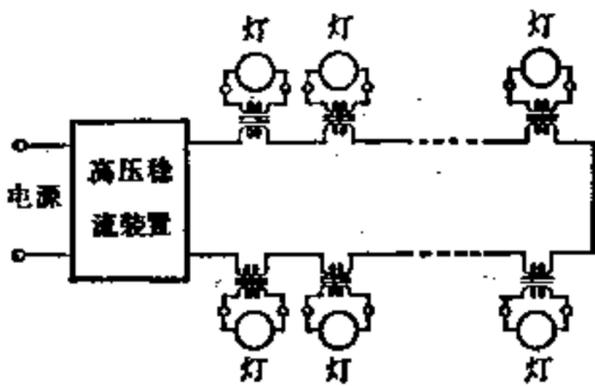


图6-110 多灯串联点灯型
(100V、200V, 200~1000W)

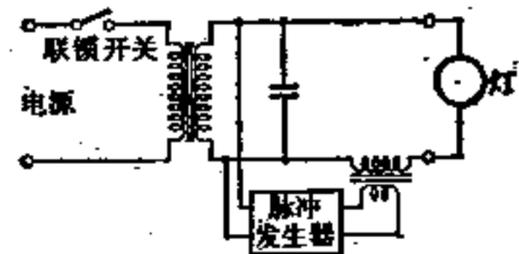


图6-111 瞬时点灭型(使用特殊的灯)
(100V, 30~1000W)

6-6-3 金属卤化物灯的点灯回路

在金属卤化物灯中,由于使用的电极或充入的气体的影响,启动电压较高,所以,必须提高二次电压的峰值。为解决这个问题,通常采用超前峰值型回路(图6-112),施加高压脉冲型回路(图6-113)。或者采用利用双金属机构预热后的施加扼流圈的反冲电压的方式(图6-114),当在灯上安有辅助电极等容易启动的装置时,可采用与汞灯同样的扼流圈点灯。

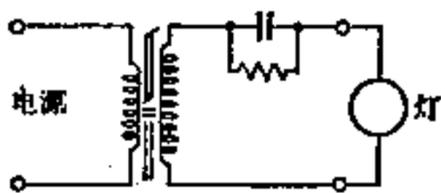


图6-112 一般型
(超前峰值型回路)
(100V, 250~1000W)

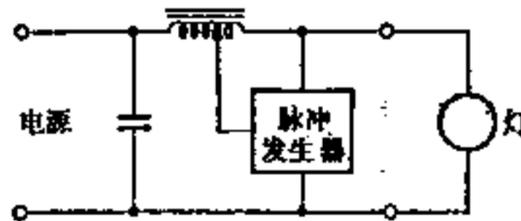


图6-113 一般型
(施加高压脉冲)
(200V, 400W)

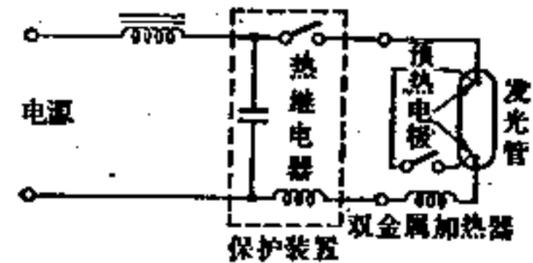


图6-114 一般型
(预热启动方式)
(200V, 400W)

金属卤化物灯除了灯中的游离卤化物会使灯电压升高以外,由于灯管黑化,也会使灯电压升高,所以,必须选择适当的回路,使灯不至自动熄灭。另外,要考虑镇流器的重量和大小,二次配线的绝缘和容许的配线长度,脉冲产生的高频杂波,保护装置的必要性等,以选择最适当的点灯回路。

6-6-4 高压钠灯的点灯回路

(1) **一般型** 高压启动型灯与低压启动型灯(无触发装置)的点灯回路各不相同,前者的点灯回路附加有启动装置。该装置与金属卤化物灯的点灯回路相同,采用施加高压脉冲的方式(图6-113),例如利用半导体开关元件在镇流器的线圈上产生峰值电压达数千伏的高压脉冲,从此增加镇流器的次级电压。后者的点灯回路采用扼流圈方式。当与汞灯用扼流圈兼用时,将汞灯用扼流圈与辅助扼流圈串联使用(图6-115),或者使用专用扼流圈。

(2) **定功率型** 定功率型的高压钠灯的点灯回路,例如采用并联磁铁谐振的定电压回路(图6-116)。



图6-115 一般型(在汞灯扼流圈上串联辅助扼流圈的回路)
(200V, 250W)

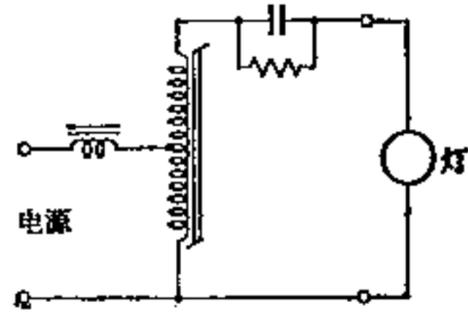


图6-116 定功率型
(并联磁铁谐振回路)
(200V, 250~400W)

高压钠灯的定功率化与汞灯的相似,采用控制灯电压的方式,比控制灯电流的方式对灯的特性来说更有效,也有的定功率型采用改变扼流圈的电感来分段调光。磁铁谐振回路用的镇流器的体积和重量较大,这是它的缺点。

6-6-5 低压钠灯的点灯回路(图6-117, 图6-118)

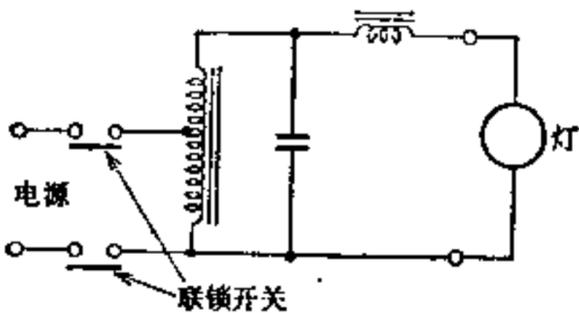


图6-117 滞后相位型
(40V, 60~140W)

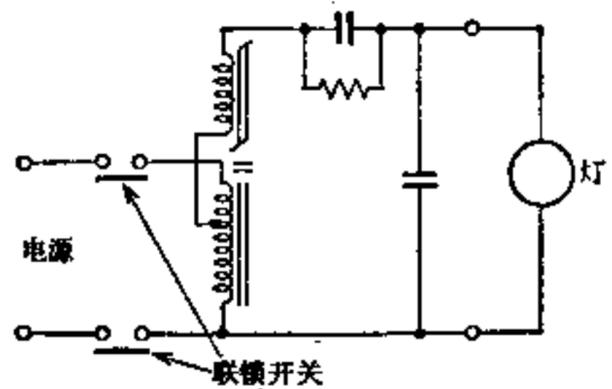


图6-118 瞬时点燃超前相位型
(200V, 60~140W)

低压钠灯的特性要求较高的启动电压,灯启动后,在钠蒸气压上升的过程中,要对灯供给接近稳定点灯时的功率。另外,由于启动电压与点灯中的灯电压相差较大,所以输入功率因数较低,为克服这一缺点,采用启动电压的有效值为低峰值的高畸变波电压点灯回路较为有效。还有,因为再启动电压比启动电压高,所以如果要求瞬时再启动时,应将再启动电压与启动电压叠加。

为此,也有采用半导体启动器作为供给启动电压的方式。

还有,为了防止由于高二次电压产生的触电事故,应安装拆卸灯时能自动切断电源的联锁开关(与灯座等组装在一起)。

6-6-6 氙灯点灯回路

(1) **短弧氙灯的点灯回路** 短弧氙灯通常采用直流点灯。图6-119所示为基本点灯回

路。根据灯功率，启动器回路产生 5~60kV、1 至几个 MHz 的高频高压。0.5kW 以上的灯，启动器装于灯具内，配线产生的损失控制在最低限度。在灯点着的同时，由 C_2 首先供给大电流，出现图 6-120 中的第一个电流峰值。同时， C_1 通过 L_2 放电，形成第二个电流峰值。这时，阴极尖端由于阴离子的轰击而被加热，变得能够发射出足够的热电子。另一方面，正柱区也在半径方向加宽，由于正柱区内的温度分布渐趋平滑，所以在半径方向上的传热损失减小。

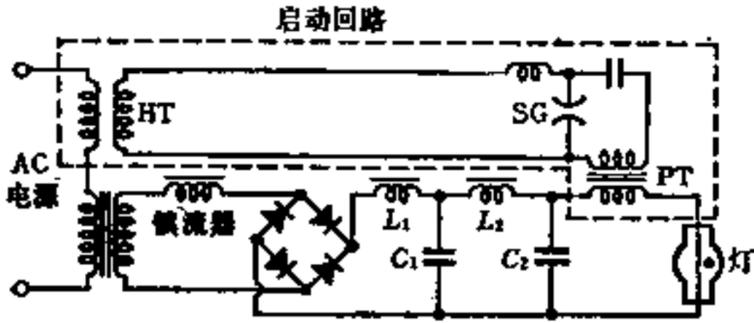


图6-119 短弧氙灯的基本点灯回路

HT—高压变压器；PT—脉冲变压器；SG—火花隙
 C_1 、 C_2 —电容； L_1 、 L_2 —扼流圈

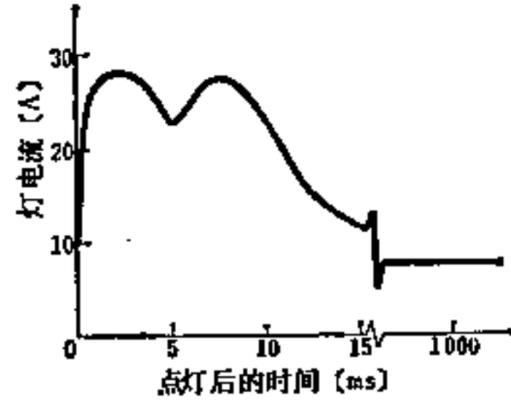
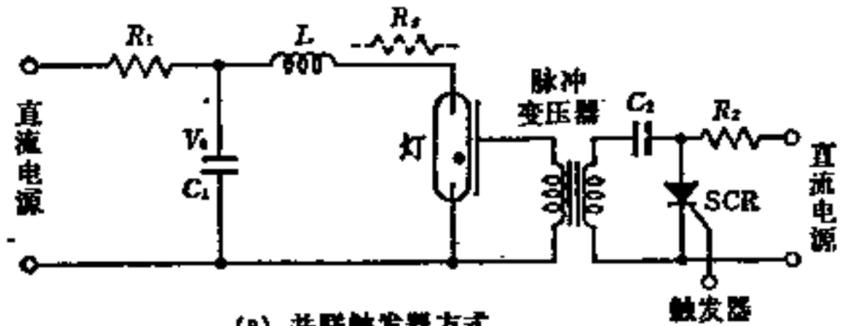


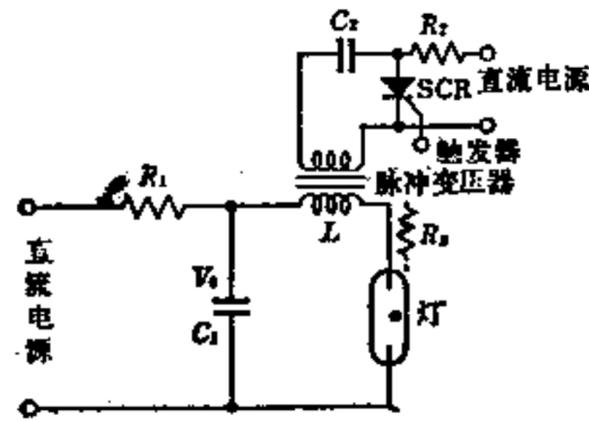
图6-120 150W短弧氙灯的启动电流波形(额定电流7.5A)

当这二个条件满足后，电流下降到正常值，进行持续放电，最后达到稳定状态。镇流器的开路电压，设计为稳定时灯电压的 3~4 倍。从 C_1 、 C_2 放出的浪涌电流，达到正常电流值的 3 倍以上时，阴极损耗严重，2 倍以下时，则不充分。稳定时电流的纹波系数，从灯寿命着眼，应保持在 10% 以下，上述的 L-C 回路，就起到滤波的作用。

(2) 长弧氙灯用点灯回路 由于长弧氙灯具有正电阻特性，所以不用镇流器。图 6-121 所示为启动器一例。这时灯的输入电源为直流或交流电压。给灯施加 50kV 的高频，经过一秒钟左右的时间，电弧即可正常。



(a) 并联触发器方式



(b) 串联触发器方式

图6-122 脉冲氙灯的基本点灯回路

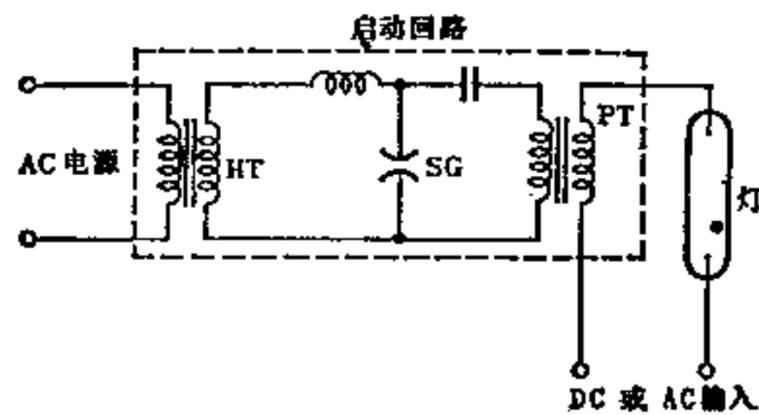


图6-121 长弧氙灯的基本点灯回路

HT—高压变压器；PT—脉冲变压器；SG—火花隙

(3) 脉冲氙灯用点灯回路 图 6-122 所示为脉冲氙灯的基本点灯回路。为使灯正常燃点，触发器要给灯施加 5~20kV 的脉冲电压。施加脉冲电压的方式有并联式和串联式。在主电源上，电容 C_1 的充电能量 $E = C_1 V_1^2 / 2$ (V_1 是 C_1 两端的电压)，放电开始后立即向灯放电，瞬间灯的正柱区的电流密度即可达到 $10^7 \sim 10^8 \text{ A/m}^2$ 。此时灯电流的基本式为：

$$L \frac{dI_L}{dt} + V_L + R_s I_L + \frac{1}{C_1} \int_0^t I_L dt = V_0 \quad (6-6)$$

式中， L 是电感量； C_1 是电容量； R_s 是灯串联的有效阻抗，包括 L 、 C_1 和配线电阻； I_L 是灯电流； V_L 是灯电压，当等离子体的光吸收系数为 $0.21/\text{cm}$ ，弧长为 L ，管径为 d 时〔82〕

$$V_L = 1.28 I_L^{1/2} / d \quad (6-7)$$

解式(6-6)得：

$$I_L' = I_L (L/C_1)^{1/2} / V_0$$

$$\tau = t / (LC_1)^{1/2}$$

$$\alpha = 1.28 I_L (C_1/L)^{1/4} / d V_0^{1/2}$$

以上列数据为参量，可求出灯电流波形如图6-123所示。

$\alpha = 0.8$ 时达到临界减幅， $\alpha < 0.8$ 时振动衰减。

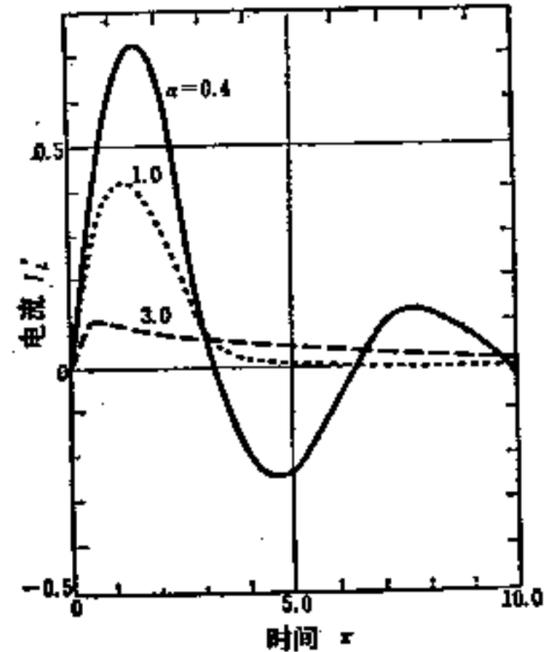


图6-123 脉冲汞灯的电流量形

6-6-7 镇流器

(1) 镇流器的结构和种类 镇流器有各种各样的结构，应根据用途选择最适合的结构〔76〕。

将层叠铁心和线圈组装并浸上绝缘漆构成露出型镇流器，限于装在灯具内使用〔77〕。而将部件装于金属外壳中，并充填绝缘性混合物，成为外壳式镇流器，在外壳表面有标记，根据电气设备技术标准〔78〕，这种镇流器适合于室内使用。改变外壳的结构，成为可直接受雨淋的室外用镇流器，但安装方向必须正确。另外，在潮气大的地方使用的镇流器，其结构必须防潮。

其它还有耐化学腐蚀型、防爆型等特殊用途的镇流器。

(2) 绝缘物的温度和寿命 在一般情况下，绝缘物的寿命决定于绝缘物的温度，温度上升和寿命缩短成指数关系（温度下降寿命延长）。镇流器的线圈也不例外，温度升高 $8\sim 10^\circ\text{C}$ ，寿命减半〔79〕（参照图6-124）。为此，必须有效地解决镇流器的散热问题，在散热困难的情况下，要使用低温升型镇流器。由于电源电压或灯的环境温度上升，都可能使灯电流增加，其结果，使线圈温度升高，寿命缩短。另外，关于电容、半导体元件等的寿命，温度的影响也是很主要的因素。

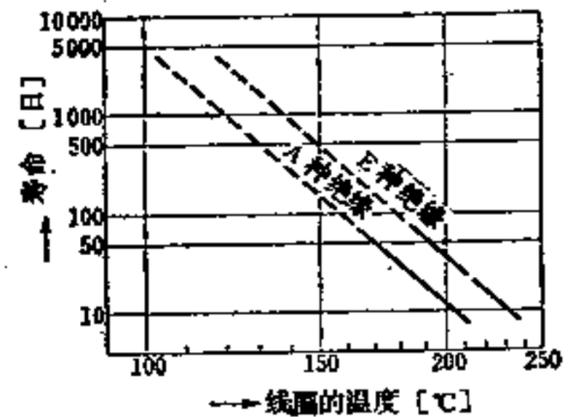


图6-124 线圈的温度和寿命的关系

(3) 噪声 扼流圈或变压器，通过层叠铁心产生交变磁通，在铁心接合部或空隙部等处引起振动；从铁心或线圈产生的漏磁交变磁通，引起镇流器外壳振动。这些振动传到灯具或顶棚上，使共振扩大，产生噪声。

镇流器或灯具的噪声，由于周围环境噪声的程度不同，产生的感觉也不一样。在比较安静的环境中，当噪声达到 $25\sim 30$ 方时，就会成为问题。在镇流器和安装面之间插进橡胶衬垫，对于抑制振动传递、降低噪声很有效果。同时，也必须考虑散热问题。

在一般情况下，镇流器的功率越小，噪声也越小。

(4) 过热保护 镇流器的线圈，在寿命末期等情况下，由于层间短路会引起过热现象。

因而，在电气设备技术标准中规定了镇流器在可燃性建筑材料上的安装方法，镇流器必须装于难燃性箱中。

镇流器内装有过热保护装置，将温度熔断器那样的非复归型保护装置，或双金属那样的复归型保护装置，安装在线圈附近，能自动切断一次侧电源，增加安全性。

6-7 EL灯和发光二极管

6-7-1 典型EL

场致发光的模型（以下称EL），是Destriau在1936年对浸在蓖麻油中的ZnS施加电场，观测到发光现象以后开始创造的。到五十年代，这种EL的研究，获得进一步发展，用面光源代替原来的点光源或线光源，引起了极大的注意。

（1）EL的典型结构和发光原理 EL的典型结构一般如图6-125所示，在面状的二电极上，敷有电介质，同时涂上荧光粉，其中至少有一个电极具有透明导电膜。透明导电膜大致分为有机型和无机型二种，这主要取决于荧光粉的粘结剂是有机物还是无机物来区分。

有机型EL灯，采用玻璃作基板，或采用树脂等软性基板。无机型EL灯，通常采用铁基板，使用低熔点玻璃作粘结剂。

在这种EL外部的玻璃基板上，敷设透明导电膜，在膜上蒸镀荧光粉和激活剂，是热处理活性化即所谓蒸镀型EL。这种灯在直流低电压下工作，不到100V即可得到几百个 cd/m^2 的亮度，作为指示元件引起广泛的注意^[83]。

固体发光现象，是原子中的电子激发、复合的过程。在典型的EL中，设置在两电极间的荧光体的发光中心的电子，与外电场或直接电场所激发并被加速的电子相碰撞，而处于激发状态，被激发的电子由于复合而发光。

（2）EL的特性 EL的光色，决定于所使用的荧光粉，通常以绿色为最佳^[84]。在典型EL中，由于施加的交流电场强度的变化而产生的激发，会由于点灯频率、施加电压等点灯条件的不同而有很大变化。发光亮度随电压的变化服从下述公式：

$$B = B_0 \cdot \exp \frac{-C}{\sqrt{V}}$$

式中， B_0 、 C 是由点灯条件、EL元件等决定的常数。

图6-126表示电源电压、点灯频率和亮度的关系^[85]。

通常，EL的寿命以亮度下降到初始亮度的50%时的点灯时间计算，现在广泛使用的无机型EL，其初始亮度为几个 cd/m^2 ，寿命可到1~2万小时^[86]。

（3）EL的应用 EL尽管亮度和效率较低，但具有面光源的优点，所以正在作多种应用研究。如象反转器、X-Y数字显示、脉冲显示器、固体镜象炉、夜间信号灯等方面的应用研究。目前，在计量仪器、控制盘、暗室操作和计测等要求显示灵敏的场所，正在广泛普及。如图6-127所示，使用可加工成任意形状的陶瓷（无机）EL。在飞机仪表上正在使用一种有机软性EL，无磁性的软性EL的用途，正在引起注意。



图6-125 EL的典型结构(陶瓷EL)
①铁基板；②电介质层；③发光层；④透明导电层(nesa膜)；⑤防潮层(玻璃)

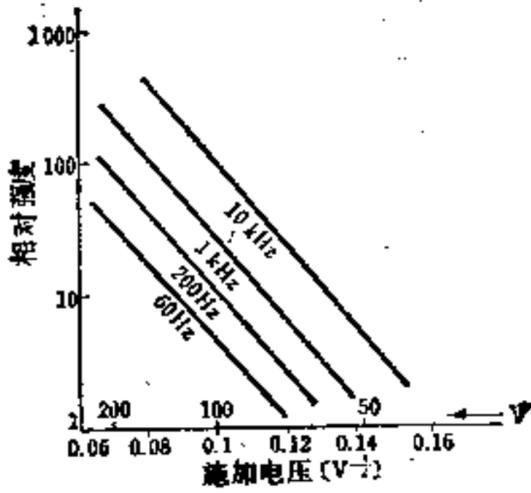


图6-126 EL的施加电压和亮度的关系



图6-127 控制盘、计量仪器等用的EL底板

6-7-2 发光二极管 (载流子注入式EL)

(1) 原理和结构 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 系利用 GaAs、GaP 或它们的混合晶体 GaAsP

等 III-V 族半导体的 p-n 结的简单结构, 在 p-n 结流过正向电流就会发光。它是一种将电能转换成可见光的固体元件, 其转换速度很快, 而且和以往的半导体元件同样, 具有体积小、可靠性高、寿命长的特点。尤其是工作电压低, 和 IC (集成电路)、LSI (大规模集成电路) 等外部电路的连接性良好。图 6-128 表示各种发光二极管的有代表性的外形结构。

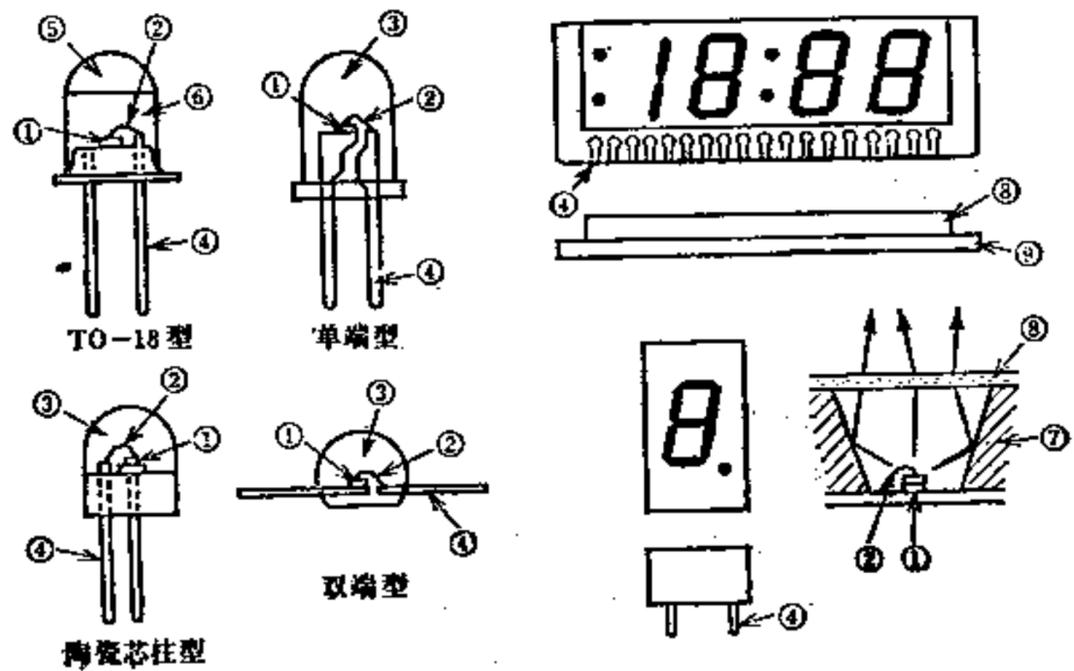


图6-128 各种发光二极管的结构

①半导体触点; ②导线; ③树脂; ④外导线; ⑤玻璃透镜; ⑥金属罩; ⑦反射板; ⑧盖

(2) 特性 发光波长和发光效率等特性, 与半导体材料和加工工艺有密切的关系。表

表6-14

各种实用的LED的特性 (87~91)

材料: 发光中心	光色	峰值发光波长 (nm)	视感灵敏度 (lm/W)	外部量子效率 (%)		发光效率 (lm/W)	
				商品	最高值	商品	最高值
GaAs: Si	红外	940	—	0.5~1	32	—	—
GaAs: Zn	红外	900	—	3~6	7.3	—	—
GaAs _{0.8} P _{0.4}	红	650	70	~0.2	0.5 ⁽⁸⁸⁾	~0.14	0.38
GaAs _{0.35} P _{0.65} : N	橙	632	190	~0.2	0.5 ⁽⁸⁸⁾	~0.38	0.95
GaAs _{0.15} P _{0.85} : N	黄	589	450	~0.05	0.2 ⁽⁸⁸⁾	~0.22	0.90
GaP: Zn, O	红	695	20	2~4	15.1 ⁽⁸⁹⁾	0.4~0.8	3.0
GaP: N	绿	563	610	0.05~0.15	0.7 ⁽⁹⁰⁾	0.3~0.9	4.2
GaP: N (N > 10 ²⁰ cm ⁻³)	黄	590	450	0.05~0.10	0.24 ⁽⁹¹⁾	0.23~0.45	0.98

6-14 对各种商品 LED 的特性进行了比较, 图 6-129 表示最高效率的 LED 的光通与电流的关系。广泛使用的有 GaAs 红外 LED、GaAsP 红色 LED、GaP 红色和绿色 LED。特别是 GaAsP 红色 LED, 在可见 LED 中, 获得最早应用。GaP 红色 LED 发光效率高, 具有低电流高光通的特点。另外, 高效率的橙色和黄色的 LED, 在 GaAsP 的发光中心添加氮气的技术正在被实用, 关于 GaN、SiC 等蓝色 LED 的新材料的研究, 亦有报告发表。

(3) 用途 LED 主要用作导向灯和数字显示元件。因为它有可靠性高、寿命长等特点, 作为导向灯, 用以代替以往的白炽灯, 正在被广泛地采用。另外, 作为数字显示元件, 主要用于台式电子计算机和计测器, 在钟表、时标、暗箱、电子计算机的末端装置等处, 也被采用。红外 LED 作为和受光元件组合的各种光结合元件(光耦合器), 也被广泛地应用, 还有, 作为光通讯用光源, 也引起注意。

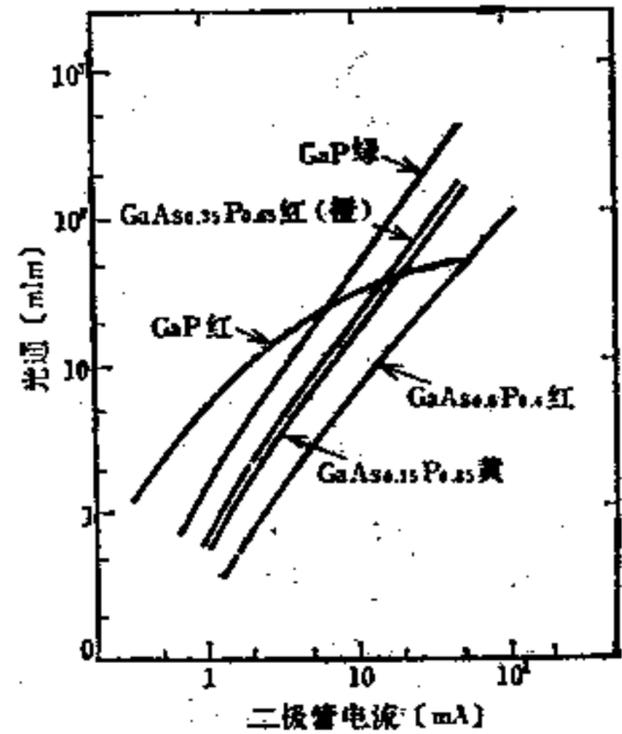


图6-129 光通与电流的关系 (表6-14中发光效率为最高值时)

6-8 激 光

6-8-1 激光振荡^[92, 93]

激光 (LASER) 是“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (因受激辐射而产生光的放大) 的简称。

在物质系中, 为了实现激光振荡 (参照第 2 章 2-5 节), 必须使高能级的粒子数多于低能级的粒子数, 并且平均寿命要长, 亦即造成一个局部负温度状态的结构。这种过程通常称为激励, 可按表 6-15 那样分类^[93]。在 YAG 激光那样的固体激光中, 通常采用脉冲氙灯、氪灯、卤钨灯等作为光泵源。

表6-15 为了产生激光而采用的各种激励法

种 类	选 择 的 机 理	利 用 的 物 质
光激励	利用能级间的辐射迁移的光激励	固体、液体、气体、半导体
气体放电	利用混合气体中的电子、原子、分子间的各种非弹性碰撞而产生的激励	气体
电流注入式	在半导体二极管的 P-n 结流过正向电流产生载流子注入	半导体结
电子束	利用电子束照射而产生激励	半导体、固体、气体
化学激励	利用分子的化学反应 (光合成、光分离、火焰反应、压缩加热等) 产生的选择性激励	气体

6-8-2 各种激光的特性和应用

能产生激光振荡的物质有很多种, 能发出很多不同波长的振荡谱线^[92]。激光具有振荡

波长范围狭窄(单色性)、相位聚集在一起(可干涉性或相干性)、聚焦性好等固有的优点。表6-16归纳了有代表性的各种激光的特性和用途〔93~95〕。主要用途有加工、计测、情报处理、光通讯、物理化学研究、核熔解研究等。

表6-16 实用激光的典型特性和用途

分类	种类	能级粒子	主要波长(μm)	连续输出(各波长)	特征和主要用途
气体	氦-氖	Ne	0.63, 1.15, 3.39	0.1~100mW	工作功率小, 简单方便, 寿命长, 便宜。计测、情报处理、全息照相术
	氩	A ⁺	0.5145 0.4945 0.4880 0.4765 0.4579	10mW~10W	在大功率电弧放电下工作, 在紫外~可见区域输出大, 水冷或强制风冷。拉曼光谱、计测、全息照相术、色素激光激励
		A ²⁺	0.3511 0.3638	10mW~1W	
	氪	Kr ⁺	0.6471 0.5682 0.5309 0.4762	10mW~5W	在大功率电弧放电下工作, 在紫外~可见区域输出大, 水冷或强制风冷。拉曼光谱、计测、全息照相术、色素激光激励
		Kr ²⁺	0.3507 0.3564	10mW~1W	
	二氧化碳	CO ₂	10.6μm附近的几个波长同样振荡(可在10.1~10.8、9.2~9.7μm内的单一波长选择振荡)	1W~1kW	使用低速气流, 封接、切割, 高效率加工
				1~15kW	使用高速气流, 高效率加工
脉冲1MW以上				利用大气压气体的脉冲放电产生激励, 得到微秒脉冲激光。放大可调的大型激光器, 用于核熔合试验研究	
氦-镉	Cd ⁺	0.4416 0.3250	1~100mW	用小功率工作的金属蒸气激光。感光材料的曝光、荧光分析、情报处理	
氮	N ₂	0.3371	脉冲 1kW~1MW	用脉冲放电激励, 得到毫微秒的脉冲激光。光谱研究、色素激光激励	
固体 (电介质)	YAG 钇铝石榴石	Nd ³⁺	1.06	1~200W 脉冲 1~10kW 脉冲 1~10MW	用卤钨灯、氙灯激励, 可用于脉冲调制振荡、加工 脉冲氙灯激励, 加工 脉冲氙灯激励, 带有Q开关。测距仪、激光雷达
	玻璃	Nd ³⁺	1.06	脉冲100MW以上	用脉冲氙灯激励, 带有Q开关。计测, 放大可调的大型激光器, 用于核熔合试验研究
	红宝石	Cr ³⁺	0.6943	脉冲10~100MW	用脉冲氙灯激励, 带有Q开关。可见光, 物性研究, 全息照相术
半导体	GaAlAs		0.85附近 0.9附近	1~20MW 脉冲 1W~1kW	小功率, 小型, 高效率。光导纤维通讯, 情报处理, 测距仪
液体	若丹明 等各种 色素		0.54~0.65	0.01~1W 脉冲	振荡波长可变, 用氩激光激励。光谱分析 振荡波长可变, 用氩激光、脉冲氙灯等激励, 毫微秒~微秒, 脉冲振荡, 光谱分析
			0.36~0.74	0.1~100kW	

气体激光由于具有优越的方向性、单色性、相干性，适用于精密计测。方向性被应用于光学机械的调准，隧道的挖掘，倾斜、垂直、水平的确定，以及监视等方面。单色性作为拉曼光谱，应用于物性物理研究。还有，利用相干性的全息照相技术，应用于失真、变形、振动的测量。

振荡频率稳定的激光，可用作干涉测长仪的光源，在工作机械的校正、超LSI（大规模集成电路）的制造中，是不可缺少的光源。

YAG、玻璃、红宝石等的固体激光，由于具有大功率的脉冲输出，所以在钟表轴承支架的钻孔、集成电路和电阻体的修边、小型金属零件的焊接等方面，可采用固体激光加工。由于固体激光，还有Q开关振荡（巨型脉冲振荡）能产生极大的峰值功率，所以在物性研究和核熔合研究等方面获得应用。

半导体激光具有体积小、功率小、效率高的特点。目前，正在研究在室温下连续振荡的长寿命半导体激光，具有直接电流调制的优点，正在研究将半导体激光用于光导纤维通讯。

6-9 其它光源

6-9-1 闪光灯

(1) 结构 在闪光灯的玻壳中，装有铝丝或钨丝等发光材料，并充入氧助燃气体。在灯丝上用粘接剂涂布着火剂锆粉和氧化剂，通电使发光材料燃烧。当电流通过灯丝或撞击灯泡，都会使着火剂发火，发光材料立刻在氧气中燃烧，并发出强烈的闪光。

为了防止玻壳爆炸，同时也为了对灯的发光颜色进行色温修正（3800→6000K），在玻壳的外面涂布蓝色的合成树脂薄膜（图6-130）。

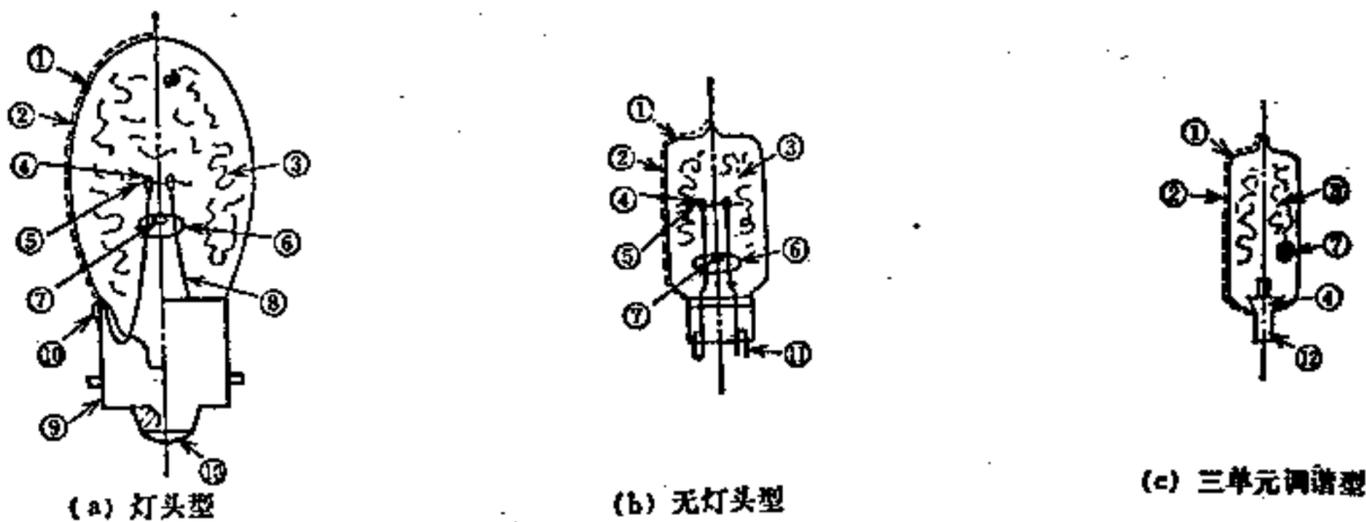


图6-130 各种闪光灯的结构

①玻壳，②保护膜，③发光材料，④着火剂，⑤灯丝，⑥玻璃珠，⑦重点，⑧内导线，
⑨灯座，⑩焊锡，⑪外触点，⑫灯脚

(2) 闪光灯的种类 闪光灯根据灯丝通电后发光材料发光时间的变化，按MF、M、FP各级分类。灯头结构，分有灯头型和无灯头型。

还有特殊型的闪光灯，是将灯与特殊的反光罩组合成一个整体。

(3) 与照相机的同步连接 在发光器中，用干电池作电源的为B型，在干电池上并联电容的为BC型。将发光器与照相机的同步接点用软线连接，当按动照相机的快门时电流被接通，闪光灯随即发光。

也有一种型号是利用快门动作时的撞击，使闪光灯发光。

因而，在使用闪光灯时，应根据照相机快门的特性，同步接点等的具体情况，选择适合于照相机的闪光灯（图 6-131）。

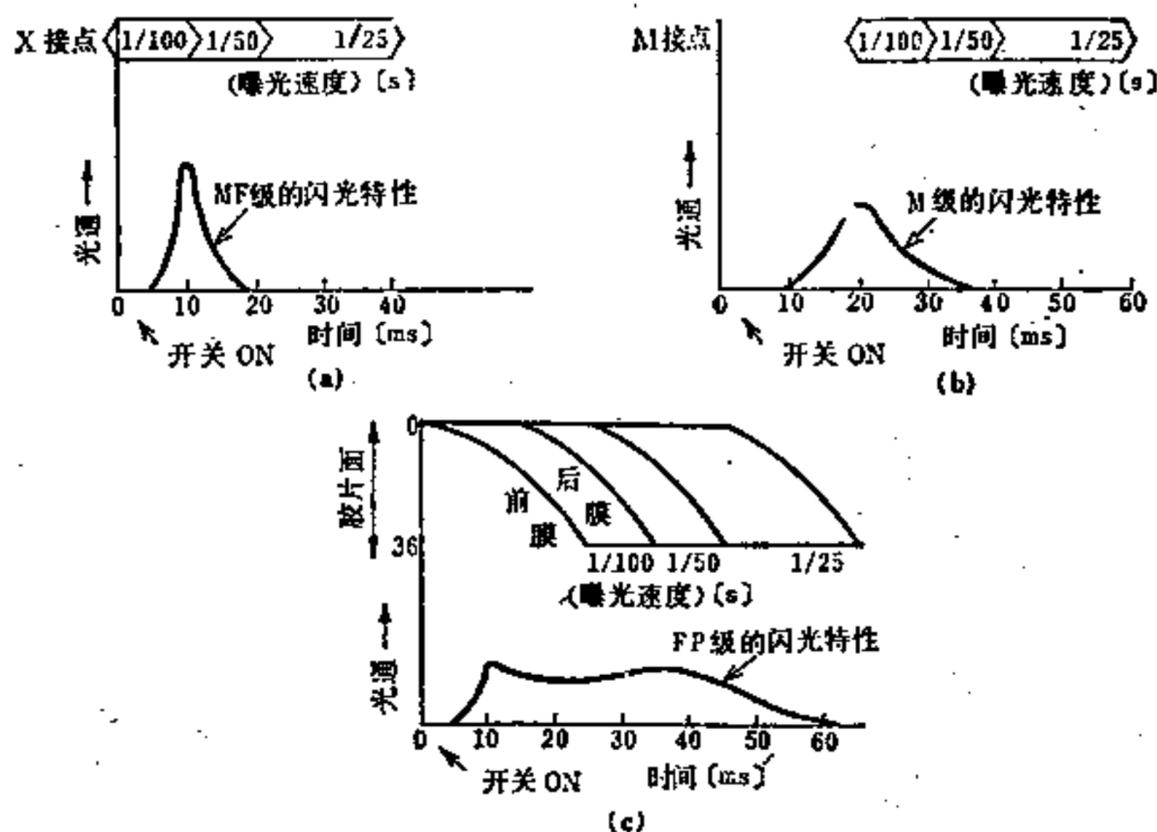


图6-131 同步接点(X、FP、M)和快门速度与闪光灯特性的关系

6-9-2 理化仪器用光源^[96, 97]

在分光光度计中使用的光源，主要有连续光谱光源和辉线光谱光源，前者要求光的波长范围较宽，后者要求光的波长应是 n 根不连续的、非常狭窄的谱线。

(1) 连续光谱光源 这是分光光度计中使用最广泛的光源，可根据各种波长范围分别使用。

在紫外区域，使用氢灯作为光源。氢灯在放电时辐射出氢特有的光谱（图6-132，图6-133）。另外，还有一种重氢灯（图 6-133，图 5-8，图 5-9）。

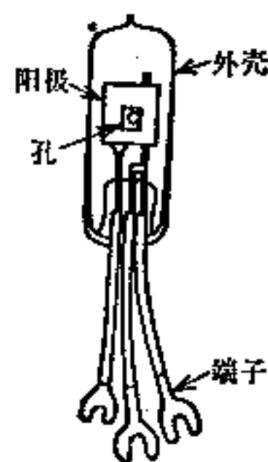


图6-132 氢灯

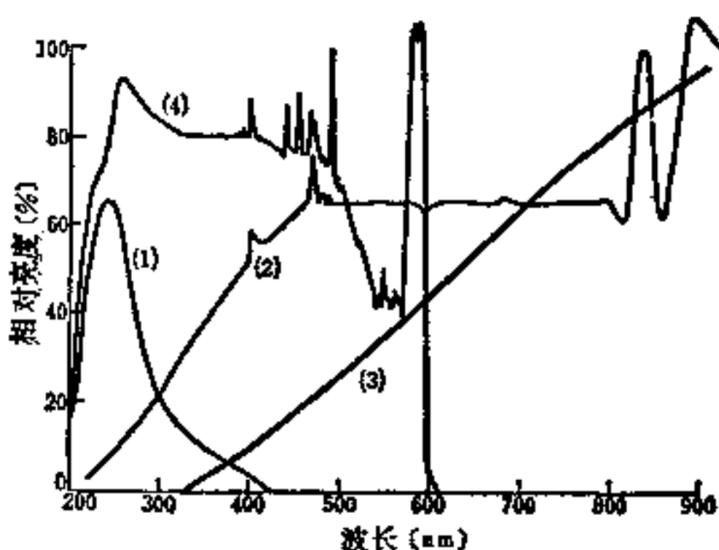


图6-133 连续光谱光源的光谱辐射特性^[97, 98]
 (1) 氢灯(Westing house, 30mA); (2) 氘灯(Osram, 150W); (3) 白炽灯; (4) 重氢灯(HTV)

在可见区域内，最广泛使用的是白炽灯。利用钨灯丝在白炽光，主要作 350~900nm 的吸光分析用。为了抑制灯丝的损耗，在灯内充入惰性气体，使用混有微量卤素的卤钨灯更能

延长灯丝的寿命。在紫外和可见区域内，亦可使用氙灯作光源。与重氢灯相同，是利用放电产生的氙光谱。

在红外分光光度计中，使用热辐射光源，如在烧结SiC中通电的辉光管，以烧结ZrO₂为主体的能斯脱·辉光管，是使用最广泛的光源。另外，在普通红外区域，使用镍铬丝加热器和筒式加热器，而在远红外区域，则使用利用700毫汞蒸气放电的高压汞灯。

(2) 辉线光谱光源 在辉线光谱光源中，使用最普遍的是气体放电管，利用充进的气体原子的放电产生激励，辐射该元素固有的辉线光谱。过去，一般使用Na、K、Cs、Rb、Tl、Hg、Cd等元素的气体放电管(图6-134(a))，其中，因低压汞灯具有253.7nm的强谱线，作为荧光分析用的激励光源，获得广泛使用。H型放电管(图6-134(b))，在H字的中央部分具有高亮度的特点，通常充进氢、氖、氩、氪、氙、氡等气体。

在使用辉线光谱光源作原子吸光分析法中，采用中空阴极灯^[98]。这种灯是在管中充进低压惰性气体，封入中空状的阴极和环状阳极(图6-135)。由于两极间的放电而使惰性气体电离，阴极内壁表面的金属原子被轰击而气化。

气化的原子被激发，辐射出固有的辉线光谱。如将被分析的金属元素作阴极材料，就能得到该元素特有的光谱。图6-136所示为铜的中空阴极灯的光谱。

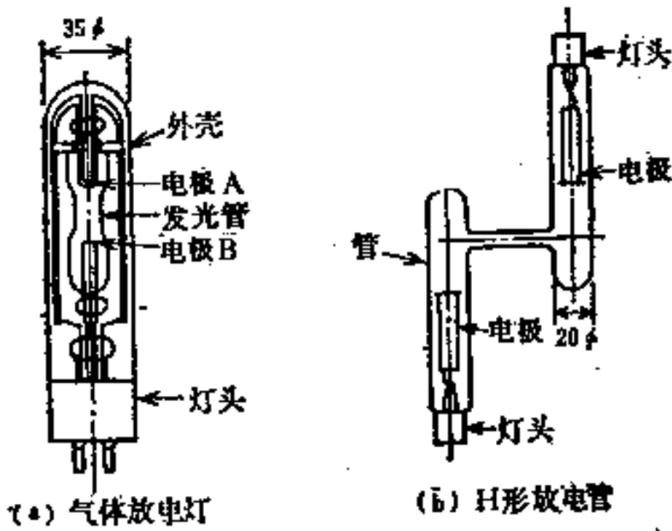


图6-134 辉线光谱光源

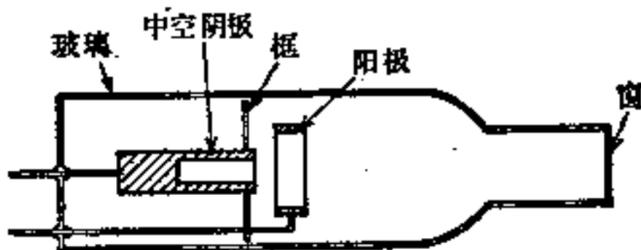


图6-135 中空阴极灯的结构

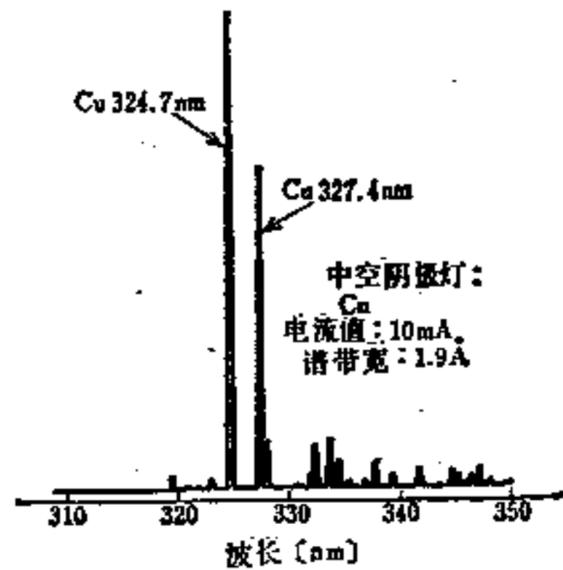


图6-136 铜的中空阴极灯的光谱

6-10 光源材料

6-10-1 玻璃和陶瓷

通常，荧光灯使用软玻璃，玻管用碱玻璃，芯柱用铅玻璃。

玻管用玻璃，特别是荧光灯用的玻璃，要求碱析出量要少，紫外线反射率要高，负感现象要小。环形荧光灯，为便于加工，玻管全使用铅玻璃。

芯柱用玻璃，通常使用铅玻璃。铅玻璃与杜美丝封接的气密性好，软化温度低，加工性能好，电阻率高。

高压放电灯的外套管和特殊灯泡的玻璃壳，采用软化温度高的硼硅玻璃。特别是室外用灯，要求灯在工作时，即使被雨淋也不会破损。对于硼硅玻璃玻璃壳使用的芯柱，必须使用硼硅玻璃，

与芯柱封接的引线,其膨胀系数应与硼硅玻璃的膨胀系数相匹配,相应地使用钨丝或钼丝。

卤钨灯、汞灯和金属卤化物灯的发光管,使用石英玻璃。高压钠灯的发光管,采用透光性好的多晶氧化铝管,而单晶氧化铝(蓝宝石管)也开始被采用。因为氧化铝的熔点高,所以和发光管封接采用以氧化铝为主要成分的陶瓷粘接剂。低压钠灯用的抗钠玻璃,采用氧化铝硼酸玻璃、氧化铝磷酸玻璃。

表6-17表示玻璃和陶瓷的特性。

表6-17(a)

玻璃和陶瓷①

光源	材料名称	膨胀系数 ($10^{-7} \text{cm/cm/}^{\circ}\text{C}$)	移动点② ($^{\circ}\text{C}$)	软化温度 ($^{\circ}\text{C}$)	
1. 白炽灯 一般灯	玻璃	碱镁玻璃($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-MgO}$ 系)	89~107	500~520	680~750
	芯柱	铅玻璃($\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O-PbO}$ 系)	85~95	410~500	620~700
		碱镁玻璃($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ 系)	90~105	450~530	650~720
		硼硅玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ 系)	32~51	490~720	770~920
		石英玻璃(SiO_2)	5	~1200	>1500
	特灯 卤钨灯	玻璃	高硅氧玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 系)	10	~1100
芯柱		硼硅玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ 系)	32~51	490~720	770~920
2. 荧光灯	玻璃管	碱镁玻璃($\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O-CaO-MgO}$ 系)	89~107	500~520	680~750
		铅玻璃($\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O-PbO}$ 系)	85~95	410~500	620~700
	芯柱	铅玻璃($\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O-PbO}$ 系)	85~95	410~500	620~700
		石英玻璃(SiO_2)	5	~1200	>1500
3. 汞灯 超高压汞灯 金属卤化物灯	发光管	高硅氧玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 系)	10	~1100	>1400
		硼硅玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O-(PbO)}$ 系)	33~40	490~560	770~850
		铝硼硅玻璃($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ 系)	40~50	680~750	880~950
		硼硅玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O-(PbO)}$ 系)	32~51	490~560	770~850
	外管冷却管	硼硅玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O-(PbO)}$ 系)	32~51	490~560	770~850
4. 杀菌灯	玻璃芯柱	硼硅玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O-ZnO}$ 系)	45~52	480~530	700~750
5. 低压钠灯	抗钠	铝硼酸盐玻璃($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO-CaO}$ 系)	80~100	350~500	450~650
		铝磷酸盐玻璃($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-R}_2\text{O}$ 系)	80~100	350~500	450~650
	基体 Cd、Mg、Cs 用玻璃	碱玻璃($\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O-CaO-MgO}$ 系)	85~100	500~520	680~750
		铝硼硅酸盐玻璃($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(BaO)}$ 系)	40~50	680~750	880~950
6. 高压钠灯	发光管	透光多晶氧化铝(Al_2O_3)	80~90		(熔点2045 $^{\circ}\text{C}$)
		透明单晶氧化铝(Al_2O_3)	80~90		
	封接用零件	结晶玻璃($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ 系)	80~90		
		(冻石)(steatite) (MgO-SiO_2 系烧结陶瓷)	80~100		

① 照明学会光源研究专门委员会。光源的评价、性能、材料。照明学会(1972)。

② 表示30~380 $^{\circ}\text{C}$ 的平均值。

6-10-2 电极材料

电极对放电灯的特性具有重要的影响。放电灯用的电极,通常为在钨基体上涂敷电子发射性氧化物的氧化物阴极。

钨的熔点高,在氧化物阴极的工作温度下,其蒸气压很低,同时,对电子发射性氧化物、充入气体、金属蒸气等的化学稳定性好,所以,用钨作为氧化物阴极的基体金属,是非常普遍的。

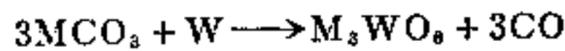
表6-17(b) 主要玻璃的成分(重量%)

材料名称 用途 成分	碱镁玻璃	碱镁玻璃	铅玻璃	铅玻璃	硼硅玻璃
	白炽灯玻壳	直管形荧光灯玻管	环形荧光灯玻管	荧光灯芯柱	汞灯玻壳
SiO ₂	70	71	60	56	71
Al ₂ O ₃	2	2	2	2	2
Fe ₂ O ₃	—				
TiO ₂	—				
CaO	6	9	0.5以下	—	—
MgO	2				
BaO	0.5				
PbO	0.3以下	—	24	30	5
Na ₂ O	18	17	9	5	5
K ₂ O			4	7	
B ₂ O ₃	—	—	—	—	16
其他	1	1	1	—	1

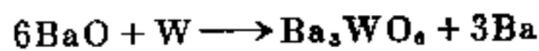
氧化物阴极使用的电子发射物质的逸出功,从灯的启动方面考虑,希望越低越好。但是,从灯的寿命方面考虑,则希望电子发射物质由于离子轰击而产生的蒸发、溅散越少越好。而符合后一要求的物质,在多数情况下,其逸出功都比较高。由于两个要求具有相反的关系,所以,作为电子发射物质,应根据灯的种类作适当的选择。

(1) 荧光灯用电极 荧光灯用的电极,是在双螺旋灯丝或三螺旋灯丝上,涂敷 BaO-SrO-CaO系的氧化物。为了抑制灯在工作中钡和锶的蒸发、溅散,涂敷 ZrO₂、MgO 等氧化物,使之成为固溶体。

BaO-SrO-CaO是以碳酸盐的形式,涂敷在钨螺旋上,在排气过程中使氧化物分解。在分解过程中,在钨表面生成钨酸盐的中间层,反应方程式如下〔99〕:



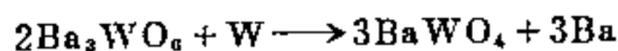
如这个中间层很薄,反应生成金属钡,起到降低逸出功的作用。反应方程式如下:



但是,如生成的金属钡过剩,电极就会过早地损耗,同时在电极周围的管壁上形成黑斑。

如这个中间层较厚,则会抑制金属钡的生成,逸出功就会升高。结果,会使电极工作温度上升,缩短电极寿命。另外,生成过量的钨酸盐,会在灯工作时放出氧气,生成汞的氧化物,将在管壁上缓慢形成黑带。

(2) 高压放电灯用电极 高压放电灯的电流大,而且电极工作温度也高。因而使用 (Ba·Sr·Ca)₃WO₆系的物质作为电子发射物质。在荧光灯中使用 Ba₃WO₆,不是作为电子发射物质,而是为了用以控制游离钡的生成速度。在高压放电灯中,



在这个反应中生成的游离钡,具有降低 Ba₃WO₆的逸出功的作用。为了控制这个游离钡的生成速度和蒸发速度,添加 ThO₂、Y₂O₃等稀土类氧化物〔100〕。汞灯和高压钠灯用电极,是在内侧螺旋的螺旋之间以及内侧螺旋和外侧螺旋之间,充填这种电子发射物质。

(3) 金属卤化物灯用电极 因为在金属卤化物灯中,充进了卤化物,所以不能使用易和卤化物反应的碱土类金属化合物。为此,使用 ThO_2 、 Dy_2O_3 、 Sc_2O_3 等稀土类氧化物或稀土类氧化物和钨金属粉末的烧结体,作为电子发射物质。

6-10-3 荧光粉

卤磷酸钙荧光粉,用254nm紫外线激发,具有较高的发光效率,又具有价钱便宜、大量生产的优点,作为荧光灯用荧光粉,自1946年以来,被广泛地采用(参见表6-18)^[101]。

表6-18 荧光粉①

灯	材料名称	化 学 式	基 本 特 性		用 途
			λ_{max} (nm)	光 色	
荧 光 灯	1. 卤磷酸盐	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}:\text{Sb}$ X = F, Cl $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}:\text{Sb, Mn}$	450	蓝白色	高显色性荧光灯 普通荧光灯
			450	昼光色~白	
			580	色~暖白色	
	2. 磷酸盐	$(\text{Sr, M})_3(\text{PO}_4)_2:\text{Sn}$ M = Mg, Zn $(\text{Ba, Ca})_2(\text{PO}_4)_2:\text{Sn}$ $(\text{Ca, Mg})_3(\text{PO}_4)_4:\text{Eu}$ $(\text{Ca, Zn})_3(\text{PO}_4)_2:\text{Tl}$ $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Eu}$ $(\text{Sr, Mg})_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Eu}$	640	橙红色	高显色性荧光灯 太阳灯 重氮拷贝灯 重氮拷贝灯
				蓝白~绿白	
			440	蓝白	
			325	紫外	
			420	深蓝色	
			390	紫外~蓝色	
	3. 硅酸盐	$\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ $\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Pb}$ $\text{CaSiO}_3:\text{Pb}$ $(\text{Ba, Sr})\text{Si}_2\text{O}_5:\text{Eu}$	525	绿色	高显色性荧光灯 捕虫灯 太阳灯 高显色性荧光灯
			350	紫外	
300			紫外		
			蓝紫色		
4. 硼酸盐	$\text{Cd}_2\text{B}_2\text{O}_5:\text{Mn}$	626	粉红色		
5. 钨酸盐	CaWO_4 $\text{CaWO}_4:\text{Pb}$	430	蓝色	植物栽培灯	
		450	蓝色		
6. 锆酸盐	$4\text{MgO}\cdot\text{GeO}_2:\text{Mn}$ $4(\text{MgO, MgF}_2)\cdot\text{GeO}_2:\text{Mn}$ $\text{Zn}(\text{Ca, Pb})\text{GeO}_4:\text{Mn}$ $\text{Li}_2\text{ZnGe}_3\text{O}_9:\text{Mn}$	660	深红色	植物栽培灯 植物栽培灯	
		660	深红色		
			绿色		
			绿色		
7. 钒酸盐	$\text{YVO}_4:\text{Eu}$ $\text{Y}(\text{P, V})\text{O}_4:\text{Eu}$	619	红色	高显色性荧光灯	
8. 铝酸盐	$\text{BaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Eu}$ $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Mn, Mg}$ $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Eu, Mn}$ $\text{BaMg}_2\text{Al}_{18}\text{O}_{27}:\text{Eu}$ $(\text{Ce, Tb})\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}$	435	蓝白色	高显色性荧光灯 高显色性荧光灯	
			红色		
		510	绿色		
		425	蓝色		
545	绿色				
9. 铝镓酸盐	$\text{Mg}(\text{Al, Ga})_2\text{O}_4:\text{Mn}$	510	绿色	干印术拷贝灯	
10. 镨酸盐	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Dy}$		白色		
11. 钇酸盐	$\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ $\text{LiYO}_2:\text{Eu}$	613	红色	高显色性荧光灯	
			红色		
荧光 汞灯	1. 磷酸盐	$(\text{Sr, M})_3(\text{PO}_4)_2:\text{Sn}$ M = Mg, Zn	630	橙红色	一般汞灯
	2. 锆酸盐	$4\text{MgO}\cdot\text{GeO}_2:\text{Mn}$ $4(\text{MgO, MgF}_2)\cdot\text{GeO}_2:\text{Mn}$	660 660	深红色 深红色	一般汞灯 一般汞灯

(续)

灯	材料名称	化 学 式	基 本 特 性		用 途
			λ_{max} (nm)	光 色	
荧 光 汞 灯	3. 钇酸盐	$Y_2O_3: Eu$	613	红色	
	4. 钒酸盐	$YVO_4: Eu$	619	红色	一般汞灯
		$Y(P, V)O_4: Eu$ $Y(P, V)O_4: In$	460	蓝白色	
	5. 卤硅酸盐	$Sr_2Si_3O_8 \cdot 2SrCl_2: Eu$	485	蓝绿色	高显色性汞灯
6. 铝酸盐	$(Ba, Mg)_2Al_{14}O_{24}: Eu$	450	蓝色	高显色性汞灯	
	$(Ba, Mg)_2Al_{14}O_{24}: Eu, Mn$	515	绿色	高显色性汞灯	
	$Al_2O_3 \cdot Y_2O_3: Tb$	545	黄绿色	高显色性汞灯	

① 照明学会光源研究专门委员会：光源的评价、性能、材料，照明学会(1972)

这种荧光粉，用 $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaX_2(Sb, Mn)$ 表示，改变Sb和Mn的比例，就可以得到色温为6500K的昼光色灯用荧光粉、3000K的暖白色以至任意色调的荧光粉。

荧光粉的颗粒过细，致使紫外线散射，造成光效下降。卤磷酸钙荧光粉，按规定的颗粒配制，发光效率较高。用EDTA(乙二胺四醋酸)溶去正磷酸盐、焦磷酸盐等的异相成分和附着在荧光粉表面的细微颗粒，可提高发光效率^[102]。卤磷酸钙，按 $Ca/PO_4 = 5/3$ 配制，越接近化学计算值，越能得到稳定的结晶结构，灯的光通维持率就越高^[103]。

卤磷酸钙荧光粉的发光效率较高，但当发光波长超高600nm时，发光效率急剧下降。为此，在要求高显色性的高级荧光灯时，就混以各种红色荧光粉。偏重显色性的荧光灯，使用正酸铈或氟锆酸镁荧光粉，偏重发光效率的荧光灯，使用氧化钪荧光粉。过去，高显色性荧光灯，显色性越高，效率越低。作为克服以上缺点的高效率、高显色性荧光灯用的荧光粉，用稀土元素作激活剂，这也就是已发表的光谱带丰宽度小的，呈现出红、绿、蓝三基色的荧光粉^[104]。

作为生产用的特殊荧光灯，复印灯采用 Eu^{2+} 激活的焦磷酸盐荧光粉，干印术拷贝灯采用Mn激活的铝镓酸盐荧光粉或用 Eu^{2+} 和Mn激活的铝酸盐荧光粉。

汞灯用荧光粉，采用365nm紫外线激发，而且要求当外管的工作温度在250~350°C时，不能有减光现象。为了补充红光，采用氟锆酸镁、钒酸钪、正磷酸铈等荧光粉。而为了改善显色性，以补充蓝绿色光，则可采用 Eu^{2+} 或Mn激活的铝酸盐、 Eu^{2+} 激活的铬硅酸盐、铽激活的铝酸盐等荧光粉^[105、106]。

6-10-4 金属材料

(1) 灯丝用金属材料 钨丝作为制造灯丝的金属材料，自1908年采用Coolidge的粉末冶金法制造成丝料以来，经过七十年的历史，作为灯用钨丝，性能上有了显著的提高，具有很好的高温机械强度和优良的物理性能，现在仍被采用。

钨丝用作白炽灯的灯丝和荧光灯的电极，特别是在高温下，晶粒偏移(off-setting)，在重力方向产生下垂(sag)，使灯的效率 and 寿命下降，而且耐轰击强度小。为了克服这个缺点，在钨中添加称为添加剂的微量不纯物，以在钨丝的轴向形成深度组合的大颗粒的再结晶组织的“不垂·添加剂·钨丝”。卤钨灯用钨丝，根据卤素再生特性，在纯度和表面处理等方面，尚需经过特殊处理。

在钨中添加氧化钪(TbO_2)，可以有效地抑制结晶成长速度和防止晶粒偏移，提高高温

屈服点，而且具有很好的热电子发射性能，可用作耐振灯泡的灯丝和金属卤化物灯的电极。

钨·铼合金(W-Re)，既保持了钨丝的特性，又提高了电阻，增强了高温强度，可用作耐振仪表泡等低功率灯、加热器、闪光灯等的灯丝。根据提炼加工性能、灯泡性能、经济性等的要求，通常普遍使用3%Re-W丝。

为了进一步改善高温特性和加工性能，正在研制添加钴等其他添加剂的钨丝，以用作各种特殊用途的灯丝和电极。

(2) 封接用金属材料 封接用金属材料，根据玻璃或陶瓷的膨胀系数，使用杜美丝、可伐丝、钼丝、钨丝、铌管等。表6-19列出它们的特性。

表6-19 封接线的成分和膨胀系数

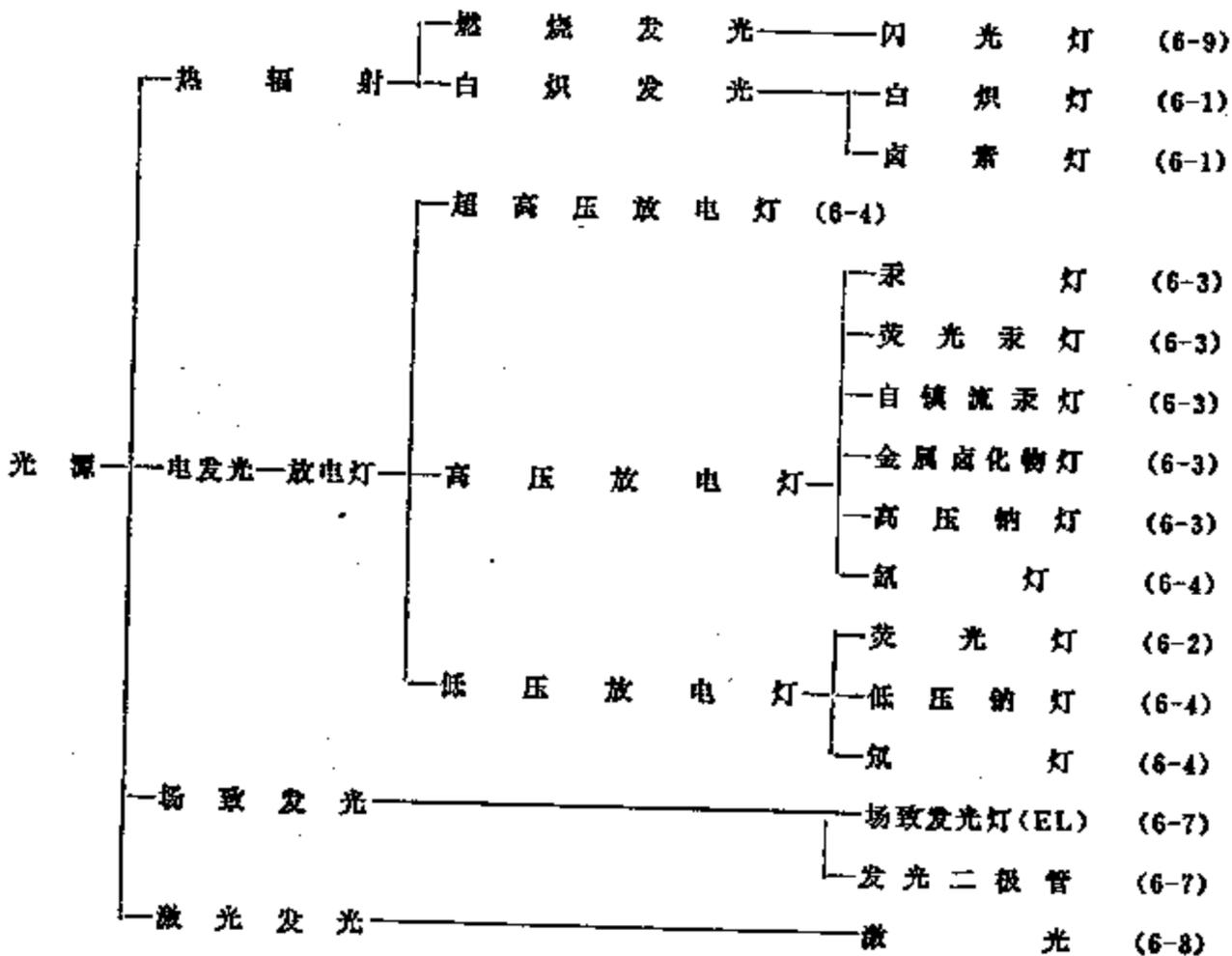
封接线的种类	成分	膨胀系数 (cm/cm/°C)	封接玻璃
杜美丝	在铁镍合金芯丝上镀铜	$81-84 \times 10^{-7} (30 \sim 500^{\circ}\text{C})$	铅玻璃、碱玻璃
可伐丝	Fe-Ni-Co合金丝	$60 \times 10^{-7} (30 \sim 500^{\circ}\text{C})$	硼硅玻璃(可伐玻璃)
钼丝	纯Mo	$60 \times 10^{-7} (25 \sim 700^{\circ}\text{C})$	硼硅玻璃(钼组玻璃)
钨丝	纯W	$44 \times 10^{-7} (25 \sim 700^{\circ}\text{C})$	硼硅玻璃(钨组玻璃)
铌管	纯Nb	72×10^{-7}	透光多晶体、氧化铝陶瓷

6-11 光源的评价

6-11-1 光源的评价项目

表6-20表示实用光源的分类。在照明方面主要使用白炽灯、荧光灯、荧光汞灯，最近，

表6-20 光源的分类^[107,108] ——()内表示章节



还使用金属卤化物灯、高压钠灯、卤素灯等。汞灯、金属卤化物灯、高压钠灯统称为HID灯 (High Intensity Discharge Lamp)。

这些光源,各有特点,一般根据各种照明设施的使用要求,以下面的各项内容作为选定评价[108, 109]。

(1) 光量特性: 总光通、效率、寿命、运转性能、亮度、光强、紫外线和热辐射等。

(2) 光质特性: 光色、色温、显色性、色度、光谱分布、闪烁等。

(3) 电气特性: 输入或消耗功率、灯电压、灯电流、电压特性、启动特性、再启动特性、电波干扰噪声特性等。

(4) 机械特性: 形状、尺寸、结构、端子结构(灯头等)、重量、机械强度、抗振性、耐冲击性等。

(5) 经济特性: 初始价格、设备费用、效率、寿命、维护管理费用、电费等。

(6) 心理特性: 舒适性、装饰性、美观性、气氛性、特殊显示性、调和性等。

(7) 与使用有关的其他特性: 稳定性、环境温度依存性、点灯方向规则、配光特性、光控制特性、调光性能、与镇流器的配合性能、点灯装置、与灯具的配合性能、灯和镇流器以及灯具的互换性、操作维护的简易性、可移动性能等。

作为照明用光源,对其中几项基本的重要的评价项目作一说明。

(a) 效率: 光量在经济方面是重要项目。对于放电灯,由于必须使用镇流器,所以效率也包含镇流器的效率在内,由于使用镇流器(点灯装置)而使效率产生变化,为灯效率的80~95%[107, 110]。

(b) 光色·色温: 白炽灯的色温约为3000K或低些,产生温暖的感觉,昼光的色温约为6500K或高些,在5000K以上就产生凉爽的感觉。由于人们的爱好不同,对光色的要求也不同,在一般情况下,照度低的地方希望色温低的光色,照度高的地方希望色温高的光色[111]。

(c) 显色性(参照4-4节): 在评价光源的显色性时,一般使用平均显色指数(R_a)和

光源种类 (功率: W)	总光通 ⁽²⁾ (lm)			灯效率 ⁽²⁾ (lm/W)								色温 (K)			平均显色指数 (R_a)		
	1 000	10 000	100 000	10	20	30	40	50	70	100	150	200	2 000	4 000	6 000	0	50
① 一般照明用灯 (20-100-150W)	[4]			[4] [3]								[4]			[4]		
② 卤素灯 (100-1 000-1 500W)	[3]			[4]								[4]			[4]		
③ 荧光灯 (20-40W)	[4]			[4]								[4]			[4]		
④ 高输出荧光灯 (110W)	[4]			[4]								[4]			[4]		
⑤ 高显色荧光灯 (20-40W)	[4]			[4]								[4]			[4]		
⑥ 汞灯 (40-400-2 000W)	[4]			[4]								[4]			[4]		
⑦ 荧光汞灯 (40-400-2 000W)	[4]			[4]								[4]			[4]		
⑧ 金属卤化物灯 (250-400-2 000W)	[4]			[4]								[4]			[4]		
⑨ 高显色金属卤化物灯 (125-400-1 000W)	[4]			[4]								[4]			[4]		
⑩ 高压钠灯 (150-400-1 000W)	[4]			[4]								[4]			[4]		
⑪ 低压钠灯 (35-50-100W)	5 000 13 000 30 000			40 70 100								2 500 4 000 5 500			40 70 85		

[注] (1) 代表灯的功率

(2) 初始值

(3) "□" 是特性的范围

(4) "●" 是样品值或代表值

图6-137 照明光源

特殊显色指数 (R_s)，以表示在待测光源照明下物体的颜色感觉和在标准光源照明下物体的颜色感觉相符合的程度。 R_s 大的光源，称为高显色性灯。

另外，从单色光的再现性出发，引入对自然色的感觉要素作为评价方法，在记忆色的基础上建立起满意色作为标准。将在标准光源 (CIE合成昼光D6500K) 照明下用来计算 R_s 的8种试验色，和用来计算 R_a 的No13 (肤色) 和 No14 (树叶色) 2种试验色，共计10种试验色的CIE—UCS色度坐标，加上它的满意色的色度坐标的偏移，在数量上用满意指数 (Flattery Index^[112]) 来评价。还有用联结对应于用来计算平均显色指数的8种试验色的CIE—UCS色度坐标，得出的八角形面积的大小 (彩度越高，面积越大)，作为判断可接受指数 (Acceptability Index^[113]) 和色识别能力指数 (Color Discrimination Index^[114])。

(d) 寿命 将灯燃点到不能再燃点，或光通维持率低于规定值以下的点灯时间，称为寿命，制造者规定的时间称为额定寿命。实际平均寿命，因点灯条件而异，点灭次数越多，寿命越短。

(e) 亮度 亮度过高，会产生闪烁现象。在一般照明中，亮度低点较好。在特殊照明中，有的则需要高亮度。

(f) 闪烁 在交流点灯中，一般会产生闪烁现象。在精密作业的照明中，则希望使用闪烁现象小的光源。

6-11-2 光源的评价和选择

根据各种照明设施的目的，从多种光源中，选择最适当的光源加以利用，是照明设计中极为重要的原则。考虑上述项目的重要程度，根据各种用途和目的，试用定性的或定量的评价方法，评价选择适当的光源^[109, 112~117]。但是，由于并未确立综合的评价方法，所以关于基本的评价项目，对各种光源的特性值，用一览表的形式表示如表6-21、图6-137、图6-138。光源的定量评价，随照明设施的用途和目的而异，不能作单一的评价，有些光源具有通用性。

寿命 (小时)		亮度 [cd/m^2] $\times 10^4$				闪烁指数				住宅	学校·图书馆	医院	美术馆等	饭店等	商店	工厂 照明	投光照明	公园广场	商店街	竞技场	道路	港口·机场
1000	10000	0.51	5.10	50.100	500.1000	0	0.1	0.2	0.3													
☐	☐	☐	☐	☐	☐ (7)	☐	☐	☐	☐	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

(5) 包括 Sx 系和 Dy-T1 系 (6) "◎" 是 Dy-T1 系灯 (7) "○" 是透明外壳形

的评价和用途

表6-21

照明光源的光色和显色性^[107]

光色和色温	平均显色指数 (R_a)			
	$R_a = 85 \sim 100$	$R_a = 70 \sim 84$	$R_a = 40 \sim 69$	$R_a < 40$
昼光色 (6000K左右)	荧光灯(D-DL, SDL) 金属卤化物灯(充Dy) 氙灯	荧光灯 (D)		汞灯(蓝白色)
白色 (4500K左右)	荧光灯(W-SDL) 金属卤化物灯(充Sn)	荧光灯 (W-DL)	荧光灯(W) 荧光汞灯 自镇流汞灯 金属卤化物灯	
	荧光灯(WW-DL) 白炽灯 卤素灯		荧光灯(WW)	高压钠灯(黄白色) 低压钠灯(橙黄色)

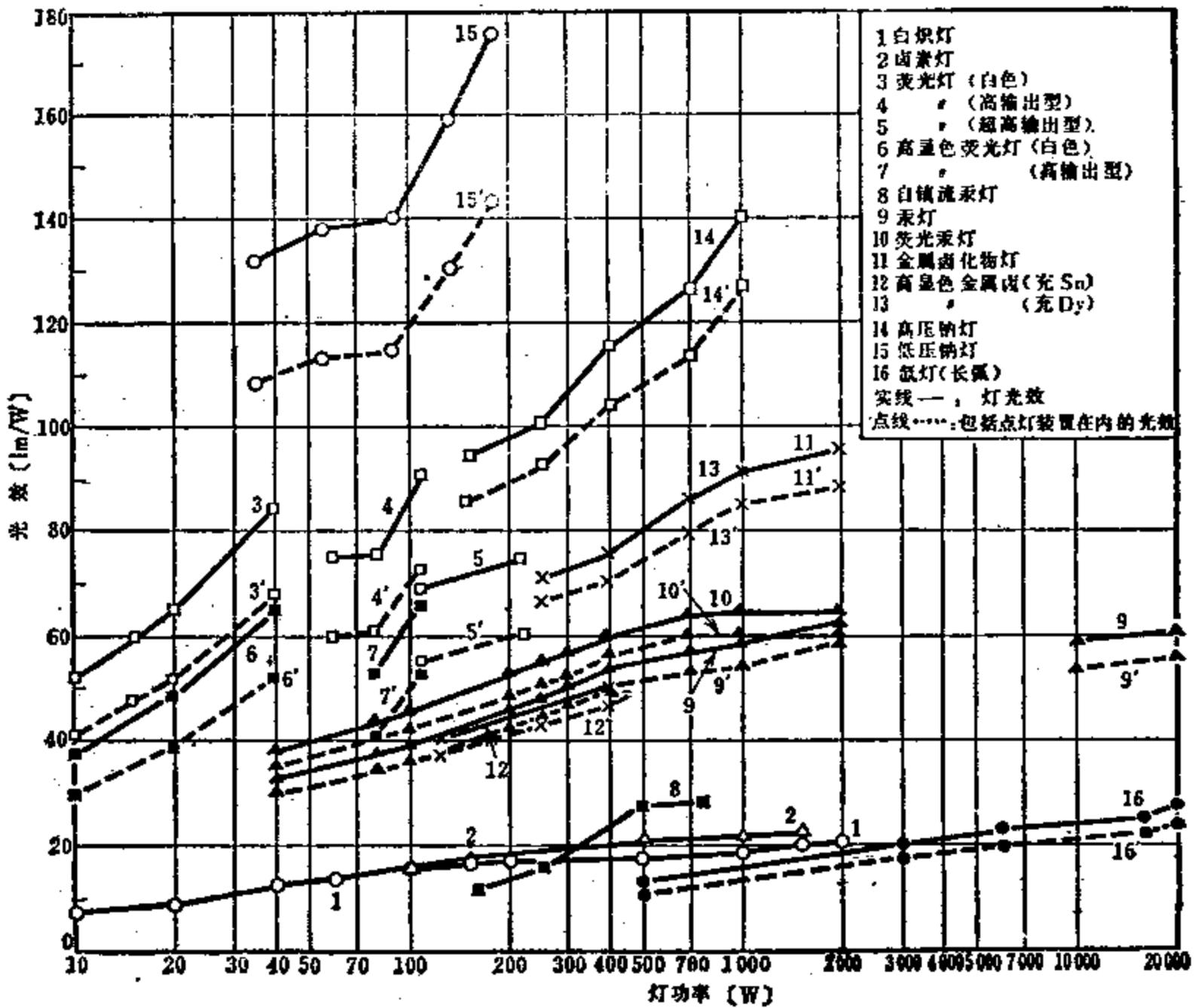


图6-133 各种光源的功率和光效

6-11-3 各种光源的特点

(1) 白炽灯：一般白炽灯效率低、寿命短、光色好、显色性好，特别是不要点灯装置。还有，由于可做成各种功率和各种玻壳形状、小型化，所以，首先在住宅、商店等室内照明

方面, 获得非常广泛的应用。

(2) 卤素灯: 效率、寿命比白炽灯稍优, 由于能够小型化, 所以灯具也可小型化。用于投光、放映、照相、摄影等方面。

(3) 荧光灯: 效率、寿命全优、可获得各种光色。由于亮度低和 R_a 可达65~92, 所以可作室内一般照明用。另外, 环形荧光灯, 在日本使用也非常多。

(4) 汞灯: 汞灯的光通高、寿命长, 荧光汞灯一般适于室外照明。由于透明式汞灯的显色性不好, 所以, 只适于在公园、投光照明等方面使用。

(5) 金属卤化物灯: 金属卤化物灯的效率、显色性均比汞灯好, 适于作室外照明和室内高顶棚照明。高显色性 ($R_a=92$) 的灯, 用作印刷厂、体育馆等处的照明。

(6) 高压钠灯: 高压钠灯是近白色光源中效率最高的一种, 尽管色温低、显色性不好, 但用于道路照明和广场照明等, 是很经济的灯种。

(7) 低压钠灯: 在人工光源中是效率最高的一种灯, 由于发出的是橙黄色的单色光, 所以主要用在隧道照明方面。

6-12 灯和镇流器用表

见表6-22。

表6-22

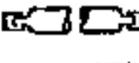
(a) 一般照明用灯

种类 ()内玻壳形状	型号	类别	玻壳直径 [mm]	长度 [mm]	灯头	光通 [lm]	光效 [lm/W]	平均寿命 [h]
乳白 (JIS C7501)  (PS)	LW100V 20W	充气, 双螺旋	55	94~104	E26/25	170	8.5	1500
	LW100V 30W	"	"	"	"	325	10.8	1000
	LW100V 40W	"	55 或 60	或 103~117	"	485	12.1	1000
	LW100V 60W	"	60	103~117	"	810	13.5	1000
	LW100V 100W	"	"	"	"	1520	15.2	1000
透明 (JIS C7501)  (PS)	L 100V 10W	真空, 单螺旋	55	102 以下	E26/25	76	7.6	1500
	L 100V 20W	充气, 双螺旋	"	"	"	175	8.7	"
	L 100V 30W	"	"	"	"	340	11.3	1000
	L 100V 40W	"	55 或 60	或 114 以下	"	510	12.8	"
	L 100V 60W	"	60	114 以下	"	850	14.2	"
	L 100V 100W	"	"	"	"	1600	16.0	"
	L 100V 150W	"	75	160 以下	"	2450	16.4	"
	L 100V 200W	"	"	"	"	3450	17.3	"
昼光  (PS)	100V 40W	充气, 双螺旋	55	105	E26	345	8.6	1000
	100V 60W	"	60	110	"	570	9.5	"
	100V 100W	"	"	136	"	1065	10.7	"
白色球形灯  (G)	WB100V 25W	真空, 单螺旋	50	72	E26	170	6.8	2000
	WB100V 40W	充气, 双螺旋	80, 95	110, 126	"	430	10.8	"
	WB100V 60W	"	"	"	"	725	12.1	"
	WB100V 100W	"	95, 125	126, 158	"	1370	13.7	"
	WB100V 150W	"	125	158	"	2220	14.8	"

种类 ()内玻璃形状	型号	类别	玻璃直径 [mm]	长度 [mm]	灯头	光通 [lm]	光效 [lm/W]	平均寿命 (h)
 (G)	CB100V 25W	真空,单螺旋	50	72	E26	190	7.6	2000
	CB100V 40W	充气,双螺旋	60, 80, 90, 125	82, 110, 126, 158	"	480	12.0	"
	CB100V 60W	"	80, 95, 125	110, 126, 158	"	815	13.6	"
	CB100V 100W	"	95	126	"	1540	15.4	"
 (R)	KW100V 36W	充气,双螺旋	60	101	E26	450	12.5	2000
	KW100V 54W	"	"	"	"	750	13.9	"
	KW100V 90W	"	"	"	"	1400	15.5	"
半反射型灯  (PS)(G)	100V 40W	充气,双螺旋	95	126	E26	455	11.4	2000
	100V 60W	"	95, 60	126, 110	"	755, 820	12.9, 13.72	2000, 1000
	100V 100W	"	95, 70	126, 124	"	1435, 1540	14.3, 15.42	2000, 1000
小球灯 (JIS C 7523) (G)	100V 2C	真空,单螺旋	43以下	65以下	E26/25	(20)	—	2000以上
	100V 1C	"	32以下	50以下	E12/15	(10)	—	1000以上
装饰灯 	100V 25W	真空,单螺旋	C37	102	E26	160	6.4	1500
	100V 40W	充气,单螺旋	C37	"	"	300	7.5	"
	100V 60W	"	C37	"	"	540	9.0	"

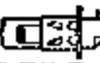
(b) 投光灯

投光灯具用灯 (JIS C 7512-1962)	型号	玻璃型号	长度 [mm]	灯头	光中心距离 [mm]	光通 [lm]	寿命 [h]	标准点 灯方向
	PR100V 250WG	G95	123	E26	76	3380	1500	向上
	PR100V 500WG	G125	168	E39	105	7750	"	"
	PR100V 500W	PS110	232	"	177	"	"	向下
	PR100V1000WG	G125	168	"	105	18000	"	向上
	PR100V1000W	PS165	322	"	240	"	"	向下
	PR100V1500W	"	"	"	"	28500	"	"
	100V2000W	"	"	"	"	41000	1000	"
反射型投光灯 (JIS C 7525-1976)	型号	玻璃直径 [mm]	长度 [mm]	灯头	光束开口 [°]	最大光强 [cd]	光束光通 [lm]	寿命 [h]
 (R)	RS100V 40W	71以下	114以下	E26	45>	310以上	60以上(30°)	1000
	RS100V 60W	"	"	"	"	650	110 (30°)	"
	RF100V 75W	91以下	140以下	"	45~80	500	330 (60°)	"
	RF100V100W	112	155	"	"	600	400 (60°)	1500
	RFW100V100W	"	"	"	80<	250	630 (90°)	"
	RS100V100W	"	"	"	45>	1300	240 (30°)	"
	RF100V150W	"	165以下	"	45~80	900	600 (60°)	"
	RFW100V150W	"	"	"	80<	400	1000 (90°)	"
	RS100V150W	"	"	"	45>	2300	430 (30°)	"
	RF100V200W	"	"	"	45~80	1400	940 (60°)	"
	RFW100V200W	122以下	"	"	80<	500	1250 (90°)	"
	RS100V200W	132	178以下	"	45>	3100	530 (30°)	"
	RF100V300W	"	185	"	45~80	2300	1550 (60°)	"
	RS100V300W	152以下	238	"	45>	5400	900 (30°)	"
	室外用	RF100V100WH	112以下	165以下	"	45~80	500	330以上(60°)
	RFW100V100WH	132	185	"	80<	220	550 (90°)	"
	RF100V150WH	"	170	"	45~80	850	570 (60°)	"

反射型投光灯 (JIS C 7525-1976)		型号	玻壳直径 [mm]	长度 [mm]	灯头	光束开口 [°]	最大光强 [cd]	光束光通 [lm]	寿命 [h]	
室 外 用	RFW100V150WH	132 以下	170 以下	E26	80<	380 以上	950以上(90°)	2000		
	RS100V150WH	"	165 "	"	45>	2000 "	350 " (30°)	"		
	RF100V200WH	"	170 "	"	45~80	1300 "	870 " (60°)	"		
	RS100V200WH	"	165 "	"	45>	2700 "	470 " (30°)	"		
	RF100V300WH	152 以下	235 "	E39	45~80	2100 "	1500 " (60°)	"		
	RS100V300WH	"	"	"	45>	5000 "	860 " (30°)	"		
	RF100V500WH	182 以下	260 以下	"	45~80	4000 "	2600 " (60°)	"		
	RS100V500WH	"	"	"	45>	11000 "	1800 " (30°)	"		
	RF100V500WB	"	"	"	45~80	4000 "	2600 " (60°)	"		
	RS100V500WB	"	"	"	45>	11000 "	1800 " (80°)	"		
PAR型反射灯 (光束灯)		型号*	玻壳直径 [mm]	长度 [mm]	灯头	最大光强 [cd]	光通 [lm]	光通开口[°] 1/2 1/10	寿命 [h]	
 (PAR)	BRS100V 75W	PAR121	132	E26	5000	760	15 30	2000		
	BRF100V 75W	"	"	"	1900	"	30 55	"		
	BRS100V100W	"	"	"	7000	1100	15 30	"		
	BRF100V100W	"	"	"	2800	"	30 55	"		
	BRS100V150W	"	"	"	11000	1700	15 30	"		
	BRF100V150W	"	"	"	4200	"	30 55	"		
	BRS110V 75W	"	"	"	5000	760	15 30	"		
	BRF110V 75W	"	"	"	1900	"	30 55	"		
	BRS110V100W	"	"	"	7000	1100	15 30	"		
	BRF110V100W	"	"	"	2800	"	30 55	"		
	BRS110V150W	"	"	"	11000	1700	15 30	"		
	BRF110V150W	"	"	"	4200	"	30 55	"		
	PAR型反射灯** (冷光束灯)		CRS100V 75W	PAR 121	132	E26	4500	700	15 30	2000
		CRF100V 75W	"	"	"	1800	700	30 55	"	
	CRS100V100W	"	"	"	6500	1000	15 30	"		
	CRF100V100W	"	"	"	2600	1000	20 55	"		
	CRS100V150W	"	"	"	10000	1500	15 30	"		
	CRF100V150W	"	"	"	3800	"	30 55	"		
PAR型反射灯 (密封光束型)		BRS100V100W/P	PAR 145	94	双触点	15000	1100	7×10 13×20	"	
	BRMF100V100W/P	"	"	"	2400	"	18×30 26×40	"		
	BRS100V200W/P	PAR 178	124	"	43000	2300	7×11 13×20	"		
	BRMF100V200W/P	"	"	"	14000	"	11×25 18×35	"		
	BRF100V200W/P	"	"	"	2100	"	43 60	"		
PAR型反射灯 (密封光束型) 多重干涉膜反射面		CRS100V250W/P	PAR 178	124	双触点	30000	980	8×13 16×22	1000	
	CRMF100V250W/P	"	"	"	12000	730	12×26 19×37	"		
	CRF100V250W/P	"	"	"	2000	1100	44 60	"		
卤素投光灯 (JIS C 7527-1974)		型号	玻壳直径 [mm]	长度 [mm]	灯头	总光通 [lm]	寿命 [h]	标准点 灯位置		
 (T)	J100V500W	12 以下	118	R7S	10500	2000	水平			
	J200V1000W	"	208	"	21000	"	"			
	J200V1500W	"	248	"	33000	"	"			
单灯头卤素投光灯		JD100(110)V250W	14	78~95	GYX9.5 E11	4500	2000	—		
	JD100(110)V500W	"	95~98	"	9500	"	—			

* 型号栏中, S: 聚光, F: 平行光, MF: 中央平行光
** 有110V的, 隔热率60%

(c) 汽车前灯

密封光束型灯 (JIS D 5504 -1971)	型号	功率 (W)	灯丝	试验电压 (V)	平均寿命 (h)	灯头	用途
	AS 13L 12V 40/35W	40 35	行驶 交错	12.8	300 500	3 触点	轻型3、4轮和 3、4轮汽车
	AS 13L 12V 40/40W	40 40	行驶 交错	12.8	300 500	3 触点	轻型3、4轮和 3、4轮汽车
	ASD 13 12V 37.5W	37.5	行驶	12.8	200	双触点	4轮汽车
	ASD 13L 12V 37.5/50W	37.5 50	行驶 交错	12.8	200 320	3 触点	4轮汽车
	ASD 13 24V 40W	40	行驶	28.0	300	双触点	4轮汽车
	ASD 13L 24V 40/60W	40 60	行驶 交错	28.0	300 500	3 触点	4轮汽车
	AS 16L 12V 50/40W	50 40	行驶 交错	12.8	200 320	"	4轮汽车
	AS 16L 24V 75/55W	75 55	行驶 交错	28.0	300 500	"	4轮汽车
卤素辅助前灯 	JA12V 35W JA12V 55W	35 55	— —	13.2 13.2	200 200	PK22S "	辅助前灯, 雾灯 "

(d) 耐振型灯(之一)

铁道车辆用灯 (JIS C 7503- 1962)	型号	类别	玻壳 直径 (mm)	长度 (mm)	灯头	光中心 距离 (mm)	光通 (lm)	寿命 (h)	过电压 耐振持 续时间 (h)	标准点 灯方向		
	R100V 20W	真空 充气	55	98	B22 或 E26		160	1000以上	40以上	向下		
	R100V 40W		"	105			380					
	R100V 60W		"	60			110				660	
	R100V100W		"	70			136				1300	
	R110V 40W		"	55			105				370	
	R 24V100WF	"	80	110	"	B22 63 E26 70	1450	1000以上	50"	水平		
	R 24V150WF		"	"		"	B22 63 E26 70				2250	
	R 24V250WF		"	95		123	"				B22 69 E26 76	3880
	R 32V100WF		"	80		110	"				B22 63 E26 70	1400
	R 32V150WF		"	"		"	"				B22 63 E26 70	2200
	R 32V250WF		"	95		123	"				B22 69 E26 70	3750
	R100V100WF		"	80		110	"				B22 63 E26 70	1200
	R100V150WF		"	"		"	"				B22 63 E26 70	1880
	R100V250WF		"	95		123	"				B22 69 E26 76	3380
	R100V400WF		"	"		"	E26				76	6000
R100V500WF	"	125	168	E39	105	8000						

(d) 耐振型灯(之二)

铁道车辆用灯 (JIS C 7503-1962)	型号	类别	玻壳直径 [mm]	长度 [mm]	灯头	光中心 距离 [mm]	光通 [lm]	寿命 [h]	过电耐 振持续 时间 [h]	标准点 灯方向
	R110V100WF	充气	80	110	B22 或 E26	B22 63 E26 70	1170	1000 以上	} 50以上	水平
	R110V150WF	"	"	"	"	B22 63 E26 70	1830	"		"
	R110V250WF	"	95	123	"	B22 69 E26 76	3300	"		"

铁道车辆用 密封光束型灯	型号	玻壳 型号	长度 [mm]	灯头	灯丝型号	中心 亮度 [cd]	光束开口* (水平方向) [°]	寿命 [h]
	RSB 12V150/150W	PAR178	120	3 触点	C-6/C-6	118 000	11	1000
	RSB 24V150/100W	"	"	"	CC-6/CC-6	100 000	13	"
	RSB 24V150/50W	"	"	"	"	54 000	22	1500
	RSB 32V150W	"	"	双触点	CC-5	52 000	23	"
	RSB 32V150/50W	"	"	3 触点	CC-6/CC-6	52 900	23	"
	RSB 50V150W	"	"	双触点	CC-6	44 000	24	"
	RSB 50V150/150W	"	"	3 触点	CC-6/CC-6	85 000	16	1000
	RSB100V150/50W	"	"	"	"	50 000	24	1500
	RSB 30V200W	"	"	双触点	CC-8	180 000	9	500

* 光束开口是用中心亮度的1/10处的展开角表示

(f) 信号灯

铁道信号灯 (JIS C 7505-1962)	型号	玻壳 型号	长度 [mm]	灯头	标准点 灯方向	光中心 距离 [mm]	灯丝型号	光通 [lm]	寿命 [h]
	S10V 5W	S35	57	BA15S/19	水平	32	C2R	48	1000 以上
	S10V10W	"	"	"	"	"	"	100	"
	S10V20W	"	"	"	向上	"	"	200	"
	S10V20WP	PS50	90	P24S/20	"	55	X型并联	200	"
	S30V40W	"	"	"	"	"	C2V并联	400	"

道路交通信号机 用灯 (JIS C 7528-1970)	型号	玻壳直 径 [mm]	长度 [mm]	灯头	光通 [lm]	效率 [lm/W]	寿命 [h]
	TS 60	60	110	E26/25	700	(10.0)	4000
	TS 60B	"	"	B22D/26×26	"	"	"
	TS100	70	136	E26/25	1400	11.8	"
	TS100B	"	"	B22D/26×26	"	"	"
	TS150	75	155	E26/25	1900	12.6	"
	TS150B	"	"	B22D/26×26	"	"	"

(g) 摄影、放映灯 (JIS C 7527-1974)

卤素摄影灯	型号	额定 电压 [V]	形状及 尺寸 [mm]	灯头	总光通 [lm]	工作特性		额定寿命 [h]	分布温度 (标准值) [K]
						规定点 时间 [h]	总光通 [lm]		
	J P100V500WB	100	12以下	R7S	11 000	250	9 000以上	500	3 050
	J P100V500WC	100	"		13 000	50	10 600以上	100	3 200
	J P100V750WB	100	"		16 500	250	13 500以上	500	3 050
	J P100V750WC	100	"		19 500	50	16 000以上	100	3 200
	J P100V1 000WB	100	14以下		23 000	250	18 800以上	500	3 050
	J P100V1 000WC	100	"		27 000	50	22 000以上	100	3 200
	J PD100V650W	100	15以下		16 900	50	13 800以上	100	3 200

(e) 汽 车 灯

小型灯	灯编号	型 号	玻壳直径	灯 头	尺 寸 [mm]			灯 丝 型 号	
					玻壳最大直径	最大长度	光中心距离		
 (S)	M3224	A6V17/5.3W	S25	BAY15D	26.0	50.0	31.8	C-6/C-6	
	M3234	A6V10/3W							
 (RP)	M7619	A6V25/25W	RP35	P15 D-30	36.0	57.0	28.5	C-2V/C-6	
	M7629	A6V35/35W							
 (B)	M936	A12V6W	G14	BA9S	14.9	27.0	(14.3)	C-2R	
	M1622	A12V12W	B19	BA15S	19.7	44.4	27.0	C-6	
	M2942	A12V23W	S25	BA15S	26.0	50.0	31.8	C-6	
	M2972	A12V27W							
	M3249	A12V23/8W	S25	BAY15D	26.0	50.0	31.8	C-6/C-6	
	M3279	12V27/8W							
	楔形灯头  T 5 T10 (无灯头型)	M2535	A12V35W	RP35	BA15S	36.0	57.0	31.8	C-6
			6V1.2W	T5	W2×4.6D	5.0	20.0	9	C-2V
M173		A24V3W	T10	W2.1 ×9.5D	10.29	27.0	14.3	C-2V	
M176		A24V6W							
M852		A24V3W	G11	BA9S	11.7	23.8	(12.7)	C-2V	
M956		A24V6W	G14		14.9	27.0	(14.3)		
M1876		A24V12W	G18	BA15S	18.9	36.5	19.0	CC-6	
M2958		A24V19W	S25		26.0	50.0	31.8		
M2964		A24V25W							
M3264		A24V25/10W			BAY15D	26.0	50.0		31.8

(JIS C 7506—1971)

试验电压 [V]	初始特性			平均寿命 (h)	参 考		
	电流 [A]	功率 [W]	光通 [lm]		平均球面 亮度 [cd]	用途举例	国外同类产品
6.4 7.0	2.63 0.75	(16.8) (5.3)	265 (38)	200 1000	21/3	尾灯 停车灯 方向指示灯 刹车灯 车宽灯	BNA520(6V18/4W) BS384(6V6/18W) US1154(6V21/3C)
6.5 7.0	1.54 0.41	(10) (2.9)	120 (20)	300 1000	10/2		—
6.5	3.85	(25)	420	100	33/33	前灯(二轮)	US2330(6V32/32C)
	3.85	(25)	420	100			
	5.40	(35)	650	100	52/52		—
	5.40	(35)	650	100			
14.0	0.43	(6)	(55)	500	4.5	车厢灯, 方向指示灯	BS989(12V6W)
12.8	0.94	(12)	190	100	15	车厢灯, 尾灯	US1003(12V15C)
12.8	1.80	(23)	400	200	32	倒车灯, 停车灯 方向指示灯, 雾灯	DIN72601E(12V25W) US1073(12V32C) BS382(12V21W) BNA628(12V21W)
	2.10	(26.8)	400	600	32	倒车灯, 停车灯 方向指示灯, 雾灯	US1156(12V32C)
12.8 14.0	1.80 0.59	(23) (8.3)	400 (38)	200 2000	32/3	尾灯, 停车灯, 方向 指示灯, 刹车灯, 车宽灯	US1034(12V32/3C)
12.8 14.0	2.10 0.59	(26.8) (8.3)	400 (38)	600 2000	32/3	尾灯, 停车灯, 方向 指示灯, 刹车灯, 车宽灯	US1157(12V32/3C)
13.0	2.70	(35.1)	670	100	53	雾灯, 倒车灯	DIN72601U(12V45W) US1195(12V50C)
6.0	0.20	—	2	10000	—	仪表灯	JIS外品
28.0	0.11	(3)	(20)	1000	1.6	仪表灯, 刹车灯	DIN72601VA(24V3W)
	0.22	(6.2)	(55)	500	4.5	车厢灯, 方向指示灯	DIN72601VB(24V5W)
	0.11	(3)	(20)	1000	1.6	仪表灯, 刹车灯	BNA269(24V3W) DIN72601H(24V2W)
	0.22-	(6.2)	(55)	500	4.5	车厢灯, 方向指示灯	—
	0.43	(12)	120	500	10	番号灯, 车厢灯, 刹 车灯, 尾灯, 车宽灯	DIN72601G(24V10W)
	0.67	(18.8)	265	250	21	倒车灯 停车灯	US307(28V21C) BNA628(24V21W) DIN72601R(24V18W)
	0.90	(25.2)	400	250	32	方向指示灯	BS339(24V24W) US315(28V32C)
	0.90 0.36	(25.2) (10)	400 (60)	250 2000	32/5	尾灯, 停车灯, 方向 指示灯, 刹车灯, 车宽灯	BS334(24V6/24W) DIN72601SL (24V21/5W)

(g) 摄影、放映灯

卤素放映灯	型号	额定电压 [V]	灯头	光强(水平) [cd]	工作特性		额定寿命 [h]	温度分布 (标准值) [K]
					规定电灯时间[h]	光强(水平) [cd]		
	J C12V 50W	12	G6.35	170	25	135 以上	50	3 300
	J C12V100W	12		350	25	285 以上	50	"
	J C24V150W	24		580	25	470 以上	50	3 400
	J C24V250W	24		950	25	770 以上	50	"
装有二向色反射镜的卤素灯	J C R12V100W	12	G6.35	—	—	—	50	3 400
	J C R15V150W	15	"	—	—	—	50	"

(h) 航空用灯(仅作飞机用) JIC C 7522-1974

飞机用小型灯	型号	灯头	玻壳颜色	初始特性		额定寿命 [h]	灯编号		
				电流[A]	总光通 [lm]				
 罗盘仪用	AP 3V0.19A	特殊	无色	0.190	3.1	350	323		
	AP 3V0.19AR		红色	0.190	—	350	323R		
	AP28V0.04AE		无色	0.040	3.1	1 000	8623		
	AP28V0.04AER		红色	0.040	—	1 000	8623R		
	AP 6V0.22A		无色	0.220	3.1	500	8639		
	AP 6V0.22AR		红色	0.220	—	500	8639R		
飞机用小型灯  (仪表灯) (警报灯)	AP 28V0.04ASX	SX6S/8×5.4	无色	0.040	4.3	1 000	327		
	AP 28V0.04ASXR		红色	0.040	—	1 000	327R		
	AP 6V0.2A		无色	0.20	4.3	1 000	328		
	AP 6V0.2AR		红色	0.20	—	1 000	328R		
	AP 14V0.08A		无色	0.080	约 6	750	330		
	AP2.7V0.06A		无色	0.080	约 0.5	500	338		
	AP2.5V0.2A		无色	0.20	2.5	500	368		
飞机用小型灯  (标志灯) (室内灯)	AP28V0.17A	BA9S/13	无色	0.170	44	500	313		
	AP28V0.17AR		红色	0.170	—	500	313R		
	AP 6V0.7A		无色	0.70	44	500	316		
	AP 6V0.7AR		红色	0.70	—	500	316R		
	AP28V0.04ABA		无色	0.040	4.3	1 000	1819		
	AP28V0.04ABAR		红色	0.040	—	1 000	1819R		
	AP28V0.07A		无色	0.070	—	1 000	1829		
机场用卤素灯	型号	灯头	标准点灯方向	额定电流 [A]	总光通 [lm]	工作特性		寿命 [h]	
	J F 6.6A 45W	特殊	水平	6.6	630	规定点灯时间[h]	总光通[lm]	1 000	
	J F 6.6A 65W	R7S		"	"	1 200	300	1 080 以上	500
	J F D6.6A200W	"		"	"	4 600	300	4 100 以上	500

(i) 测光标准灯

总光通测试用	型号	类别	玻壳型号	长度 [mm]	灯头	光中心距离 [mm]	光通 [lm]
	100V 10W	真空, 单螺旋	PS 55	105	E26	78	70
	100V 20W	"	"	"	"	"	160
	100V 30W	充气, 单螺旋	PS 60	110	"	80	255
	100V 40W	"	"	"	"	"	400
	100V 50W	"	PS 65	116	"	84	600
	100V 60W	"	"	"	"	"	750
	100V 100W	"	PS 70	136	"	101	1 450
	100V 150W	"	PS 80	165	"	125	2 480
	100V 200W	"	PS 95	200	"	152	3 400
	100V 300W	"	PS 110	232	E39	177	4 800
	100V 500W	"	PS 127	242	"	178	8 750
	100V 1 000W	"	PS 165	322	"	240	19 000

光强标准用 (JIS C 7526-1974)	型 号	玻 壳		长度 [mm]	光中心距离 (标准值) [mm]	灯头	消耗功率 [W]	相对于分布 温度 2856 K 时的电压[V]
		型号	直径[mm]					
 (T)	10 cd	T64	64	135	76	E26	8	6~8
	40 cd	T64	"	"	"	"	30	28~32
	150 cd	"	"	"	"	"	100	95~100
	300 cd	"	"	"	"	"	200	95~100
	800 cd-E26	"	"	223	117	E26	500	80~100
	800 cd-E39	"	"	228	123	E39	"	"
	3 000 cd	G152	152	254	157	E39	1 500	"

光学高温计用	型 号 ⁰	类 别	玻壳型号	长度 [mm]	灯头	光中心距离 [mm]	测定范围
	2.5V2.5A	真空带丝	G60	115	A4-5A	70	1000~1500°C
	4V15A	"	G152	275	E39	200	"
	4.5V5A	充气带丝	G60	115	A4-5A	70	1000~1800°C
	5V20A	"	G152	275	E39	200	"

(j) 红外灯 (JIS C 7514-1967)

反射型	型 号	玻壳管 型 号	长度 [mm]	端子 距离 [mm]	发光 长 [mm]	最大直径 或长度 [mm]	灯头部分	总辐射 功 [W]	辐射效 率 [%]	寿命 [h]
	IR100/110V 125WR	R127	185±8	—	—	158±8	E26	80以上	64以上	5 000
	IR100/110V 250WR	"	"	—	—	"	"	170以上	68以上	"
	IR100/110V 375WR	"	"	—	—	"	"	270以上	72以上	"
石英管型 (T)	QIR100/110V 500W	T10	227以下	—	127	—	镍或瓷导线长 60mm以上	370(360) 以上	75(72) 以上	"
	QIR100/110V 500WL	"	"	—	160	—	瓷导线 60mm以上	"	"	"
	QIR100/110V 500WM	"	—	243	"	—	金属片	"	"	"
	QIR200/220V 1 000W	"	355以下	—	254	—	镍或瓷导线长 60mm以上	750(720) 以上	"	"
	QIR200/220V 1 000WL	"	"	—	272	—	瓷导线长 60mm以上	"	"	"
	QIR200/220V 1 000WM	"	—	368	"	—	金属片	"	"	"

() 内表示使用半透明玻管的数值

(k) 其它小型灯

无线电操纵台 用灯 (JIS C 7509-1962)	型 号	额定电压 [V]	玻壳型号	长度[mm]	灯头	初始特性		寿命 [h]
						光通 [lm]	效率 [lm/W]	
	P6.3V0.15A	6.3	T10	28±2	E10/14	0.15±0.03	2 000	
	P6.3V0.15AS	"	"	"	BA9S	"	"	
	P6.3V0.25A	"	"	"	E10/14	0.25±0.03	"	
	P6.3V0.25AS	"	"	"	BA9S	"	"	

自行车磨电灯 (JIS C 7510-1972)	型 号	玻壳型号	灯头	全长 [mm]	光中心 距 离 [mm]	初始特性		寿命 [h]
						光通 [lm]	效率 [lm/W]	
	L6V3WE	G14	E10/14	27.0	21	30	10.0	30
	D6V6WB	G14	BA9S/13	26.0	16	85	14.1	30
	D6V6WE	"	E10/14	27.0	21	"	"	"

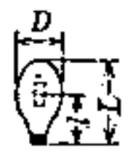
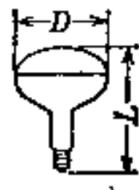
装有灯罩的安全灯 (JIS C 7502-1976)	型号	玻壳直径	灯头	初始特性		寿命[h]	备注
				光通 [lm]	效率 [lm/W]		
	M2.5V1.3A	G19	S15-62	20	6.2	300 以上	碱蓄电池
	M4V0.55AS	S25	S15-61	18	8.1	"	铅蓄电池
	M2.5V1.3AS	S25	S15-61	20	6.2	"	碱蓄电池

配电盘用灯 (JIS C 7516-1976)	型号	玻壳型号	灯头	全长[mm]	初始特性		寿命[h]
					光通 [lm]	效率 [lm/W]	
	SL18V2W	T14	E12	34	12	6	1000
	SL140V15W	T20	"	75	90	6	1000
	SL140V20W	PS55	E26	98	140	7	2000

常夜灯用灯	100V5W 100V5W	T20 G30	E12 "	48 47	— —	— —	1500 1500

携带灯用灯	型号	灯头	玻壳		长度 [mm]	光通 [lm]	寿命 [h]	使用于电池
			型号	直径 [mm]				
	1.1V0.22A	E10/12 または E10/14	TL	9.5	21.5	(1)	5	UM3×1
	2.2V0.25A	"	"	"	"	(3)	"	UM3×2
	2.5V0.3A	E10/14	G	11	23	(5)	10	UM1×2 UM2×2
	2.5V0.3AB	P13.5S/14	B	11	28	"	"	"
	2.5V0.5A	E10/14	G	11	23	(10)	"	UM1×2

(1) 一般照明用高压汞灯

外形	灯型号	尺寸			灯头	初始特性 (100小时后)			平均寿命 [h]			
		L [mm]	D [mm]	l [mm]		灯电压 [V]	灯电流 [A]	总光通或光束光通 [lm]				
一般型 	H 40 HF 40X	127	55	89	E26	90	0.53	1200 1400	6000			
	H 80 HF 80X	175	70	115		110	0.85	2900 3300				
一般型 	H 100 HF 100X	175	70	—	E39	115	1.0	3800 4200	12000			
	H 250 HF 250X	245	100	160		130	2.1	11500 12800				
	H 300 HF 300X	290	116	185		130	2.5	14500 15800				
	H 400 HF 400X	290	116	185		130	3.3	20500 22000				
	H 700 HF 700X	370	150	240		130	5.9	38000 41000				
	H 1000 HF 1000X	390	180	245		130	8.3	56000 59500				
	反射型** 	HRF 100X	190	130		—	E26	115		1.0	2650~3100	12000
		HRF 250X	305	165		—	E39	130		2.1	7300~8600	
HRF 300X		305	165	—	130	2.5		9300~10600				
HR 400 HRF 400X		315	180	—	130	3.3		11600 12900~15200				
HRF 700X		410	280	—	130	5.9		25000~28500				
HRF 1000X		410	280	—	130	8.3		35000~40000				

* 光束光通是指0°~130°内的光通
 ** 光束开口角度为130°

(m-4) 杀菌灯

型号	额定消耗功率 [W]	管尺寸 [mm]		灯头	灯电流 [A]	紫外线输出 [W]
		管径	长度			
GL 4	4	15	134.5	G5	0.125	0.5
GL 6	6	15	210.5	"	0.147	0.9~1.0
GL 8	8	15	287	"	0.170	1.5~1.6
GL 10	10	25	330	G13	0.230	1.7~1.8
GL 15	15	25	436	"	0.330	3.0~3.6
GL 30	30	25	893	"	0.335	7.5

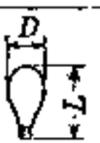
(m-5) 黑光灯 (BL 和 BLB)

型号	额定消耗功率 [W]	管尺寸 [mm]		灯头	灯电流 [A]	紫外线输出 [W]
		管径	长度			
FL 6 BLB	6	15	210.5	G5	0.147	0.6
FL 10 BLB	10	25	330	G13	0.230	1.1~1.2
FL 15 BLB	15	25	436	"	0.300	2.0~2.1
FL 20SBLB	20	32	580	"	0.350	3.0~3.4
FL 40SBLB	40	32	1198	"	0.415	7.5
FL 6 BL	6	15	210.5	G5	0.147	0.5~0.7
FL 10 BL	10	25	330	G13	0.230	1.2~1.8
FL 15SBL	15	25	436	"	0.300	2.0~2.15
FL 20SBL	20	32	580	"	0.350	3.0~3.2
FL 30 BL	30	38	630	"	0.620	4.7~5.0
FL 40 BL	40	32	1198	"	0.415	7.9~8.0
FCL20 BL	20	32	210 ϕ	G10Q	0.375	2.5~2.8

(n) 辉光启动器 (点灯管)

型号	尺寸 [mm]		灯头	极限工作电压 [V]	点灯所需时间 [s]	平均寿命 [次]	适用荧光灯
	长度	管径					
FG-7E	40	17	E17	94 以下	3 以下	5000 以上	FL4, 6, 8, 10
FG-7P	38	21	P21	94 以下	"	"	GL4, 6, 8, 10
FG-1E	40	17	E17	94 以下	"	"	FL15S, 20, 20S, 30, 30S
FG-1P	38	21	P21	94 以下	"	"	FCL15, 20, 30 GL15
FG-4P	38	21	P21	180 以下	"	"	FL40, 40S, 35S S FCL40
FG-5P	38	21	P21	137 以下	"	"	FL32S FCL32

(o) 自镇流汞灯

外形	灯种	尺寸		灯头	灯电流 [A]		总光通或光束光通 (标准值) [lm]	寿命 [h]
		L [mm]	D [mm]		(启动时)	(稳定时)		
	漫射型 100/110V 160W	172	75	E26	1.9	1.6	1800~2400	6000
	" 200/220V 160W	~178			0.9	0.8	2800	
	" 100V 250W 230		110		3.2	2.6	4000	
	漫射型 100/110V 500W	290	120	E39	6.9	5.1	12000	9000
	漫射型 200/220V 500W				3.6	2.5	14000	
	" 100V 750W	370	150		11.2	8.0	20000	
	" 200V 750W				5.9	4.0	23000	

(m) 荧 光

(m-1) 直管形荧光灯

类别	种 类	额定消耗功率 [W]	管尺寸(mm)		灯头	灯电流 [A]	昼光色系		
			直径	长度			D	D-SDL	
一般型 (预热启动器)	FL4	4	15.5	134.5	G5	0.125	90~105		
	FL6	6	15.5	210.5	"	0.147	205~240		
	FL8	8	15.5	287	"	0.170	350~360		
	FL10	10	25.5	330	G13	0.230	440~450	340~345	
	FL15S	15	25.5	436	"	0.300	750~775	575	
	FL20	20	38.0	580	"	0.375	1050~1060		
	FL20S	20	32.5	580	"	0.355	1070~1150	780~810	
	FL20SS	20	25	580	"	0.355	1050		
	FL30	30	38.0	630	"	0.620	1600~1670	1200	
	FL30S	30	32.5	630	"	0.590	1600~1700		
	FL32S	32	32.5	830	"	0.435	1940		
	FL35SS	35	25	1000	"	0.400	2440		
	FL40	40	38.0	1198	"	0.435	2750~2800		
	FL40S	40	32.5	1198	"	0.415	2790~2900	2020~2100	
FL40SS	40	25	1198	"	0.400	2680			
快速启动型	标准型	FLR20	20	38.0	580	G13	0.375	1020~1050	
		FLR20S	20	32.5	580	"	0.355	1020~1070	
		FLR40	40	38.0	1198	"	0.435	2700~2720	
		FLR40S	40	32.5	1198	"	0.415	2610~2750	1960~2020
	高输出型	FLR60H	60	38.0	1198	R17D	0.800	3840	
		FLR80H	80	38.0	1500	"	0.900	4900	
		FLR110H	110	38.0	2367	"	0.800	8000~8500	5780
	超输出型	FLR110EH	110	38.0	1148	"	1.500		
		FLR220EH	220	38.0	2367	"	1.500		

(m-2) 环形荧光灯

类别	种 类	额定消耗功率 [W]	管尺寸 [mm]		灯头	灯电流 [A]	总通光(100小时后的标准值) [lm]						
			外径	管径			昼光色系 D	白色系			暖白色系		
								W	W-DL	W-SDL	WW	白炽灯色	
一般型	FCL15	15	170	25	G10Q	0.300	690	790					
	FCL20	20	210	32	"	0.375	925~1010	1070~1160		700	910		
	FCL30	30	230	32	"	0.620	1490~1550	1680~1750	1550	1050	1620	1050	
	FCL32	32	305	32	"	0.435	1780~1890	2090~2150	1850			1970	
	FCL40	40	380	32	"	0.435	2440~2470	2770~2840					
快速启动型	FCR20	20	210	32	"	0.375	860	380~1070					
	FCR30	30	230	32	"	0.620	1360	1550~1650					
	FCR40	40	380	32	"	0.435	2250	2650~2810					

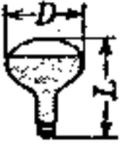
灯

总光通(100小时后的标准值)(lm)									
白色系				暖白色系		蓝色(B)	蓝白色(BW)	绿色(G)	粉红色(P)
W	W-DL	W-SDL	W-EDL50	WW	白炽灯色				
110~120 235~270 395~450 490~520 850~875 1210	365	340~345	335	365	265	150~180	330	520~660	120
1210~1300 1200 1840~1930 1850~1990 2230 2780		550~575			470				
1210~1300 1200 1840~1930 1850~1990 2230 2780	950~1100	780~910	770~800	1100~1270	660	400~410	750~800	1250~1500	300
3150~3200 3170~3270 3070		865			1150~1220				
1150~1210 1160~1210 3000~3100 2950~3160	940	790		1100					
4320 5560~5800 9000~9650		1960~2120	1940	2880~3020	2820~3000	950~990		3000	
7200 15500~16500	8000	5780~6100		9000~9600	4600~8850				

(m-3) 细管型荧光灯

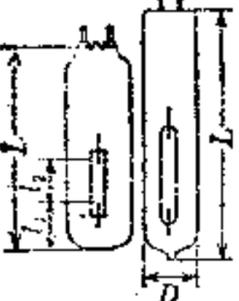
类别	管尺寸 [mm]		灯头	灯电流 [A]	灯功率 [W]	总光通 [lm]	
	管径	长度				昼光色 D	白色 W
FSL42T6	20	999	FA6	0.100	14	1020	1140
				0.200	24	1610	1810
FSL64T6	20	1556	"	0.100	21	1600	1800
				0.200	36	2520	2850
FSL42T8	25	999	FA8	0.300	29	1920	2190
FSL64T8	25	1556	"	0.300	43	2990	3450
FSL72T8	25	1759	"	0.300	48	3530	3910
FSL96T8	25	2368	"	0.300	65	4560	5300

(c) 自镇流汞灯 (之二)

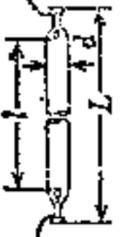
	漫射型 100, 110V 160W	143	120	E26	1.9	1.6	*1 400~1 500	6 000
	" 200/220V 160W				0.9	0.8	*1 600	
	" 100V 250W	305	165	E39	3.2	2.6	**2 700	6 000
	" 100V 500W	252	181		6.9	5.1	**6 400	9 000
	" 200V 500W				3.6	2.5	**7 200	

* 0-180° 光束光通, ** 0-130° 光束光通

(p) 光化学用汞灯

外型	灯型号	外管	灯头	尺寸				灯电压 [V]	灯电流 [A]
				L(mm)	D(mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)		
	H 400PL	硬质玻璃	插头	330	60	70	65	130	3.3
	H 2000PL			600	60	330	78	405	5.4
	H 4000PL			1800	60	1300	150	950	4.4
	H 400PQ	石英玻璃	导线	330	56	70	65	130	3.3
	H 2000PQ			600	56	330	70	405	4.5

(q) 紫外线硬化用汞灯

外型	灯型号	尺寸			灯电压 [V]	灯电流 [A]	灯负荷 [W/cm ²]	灯头
		L(mm)	l(mm)	d(mm)				
	H 2000L	350	250	25	350	6.3	80	导线
	H 4000L	600	500	25	700	6.3	80	
	H 6000L	850	750	25	1050	6.3	80	
	H 8000L	1100	1000	25	1400	6.3	80	
	H 10000L	1350	1250	25	1750	6.3	80	
	H 12000L	1600	1500	25	2100	6.3	80	

(r) 一般照明用金属卤化物灯

(r-1) Na-Tl-In系, Sc-Na系, Dy-Tl系

	型号	功率 [W]	外管径 [mm]	全长 [mm]	光中心距离 [mm]	灯头	灯电压 [V]	灯电流 [A]	光通		寿命 [h]
									上行垂直点灯	下行水平点灯	
透明型	M 250	250	90~100	235~250	160	E39	120~130	2.1~2.45	17 000~19 000	16 000~17 000	6 000~9 000
	M 400	400	116~120	285~295	185	E39	120~130	3.3~3.85	30 000~35 000	30 000	6 000~9 000
	M 700	700	140~150	360~375	240	E39	130	5.9~6.1	56 000~60 000	54 000~54 500	6 000~9 000
	M 1000	1000	165~180	385~400	245	E39	130	8.5~8.7	82 500	80 000	6 000~9 000
漫射型	MF 250	250	90~100	235~250	—	E39	120~130	2.1~2.45	17 000~19 000	16 000	
	MF 400	400	116~120	285~295	—	E39	120~130	3.3~3.85	30 000~35 000	28 500~30 000	6 000~9 000
	MF 700	700	140~150	360~375	—	E39	130	5.9~6.1	56 000~60 000	51 500~54 500	6 000~9 000
	MF 1000	1000	165~180	385~400	—	E39	130	8.5~8.7	82 500	76 000~80 000	6 000~9 000

(r-2) Sn系

型号	功率 [W]	外管径 [mm]	全长 [mm]	光中心距离 [mm]	灯头	灯电压 [V]	灯电流 [A]	光通 [lm]	寿命 [h]
D125	125	70	175	115	E39	115	1.30	5 000	4 000
D250	250	90	240	160	E39	130	2.25	11 500	6 000
D400	400	116	290	185	E39	130	2.45	20 000	6 000

(s) 高压钠灯

型号	功率 [W]	尺寸			灯头螺 旋部分	初始特性*			平均寿命 ^① [h]		
		玻壳 型号	直径 [mm]	长度 [mm]		光中心距 [mm]	灯电压 [V]	灯电流 [A]		总光通 [lm]	
透明 型	NH 150	150	BT 或 B	90 ~100	235 ~240	160	E39	90	2.0	14 000	9 000 ~12 000
	NH 250	250	"	90 ~100	235 ~250	160	"	95	3.1	25 000	12 000
	NH 400	400	"	116 ~120	280 ~295	185	"	100	4.7	46 000	"
	NH 700	700	"	140 ~150	360 ~375	240	"	100	7.4~8.2	81 000 ~86 000	"
	NH 1 000	1 000	"	165 ~180	390 ~400	240 ~245	"	100 ~140	8.4 ~11.2	120 000 ~125 000	"
漫射 型	NH 150 F	150	BT 或 B	90 ~100	235 ~250	—	E39	90	2.0	13 000	9 000 ~12 000
	NH 250 F	250	"	90 ~100	235 ~250	—	"	95	3.1	23 000 ~23 500	12 000
	NH 400 F	400	"	116 ~120	280 ~295	—	"	100	4.7	42 000 ~44 000	"
	NH 700 F	700	"	140 ~150	360 ~375	—	"	100	7.4~8.2	74 000 ~81 000	"
	NH 1 000 F	1 000	"	165 ~180	390 ~400	—	"	100~140	8.4 ~11.2	110 000 ~118 000	"
透明 型	NH250L**	250	BT 或 B	100	245 ~275	160 ~185	E39	95	3.1	23 000	12 000
	NH400L	400	"	116 ~120	285 ~295	185	"	100	4.7	41 500	"
漫射 型	NH250L·F	250	BT 或 B	100	245 ~275	—	E39	95	3.1	21 400 ~21 500	12 000
	NH400L·F	400	"	116 ~120	285 ~295	—	"	100	4.7	38 500	"

* 根据产品目录
** 低压启动型

(t) 氙灯

类别	功率 [W]	外径 [mm]	长度 [mm]	光中心 距 [mm]	灯电压 [V]	灯电流 [A]	总光通 [lm]	光强 [cd]	平均亮度 [cd/m ² × 10 ⁴]	点灯方向	备注
短 弧 灯	75	14	108	44	15 14	5.0 5.4	1 600 1 000	160 100	8 000 40 000	垂直	
	150	20	150	58	20	7.5	3 500 3 000	350 300	14 000 15 000	" 水平	
	350	20	145	65	22	16	9 000	900	23 000	" "	
	500	30	234 220	95	20	25	13 500	1 400 1 280	25 000	"	
	1 000	40	315	125	24 22	45	31 000 30 000	3 300 3 100	32 000 32 000	" 水平	
	1 600	53 47	370 285	145 96.5	24	65	60 000	6 000 5 800	75 000 65 000	" 水平	强制风冷
	2 000	53	360	145	26	80	70 000	7 500	75 000	" "	
	3 000	55	408	165	30	100	120 000 100 000	12 500 10 000	85 000	"	
	3 600	55	408	165	30	120	120 000	12 000	—	" 水平	
	4 000	70	410	174	30	135	155 000	17 000	90 000	" 水平	
	5 000	60	428	171	30	160	200 000	20 000	—	垂直水平	
	6 500	70	506	226	40	165	325 000	30 000	92 000	水平	
	30 000	150	487	241	45	650	1 250 000	167 400	—		水冷

类别	功率 [W]	外径 [mm]	长度 [mm]	光中心距 [mm]	灯电压 [V]	灯电流 [A]	总光通 [lm]	光强 [cd]	平均亮度 [cd/m ² ×10 ³]	点灯方向	备注
长弧灯	16 000	40	1 625	—	200	80	400 000	—	—		
	20 000	35	1 920	—	240	83	500 000	—	—		
类别	能量 [焦耳/脉冲]	长度 [mm]	电压 [V]	最大重 [Hz]	复频率	寿命 [次]	备注				
脉冲灯	13	45	400	1.5		5 000 000	螺旋形				
	50	70	600	1		500 000	直管				
	900	260	580	0.05(1/20)		50 000	"				
	16 000	700	5 000	0.0083(1/120)		1 000	"				

(u) 低压钠灯

	尺寸		灯头	初始特性 (0 b)		
	外管径 [mm]	全长 [mm]		管压 [V]	管电流 [A]	总光通 [lm]
NX 35	51	300	BY22D	70	0.60	4 600
NX 55	51	415	BY22D	105	0.59	7 600
NX 90	65	518	BY22D	115	0.92	12 500
NX135	65	765	BY22D	160	0.92	21 500
NX180	65	1 110	BY22D	245	0.88	31 500

(v) 短弧超高压汞灯

品 种	100W	200W	250W	500W	1kW
管 压 [V]	20	57	40	60	63
额定功率 [W]	100	200	250	500	1 000
总光通 [lm]	2 200	10 000	12 500	25 000	60 000
平均亮度 [cd/m ²]	170×10 ³	33×10 ³	36×10 ³	28×10 ³	18×10 ³

(w) 直管型超高压汞灯

品 种	900W	2kW	3kW	4kW
管 压 [V]	800	1 350	2 000	2 500
管电流 [A]	1.25	1.50	1.50	1.60
总光通 [lm]	65×10 ³	130×10 ³	195×10 ³	260×10 ³
平均亮度 [cd/m ²]	42×10 ³	30×10 ³	37×10 ³	40×10 ³
弧 长 [mm]	23	80	80	100

(x) 氙灯

型 号	灯头	全长 [mm]	最大直径 [mm]	额定电压 [V]	电流 (标准值) [mA]	总光通 [lm]	放电开始电压 [V]	串联电阻 [kΩ]	寿命 [h]	备注
NE-2	导线	27	6.8	100	0.3	20	75以下	150	30 000	小型
NE-2C	"	"	"	"	1.7	80	70 "	33	20 000	小型, 高亮度
NE-H	"	19	6.3	"	1.4	150	85 "	27	30 000	超小型, 超高亮度
NE-2/G	"	27	6.8	"	0.8	30	80 "	56	10 000	小型, 绿
NE-2/PK	"	"	"	"	0.9	24	" "	"	"	小型, 粉红
NE-2/GY	"	"	"	"	0.8	—	" "	33	20 000	小型, 黄绿
NL-5A	E10	30	11	"	0.3	—	45~55	100	10 000	顶端透镜
NL-5AS	BA9S	"	"	"	"	—	" "	"	"	"
NL-6A	E10	"	"	"	"	—	75以下	"	20 000	"
NL-6AS	BA9S	"	"	"	"	—	"	"	"	"

(y) 放电灯镇流器的标准值

(由于各制造厂的产品形状、尺寸有若干差异, 仅提供典型的电特性数据。在使用时应参考制造厂的产品样本)

(y-1) 荧光灯镇流器

类别	灯种·灯数	回路方式	额定电压 [V]	输入电流 [A]		输入功率* [W]	功率因素	二次电压 [V]	改善功率因素用 电容 [μF]	器容量	
				启动时	稳定时						
辉光启动器型	6W 1灯	扼流圈	100	0.147		8.5	低	—	2.5/2.0		
	10W 1灯	"	"	0.23		13	"	—	4.5/3.5		
	15W 1灯	"	"	0.30		19	"	—	5.5/4.5		
	20W 1灯	"	"	0.375		25	"	—	"		
	"	"	"	200	"		32	"	—	4.5/3.5	
	30W 1灯	"	"	100	0.62		36	"	—	11/9	
	32W 1灯	漏磁变压器	"	"	0.65		40	"	147	14/11	
	"	"	"	200	0.435		41	"	—	4.5/3.5	
	40W 1灯	"	"	100	1.0		52	"	200	21/17	
	"	扼流圈	"	200	0.435		49	"	—	4.5/3.5	
	"	漏磁变压器	"	100	0.58		52	高	200	—	
	"	扼流圈	"	200	0.26		49	"	—	—	
40W 2灯	漏磁变压器· 无闪烁	"	100	1.1		100	"	200	—		
"	扼流圈·无闪烁	"	200	0.5		98	"	—	—		
快速启动器型	20W 1灯	谐振	100	0.3		26	高	150			
	20W 2灯	顺序	"	0.58		54	"	200			
	40W 1灯	漏磁变压器	"	1.2		"	低	230	26/22		
	"	"	200	0.6		"	"	"	6.5/5.5		
	"	"	100	0.55		"	高	"			
	"	"	200	0.27		"	"	"			
	40W 2灯	顺序	100	0.96		95	"	295			
	"	"	200	0.48		"	"	"			
	"	无闪烁	100	1.1		100	"	230			
	"	"	200	0.55		"	"	"			
	110W 1灯	接前峰值	100	1.4		135	"	340			
	"	"	200	0.7		"	"	"			
110W 2灯	顺序	100	2.5		240	"	470				
"	"	200	1.3		"	"	"				
220W 1灯	混合线路	"	1.3		"	"	200				
220W 2灯	顺序	"	2.5		480	"	520				
调光型	20W 1灯		100	0.34		32	高	145			
	40W 1灯		"	0.56		55	"	230			
	"		200	0.28		"	"	"			
	110W 1灯		100	1.6		150	"	400			
"		200	0.8		"	"	"				

* 用适合灯作负荷时的输入功率。
** 表示在50 Hz/60 Hz时的容量值。
† 表示与半导体开关元件调光器组合使用的镇流器。

(y-2) 低压钠灯镇流器

类别	适合灯	回路方式	额定电压 [V]	输入电流 [A]		输入功率 [W]	功率因素	二次电压 [V]
				启动时	稳定时			
灯具内嵌型	NX35	接前峰值	200	0.4	0.3	60	高	320
	NX55	"	"	0.5	0.41	80	"	350
	NX90	"	"	0.9	0.67	130	"	360
	NX135	"	"	1.3	0.93	180	"	500
	NX180	"	"	1.7	1.25	230	"	590

(y-3) 汞灯镇流器

类型	适合灯	回路方式	额定电压 [V]	输入电流 [A]		输入功率 [W]	功率因素	二次电压 [V]	
				启动时	稳定时				
般 流	H(F) 40	漏磁变压器	100	1.6	1.2	51	低 高 低 高 低 高 低 高 低 高 低 高 低 高 低 高 低 高 低 高	200	
	"	"	"	0.7	0.57	52		"	
	H(F) 80	"	"	2.7	1.9	96		220	
	"	"	"	"	2.1	1.0		98	"
	H(F) 100	"	"	"	3.6	2.4		120	"
	"	"	"	"	2.1	1.3		131	"
	"	扼流圈	200	1.6	1.0	115		—	
	"	"	"	"	1.0	0.65		"	—
	H(F) 200	漏磁变压器	100	6.5	4.3	230		210	
	"	"	"	"	4.0	2.5		"	"
	"	扼流圈	200	3.1	1.9	220		—	
	"	"	"	"	2.1	1.2		"	—
	H(F) 250	漏磁变压器	100	8.0	4.8	280		210	
	"	"	"	"	5.1	3.0		"	"
	"	扼流圈	200	3.8	2.1	270		—	
	"	"	"	"	2.8	1.5		"	—
	H(F) 300	漏磁变压器	100	10.3	5.5	330		210	
	"	"	"	"	7.3	3.7		"	"
	"	扼流圈	200	4.5	2.5	325		—	
	"	"	"	"	3.5	1.3		"	—
H(F) 400	漏磁变压器	100	12.5	7.5	440	210			
"	"	"	"	8.2	4.9	"	"		
"	扼流圈	200	5.3	3.3	425	—			
"	"	"	"	4.3	2.3	"	—		
H(F) 700	漏磁变压器	100	14.0	8.5	770	210			
"	"	"	"	11.0	5.9	740	—		
"	扼流圈	200	8.5	4.0	745	—			
H(F) 1000	漏磁变压器	100	20.0	12.0	1110	210			
"	"	"	"	14.5	8.3	1050	—		
"	扼流圈	200	"	11.0	5.8	1055	—		
定 功 率 型	H(F) 100		100	0.7	1.4	125	高	210	
	"		200	0.55	0.65	"	"	"	
	H(F) 200		100	1.2	2.4	230	"	"	
	"		200	0.7	1.2	"	"	"	
	H(F) 250		100	1.6	2.9	280	"	"	
	"		200	0.8	1.5	"	"	"	
	H(F) 300		100	1.7	3.5	335	"	"	
	"		200	0.9	1.7	"	"	"	
	H(F) 400		100	2.3	4.5	440	"	"	
	"		200	1.1	2.3	"	"	"	
H(F) 700		100	5.0	8.2	775	"	"		
"		200	3.0	4.1	"	"	"		
H(F) 1000		100	8.0	11.5	1110	"	"		
"		200	4.0	5.7	"	"	"		
无 闪 烁 型	H(F) 200 2灯	无闪烁	200	1.1	2.3	435	"	—	
	H(F) 250 2灯	"	"	1.8	2.7	530	"	—	
	H(F) 300 2灯	"	"	1.7	3.3	650	"	—	
	H(F) 400 2灯	"	"	2.7	4.4	845	"	—	
	H(F) 700 2灯	"	"	4.6	7.5	1490	"	—	

类别	适合灯	回路方式	额定电压 [V]	输入电流 [A]		输入功率* [W]	功率因素	二次电压 [V]
				启动时	稳定时			
定调 功光 率型	H(F) 400		200	1.0	2.3/1.3	440/255	高	210
	H(F) 700		"	4.0	4.0/2.3	770/430	"	"
	H(F) 1000		"	4.0	5.7/3.6	1110/610	"	"

*表示全光时/调光时的值

(y-4) 金属卤化物灯镇流器

类别	适合灯	回路方式	额定电压 [V]	输入电流 [A]			输入功率 [W]	功率因素	二次电压 [V]
				空载时	启动时	稳定时			
一 般 型	M(F) 250	漏磁变压器	200	2.8	2.0	1.6	290	高	300
	M(F) 400	"	"	4.2	3.0	3.0	450	"	"
	"	扼流圈	"	1.5	4.6	2.3	425	"	—
	M(F) 700	漏磁变压器	"	6.5	5.8	4.2	770	"	300
	M(F) 1000	超前峰值	"	4.0	4.0	5.8	1100	"	460

(y-5) 高压钠灯镇流器

类别	适合灯	回路方式	额定电压 [V]	输入电流 [A]			输入功率 [W]	功率因素	二次电压 [V]
				空载时	启动时	稳定时			
	NH150(F)	扼流圈+脉冲	200	1.5	1.1	0.96	175	高	—
	NH250(F)	"	"	2.2	1.8	1.55	275	"	—
	NH400(F)	"	"	3.5	2.9	2.4	440	"	—
	NH700(F)	"	"	5.6	5.7	4.2	760	"	—
	NH1000(F)	"	"	8.0	6.8	5.9	1070	"	—

参 考 文 献

- (1) 日本電球工業会編：日本電球工業史 (昭38)
- (2) CIE COMPTE RENDU 18 SESSION LONDRES (1976) 363
- (3) C. J. Smithells: Tungsten, Chapman & Hall Ltd (1936)
- (4) 照明学会編：照明工学ポケットブック (昭22)
- (5) 石田：照学誌, 23-8 (昭14) 414
- (6) 鈴木：電気試験所調査報告 No.167 (昭45) 29
- (7) C. E. Weitz: G. E. Lamp Bulletin, LD-1 (1946)
- (8) CIE: Technical Report TC 2.1 New Light Sources (未出版)
- (9) J. R. Coaton: Light. Res. Tech., 1 (1969) 98
- (10) T. A. Giorgi ほか: Residual Gases in Electron Tubes, Academic Press Inc. (1972)
- (11) C. J. Bernier ほか: Illum. Engng., 59-12(1964) 801
- (12) SLG, LTAG und LiTG: Handbuch für Beleuchtung, Druck W. Girardet, Essen (1975) 59
- (13) 橋本ほか：東芝レビュー, 18-10 (昭38) 1116
- (14) G. S. Evans: Light. Des. Appl. July (1974) 11
- (15) W. J. Roche: J. Illum. Engng. Soc., 2-1 (1973) 65
- (16) JIS C 7601-1977
- (17) JIS C 9112-1966, 3
- (18) IEC Publication, 81 (1961) 48
- (19) 飯口ほか：照学誌, 57-6 (昭48) 332
- (20) W. A. Thornton: J. Illum. Engng. Soc., 2-1 (1973) 61
- (21) J. M. P. J. Versteegen ほか: J. Illum. Engng. Soc., 4-1 (1975) 90
- (22) J. C. Heffernan: Illum. Engng. 58-12 (1963) 731
- (23) 日本電球工業会規格 JEL 204, けい光ランプ雑音測定法 (昭52)
- (24) W. Elenbaas: The High Pressure Mercury Vapour Discharge (1951)
- (25) W. Elenbaas: High Pressure Mercury Vapour Lamps and their Applications (1963)
- (26) F. C. Pallila et al.: J. Electrochem. Soc., 112-8 (1965) 776
- (27) F. C. Pallila et al.: Appl. Opt., 5-9 (1966) 1467
- (28) J. F. Waymouth: Electric Discharge Lamps (1971)
- (29) 土井ほか：三菱電機技報, 40-9 (昭41) 1391
- (30) 太田ほか：岩崎電気技報, 11 (昭45) 51
- (31) JIS C 7604-1970
- (32) 石田：岩崎電気技報, 7 (昭39) 65
- (33) 岩崎ほか：照学誌, 60-1 (昭51) 41
- (34) 村上ほか：三菱電機技報, 50-11 (昭51) 577
- (35) A. G. Jack et al.: J. Illum. Engng. Soc., 3-4

- (1974) 323
- (36) 大須賀: 高圧水銀燈とその取扱 (昭34)
- (37) A. Airola: CIE 17th Meeting (1971) 71-15
- (38) 森田: 照学誌, 61-1 (昭52) 4
- (39) 照明学会編: 照明のデータブック (改訂版) (昭43)
- (40) 高須: GS News, 31-2 (1972) 134
- (41) Landolt-Börnstein II Band, 2 Teil
- (42) R.F. Rolsten: Iodide Metals and Metal Iodide
- (43) 三菱電機技報, 40-9 (昭41) 1403
- (44) 野村: 昭43 電気四学会連大
- (45) J.M. Harris et al.: IEEE, 12 (1964)
- (46) 三菱電機技報, 46-4 (昭47) 412
- (47) Lichttechnik, 23-3 (1971) 135
- (48) 加納ほか: 東芝レビュー, 23-9 (昭43) 1130
- (49) 伊藤ほか: 新日本技報, 2-1 (昭43) 89
- (50) A. Dobrusskin: Lichttechnik, 23-8, 9 (1971) 447
- (51) 野村ほか: 東芝レビュー, 22-10 (昭42) 1207
- (52) W.M. Keefe: J. Illum. Engng. Soc. July (1975) 260
- (53) A.G. Jack: J. Illum. Engng. Soc. July (1974) 323
- (54) W.C. Loudon et al.: Illum. Engng., 60-12 (1965) 696
- (55) K. Schmidt: Proc. 6th Intl. Conf. Ion. Phen. in Gases, 3 (1963) 323 Paris
- (56) 渡会ほか: 照学誌, 57-8 (昭48) 536
- (57) 坪ほか: 照学誌, 58-12 (昭49) 658
- (58) Teh-Sen Jen et al.: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 9 (1969) 487
- (59) K. Schmidt: Proc. 7th Intl. Conf. Ion. Phen. in Gases, 1 (1965) 654 Beograd
- (60) N. Ozaki: J. Appl. Phys., 42-8 (1971) 3171
- (61) R.E. Hanneman et al.: IES Preprint, 18 (1968)
- (62) W. Eienbaas et al.: IES Conf. Preprint No. 19 (1968)
- (63) H.J.J. van Broort et al.: Philips Tech. Rev., 29 (1968) 17
- (64) P. Schulz et al.: Ann. Physik, 18 (1956) 23
- (65) H. Grabner: Phys. Verh., 9 (1958) 211
- (66) L.R. Koller: Ultraviolet Radiation, John Wiley, New York, 2nd edition, 43
- (67) E.J.G. Beeson: Pub. Lighting, 36 (1971) 154
- (68) W. Block: The new daylight source, 115th SMPTE Tech. Conf. (1974)
- (69) S.L. Slomski: Illum. Engng., 62 (1967) 229
- (70) 住: 東芝レビュー, 19-8 (昭39) 904
- (71) W. Elenbaas: Fluorescent Lamps, Philips Tech. Lib. Macmillan, 2nd Ed (1971)
- (72) S.T. Hendarson: Lamps and Lighting Edward Arnold, 2nd Ed. (1972)
- (73) I.F. Davies: Light. Res. Tech., 1-4, (1963) 216
- (74) JIS C 7601-1967, けい光ランプ
- (75) JIS C. 7602-1962, 瞬時起動熱陰極けい光放電管
- (76) JIS C 8108-1971, けい光燈安定器
- (77) 電気用品技術基準 (昭49) 別表第六
- (78) 電気設備技術基準 (昭51) 第221条
- (79) IEC Pub. 82, 3rd ed., Ballast for tubular fluorescent lamps (1973)
- (80) U.L., Subject 935, Fluorescent Lamp Ballasts (1971)
- (81) 高塚ほか: GS ニュース, 28-2 (昭44) 53
- (82) J.H. Gonz: J. Appl. Phys., 36-3 (1965) 742
- (83) 三戸ほか: 光源・関連装置研究会資料, LS-74-13 (昭49)
- (84) 川島: エレクトロルミネセンス, 日刊工業新聞社 (昭41)
- (85) 伊吹: 固体表示装置, 朝倉書店 (昭49)
- (86) 光源調査専門委員会: 光源の評価・性能・材料, 照明学会 (昭47)
- (87) A.A. Bergh et al.: Light-emitting diodes, Clarendon Press, Oxford (1976)
- (88) M.G. Craford et al.: Solid State Tech. Jan. (1974) 39
- (89) R. Solomon et al.: Appl. Phys. Lett., 21 (1972) 257
- (90) O.G. Lorimore et al.: J. Electrochem. Soc., 122 (1975) 407
- (91) B.W. Wessels: J. Electrochem. Soc., 122 (1975) 402
- (92) 稲葉ほか編: レーザハンドブック, 朝倉書店 (昭48)
- (93) 浅見監修: レーザ工学, 東京電機大学出版局 (昭47)
- (94) 山中ほか: 応物, 46 (昭52) 318
- (95) 高橋ほか: テレビジョン学会誌, 30-8 (昭51) 67⁸
- (96) 加納: 分光研究, 22-2 (昭48) 101
- (97) 岡崎ほか: 照学誌, 58-4 (昭49) 165
- (98) 大道寺ほか: 化学の領域, 増刊100号 (昭48) 11~38
- (99) A. Bouwknecht: Philips Tech. Rev., 35-11/12 (1975) 356
- (100) K. Watanabe: J. Light & Vis. Env., 1 (1977)
- (101) A.H. Mckeag: J. Electrochem. Soc., 96 (1949) 1
- (102) J.G. Rabatin: J. Electrochem. Soc., 114 (1967) 956
- (103) A. Wachtel: J. Electrochem. Soc., 113 (1966) 128
- (104) J.M.P.J. Verstegen: J. Electrochem. Soc., 121 (1974) 1627
- (105) 岩間: 照学誌, 60-1 (1977) 41
- (106) 栗津: 照学誌, 60-1 (1977) 8
- (107) SLG, LTAG und LiTG: Handbuch für Beleuchtung, Druck W. Girardet, Essen (1975) C-1, 4 p.43, p.63
- (108) 大谷: 照学誌, 51-11 (昭43) 618

- (109) 光源調査専門委員会：光源の評価・性能・材料，照明学会（昭47）
- (110) 照明教室 38：省エネルギー照明，照明学会・照明普及会（昭50）11
- (111) A. W. Willoughby: *Light. Res. Tech.*, **6**, 1 (1974)
- (112) D. B. Judd: *Illum. Engng.*, **62-10** (1967) 593
- (113) W. G. Pracejus: *Illum. Engng.*, **62-12** (1967) 663
- (114) W. A. Thornton: *J. Opt. Soc. Amer.*, **62-2** (1972) 191
- (115) 阪口，渡辺：照学誌，**57-6**（昭48）332
- (116) C. W. Jerome et al.: *Illum. Engng.*, **62-5** (1967) 319
- (117) C. N. Clark & G. W. Frederick: *Illum. Engng.* **63-7** (1968) 361
- (118) 大谷：CIE, TC-2,1(可視光源技術委員会)報告，第1インタナショナル(株)(1976)または，同委員会資料 No.157
- (119) R. N. Thayer and D. D. Hinman, *Trans. Illum. Engng. Soc.*, **40** (1945) 641
- (120) 井上：照学誌，**57-9**（昭43）584
- (121) H. Strauch, *Archiv für Elektrotechnik*, **33**, 7~9(1939)
- (122) J. C. Engel, et al., Design and analysis of a closed loop dynamic metal-vapor lamp ballast, *Proc. Ann. Symp. An. Soc. Sybernetics*, 4th Ann. Meeting (1969)
- (123) 大和：照学誌，**53-9**（昭44）490
- (124) J. H. Campbell: *Illum. Engng.*, May (1960) 247

第7章

照明灯具

7-1 照明灯具的设计方法^[1]

7-1-1 照明灯具

调整光源发出的光以得到舒适的照明环境的器具，称为照明灯具。照明灯具在保证总效率的要求下把必要的光量分配到必要的位置，这个功能就是调整配光。实际上它除此之外，还具有保护光源、装饰和电气供应的作用。尽管机械的、电气的功能是次要的，但是照明灯具为了完成它的主要的功能，这些次要的功能却是不可缺少的。

7-1-2 扩散性照明灯具

(1) 罩(灯伞) 这是用半透明的漫射性材料制作的，把光源的上方的一部分遮蔽起来的照明灯具。它一般用在对光学性能不很重视，但要求全面防止眩光和得到柔和配光的场合。基本形状为半球型灯伞的照明灯具效率及垂直配光，可按如下方法求得。设灯伞的半径为 R (cm)(图 7-1)，使用均匀的点光源，置于灯伞的中心，若光强为 I (cd)，灯伞是反射率为 ρ 、透过率为 τ 的完全漫射性玻璃，则由于相互反射而造成的漫射照度 E_s 为：

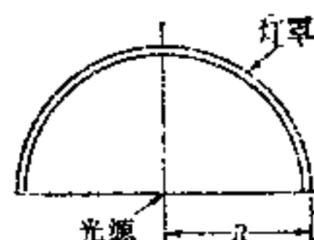


图7-1 灯罩的一例

$$E_s = \frac{\rho I}{2R^2} \left\{ 1 + \frac{\rho}{2} + \left(\frac{\rho^2}{2} \right) + \dots \right\} = \frac{\rho I}{R^2(2 - \rho)} \dots \quad (7-1)$$

因此，灯伞内面各点的总照度 E 为：

$$E = \frac{I}{R^2} + \frac{\rho I}{R^2(2 - \rho)} = \frac{2I}{R^2(2 - \rho)} \quad (7-2)$$

各点的亮度是总照度的 ρ/π 倍，由反射光而产生的配光变成具有此亮度的、面积为 πR^2 的圆。铅直角 θ 方向的反射光的光强为：

$$2\rho I \cos\theta / (2 - \rho)$$

把光源的直射光加在它的上面，总光强 $I(\theta)$ 为：

$$I(\theta) = \left(1 + \frac{2\rho}{2 - \rho} \cdot \cos\theta \right) I \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

灯伞外面的亮度是式 (7-2) E 的 τ/π 倍，因而上方向的配光 $I(\theta)_\perp$ 为

$$I(\theta)_\perp = \frac{\tau I}{2\rho} (1 - \cos\theta) \quad \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \quad (7-3)$$

下方向的光通 F_\mp 和上方向的光通 F_\perp 为

$$F_\mp = \frac{4\pi I}{2 - \rho} \quad F_\perp = \frac{4\pi \tau I}{2 - \rho} \quad (7-4)$$

照明灯具效率 η 从 $(F_{\tau} + F_{\rho})/4\pi I$ 得

$$\eta = \frac{\tau + 1}{2 - \rho} \quad (7-5)$$

(2) 球型灯罩(非棱镜的) 球型灯罩的保护角可考虑为 90° 。灯具的效率 η 为

$$\eta = \tau \left[1 - \delta + \frac{(1 - \varepsilon) \{ \rho_1 \delta + \rho_2 (1 - \delta) \}}{1 - \{ \rho_1 \varepsilon + \rho_2 (1 - \varepsilon) \}} \right]$$

式中, τ 为球型灯罩透过率; δ 为从光源中心计算到上部金属部分的角度, ε 为从球型灯罩中心部分计算到金属部分的角度; ρ_1 为金属部分的反射率; ρ_2 为球型灯罩的反射率(图 7-2)。

假如金属部分完全忽略不计, 则

$$\eta = \frac{\tau}{1 - \rho_2} \quad (7-6)$$

这就是有名的球型灯罩的效率公式。球型灯罩的配光如果是完全漫射性的材料, 则某一方向的光强 $I(\theta)$ 为:

$$I(\theta) = BA(\theta) \quad (7-7)$$

式中, B 为球型灯罩的等效亮度, $A(\theta)$ 为在 θ 方向的发光面积。

设球型灯罩的表面积为 A_0 , 照明灯具效率为 η , 所使用的灯的总光通为 F_0 , 则

$$B = \eta F_0 / \pi A_0 \quad (7-8)$$

又
$$\eta F_0 = 2\pi B \int_0^\pi A(\theta) \sin\theta d\theta$$

从(7-7) 式的关系, 得

$$\pi A_0 = 2\pi \int_0^\pi A(\theta) \sin\theta d\theta \quad (7-9)$$

上式右边和从配光求出总光通完全相同。若把它的结果除以 π 则可得出总面积, 如此, 若球型灯罩的形状一定, 则配光就能预测出来。

(3) 扩散反射罩 这是材料不透明的情况。荧光灯使用的反射罩, 光源水平使用, 罩很多是以水平直线作为母线形成柱面型的。白炽灯和高压放电灯用的罩是把光源垂直使用, 罩与灯轴的关系多是对称型。部分高压放电灯的罩也有水平使用的。

把球面的一部分, 作为它的形状的扩散反射罩的照明灯具效率 η

$$\eta = 1 - \delta \cdot \frac{1 - \rho_1}{1 - \rho_1 \varepsilon} = (1 - \delta) + \frac{\delta \rho_1 (1 - \varepsilon)}{1 - \rho_1 \varepsilon} \quad (7-10)$$

式中, δ 为从光源计算起的角度; ρ 为反射率; ε 为从罩的中心计算起的角度。

第一项是直射光通, 第二项是反射光通。因此, 若罩的形状和材质一经决定, 就能计算。又罩的总的光强 $I(\theta)$

$$I(\theta) = I_c(\theta) + \frac{\delta \rho_1 (1 - \varepsilon)}{1 - \rho_1 \varepsilon} \cdot \frac{F_0}{\pi} \cos\theta \quad (7-11)$$

式中, $I_c(\theta)$ 为直射光的光强。

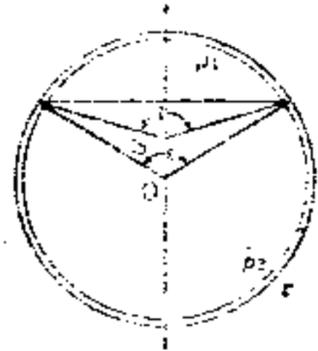


图7-2 球型灯罩的一例
O—球型灯罩的中心
S—光源的中心

对于荧光灯用的反射罩，即形成柱面型的反射罩，其照明灯具效率的公式亦与式(7-10)相同，只是 δ 和 ϵ 不是立体角，可按垂直断面内的平面角的关系来考虑。

7-1-3 指向性照明灯具

扩散性照明灯具控制配光只能在有限的范围内，对于配光控制在宽广的范围时，可利用镜面反射和折射现象，这里以投光灯为代表叙述如下。

考察采用镜面的投光器，有很多是形成旋转抛物面的（图7-3）。现实光源有一定的尺寸，这和理想点光源是不同的。即使这样，也可以把光缩小到较窄的范围内。在这种情况下，轴方向的光强为 $I(0)$ ，任意方向 θ 的光强 $I(\theta)$ 为：

$$I(\theta) = kBA(\theta) \tag{7-12}$$

式中， B 为光源的等效亮度； $A(\theta)$ 为在 θ 方向的发光面积，旋转抛物线镜面，在光轴充分远处时，假如镜的口径为 $2\bar{y}$ 则 $A(\theta) = \pi\bar{y}^2$ 。对于半径为 a 的圆盘（球）型光源，其光束的张角 β 为（图7-4）：

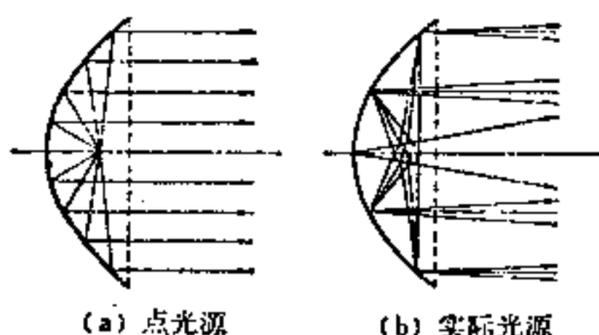


图7-3 抛物面镜的光的投射

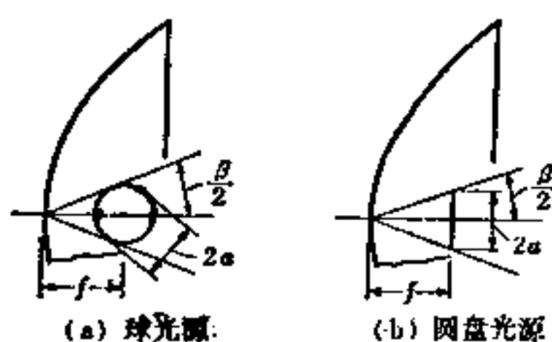


图7-4 抛物面镜的光束张角

$$\tan(\sin)\beta/2 = a/f \tag{7-13}$$

式中， f 为镜的焦距，当 a/f 很小时

$$\beta \cong 114.6(a/f) \text{ (度)}$$

现在，在口径为 $2\bar{y}$ ，焦距为 f 的镜的焦点上，假定有直径为 $2a$ 的球光源的中心（图7-5）。从轴上看过去，就可以看见该镜全部发光：

$$I(0) = \pi\bar{y}^2 k B \tag{7-14}$$

即使稍微偏离轴的位置，仍然能看见全部发光，因为可以作 $\cos\theta \approx 1$ ，所以光强没有变化。 θ 变大，最后达到给予的 θ_1 时：

$$\sin\theta_1 = \frac{a}{f} \cdot \frac{1}{1 - (\bar{y}/2f)} \tag{7-15}$$

镜的周围就开始变暗，到 $\sin\theta_2 = a/f$ 的 θ_2 时，就完全变成黑暗的了。 θ_1 、 θ_2 间的 θ 只是镜面 πy^2 发光。根据抛物线的性质， θ 与 y 的关系为：

$$y = 2f \tan \frac{\phi}{2}, \quad \sin\theta = \frac{a}{f} \cos^2 \frac{\phi}{2}$$

$$\therefore y^2 = 4f^2 \left(\frac{a}{f \sin\theta} - 1 \right) \tag{7-16}$$

ϕ 是镜面上的点在焦点上形成的径向角。根据以上论述，配光可计算如下：

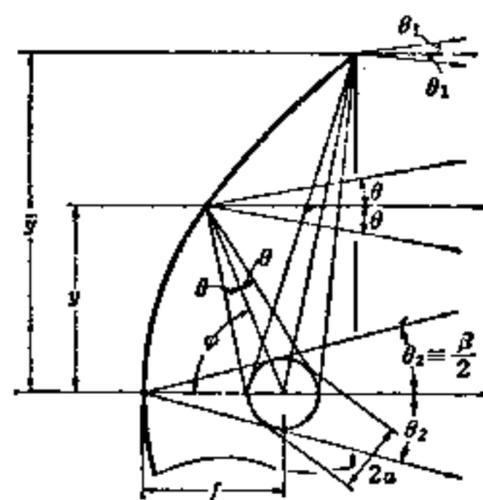


图7-5 抛物线面镜对球光源发出光的反射

$$\begin{cases}
 0 \leq \theta \leq \theta_1, & I(\theta) = \pi \bar{y}^2 k B \\
 0 \leq \theta \leq \theta_2, & I(\theta) = 4\pi f^2 k B \left(\frac{a}{f \sin \theta} - 1 \right) \\
 \theta_2 \leq \theta, & I(\theta) = 0
 \end{cases} \quad (7-17)$$

在 $a/f = 0.01$ 时，镜的口径均为 $4\sqrt{3}$ ，焦距分别为 1、 $\sqrt{3}$ 、3，因而，镜的口径在焦点上的计算角度（聚光角）也分别为 $2 \times 120^\circ$ 、 $2 \times 90^\circ$ 、 $2 \times 60^\circ$ ，如图 7-6 所示。因镜的口径相等，所以轴上光强相等。光束的张角因焦距的不同而不同。聚光角大则镜集中的光通就多，但决非有助于轴光强，只是使配光曲线宽广、光束变宽罢了。平均光强增加，灯具效率提高。

将以上所述归纳成表 7-1。

表 7-1 各因素对投光器性能的影响

项 目	由于左边的项目增加而增大的性能
光源的亮度(B)	轴上的光强 $I(0)$
光源的面积	光束的张角 β
镜的有效口径 $2\bar{y}$	轴上的光强 $I(0)$
聚光角 $2\bar{\theta}$	光束的张角 β

假如光源不在焦点上，光束就乱了。光源仍在轴上而位于焦点以内时，光束就扩宽。只要光源的任一部分通过焦点，轴光强是不变的。若光源位于焦点以外，则情况与上述的相反(图 7-7)。

为了调整配光，也可以使用和旋转抛物面形状稍有不同曲面，如图 7-8、图 7-9 所示。

把汞灯那样的线光源沿着焦点前后方向放入，再增加光点横的距离，则可从镜面的中心估计线形光源的角度。

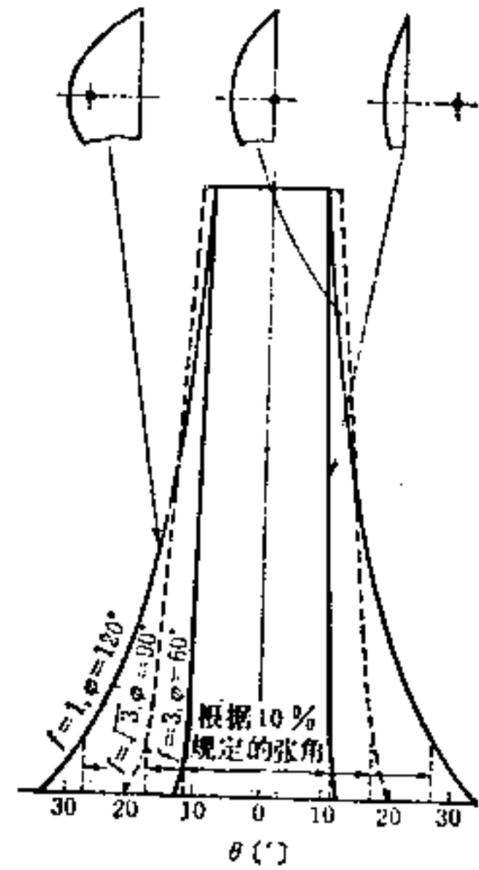


图7-6 在抛物面镜内放入球光源时的配光。 $a/f = 0.01$ ，镜的口径相等，三种不同焦距的比较

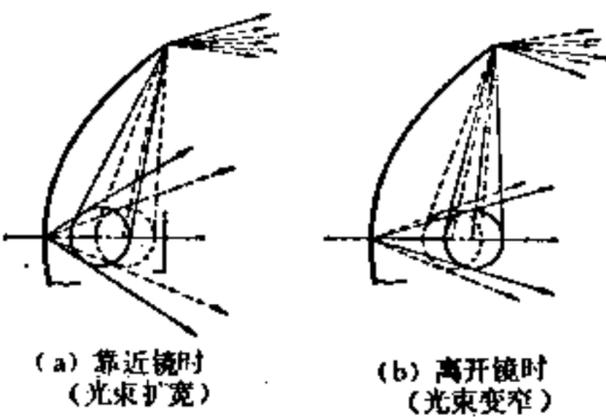


图7-7 光源在轴上移动位置时的影响

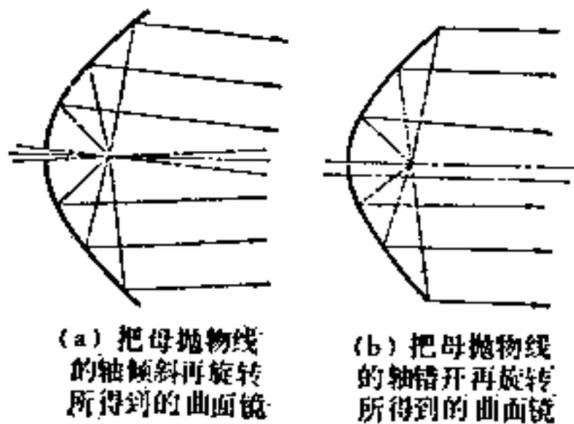


图7-8 根据抛物线制作的曲面镜

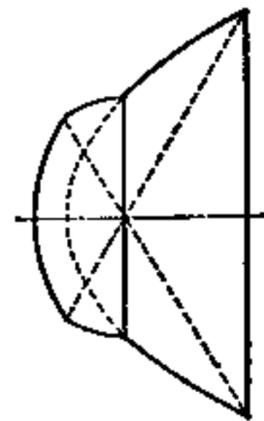


图7-9 抛物线面镜与球面镜的组合

7-1-4 照明灯具设计的注意事项

进行电气的和机械的设计时，有许多应予注意的事项，兹将其主要的叙述如下。

(1) 要符合有关的法规和标准 设计上必须注意的法规和标准有电器用品取缔法、电气设备技术标准、内线规程、JIS、JIL (日本照明灯具工业会标准)、消防法、建筑基准法等等。

(2) 要对热量予以考虑 因为灯具里面装有光源,所以必然产生热量。因而使用的材料和零件,必须在它们的允许温度以下。对于温升,在设计时可以作某种程度的预测。

对于密闭型的灯具(图7-10),可根据下述公式计算

$$\Delta t = \frac{0.86 \times W}{\sum_{i=1}^n K_i \times F_i} \quad (7-18)$$

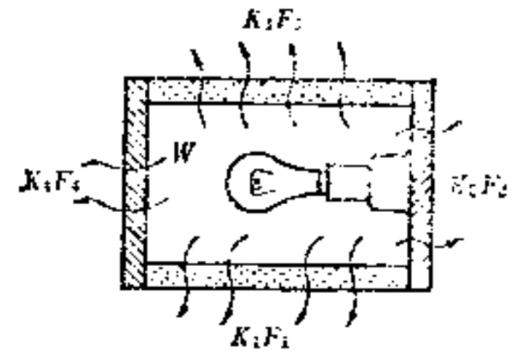


图7-10 密闭灯具的模型图

式中, Δt 为上升温度 ($^{\circ}\text{C}$); W 为光源消耗的功率 (W);

K_i 为第 i 面所用材料的传热系数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$); F_i 为第 i 面的表面积 (m^2).

作为热处理手段,有各种隔热、散热方法。兹将隔热及散热方法的一些例子记述如下:

(a) 隔热 使用水、空气、石棉等传热不好的材料,以保护耐热性薄弱的部分和零件等。

(b) 散热 依靠散热片、散热孔、风扇等强制空气冷却,依靠反射板反射辐射热,依靠黑色涂漆吸收辐射热。此外,还可以考虑使用散热密封剂或热导管等等。

(3) 要有足够的强度 根据使用目的,必须具有适当的强度。例如室外的灯具必须能耐风荷载,积雪荷载,地震力等。风荷载一般可根据下式计算:

$$P = C \times V^2 / 16 \times A \quad (7-19)$$

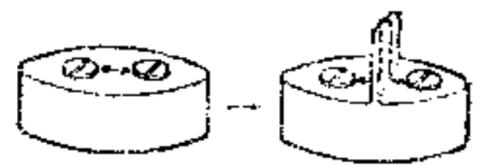
式中, P 为风压力 (kg); C 为风力系数; V 为风速 (m/s); A 为受压面积 (m^2).

(4) 电气安全问题 照明灯具是电气制品(或零件)的一部分,必须充分保证电气的安全。为此应遵守上述的法规和标准,如采用符合于使用环境条件的电气零件和材料,防止带电部分的外露,保持适当的绝缘距离,确保适当的耐压性,在导线的容许电流以下使用等等。

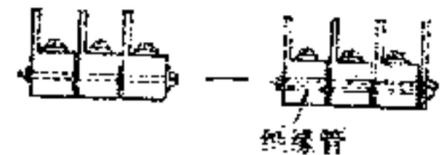
关于保持适当的绝缘距离,必须遵守电气用品取缔法所规定的最低标准。考察灯具的情况时,最成问题的部分是端子部分及插座部分。其适当绝缘距离一般零件本身已作了考虑。但组合使用和新设计时,则必须予以考虑,这种情况的例子示于图7-11。

关于防止带电部分外露,一般是以适合于环境条件的绝缘物完全把它覆盖上。

(5) 适当使用灯和镇流器 灯和镇流器是灯具的主要部件,它们也和其它部件一样,在热的、电气的、机械的方面,必须充分符合标准。为此,必须很好地掌握灯和镇流器的技术指标与使用条件,来进行照明灯具的设计。



(a) 端子处适当绝缘距离示例



(b) 组合端子处适当绝缘距离示例

图7-11 保持适当的绝缘距离的例子

7-2 灯具材料

7-2-1 金属材料

(1) **钢板** 钢板是作为照明灯具的主要构造材料使用的，特别是冷轧钢板强度和加工性能好，价钱也便宜，所以使用得最多。冷轧钢板的种类和标准厚度如表7-2、表7-3所示，这是“日本工业产品规格”中所规定的。标准尺寸中3×6板(914×1828mm)和4×8板(1219×2438mm)使用得最多。从这些标准尺寸中，选择损耗最少的材料，以求原材料得到有效的利用，这是很重要的。

表7-2 冷轧钢板的种类和符号

种 类	符 号	摘 要
第1种	SPCC	一般用
第2种	SPCD	拉伸用
第3种	SPCE	深拉伸用

(2) **表面处理钢板** 钢板一般如表7-4所示经板金加工后进行油漆或电镀后再使用，但近年来表面处理钢板大量生产，以致镀锌钢板和锌铁板等被广泛地作为照明灯具的材料。

表7-3 冷轧钢板的标准(厚度)尺寸(mm)

标准厚度	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4
	1.6	1.8	2.0	2.3	2.5	(2.6)	2.8	(2.9)	3.2

注：括弧内的厚度为标准厚度以外的希望采用的合适厚度

表7-4 表面处理钢板的种类⁽¹⁾

1. 镀锌钢板	
熔 融 镀 锌	<ul style="list-style-type: none"> —— 锌铁板(JIS)($>183\text{g}/\text{m}^2$双面) —— 网纹镀锌钢板($>60\text{g}/\text{m}^2$单面) —— 合金处理镀锌钢板($>45\text{g}/\text{m}^2$单面)
电 镀 锌	<ul style="list-style-type: none"> —— 电镀锌钢板($>10\text{g}/\text{cm}^2$单面) —— 磷酸盐薄层钢板($>3\text{g}/\text{m}^2$单面)
镀 合 金	<ul style="list-style-type: none"> —— 镀锌铝合金钢板(熔融) —— 镀锌铜合金钢板(电镀)
2. 镀锡钢板	热浸镀白铁皮(渐趋不用) 电镀白铁皮
3. 镀铝钢板	渗铝钢板(熔融)
4. 不锈表面处理钢板	镀铜不锈钢板 着色不锈钢板
5. 油漆钢板	着色锌铁板(油漆、氯乙烯溶液涂敷) 油漆钢板(氯化烯钢板、印花钢板、油漆钢板)

铁、铝合金和铜合金的一般特性如表7-5所示。

(3) **铝** 铝材质轻，加工性能好又美观，所以作为照明灯具的材料使用，尤其是用作光的高反射性的反射材料，是不可缺少的。

从铝的优点和缺点来看，作为照明材料的使用方法如表7-6所示。

表7-5

主要的金属材料的特性比较

项	II	铁 系 统	铝 系 统	铜 系 统
物理性质	比重	7.8	2.7	8.9
	熔点	1150~1530°C	570~660°C	840~1250°C
	热膨胀系数	$1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	$2.3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	$1.7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
	导电系数	$10 \times 10^4 \text{cm}^{-1} \Omega^{-1}$	$37.5 \times 10^4 \text{cm}^{-1} \Omega^{-1}$	$58 \times 10^4 \text{cm}^{-1} \Omega^{-1}$
	导热系数	$0.14 \text{cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$	$0.52 \text{cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$	$0.93 \text{cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$
	常用极限温度	400°C	300°C	200°C
	低温特性	C	A	A
耐腐蚀性	耐锈性	A~C	A~B	A~B
	耐水性	A~C	A~B	A
	耐海水性	A~C	A~B	A
	耐药性	B~C	A~C	A
机械性质	受拉强度	20~210	18~60	20~140
	杨氏模量	7500~21000	6300~7500	7000~18200
	延伸率	0.5~55	5~30	6~64
	布氏硬度	60~250	20~160	50~195
加工性	延展性	B	A	A
	折叠性	A~B	A~B	A
	挤压性	C	A	C
	切削性	B~C	B	A
	铸造性	B	A	A~B
接合性	电焊	A	B~C	B~C
	钎焊	A~B	B	A
	锡焊	A~B	B	A
其他	电镀性	A~B	A~C	A
	无毒性	B	A	C
	价格	A	B	B~C

注：A，优秀 B，良 C，不可

表7-6

铝的优点与使用方法

优点	使 用 方 法
(1) 反射光和热	对白色光的反射率，普通为67~82%，高纯铝经电解抛光者为94%，比银的92%还高。除紫外线红外线外，还具有热反射率高的性质。多用于投光器的反射镜、杀菌灯的反射板、红外线灯的反射板等
(2) 是电和热的良导体	电导率高，把铜作为100时，铁是16，铝是63。又热的传导能力铜0.93，铁0.17，铝是0.52。也可作为高功率、高光输出灯的散热部分的材料
(3) 容易加工	冲压加工、旋压加工和模铸加工、挤压成型等多种加工方法
(4) 美观	表面是光亮的银白色，也能造成无色透明的薄氧化膜，经久美观。还可进行种种颜色的着色氧化铝薄膜处理，油漆也方便
(5) 非常轻	作为构造材料，可以减轻重量，便于搬运和安装
(6) 电位高	因为和铜、铅等重金属接触部分容易腐蚀，所以接触部分有必要用绝缘油漆加以保护

铝的纯度增高，经阳极氧化处理后也可以得到80%以上的反射率，另一方面，材质极软，在加工时表面容易起毛；处理时必须充分注意。

(4) **铜和铜合金** 黄铜作为导电材料，用于插座和开关、接线柱等电气的连接部分。使用时，假如在弯曲加工时产生内应力，则由于腐蚀等原因而引起破裂，在遭受应力状态下长时间使用就会发生应力腐蚀破裂，所以有必要充分研究。

另外，不同种类的金属，特别是和铝组合时，因电极电位差大，从而引起电化学腐蚀作用，这样铝就要被腐蚀，对此要十分注意。

照明灯具中用的乙烯软线等电线类的导体，或镇流器的线圈导体使用铜材最多。

(5) **不锈钢板** 不锈钢板用在防水灯具、防腐灯具等特殊环境下，即容易发生材料腐蚀生锈的场所。这些场所使用不锈钢板作为照明灯具的材料。

不锈钢板由于添加元素的种类和数量的不同而具有不同的耐腐蚀性，故必须根据用途的不同而正确选用。

7-2-2 塑料材料

塑料材料大致可区分为热塑料树脂和热硬化性树脂，前者由于温度的作用可呈流动状态或凝固状态，故成型方法也多，但容易受到温度对机械强度的影响。

在照明灯具中，使用的主要塑料材料的一般特性如表7-7所示，即使是同种的塑料材料，由于填充剂、物性改善剂、分子量、成型工艺等不同，特性的差别也很大，又由于受到从光源发出的热和光，以及使用环境等的影响，特性容易变化，所以要注意。

(1) **热塑性树脂** 聚苯乙烯树脂(苯乙烯)的一般用的品级，成型性和透明性都好，所以广泛的使用在透光罩一类的物品中，但它的耐冲击性差。改善耐冲击强度的品级，用作乳白透光罩和构造零件。此外，发泡剂与着色剂适当混合的成品，可以得到木材那样质感的外观与物性，故往往用于制作日本式的照明灯具。由于应力而产生的裂缝，与软质乙烯树脂的接触而转变成可塑剂，由于日光紫外线照射，而容易出现变黄等现象，所以在配合和使用条件等方面要充分注意。

甲基丙烯酸树脂亦称丙烯酸树脂，因为透明度和耐候性好，所以用在室内外棱镜球型灯罩和透光罩等。由于应力和热应力的增加，在使用中有发生裂缝的情况，所以要避免镶嵌成型或用自攻螺旋固定。视情况而需要配合耐热的品级或成型后的退火加工。

聚乙烯树脂，用于乳白球型灯罩等室内照明灯具的透光材料。实用的粘结剂不仅抗药物性能好，而且电气性能、耐寒性也好，但由于应力容易引起裂缝(应力裂缝)，由于热和日光，也有促进劣化的情况，所以必须对品级的选择和使用条件予以很好地研究。

聚丙烯树脂与聚乙烯树脂具有相似的特性和用途，由于抗弯疲劳性能好，所以它可与很多零件面结合整体成型。可是它在热和应力等特定环境下成型时，一与铜接触就会脆化，这是必须注意的。

氯化乙烯树脂，主要是硬质磨去的光泽、轧花等的加工薄板，真空成型，或者和纸、布等加工成薄板作为透光材料使用。此外，半硬质、软质的氯化乙烯树脂，也有作为竹篾的代用品，氯化钢板等装饰用的材料或构造材料，用途很广。由于它的熄火性能好，所以经常用作指路安全灯的标志板，但热变形温度很低，故应注意使用温度。

(2) **热硬化性树脂** 尿素树脂，由于电气特性(特别是耐电弧性)好，多使用在荧光灯灯座等电气零件上。由于着色方便也有光泽，所以也用作反射板、透光罩等方面，但由于

表7-7 照明灯具用的主要塑料材料特性比较表

树脂名	品级	成型方法						用途						特性															
		喷射	挤压	真空	吹	直	其他	透光零件		室外	汞灯	构造零件	电气零件	着色性	拉力 kg/cm ²	冲击强度 kg·cm/cm ²	耐应力龟裂性	耐溶剂性	耐弱酸性	耐弱碱性	绝缘破坏时间 kV/mm	耐电弧性 SEC	热变形温度 (荷重 18.6 kg/cm ²) °C	低温脆化点 °C	燃烧性	热溶解性	粘胶性	机械成型性	机械加工性
								室内	室外																				
热塑性树脂	聚乙烯	◎	◎	◎	○	○	—	◎	◎	○	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	<104	-55	燃烧	○	○	—	—
		◎	◎	◎	○	○	—	◎	◎	○	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	<99	-70	燃烧	○	○	—	—
	◎	◎	◎	○	○	—	◎	◎	○	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	60~88		燃烧	△	○	—	—	
	◎	△	△	○	○	—	◎	△	△	△	△	△	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	43~49	<-80	燃烧	○	○	—	—	
聚丙烯	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	50~64	+10~-30	燃烧	○	○	—	—	
	◎	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	54~80	-20	不燃	△	○	—	—	
氯化乙烯树脂	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	15~30	50~80	-20	不燃	△	○	—	—
	◎	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	15	50~85	<-40	燃烧	○	○	—	—
ABS	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	18	10~120	-135	不燃	—	○	—	—
聚碳酸酯	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	18	10~120	-135	不燃	—	○	—	—
热硬化性树脂	脲素树脂	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	9~16	60~80	—	不燃	×	○	—	—
		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	8~17	<10	—	不燃	×	○	—	—
	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	15~20	80~140	—	不燃~燃烧	×	○	—	—	
	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	12~16	100~180	—	不燃	×	○	—	—
酚	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	80~180	—	不燃~燃烧	×	○	—	—	
聚	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	125~145	—	不燃	×	○	—	—	
胺	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	125~170	—	不燃	×	○	—	—	
蜜	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	80~180	—	不燃	×	○	—	—	
	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	125~195	—	不燃	×	○	—	—	

注：◎：好 ○：较好 △：普通 ×：不好

吸湿，加热时尺寸变化很大，耐候性和耐冲击性也不好，所以要注意使用条件。

酚醛树脂用在连接器、接线座等电气零件上，由于填充剂与强化剂配合的不同而特性有很大的差异。一般而言，耐热性较尿素树脂好，耐电弧性和耐漏电性差，只能得到黑色系统的颜色。

作为增强塑料（FRP）的代表物品，可用玻璃纤维作增强剂的不饱和聚烯树脂。除机械性能良好外，而且即使不加热加压也可成型，所以也可采用与其他树脂不同的常温无压成型（接触压力成型法）或加温低压成型（低压成型法）等方法。此外，它的耐水、耐酸、耐溶剂性、耐热性和耐电弧性也好，因而可用作道路照明灯具和腐蚀环境用的灯具的外壳材料，以及耐热电气零件等使用条件比较严酷的地方。因为成型硬化时尺寸收缩很大，有碱性弱、加水容易分解的性质，所以必须根据用途选择各种成型法、树脂的品级以及玻璃纤维的长度等。

7-2-3 玻璃〔6〕

玻璃是无机非晶体，主要以氧化物的形式构成，根据其组成可分为以下几类：

（1）**钠钙玻璃** 钠钙玻璃是最一般的玻璃，在照明灯具中，是以玻璃板的状态使用，或者是制成透明或乳白玻璃球型罩来使用。玻璃板的种类非常多，一般使用的有：普通平板玻璃，磨砂玻璃、压花玻璃、钢化玻璃等。钢化玻璃是把平板玻璃加热到软化温度附近（650~700℃），两面吹进同样的冷空气使之急剧冷却，并使在表面上形成压缩歪层，它除提高机械和热强度外，碎片是粒状，故是减少伤人危险的安全玻璃。在钢化玻璃中，把表面的离子置换，使其产生压缩变形的化学强化法也正在实用化中。

（2）**铅玻璃**（铅结晶玻璃） 铅玻璃可在比较低温下加工，由于透明度好，折射率高，以及它的表面光泽与放出辉光而很美观，因此用作有孔玻璃珠，装饰性碟形罩，装饰用球型罩等，是作为照明灯具的工艺装饰透光零件来使用。此外，作为无铅结晶玻璃，可使用钾石灰玻璃。

（3）**硼硅酸玻璃** 一般称为硬质玻璃，因为热膨胀系数小而耐热性能好，所以用作路灯等高温部分的玻璃罩。

（4）**石英玻璃** 石英玻璃也称熔融的二氧化硅玻璃，纯度高，耐热性和化学耐久性好，可见光、红外线、紫外线的透过率均高，在照明灯具中，用作卤化物灯小型特殊投光器前面的玻璃等。

（5）**（低膨胀）结晶玻璃** 在 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{MgO}$ 系统的玻璃中调合成结晶核形成剂，把熔化成形的原玻璃由常温再加热，析出结晶，即得稍带黄色的透明玻璃。

热膨胀系数大致为零，热冲击力非常强，加热到800℃后，投入0℃的水中，即使急速冷却也不破裂，连续使用的安全温度大约是700℃。宜使用于卤化物灯投光器前面的玻璃等热冲击强度高的地方。

（6）**玻璃的成型及加工** 玻璃制品的成型有压模成型、模吹成型、滚压成型、拉拔成型、离心成型等方法。作为工艺制品的制作方法，有流入成型、吹制成型等方法，玻璃制品成型或者热加工后，除了特殊情况（风冷强化处理等）外，为了防止热冲击应力，消除永久应变，必须徐徐冷却。

玻璃的加工，有切断、磨削、抛光、穿孔或热加工等等。

玻璃的表面状态，根据成型法的不同而有差异，玻璃依靠酸磨、化学研磨、打毛加工

等,可使玻璃表面形成平滑面或漫射面。

表7-8

照明用的透明玻璃的特性^[7]

		钠钙玻璃	铅玻璃	硼硅酸玻璃	石英玻璃	结晶玻璃
热膨胀系数 $[\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}](0\sim 300^{\circ}\text{C})$		85~97	85~91	34~52	5.5	-3~+6
使用温度($^{\circ}\text{C}$) ^①	徐冷 { 常用 最高	110	110	230	1000	700
		430~460	370~400	460~490	1200	800
	钢化 { 常用 最高	200~240	220	250~260	—	—
		250	240	250~290	—	—
耐热冲击性($^{\circ}\text{C}$) ^② 6"×6"板徐冷玻璃6.4mm(厚)		50	45	100~150	1000	800
冲击摩擦阻力 ^③		1.0~1.2	0.56	3.1~3.2	3.6	—
密度(g/cm^3)		2.47~2.49	2.85~3.05	2.13~2.43	2.2	2.47~2.55
弹性模量($\times 10^5 \text{kg}/\text{cm}^2$)		7.03~7.17	6.05~6.26	6.53~6.68	7.31~7.78	约8
泊松比		0.24	0.22	0.20	0.16	—
折射率(5893Å)		1.512~1.514	1.534~1.56	1.474~1.488	1.458	1.54~1.544

① 这里举出的数值是近似值,是只从机械的观点给与的数值,关于受热冲击情况下使用的界限,希参照耐冲击性一栏。

② 这些数值是近似值,所谓耐热冲击性 100°C ,就是指加热到 110°C 后投入到 10°C 的水中时没有破裂的数值。钢化玻璃,表示为徐冷玻璃的2倍以上的耐热冲击性。

③ 喷砂时的相对阻力值。

7-2-4 其他材料

木、竹、藤、纸、布、陶器等,到目前为止是用量比较少的材料。为适应消费者要求的多样化、个性化,以住宅照明及商店照明为中心,其使用量及使用范围正在不断扩大。在使用时,应按照灯具的结构及灯具的用途等来选定最合适的材料,还要充分考虑材料的性质以进行结构的设计,这是重要的。

现在使用的木材,大别为针叶树和阔叶树,针叶树以北美大陆生产的美杉为多,阔叶树以栎、山毛榉等日本材料,柳安、阿加提斯等东南亚的外地材料居多。针叶树主要作为日本式的灯具使用,以不涂色的白木为主,也用神代杉(译者注:长期埋在土中的杉木)、烧杉等装修,另一方面,阔叶树用于西洋式的灯具涂油后使用。

7-3 灯具的加工^[8~10]

照明灯具在根据光源的种类,使用场所周围环境,零件的构成要素等来考虑选择材料的同时,必须进行适当的加工。灯具加工的主要目的是美观,保护原材料,提高反射面的反射系数。

7-3-1 镀膜

照明灯具零件的镀膜,主要是电镀及熔化锌热镀。

电镀是根据电气的化学反应,在素材的表面电镀上不同种类的金属皮膜,以增加装饰性

及耐腐蚀性。电气电镀主要有镀锌、镀铬、镀镍等，还有部分地用镀金、镀银、镀铜等。

镀锌广泛地用于照明灯具内部的钢板零件。一般是为了提高耐腐蚀性而施行铬酸盐处理，有色铬酸盐处理在于耐腐蚀性，而光泽铬酸盐处理在于外观好看。镀层厚度宜在 10μ 以上。不过，它的耐热性、耐磨性较差。

镀铬有光泽和耐腐蚀性好的装饰用的电镀铬和硬度高而耐磨性大的电镀硬质铬。照明灯具使用装饰用的铬电镀，基底电镀用铜—镍、镍—镍。镀层厚度在 $15\sim 30\mu$ 左右。它的耐腐蚀性和耐热性都好，但形状复杂的東西不适宜采用。镀镍多数用在黄铜等零件上。为了增加美观，也有镀在白色青铜上的。镀层厚度为 $5\sim 30\mu$ 。它的耐热性、耐磨性良好。基底的电镀铬也常使用。

镀金、镀银用于枝形灯等装饰零件上，衬底电镀很有必要，镀银时为了防止因硫化而变色，可涂上一层清漆。

镀铜是作为基底电镀而使用的。复杂的形状也能均匀镀上。但有针孔的缺点。装饰零件使用时与镀银的情况一样，以用清漆涂罩为好。

熔融锌镀膜是把毛坯材料放进熔融的锌浴中浸泡以进行镀锌，可增加抗腐蚀性，一般用于铁零件上。

7-3-2 油漆

照明灯具的油漆，一般可用合成树脂的烤漆。油漆颜色丰富，在要求美观、防止腐蚀和漫反射面等部分广泛使用。

油漆工序一般是脱脂→皮膜化成处理→底漆→表面油漆。油漆方法有：刷漆，有气喷漆，无气喷漆，静电喷漆等。

基底漆为了增加它的粘着性和耐腐蚀，可使用有蚀洗用底漆、铬酸锌底漆和环氧底漆等。

表面用的涂料，一般使用密胺树脂涂料，它有光泽和耐气候性的优点。为了增加耐药性，使用环氧树脂、丙烯酸树脂，这些都比密胺树脂的抗热性能为好，但是环氧树脂在室外有引起粉化的缺点。在高温的地方也有使用硅有机树脂的。

根据性能，这些底漆和表漆组合起来，可以得到更好的效果，涂膜的厚度随使用场所和性能的不同而异，约在 $10\sim 50\mu$ 左右，白色的场合希望在 20μ 以上。

也有用表面硬度和防腐性能好的粉体涂漆。其中有丙烯酸树脂、环氧树脂、聚酯树脂等涂料，把涂料树脂和颜料按照本来的粉状进行静电喷漆，因为不使用溶剂，所以安全，涂料的损耗也少。

7-3-3 搪瓷

搪瓷是在金属表面上薄薄地烤上玻璃质釉料，具有金属的坚固性和玻璃的特性，装饰性、耐药性和耐磨性能好，用作汞灯灯具的反射罩等。

工序一般如下：

```

    毛坯成形→毛坯表面处理→上釉→烤成
    熔化釉料→调整釉浆——┘
  
```

上釉有喷釉、浸釉等。

搪瓷制品希望做到没有翘曲和下垂等变形，没有气泡和不均匀等缺点。这些原因和使用

材料有关。含炭量少的钢板就好一些。沸腾冷轧钢板、脱碳的极低碳钢等也可使用。

7-3-4 铝的阳极氧化薄膜处理

若把铝作为阳极，放在电解液中进行电解，则在铝的表面上即生成粘合性的、良好的钝态形的氧化薄膜，氧化薄膜的组成是氧化铝(Al_2O_3)，它的硬度高，耐腐蚀性、耐磨性、可擦性能好。电解液是硫酸、铬酸等时，氧化铝薄膜将局部溶解，而变成多孔质的一层，这就容易吸附各种物质，故有必要进行封孔处理。

7-3-5 电解抛光

电解抛光是把金属作为阳极，在电解液中电解，做微观的凸出部分优先地溶解出来，是作为使表面变得光亮的方法。在粗糙的表面上进行电解抛光，虽然表面变得光亮，但不一定平滑，为了得到平滑的光亮表面，必须进行抛光等加工。电解抛光后的铝的表面，若未经处理，就容易污染，质软而容易受伤，所以有必要进行阳极氧化薄膜处理。铝含有铁、铜等不纯物时，氧化薄膜就模糊，也就不成为镜面，需要反射镜等高反射特性时，就必须使用高纯铝(99.8%以上)。铝表面需要做成扩散反射面，或有深的样子的光泽面时，可进行预处理，把铝表面做成类似梨皮的花样。

7-3-6 真空镀膜法

这是在 $10^{-4}\sim 10^{-6}$ 毫米汞柱的高真空中，把金属加热蒸发，使在试件面上凝结，形成金属薄膜的方法，特别是铝的镀膜由于反射特性好，可以作为反射镜使用。试件可用金属、玻璃、塑料，铝的镀膜薄而摩擦力小，附着性不好，所以希望先要进行底层涂漆，然后进行铝的镀膜，再加清漆罩面，以保护镀膜。

7-4 灯具试验方法^[11~13]

7-4-1 试验项目

照明灯具，根据使用场所、目的，除了室内照明用的一般照明灯具外，还有道路照明灯具，水中照明灯具，防爆型照明灯具等种种类型。这些照明灯具，根据日本工业标准，电器用品管理办法，工厂电气设备防暴指南，以及各种说明书，规定其基本的构造和性能，并要求试验灯具在性能和构造上要符合这些规定，适合所使用的光源。灯具的试验，要满足标准所要求的性能，才能确定是否能安全使用。

试验从其性质上分类，可分为验收试验和例行试验两种。而从试验内容来分，则有(1)确定机械构造的性能试验；(2)确定电气性能的试验；(3)确定光学性能的试验三种。

表7-9所示是这三大类及其中包括的试验名称。一般是根据三大项目，选定如表7-10所示的项目进行试验。

表7-9 试验项目的分类

大 分 类	项 目
机械构造性能鉴定试验	构造试验 温升试验 热变形、热冲击试验 防水试验 噪声试验 耐久试验 耐振动、耐冲击试验
电气性能鉴定试验	点灯试验 绝缘电阻试验 耐电压试验 功率输入试验 功率因数试验
光学性能鉴定试验	配光试验

表7-10 一般的试验项目

规格名	照明灯具标准 (建电协)	室外照明一般原则 (JIL-5001)	白炽灯、放电灯 (电气用品)
构造试验	○	○	○
点灯试验	○		
温升试验	○	○	○
绝缘电阻试验	○	○	○
耐电压试验	○	○	○
热变形试验	○	○	
热冲击试验	○	○	○
防水试验	○	○	○
功率输入试验	○	○	○
功率因数试验	○	○	
配光试验			
噪声试验	○		

7-4-2 试验方法

试验一般在恒温恒湿 (5~35°C, 45~85%) 的环境中进行, 试验方法及其评定根据日本工业标准和电气用品管理办法进行。下面是关于目前进行的一般的试验项目, 以说明其方法和评定标准。

(1) 机械构造的性能试验

(a) 构造试验 检查灯具的尺寸和加工质量, 导线的包皮有无损伤, 它的构造是否使人容易碰到带电部分, 是否符合标准、说明书和图纸的要求。

(b) 温度上升试验 把灯具置于近似使用状态, 把可能使用的最大的灯, 在额定频率、电压下点燃, 在各部件的温度大致稳定时, 用热电偶温度计测定各部件的温度, 把它和材料的使用温度范围进行比较。表7-11示出在额定电压下温度上升极限值的一个例子。另外, 镇流器、变压器等装在灯具里面时, 按照电阻方法测定线圈的温度, 确定其是否在标准值以下。

表7-11 主要部件的温度上升限度

灯具的部件		温度上升(°C)
外	人接触的使用部件	金属、陶瓷、玻璃制品 其他
	人容易接触的部件	金属、陶瓷、玻璃制品 其他
壳①	人不容易接触的部件	70
	接触或接近建筑材料的部件②	60
灯口	水泥灯头	白炽灯
		汞灯
	机械灯头、石棉灯头	200

注: ① 不适用于接近灯罩和光源的部分

② 灯具的嵌入部分, 较顶棚面深100mm者可视为接近建筑材料的部分

镇流器绝缘体的种类	温度上升 (°C)
A 种	70 以下
E 种	85 以下
B 种	95 以下

注：装在灯具内的镇流器线圈的温度上升值

(c) 热变形、热冲击试验 此试验是在温度上升试验持续 8 小时后进行，前者要检查球型灯罩、填充件等是否变形变质，后者适用于室外防水型器具。从灯具的斜上方 (45°)，用每分钟 3 毫米的水量向球型灯罩、灯伞注水，检验是否产生龟裂和破损。这时水温要比周围温度低 10°C，起码也要低 4°C 以上。

(d) 防水试验 防水试验根据 JIS C 0920 (电气机械器具及配线材料的防水检验一般规则) 进行。该试验根据灯具的性能，还可分成如表 7-12 所示的 8 个项目。

表 7-12 灯具的防水种类

类别	性能
(1) 防滴型	不受从下垂线算起 15° 角的范围内落下来的水滴有害影响的灯具
(2) 防雨型	不受从下垂线算起 60° 角的范围内的降雨有害影响的灯具
(3) 防溅型	不受从任何方向溅来的水沫影响的灯具
(4) 防喷射型	不受从任何方向的水的直接喷射影响的灯具
(5) 耐水型	受到任何方向的水的直接喷射，内部也不进水的灯具
(6) 防浸型	在特定条件下，浸泡在水中，内部也不进水的灯具
(7) 水中型	可以在指定压力的水中经常浸泡使用的灯具
(8) 防潮型	能在相对湿度 90% 以上的环境中使用的灯具

(引自 JISC0920)

(e) 噪声试验 这是对内装镇流器、变压器的灯具所进行的试验。在额定频率及额定电压下点灯时，对灯具产生的噪声用指示声级计测定。对荧光灯台灯及家庭用的吊挂式荧光灯灯具，规定了噪声限制的数值，其它灯具不妨碍使用就可以。

(2) 电气性能试验

(a) 绝缘电阻试验 本试验有热试验和冷试验两种方法。前者是一般例行试验，在温度上升试验后，用 500 V 绝缘电阻计 (超过 300 V 时用 1000 V 绝缘电阻计) 测定带电部件与非带电部件金属之间电阻，这时要保持在 5 MΩ 以上。后者适用于验收试验，测定冷绝缘电阻时，要保持在 30 MΩ 以上。

(b) 耐电压试验 在与 (a) 项试验的同一个地方，增加如表 7-13 所示的电压，以检查

表 7-13 耐电压试验的试验电压

使用电压 (E) 的区分 (V)	试验电压 (V)
150 以下	1000
超过 150 ~ 300 以下	1500
超过 300 ~ 1000 以下	2E + 1000

灯具在一分钟间的绝缘能力。此外，验收试验也有在一秒钟内加上表 7-13 的试验电压值值的

120%的电压来进行试验的。

(c) 输入功率试验 适用于对内装镇流器的灯具的试验。灯在额定频率、额定电压下点亮,待灯稳定后,测定其输入侧的电流及电功率。电流读数值应在铭牌数值的±10% (10W以下的荧光灯器具在±20%) 以内。电功率的读数值应在名牌数值的+120%以内。

(d) 功率因数试验 根据(c)的结果计算出功率因数。

(3) 光学性能试验

配光测定 配光测定试验,根据 JIS C 8010 (道路照明灯具) 和 JIS C 8011(照明用的反射罩) 来进行。根据配光测定结果求出利用系数、灯具效率和光束的张角。测定时使用调压器,在一定电压下点灯,用照度计测定各点的照度。这时,灯具与接收器的距离必须要充分大到可以把灯具作为点光源来考虑的程度。反射罩是把罩的内径的 10 倍以上作为测定距离。

7-4-3 灯具的种类和试验项目

有几种灯具的性能和试验内容在《日本工业标准》中有明确的规定。表7-14是《日本工业标准》中所示的灯具试验项目的一览表。

表7-14 JIS所示器具的试验项目

灯具类别 试验项目	反射罩 JIS C 8111	道路照明灯具 JIS C 8113	荧光灯灯具 JIS C 8106
构造试验	○	○	○
温度上升试验		○	○
绝缘电阻试验		○	○
耐电压试验		○	○
热变形试验		○	○
热冲击试验		○	○
防水试验		○	○
噪声试验			○
点灯试验			○
输入功率试验		○	○
功率因数试验		○	○
配光试验	○	○	
耐久试验	○		
耐冲击试验	○		

7-5 照明灯具的分类与名称

7-5-1 照明灯具的分类

照明灯具很难按一个意思来分类,而是从不同的角度来进行分类。下面是几种比较有代表性的分类。

(1) 根据灯具的安装手段进行分类 可分为工程用灯具与家庭用灯具两类,这是制造

厂采用的基本分类方法。

工程用灯具原则上就是通过电工人员之手进行施工的，而家庭用灯具是不用麻烦电工，一般由用户自己接通电源（依靠插头等）就能把灯具安装上。

（2）根据使用的光源进行分类 可冠以光源的分类名称来区分。根据光源的种类，附以光源的功率，就可以区分灯具大致的大小和形状。

这种分类方法和（1）一起用作制造厂的基本分类，如白炽灯灯具、荧光灯灯具、高压放电灯灯具等等。但还有同是一种灯具，也能装高压汞灯也能装高压钠灯的情况，所以这样的分类并不能确实把灯具表现出来。

（3）根据灯具的形状进行分类 根据灯具形状分类和根据灯具安装状态分类以及根据灯具功能分类，是最基础的分类，从这些分类可以看出灯具的历史发展。学术用语及《日本工业标准》照明用语所辑录的灯具，大部分都包含在这三种分类中。

根据形状来分类的有代表性的灯具是台灯、落地灯、枝状灯等等。

（4）根据灯具的安装状态进行分类 光源在以白炽灯为主体的时代，用这种分类来表示是可以的，但由于光源的多样化，现在是作为修饰的分类用语使用着。

大致可分为顶棚灯、壁灯（或壁上托灯），悬挂式灯具、嵌入式灯具。

（5）根据灯具的功能进行分类 根据灯具的功能分类虽然多数比较容易得到灯具的形象，但若没有说明，则即使有了理解，这种分类还是和灯具的形状联系不起来。

大致可区分为“根据光学的特性或功能”，“根据对水和异物侵入的保护程度”，“根据对电击的保护程度”及“根据其他的功能”进行区分。

在国际电气标准会议（IEC）中，对照明灯具的分类非常明确，除了“根据对电击的保护程度”与“根据对水和异物侵入的保护程度”两种区分外没有其他分类，其他仅仅作为灯具的名称。

（a）根据光学特性或功能进行分类 据根配光的垂直面形状区分，从反射罩的分类开始，现在是广泛地作为一般灯具的配光分类来使用着。在JIS C 8111（照明反射罩）中，分为特狭照型、狭照型、中照型、广照型和特广照型五种。作为有轴对称配光的灯具的分类用语这是基本的。但表示或区分非对称配光则不是适当的。

道路照明灯具，根据水平面的配光形状分为“全周配光型”、“两个方向配光型”，或根据控制眩光的程度，而分为“遮断型”、“半遮断型”、“不遮断型”。

照明灯具的功能是调节光和保护光源。但现在根据光的调节来分类只对一部分灯具是重要的，对于大多数一般灯具则只是辅助地使用，或者甚至予以忽视。

根据光学功能的灯具分类名称，使用的比较早，多数是大致地把灯具表现出来。例如“投光灯”、“泛光灯”、“聚光灯”、“探照灯”、“脚光灯”等等。

（b）根据对水和异物的侵入的保护程度进行分类 根据对水的保护程度分为“防滴型”、“防雨型”、“防溅型”、“防喷射型”、“耐水型”、“防浸型”、“水中型”、“防湿型”等等，总称为“防水型”。国际上没有总称的用语。因为没有表现出保护的程 度，所以也没有分类用语。而且“防湿型”没有国际上的概念，将来应该取消。

从异物侵入的保护程度，IEC中有对于一定大小的球和棍、人的手、线、粉尘等的保护方面的区分，区分名称明确的只是“防尘型”和“耐尘型”。

（c）根据灯具抗电击程度进行分类 这是近年来确定的重要的分类。

“0级器具”：不进行接地的灯具。

“0I级灯具”，“I级灯具”：进行接地的灯具，0I灯具属可移动的灯的情况，将来是没有的。

“II级灯具”：不接地，它是在一般的绝缘上进行附加绝缘。在JIS中称为双重绝缘灯具或外层绝缘灯具。

“III级灯具”：这是供电在交流30V以下，直流45V以下的灯具，称为人接触带电部件后没有电击危险的灯具。

(d) 根据其它保护结构进行分类 这是在有煤气、蒸汽危险的场所使用的灯具的一类，称作防爆照明灯具。根据保护程度可区分为：“耐压型”、“增加安全型”等。还有些灯具的结构能保护它在腐蚀的气氛中使用，而称为“耐蚀型”、“耐盐型”等。

(e) 根据其它功能进行分类 通过照明灯具的光特性大致可分为：“场所照明灯具”和“传达信息灯具”。前者是一般的，而后者有“信号灯”、“指示灯”、“标识灯”等。这要根据使用目的或使用场所来进行分类、命名。

(6) 根据灯具的使用目的进行分类 可分类为“医疗用的灯具”，“展览用的灯具”，“特殊用的照明灯具”，“指引灯具”等。

另外也有从一般的使用要求或作业要求来得名的，“手灯”、“行灯”等就是属于这个范围。

使用目的有很大意义的“医疗用照明灯具”的区分，由于时代的要求在不断出现新的分类用语。

(7) 根据使用场所进行分类 因照明灯具是建筑或土木设施的一部分，把设施的灯具作为分类的方法是最简单的。除了多目的使用的照明灯具外，剩下的灯具就按使用的场所作为分类用语以及表示灯具本身的用语来使用。

大致分为：

- (1) 住宅用照明灯具
- (2) 商业用照明灯具
- (3) 产业用照明灯具

本手册各项中表示的照明分类用语中附加上灯具，即能够表示灯具的实际状态。例如：“学校照明灯具”，“工厂照明灯具”，“道路照明灯具”，“舞台照明灯具”等等。

“道路照明灯具”、“舞台照明灯具”等，较之其它的分类方法，因为灯具的特性明瞭，能够形成独自的类型。但是，“学校照明灯具”、“工厂照明灯具”等，主要是使用有通用性的灯具，也有一些独自的灯具，所以除了特殊的之外应该不作为基本的分类。

(8) 其它的分类 除了(1)~(7)的分类方法外，还有根据“灯具使用材料”的分类和根据“灯具的设计倾向”的分类等等。

7-5-2 照明灯具的名称

照明灯具的名称，除了《日本工业标准》照明用语中规定的名称外，没有固定的名称。所谓照明灯具用语本身，在法规用语中，可改用“电灯器具”或“灯具”等，没有得到统一。此外，在《日本工业标准》照明用语中，携带电灯和信号灯虽然被列入照明灯具的范围内，但在行政上的分类区分上多数是使用在别的用途上。

作为一般地表示某些照明灯具，根据7-5-1节的分类用语的组合是适当的。

制造厂是用营业上的需要来表现灯具的名称的, 为了避免和其它厂商的混同, 多数是不管是同一种类或同一形状, 也用别的称呼。譬如, 对某种形状的灯具, A称作“三角形”, B称作“V形”, C称作“富士形”, D称作“反富士形”, 各有各的称呼。

参 考 文 献

- | | |
|--|--|
| (1) 黒沢凉之助: 照明器具の光学 (1)~(3), 東芝レビュー, 11-1~3 (1956) 85, 195, 335 | (8) 田島榮編: 表面処理ハンドブック, 産業図書 (昭49) |
| (2) 寺村章: 表面処理鋼板の最近の動向, 防錆管理, 18-11 (昭49) 12 | (9) 金属表面技術協会編: 被覆形成技術, 朝倉書店 (昭49) |
| (3) 前川忠男: 銅合金に挑戦する注目のアルミ合金, 金属, 36-8 (昭41) 39 | (10) 窯業協会編: 窯業工学ハンドブック (第2版), 技報堂 (昭48) |
| (4) 住友金属工業カタログ, アルミニウムとは | (11) 通産省資源エネルギー庁公益事業部技術課監修: 電気用品取締法関係法令集 I, II, 日本電気協会 (昭53) |
| (5) 大阪市立工業研究所ほか編: プラスチック説本 (改定版), プラスチックエージ (昭45) | (12) 通産省: 電気用品の技術上の基準を定める政令 (昭表6) |
| (6) 作花清夫ほか編: ガラスハンドブック, 朝倉書店 (昭50) | (13) 営繕協会・建設電気技術協会共編: 建設大臣官房官庁営繕部照別器具標準 (昭47) |
| (7) 米国IES: IES Lighting Handbook, 5th ed. (1972) 6-16 | |

第 8 章

天然采光

8-1 直射阳光

天然光大致可分为直射阳光和天空光，两者都来源于太阳。由于直射阳光随着天气和时间而剧烈变化，所以要把它作为天然采光的稳定光源来利用是困难的。在一般情况下，最常用的天然光源是天空光。从广义上说，直射阳光和天空光的地物反射光也可认为是天然光源。

当从太阳发出的光进入地球时，由于在大气层中的散射和吸收而衰减，然后到达地表面。这是直射阳光。另一方面，阳光在大气层中或被散射，或被云及其它悬浮微粒反射，其中极小一部分在大气中被吸收，但是，残余的大部分或到达地表面，或者飞散在宇宙空间。到达地表面的这一部分是天空光。

8-1-1 大气层外的阳光

太阳不断地放射出大量的辐射能。地球边围绕着太阳旋转，边接受太阳辐射。地球公转轨道不是一个正圆，而是以太阳为焦点，离心率 $e = 0.01672$ 的椭圆。因而，在一年里，地球和太阳间的距离会有稍许变动，其平均距离为 $1.4960 \times 10^{11} \text{ m}$ ，等于椭圆轨道长轴的一半。这个距离叫做 1 个天文单位 (AU)。从地球观看在 1 AU 距离上的太阳时，视半径为 $16'00''$ [1]。

虽然到达地表面的太阳辐射由于地球大气层受到了衰减，但是没有受到大气影响的辐射量，在日辐射应用方面来说，是一个非常重要的基本量。从太阳起，在 1 AU 距离上，与太阳光垂直的平面上的辐照度叫做太阳常数。据最近的研究，太阳常数为 $1353 \text{ W/m}^2 = 1.939 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ 。它的光谱组成如表 8-1 及图 8-1 所示。

同样，不受大气影响时的直射阳光的照度，在天然采光领域里也是一个基本的且重要的量。在此，叫做大气层外日光法线照度。地球太阳间的距离为 1 AU 时的大气层外阳光法线照度，由上述的太阳常数光谱组成和 CIE 规定的视函数计算，得出 126800 lx 。这时的太阳平均亮度为 $1.865 \times 10^9 \text{ cd/m}^2$ 。大气层外日光法线照度随着地球太阳间距离的变化而变化，变化的范围是以上述数值为中心，在 $1/(1+e)^2$ 倍和 $1/(1-e)^2$ 倍之间变动 (式中 e 是地球公转轨道的离心率)，但是，在一般情况下，作为常数来处理就可以了。根据以上所述，将有关太阳辐射的各种常数归纳起来，如表 8-2 所示。

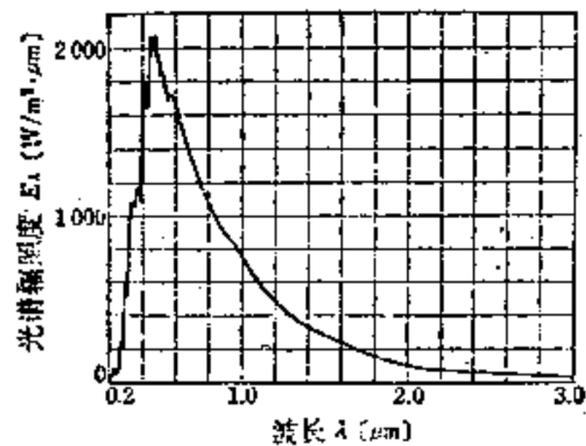


图8-1 大气层外太阳辐射的光谱组成

8-1-2 地面的直射阳光

入射到地球大气层里的阳光是由于散射和吸收而受到衰减，但是，这没有把可见光在分光方面的问题考虑在内。将可见光整个波长范围一起考虑时，其衰减也可以认为是由于净散射引起的。实际上，由图 8-2 可见，在可见光波长范围内也有吸收带，但是在 555nm 附近所见到的臭氧的吸收是微弱的，而在 700nm 附近，所见到的水蒸汽和氧气的吸收虽然较强，但由于在这段光谱附近视函数非常小，所以光的吸收是不太成为问题的。图 8-2 表示在标准晴天空下，太阳高度角为 90° 时，直射阳光衰减的情况〔3〕。

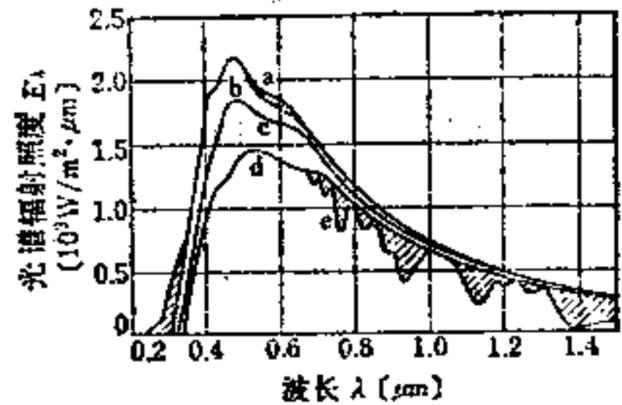


图8-2 直射阳光的光谱分布
a—大气层外太阳辐射；b—臭氧吸收之后；
c—瑞利散射后；d—烟尘吸收和散射后；
e—水蒸汽和氧气吸收后

根据瑞利理论，由空气分子引起的散射光的强度与入射光波长的 4 次方成反比，因而在大气中，太阳光的短波成分比长波成分受到较强的散射。

其结果，将地面上的直射阳光与大气层外阳光相比，它的光谱分布中的短波成分相对减少，由于带红色，所以相关色温变低。这种倾向在太阳高度角较低时，由于太阳光在大气中通过的路程越长而越显著，所以朝阳和夕阳看起来好像是红色的。同样道理，晴朗的天空之所以看起来是蓝色的，是因为散射光中所含的短波成分多的缘故。

地上直射阳光法线照度 E_s ，可用大气层外阳光法线照度 E_0 和直射阳光到达地面所通过这段距离的大气质量 x 来表示：

$$E_s = E_0 e^{-\alpha x} \tag{8-1}$$

式中， α 表示光的衰减程度，称为消光系数。 x 多以太阳在天顶时候的大气质量 H 为单位来表示：

$$x = mH \tag{8-2}$$

m 称为大气光学质量。如果像图 8-3 那样，近似地认为地球的圆度可忽略不计，则 m 和太阳高度角 h 之间有如下的关系：

$$m = \text{cosec} h \tag{8-3}$$

当 $h > 10^\circ$ 时，此式可给出非常好的近似值。

此时：

$$P = e^{-\alpha H} \tag{8-4}$$

代入式 (8-1)，得出：

$$E_s = E_0 e^{-\alpha m H} = E_0 P^m \tag{8-5}$$

近似地为：

$$E_s = E_0 P^{\text{cosec} h} \tag{8-6}$$

特别当 $m = 1$ 时，如果用 E_s 来表示 E_0 ，则由 (8-5) 式，可得出下式：

$$P = E_s / E_0 \tag{8-7}$$

即 P 等于假定直射阳光从上面垂直入射时，直射阳光的法线照度和大气层外阳光法线照度之比。 P 称为大气透过率。因为大气透过率随着入射光线的波长变化，所以，为要做精密研究，必须进行光谱分析。但是，在没有那样做的必要时，往往把可见光域当成为一个整体，在整个区域应用单一的透过率。虽然，完全不包含水蒸汽和尘雾，而所谓瑞利大气的大气透过率

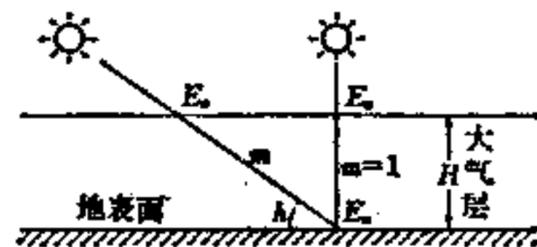


图8-3 大气光学质量

为 0.91 弱, 但是, 实际的大气的大气透过率, 在非常晴朗的天气为 0.85, 普通晴天为 0.75, 水蒸汽和尘雾多的晴天为 0.55。

作为直射阳光法线照度的计算公式来说, 应用上述的 (8-6) 式最普遍。

直射阳光水平面照度 E_h 为:

$$E_h = E_0 P^{\cos^2 \theta} \sin \theta \quad (8-8)$$

正对太阳下的垂直面上的直射阳光垂直面照度 E_v 为:

$$E_v = E_0 P^{\cos^2 \theta} \cos \theta \quad (8-9)$$

图 8-4 是由以上公式求出的 E_h 、 E_v 、 E_n 值的表示图。

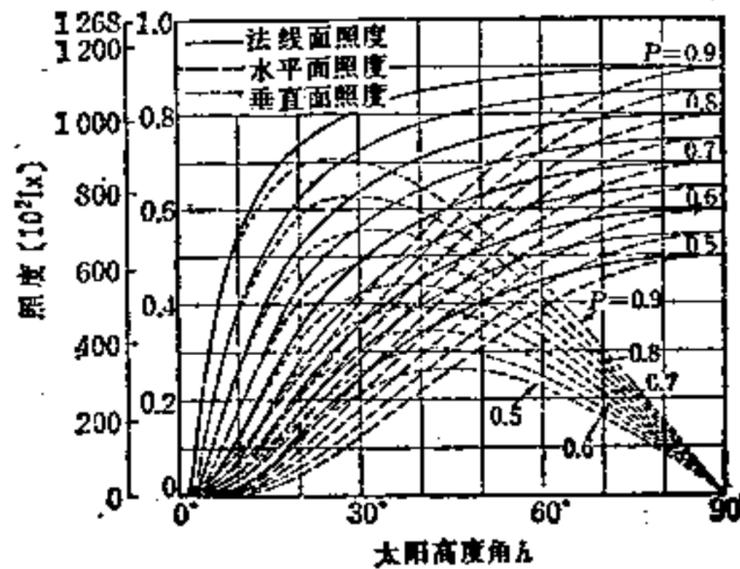


图8-4 直射阳光照度

8-2 天空光

8-2-1 晴天天空光

晴天天空光是由于太阳光在大气中散射产生的。晴天天空光的强度和光谱分布主要受大气混浊度和太阳高度角的影响。大气清彻, 混浊度小时, 天空亮度低, 其颜色为深蓝色。若大气中的水蒸汽和尘雾多, 混浊度大时, 则天空亮度高, 其色发白。

晴天天空的亮度, 全天均不一样, 天空各部分也不同。图 8-5 是晴天天空亮度分布测定的例子。亮度分布除了通过太阳和天顶的连线, 左右大致对称。亮度最高的地方是在太阳附近, 亮度最低的地方是在通过天顶离太阳大约 90° 的天空。

CIE 于 1973 年规定, 如下的晴天天空相对的亮度分布称为 CIE 晴天天空^[5]。在图 8-6 所示的天空上 P 点亮度 $L(\zeta, \alpha)$ 与天顶亮度 L_z 之比, 由下式表示:

$$\frac{L(\zeta, \alpha)}{L_z} = \frac{f(\gamma)\varphi(\zeta)}{f(z_0)\varphi(0^\circ)} \quad (8-10)$$

$$\text{式中 } f(\gamma) = 0.91 + 10\exp(-3\gamma) + 0.45\cos^2\gamma \quad (8-11)$$

$$\varphi(\zeta) = 1 - \exp(-0.32\sec\zeta) \quad (8-12)$$

$f(\gamma)$ 称为标准扩散特性函数。 γ 可由下式求得:

$$\cos\gamma = \cos z_0 \cos\zeta + \sin z_0 \sin\zeta \cos\alpha \quad (8-13)$$

$f(\gamma)$ 的计算使用弧度法表示的值。对于大城市和工业区的污染大气的 $f(\gamma)$ 用 $f'(\gamma)$ 代之^[5]。

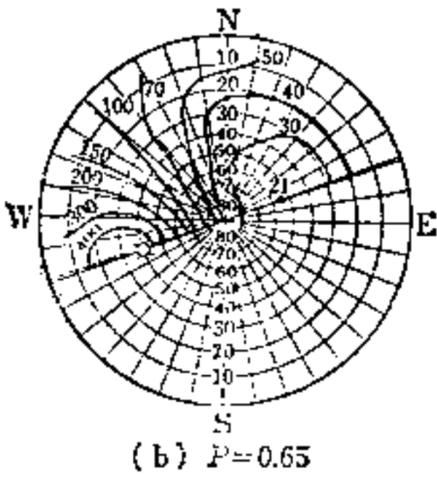
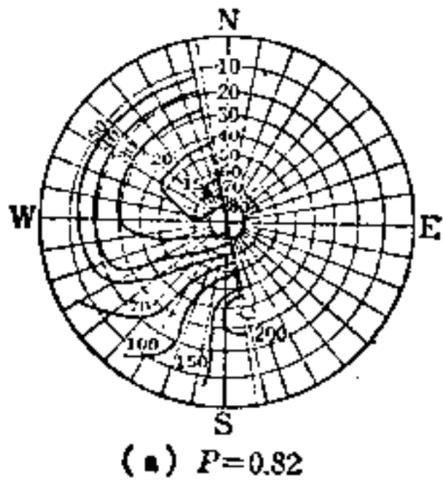


图8-5 晴天天空亮度分布 $\times 10^2$ (cd/m²)

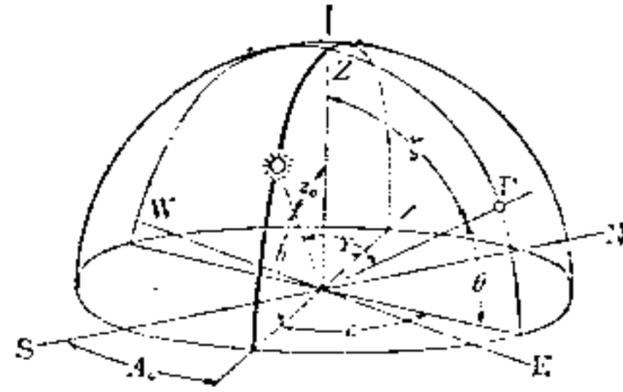


图8-6 天空上任意点P与太阳位置的关系

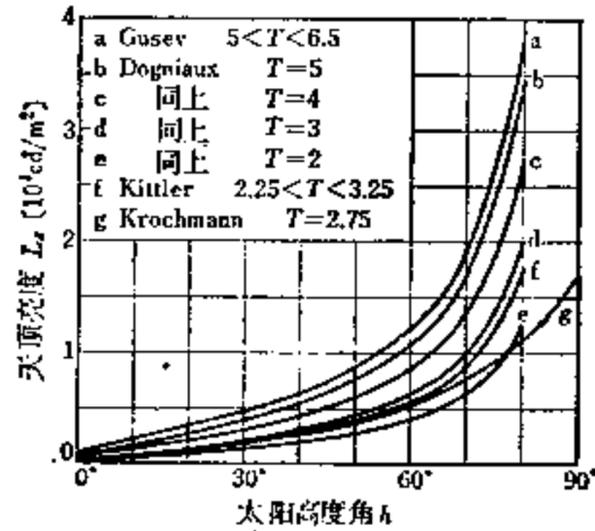


图8-7 晴天天空天顶亮度的推荐值

$$f'(\gamma) = 0.856 + 16\exp(-3\gamma) + 0.3\cos^2\gamma \quad (8-14)$$

CIE 晴天天空虽然没有规定天顶亮度值，但如果决定了天顶亮度，就可以直接从(8-10)式确定天空各部分的亮度。为此，有一些人正在为确定天顶亮度值作出努力，提出了若干方案。图8-7所示是一些方案的推荐值的例子^[6]。图中的 T 表示大气的混浊因子。混浊因子与大气透过率一样，是大气混浊度的指标，在两者之间可有如图8-8所示的关系。

想要根据直接的亮度来确定天空亮度分布，而不要用相对值，则也有下面这样的方案^[7, 8]。按此方案，图8-6上表示的天空上 P 点的亮度 $L(0, \alpha)$ (cd/m²) 可以近似地用下式来表示：

$$L(0, \alpha) = KE_0 s(\gamma) \psi(0, h, P) \quad (8-15)$$

式中， E_0 是大气层外日光法线照度 (lx)， P 是大气透过率。 $s(\gamma)$ 是与散射角 γ 有关的散射特性函数。

$P \geq 0.75$ 时，一般用下式表示：

$$s(\gamma) = \frac{1}{19.60} f(\gamma) \quad (8-16)$$

$P < 0.75$ 时，用下式表示：

$$S(\gamma) = \frac{1}{22.07} f'(\gamma) \quad (8-17)$$

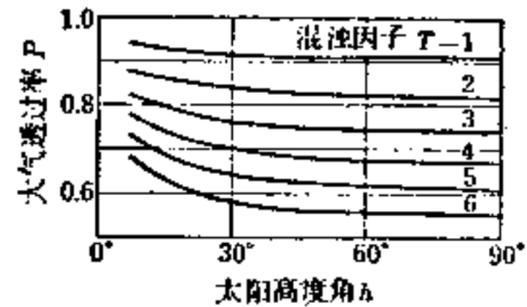


图8-8 大气透过率 P 与混浊因子 T

$f(\gamma)$ 、 $f'(\gamma)$ 是式 (8-11) 及 (8-14) 中所表示的参数。

$\psi(0, h, P)$ 是表示在以下情况的函数：

当 $0 \neq h$ 时

$$\psi(0, h, P) = \frac{\operatorname{cosec} \theta}{\operatorname{cosec} \theta - \operatorname{cosec} h} (P^{\operatorname{cosec} h} - P^{\operatorname{cosec} \theta}) \quad (8-18)$$

当 $\theta = h$ 时

$$\psi(0, h, P) = \operatorname{cosec} \theta \cdot P^{\operatorname{cosec} h} (-\ln P) \quad (8-19)$$

K 是随着 P 和 h 变化的系数，其实验式由下式表示：

$$K = \frac{1}{4} \{3 + 11P - 10P^2 + 5(1 - P)^2 \operatorname{cosec} h\} \quad (8-20)$$

式 (8-15) 的分布值，在 $\theta > 10^\circ$ 时，与 CIE 晴天天空有相当好的吻合，特别在 $\theta > 30^\circ$ 时，有非常好的吻合。

如果确定了晴天天空亮度分布，就可以用它来计算，求出晴天天空的水平面照度 E_s 。从式 (8-10) 和图 8-7 中的 L_s 值的推荐值中选出二、三个，如用图示求 E_s ，就变成图 8-9 所示的情况。在这张图上，对于 $h > 70^\circ$ 的数值，无实用价值。此外，还提出了一些计算晴天天空时水平面照度的简单的近似式^[6, 8]。Krochmann 的方案是对于 $T = 2.75$ 、混浊度比较小的晴天天空时的计算式：

$$E_s = 1100 + 15500 \sin^{0.5} h \quad (8-21)$$

Chrościcki 的方案， h 用度 $^\circ$ 来表示：

$$E_s = 3000 + 170 h \quad (8-22)$$

永田的方案是：

$$E_s = E_0 \sinh(1 - P^{\operatorname{cosec} h}) \times \{0.5 + (0.4 - 0.3P) \sinh h\} \quad (8-23)$$

如把这些用图来表示，则如图 8-10 所示。

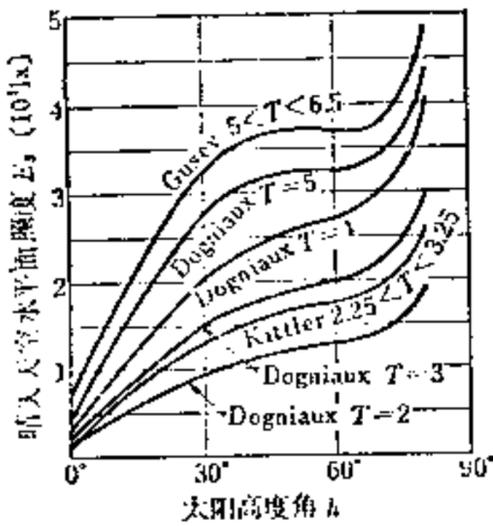


图8-9 晴天天空水平面照度计算值

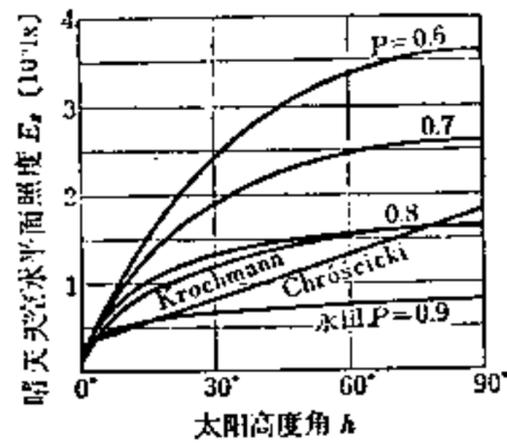


图8-10 晴天天空水平面照度计算值

晴天时，入射在水平面上的天然光有直射阳光和晴天天空光。直射阳光和晴天天空光的光谱分布，虽然随着太阳高度角的变化各自会有所变化，但是把这两种光合而为一，当太阳高度角变化时，总太阳辐射的光谱分布不会有多大变化。CIE 推荐的包括紫外线和红外线区域在内的总太阳辐射光谱分布，如图 8-11 所示^[3]。这是在混浊因子 $T = 2.75$ 、可降水量为 1cm 的大气时，总太阳辐射的辐照度为 $1120\text{W}/\text{m}^2$ 。假如混浊因子和可降水量变化，则

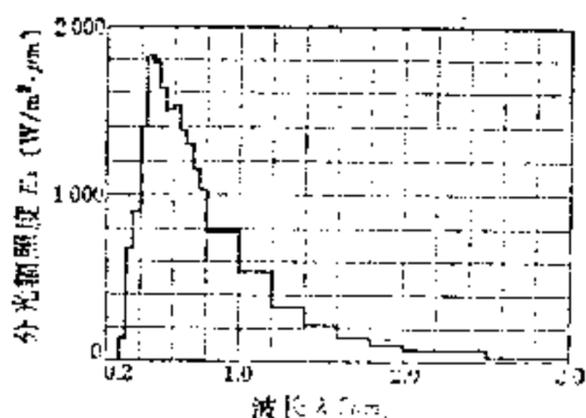


图8-11 晴天时总太阳辐射的光谱组成
(太阳高度角 $h = 90^\circ$)

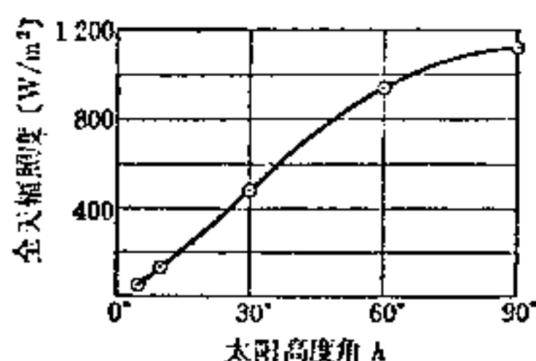


图8-12 晴天时的全天总辐照度

总太阳辐射值也会有一些变化。总太阳辐照度如图 8-12 那样，随着太阳高度角的变化而变化。天空辐射在总太阳辐射中所占的比例，如图 8-13 所示，随着波长和太阳高度角的变化而变化。晴天天空光的平均色度，太阳高度角越低越蓝。

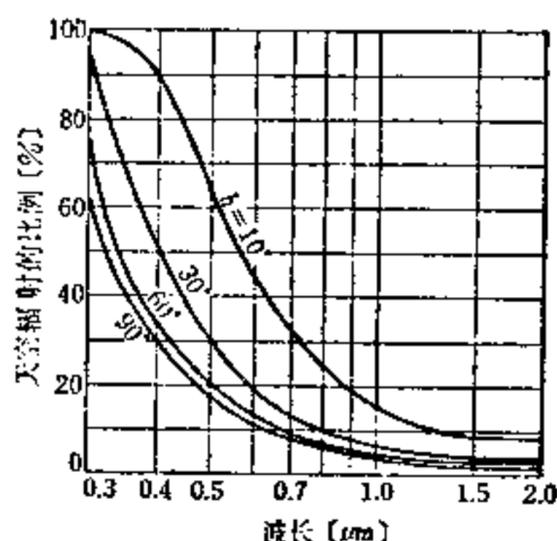


图8-13 天空辐射在总太阳辐射中所占的比例

晴天天空光的色度也和亮度一样，在天空各个部分不同。一般情况下，亮度大的部分呈白色，相关色温低，亮度小的部分为深蓝色，相关色温高。如试作晴天天空的相关色温的分布图，就可得到色温从 6000 K 到 15000 K 左右连续的亮度分布和类似形状的曲线群。

8-2-2 全阴天天空光

CIE 于 1955 年，根据 P.Moon 和 D.E.Spencer 的建议，作出如下规定，即当天空乌云密布、看不到太阳位置时，全阴天天空相对亮度分布符合下式时，叫做 CIE 标准全阴天天空^[9]。天空上的高度角为 θ 处的亮度 L_θ 与天顶亮度 L_z 之比为：

$$\frac{L_\theta}{L_z} = \frac{1 + 2\sin\theta}{3} \quad (8-24)$$

根据此式可知，全阴天天空的亮度分布与方位无关，仅取决于太阳高度角。这与在世界各地实测结果相当吻合。

由 CIE 标准全阴天天空的天空亮度 L_z (cd/m^2) 求水平面照度 E_s 用下式表示：

$$E_s = \frac{7}{9} \pi L_z \quad (8-25)$$

因为 CIE 标准全阴天天空仅仅规定了亮度分布的相对值，所以为了采用绝对值进行研究，有必要定出 L_z 或 E_s 。因为 L_z 和 E_s 之间有上述的关系，所以只要确定了其中之一就可以了。在此，将有关 E_s 的方案提出来讨论。全阴天天空的亮度主要随着云的厚度和太阳高度角变化。根据许多建议者提出的 E_s 值来看，虽然有相当大的偏差，但是大致上都在图 8-14 中的阴影范围之内。为简便起见，对阴暗的全阴天取：

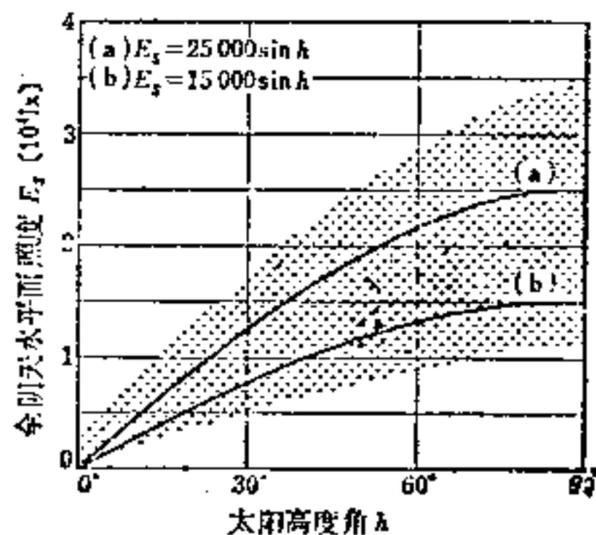


图8-14 全阴天水平面照度

$$E_s = 15000 \sin h \quad (8-26)$$

对有些明亮的全阴天也可取:

$$E_s = 25000 \sin h \quad (8-27)$$

这样做, 可以认为是不会特别不合适。

图 8-10 和图 8-14 所示的数值几乎相等, 由此可知, 如果只取背着太阳的半个天空来看的话, 晴天天空比全阴天天空还要暗。

全阴天天空的色度虽然在同一天空的各部分有所不同, 但是差别很小, 相关色温为 6000 K 左右。

8-2-3 稍阴和晴间有云天气的天空光

稍阴和晴间有云时, 水平面照度比晴天天空和全阴天天空还大, 一般大 1~2 倍。所以天空亮度值也高, 但其亮度分布复杂, 随时间剧烈变动。天空光的相关色温介于晴天天空和全阴天天空之间。

8-2-4 采光时间

仅用天然光, 而不需要人工光补充, 即可满足室内照明的时间带, 是扣除了日出后一段时间和日落前一段时间之后的白天, 它与天文学上昼间的意思不同。把它称为采光时间。宜取太阳高度角为 10° 以上的时间带作为采光时间的时间带^[10]。

8-2-5 采光设计用天空光

以确保室内所必需的最低限度的照度为目标, 而进行采光设计时, 采用通常出现的低天空照度值作为设计标准。将其大致的标准示于表 8-3 中^[11]。

表 8-3 必要的最低照度设计用的天空照度值

条 件	天 空 照 度 (lx)
对于有代表性的太阳高度角的天气状况的最低值	5800
对于最低太阳高度角的天气状况的代表值	5600
对于最低太阳高度角的天气状况的最低值	1300
全年的采光时间的 99% 的最低值	2000
全年的采光时间的 95% 的最低值	4500

如果设计目标不同, 除必须采用的天空光的标准外, 还应考虑到别的问题, 例如, 当由于窗户引起眩光问题时, 有必要考虑出现的高的天空亮度值。

8-3 天然采光设计

8-3-1 设计目标

建筑物室内天然采光设计, 有仅仅考虑天然光的采光设计和 8-4 节的天然光和人工光的综合照明设计两种。本节虽然讲的是前一个问题 (天然采光), 但是, 文中也包括了后面综合照明设计所必需的天然采光计算等基本问题。

(1) 遮阳 在天然采光中为什么要考虑直射阳光, 因为它变化大、眩光、亮度分布不均匀等, 成为影响视觉工作的原因, 所以是令人讨厌的东西, 原则上应采取排除它的方针。

因而，想要能随时遮蔽直射阳光，可在窗口设置百页窗、窗帘等。朝南的窗可用水平遮阳板，东西向的窗子宜用垂直遮阳板。可是，对于视觉工作不那么重要，而要利用直射阳光创造出生动活泼气氛的空间的地方，则不受此限制。

(2) 天然光照度和采光系数 由于直射阳光变化大，不能利用它作为稳定的光源，因此，原则上考虑把天空光及其反射光作为天然采光的光源。因为，天空光也有相当大的变化，室内天然光照度也随之变化，所以像人工照明那样来决定照度标准是困难的。

我们常说，在一个建筑里，有所谓亮的房间和暗的房间，这是非常一般的概念。它与天气无关，而是根据窗子的大小来确定的概念。把相当于这个概念的天然采光系数作为天然采光设计的指标，并定义如下式：

$$\text{采光系数 } D = \frac{\text{某点的照度 } E}{\text{此时的全天空照度 } E_t} \quad (8-28)$$

如果没有直射阳光，这个值几乎是一常数，作为该点的照度指标。若将 8-2 节得到的全天空照度乘以这个采光系数，就可算出该点的天然光照度。

(3) 天然采光系数标准 首先，用与人工照明标准相同的方法来确定工作面上的采光系数标准，作为主要设计的目标。可是，采光工作面为离地 75cm 的水平面，距窗子和四周墙壁 1 m 以内的部分除外。

表 8-4 是日本建筑学会制定的标准^[12]。由表可知，不亮也不暗的平常天气状况代表的全天空照度 $E_t = 15000lx$ 时，室内的天然光照度和照度标准 (JIS Z9110-1978) 的照度等级大体是相对应的，此时，可以把这一张表扩大成为如表 8-5 那样的表，使两者一一对应。根据这一张表可以求出表 8-4 中所没有列入的场所和工作的采光系数标准。

表8-4 天然采光系数标准

工作或房间类别	天然采光标准 (%)	天然光照度 (lx)			
		明朗天	平常天	阴暗天	非常暗的天
钟表修理、仅用天然光的手术室	10	3000	1500	500	200
长时间的裁缝、精密制图、精细工作	5	1500	750	250	100
短时间的裁缝、长时间的读书、一般制图、打字、电话交换、牙科诊疗	3	900	450	150	60
读书、办公、一般诊疗、普通教室	2	600	300	100	40
会议、接待、礼堂平均值、体育馆最低、一般病房	1.5	450	225	75	30
短时间的读书(白天)、美术展览、图书馆书库、汽车库	1	300	150	50	20
旅馆门厅、住宅食堂、一般起居室、电影院休息室、教会观众席	0.7	210	105	35	14
一般走廊楼梯、小型货物仓库、	0.5	150	75	25	10
大型货物仓库、住宅贮藏室	0.2	60	30	10	4

表8-5 采光系数标准与 JIS 照度等级的对应关系

采光系数标准 (%)	JIS 照度等级 (lx)	采光系数标准 (%)	JIS 照度等级 (lx)	采光系数标准 (%)	JIS 照度等级 (lx)
10	1500	2	300	0.5	75
7	1000	1.5	200	0.3	50
5	750	1	150	0.2	30
3	500	0.7	100		

因为表 8-4 考虑的对象，主要是侧面采光，所以即使在阴暗天，房间进深处工作面上的水平照度降低了，可是从窗子来的水平方向的光是强的，所以颇有助于视觉工作。天窗采光的场合，希望把 2 倍于此表的采光系数作为标准。但是，当天然光照度超过 1000lx 和特别对天窗来说，需注意夏天给于人体的辐射热过大的问题。

(4) 均匀度和入射光的方向性 因为单侧采光房间工作面上的采光系数分布变化非常剧烈，处理起来比较困难，因此，均匀度（采光系数最小值与最大值之比）应在 1/10 以上 [13]。此外，由于投向房间深处工作面上的入射光过分倾斜也是不太理想的，因而，推荐工作面上水平面和正对窗户的垂直面上的采光系数之比在 1/3~3 之间为宜 [14]。

(5) 窗的眩光 英国照明学会建议关于窗也采用与人工照明相同的眩光评价标准，即像侧窗那样的大面积光源，推荐用如表 8-6 所示的眩光指数 GI 限制值 [15]。但需要注意，这种场合的 GI 和后面 9-9-2 中叙述的人工照明器眩光指数 GI 是有一些不同的。这个评价方法及其标准在日本的适用情况，还需进一步探讨，这里提出来仅供参考。

表 8-6 侧窗的限制眩光指数 (英国 IES Code 1973)

建筑物名称	工作及房间类别	眩光指数限制值
事务所	一般办公室	22
	制图室	20
图书馆	阅览桌	22
学校、大学	礼堂、教室、实验室	20
医院	病房	18
	药房	22

8-3-2 采光系数的计算 [16]

(1) 采光系数的计算方法 式 8-28 定义的采光系数 D 为由窗户进入的天空光和对面建筑物等反射光所产生的直接照度 E_d ，除以 E_s 所得的直接采光系数 D_d 和由室内表面反射光产生的间接照度 E_r ，除以 E_s 所得的间接采光系数 D_r 之和，即：

$$D = D_d + D_r = \frac{E_d}{E_s} + \frac{E_r}{E_s} \tag{8-29}$$

该计算方法采取逐点计算法。因为 D_d 一般是不均匀的，所以需求出工作面上几个点，然后加上被看作在这个房间里几乎相同的 D_r 。

(2) 立体角投射率和直接采光系数 立体角投射率（简称投射率）虽是计算直接采光系数的，但它是作为媒介的几何量。

图 8-15 表示，由均匀亮度为 L (cd/m²) 的窗子（面光源）和窗面积为 S (m²)，对 P 点的直接照度 E_d (lx) 为：（见后述 9-2 节）

$$E_d = L \int_s \frac{\cos \theta \cdot \cos i}{r^2} dS \tag{8-30}$$

式中， θ 、 i 、 r 如图所示。

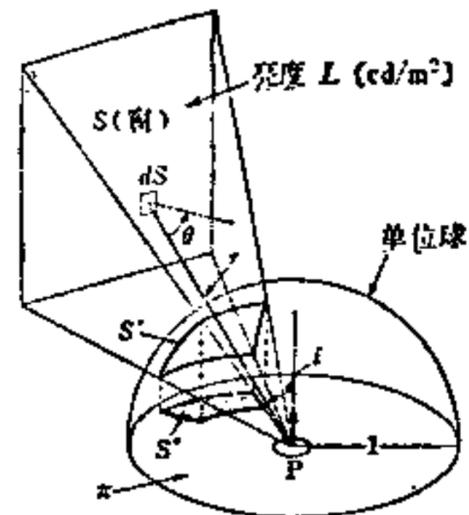


图 8-15 立体角投射率

令
$$C = \int_s \frac{\cos \theta \cdot \cos i}{\pi r^2} dS \quad (8-31)$$

则

$$E_d = \pi Lc \quad (8-32)$$

这个 c 是立体角投射率，相当于图 8-15 所示那样，从受照点 P ，以 P 为中心，作一包含窗面积 S 的立体角锥体，在单位球体上截取面积 S' ，将此正投影在受照面上的面积 S'' 与单位球体底面积 π 之比的量。如果面光源扩大成为均匀亮度为 L_s 的全天空时，则 $c = 1$ ，由此产生的照度 E_s 为：

$$E_s = \pi L_s \quad (8-33)$$

所以 P 点的直接采光系数 D_d 为：

$$D_d = \frac{E_d}{E_s} = \frac{L}{L_s} \cdot c \quad (8-34)$$

即由均匀亮度的窗面产生的直接采光系数，可由窗亮度为 L 和均匀天空亮度 L_s 之比 (L/L_s) 乘以这个窗面的立体角投射率 c 求得。

没有窗玻璃，直接看到天空时，窗的亮度等于天空亮度， $L/L_s = 1$ ，因此，式 (8-34) 的 $D_d = c$ ，直接采光系数和立体角投射率一致。这时的 c 有时也叫做天空率。

窗是透明的，如图 8-16 那样，能清楚地分辨出窗外的天空、建筑物等时，若从室内看到各部分的亮度为 L_n ，投射率为 c_n ，则式 (8-34) 就成为：

$$D_d = \sum (L_n/L_s) \cdot c_n \quad (8-35)$$

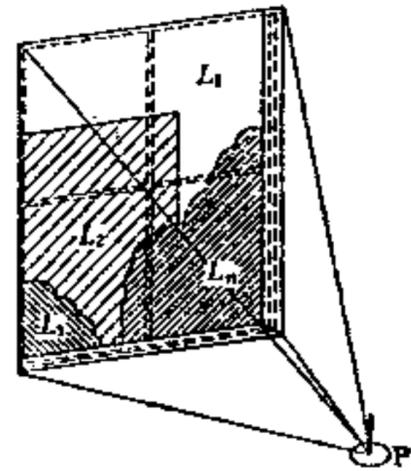


图8-16 透明窗的亮度

(3) 直接采光系数的计算方法

(a) 透明窗 在没有玻璃或有透明玻璃、隔热玻璃等场合，式 (8-35) 中的 L_n/L_s 为：

$$\frac{L_n}{L_s} = \tau \cdot m \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \frac{L_{n0}}{L_s} \quad (8-36)$$

式中 τ 是玻璃的正透光系数 (表 8-7)； m 是玻璃污染折减系数 (表 8-8)； R_1 是窗结构挡光折减系数 (铝窗为 0.90，钢窗为 0.85，木窗为 0.75)； R_2 是去掉窗壁厚的窗面积有效率 (图 8-17)。此外， L_{n0} 是不通过窗玻璃，直接看到的窗外亮度。

(b) 半透明窗、半扩散窗 和透明窗相同。

表8-7 窗透光材料的透光特性和透光系数
(不加说明的均为扩散光入射)

材料名称	透光特性	透光系数 (%)	材料名称	透光特性	透光系数 (%)
透明玻璃(垂直入射)	透明	90	普通嵌丝玻璃	半透明	60~70
透明玻璃	同上	83	隔热玻璃	透明	50~75
磨砂玻璃(垂直入射)	半透明 半扩散	75~85	糊窗纸	扩散	35~50
磨砂玻璃			同上	灰色薄窗帘	扩散
磨光嵌丝玻璃	透明	75~80	深色薄窗帘	扩散	1~5

表8-8 窗玻璃污染折减系数(m)

地 区	生 产 分 类	与 玻 璃 水 平 面 的 倾 斜 角		
		0°~30°	20°~60°	60°~90°
农 村 或 郊 区	讲 洁	0.8	0.85	0.9
	污 染	0.55	0.6	0.7
住 宅 区	洗 洁	0.7	0.75	0.8
	污 染	0.4	0.5	0.6
工 厂 区	讲 洁	0.55	0.6	0.7
	污 染	0.25	0.35	0.5

(Pub. CIE №16, 1970)

注：每6个月清扫一次窗子，基本上是按澳大利亚的测定资料编制的。

(c) 扩散窗 乳白玻璃、玻璃砖、糊纸窗扇、窗帘等看作为完全扩散透过，式(8-34)中的 L/L_0 为：

$$\frac{L}{L_0} = \tau_m \cdot m \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot D_w \quad (8-37)$$

式中， τ_m 是窗材料的扩散透光系数（表8-7），其它与式(8-36)相同。还有， D_w 是窗外侧（与侧窗平行的垂直面上）的总采光系数。

(d) 窗外建筑物等的亮度比 L_{on}/L_0 为了简单起见，设该建筑物等表面上的采光系数为 D_n ，反射系数为 ρ_n ，亮度比可由下式求得：

$$\frac{L_{on}}{L_0} = D_n \cdot \rho_n \quad (8-38)$$

全阴天时的亮度比大致为 $L_{on}/L_0 = 0.1$ 。

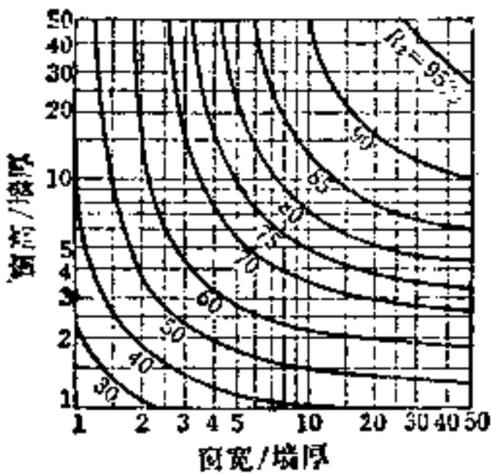


图8-17 由墙厚决定的窗面积有效率 R_2

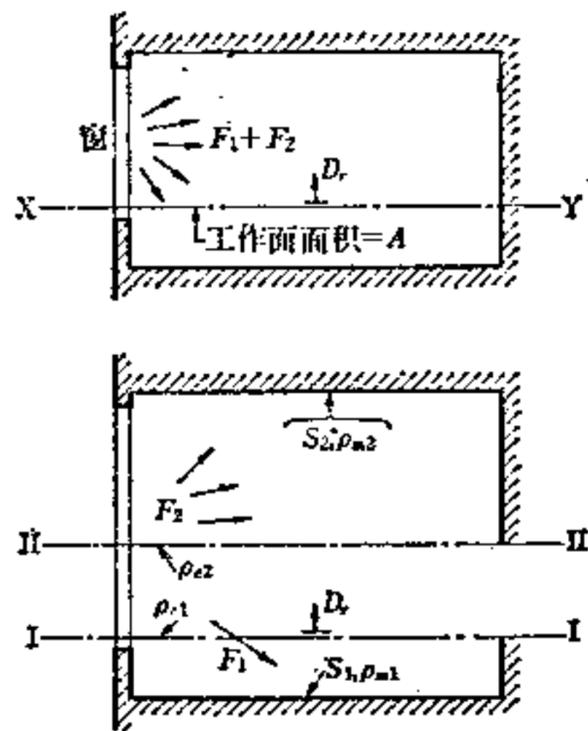


图8-18 工作面剖面公式的说明

(4) 间接采光系数的计算公式 (工作面剖面公式) 求工作面上间接采光系数平均值 D_r 的计算方法，如图8-18所示，沿工作面将房间剖开，得到剖面上的等效反射系数 ρ_{e1} (朝上)、 ρ_{e2} (朝下)，并考虑它们之间的相互反射。如将从窗进入的入射光通量 F_w ，从工作面起，分成入射到上部和入射到下部的的光通量 F_1 和 F_2 时，则：

$$D_r = \frac{(F_1 \cdot \rho_{e1} + F_2) \rho_{e2}}{A(1 - \rho_{e1} \cdot \rho_{e2}) E_e} \quad (8-39)$$

式中 A 是地面积, ρ_{e1} 、 ρ_{e2} 用下式计算:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{e1} &= \frac{A \cdot \rho_{m1}}{S_1 - (S_1 - A) \rho_{m1}} \\ \rho_{e2} &= \frac{A \cdot \rho_{m2}}{S_2 - (S_2 - A) \rho_{m2}} \end{aligned} \right\} \quad (8-40)$$

式中 S_1 、 S_2 分别是工作面上部及下部的室内表面积, ρ_{m1} 、 ρ_{m2} 是 S_1 、 S_2 的平均反射系数。此外, 在透明窗时的 F_1 、 F_2 为:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= E_e \cdot D_{w1} \cdot S_0 \cdot \tau_m \cdot m \cdot R_1 \cdot R_2 \\ F_2 &= E_e \cdot D_{w2} \cdot S_0 \cdot \tau_m \cdot m \cdot R_1 \cdot R_2 \end{aligned} \right\} \quad (8-41)$$

在扩散窗时:

$$F_1 = F_2 = E_e \cdot \left\{ \frac{(D_{w1} + D_{w2})}{2} \right\} \times S_0 \cdot \tau_m \cdot m \cdot R_1 \cdot R_2 \quad (8-42)$$

式中, S_0 为窗面积; D_{w1} 、 D_{w2} 分别是窗外侧从上面一半空间和下一半空间来的光所产生的采光系数; 其它符号与式 (8-37) 相同。此外, F_1 、 F_2 可参考后面 9-4 节 (从面到面的入射光通量), 可求得更高的精度。

为要更简便地求出间接采光系数, 设室内总面积为 S , 其平均反射系数为 ρ_m , 由窗进入的总入射光通量为 $F_d (= F_1 + F_2)$, 则:

$$D_r = F_d \cdot \rho_m / S(1 - \rho_m) E_e \quad (8-43)$$

F_d 可从式 (8-41) 求得。

(5) 设计举例^[17] 图 8-19 所示的是一个面对十分宽广的运动场、外部没有遮挡物的小学普通教室及其工作面上采光系数计算结果。将装上透明玻璃的钢窗, 从中间分成上下二部分。室内装修的反射系数: 顶棚和墙壁为 0.70, 布告板等为 0.40, 地面为 0.20。

均匀天空亮度时的工作面采光系数分布如图示那样, 低于普通教室的采光系数标准 2% (表 8-4) 的部分是用阴影表示的区域。但是, 除 C_7 点附近外, 大体上可以满足标准的要求。

工作上的均匀度是最小的 C_7 点和最大的 A_1 点的采光系数之比, 其值为 $1.6\% / 12.6\% = 1 / 7.9 > 1 / 10$, 达到了设计要求。

作为入射光的方向性来说, 在最不利的 C_7 点上, 水平面和垂直面 (朝窗) 的采光系数之比为 $1.6\% / 5.1\% = 1 / 3.2$, 大体满足了 $1/3 \sim 3$ 推荐值的要求。

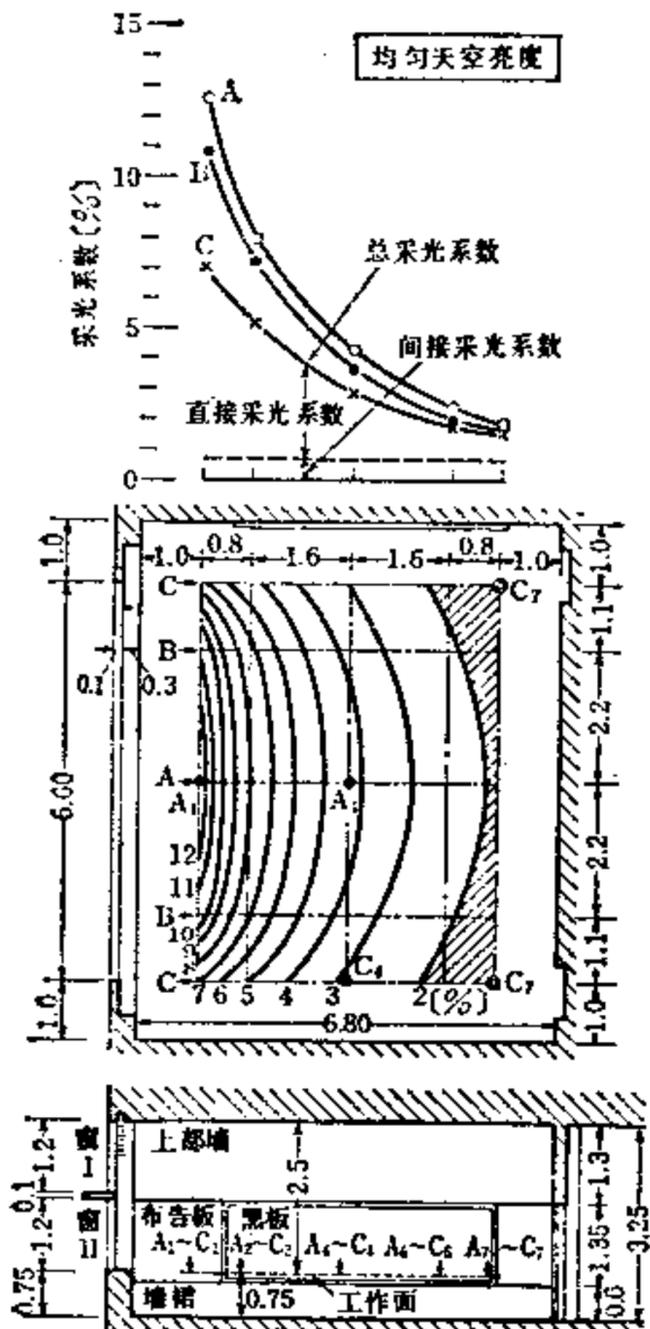


图8-19 小学普通教室的采光系数分布

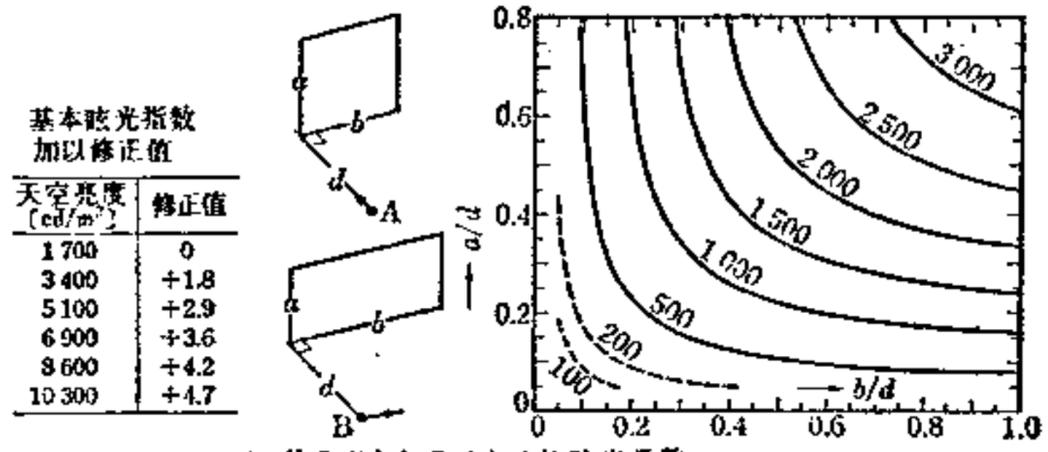
8-3-3 窗的眩光的控制^[18]

图 8-20 所示的 A 及 B 位置和视线方向场合的眩光常数 GC, 可以从图 (a) 及 (b) 中求得。这时的眩光指数 GI 为:

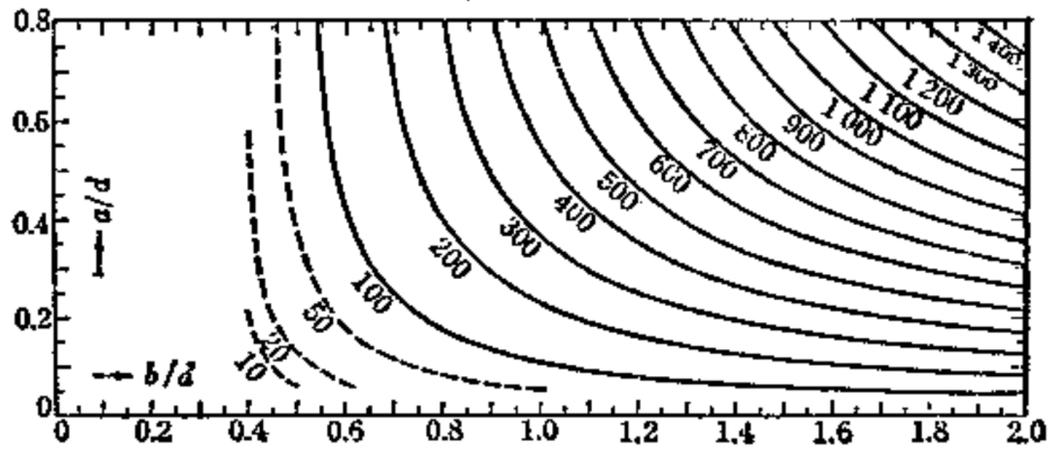
$$GI = 10 \lg \frac{GC}{500 D_r} \quad (8-44)$$

式中, D_r 是由式 (8-43) 求得的间接采光系数。再者, 因为这种场合的窗面亮度是 1700 cd/m^2 , 所以, 亮度比它大的场合, 需按图进行修正。

在上述的普通教室的 C, 点上, 与窗子平行地观看时, 从图 8-20(b), $a/d = 2.5/3.7 = 0.68$, $b/d = 6.6/3.7 = 1.78$, 得出 $GC = 1170$ 。从式 (8-44), 当 $D_r = 0.0069$, 则 $GI = 25.3$, 即使天空亮度为 1700 cd/m^2 时, 也不能满足表 8-6 中教室 $GI < 20$ 的要求。可是, 在房间中央 A, 点位置上, $GI = 20.2$, 大致可以满足要求。



(a) 从垂直方向看到窗时的眩光常数



(b) 与窗平行观看时的眩光常数

图8-20 窗的眩光常数

8-4 PSALI (室内恒定的辅助人工照明)

8-4-1 所谓PSALI

室内恒定的辅助人工照明(PSALI)是 Permanent Supplementary Artificial Lighting in Interiors 的简称, 日本译为“昼间人工照明”。Hopkinson 和 Longmore^[19, 20]指出昼间人工照明的重要性以来, 一些人对此进行了种种研究^[21~24]。

可是现在, 关于其范围、概念、必要条件以及与此相应的设计方法, 尚未达到建立一定学说的地步, 但是, 可以认为, 按下面那样考虑还是妥当的^[23~26]。

(1) 概念 所谓昼间人工照明, 一般认为是指在白天的室内照明中, 使窗子射入的天然光和室内的人工照明舒适且合理的协调起来, 形成良好的照明环境。

与天然光协调的方法大多分为照度平衡型昼间人工照明和亮度平衡型昼间人工照明二种方式。

(2) 昼间照明的重要性 昼间照明的重要性有以下二个理由:

(1) 办公大楼几乎都是白天在里边进行工作, 因而, 必须将照明设计成在白天使用情况有最佳的照明效果。

(2) 以窗为界, 窗内外的照度差别很大。连较高照度的照明装置, 人工照明的照度也只有 1000lx 左右, 然而, 室外照度可达到 100000lx, 因而, 两者之比为 100:1, 所以, 有必要使比室外照度低的室内照明, 与屋外相适应, 进行适当的协调。

8-4-2 PSALI的基本观点

(1) **照度平衡型昼间人工照明** 在白天的室内,天然光照射在近窗处,为使房间深处的照度与近窗处的照度达到平衡,使之尽量保持均匀一致的照明方式,称为“照度平衡型昼间人工照明”。因为近窗处的人工照明可以减少,所以照明用电随此而降低。

要注意的问题是:不能因为仅着眼于确保工作面照度,而取得天然光照度后,就存在简单地甚至连离窗太远的灯也关灭的倾向,而光的方向性变坏,产生挡光和身体阴影等,容易损坏照明质量,所以应予以注意。可是,从对当前节能要求,一方面将损坏照明质量限制到最小,同时容许将照明器减光,这对节能观点来说是妥当的。

(2) **亮度平衡型昼间人工照明** 在白天的室内,窗的亮度非常高,所以,对在房间里的人来说,近窗的顶棚和墙壁让人觉得暗,此外,因能看到人和东西的剪影,所以,感到室内阴暗。在这种情况下,如果用自动曝光的照相机不加考虑地拍摄逆光照片时,就会照出受窗子亮度影响而室内很暗的照片。

为了防止这种情况,必须使室内人工照明和窗的亮度的比例达到平衡,称此为“亮度平衡型昼间人工照明”。

当窗的亮度降低时,室内的人工照明的照度也应相应降低为宜。因此,如果采用适当的昼间人工照明控制装置来减光,就会比平时用最大照度点灯时的照明用电减少。

这犹如使用空调器一样,是随着室内、外气温的变化,而运行或停止的。在照明方面也可以这样考虑。

此外,本文中所述的“窗的亮度”的意思,是指通过窗子所看到的外景的平均亮度。

8-4-3 照度平衡的PSALI的必要条件

(1) **条件** 如果,即使把近窗处的灯关灭,而仅用离窗更远的灯和天然光来照明,其所得到的总照度,也大于这个房间设定照度的话,就规定将近窗处的灯关灭。

(2) **人工照明和天然光的协调** 关于计算方法有二、三个报告〔26~28〕。

在实际设计中,把人工照明的布置方案确定到某种程度之后,计算关掉近窗处1~2台灯时的照度分布,求出比这个房间设定照度的不足部分,用天然光来补充。从下面(3)项中叙述的方法,求得必需的天空亮度。对于大约怎样的时间比率可以不开灯?可从8-4-5节中叙述的天空亮度的超过率求得。

为了设计更简便,也可以考虑关掉窗边的灯,在关掉了的灯和深处亮着的灯中间部分所得到的照度约为这个房间规定照度的1/2以上。在这附近,如果规定照度的1/2以上是由天然光得到,那么,就可以将它作为关掉的人工照明来计算。

在这种场合,必要的天空亮度也可以从下面(3)项中求得,该值的超过率宜从8-4-5节求得。

(3) **天然光照度的计算** 详细的以8-3节“天然采光设计”为依据。

为简化计算,天然光照度 $E_D(\text{lx})$ 可由采光系数 $D(\%)$ 和天空亮度 $L_s(\text{cd}/\text{m}^2)$ 求得

$$E_D = \pi D L_s \times 10^{-2}$$

图8-21〔29〕所示为具有代表性的采光系数计算曲线。

此外,在图8-22〔30〕中表示的是一个假想的近似实际办公室房间的计算例子。当顶棚高度约为2.5m的一般事务所照明设计时,可以参考这个例子。

计算条件:

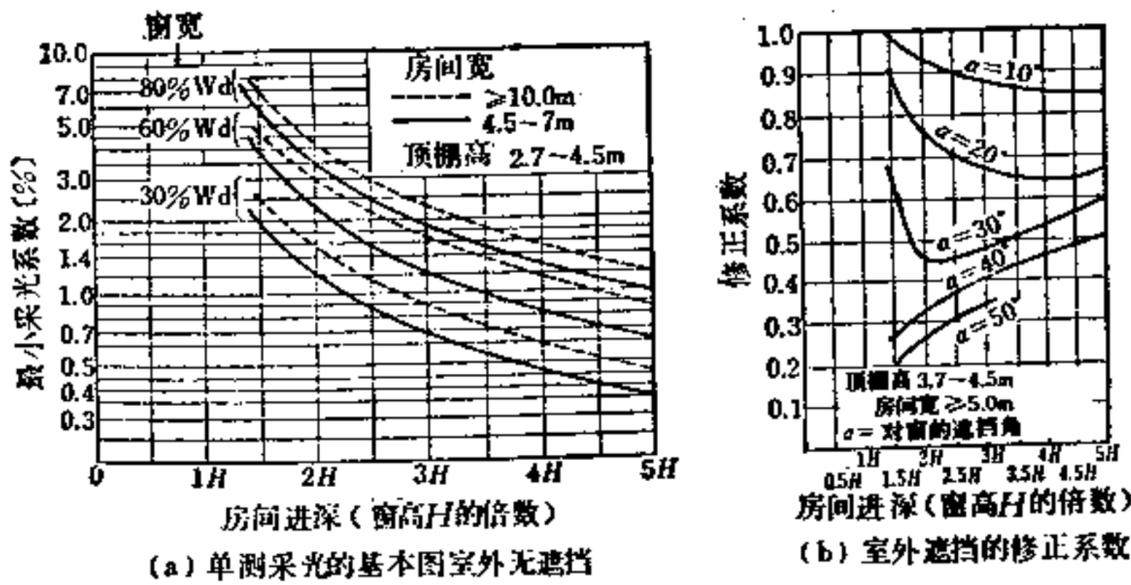


图8-21 CIE法采光系数计算图^[29]

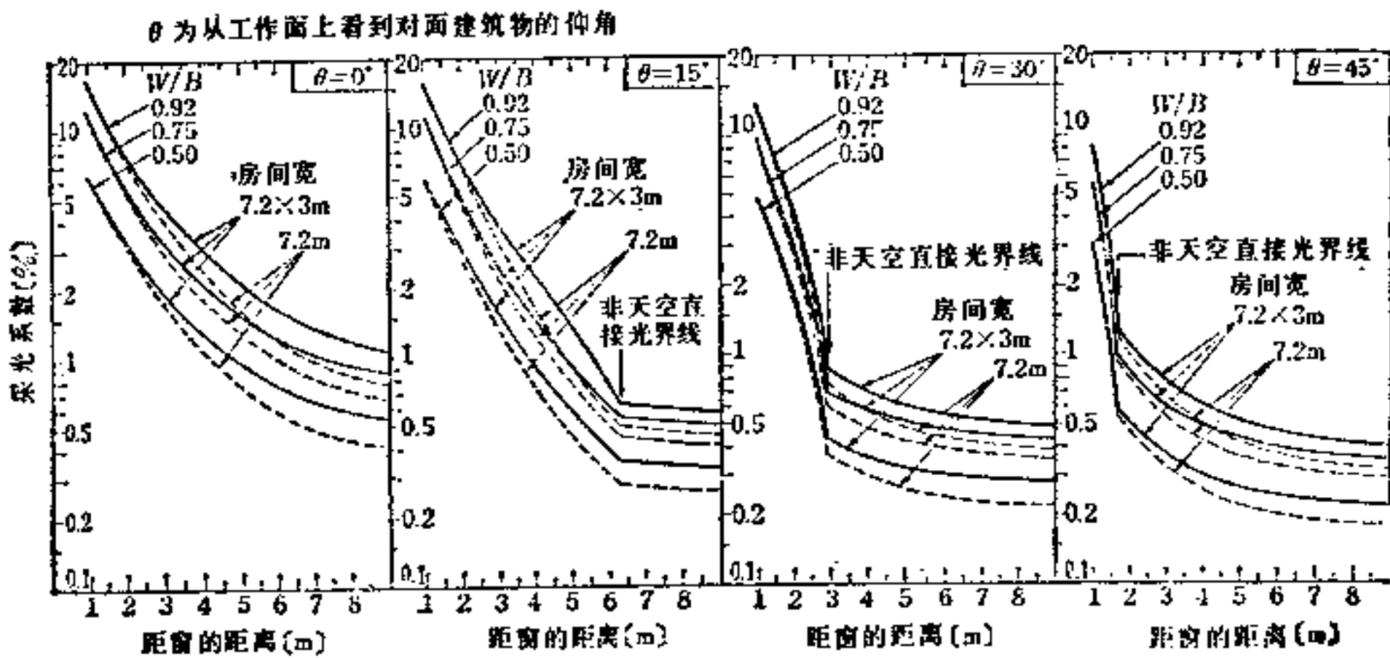
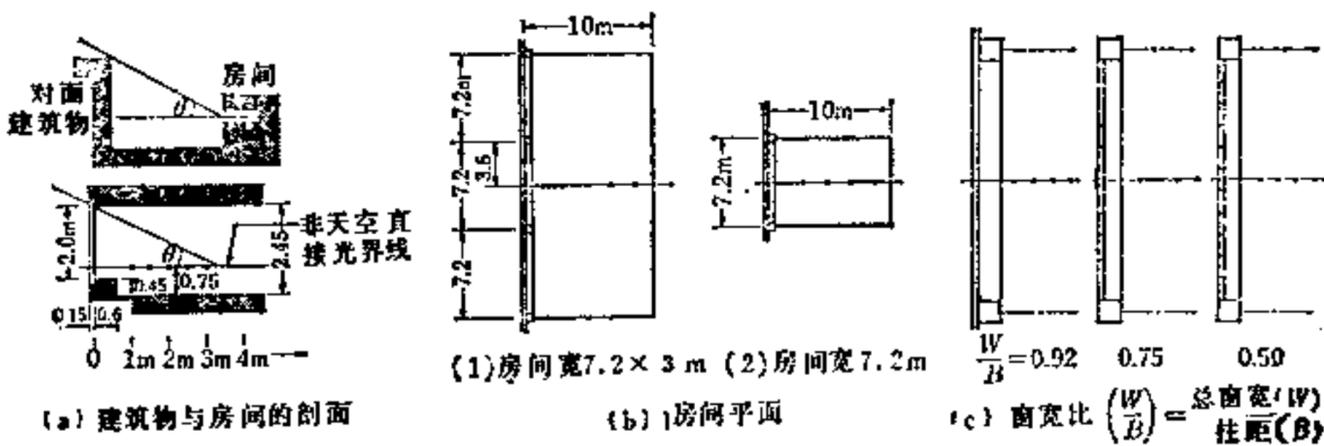


图8-22 工作面上采光系数的计算举例，单侧采光房间中心线上的天然光分布(直接+间接)^[30]

- 1) 均匀天空亮度;
- 2) 对面的建筑物的宽为无限长;
- 3) 墙面亮度为天空亮度的 1/10;
- 4) 相对于对面建筑物的仰角 θ ，假定在全部工作面上都相同;
- 5) 窗宽比 W/B 为总窗宽 W 和柱距 B 之比;
- 6) 直接采光系数的计算条件为:

$$\tau = 0.91;$$

$$m = 0.83;$$

$$R_1 = 0.90;$$

$R_2 =$ 窗壁厚的修正系数;

投射率以窗墙内表面来计算;

7) 间接采光系数的计算条件为:

$$\tau_m = 0.83;$$

$$m = 0.83;$$

$$R_1 = 0.90;$$

$R_2 =$ 考虑了柱子、窗台及窗墙两者的修正系数;

室内表面的反射率: 顶棚为 0.8, 墙壁为 0.5, 窗子为 0.17, 地面为 0.20;

窗玻璃污染的折减系数 m 参照 8-3 节;

另外, 有关上面各项 τ 、 m 、…等的详情参照 8-3 节。

8-4-4 亮度平衡的PSALI的必要条件

(1) 必要条件

(1) 改善房间发暗的感觉

(i) 改善室内亮度平衡

(ii) 防止剪影现象

(2) 改善立体感

(2) 改善室内发暗的感觉

(a) 室内亮度的平衡 Hopkinson 第一次提倡昼间人工照明时的主要原因是采纳了如下论述: “当环视室内时, 由于能看见窗附近被天然光照射部分, 眼睛的适应亮度一高, 就感到房间里面暗, 所以, 为了防止这种现象的人工照明是必需的”。

下面的 (b) 项比这个必要条件感觉更为强烈。

(b) 防止剪影现象 在一般情况下, 房间里的人可以面对各个方向, 所以也会经常出现面对窗子坐的情况。这时, 这个人正面的窗子就成为房间里其它人物和家具、杂物等的背景。当看这些对象时, 因为正对这些对象的视线附近存在着亮背景, 所以眼睛适应亮度变高, 就会看到对象的剪影, 随着就会感到房间发暗。这种现象称为“剪影现象”。这种现象比 (a) 的亮度平衡问题发生更为强烈。为什么呢? 因为在亮度平衡时, 亮的窗和近窗处和房间深处都是指稍许离开了一些的地方, 虽然, 这些被相互对比, 但是, 在剪影现象中, 由于在对象的背后有直接的亮背景, 所以, 室内阴暗的程度感觉远为强烈。

因而, 如果防止整个房间里的剪影现象能实行的话, 设计亮度的平衡也就能得到了解决。作为必须防止剪影现象的对象, 最重要的是人脸。其原因是:

(i) 人的脸是重要的视觉工作对象。详情在 10-1-3 (2) 中论述。

(ii) 当室内的人面对窗子时, 假定对方脸的位置大致是在背景窗的中央时, 那就最容易形成剪影。如图 8-23、图 8-24 所示。

如果, 由房间深处的人来看, 因为仍然以窗为背景, 所以同样会成为剪影。

图 8-24 所示是某房间的剖面图。在房间里的人在面对面地交谈。涂黑的表示为剪影一侧的人物。



图8-23 以窗为背景下的人脸



图8-24 正在房间里交谈的人 (房间的剖面图)

此外，如图 8-24 所示，不仅靠近窗子的人脸会成剪影，在房间比较深处的人脸也同样形成剪影。

为了防止人脸的剪影现象，在脸上必须给予充分的照度。必要的脸部照度与背景亮度之比在表 8-9 列出，表中的 I~III 类是根据下面资料得来的。

表8-9 防止剪影现象必需的脸部照度

等 级	$R = \frac{\text{脸部照度 (lx)}}{\text{背景亮度 (cd/m}^2)}$
I. 看不到剪影的下限	0.07
II. 能看到眼睛鼻子的下限	0.15
III. 稍好	0.30

类别 I：根据 Bodmann^[31] 的实验：“对于亮背景，为了在其前侧的对象不成剪影，观察对象的亮度必须是背景亮度的 0.7% 以上（观察者的满足率为 99%）。如以人脸的反射率为 0.3 换算成照度，则（脸部照度）/（背景亮度）为 0.071lx/(cd/m²)。

类别 II、III^[32]：从松田、田渊的实验^[32]导出。

(3)改善立体感^[33] 在侧面采光的房间里，靠近窗子的地方照到的天然光特别多。在房间里的人与窗子平行地坐着时，如图 8-25 所示，靠窗子一侧的脸部亮，另一侧产生阴影，显得暗。如果只用天然光照明或人工照明的量不够时，这种明暗情况形成强烈的感觉，是不能令人满意的。虽然关于室内各种立体物都有理想的立体感，但是对特别重要的立体物，特别在立体感差的场所，即把改善近窗处人的脸部的立体感作为设计目标。

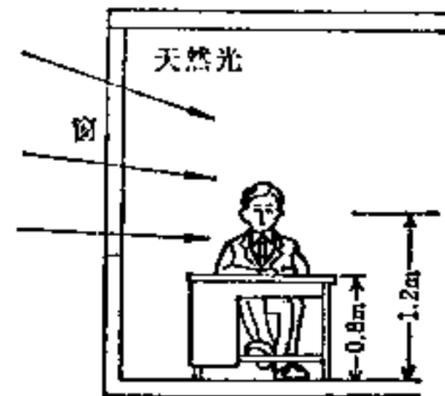


图8-25 在近窗处交谈的人脸

为了使人的脸部不产生极度的明暗差别，必须使从窗来的天然光和从相反方向照到人脸的光达到平衡，即如果把对应于人脸从左右来的光，面向窗子的垂直面照度和面向里面的垂直面照度之比称为 r ，则我们希望 r 值为表 8-10 所规定的数值。这个值是参考了 Moon 和 Spencer^[34] 的立体感比 (Modeling Ratio) 制定的。

表8-10 立体感的垂直面照度比

等 级	垂直照度比 r
I 非常强烈	10
II 满意的	2~6

8-4-5 采光设计用的天空亮度

以窗的亮度作为昼间人工照明设计的依据，利于眺望的窗，例如高层建筑的窗大部分外景是天空，所以采用天空亮度。可是如果在窗子外面有高大建筑物等场合，则应采用建筑物墙面的亮度，或根据实测求得的数据来计算。

此外，照度平衡型昼间人工照明和亮度平衡型昼间人工照明，对天空亮度的必要条件稍

有不同。

(1)照度平衡型昼间人工照明 如果天空亮度高,房间里可得到充分的天然光,当然要把部分人工照明关掉或减光,所以,就需要知道天空亮度“至少为多少”?或“有多少时间比率能得到某值以上”?

(2)亮度平衡型昼间人工照明 与上面(1)的场合完全相反,因为“天空亮度越高,感到室内越暗,所以,必须要有多的人工照明”,因而,必须知道天空亮度“最大能达到多少”?或“至少约有多少时间比率超过某个值”?

(3)天空亮度的超过率 只要知道上述(1)或(2)中的情况的一种,并找出天空亮度超过某值 L 的时间比即可。这也称天空亮度的“超过率”。所谓超过率,意味着在天空亮度超过某值 L 的总时间与既定时间内的比率:

$$\text{天空亮度的超过率}(L) = \frac{\text{在既定时间内超过 } L \text{ 的总时间}}{\text{既定的时间}}$$

式中,取一般工作时间9~17时作为既定时间,天空亮度的超过率曲线见图8-26^[35],对应于各种超过率的天天空亮度见表8-11^[36]所示。

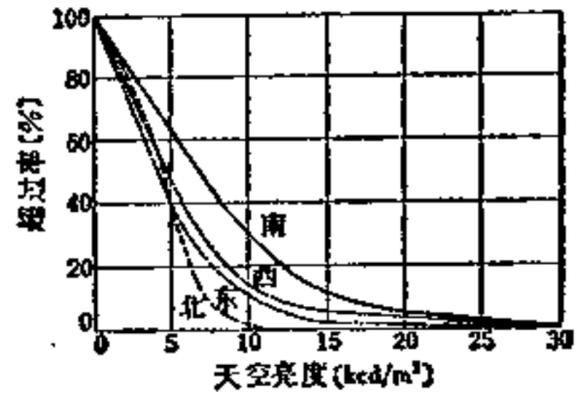


图8-26 天空亮度的超过率

此外,对于在既定时间里,太阳大于某个高度角的时刻,天空亮度和天空照度的资料被归纳在同样的报告里^[37~39]。

表8-11 对应于各种超过率的天天空亮度 (kcd/m²)

超过率 (%)	北	东 北	东	东 南	南	西 南	西	西 北
1	9.8	12.0	18.0	22.0	26.0	25.8	25.5	12.5
10	7.4	8.8	10.2	13.0	15.8	13.6	11.3	9.4
25	6.0	6.9	6.5	8.9	10.9	9.1	7.3	6.7
50	4.4	4.3	4.2	5.7	7.2	5.9	4.6	4.5

8-5 窗

8-5-1 采光窗和法令

窗可以定义为“在屋面及墙壁上开设的洞”。尽管在日本建筑中,从古以来也有此定义那样的窗子,但是,日本式的遮蔽风雨的板窗、外廊木窗、纸糊的拉门等与其说是窗,倒不如称其为柱间的开口部为好。在建筑基准法中把这些总称为“窗及其它开口部”(以下简称为窗)。

窗的第一功能是采光,但是,除此之外,还有很多的功能力,如通风、换气、瞭望、开放感、取得外界的情况等重要功能。相对这些说起来是消极功能的,还有隔热、防风雨、防虫隔声等能力,而且也不容轻视。

在建筑基准法及其实施令中,关于采光有详细的规定(表8-12)。如按此表,就可以确定住宅、学校、医院及其它特定房间的采光窗应大于某个尺寸。可是这个规定不适用于居室以

表8-12

关于采光的法令

法第28条 1. 条例规定, 住宅、学校、医院、诊疗所、集体宿舍、简易旅店及其它与此类似的建筑的房间, 设置采光窗及其它开口部分, 在法令所规定的房间中, 采光有效面积相对于房间的地板面积必须在条例规定的比例以上。住宅为1/7以上, 其它建筑物在1/5~1/10之间。但是设置在地下室或地下构筑物内的房间以及其它类似的房间, 或者是工作时需要调节温湿度的工作间及其它不得停止工作的房间, 不受本条限制。

2. 房间里设置通风窗及其它开口部相对于房间的地板面积的有效通风面积, 必须在1/20以上。但是, 条例规定, 根据技术标准设置有通风设备的场所, 不受本条的限制。

3. 在另一张表(略)列举的供特殊建筑物用的居室或厨房、浴室及其它房间等, 在房间里装有炊事用的小炉子及其它用火设备或器具的(除条例规定的外), 条例规定, 根据技术标准, 必须装置通风设备。

4. 中间用可以随时开启的隔扇、拉门作为隔墙的二个房间, 按一个房间看待, 前三项规定同样适用这种场合。

令第19条 1. 按法第28条第1项规定, 条例规定的建筑物举例如下:

一、儿童福利设施、接生站、残废人救援设施(残废用具制作设施、盲文图书馆及盲文出版设施除外)、保护设施(医疗保护设施除外)、妇女保护设施、精神薄弱者救援设施、老人福利设施、交费的养老院或妇幼保健设施(以下称为“儿童福利设施等”)。

二、街道办事处

2. 在法第28条第1项中所规定的学校等房间的窗及其它开口部, 采光有效面积与房间的地板面积的比例, 必须分别大于下表列举的数值:

房 间 的 种 类	比 例
(1) 幼儿园、小学、中学或高等学校的教室	1/5
(2) 托儿所的托儿室	
(3) 医院或诊所的病房	1/7
(4) 集体宿舍的寝室或简易旅店的客房	
(5) 供儿童福利设施等(托儿所除外)用的主要房间	
(6) 学校、医院、诊疗所、集体宿舍、简易旅店或儿童福利设施等的(1)到(5)中列举的房间以外的房间。	1/10
(7) 街道办事处房间	

令第20条 1. 法第28条第1项所规定的房间里的窗及其它开口部(在以下这一条中简称为开口部)。采光有效面积可按下面各号第1项中关于开口部分的规定进行计算。

一、在相对相邻地界线或同一建筑用地内的其它建筑或该建筑的其它部分的开口部的部分, 从开口部以上的建筑物的各部分(在从开口部以上垂直面上有凹进或凸出部分时, 应包括这个部分。在有半透明雨搭及其它妨碍采光的内雨搭时, 规定应将其除去), 到此部分相对的毗邻地界线或同一建筑用地内的其它建筑或该建筑的其它部分对置部位的水平距离, 除以从这部分到开口部的垂直距离的比例, 应大于下表列举的数值。

	地 区 或 区 域	比 例
(1)	第1种居住专用地区、第2种居住专用地区或居住地区	4/10
(2)	准工业区、工业区或工业专用区	2.5/10
(3)	邻近商业区、商业区或没有指定用途的地区	2/10

二、在上表(2)或(3)中的地区或区域中, 当开口部面对相邻地界线或同一建筑用地内其它建筑或该建筑其它部分时, 同号规定的水平距离在5米以上。

三、面对道路(在城市规划区域内、法第42条(略)中规定的道路)公园、广场、河流及其它类似的空地或水面。

2. 天窗采光的有效面积当作法第28条第1项所规定的面积的3倍来应用。

3. 在开口部外侧有宽90厘米以上的外廊(不遮雨的檐廊除外)及其它类似的场合, 其采光有效面积当作第28条第1项所规定的面积的7/10应用。

外的房间和不包括在此表中的建筑物的窗。

8-5-2 采光方式的分类

采光方式一般可按窗的位置和垂直窗还是水平窗的不同进行分类。

(1) 侧窗采光 从墙面的普通垂直窗采光的称为侧窗采光。

在侧窗采光中，仅从一面墙来的采光称为单侧采光。通常在单侧采光中，房间深处的照度不足，从而形成照度分布不均匀，射向房间深处的主光线角度低等问题。但是，采用单侧采光在建筑设计上不是没有道理的，上面提到的问题通过与人工照明配合使用，可以容易地得到弥补。

从二个相对墙上的侧窗采光称为双侧采光。虽然双侧采光对采光量有利，然而双侧采光的主光线有二个，存在着分成二个阴影的难题。但是，与此点相同的二面采光，而从二面夹角的相邻墙上的侧窗采光方法，问题也就少一些。

同样的侧窗，处于高位置上的称高侧窗。这种采光称为高侧窗采光。虽然高侧窗能有效地给房间深处提供光，但是，除了顶棚高的高大建筑外，是难以得到的。

(2) 天窗采光 在屋面上的水平或接近水平的窗称天窗。这种采光称为天窗采光。天窗采光可以解决单侧采光时，房间深处的低照度、照度分布不均匀、房间深处主光线方向的低角度等问题。可是，天窗平面设计较难，结构、施工特别是防雨处理困难。

天窗中，在有顶棚的房间里，天窗下部使用扩散材料，从下面向上观看时，看起来好像光的井，所以称它为光井〔图8-27(a)〕。

实际上，高侧窗采光，由于顶棚表面上带格片等材料，从房间里看，正好像看到天窗一样，所以称其为假天窗〔图8-27(b)〕。

(3) 顶侧窗采光 由屋面上垂直的或接近垂直窗采光的称为顶侧窗采光。顶侧窗和天窗不同之处就在于窗是垂直的或是水平的差别。

顶侧窗采光中图8-27(c)形式的窗称为气楼采光。

在大面积工厂中，经常采用的顶侧窗采光有二种，它们是锯齿形天窗采光〔图8-27(d)〕和矩型天窗（或纵向天窗屋面）采光〔图8-27(e)〕。

一般地说，侧窗在通风换气、视觉效果等方面的功能优越，而侧窗中的高侧窗和天窗、顶侧窗在这些功能方面不如侧窗。

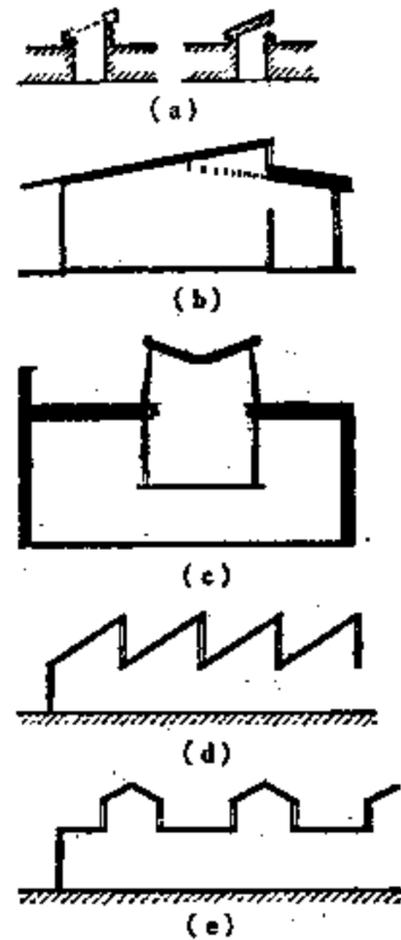


图8-27 各种采光方式

参 考 文 献

(1) 東京天文台編：理科年表，丸善（1977）	the spectral distribution of simulated solar radiation for testing purposes" (1972)
(2) M. P. Thekaekara: "Extraterrestrial solar spectrum, 3000-6000 Å at 1-Å intervals", Appl. Optics, 13-3 (1974) 518	(4) Nagata T.: "Luminance distribution on clear skies, part 1", 日本建築学会論文報告集 No. 185 (1971) 65
(3) CIE: Publication CIE No. 20, "Recommendations for the integrated irradiance and	(5) CIE: Publication CIE No. 22, "Standardiza-

- tion of luminance distribution on clear skies" (1973)
- (6) J. Krochmann, M. Seidl: "Quantitative data on daylight for illuminating engineering", *Light. Res. Tech.*, 6-3 (1964) 165
- (7) Nagata T.: "Luminance distribution on clear skies, part 2", 日本建築学会論文報告集 No.186 (1971) 41
- (8) 永田忠彦: 晴天空輝度分布と晴天空による野外水平面照度, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭49) 115
- (9) CIE: Proc. 13th Session CIE, Vol. 2 part 3-2 (1955)
- (10) 小木曾定彰: いわゆる "日中" もしくは "照明学的昼間" の査定, 照学誌, 31 (昭22) 20
- (11) 小木曾定彰: 野外照度の計画基準について, 照学誌, 37-10 (昭28) 342
- (12) 日本建築学会: 採光設計, 彰国社 (昭38) 12
- (13) 同上 13
- (14) 同上 15
- (15) The IES Code for interior lighting, IES, London, (1973) 45
- (16) 文献 (1) 24
- (17) 松浦邦男: 建築照明, 共立出版 (昭46) 151
- (18) R. G. Hopkinson et al.: Daylighting, Heinemann (1966) 313
- (19) Hopkinson, R. G. and Longmore, J.: The permanent supplementary artificial lighting of interiors, *Trans Illum. Engng. Soc.*, 24 (1959) 121
- (20) Hopkinson, R. G. et al.: Integrated daylight and artificial lighting in interiors, *Proc. CIE*, 12 (1963) 63.
- (21) IES Technical Report No. 4: Lighting during daylight hours, IES, London (1962)
- (22) IES Technical Report No. 4, Second ed., Daytime lighting in buildings, IES, London, (1972) 12
- (23) PSALI 設計技術研究委員会: 昼間の合理的照明設計, 新しい PSALI, 照明教室 36, 照明学会・照明普及会 (昭49)
- (24) 田淵義彦: 省エネルギー時代の昼間人工照明, 昭和49年電気関係学会関西支部連大, S7-4
- (25) 田淵・東方: 昼間人工照明の効果的な制御方式, 電気と工事, (昭51, 8) 49
- (26) 松下電工: 照明設計資料, 照C-19 (昭51) 30
- (27) 松浦邦男: 側窓採光室の省エネルギー照明設計, 建築学会近畿支部 (昭52) 45
- (28) 伊藤克三ほか: 昼光利用照明の設計方法, 昭52年照明学会全国大会 44
- (29) CIE Publication No.16, "International recommendations for the calculation of natural daylight", CIE, Paris (1970)
- (30) 建築学会: 建築設計資料集成 No.2 改訂版, 未刊
- (31) Bodmann, H.W. et al.: Versuche zur Beschreibung der Hellempfindung, *Lichttechnik*, 14 (1962) 394
- (32) 松田・田淵: 明るい窓を背景にした顔の見え方の実験, 昭和43年照明学会全国大会
- (33) 田淵・松田: 側窓採光における鉛直面照度とその問題点, 昭和43年電気四学会連大
- (34) Moon, P. and Spencer, D. E.: Modeling with light, *Jour. of Franklin Institute*, 251 (1951) 453
- (35) 田淵義彦: 天空輝度の連続測定記録, 照学誌, 66 (昭46) 35
- (36) Tabuchi et al.: Cumulative Occurrence Rate of Sky Luminance at Low Altitude (10°) in Osaka, Japan; 17th CIE Session, Short Paper (1971)
- (37) 伊藤克三ほか: 天空輝度の設計用標準値に関する研究, 日本建築学会論文報告集 No. 215号 (昭49, 1) 51
- (38) 伊藤克三ほか: 天空輝度の地域別設計標準値に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No. 229号 (昭50, 3) 85
- (39) 伊藤克三ほか: 作業時間帯における全天空照度の年間出現頻度, 昭和52年照明学会連合大会 3
- (40) 大宮海 (1935) による
- (41) 採光窓の規定は建築基準法 28条, 同施行令 19条, 20条にある

第 9 章

照 明 计 算

9-1 配光和光通计算

9-1-1 配光的表示方法

(1) 与配光有关的术语 (图9-1)

配光 光源在空间各个方向上的光强分布称为配光。

配光曲线 表示配光的分布状态的曲线称为配光曲线。

光中心 把某个有一定尺寸的光源当作点光源时, 代表其位置的点称为光中心。多数情况下, 光中心为几何重心。

灯轴 通过光中心的垂直线。

垂直角 (θ) 所考察的方向和灯轴的向下方向所形成的角。

水平角 (φ) 所考察的方向所包含的垂直面和基准垂直面所形成的角。

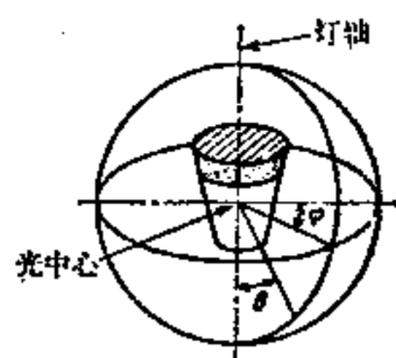


图9-1 与配光有关的术语

(2) 对称配光

(a) 垂直配光曲线 (图9-2) 用极坐标表示垂直配光曲线, 不很对称情况下采用平均垂直配光曲线。

(b) 直角坐标 在横轴上取垂直角, 纵轴上取光强 $I(\theta)$, 表示像投光灯那样光强变化大的灯具, 纵轴用对数分格 (图9-3)。

(c) 卢梭图 用 $1 - \cos \theta$ 来标度纵轴, 在横轴上则取光强 $I(\theta)$, 纵轴和曲线所包围的面积为 $\int I(\theta) \sin \theta d\theta$, 表示光通。图9-4 给出图9-2的平均配光。

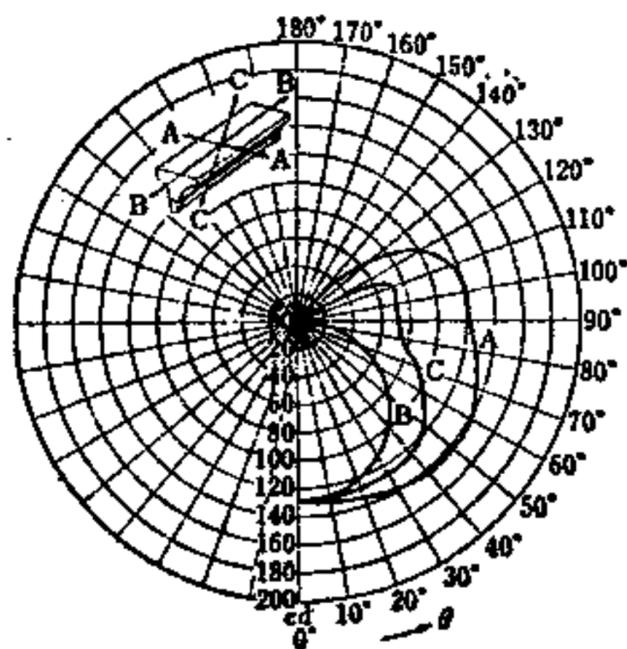


图9-2 垂直配光曲线

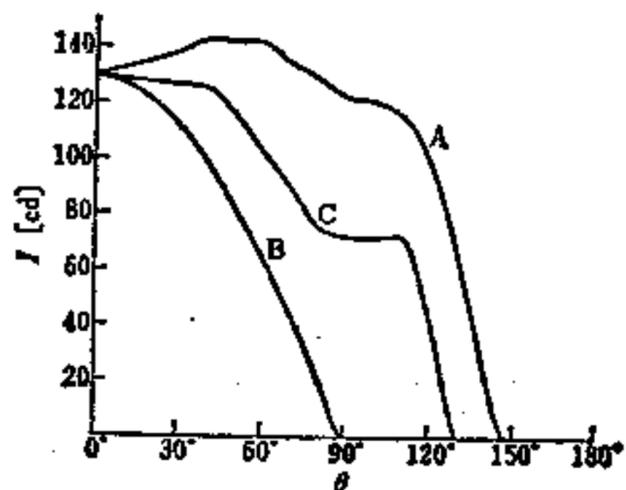


图9-3 用直角坐标表示的垂直配光曲线

(3) 非对称配光

(a) 垂直配光曲线 用前面提到的垂直配光曲线表示每个不同的垂直面的配光。

(b) 圆等光强图 将球面上垂直角为 θ 、水平角为 φ 的点变换成

$$\left. \begin{aligned} \text{矢径 } R &= K \cdot \sin(\theta/2) \\ \text{径角 } \phi &= \varphi \\ K: &\text{任意常数} \end{aligned} \right\} \quad (9-1)$$

的极坐标, 把整个球面投影在圆上。通常上下半球使用各自的圆等光强图。图 9-5 为图 9-2 的下半球部分的圆等光强图, 左侧和右侧对称。

(c) 正弦等光强图 将垂直角为 θ 、水平角为 φ 的球面上的点变换成

$$\left. \begin{aligned} \text{横轴 } x &= K \cdot \varphi \cdot \sin \theta \\ \text{纵轴 } y &= K \cdot (\theta - \pi/2) \\ K: &\text{任意常数} \end{aligned} \right\} \quad (9-2)$$

的正交坐标, 把整个球面投影在纵轴上的二个正弦弧之间。图 9-6 为从 B 方向看到的图 9-2 的配光的纵剖面半球部分的正弦等光强图。

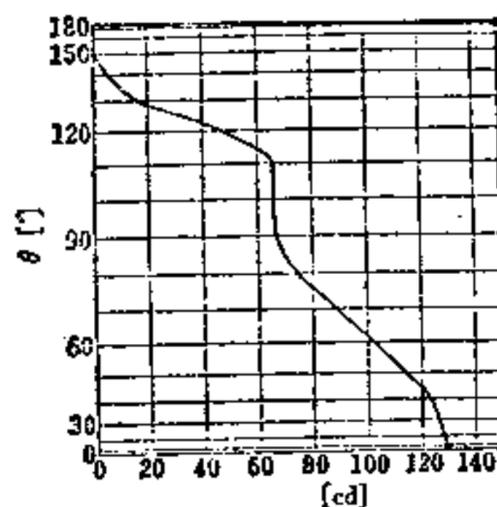


图9-4 卢梭图

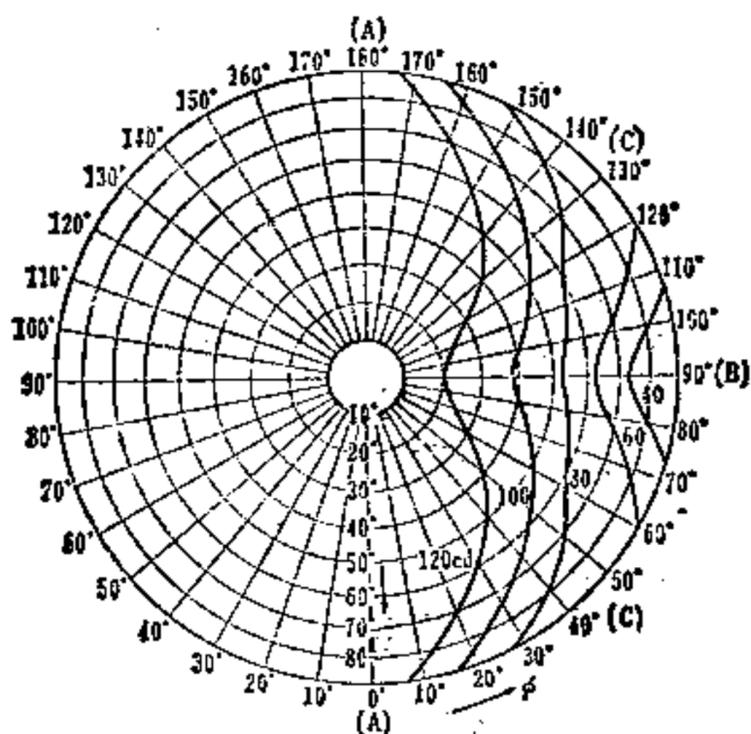


图9-5 圆等光强图

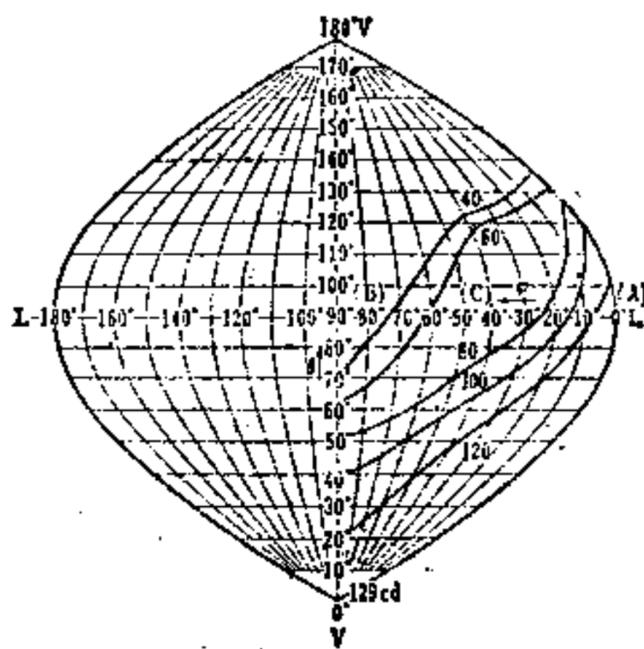


图9-6 正弦等光强图

表9-1

配光的BZ分类

配光分类	配光表达式	配光分类	配光表达式
BZ1	$I \propto \cos^4 \theta$	BZ6	$I \propto (1 + 2 \cos \theta)$
BZ2	$I \propto \cos^3 \theta$	BZ7	$I \propto (2 + \cos \theta)$
BZ3	$I \propto \cos^2 \theta$	BZ8	$I = \text{一定}$
BZ4	$I \propto \cos^{1.5} \theta$	BZ9	$I \propto (1 + \sin \theta)$
BZ5	$I \propto \cos \theta$	BZ10	$I \propto \sin \theta$

9-1-2 光通的计算 (图9-7)

垂直角 (θ_1, θ_2) , 水平角 (φ_1, φ_2) 之间斜线部分的光通, 视为配光 $I(\theta, \varphi)$ 乘上斜线部分的立体角的积分, 可通过下式进行计算:

$$\Phi \left(\begin{matrix} \theta_2, \varphi_2 \\ \theta_1, \varphi_1 \end{matrix} \right) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (9-3)$$

(1) 卢梭图 若设卢梭图之纵轴 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的长度为 $K(m)$, 每 1cd 光强的横轴长度为 $a(m)$, 纵轴和曲线所包围的那部分面积为 $S(m^2)$, 则总光通可根据公式

$$\Phi = \frac{2\pi S}{a \cdot K} (lm) \quad (9-4)$$

求出。

(2) 球带系数法 在以光中心为球心的假想球的垂直角 $\theta - \alpha$ 和 $\theta + \alpha$ 之间的球带中, 若其间的光强一定, 则所考察的这一球带内的光通为:

$$\Phi \left(\begin{matrix} \theta + \alpha \\ \theta - \alpha \end{matrix} \right) = 2\pi \cdot I(\theta) \int_{\theta - \alpha}^{\theta + \alpha} \sin\theta d\theta = 4\pi \cdot I(\theta) \sin\alpha \sin\theta \quad (9-5)$$

若设 θ 方向的球带系数为 $z(\theta) = 4\pi \sin\alpha \sin\theta$, 则得: $\Phi \left(\begin{matrix} \theta + \alpha \\ \theta - \alpha \end{matrix} \right) = z(\theta) \cdot I(\theta)$, 总光通可用公式

$$\Phi = \sum_{\theta} z(\theta) \cdot I(\theta) \quad (9-6)$$

进行计算。 $2\alpha = 10^\circ$ 的球带系数示于表9-2〔1〕。

表9-2 球带系数表 (10°间隔)

θ	0° 180°	10° 170°	20° 160°	30° 150°	40° 140°	50° 130°	60° 120°	70° 110°	80° 100°	90° 90°
$z(\theta)$	0.02390	0.19018	0.37459	0.54762	0.70400	0.83900	0.94850	1.02918	1.07859	1.09523
θ	5° 175°	15° 165°	25° 155°	35° 145°	45° 135°	55° 125°	65° 115°	75° 105°	85° 95°	
$z(\theta)$	0.09546	0.28347	0.46286	0.62820	0.77445	0.89716	0.99262	1.05791	1.09106	

(3) 平均法〔2〕 通过对适当方向上的光强相加平均得到平均球面光强的方法, 主要有拉瑟法和山内法〔3〕。总光通为

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= 4\pi \Sigma I(\theta) / n \\ \theta &: \text{拉瑟角, 山内角} \\ n &: \text{取 } \theta \text{ 的数目} \end{aligned} \right\} \quad (9-7)$$

$n = 20$ 的拉瑟角和山内角示于表9-3。

拉瑟法以保持球带面积相等的方式来等分卢梭图的纵轴, 而山内法则用切比雪夫的平均法分割卢梭图的纵轴, 因此山内法的精度高。

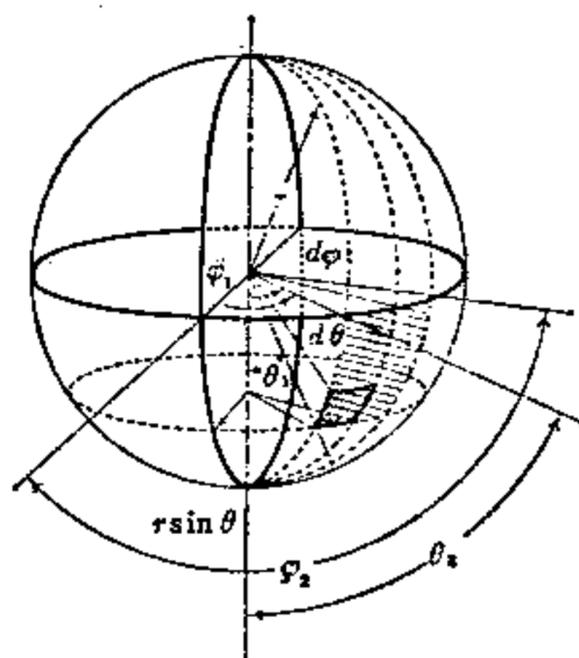


图9-7 球带的设置

表9-3 拉瑟角和山内角 (20个角)

拉瑟角		山内角		拉瑟角		山内角	
18.2°	161.8°	16.6°	163.4°	63.3	116.7	62.7	117.3
31.8	148.2	32.5	147.5	69.5	110.5	69.9	110.1
41.4	138.6	41.3	138.7	75.5	104.5	75.5	104.5
49.5	130.5	49.0	131.0	81.4	98.6	81.0	99.0
56.6	123.4	57.2	122.8	87.1	92.9	87.4	92.6

(4) 等光强图法 光源配光为非对称时多采用此法。在等光强图上:

(a) 各网眼所包围的面积 将网眼的立体角乘上其平均光强再相加。

(b) 各等光强曲线所包围的面积 在直角坐标横轴上取光强, 在纵轴上则取各等光强曲线所包围的面积所对应的值, 然后画出一条光滑曲线, 再求这条曲线所包围的面积。

(5) 简易计算法

(a) 山内公式〔4〕 求出平均球面光强 \bar{I} , 然后乘上球带系数。

$$\bar{I} = \frac{1}{6} \{ I(30^\circ) + I(60^\circ) + I(80^\circ) + I(100^\circ) + I(120^\circ) + I(150^\circ) \} \quad (9-8)$$

总光通 $\Phi = 4\pi\bar{I}$

(b) 荧光灯的三照度法〔5〕

$$\text{总光通 } \Phi = 3.60 \{ I(45^\circ) + I(135^\circ) \} + 4.78 \times I(90^\circ) \quad (9-9)$$

(c) 荧光灯的一照度法〔6〕

$$\text{总光通 } \Phi = 9.3 \times I(90^\circ) \quad (9-10)$$

9-1-3 几何形状简单的光源

几何形状简单的光源的配光、光通等示于表9-4〔7〕。

表9-4 几何形状简单的光源的配光、光通

光源性质	直线	圆环	平板	圆柱	球	半球
光源轴的取向						
垂直配光取线						
$I(\theta)$	$I(\pi/2)\sin\theta$	$I(\pi/2)E(K)^{1/2}$	$I(0)\cos\theta$	$I(\pi/2)\sin\theta$	$I(\pi/2) = I(0)$	$I(\pi/2)(1+\cos\theta)$
$I(\pi/2)$	hL^2	$4RL$	0	$2rhl$	πR^2L	$\pi R^2L/2$
$I(0)$	0	$2\pi RL$	SL	0	πR^2L	πR^2L
平均球面光强 \bar{I}	$\pi I(\pi/2)/4$	$\pi I(0)/4$	$I(0)/4$	$\pi I(\pi/2)/4$	$I(\pi/2) = I(0)$	$I(\pi/2)$
下半球面光强	$\pi I(\pi/2)/2$	I	$I(0)/2$	I	I	$3I(0)/4$
上半球面光强	$\pi I(\pi/2)/2$	I	0	I	I	$I(0)/4$
全光通 Φ_s	$\pi^2 I(\pi/2)$	$\pi^2 I(0)$	$\pi I(0)$	$\pi^2 I(\pi/2)$	$4\pi I_0$	$2\pi I(0)$
下半球光通	$\Phi_s/2$	$\Phi_s/2$	Φ_s	$\Phi_s/2$	$\Phi_s/2$	$3\Phi_s/4$
上半球光通	$\Phi_s/2$	$\Phi_s/2$	0	$\Phi_s/2$	$\Phi_s/2$	$\Phi_s/4$

(1) $K = \sin\theta$, $E(K)$ 为总体参数 K 的第二种完全椭圆积分
 (2) L : 每单位长或每单位面积的光度

9-2 直射照度的计算

9-2-1 点光源

和光源到被照点的距离相比,光源的尺寸很小者称为点光源。

(1) 点光源产生的照度(图9-8) 欲求某一点的照度 E , 假若光源指向该点的光强为 I , 从光源到该点的距离为 l , 则

$$E = I \cdot \cos \theta / l^2 \quad (9-11)$$

把入射角为 0° 的方向面上的照度叫做法线照度 E_n , 水平面上的照度叫水平面照度 E_h , 垂直面上的照度叫垂直面照度 E_v 。在垂直面照度中, 自光源 L 作一垂线, 用 E_{v0} 表示到垂足 O 的方向的照度, 而用 $E_{v\varphi}$ 表示与该方向构成 φ 角方向的照度(表 9-5)。

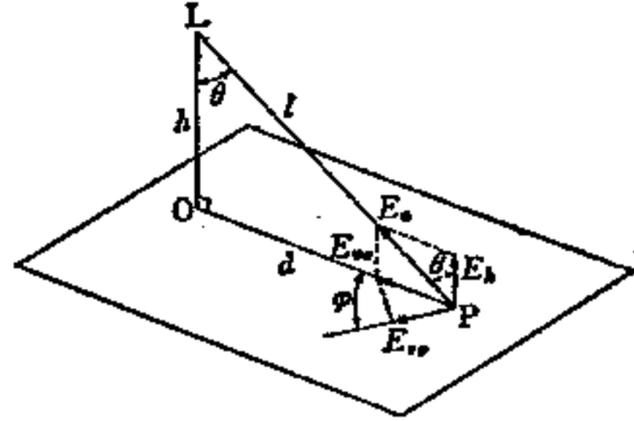


图9-8 点光源所产生的直射照度

表9-5 点光源所产生的直射照度

	l	h	d	$E_n \times$
E_n	$\frac{I}{l^2}$	$\frac{I}{h^2} \cos^2 \theta$	$\frac{I}{d^2} \sin^2 \theta$	1
E_h	$\frac{I}{l^2} \cos \theta$	$\frac{I}{h^2} \cos^3 \theta$	$\frac{I}{d^2} \sin \theta \cos \theta$	$\cos \theta$
E_{v0}	$\frac{I}{l^2} \sin \theta$	$\frac{I}{h^2} \sin \theta \cos^2 \theta$	$\frac{I}{d^2} \sin^3 \theta$	$\sin \theta$
$E_{v\varphi}$	$\frac{I}{l^2} \sin \theta \cos \varphi$	$\frac{I}{h^2} \sin \theta \cos^3 \theta \cos \varphi$	$\frac{I}{d^2} \sin^3 \theta \cos \varphi$	$\sin \theta \cos \varphi$

(2) 当作点光源的界限 点光源 A 和圆盘光源 B (直径 $d = 2r$) 在灯轴下方距离为 h 处的点的法线照度 E_n 和 E_h , 若光强 I 相同, 则

$$E_n = I/h^2 \quad E_h = I/(r^2 + h^2)$$

其差的比率为 $(E_n - E_h)/E_n = (r^2/h^2) = (d/2h)^2$

为了使误差在 1% 以下, 即 $(d/2h)^2 \leq 0.01$, 故设 $h \geq 5d$ 就是必要的了。此外, 周边发光的圆环或圆带光源, 因照度差的比率分别为 1.5 倍和 2 倍, 所以必须设 $h \geq 10d$ 。

9-2-2 立体角

(1) 微小面的立体角 空间中某个微小面 dS , 入射角为 φ , 对距离为 r 的光中心 L 所张的微小立体角 $d\omega$ 为

$$d\omega = dS \cdot \cos \varphi / r^2 \quad (9-12)$$

(2) 经纬线所围成的球带的立体角 垂直角 θ_1 、 θ_2 和水平角 φ_1 、 φ_2 所围成的球带部分, 对中心所张的立体角 ω 为

$$\omega = (\varphi_2 - \varphi_1) (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (9-13)$$

此外, 若 $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 2\pi$, 则垂直角 θ_1 和 θ_2 所围成的球带立体角为

$$\omega = 2\pi (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (9-14)$$

(3) 长方形的立体角 (图9-9) 长方形 abcd 对 L 点所张的立体角为 ω , 由长方形 Ox_1ay_1 、 Ox_2by_2 、 Ox_1cy_1 、 Ox_2dy_2 对 L 点所张的立体角 ω_a 、 ω_b 、 ω_c 、 ω_d , 通过公式

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_a + \omega_c - \omega_b - \omega_d \\ &= \tan^{-1} \frac{x_1 y_1}{z \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{x_2 y_2}{z \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z^2}} \\ &\quad - \tan^{-1} \frac{x_2 y_1}{z \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z^2}} - \tan^{-1} \frac{x_1 y_2}{z \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z^2}} \end{aligned} \quad (9-15)$$

图9-9 长方形的立体角

图9-10 微小长方形的立体角

此外, 长方形 abcd, 相对于 x 、 y 、 z 来说为很小时, 由图 9-10 得

$$d\omega \cong \frac{(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1)(\tan\beta_2 - \tan\beta_1)}{(1 + \tan^2\alpha + \tan^2\beta)^{3/2}} \quad (9-16)$$

(4) 扇形的立体角^[8](图9-11)

由 $\alpha = \tan^{-1}(l/a)$, $\sin \alpha = l/\sqrt{a^2+l^2}$, $\cos \alpha = a/\sqrt{a^2+l^2}$
 得
$$E_n = \frac{I}{2a} \left(\tan^{-1} \frac{l}{a} + \frac{al}{a^2+l^2} \right) = \frac{I}{a} \left\{ \frac{1}{2} \left(\tan^{-1} \frac{l}{a} + \frac{1+l^2/a^2}{l/a} \right) \right\} = K \cdot \frac{I}{a}$$

其中
$$K = \left\{ \tan^{-1}(l/a) + (l/a)/(1+l^2/a^2) \right\} / 2 \tag{9-20}$$

$$E_z = E_n \cdot \cos \theta = K \cdot \frac{hI}{a^2} \tag{9-21}$$

$$E_x = E_n \cdot \sin \theta = K \cdot \frac{dI}{a^2} \tag{9-22}$$

$$E_y = \frac{I}{2a} \cdot \sin^2 \alpha = \frac{I}{a} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{l^2/a^2}{1+l^2/a^2} \right) \right\} = K' \cdot \frac{I}{a}$$

其中
$$K' = \left\{ (l^2/a^2)/(1+l^2/a^2) \right\} / 2 \tag{9-23}$$

图9-14用曲线表示 l/a 与 K 、 K' 值的对应关系, 这些值很容易从式 (9-20) 和式 (9-23) 进行计算。

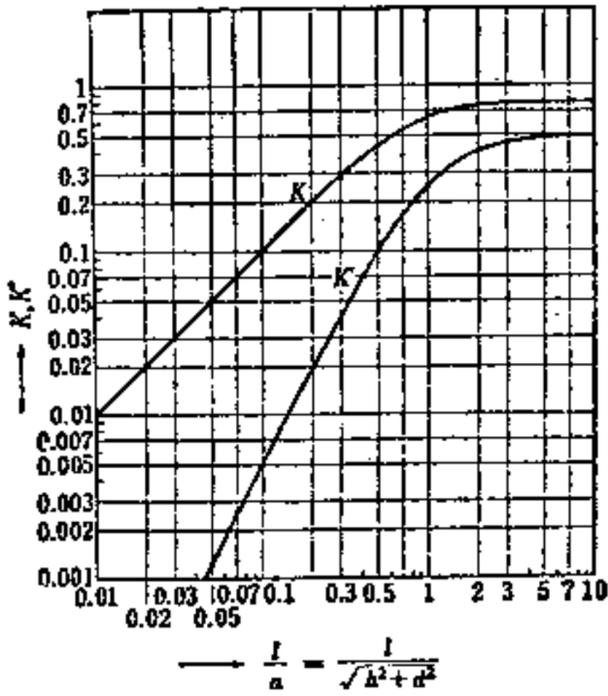


图9-14 计算直线光源的照度用图

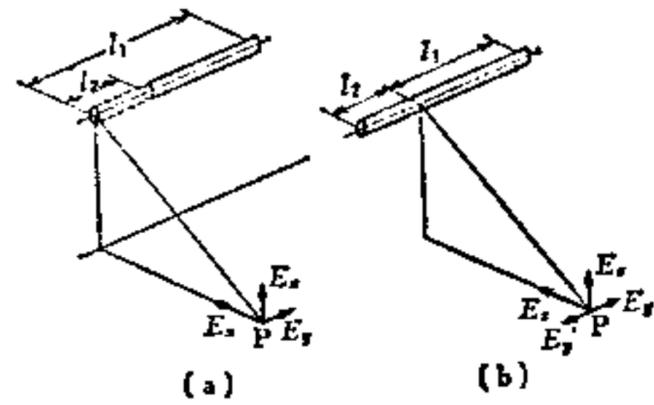


图9-15 被照点不在包含光源端的平面上的情况

如图9-15所示, P点不在包含光源端的平面上的情况下, 由 l_1 部分和 l_2 部分所产生的照度, 可得:

图9-15 (a)

$$\left. \begin{aligned} E_z &= E_{z1} - E_{z2} \\ E_x &= E_{x1} - E_{x2} \\ E_y &= E_{y1} - E_{y2} \end{aligned} \right\} \tag{9-24}$$

图9-15 (b)

$$\left. \begin{aligned} E_z &= E_{z1} + E_{z2} \\ E_x &= E_{x1} + E_{x2} \\ E_y &= E_{y1}, E'_y = E_{y2} \end{aligned} \right\} \tag{9-25}$$

【例题】 根据图9-16, 求40W荧光灯在P点产生的照度。设垂直于灯管的方向的光强为360cd。

单位长光强 $I = 360/1.2 = 300 \text{ (cd/m)}$

$$E = \int_{S_s} \frac{L \cdot dS_s \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2} \tag{9-28}$$

而且, 假如以P点为顶点, 以光源 S_s 为底的锥体, 从以点P为中心、1为半径的球切

$$a = \sqrt{2^2 + 2^2} = 2.83$$

$$l_1/a = 2.2/2.83 = 0.78$$

根据图 9-14 的曲线

$$K_1 = 0.57, K'_1 = 0.19$$

$$E_{n1} = 0.57 \times 300/2.83 = 60.4(\text{lx})$$

$$E_{z1} = 0.57 \times 2 \times 300/2.83^2 = 42.7(\text{lx})$$

$$E_{x1} = 0.57 \times 2 \times 300/2.83^2 = 42.7(\text{lx})$$

$$E_{y1} = 0.19 \times 300/2.83 = 20.1(\text{lx})$$

$$l/a = 1/2.83 = 0.35, K_2 = 0.32, K'_2 = 0.053$$

$$E_{n2} = 0.35 \times 300/2.83 = 37.1(\text{lx})$$

$$E_{z2} = 0.35 \times 2 \times 300/2.83^2 = 26.2(\text{lx})$$

$$E_{x2} = 0.35 \times 2 \times 300/2.83^2 = 26.2(\text{lx})$$

$$E_{y2} = 0.053 \times 300/2.83 = 5.6(\text{lx})$$

$$E_x = E_{z1} - E_{z2} = 42.7 - 26.2 = 16.5(\text{lx})$$

$$E_y = E_{y1} - E_{y2} = 20.1 - 5.6 = 14.5(\text{lx})$$

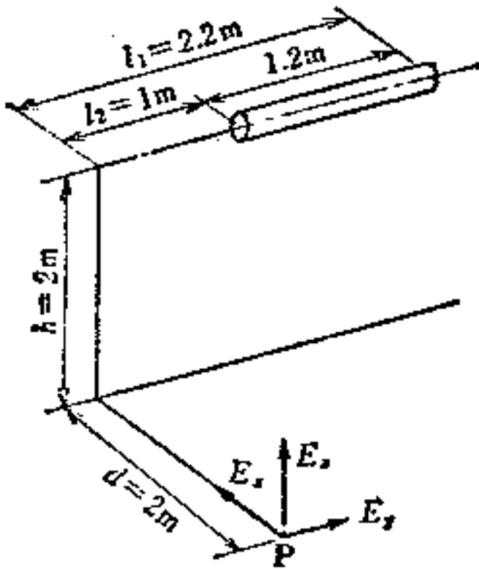


图9-16 荧光灯的照度计算

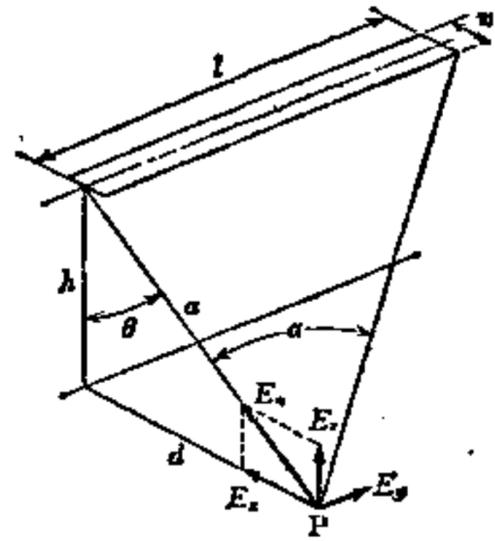


图9-17 平带状光源所产生的直射照度

9-2-4 平带状光源 (图9-17)

如果光源的宽度 w 和高度相比很小, 光源面法线方向每单位长度的光强为 I , 则 E_n 和 E_s 为:

$$E_n = \frac{hI}{2a^2} (\alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha) = \frac{hI}{a^2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\tan^{-1} \frac{l}{a} + \frac{l/a}{1 + l^2/a^2} \right) \right\} \quad (9-26)$$

$$E_s = \frac{hI}{2a^2} \cdot \sin^2 \alpha = \frac{hI}{a^2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{l^2/a^2}{1 + l^2/a^2} \right) \right\} \quad (9-27)$$

因大括号内相当于前项 K 、 K' , 故可用图 9-14 进行计算。水平面和垂直面照度可用公式 $E_x = E_n \cdot \cos \theta$, $E_z = E_n \cdot \sin \theta$ 进行计算。

9-2-5 面光源产生的直射照度〔9〕

(1) 立体角投影法 (图9-18) 面 S_s 为完全扩散面光源, 假定其微小部分 dS_s 的亮度为 L , 面 dS_s 的法线和连接被照点 P 与面 dS_s 之间的直线构成 α 角, 上述直线和在点 P 的法线构成 β 角, P 和 dS_s 间的距离为 r , 则由 S_s 产生的 P 点的照度为

$$E = \int_{S_s} \frac{L \cdot dS_s \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2} \quad (9-28)$$

而且，假如以P点为顶点，以光源 S_s 为底的锥体，从以点P为中心、1为半径的球切下面积 S_s ，它在包含P点的被照面上的正投影面积为 S ，光源的亮度 L 均匀的情况下，点P的照度为

$$E = L \cdot S \quad (9-29)$$

这就称为立体角的投影法。

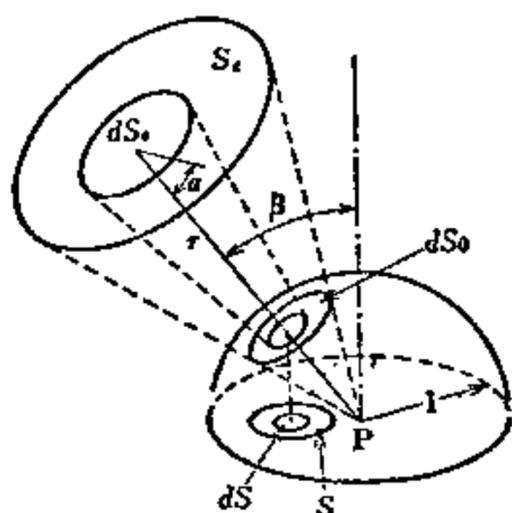


图9-18 立体角投影法则

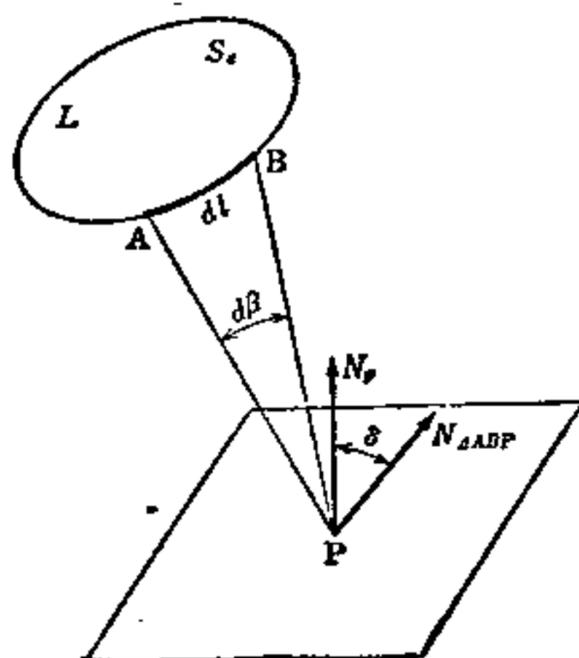


图9-19 边界积分法

$N_{p\tau}$ 被照面的法线 $N_{\Delta ABP}$ ΔABP 面的法线

(2) 边界积分法 (图9-19) 假定亮度 L 均匀的完全扩散的面光源 S_s 的边界线的微小部分 $AB = dl$ 在点P所张的立体角为 $d\beta$ ，面 APB 与被照面形成的角度为 δ 。和图9-18一样，面 S_s 从以P点为中心、1为半径的单位球面上切下一部分面积 S_s 时，与 S_s 面的微小部分 $AB (= dl)$ 相对应的单位球面长度为 $d\beta$ 。并且，点P和单位球面上的长度 $d\beta$ 可以组成三角形，其面积为 $\frac{1}{2}d\beta$ ，此三角形在被照面上的正投影的面积 $dS = \frac{1}{2}d\beta \cdot \cos \delta$ 。因此，面

S_s 从单位球面切下的 S_s 部分在被照面上的正投影之面积 $S = \int_{S_s} dS = \frac{1}{2} \int_{S_s} d\beta \cos \delta$ ，由式

(9-29)，P点的照度可用下式表示：

$$E = LS = \frac{L}{2} \int_{S_s} d\beta \cdot \cos \delta \quad (9-30)$$

9-2-6 直角三角形光源

(1) 光源和被照面平行的情况 (图9-20)

$$E = \frac{L}{2} \cdot \gamma \cdot \cos \delta = \frac{L}{2} \cdot \frac{a}{\sqrt{x^2 + a^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{x^2 + a^2}} \quad (9-31)$$

(2) 光源面倾斜的情况^[10] (图9-21)

$$E = \frac{L}{2} \frac{\sqrt{x^2 \cot^2 \theta - a^2}}{\sqrt{x^2 + a^2}} \cdot \sin \theta \times \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{x^2 + a^2}} \quad (9-32)$$

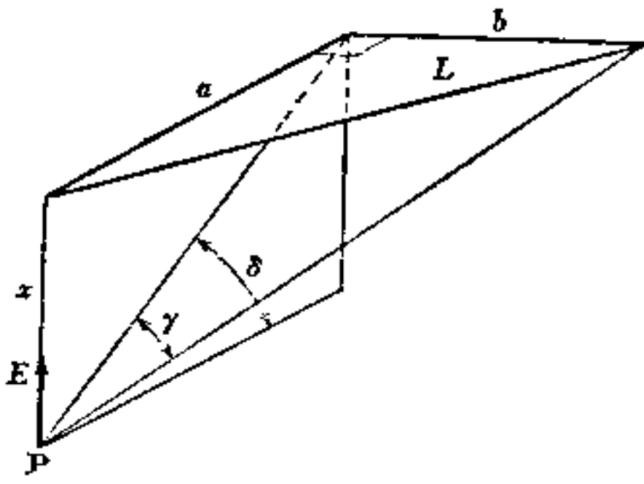


图9-20 水平直角三角形光源

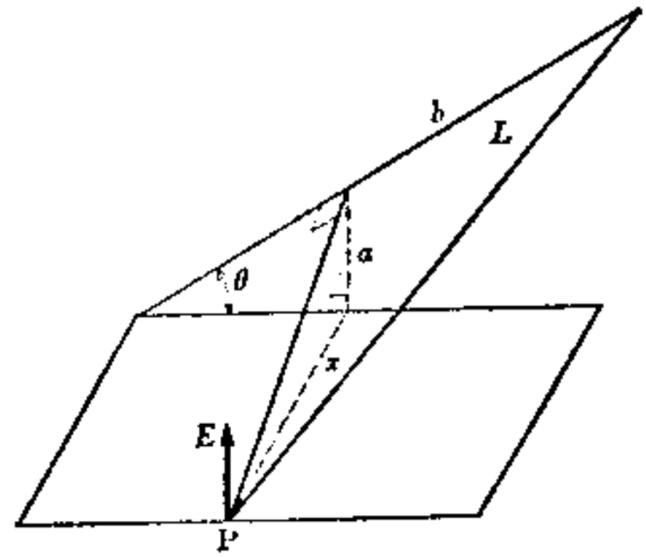


图9-21 倾斜直角三角形光源

9-2-7 等照度球 (图9-22)

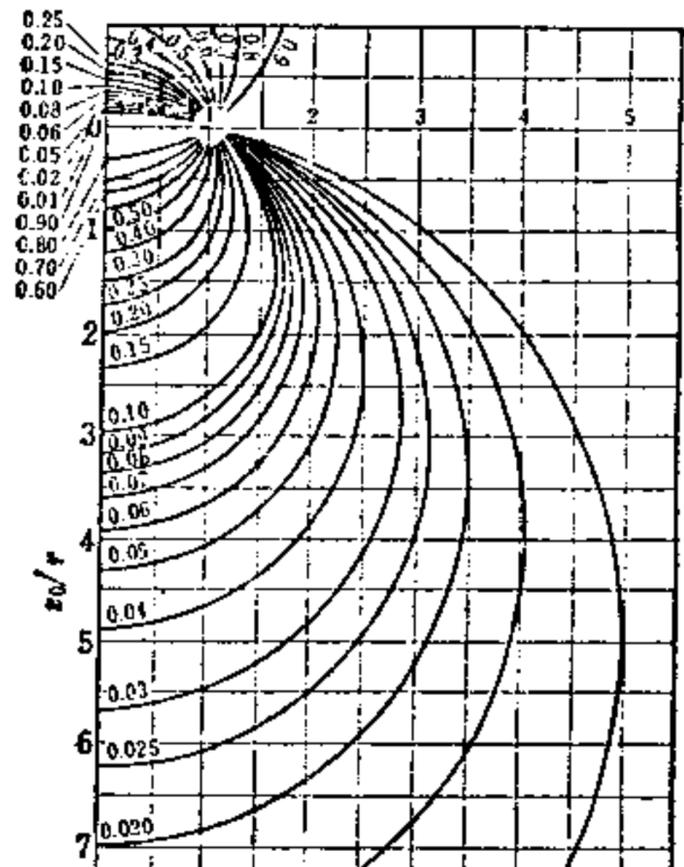
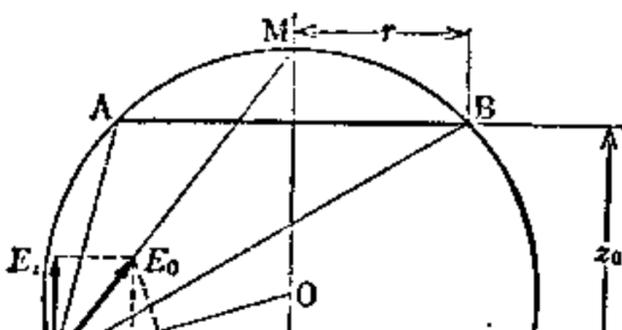
假如M点为球的天顶, P点的照度矢量 E_0 朝 PM 方向

$$E_0 = \frac{\pi L (1 - \cos \alpha)}{2 \cos \theta} \quad (9-33)$$

$\alpha : \angle APB, \theta : \angle PMO$

$$E_x = E_z = E_0 \cdot \cos \theta = \frac{\pi L}{2} (1 - \cos \theta) = \pi L \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (9-34)$$

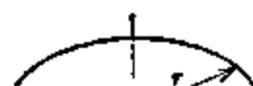
在图 9-23 里^[11], 在两轴上标出表示圆盘和被照点的相对位置的变量 $z_0/r, x_0/r$, 给出以 $E_x/\pi L$ 为变量的一组等照度球。



(2) 至光源中心下垂线的距离为x的Q点

$$E_z = \frac{\pi L}{2} \left\{ 1 - \frac{z^2 + x^2 - r^2}{\sqrt{(z^2 + x^2 + r^2)^2 - 4(xr)^2}} \right\} = \pi L \cdot \frac{4r^2 - (l_1 - l_2)^2}{4l_1 l_2} \quad (9-36)$$

$$\pi L \cdot z \left\{ \frac{z^2 + x^2 + r^2}{\sqrt{(z^2 + x^2 + r^2)^2 - 4(xr)^2}} - 1 \right\}$$



情况下, 考虑P点的照度。

$$\pi L = E \cdot \rho = 1500 \times 0.8 = 1200 \text{ lx}$$

$$z/r = 3/2 = 1.5, \quad x/r = 4/2 = 2$$

由表 9-6, $E_z/\pi L = 0.065879$

$$E_z = 1200 \times 0.065879 = 79.1 \text{ lx}$$

$$E_x/\pi L = 0.074625$$

$$E_x = 1200 \times 0.074625 = 89.6 \text{ lx}$$

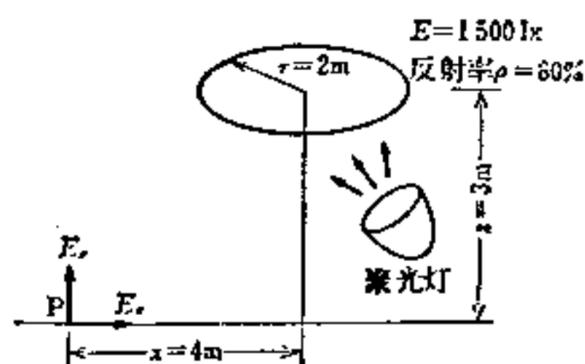


图9-25 圆盘光源的照度计算

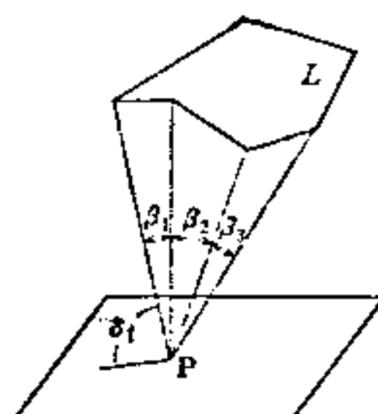


图9-26 多角形光源

9-2-9 多角形光源

图 9-26 的多角形光源有均匀亮度 L 时, 若 P 点的照度适用边界积分法, 则

$$E = \frac{L}{2} \sum_{i=1}^n \beta_x \cdot \cos \delta_x \quad (9-39)$$

式中 n —— 多角形的边数;

β_x —— 第 K 条边在 P 点所张的角;

δ_x —— 第 K 条边和 P 点组成的三角形与被照面所形成的角。

9-2-10 长方形光源

(1) 被照点在光源面占向下作的垂线上时

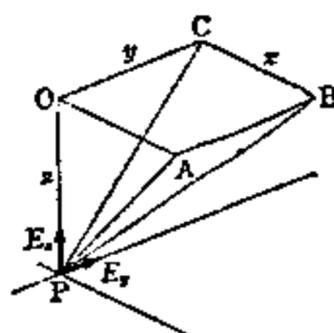


图9-27 长方形光源

$$\beta_1 = \tan^{-1}(x/z), \delta_1 = \pi/2$$

$$\therefore \cos \delta_1 = 0$$

对 AB 边

$$\beta_2 = \tan^{-1}(y/\sqrt{x^2+z^2}), \delta_2 = \tan^{-1}(z/x)$$

$$\therefore \cos \delta_2 = x/\sqrt{x^2+z^2}$$

对 BC 边

$$\beta_3 = \tan^{-1}(x/\sqrt{y^2+z^2}), \delta_3 = \tan^{-1}(z/y)$$

$$\therefore \cos \delta_3 = y/\sqrt{y^2+z^2}$$

对 CO 边

$$\beta_4 = \tan^{-1}(y/z), \delta_4 = \pi/2 \quad \therefore \cos \delta_4 = 0$$

因而得

$$E_z = \frac{I_s}{2} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2+z^2}} \tan^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2+z^2}} + \frac{y}{\sqrt{y^2+z^2}} \tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{y^2+z^2}} \right) \quad (9-40)$$

此外, 面 POA 的垂直面照度 E_y 也同样为

$$E_y = \frac{L}{2} \left(\tan^{-1} \frac{x}{z} - \frac{z}{\sqrt{y^2+z^2}} \tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{y^2+z^2}} \right) \quad (9-41)$$

表9-7^[13]为式(9-40)、式(9-41)的一部分, 通过 x 或 y 把 x, y, z 各边基准化成 h, b , 再用 h, b 的各种数值预先进行计算所得的结果。

(2) 被照点在光源顶点向下作的垂线以外的情况 (图9-28)

E_z 和 E_y 分别根据下式进行计算

$$E = E(\text{OFAG}) + E(\text{OECH}) - E(\text{OEDG}) - E(\text{OFBH}) \quad (9-42)$$

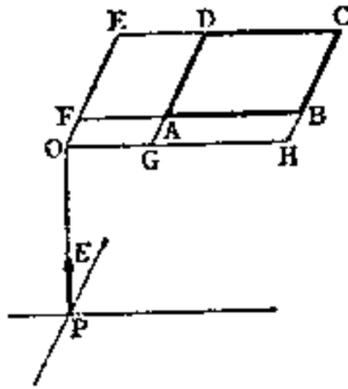


图9-28 长方形光源(P点不在光源
顶点向下作的垂线上)

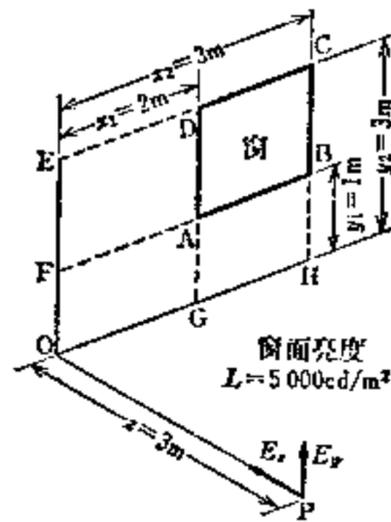


图9-29 垂直窗所产生的照度

【例题】 试考虑图9-29中阳光射进室内时P点的照度(表9-8)。

$$E_z = E_A + E_C - E_D - E_B = 279.5 \text{ lx}$$

$$E_y = 155 \text{ lx}$$

9-2-11 图表计算法

(1) 水平三角形光源 在式(9-31)中, 以 z 替换 x, y 替换 a, x 替换 b , 计算和 x/z 及 y/z 相对应的 E/L , 结果示于图9-30(a)。同图(b)的直角三角形光源 OAB 在 P 点所产生的照度, 假如像在同图(c)中示出 x/z 和 y/z 那样理解 $\overline{A'B'}$, $\overline{OB'}$ 的话, 那

表9-7(a) 长方形光源所产生的照度 $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+h^2}} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{1+h^2}}$ 的值

A	b = 0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.0	0.0498	0.0987	0.146	0.190	0.232	0.270	0.305	0.337	0.366
0.1	0.0493	0.0977	0.144	0.128	0.230	0.268	0.303	0.334	0.363
0.2	479	950	140	183	224	261	295	326	355
0.3	457	967	134	175	214	250	283	313	341
0.4	430	852	126	165	202	236	268	300	323
0.5	399	791	117	154	188	221	250	278	303
0.6	367	728	108	142	174	204	232	258	282
0.7	335	665	0.0987	130	159	187	213	238	260
0.8	304	605	898	118	145	171	195	218	239
0.9	276	548	815	107	132	156	178	199	219
1.0	250	497	739	0.0987	120	142	163	181	200
1.1	226	450	670	884	109	130	148	166	183
1.2	205	406	607	802	0.0992	117	135	151	167
1.3	186	370	551	729	902	107	122	138	153
1.4	169	336	502	664	822	0.0975	112	126	140
1.5	154	306	457	606	750	881	103	116	128
1.6	140	280	418	554	686	816	0.0941	106	118
1.7	128	256	383	507	629	749	864	0.0977	109
1.8	118	235	351	466	578	688	796	900	100
1.9	108	216	323	429	533	634	734	840	0.0924
2.0	0.00999	199	298	396	492	586	678	768	856
2.2	856	171	255	339	422	504	583	661	738
2.4	739	148	221	294	365	436	506	574	641
2.6	644	129	193	256	319	381	441	502	561
2.8	565	113	169	225	280	335	389	442	494
3.0	500	0.00997	150	199	248	296	344	392	438
3.2	445	889	133	177	221	264	307	349	391
3.4	398	795	119	159	198	237	275	313	351
3.6	358	716	107	143	178	213	248	282	316
3.8	324	647	0.00970	129	161	192	224	256	287
4.0	294	590	880	117	146	175	204	232	261
4.2	268	536	803	107	134	160	186	212	238
4.4	246	491	736	0.00980	123	146	171	194	218
4.6	226	451	676	899	112	132	157	179	201
4.8	208	416	623	830	104	124	145	165	185
5.0	192	384	576	768	0.00958	115	134	152	171
5.5	160	320	480	643	798	0.00956	111	127	143
6.0	135	270	405	540	675	808	0.00942	107	121
6.5	116	231	346	462	577	692	806	0.00920	103
7.0	100	200	300	400	500	599	698	797	0.00896
7.5	0.000873	175	262	349	436	524	610	696	782
8.0	769	154	231	307	384	461	537	613	689
8.5	678	136	205	273	341	409	476	544	612
9.0	610	122	183	243	305	365	426	487	547
9.5	548	110	164	219	274	328	383	437	492
10.0	495	0.000990	148	198	247	297	345	396	444

表9-7(b)

长方形光源所产生的照度 $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+h^2}} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{1+h^2}}$ 的值

a	b = 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.0	0.393	0.554	0.625	0.663	0.687	0.703	0.714	0.723	0.730	—
0.1	0.390	0.550	0.621	0.659	0.683	0.699	0.711	0.719	0.726	0.732
0.2	380	539	609	648	671	688	699	708	715	720
0.3	366	522	592	630	654	670	681	690	697	702
0.4	347	500	569	607	631	647	658	667	674	679
0.5	326	474	543	581	604	620	632	640	647	653
0.6	304	447	515	552	575	591	603	611	618	624
0.7	281	420	485	522	545	561	573	581	588	594
0.8	259	391	456	492	515	531	543	551	558	563
0.9	238	364	427	463	486	502	513	521	529	534
1.0	218	338	400	435	458	474	485	493	500	506
1.1	199	313	374	409	431	447	458	467	473	479
1.2	182	291	349	384	406	421	433	441	447	453
1.3	167	270	326	360	382	398	409	417	424	429
1.4	153	250	305	338	360	375	386	395	401	407
1.5	140	232	286	318	340	355	366	374	381	386
1.6	129	216	267	299	321	336	346	355	362	367
1.7	119	201	251	282	303	318	329	337	344	349
1.8	110	187	235	266	287	301	312	320	327	332
1.9	101	175	221	251	271	286	296	305	311	317
2.0	0.0940	163	208	237	257	271	282	290	297	302
2.2	811	143	184	213	232	246	256	264	271	276
2.4	706	126	165	192	210	224	234	241	248	253
2.6	619	112	148	173	191	204	214	222	228	233
2.8	546	0.0996	133	157	174	187	197	204	211	216
3.0	484	891	120	143	159	172	181	189	195	200
3.2	432	802	109	130	146	158	168	175	181	186
3.4	387	724	0.0991	119	135	146	156	163	168	174
3.6	349	658	905	110	124	136	145	152	158	162
3.8	317	599	830	101	115	126	135	143	147	152
4.0	289	547	763	0.0934	107	117	126	133	138	143
4.2	264	502	704	865	0.0994	110	118	124	130	135
4.4	242	463	650	804	927	103	111	117	123	127
4.6	222	427	603	748	866	0.0962	104	110	116	120
4.8	205	395	560	698	811	903	0.0979	104	109	114
5.0	190	367	521	652	760	850	923	0.0984	103	108
5.5	158	307	441	555	654	734	802	859	0.0908	0.0949
6.0	134	261	377	478	566	639	703	757	803	842
6.5	115	224	325	415	494	562	621	671	714	752
7.0	0.00993	195	284	364	435	493	552	599	640	676
7.5	868	171	249	321	386	443	493	537	576	610
8.0	765	151	221	286	344	397	443	485	521	553
8.5	679	134	197	255	309	357	401	439	474	504
9.0	607	120	176	230	279	323	363	400	432	461
9.5	546	108	159	208	253	294	331	365	395	423
10.0	493	0.00984	144	188	230	268	303	334	363	390

表9-8

垂直窗所产生的照度

面	x	y	z	$h = \frac{z}{x}$	$b = \frac{y}{x}$	K_1	$h = \frac{z}{y}$	$b = \frac{x}{y}$	K_2	$E_z = L \times (K_1 + K_2)$	$h = \frac{y}{z}$	$b = \frac{x}{z}$	$K_3 = \frac{1}{2}(\tan^{-1} b)$	K_4	$E_y = L \times (K_3 - K_4)$
面OFAG	2	1	3	1.5	0.5	0.075	3	2	0.0891	$E_A = 820.5$	0.333	0.667	0.294	*0.267	$E_A = 135$
OECH	3	3	3	1	1	0.218	1	1	0.218	$E_C = 2180$	1	1	0.393	0.218	$E_C = 875$
OEDG	2	3	3	1.5	1.5	*0.186	1	0.667	*0.156	$E_D = 1710$	1	0.667	0.294	*0.156	$E_D = 690$
OFBH	3	1	3	1	0.333	*0.0822	3	3	0.120	$E_B = 1011$	0.333	1	0.393	*0.360	$E_B = 165$

* 根据表9-6插值而求出。

么在同图 (a) 中, 从通过顶点 A' 的曲线的读数 K, 可用公式

$$E = K \cdot L \quad (9-43)$$

计算出照度 E。

此外三角形 OAC 所产生的照度, 由调换 x 和 y, 即在 x/z 轴上取 y/z, y/z 轴上取 x/z, 可同样进行计算。

(2) 长方形光源 图9-31(a)(b)[14] 为式 (9-40)、式 (9-41) 中与 x/z 和 y/z 相对应的 E/L 的计算结果[(a) 图示出 $K_x = E_x/L$, (b) 图示出 $K_y = E_y/L$]。但图 (a) (b) 里, 因为是通过光出射度求解 E, 所以用亮度 L 进行计算时, 由图求出的系数 K_x 、 K_y 乘以 π 是必要的。

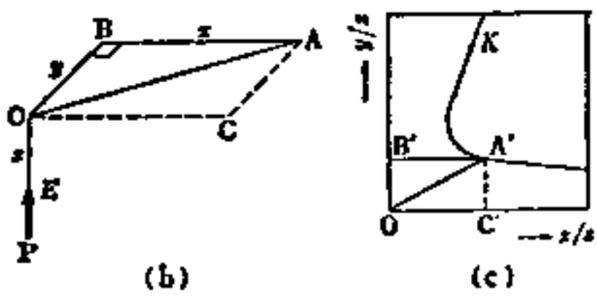
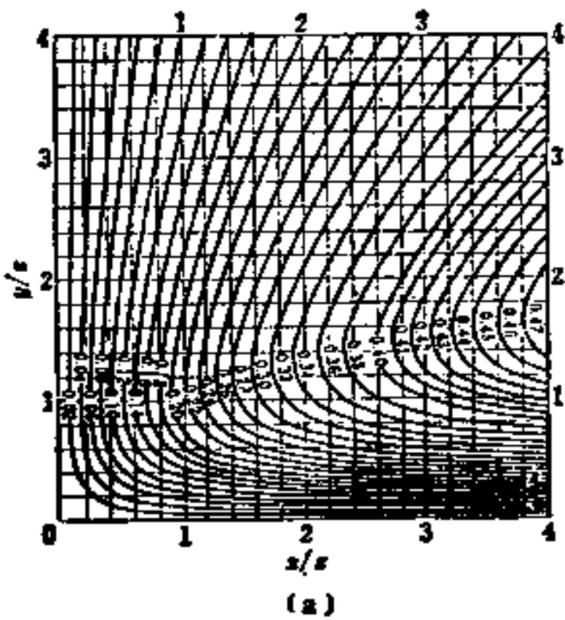


图9-30 水平三角形光源产生的照度计算图

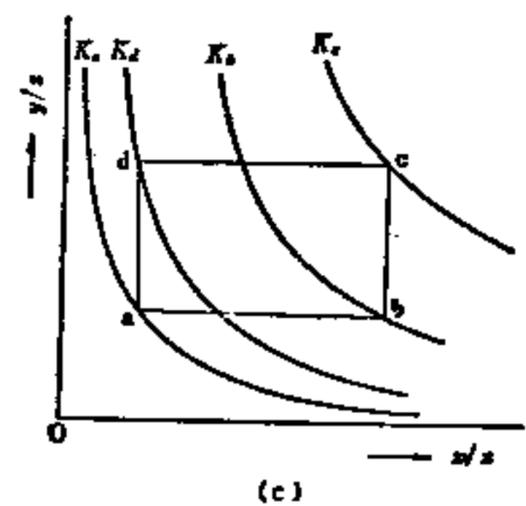
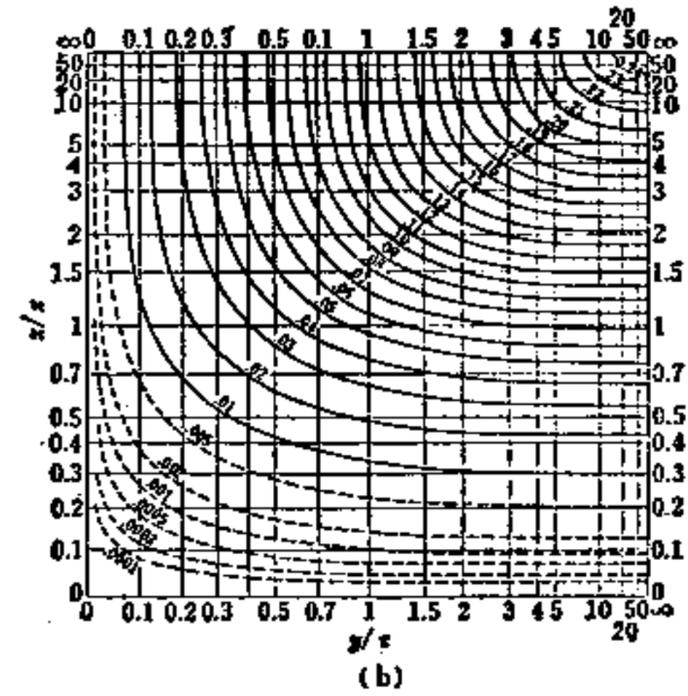
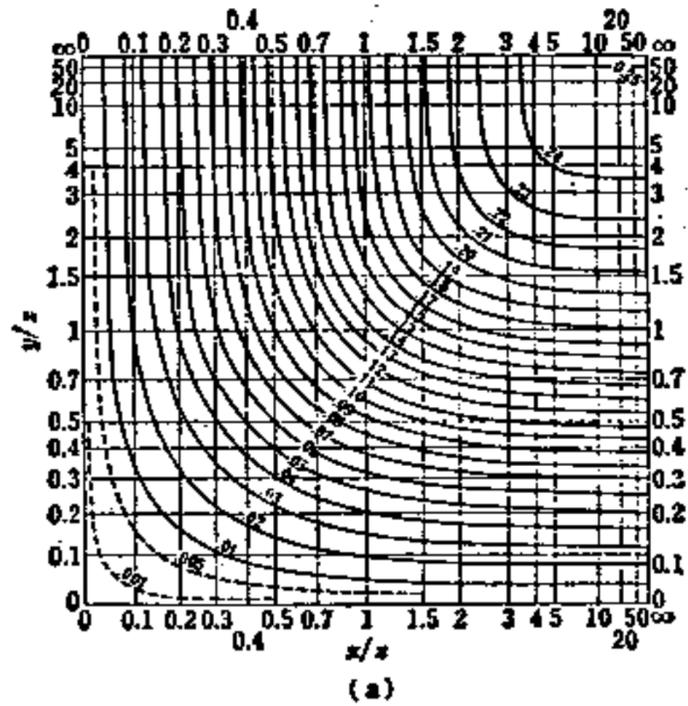


图9-31 长方形光源所产生的照度计算图

若求长方形光源顶点下垂线上的照度,先决定 x/z 和 y/z ,由图 9-31(a)(b) 读出 K_x 、 K_y ,通过公式

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \pi L \cdot K_x \\ E_y &= \pi L \cdot K_y \end{aligned} \right\} \quad (9-44)$$

进行计算。

被照点在光源顶点下垂线以外时,在图(c)上像所示出的那样标出与 x/z 、 y/z 相应的各顶点,由图(a)、(b)读出 K_a 、 K_b 、 K_c 和 K_d ,可根据下式

$$E = \pi L (K_a + K_c - K_b - K_d) \quad (9-45)$$

计算出照度。

【例题】 求出图 9-29 中垂直窗所产生的照度。

A 点

$$\begin{aligned} x/z &= 2/3 = 0.667 & y/z &= 1/3 = 0.333 \\ K_{ax} &= 0.051 & K_{ay} &= 0.008 \end{aligned}$$

B 点

$$\begin{aligned} x/z &= 3/3 = 1 & y/z &= 1/3 = 0.333 \\ K_{bx} &= 0.063 & K_{by} &= 0.01 \end{aligned}$$

C 点

$$\begin{aligned} x/z &= 3/3 = 1 & y/z &= 3/3 = 1 \\ K_{cx} &= 0.135 & K_{cy} &= 0.054 \end{aligned}$$

D 点

$$\begin{aligned} x/z &= 2/3 = 0.667 & y/z &= 3/3 = 1 \\ K_{dx} &= 0.107 & K_{dy} &= 0.042 \end{aligned}$$

$$E_x = \pi \times 5000 \times (0.051 + 0.135 - 0.063 - 0.107) = 251 \text{ lx}$$

$$E_y = \pi \times 5000 \times (0.008 + 0.054 - 0.01 - 0.042) = 157 \text{ lx}$$

再者,用式(9-40)、式(9-41)计算得到的值为

$$E_x = 246.7 \text{ lx}$$

$$E_y = 153.5 \text{ lx}$$

9-3 照度分布和平均照度

9-3-1 照度分布

在光源和空间构成的照明场所,设计工作就是要根据照明的目的,确定被照面,尽可能提高它上面的照度和均匀度。即被照面上的照度分布是照明设计的一个目标,因而也就成为良好照明的一项评价基准。

作为被照面,平面最为普通,形状多为长方形或圆盘形。有时也考察球面上法线照度的分布。

考察长方形或圆盘形上的照度分布时,假如标出空间某些点的法线上的照度值,有可能使空间的照度分布曲面形象些,模仿地形图上的等高线,用等照度曲线表示,照度分布的情况也就明了了。

此外，为了从数值上掌握照度分布，必须拥有照度分布的许多数据群，并作统计处理，因以平均值和误差为标准，故平常根据平均照度和均匀度来考察照度分布。

设平均照度为 E_0 ，欲考察照度分布的区域为 D ，其面积为 A ，微小面积为 dA ，各点的照度为 $E(x, y)$ 或 E_{xy} ，入射到此区域上的光通为 Φ ，入射到微小面积上的光通为 $d\Phi$ ，则

$$\Phi = \iint_D d\Phi = \iint_D E_{xy} dA \tag{9-46}$$

$$E_0 = \Phi/A = \iint_D E_{xy} dA / \iint_D dA \tag{9-47}$$

也就是说，为了比较同一场所的各种照度分布，平均照度和光通同义，平均值比积分值看得更清楚，而且照度比光通有视觉直观的好处。

若照度分布区域的最大照度为 E_m ，最小照度为 E_0 ，则均匀度可用 E_0/E_m 、 E_0/E_m 、 $(E_m - E_0)/E_0$ 、 $(E_0 - E_m)/E_m$ 、 $(E_m - E_0)/E_0$ 等比例式表示。而且，取均匀度的倒数 E_m/E_0 表示也是很多的。一般 3:1 或 2:1 左右为容许限度。为了得到好的均匀度，可采取选择有适当配光特性的光源或是把多光源分散安装的办法。在投光灯方面，可采用把几台配光特性不同的光源组合成倾斜系统等办法，此外，若不计算均匀度，也可以按 $E_0(E_m, E_0)$ 的形式把最大照度、最小照度一起记录下来。

9-3-2 轴对称光源所产生的平均照度

配光特性为 $I(\theta)$ 那样的点光源称之为轴（旋转）对称光源。由于实用上许多光源可近似看作是轴对称的，所以预先算出轴对称光源的照度分布或平均照度在实用上是很方便的。

一般来说，与配光特性 $I(\theta, \varphi)$ 对应的照度分布，根据逐点法逐点算出照度，由这样算出的许多照度值，用内插法（一次内插或二次内插）求出所指定的等照度点，用线条把这些点连接起来，得到用图表示的等照度曲线。为了计算出平均照度，必须采用数值积分法或蒙特卡罗法。这样一来计算工作量很大，采用大型电子计算机就是很有必要的了。

要表示配光特性 $I(\theta, \varphi)$ ，有长方形等光强图（沃尔多拉姆方案），正弦等光强图（本弗奥多方案）和圆等光强图（山内方案）等。因微小立体角 $d\omega$ 都和微小网孔面积成一定比例，且可以得到反映，因此可以用作平均照度的计算，但计算量并没有减少。使用圆等光强图的久野图表解法，光源倾斜情况下的浜二图表解法^[18]等虽有预测的手段，但计算量反而增加。图表解法随着电子计算机的发展普及，能成为直观的东西。

与此相反，与轴对称配光特性 $I(\theta)$ 的轴垂直的平面上的照度分布却很简便（图9-32）。取光源垂直下方的一点作为原点 O ，假若用高度 H 把直角坐标轴 X, Y 标准化，即得坐标 $x = X/H, y = Y/H, r = R/H$ ，垂直下方照度 $E_{00} = I_0/H^2$ ，照度 $E_{xy} = E_r$ 的结果为：

$$E_r = I_0 \cos^3 \theta / H^2 = E_{00} (I_0 / I_0) \cos^3 \theta \tag{9-48}$$

照度分布，呈现为可以用以原点 O 为圆心的等照度同心圆表示的旋转对称照度曲面（图9-33）。落在 θ 以内圆盘上的光通可直接或由芦梭图按下式计算

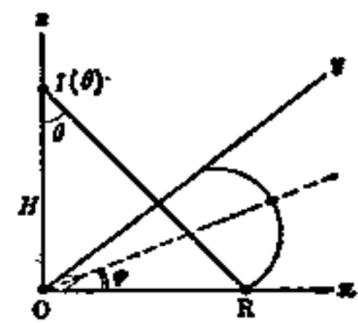


图9-32 轴对称照度分布

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\theta} I_0 \sin \theta d\theta \quad (9-49)$$

轴对称光源 $I(\theta)$ ，可分解成 $\sin^m \theta \cdot \cos^n \theta$ 那样的成分， $m = 0$ ， $\cos^n \theta$ 的泛光灯形的配光出现多， n 如果不大，光束孔径就小，指向性就强。以原点 O 为中心的圆盘上的光通或平均照度比较容易求出，但计算长方形上的光通或平均照度就比较困难。

(1) 圆盘上的平均照度

光强 $I_\theta = I \cos^n \theta$

照度 $E = E_{00} \cos^{n+1} \theta$

下半球光通 $\Phi_0 = 2\pi I / (n + 1)$

圆盘光通 $\Phi = 2\pi I (1 - \cos^{n+1} \theta) / (n + 1)$

平均照度 $\bar{E} = 2E_{00} (1 - \cos^{n+1} \theta) / (n + 1) \tan^2 \theta$

利用系数 $U = 1 - \cos^{n+1} \theta$

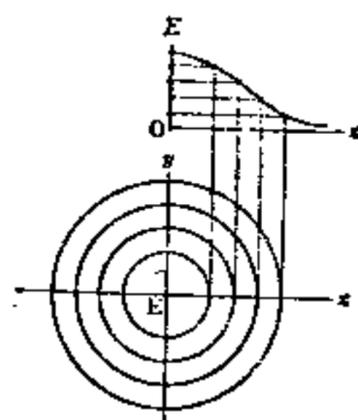


图9-33 等照度同心圆

(2) 长方形上的平均照度^[17] 以原点 O 作端点的 $a \times b$ 长方形上 (图9-34)，连同配光在内的下列公式成立。

光强 $I_\theta = I \cos^n \theta$

长方形光通 $\Phi_n(a, b) = I \cdot Y_{n+1}$

$Y_1 = \tan^{-1}(a \cdot b / \sqrt{1 + a^2 + b^2})$

$Y_2 = \{ (b / \sqrt{1 + b^2}) \tan^{-1}(a / \sqrt{1 + b^2}) + (a / \sqrt{1 + a^2}) \tan^{-1}(b / \sqrt{1 + a^2}) \} / 2$

$Y_3 = \{ \tan^{-1}(ab / \sqrt{1 + a^2 + b^2}) + [1 / (1 + a^2) + 1 / (1 + b^2)] ab / \sqrt{1 + a^2 + b^2} \} / 3$

$Y_4 = \{ a / (1 + a^2) \tan^{-1}(b / \sqrt{1 + a^2}) \times [1 + 1/2(1 + a^2)]$
 $+ b / (1 + b^2) \tan^{-1}(a / \sqrt{1 + b^2}) \times [1 + 1/2(1 + b^2)]$
 $+ [ab / 2(1 + a^2 + b^2)] [1 / (1 + a^2) + 1 / (1 + b^2)] \} / 4$

位于一般位置的长方形上的光通，可分解成以原点 O 作端点的长方形，按公式 $Y_1 \sim Y_4$ 进行计算。

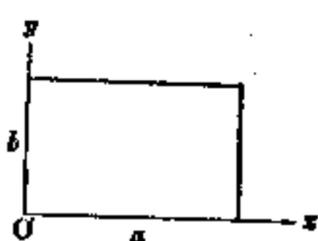
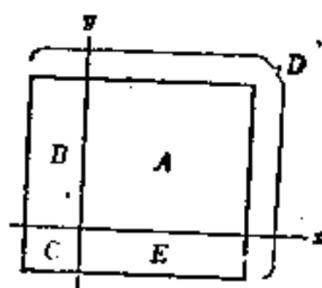
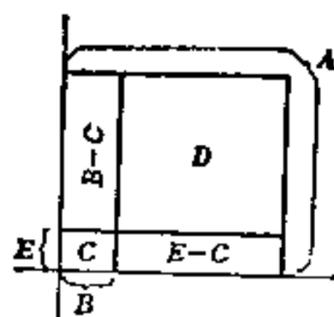


图9-34 Y_{n+1} 公式的适用范围



区域 $D = A + B + C + E$

图 9-35



区域 $D = A - B + C - E$

图 9-36

由长方形上的光通，按照需要能够算出平均照度和利用系数。在道路照明等场合，因 $a = \infty$ ，平均照度当然为零，此时宜用作为 $b = B/H$ 函数的光通或利用系数公式。此外由于光通为二重积分形式，可以找出各种各样的计算方法。按等立体角划分光源的配光和按等面积划分被照面是主要的方法。

9-3-3 计算平均照度的一般方法^{[19], [20], [21]}

为了测量长方形上的平均照度，必须设置适当的测量点，并由那些照度测量值高效率地

算出平均照度。所谓的高效率，意味着设置的测量点数不多，却有好的精度。也就是说，意味着照度测量误差、测量点的设置误差，与计算公式的高次项相应的高次误差不大。

为了减少实测误差，要用好的照度计，准确地进行布点，增多测量点数，预期的统计误差为 $1/\sqrt{n}$ 。与此相反，采用计算公式的办法，虽然用同一的测量值，但低次误差完全消失，高次误差可控制到极小。从而应该采用适用次数 N 大的公式。

像前面的公式 $Y_1 \sim Y_n$ 那样，照度分布函数为已知时，由基本的配光计算出照度分布，但一般用多项式近似地推算出最终的照度分布。对第 i 个测量点，假定其照度为 $f(x_i, y_i) = f_i$ ，平均照度为 \bar{f} ，各照度值的权系数为 $w(x_i, y_i) = w_i$ ，则

$$\bar{f} = \sum_{i=1}^n w_i f_i \tag{9-50}$$

得到了关于照度值的一次式的计算公式。若设想 $f_1 = f_2 = \dots = f_n = \bar{f}$ ，则

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \tag{9-51}$$

$w_i = w(x_i, y_i)$ 为与测量点有关的函数，作测量区域的一次变换，而照度值，权系数则保持不变，测量点也设想移到新的测量点，式(9-51)不变。也就是说，平行四边形区域和长方形区域都是基准的正方形区域($x = -1 \sim 1, y = -1 \sim 1$)，可以在同一测点上作相对的考察。一维线段上的平均法也同样可在基准区间($x = -1 \sim 1$)上考察。设基准区间、基准正方形上的基本平均法为 X 法、 Y 法，实际上测量点数增加，但等分受照区域，重复运用基本平均法还是有效，简写成 $l \times X$ 法、 $l \times m \times Y$ 法。导出计算公式就是很容易的了。虽由于重复运算适用次数不变，但实测误差与高次误差可以改善到 $1/\sqrt{l \times m}$ 、 $\{1/\sqrt{l \times m}\}^{n+1}$ 的程度。

关于一元的 X 法，虽然从来就可以使其和差分法建立起联系，作为数值积分法加以研究，但就建立在其上的原来含义的多项式而论，平均值条件和高次误差减少，若考虑适用次数和测量点数，那么平均法的相互联系就变得明显了，把各种平均法定位在 $N - n$ 图(图9-37)

上使其完全体系化。不产生高次误差的最高适用次数为 N ， N 轴为高次误差减少的方向，测量点数 n 轴为实测误差减少的方向。作为有代表性的方法有：(1) 算术平均法 $A_n(N=1)$ ，(2) 牛顿·柯西法 $C_n\{N = n - n_0^* : n_0^* = 0 (n = \text{奇}) = 1 (n = \text{偶})\}$ ，(3) 麦克罗林法 $M_n(N = n - n_0^*)$ ，(4) 切比雪夫法 $T_n(N = n + n_0^*)$ ，(5) 高斯法 $G_n(N = 2n - 1)$ (表9-9)。若从测量间隔和系数来称呼，则 A_n 、 C_n 、 M_n 法为等

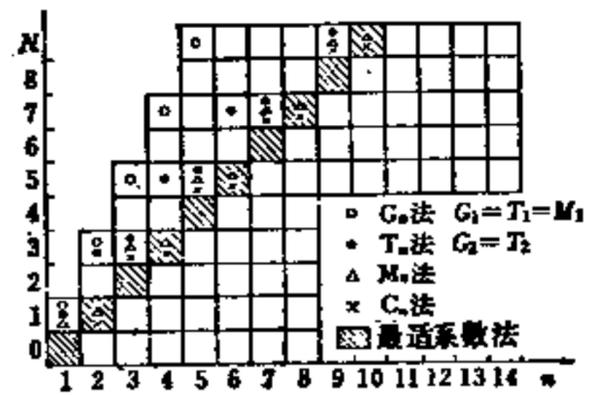


图9-37 一元 X_n 法 $N - n$ 图

间隔法， T_n 为等系数法， G_n 为最精密法。其它还有华尔茨特洛法 W_n ，升格等间隔法 UED_n 等，还可以探索新方法。通过反复的方式，在实用上被广泛采用的梯形法为 $l \times C_n$ ，辛卜森法为 $l \times C_n$ 。

关于二元的 Y 法，大体上和 X 法一样又回到原义的 N 次多项式 $\sum \alpha x^l y^m (l + m \leq N)$ 上，关于各单项式 $x^l y^m$ 基底(图9-38)，有满足总计为 $M = (n + 1)(n + 2)/2$ 个平均值条件的必要，如果采用 M 个以上的测量点，则平均法容易组织。为了节约测量点数，利用多项式

表9-9

四种基本方法的系数表 $\bar{F} = \sum w_i f(t_i)$

测量点数 n	C_n 牛顿·柯西法		M_n 麦克罗林法		T_n 切比雪夫法	G_n 高斯法	
	t_i	w_i	t_i	w_i	t_i	t_i	w_i
1	—	—	0	1.0000	0	0	1.0000
2	± 1	0.5000	$\pm 1/2$	0.5000	± 0.5774	± 0.5774	0.5000
3	± 1	0.1667	$\pm 2/3$	0.3750	± 0.7071	± 0.7746	0.2778
	0	0.6666	0	0.2500	0	0	0.4444
4	± 1	0.1250	$\pm 3/4$	0.2708	± 0.7947	± 0.8611	0.1739
	$\pm 1/3$	0.3750	$\pm 1/4$	0.2292	± 0.1876	± 0.3400	0.3261
5	± 1	0.0778	$\pm 4/5$	0.2387	± 0.8325	± 0.9062	0.1185
	$\pm 1/2$	0.3556	$\pm 2/5$	0.0868	± 0.3745	± 0.5385	0.2393
	0	0.1332	0	0.3490	0	0	0.2844
6	± 1	0.0660	$\pm 5/6$	0.1930	± 0.8662	± 0.9325	0.0856
	$\pm 3/5$	0.2604	$\pm 3/6$	0.1086	± 0.4225	± 0.6612	0.1804
	$\pm 1/5$	0.1736	$\pm 1/6$	0.1984	± 0.2666	± 0.2386	0.2340

的特性，积分区域图形的规则性（旋转性、轴对称性、直积性），若开动脑筋设置测量点，则可谋求节约测量点数最大达到 $M/3$ 的程度。围绕着节约方法，产生出各种办法。其结果附在 $N-n$ 图上。

关于 Y 法（图9-39），最明显的是由于图形的直积性，可从任意的 $X_{(1)}$ 法、 $X_{(2)}$ 法得出 $X_{(1)} \times X_{(2)}$ 法或 $X_{(1)}^2$ 法。也就是可以进行平均法的相乘运算，测量点的位置为指定坐标的组合 (x_i, y_i) ，权系数为 $w_i \times w_i$ 。再则，由任意的 Y_1 法、 Y_2 法，可进行任意的叠加 $\alpha Y_1 + \beta Y_2$ 。把这些作为基准可对测量点的节约加以考虑，精度方面 G_n^2 法最高，而测量点的节约方面则 Y_n 法要稍为优越些。但是，若考察三元平均法 Z 法，又比 G_n^2 法好得多。就适用次数 N 而言， $X_n < G_n, Y_n > G_n^2, Z_n \gg G_n^2$ 。

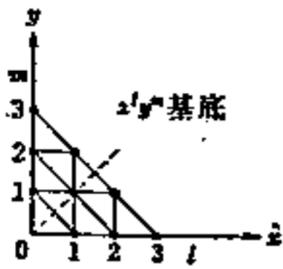


图9-38 $x^l y^m$ 基底的位置
($N \geq l + m$)

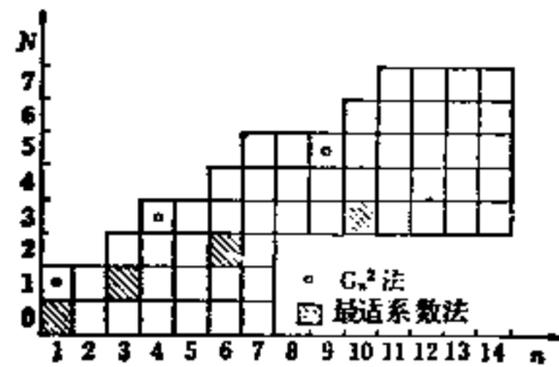


图9-39 二元 Y_n 法 $N-n$ 图

作为实用的平均照度法，因为在工程学上要求：

- (1) 测量点容易设置
- (2) 权系数为正值
- (3) 高次误差少， N 高
- (4) 测量点效率 (N/n) 高

因此，图 9-40 和图 9-41 等给出了有关的基本正方形，图 9-42 给出了三角形的 3 中点法 ($N = 2$)，图 9-43 给出 5 点法的构成，图 9-44 给出圆盘的 5 点法，以供参考。

当应用平均照度法时,在所需精度和测量所花费的人力之间有取得平衡的必要。如果把测量精度±1%,平均照度精度±(2~3)%作为目标,则在测量点上重复N=3的方法,25~49个点是有用的。若把平均照度±1%作为目标,则需121~169个点。

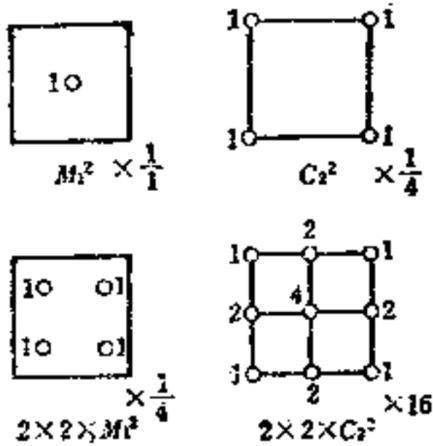


图9-40 N=1的方法

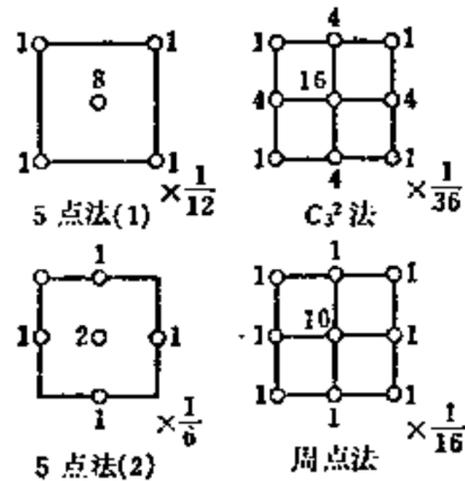


图9-41 N=3的方法

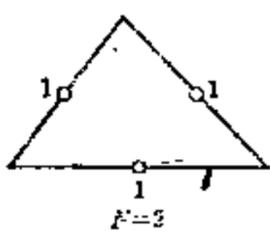


图9-42 3中点法

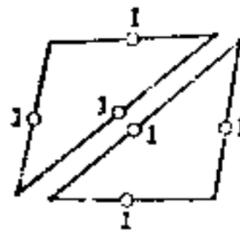


图9-43 5点法(2)的构成

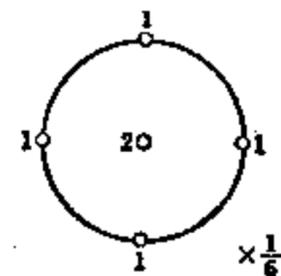


图9-44 5点法(3)

9-4 从面入射到面上的光通

9-4-1 固有入射光通系数^[22]

(1) 固有入射光通系数的定义和性质^[23] 任意的二个完全扩散面 A_i 、 A_j 有如图9-45所示那样的位置关系,当每个面具有均匀的光出射度 M_i 、 M_j 时,由面 A_i 入射到面 A_j 上的光通量 $\phi_{A_i \rightarrow A_j}$ 为

$$\phi_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{M_i}{\pi} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{r_{ij}^2} dA_i dA_j \quad (9-52)$$

其中,若设

$$F_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{1}{\pi A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{r_{ij}^2} dA_i dA_j \quad (9-53)$$

因由面 A_i 发出的全部光通量为 $A_i M_i$, 故得

$$F_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{\phi_{A_i \rightarrow A_j}}{M_i \cdot A_i} \quad (9-54)$$

将式(9-53)定义的 $F_{A_i \rightarrow A_j}$ 称为固有入射光通系数,它由二个平面的尺寸及其几何形状关系决定。由式(9-54)知道,这个固有入射光通系数 $F_{A_i \rightarrow A_j}$ 表示“由面 A_i 入射到面 A_j 上的光通占面 A_i 所发出的全部光通的比例”。同样,由固有入射光通的定义

$$F_{A_i \rightarrow A_i} = \frac{1}{\pi A_i} \int_{A_i} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{r_{ij}^2} dA_i dA_j \quad (9-55)$$

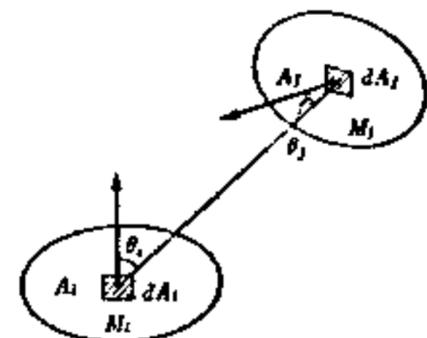


图9-45

得

$$A_i F_{A_i \rightarrow A_j} = A_j F_{A_j \rightarrow A_i} \quad (9-56)$$

互易定理成立。从而

$$F_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{\phi_{A_i \rightarrow A_j}}{M_j \cdot A_i} \quad (9-57)$$

也可以说, $F_{A_i \rightarrow A_j}$ 表示“当面 A_i 有单位光出射度时, 面 i 从面 j 所接收到的平均照度”。在由 n 个面形成的闭合曲面上, 由式 (9-54), 如下的闭合曲面的性质成立。

$$\sum_{j=1}^n F_{A_i \rightarrow A_j} = F_{A_i \rightarrow A_1} + F_{A_i \rightarrow A_2} + \cdots + F_{A_i \rightarrow A_n} = 1 \quad (9-58)$$

(2) 有一边是公共的二个长方形的固有入射光通系数 如图 9-46 所示, 二个长方形 A_1 、 A_2 有一边是公共的, 若令

$$\left. \begin{aligned} X &= a/b \\ Y &= c/b \end{aligned} \right\} \quad (9-59)$$

则其交角为 ϕ 情况下的固有入射光通系数 $F_{A_1 \rightarrow A_2}$ 可用下式表示

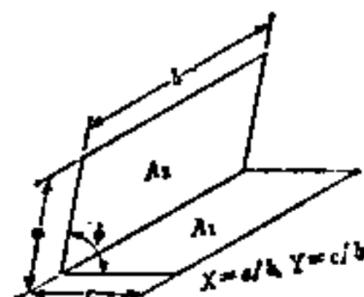


图9-46

$$\begin{aligned} F_{A_1 \rightarrow A_2} = & \frac{1}{\pi Y} \left\{ -\frac{\sin 2\phi}{4} \left[XY \sin \phi + \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) (X^2 + Y^2) \right. \right. \\ & \left. \left. + Y^2 \tan^{-1} \left(\frac{X - Y \cos \phi}{Y \sin \phi} \right) + X^2 \tan^{-1} \left(\frac{Y - X \cos \phi}{X \sin \phi} \right) \right] \right. \\ & \left. + \frac{\sin^2 \phi}{4} \ln \left[\frac{(1 + X^2)(1 + Y^2)}{1 + X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi} \right]^{\csc^2 \phi + \cot^2 \phi} \right. \\ & \left. \times \left[\frac{Y^2(1 + X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi)}{(1 + Y^2)(X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi)} \right]^{Y^2} \right. \\ & \left. + Y \tan^{-1} \left(\frac{1}{Y} \right) + X \tan^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) \right. \\ & \left. + \frac{X^2 \sin^2 \phi}{4} \ln \left[\left(\frac{X^2}{X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi} \right) \left(\frac{1 + X^2}{1 + X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi} \right)^{\cos^2 \phi} \right] \right. \\ & \left. - \sqrt{X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi} \cdot \cot^{-1} \sqrt{X^2 + Y^2 - 2XY \cos \phi} \right. \\ & \left. + \frac{X \sin \phi \sin 2\phi}{2} \sqrt{1 + X^2 \sin^2 \phi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{X \cos \phi}{\sqrt{1 + X^2 \sin^2 \phi}} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \tan^{-1} \left(\frac{Y - X \cos \phi}{\sqrt{1 + X^2 \sin^2 \phi}} \right) \right] + \cos \phi \int_0^Y \sqrt{1 + Z^2 \sin^2 \phi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{X - Z \cos \phi}{\sqrt{1 + Z^2 \sin^2 \phi}} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \tan^{-1} \left(\frac{Z \cos \phi}{\sqrt{1 + Z^2 \sin^2 \phi}} \right) \right] dz \right\} \quad (9-60) \end{aligned}$$

当 $\phi = 90^\circ$ 时

$$\begin{aligned} F_{A_1 \rightarrow A_2} = & \frac{1}{\pi Y} \left\{ X \tan^{-1} \frac{1}{X} + Y \tan^{-1} \frac{1}{Y} - \sqrt{X^2 + Y^2} \cot^{-1} \sqrt{X^2 + Y^2} \right. \\ & \left. + \frac{1}{4} \left[\ln \left[\frac{(1 + Y^2)(1 + X^2)}{1 + X^2 + Y^2} \right] + Y^2 \ln \left[\frac{Y^2(1 + X^2 + Y^2)}{(1 + Y^2)(X^2 + Y^2)} \right] \right. \right. \\ & \left. \left. + X^2 \ln \left[\frac{X^2(1 + X^2 + Y^2)}{(1 + X^2)(X^2 + Y^2)} \right] \right] \right\} \quad (9-61) \end{aligned}$$

当 $\phi = 90^\circ$, 且 $b = \infty$ (无限长) 时, 式(9-61)变成下式

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{a}{c} - \sqrt{1 + \left(\frac{a}{c} \right)^2} \right] \quad (9-62)$$

表 9-10 示出图 9-46 情况下的固有入射光通系数 $F_{A_1 \rightarrow A_2}$ 的计算值。

表9-10 有一边是公共边的两个长方形间的固有入射光通系数

L \ N	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	2.0	4.0	6.0	10.0	20.0	∞	
$\Phi = 30^\circ$													
0.1	0.4205	0.7314	0.8604	\	0.8948	0.8981	0.8996	0.9000	0.9001	0.9001	0.9001	0.9001	
0.2	0.2132	0.4098	0.7188		0.8595	0.8676	0.8719	0.8728	0.8729	0.8730	0.8730	0.8730	0.8730
0.4	0.1451	0.2133	0.4055		0.7772	0.8099	0.8228	0.8249	0.8252	0.8254	0.8255	0.8255	0.3255
0.6	0.0976	0.1497	0.2749		0.6669	0.7534	0.7789	0.7827	0.7832	0.7835	0.7836	0.7836	0.7836
1.0	0.0586	0.0900	0.1772		0.4465	0.6202	0.7002	0.7100	0.7111	0.7116	0.7118	0.7118	0.7118
2.0	0.0293	0.0451	0.0889		0.2354	0.3244	0.5235	0.5736	0.5778	0.5793	0.5797	0.5797	0.5798
4.0	0.0147	0.0225	0.0445		0.1181	0.1803	0.2759	0.3961	0.4196	0.4261	0.4274	0.4274	0.4277
6.0	0.0098	0.0150	0.0297		0.0788	0.1203	0.1868	0.2807	0.3216	0.3393	0.3426	0.3426	0.3431
10.0	0.0059	0.0090	0.0178		0.0473	0.0722	0.1123	0.1709	0.2030	0.2389	0.2505	0.2505	0.2518
20.0	0.0029	0.0045	0.0089		0.0236	0.0361	0.0562	0.0856	0.1019	0.1203	0.1261		
$\Phi = 60^\circ$													
0.1	0.3024	0.4866	0.6093	\	0.6766	0.6851	0.6893	0.6904	0.6906	0.6907	0.6907	0.6908	
0.2	0.1732	0.2970	0.4720		0.6169	0.6362	0.6453	0.6477	0.6481	0.6483	0.6484	0.6484	0.6484
0.4	0.1055	0.1684	0.2868		0.5095	0.5541	0.5751	0.5803	0.5812	0.5816	0.5818	0.5818	0.5819
0.6	0.0717	0.1172	0.2025		0.4177	0.4839	0.5185	0.5270	0.5284	0.5292	0.5294	0.5294	0.5295
1.0	0.0435	0.0725	0.1292		0.2891	0.3712	0.4300	0.4462	0.4488	0.4502	0.4506	0.4506	0.4507
2.0	0.0218	0.0364	0.0653		0.1612	0.2128	0.2899	0.3234	0.3297	0.3325	0.3335	0.3335	0.3340
4.0	0.0109	0.0182	0.0328		0.0816	0.1204	0.1630	0.2064	0.2192	0.2260	0.2286	0.2286	0.2293
6.0	0.0073	0.0122	0.0219		0.0546	0.0807	0.1122	0.1469	0.1618	0.1719	0.1761	0.1761	0.1772
10.0	0.0044	0.0073	0.0131		0.0328	0.0485	0.0678	0.0922	0.1040	0.1160	0.1231	0.1231	0.1253
20.0	0.0022	0.0036	0.0066		0.0164	0.0243	0.0340	0.0465	0.0528	0.0595	0.0631		
$\Phi = 90^\circ$													
0.02	0.39908	0.44375	0.46615	0.47725	0.47943	0.48138	0.48239	0.48267	0.48273	0.48275	0.48276	0.48277	
0.05	0.28738	0.37202	0.42337	0.44852	0.45587	0.46073	0.46327	0.46397	0.46411	0.46418	0.46421	0.46422	
0.1	0.18601	0.28189	0.36216	0.40859	0.42290	0.43251	0.43756	0.43898	0.43925	0.43939	0.43943	0.43947	
0.2	0.10584	0.18108	0.27104	0.34295	0.36884	0.38719	0.39711	0.39994	0.40048	0.40076	0.40089	0.40092	
0.4	0.05606	0.10215	0.17147	0.25032	0.28809	0.31924	0.33784	0.34339	0.34447	0.34503	0.34528	0.34535	
0.6	0.03799	0.07048	0.12295	0.19206	0.23147	0.26896	0.29429	0.30238	0.30399	0.30482	0.30518	0.30530	
1.0	0.02304	0.04325	0.07744	0.12770	0.16138	0.20004	0.23285	0.24522	0.24783	0.24921	0.24980	0.25000	
2.0	0.01158	0.02188	0.03971	0.06757	0.08829	0.11643	0.14930	0.16731	0.17193	0.17455	0.17571	0.17611	
4.0	0.00580	0.01097	0.02000	0.03434	0.04536	0.06131	0.08365	0.10136	0.10776	0.11210	0.11427	0.11505	
6.0	0.00388	0.00732	0.01335	0.02296	0.03040	0.04130	0.05731	0.07184	0.07822	0.08331	0.08624	0.08738	
10.0	0.00232	0.00439	0.00802	0.01380	0.01829	0.02492	0.03491	0.04484	0.04998	0.05502	0.05876	0.06053	
20.0	0.00116	0.00220	0.00401	0.00691	0.00916	0.01249	0.01757	0.02285	0.02587	0.02938	0.03302	0.03578	
$\Phi = 120^\circ$													
0.1	0.0871	0.1284	0.1667	\	0.2008	0.2070	0.2104	0.2115	0.2116	0.2117	0.2118	0.2118	
0.2	0.0538	0.0843	0.1227		0.1700	0.1804	0.1866	0.1886	0.1889	0.1891	0.1892	0.1892	0.1892
0.4	0.0314	0.0507	0.0790		0.1287	0.1437	0.1538	0.1573	0.1580	0.1584	0.1586	0.1586	0.1586
0.6	0.0216	0.0357	0.0576		0.1023	0.1186	0.1311	0.1358	0.1368	0.1374	0.1377	0.1377	0.1377
1.0	0.0131	0.0218	0.0374		0.0715	0.0870	0.1012	0.1074	0.1090	0.1099	0.1103	0.1103	0.1103
2.0	0.0066	0.0111	0.0193		0.0412	0.0518	0.0643	0.0720	0.0742	0.0757	0.0765	0.0765	0.0767
4.0	0.0033	0.0056	0.0097		0.0213	0.0297	0.0377	0.0443	0.0469	0.0489	0.0501	0.0501	0.0506
6.0	0.0022	0.0037	0.0065		0.0143	0.0200	0.0262	0.0316	0.0340	0.0361	0.0375	0.0375	0.0382
10.0	0.0013	0.0022	0.0039		0.0086	0.0121	0.0160	0.0200	0.0219	0.0238	0.0254	0.0254	0.0264
20.0	0.0007	0.0011	0.0020		0.0043	0.0061	0.0081	0.0102	0.0113	0.0125	0.0133		
$\Phi = 150^\circ$													
0.1	0.0225	0.0325	0.0424	\	0.0520	0.0538	0.0549	0.0553	0.0553	0.0554	0.0554	0.0554	
0.2	0.0141	0.0214	0.0310		0.0432	0.0462	0.0480	0.0486	0.0487	0.0488	0.0488	0.0488	0.0489
0.4	0.0084	0.0130	0.0201		0.0322	0.0361	0.0389	0.0399	0.0401	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403
0.6	0.0057	0.0089	0.0147		0.0255	0.0295	0.0327	0.0341	0.0344	0.0346	0.0346	0.0346	0.0347
1.0	0.0035	0.0055	0.0093		0.0178	0.0215	0.0249	0.0266	0.0270	0.0273	0.0273	0.0273	0.0275
2.0	0.0017	0.0028	0.0048		0.0098	0.0127	0.0157	0.0177	0.0182	0.0186	0.0186	0.0187	0.0189
4.0	0.0009	0.0014	0.0024		0.0051	0.0068	0.0086	0.0108	0.0114	0.0119	0.0120	0.0120	0.0124
6.0	0.0006	0.0009	0.0016		0.0034	0.0046	0.0059	0.0075	0.0082	0.0088	0.0090	0.0090	0.0093
10.0	0.0003	0.0006	0.0010		0.0021	0.0028	0.0036	0.0047	0.0052	0.0055	0.0055	0.0055	0.0064
20.0	0.0002	0.0003	0.0005		0.0010	0.0014	0.0018	0.0024	0.0027	0.0029	0.0029		

(3) 二个平行的长方形间的固有入射光通系数 如图9-47所示, 尺寸相等的二个平行长方形 A_1 、 A_2 间的固有入射光通系数 $F_{A_1 \rightarrow A_2}$, 若令

$$x = b/c, \quad y = a/c \tag{9-63}$$

则可用下式表示

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{2}{\pi xy} \left\{ y \sqrt{1+x^2} \tan^{-1} \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} + x \sqrt{1+y^2} \tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{1+y^2}} - y \tan^{-1} y - x \tan^{-1} x + \frac{1}{2} \ln \frac{(1+x^2)(1+y^2)}{1+x^2+y^2} \right\} \tag{9-64}$$

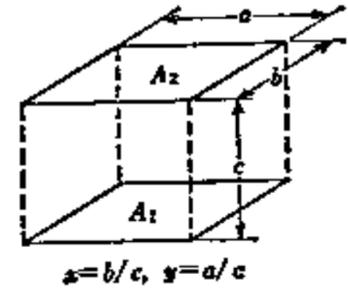


图9-47

表9-11给出了图9-47情况下的固有入射光通系数 $F_{A_1 \rightarrow A_2}$ 的计算值

表9-11 两个平行的长方形间的固有入射光通系数

$x \backslash y$	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	2.0	4.0	6.0	10.0	20.0	∞
0.1	0.00316	0.00626	0.01207	0.01715	0.02492	0.03514	0.04210	0.04463	0.04671	0.04829	0.04988
0.2	0.00626	0.01240	0.02391	0.03398	0.04941	0.06971	0.08353	0.08859	0.09272	0.09586	0.09902
0.4	0.01207	0.02392	0.04614	0.06560	0.09554	0.13513	0.16219	0.17209	0.18021	0.18638	0.19258
0.6	0.01715	0.03398	0.06550	0.09336	0.13627	0.19341	0.23271	0.24712	0.25896	0.26795	0.27698
1.0	0.02492	0.04941	0.09554	0.13627	0.19982	0.28588	0.34596	0.36813	0.38638	0.40026	0.41421
2.0	0.03514	0.06971	0.13513	0.19342	0.28588	0.41525	0.50899	0.54421	0.57338	0.59563	0.61803
4.0	0.04209	0.08353	0.16219	0.23271	0.34596	0.50899	0.63204	0.67954	0.71933	0.74990	0.78078
10.0	0.04671	0.09270	0.18021	0.25896	0.33638	0.57361	0.71933	0.77741	0.82699	0.86563	0.90499
∞	0.04988	0.09902	0.19258	0.27698	0.41421	0.61803	0.78078	0.84713	0.90499	0.95125	1.00000

(4) 求固有入射光通系数的几何学方法 用(2)里所示的表9-10或式(9-52)探索求解图9-48所示的各个面间的固有入射光通系数的方法。

现在, 若用 G_{ij} 表示 $A_i F_{A_i \rightarrow A_j}$, 根据互易定理式(9-56):

$$G_{ij} = A_i F_{A_i \rightarrow A_j} = A_j F_{A_j \rightarrow A_i} = G_{ji} \tag{9-65}$$

故, 如果 G_{ij} 知道的话, 面 A_i 和 A_j 之间的固有入射光通系数 F_{ij} 或 F_{ji} 就很容易求出。在图9-48中

$$\left. \begin{aligned} G_{55}' (= G_{5'5}) = G_{66}' (= G_{6'6}) \\ G_{15}' (= G_{5'1}) = G_{31}' (= G_{1'3}) \end{aligned} \right\} \tag{9-66}$$

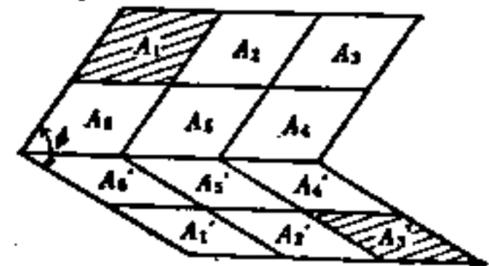


图9-48

等对称原理的成立可由 $F_{A_i \rightarrow A_j}$ 的定义式予以证明。

若运用互易定理和对称的原理, 对图9-48所示的情况, 便可得到式(9-67)所示的那种关系。这个式子右边的值可运用表9-10或式(9-60)求出。

$$\begin{aligned} G_{55}' = G_{6'6} = G_{55}' = G_{5'5} &= \frac{1}{2} \{ G_{(55)(5'6')} - G_{55}' G_{66}' \} \\ G_{15}' = G_{6'1} = G_{(15)6'} - G_{55}' & \\ G_{11}' = G_{1'1} = G_{(15)6'} - G_{(15)6'} - G_{5(1'6')} + G_{55}' & \\ G_{6'6} = G_{6'6} = G_{40}' = G_{6'4} & \\ &= \frac{1}{2} \{ G_{(400)(4'6'6')} - 2G_{55}' - 2G_{46}' - G_{46}' - G_{55}' - G_{55}' \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_{12}' &= G_{21}' = G_{21}' = G_{12}' \\
 &= \frac{1}{2} \{ G_{(1256)}(1'2'5'6') - 2G_{(1256)}(5'6') + 2G_{(56)}(5'6') - G_{11}' - G_{22}' \} \\
 G_{13}' &= G_{31}' = G_{31}' = G_{13}' \\
 &= \frac{1}{2} \{ G_{(123456)}(1'2'3'4'5'6') - G_{(2345)}(2'3'4'5') - G_{(1256)}(1'2'5'6') + G_{(456)}(4'5'6') \\
 &\quad - G_{(456)}(1'2'3'4'5'6') - G_{(125456)}(4'5'6') + G_{(1256)}(5'6') + G_{(12845)}(4'5'6') \\
 &\quad + G_{(56)}(1'2'5'6') + G_{(45)}(2'3'4'5') + G_{(25)}(2'5') - G_{(25)}(5') \\
 &\quad - G_{(56)}(5'6') - G_{(45)}(4'5') - G_{55}(2'5') + G_{55}' \} \tag{9-67}
 \end{aligned}$$

9-4-2 光通函数

求解从长方形光源直接入射到矩形面上的光通，若不用固有入射光通系数法，则还有山内的光通函数法^[24]。

(1) 光源和被照面为长方形且互相垂直的情况 光源和被照面有如图 9-49 所示的关系时，面 A_2 接收到的来自光出射度为 M_1 的面 A_1 (斜线部分) 的光通为 $\phi_{A_1 \rightarrow A_2}$

$$\phi_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{2yM_1}{\pi} \{ x\varphi_0(\beta_2) + z\varphi_0(\beta_2) - \sqrt{x^2 + z^2}\varphi_0(\beta_1) \} \tag{9-68}$$

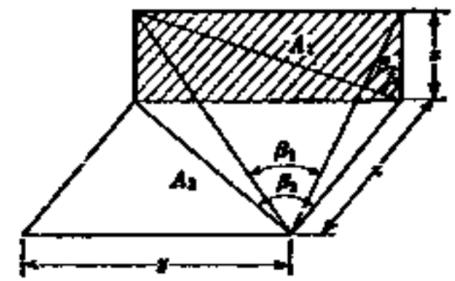


图9-49 光源和被照面相互垂直的情况

上式中若把 $\varphi_0(\beta)$ 叫做光通函数，则它可定义为

$$\varphi_0(\beta) = \frac{1}{2} \left(\beta - \frac{1}{2} \tan \beta \ln \sin \beta + \frac{1}{2} \cot \beta \ln \cos \beta \right) \tag{9-69}$$

(2) 光源和被照面为长方形且互相平行的情况 光源和被照面有如图 9-50 所示的关系时，面 A_2 接收到的来自光出射度为 M_1 的面 A_1 (斜线部分) 的光通为 $\phi_{A_1 \rightarrow A_2}$

$$\begin{aligned}
 \phi_{A_1 \rightarrow A_2} &= \frac{4M_1}{\pi} \{ x [\sqrt{y^2 + z^2}\varphi_0(\beta_2) - z\varphi_0(\beta_2)] \\
 &\quad + y [\sqrt{x^2 + z^2}\varphi_0(\beta_4) - z\varphi_0(\beta_1)] \} \tag{9-70}
 \end{aligned}$$

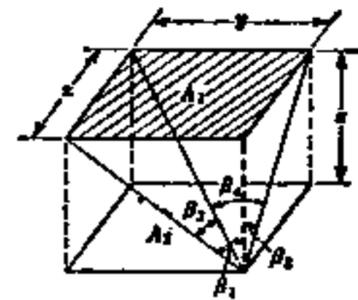


图9-50 光源和被照面相互平行的情况

式中 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 可称之为光通函数，可按下式求出

$$\left. \begin{aligned}
 \beta_1 &= \tan^{-1} \frac{z}{y}, & \beta_2 &= \tan^{-1} \frac{x}{z} \\
 \beta_3 &= \tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{y^2 + z^2}}, & \beta_4 &= \tan^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}
 \end{aligned} \right\} \tag{9-71}$$

9-5 由相互反射所产生的光通分布

9-5-1 相互反射计算的应用

相互反射这一现象，是日常生活中经常可以看到的现象。盛夏太阳下的纯白的积乱云就是一个很好的例子。这是射入厚云层的太阳光，凭借云片，在表面被来回散射数次而形成的。此外，山茶花和蔷薇花上，若仔细观察其淡淡的颜色，则可以看到花瓣内侧的色浓，而花瓣外侧逐渐发白，这也是由于相互反射的效果而引起的。

在照明工程学的领域里，当作相互反射问题来处理的有：

- (1) 室内或隧道内照度、亮度的预测；
- (2) 灯具效率的理论推断；
- (3) 相互反射而引起的色偏移；
- (4) 用积分球的测光仪器所得到的测量值的处理；
- (5) 滤光系统的透过率、反射率的计算；
- (6) 黑体炉的黑度计算；等等。

9-5-2 相互反射计算的基础公式

用 i 、 j 等字母表示闭合曲面上的点的位置时，若设 i 点的直射照度为 E_{oi} ，相互反射所产生的间接照度为 E_{ri} ，则 i 点的总照度为

$$E_i = E_{oi} + E_{ri} \quad (9-72)$$

现在，若假定闭合曲面为完全扩散的反射面，则如图 9-51 所示，当假定与 i 点面对的 j 点的反射率为 ρ_j ，总照度为 E_j 时，间接照度 E_{ri} 为

$$E_{ri} = \int_{A_j} \frac{\rho_j E_j dA_j \cos\theta_j \cos\theta_i}{\pi r_{ij}^2} \quad (9-73)$$

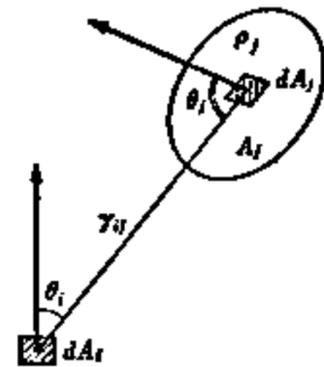


图 9-51

于是：

$$E_i = E_{oi} + \int_{A_j} \rho_j e_o(i, j) E_j dA_j \quad (9-74)$$

其中

$$e_o(i, j) = \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi \cdot r_{ij}^2} \quad (9-75)$$

为相互反射基础公式。称之为弗雷特奥罗姆形第二种积分方程式。

$e_o(i, j)$ 可称之为固有照度系数，在球面的情况下， $e_o(i, j) = \{\pi(2R)^2\}^{-1}$ = 一定 (R : 半径)。这个固有照度系数 $e_o(i, j)$ 所包含的物理意义为：“ i 点的光出射度为 1lm/m^2 时， j 点所接收到的由 dA_i 所产生的照度由式 $e_o(i, j) dA_i (\text{lx})$ 所给出”，此外， $\rho_j \cdot e_o(i, j)$ 相当于积分方程式的核。

9-5-3 相互反射方程式的近似解法

相互反射系统的问题，归结为求解式 (9-74) 的积分方程式，其解法有解析解法和数值解法^[25]两种。作为现实的有效手段，正为人们所广泛采用的是数值解法。

(1) 解析解法 解析地求出关于相互反射系统的积分方程式 (9-74) 的准确解，一般来说是困难的，只对球和无限圆筒才可严格地解出。其他情况，核或直射照度整个式子正在采用通过傅里叶级数或指数函数等进行近似求解的方法。

(2) 数值解法 若把相互反射的基础公式 (9-74) 的积分区域 A_j 分割成 n 分，则得

$$E_i = E_{oi} + \sum_{j=1}^n \int_{A_j} \rho_j e_o(i, j) E_j dA_j \quad (9-76)$$

假定在分割面 A_i 上对 E_i 积分

$$\int_{A_i} E_i dA_i = \int_{A_i} E_{oi} + \sum_{j=1}^n \int_{A_i} \int_{A_j} \rho_j e_o(i, j) E_j dA_j dA_i \quad (9-77)$$

若假定在被分割的各个面上, 总照度 E_i 和反射率 ρ_i 为一定值, 则得如下的光通表达式

$$F_i = F_{0i} + \sum_{j=1}^n \rho_j E_j \cdot A_i \cdot F_{ij} \quad (9-78)$$

但 F_{ij} ($\equiv F_{A_i \rightarrow A_j}$) 是根据式 (9-53) 定义的固有入射光通系数。

若将 (9-78) 式的各项乘上 ρ_i/A_i , 便得用光出射度的形式表示的关于相互反射系统的 n 元一次联立方程式

$$M_i = M_{0i} + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} \cdot M_j \quad (9-79)$$

式 (9-78) 也可写成

$$E_i = E_{0i} + \sum_{j=1}^n \rho_j \cdot F_{ji} \cdot E_j \quad (9-80)$$

或

$$F_i = F_{0i} + \sum_{j=1}^n \rho_j \cdot F_{ji} \cdot F_j \quad (9-81)$$

用数值法解相互反射问题时, 在式 (9-79)~(9-81) 中, 哪个方便就采用那一个。

式 (9-79) 的关系可用矩阵方程式 (9-82) 表示

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_i \\ \vdots \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{i1} & G_{i2} & \cdots & G_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{01} \\ M_{02} \\ \vdots \\ M_{0i} \\ \vdots \\ M_{0n} \end{bmatrix} \quad (9-82)$$

但

$$G_{ij} = \frac{\partial \Delta}{\partial F_{ij}} \quad (9-83)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} (1 - \rho_1 F_{11}) & -\rho_2 F_{12} & \cdots & -\rho_n F_{1n} \\ -\rho_1 F_{21} & (1 - \rho_2 F_{22}) & \cdots & -\rho_n F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\rho_n F_{n1} & -\rho_n F_{n2} & \cdots & (1 - \rho_n F_{nn}) \end{vmatrix} \quad (9-84)$$

j 面有单位初始光出射度时, 意味着由于相互反射的结果在 i 面上产生 G_{ij} 的光出射度, 则称 G_{ij} 为 j 对 i 的光出射度比或光通传递函数。

同样, 式 (9-81) 的关系可用式 (9-85) 来表示:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{21} & \cdots & K_{n1} \\ K_{12} & K_{22} & \cdots & K_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{1i} & K_{2i} & \cdots & K_{ni} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{1n} & K_{2n} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{01} \\ F_{02} \\ \vdots \\ F_{0i} \\ \vdots \\ F_{0n} \end{bmatrix} \quad (9-85)$$

其中

$$K_{ji} = \frac{\partial \Delta'}{\partial F_{ji}} \quad (9-86)$$

$$\Delta'_{ij} = \delta_{ij} - \rho_j F_{ji} \quad (9-87)$$

$$(i, j: 1, 2 \dots n)$$

式中 δ_{ij} 为 Kronecker 的记号; K_{ij} 为单位光通入射在 i 面上时, 意味着由于相互反射的结果有 K_{ij} 的光通入射在 j 面上。

9-5-4 相互反射的应用计算举例

(1) 完全扩散球内的相互反射的计算 如图 9-52 所示, 球内 j 点处的直射照度为 E_{0j} , 反射率为 ρ_j 时, i 点的照度由式 (9-72) 和式 (9-74) 为

$$E_i = E_{0i} + E_{ri} = E_{0i} + \int_A \rho_j \cdot e_0(i, j) E_j dA_j \quad (9-88)$$

若设球内的半径为 R , 球的内表面积为 A , 则固有照度系数 $e_0(i, j)$ 为

$$e_0(i, j) = \frac{\cos\theta_i \cdot \cos\theta_j}{\pi r_{ij}^2} = \frac{1}{4\pi R^2} = \frac{1}{A} \quad (9-89)$$

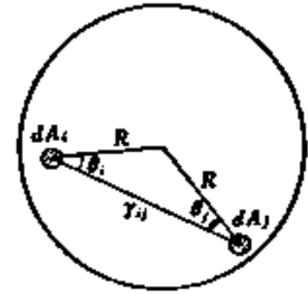


图9-52

由于
$$E_{ri} = \frac{1}{A} \int_A \rho_j E_j dA_j = \text{一定}(E_r) \quad (9-90)$$

$$= \frac{1}{A} \int_A \{\rho_j E_{0j} + \rho_j E_{rj}\} dA_j$$

$$= \frac{1}{A} \int_A \rho_j E_{0j} dA_j + \frac{1}{A} \cdot E_r \int_A \rho_j dA_j \quad (9-91)$$

因此由相互反射所产生的间接照度 E_r 为下式所给定

$$E_r = \frac{\int_A \rho_j \cdot E_{0j} dA_j}{A - \int_A \rho_j dA_j} \quad (9-92)$$

尤其在球内的反射率为一定 ($= \rho$) 的情况下, 若 F_0 为直射光通, 则得

$$E_r = \frac{F_0}{A} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \quad (9-93)$$

(2) 矩形室内相互反射的计算^[26] 当假定顶棚、墙壁、地板各面的初始光出射度为 M_{01} 、 M_{02} 、 M_{03} , 反射率为 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 , 房间尺寸为 $L \times W \times H$ 时 (图 9-53), 相互反射后各个面的最终光出射度 M_1 、 M_2 、 M_3 可由式 (9-79) 为下面式子所给定

$$\begin{bmatrix} 1 & -\rho_1 F_{12} & -\rho_1 F_{13} \\ -\rho_2 F_{21} & 1 - \rho_2 F_{22} & -\rho_2 F_{23} \\ -\rho_3 F_{31} & -\rho_3 F_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{01} \\ M_{02} \\ M_{03} \end{bmatrix} \quad (9-94)$$

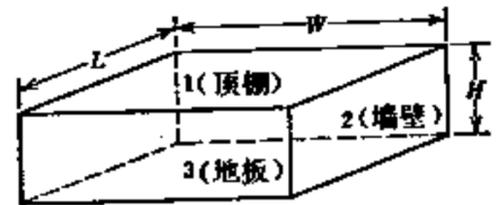


图9-53

在这里,若运用关于固有入射光通系数 F_{ij} 的互易定理和闭合曲面的原理,则式(9-94)变成下式

$$\begin{bmatrix} 1 & -\rho_1(1-f) & -\rho_1 f \\ -\rho_2 \frac{k_r}{2}(1-f) & 1 - \rho_2 \{1 - k_r(1-f)\} & -\rho_2 \frac{k_r}{2}(1-f) \\ -\rho_3 & -\rho_3(1-f) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{01} \\ M_{02} \\ M_{03} \end{bmatrix} \quad (9-95)$$

其中 $f = F_{13} \quad (9-96)$

$$k_r = \frac{L \cdot W}{H(L+W)} = \frac{2A_1}{A_2} \quad (9-97)$$

f 的值可运用式(9-64)求出。实际的办公室等,一般来说 $L \approx W$,但求 f 的值时,即使作为 $L = W$ 来考虑,从实用上来讲,在精度方面也是没有问题的。这时 f 的值可用室指数 k_r 为式(9-98)所表示。

$$f = \frac{1}{2\pi k_r} \left\{ \log \frac{1+4k_r^2}{\sqrt{1+8k_r^2}} + 4k_r \sqrt{1+4k_r^2} \tan^{-1} \frac{2k_r}{\sqrt{1+4k_r^2}} - 4k_r \tan^{-1} 2k_r \right\} \quad (9-98)$$

f 与 k_r 的关系示于图 9-54。

现在,在尺寸为 $L = W = 8\text{m}$,高度 $H = 2\text{m}$ 的房间里,采用扩散性好的丙烯镶板的发光顶棚照明,试求当初始光出射度为 1000lm/m^2 ,顶棚、墙壁和地板的反射率分别为 $0.8, 0.5, 0.1$ 时的地板面照度。

这时,室指数 $k_r = 2, f = 0.632$,把这些值代入式(9-95),求出地板面光出射度 M_3

$$M_3 = 0.0071 M_{01} = 71\text{lm/m}^2$$

因而包含了相互反射效果的地板面照度为

$$E_3 = M_3 / \rho_3 = 71 / 0.1 = 710\text{lx}$$

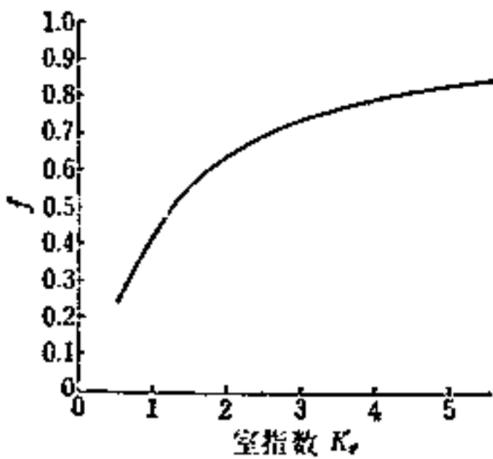


图9-54

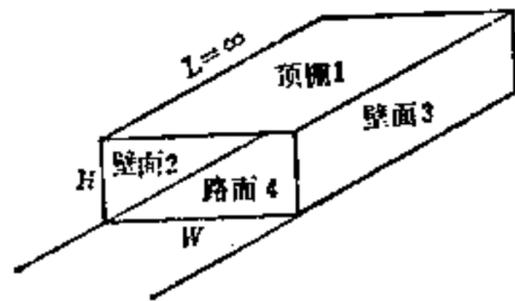


图9-55

(3) 隧道照明中利用系数的计算^[27] 在断面为图 9-55 所示的无限长隧道中,固有入射光通系数可由式(9-54)和式(9-61)设 $\lim_{L \rightarrow \infty} F_{ij}$ 而求出,并可用下式表示

$$F_{14} = F_{41} = \frac{\sqrt{W^2 + H^2} - H}{W} \quad (9-99)$$

$$F_{12} = F_{13} = F_{21} = F_{31} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{W + H - \sqrt{W^2 + H^2}}{W} \right\} \quad (9-100)$$

在无限长的隧道情况下,各个面的面积为无限大,由于考察照度时可在单位长度上考察,因此

$$A_1 = A_2 = W, \quad A_3 = A_4 = H \quad (9-101)$$

如今若用 $g_{ij} = A_i F_{ij}$ 这个记号表示,则由式(9-80)

$$E_i = E_{oi} + \sum_{j=1}^4 \rho_j g_{ij} E_j / A_i \quad (9-102)$$

在这里,若 U_{oi} 为对于面 i 的直接利用系数, U_i 为利用系数,则式(9-102)可以改写成

$$U_i = U_{oi} + \sum_j g_{ij} \cdot \rho_j \cdot U_j / A_i \quad (9-103)$$

当把此式代入式(9-99)~(9-101)时,得到计算利用系数用的相互反射方程式(9-104)

$$\begin{bmatrix} 1 & -\beta\rho_2 & -\beta\rho_3 & -\alpha\rho_4/n \\ -\beta\rho_1/n & 1 & -r\rho_2 & -\beta\rho_4/n \\ -\beta\rho_1/n & -r\rho_2 & 1 & -\beta\rho_4/n \\ -\beta\rho_1/n & -\beta\rho_2 & -\beta\rho_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{o1} \\ U_{o2} \\ U_{o3} \\ U_{o4} \end{bmatrix} \quad (9-104)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \sqrt{n^2 + 1} - 1, \quad \beta = \frac{1}{2}(n + 1)\sqrt{n^2 + 1} \\ \gamma &= \sqrt{n^2 + 1} - n, \quad n = W/H \end{aligned} \right\} \quad (9-105)$$

(4) 因相互反射而引起色偏移的计算 设计室内的色彩调配时,如果实际采用通过观察色标而认为好的颜色,结果会出现刺眼的颜色而失败的情况。这是由于相互反射分光反射率的峰值因此而加强的地方大的缘故。

假定用作照明的光源的分光能量分布为 $P(\lambda)$, 面 i 分光反射率为 $\rho_i(\lambda)$ 时,由于直射光而产生的面 i 的辐射出射度 $M_{oi}(\lambda)$ 为

$$M_{oi}(\lambda) = \rho_i(\lambda) \cdot P(\lambda) \quad (9-106)$$

若相互反射后面 i 的辐射出射度为 $M_{ii}(\lambda)$, 则由式(9-79)得

$$M_{ii}(\lambda) = M_{oi}(\lambda) + \rho_i(\lambda) \sum_{j=1}^n F_{ij} M_{jj}(\lambda) \quad (9-107)$$

若再运用式(9-82),则得

$$M_{ii}(\lambda) = \sum_{j=1}^n G_{ij}(\lambda) \cdot M_{oj}(\lambda) \quad (9-108)$$

($i, j = 1, 2, \dots, n$)

运用式(9-108),能够求出在各波长 λ 上的辐射出射度。面 i 的相互反射之前和之后的色度坐标 (x_{oi}, y_{oi}) 和 (x_i, y_i) 分别为式(9-109)和式(9-111)所给定。

$$\begin{pmatrix} x_{oi} \\ y_{oi} \end{pmatrix} = \frac{1}{X_{oi} + Y_{oi} + Z_{oi}} \begin{pmatrix} X_{oi} \\ Y_{oi} \end{pmatrix} \quad (9-109)$$

其中

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X_{oi} \\ Y_{oi} \\ Z_{oi} \end{pmatrix} &= \int M_{oi}(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} d\lambda / \int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ &= \int \rho_i(\lambda) P(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} d\lambda / \int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (9-110)$$

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \frac{1}{X_i + Y_i + Z_i} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} \quad (9-111)$$

其中

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} &= \int M_{oi}(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} d\lambda / \int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ &= \int \rho_i(\lambda) \sum_{j=1}^n G_{ij}(\lambda) P(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} d\lambda / \int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (9-112)$$

9-5-5 按相互反射的能量守恒定律来处理问题

相互反射的复杂问题也由于适用能量守恒定律,因而有简单的解决办法。这里作为实例,举出多层乳白板滤光系统的综合透过率、综合反射率的计算。

多层滤光器系统的综合透过率、综合反射率

把 n 块乳白板重叠起来时,用图 9-56 所示的符号表示在各乳白板的介质内和边界上的反射率、透过率、入射光量时,在这些量之间,由于能量守恒定律,一般来说,下面的关系式成立〔28〕。

$$\begin{aligned} I'_i &= T_i I_i + R_i J_i \\ I_{i+1} &= (1 - r'_i) I'_i + r_{i+1} \cdot J_{i+1} \\ J'_i &= (1 - r_{i+1}) J_i + r'_i \cdot J'_i \\ J_i &= T_i \cdot J'_i + R_i \cdot I_i \end{aligned} \quad (9-113)$$

式 (9-113) 若用矩阵式来表示则得

$$\begin{bmatrix} I_i \\ J_i \end{bmatrix} = [r(i)] \begin{bmatrix} I'_i \\ J'_i \end{bmatrix} \quad (9-114)$$

其中

$$[r(i)] = \begin{bmatrix} 1 & -R_i \\ \frac{R_i}{T_i} & \frac{T_i^2 - R_i^2}{T_i} \end{bmatrix} \quad (9-115)$$

以及

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ J'_i \end{bmatrix} = [r(i)] \begin{bmatrix} I_{i+1} \\ J_{i+1} \end{bmatrix} \quad (9-116)$$

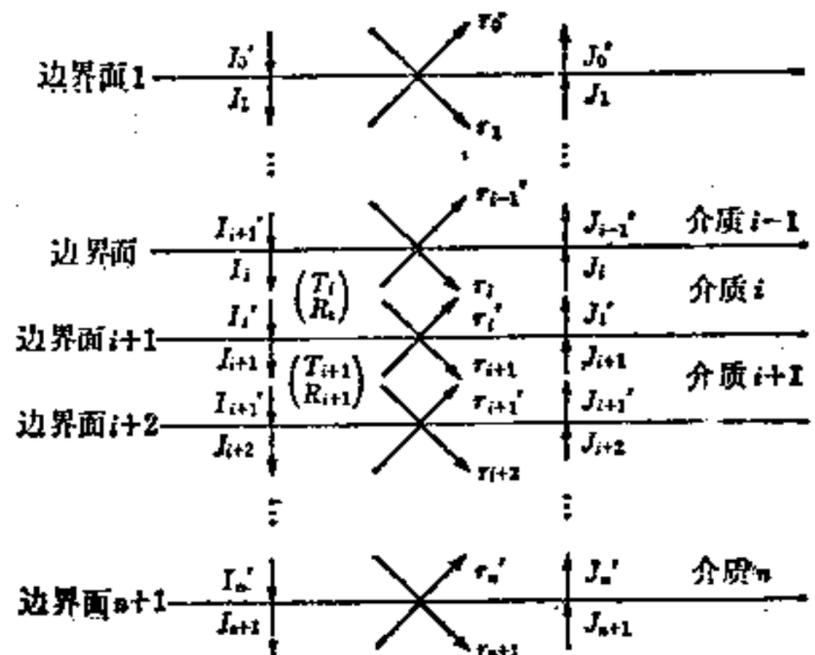


图9-56 为计算多层乳白滤光器系统的综合反射率、综合透过率用的符号说明图

- 〔符号〕 r'_{i-1} 在介质 $i-1$ 的边界面 i 上的界面反射率
 r_{ii} 在介质 i 的边界面 i 上的界面反射率
 R_{ii} 介质 i 的内部反射率
 T_{ii} 介质 i 的内部透射率
 I'_{i-1} 从介质 $i-1$ 入射到边界面 i 上去的入射光量
 I_{ii} 从介质 i 入射到界面 i 上去的入射光量
 J'_{i-1} 从边界面 i 入射到介质 $i-1$ 上去的入射光量
 J_{ii} 从边界面 i 入射到介质 i 上去的入射光量

其中

$$[r(i)] = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-r'_i} & \frac{-r'_{i+1}}{1-r'_i} \\ \frac{r'_i}{1-r'_i} & \frac{(1-r'_i)(1-r'_{i+1}) - r'_i \cdot r'_{i+1}}{1-r'_i} \end{bmatrix} \quad (9-117)$$

从而, 把 n 块乳白板重叠起来时, 在各层内光被完全散射, 若看作是扩散的, 则得

$$\begin{bmatrix} I'_0 \\ J'_0 \end{bmatrix} = [r(0)] \prod_{i=1}^n \{ [I(i)] [r(i)] \} \begin{bmatrix} I_{n+1} \\ J_{n+1} \end{bmatrix} \quad (9-118)$$

在上式中, 若令 $I'_0 = 1$, $J_{n+1} = 0$, 则 J'_0 成为这个滤光系统的综合反射率 ρ , I_{n+1} 为综合透过率, 于是

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \rho \end{bmatrix} = [r(0)] \prod_{i=1}^n \{ [I(i)] [r(i)] \} \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9-119)$$

设把二块单体反射率为 $\rho(1)$ 、透过率为 $\tau(1)$ 的乳白板叠加在一起时的综合反射率为 $\rho(2)$, 综合透过率为 $\tau(2)$, 则在它们之间若运用式 (9-119), 则可证明存在下面的关系式

$$\rho(1) = \sqrt{1 - \frac{\tau(1)^2}{\tau(2)}} \quad (9-120)$$

$$\tau(1) = \sqrt{\rho(1)^2 - \frac{\rho(2)}{\rho(1)} [\rho(1)^2 - 1] - 1} \quad (9-121)$$

9-6 一般照明平均照度的计算

9-6-1 利用系数计算的基础

(1) 光通法 一般照明是指如室内照明之类的照明, 相对于局部照明来说, 其效率和均匀性都比较好。在设计一般照明时, 虽然也可以考虑通过侧窗和天窗等来利用日光, 但对于办公室等类照明来说, 因为云天和雨天多, 而且又有夜间的活动, 只能把日光当作辅助性的, 主要根据充分满足夜间的的使用要求进行照明设计。为了经济起见, 要节约电能, 因此根据所谓光通法进行设计。为了有效地利用考虑光能的视感效率的光通, 就要把提高利用系数——工作面光通与光源总光通之比作为一个指标。

对室内照明来说, 除了由光源产生的工作面的直射照度以外, 还有由墙壁、顶棚的相互反射所产生的扩散照度。要准确地计算出由相互反射产生的扩散照度是困难的, 而且, 在通常的反射条件下, 相对于由直射照度产生的直接利用系数 DR 来说, 相互反射的增强不会超过 20~30%, 因此, 建立严格的条件, 即使能够得到相互反射的精密的解, 也没有什么实用价值。比较实用的是, 把许多照明条件简化, 以一定的精度为目标来求解。本节后面列举的三个方法就是根据这个原则的。

(2) 积分方程式解法 把房间当作没有外来光影响的封闭曲面。把光源看成只有一种配光的点光源, 其位置只对直射照度有影响, 而对扩散照度没有影响。为了忽略光源本身对相互反射光通的吸收和反射等影响, 不考虑光源的大小。曲面为凸曲面, 其内部没有隔板等障碍物, 相互反射可以非常自由地进行。

设受光面元具有完全扩散反射率 ρ , 虽然 $1 - \rho = \tau + \alpha$, τ : 透过率, α : 吸收率, 但是现在不考虑外部的影响, 只考虑吸收率。在凸闭曲面 A 上取 x, y 点, 令全照度为 $E(x), E(y)$, 点光源产生的直射照度为 $E_0(x), E_0(y)$, 扩散照度为 $E_d(x), E_d(y)$, 在各点有:

$$E(x) = E_0(x) + E_d(x) \quad (9-122)$$

在面元 $dA(y)$ 上的全照度为 $E(y)$, 则其完全扩散反射的面发光度为 $\rho(y)E(y)$, 亮度为 $\rho(y)E(y)/\pi$, 面元在 x 方向的光强为 $dI = \rho(y)E(y)/\pi \times dA(y)\cos\alpha_y$, 对 $E_d(x)$ 的贡献则为 $dE_d(x) = dI\cos\alpha_x/r^2 = \rho(y)E(y)dA(y)\cos\alpha_x\cos\alpha_y/\pi r^2$ 。令系数为 $e_0(y, x)$, 则式(9-122)变成下式:

$$E(x) = E_0(x) + \iint_A \rho(y)E(y)e_0(y, x)dA(y) \quad (9-123)$$

这是 Fredholm 形的线性积分方程式, ρ 为常数时就成为对称核。系数 $e_0(y, x)$, 是当 y 点是单位面发光度的二次面光源时, 在 x 点产生的照度为 $e_0(y, x)dA(y)$ 时的系数, 称为固有照度系数, 是纯几何学的量。

$$e_0(y, x) = \cos\alpha_x\cos\alpha_y/\pi r^2 = e_0(x, y) \quad (9-124)$$

简单的积分方程式, 虽然也有变换成微分方程式求解的情况, 但一般来说, 展开为级数解是困难的, 实际上是用由山内^[1]最先引进, 后经 P. Moon 和 D. E. Spencer^[30]发展的解法求解的。在原理上, 得到一般性的解法当然好, 但对实际的室内照明计算来说, 因为必须考虑长方体内面的情况, 所以归根到底, 其解法和联立方程式解法相同。

如果考虑凸闭曲面是半径为 R 的球面的情况, 因为 $A = 4\pi R^2$, $e_0(y, x) = \cos^2\alpha_x/\pi r^2 = 1/4\pi R^2 = 1/A$ 为常数, 代入 $E_d(x) = E_d(y)$ 的条件, 则

$$\begin{aligned} E_d &= 1/A \cdot \iint \rho(y)E_0(y)dA(y) + \frac{1}{A} \cdot E_d \iint \rho(y)dA(y) \\ E_d &= \iint \rho E_0 dA / \left(A - \iint \rho dA \right) \end{aligned} \quad (9-125)$$

在 ρ 为常数的积分球情况, 就变得更为简单:

$$E = E_0 + \frac{\phi}{A} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (9-126)$$

这当然和别的解法结果一致。(9-125) 式的应用范围很广, 既可用于 ρ 不是常数的情况, 也可用于缺少一部分球面的情况, 只需令所缺部分的 $\rho = 0$ 即可。

若考虑平均反射率 $\bar{\rho}$ 或等效反射率 ρ_{eff} , 则因

$$\bar{\rho} = \rho_{eff} = \iint \rho dA / A \quad (9-127)$$

如用 $\bar{\rho}$, 则扩散照度的大概的数值从积分球的 (9-126) 式也可计算出来^[7]。如果把地面平均照度看成是 E_0 , 则 ϕ/A 就是对全曲面的平均照度, 可以按 E_0 的 $1/4 \sim 1/3$ 来估价, $\bar{\rho}$ 的实用上的界限是 0.5, 这时系数 $\rho/(1 - \rho)$ 为 1.0, 是最高值, 也就是说扩散照度为直射照度的 $1/4 \sim 1/3$ 。要想更严格的决定扩散照度时, 可以根据后述的简略式或具体的利用系数表。

(3) 光通的三法则 光通的主要性质从 (9-123) 的积分方程式或后述的联立方程式中也可以看出, 有如下三项:

- (1) 线性;
- (2) 光通传播的可逆性、交换性;
- (3) 光通的保存性、吸收性。

线性意味着光源的照度分布的叠加法则和配光特性的加法分解法则成立。实际的利用系数表是根据适当的配光分类制成的、至于中间的配光,可用线性内插法求得利用系数。如果把配光分得更细,虽然也可能制成万能利用系数表,但从表中不能直接读出所要的利用系数,这样,事前或事后的计算量就增加,因此实用性不大。对于近乎直读的利用系数表来说,因为其数据还是相当多,使用时最重要的是选择好数据和很好地利用内插法。

光通传播的可逆性、交换性是以光线的可逆性为基础的,包含了光的量和质两方面的可逆性。就是说,它是以波长分布不变、光通可逆地进行传播为前提条件的几何光学和照明工程的概念。伴随有物理光学现象的过程就没有可逆性。

例如,受光器接受光通后,产生电流,此电流又使电灯发光,产生与原来不同的光通,这种系统就没有可逆性。还有一种情况是无选择性的吸收体把所接收到的光通转换成别的能量,并携带出系统外,而系统内没有发光,这系统也没有可逆性。

此外,荧光涂料没有波长变换的可逆性。各向异性的介质、偏光性的物质也没有波长变换的可逆性。

再看看几何光学的一般现象:反射、透射、吸收。对于把能量带出系统外的透射,或者对于吸收来说,可逆性是不成问题的。但对于反射来说,可逆性就有问题。肥後、室井^[32]对此进行了研究,认为如果没有扩散反射,可逆性就得不到保证。对于包括正反射的所谓镜面反射,在入射角等于出射角的条件下,可逆性成立。

具体地说,可逆性表现为(9-124)式中固有照度系数的对称性。除了凸闭曲面内的总反射的次数外,把 x 点的照度分级地规定为 E_0, E_1, E_2, \dots ,如果考虑与直射照度 E_0 、扩散照度 $E_k = E_1 + E_2 + \dots$ 、全照度(最终照度) $E = E_0 + E_1 + E_2 + \dots$ 相对应的光通分别为 $\Phi_0, \Phi_k, \Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi$,则

$$E_k(x) = \iint \rho(y) E(y) e_0(y, x) dA(y) \quad (9-128)$$

$$E_i(x) = \iint \rho(y) E_{i-1}(y) e_0(y, x) dA(y) \quad (9-129)$$

$$i \geq 1$$

因为两式中的 $e_0(y, x)$ 对于 x, y 是对称的, x, y 可以交换。 $\rho(y) E_{i-1}(y)$ 是 y 点所提供的面发光度($\pi \times$ 亮度),产生 $E_i(x)$ 。如果 x, y 交换,并把同一面发光度给予 x 点的话,在 y 点就产生同样的照度。准确地说,把两边对 $dA(x)$ 积分,把 $A(x), A(y)$ 面互相交换,如果认为其他曲面的 $\rho = 0$,则

$$\begin{aligned} \Phi_i(x)_y &= \iint E_i(x) dA(x) \\ &= \iiint \rho(y) E_{i-1}(y) e_0(y, x) dA(x) dA(y) \end{aligned} \quad (9-130)$$

$\Phi_i(x)_y$ 是从 $A(y)$ 面向 $A(x)$ 面传播的光通。因此,如果 x 面提供同样的面发光度,那末,就有同样的光通传播到 $A(y)$ 面。也可以把面发光度换成亮度,在这种情况下,假定 $A(x)$ 、

$A(y)$ 面的亮度分别是 L_1, L_2 , $A(x)$ 向 $A(y)$ 和 $A(y)$ 向 $A(x)$ 传播的光通分别是 Φ_1, Φ_2 , 则

$$L_1 \Phi_2 = L_2 \Phi_1 \tag{9-131}$$

这种形式就称为交换性。在后面所述的 n 面体情况下, L, Φ 一起变成 n 次的纵向量, 其关系变成 n 元联立方程式, 用 n 次的行列式联系起来。因此, 在这种情况下, n 次矢量的数量积可用同样的形式, 即

$$\left. \begin{aligned} (L)^T(\Phi') &= (L')^T(\Phi) \\ \Sigma L\Phi' &= \Sigma L'\Phi \end{aligned} \right\} \tag{9-132}$$

光通的保存性以能量的守恒性为基础, 但光通是能量的功率, 所以, 不能简单对待, Matcarlist 指出, 在闭曲面 (这种情况, 不是凸的也可以) 中, 如果给予初始光通 Φ_0 , 则在达到稳定状态时, 在闭曲面内只有扩散光通 Φ_k 增加, 而最终光通 Φ 维持不变, 在壁面则有和 Φ_0 相等的光通被吸收。这就称为光通的保存性。

如果壁所吸收的光通为 Φ_a , 因为吸收是由最终照度 $E(x)$ 所决定的, 计算结果为

$$\begin{aligned} \Phi_a &= \iint \{1 - \rho(x)\} E(x) dA(x) \\ &= \iint E dA - \iint \rho E dA = \Phi - \Phi_k = \Phi_0 \end{aligned} \tag{9-133}$$

这证明 $\Phi_a = \Phi_0$ 。这样看来, 与其叫光通的保存性, 不如叫光通的吸收性更为妥当。在闭曲面内部不存在遮光板等吸收体时, 光通的这个性质很好理解, 它相当于振荡电路、电磁波的空腔。

(4) 联立方程式解法 山内最先把凸的闭合 n 面体内的相互反射公式化。采用和前面相同的符号, x, y 为 $1 \sim n$ 面的号码, $A(x)$ 为面 (x) 的面积, 面 (x) 的光度学量有: 完全扩散反射率 $\rho(x)$ 、照度 $E(x)$ 、面发光度 $M(x) = \rho(x)E(x)$ 、亮度 $L(x) = \rho(x)E(x)/\pi$ 、光通 $\Phi(x) = \iint E(x) dA(x) = \bar{E}(x)A(x)$ 、由面 (y) 的 $E(y)$ 传播到面 (x) 的光通 $\Phi(x)_y$ 。把总反射的次数附在下标。

虽然面的光度学量也可以理解为面上是均匀的, 但最好看成是面上的平均值。因为光通是积分值, 两者没有什么差别。但 ρ, E, M, L 和 $\bar{\rho}, \bar{E}, \bar{M} = \iint \rho E dA/A$, 则有些差别。在基础方程式中, 如果采用面发光度和照度, n 次的矢量关系式用矩阵

$$T_{xy} \cdot M_{j-1} = E_i \tag{9-134}$$

实际求 T_{xy} 时, 根据 (9-130) 式

$$T_{xy} = \iiint e_0(y, x) dA(x) dA(y) / A(x) \tag{9-135}$$

T_{xy} 纯粹是几何学的量, 叫做固有入射光通系数。互易律可用 $T_{xy} \cdot A(x) = T_{yx} \cdot A(y)$ 表示, 意思就是用相同的面发光度传播同样的光通。 (x) 面如果是平面, 则 $T_{xx} = 0$, 对于全闭曲面的总和来说, 则有 $\Sigma T_{xy} = 1$ 的性质。从 (9-124) 式

$$\begin{aligned} T_{xy} M &= E_k = (M/\rho) - (M_0/\rho) \\ (\delta_{xy}/\rho - T_{xy}) M &= M_0/\rho \\ M &= (\delta_{xy}/\rho - T_{xy})^{-1} \cdot (M_0/\rho) \end{aligned} \tag{9-136}$$

和从初始面发光度 M_0 ，求出最终的面发光度 M 。如果用包含有 ρ 的光学系数 G_{xy} ，则

$$M = G_{xy} \cdot M_0 \quad (9-137)$$

只要求出 G_{xy} ，问题就得到具体的解决。为了用于实际的室内照明，可以把房间看成是有六个面的长方体，如果进一步把壁面省略，像圆柱体那样当作一个面处理，就更为简单。

室指数 K_r ，有一个大致的标准。顶棚高度为 H (m)，长度为 L (m)，宽为 W (m) 时，室指数

$$K_r = WL/H(W + L) \quad (9-138)$$

因为室指数是和室的形状有关的纯几何学的量，所以，使室指数不变，而室的形状从长方形变为正方形和圆柱形，则计算更为简单。

使用室指数就能够计算出前面所说的固有入射光通系数。把六面体的顶棚面、墙壁面、地面的下标分别记作 c 、 w 、 f (O'Breien 使用 2、1、3，Dourgnon 使用 1；2，3；4 的数字)。则

$$T_{cw} = T_{fw} = 1 - T_{cf} \quad (9-139)$$

$$\begin{aligned} T_{cf} &= T_{fc} \\ &= \left(\frac{1}{2} \pi K_r^2\right) \left\{ \lg(1 + 4K_r^2) / \sqrt{1 + 8K_r^2} - 4K_r \tan^{-1} 2K_r \right. \\ &\quad \left. + 4K_r \sqrt{1 + 4K_r^2} \tan^{-1} 2K_r / \sqrt{1 + 4K_r^2} \right\} \end{aligned} \quad (9-140)$$

同样，在圆柱面的情况下，有

$$\begin{aligned} T_{cf} &= 1 - (\sqrt{1 + 4K_r^2} - 1) / 2K_r^2 \\ &\quad (K_r = D/2H) \end{aligned} \quad (9-141)$$

(9-141) 式在 $K_r > 5$ 时，误差为 1%， $K_r = 2$ 时，误差为 3%，在 2 以下时，则近似性更差。

此外， ρ_{eff} 的考虑还是有效的。从地面所看到的室指数为 K_r 的房间的等效反射率，有佐土根的 (9-142) 式，Moon、Spencer 的 (9-143) 式，英国 IES 的 (9-144) 式等。在 (9-143) 式中，使用的室指数 (domance) $K_d = 1/2K_r$ 。

$$\begin{aligned} \rho_{eff} &= \{ \rho_w (1 - T_{cf})^2 K_r (0.5 + \rho_c T_{cf}) + \rho_c T_{cf}^2 - \rho_c \rho_w T_{cf}^2 [1 - K_r (1 - T_{cf})] \} / \{ 1 - \rho_w \\ &\quad + 0.5 \rho_w (1 - T_{cf}) K_r [2 - \rho_c (1 - T_{cf})] \} \end{aligned} \quad (9-142)$$

$$\begin{aligned} \rho_{eff} &= \{ [\rho_w (1 + \rho_c) - 2\rho_c] \sinh 2K_d \sqrt{1 - \rho_c} + 2\rho_c \sqrt{1 - \rho_w} \cosh 2K_d \sqrt{1 - \rho_w} \} \\ &\quad / [2 - \rho_w (1 + \rho_c)] \sinh 2K_d \sqrt{1 - \rho_w} + 2\sqrt{1 - \rho_w} \cosh 2K_d \sqrt{1 - \rho_w} \} \end{aligned} \quad (9-143)$$

$$\rho_{eff} = [\rho_c K_r^2 + 2\rho_w K_r] / [K_r^2 + 2K_r (2 - \rho_c) + 4(1 - \rho_w)] \quad (9-144)$$

(9-143) 式在 $K_r < 2$ 时产生误差。(9-144) 式在 ρ_c 和 ρ_w 之差大时，误差就大。

在 $\rho_c = \rho_w$ 的条件下，从 (9-144) 式可得

$$\rho_{eff} = \rho_c / [1 + 2(1 - \rho_c) / K_r] \quad (9-145)$$

由于 $\rho_{eff} < \rho_c$ ，结果 ρ_c 因为长方体空腔的高度 H 的关系，反射效果变坏，其变坏的程度可用 $(1 - \rho_c) \cdot H$ 或 $(1 - \rho_c) / K_r$ 表示。如果 $K_r \rightarrow \infty$ ，也就是相对高度变小的话，反射率就不会降低。

如果 $\rho_c \rightarrow 1$ ，相互反射就能充分地进行，反射照度就非常高，反射率的降低就少。在立方体的条件下，因为 $K_r = 0.5$ ，从 (9-145) 式，对于 $\rho_c = 0.7$ 、 0.5 、 0.3 ，分别可得 ρ_{eff} 为 $1/2.2$ 、 $1/3$ 、 $1/3.8$ 。反射板的反射性能必须用面发光度 $M = \rho E$ 来评价，例如，即使反射

率相同, 视角也相同, 照度是按与光源的距离的平方成反比地降低的。这个事实可以看成由于相互反射的结果, 反射率随距离 H 的一次方面降低。

如果长方体的 ρ 一样, 当然可以用作光通计, 关于这个问题, 现正在进行理论和实验的详细研究^[38]。对于实际的室内照明, 如果也用前面的 ρ_{eff} 来考虑, 可能会有很大的参考价值。作为一个例子, 在 $\rho = 0.7$ 时, 可以见到扩散照度 E_s 有10%的较大的不均匀性。如果进一步提高 ρ , 比如 $\rho = 0.9$ 时, 由于相互反射充分进行的结果, 不均匀性变为百分之几以下, 如果是等距离的积分球, 不均匀性就可以控制在1%以下。

(5) 解法的比较 假定凸闭曲面上的反射率具有完全的扩散性, 就可以正确地用积分方程式(9-123)来表示。但是很难得到一般解, 只能得到近似解。对于凸多面体, 把边界条件代入上式, 就可以转化为多元联立方程式(9-134)。但是, 这只是在各面上的 ρ 一样而且不存在照度不均匀性的理想情况时才是正确的。通常对面上的平均值求解, 可以得到好的近似解。要提高精度时, 就要认真考虑六面的相互反射系统, 把一个点光源的配光分成下向配光和上向配光, 考虑光源的位置分别决定六面的 DR , 这大概是实用上最精密的决定初始照度的方法。

9-6-2 室指数

(1) 概述 在计算利用系数时, 必须求出由室的形状决定的室指数。这个室指数在室的形状的标准化方面具有重要的意义, W. Harison 和 E. A. Anderson 对正方形室进行了严密的定义^[39]。但是, 对于矩形室, 久野清等人的研究指出^[40], 两三个关于把矩形室变换为正方形室的方案误差较大。

久野清提议, 在矩形室时, 把两边(宽 b , 长 l)的调和中项, 即 b 和 l 之积除以 b 和 l 之平均作为正方形室的一边, 这个概念现在已被采用作为室指数。

(2) 单纯尺度 如果用矩形室的两边 b 和 l 的调和中项 λ 作为尺度, 则以调和中项为尺度的室的高度 H 可用(9-146)式表示。

$$H = \frac{h}{\lambda} \quad (9-146)$$

式中 h : 室的高度; $\lambda: \frac{b \cdot l}{\frac{b+l}{2}}$ 。

久野清证明, 如果把任意的矩形室换成这个 $1 \times 1 \times H$ 的等效正方形室进行照明计算, 可以得到在实用上足够的准确度。

(3) 等效正方形置换的理论 作为证明可以把任意的矩形室当作等效正方形室的例子, 考虑从顶棚面直接入射到地面的光通。

长方体室的顶棚面, 具有均匀的单位亮度时, 直接入射到地面的光通可用下式表示^[41]:

$$\begin{aligned} \phi_v = 4 \left\{ l^2 \left[\varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{l}{\sqrt{b^2 + l^2}} \right) - \varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{l}{h} \right) \right] \right. \\ \left. + b^2 \left[\varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{l^2 + h^2}} \right) - \varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{b}{h} \right) \right] \right\} \quad (9-147) \end{aligned}$$

式中 ϕ_v : 直接入射到地面的光通; h : 室高; b, l : 室宽和室长。

$$\varphi_2(\omega) = \frac{1}{2} \left(\omega \cot \omega - \frac{1}{2} \lg \sin \omega + \frac{1}{2} \cot^2 \omega \lg \cos \omega \right)$$

因此，当顶棚面发射单位光通时，地面的平均照度可用下式表示：

$$\begin{aligned}
 E_{av} &= \frac{\Phi_v}{\pi \cdot b \cdot l} \\
 &= \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{l}{b} \left[\varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{l}{\sqrt{b^2 + h^2}} \right) - \varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{l}{h} \right) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{b}{l} \left[\varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{l^2 + h^2}} \right) - \varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{b}{h} \right) \right] \right\} \quad (9-148)
 \end{aligned}$$

式中， E_{av} ：地面平均照度。

虽然这个公式是由 b/h 、 l/h 决定的，但是对于用单纯的尺度测定的等效高度 H 和 l/b 的关系来说，如果地面是正方形的话，(9-148) 式就可简化为下式：

$$E_{av} = \frac{8}{\pi} \left[\varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + H^2}} \right) - \varphi_2 \left(\tan^{-1} \frac{1}{H} \right) \right] \quad (9-149)$$

可是，一般来说，实际上大部分的室的 H 都在 2 以下， b/l 在 4 以下，研究这个范围内的 b/l 、 H 和平均照度的关系，可得图 9-57 的曲线，已经证明，可以用实用上足够的准确度把它计算出来〔42〕。

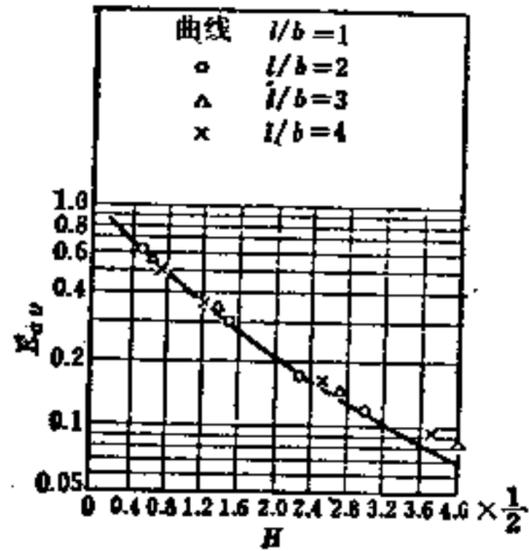


图9-57 E_{av} 和 H 的关系

(4) 室指数 在实际所涉及的光通范围内，可以证明，长方体内的一次光通只有 H 的函数，把长方体当作等效正方形对待的室指数概念就建立在这个基础上。因此，假定正方形室的边长为 x ，则室指数 R_r 可按下式定义：

$$R_r = \frac{b \cdot l}{h(b + l)} = \frac{x}{2h} \quad (9-150)$$

美国照明学会在照明设计中采用带域空间法，用室系数 K_{rs} 代替室指数，应该明确地把它和室指数区别开来。

$$K_{rs} = \frac{5h(b + l)}{b \cdot l} \quad (9-151)$$

9-6-3 三配光法

(1) 概述 1916年，W.Harrison 和 E.A.Anderson 在模型房间中用标准配光的光源进行了实验，发表了根据光通法计算平均照度的基础资料〔43〕，〔44〕以后很长时间都用它来计算平均照度。

但是，三配光法的基本数据是在地面的反射率 ρ_f 为 14%，照明器的安装间隔 S 和工作面上方照明器安装高度 h_{wp} 之比 S/h_{wp} 为 1.5~2.0 的限制条件下作成的，现在已不大采用了。

(2) 利用系数的计算 把照明器发出的总光通分为直接分量 ϕ_d 、水平分量 ϕ_h 和间接分量 ϕ_i ，对各个光通乘以由室指数 R_r 和顶棚面以及墙壁面的反射率决定的分布系数，从这三者之积的和求得入射到工作面上的有效光通，从而算出利用系数。

兹以具有图 9-58 所示的配光特性的照明器为例作具体的说明。首先选择铅直直线光源，使其水平光强为图 9-58 的水平光强 I_h ，

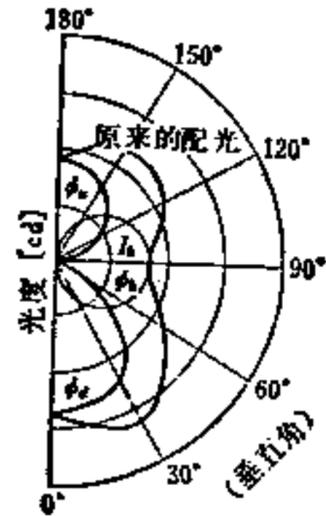


图9-58 配光的分解

把其光通作为水平分量 ϕ_h 。

其次，由 (9-152) 式求光通的直接分量 ϕ_d 和间接分量 ϕ_u 。

$$\left. \begin{aligned} \phi_h &= \pi^2 \cdot I_h \\ \phi_d &= F_{\text{下}} - \frac{\pi^2 \cdot I_h}{2} = F_{\text{下}} - \frac{\phi_h}{2} \\ \phi_u &= F_{\text{上}} - \frac{\pi^2 \cdot I_h}{2} = F_{\text{上}} - \frac{\phi_h}{2} \end{aligned} \right\} \quad (9-152)$$

式中， $F_{\text{下}}$ ：下半球光通； $F_{\text{上}}$ ：上半球光通。

直接型配光的照明器的间接分量，以及间接型配光的照明器的直接分量有时为负值。

然后，令室的开间宽为 b ，进深为 l ，工作面上方照明器的安装高度为 h_{wp} ，根据 (9-150) 式计算室指数 R_r 。从这个 R_r 和顶棚面、墙壁面的反射率的组合，求出对应于直接分量的分布系数 φ_d 、间接分量的分布系数 φ_u 、水平分量的分布系数 φ_h ，根据下式求入射到工作面的光通 ϕ_{wp} 。

$$\phi_{wp} = \phi_d \varphi_d + \phi_u \varphi_u + \phi_h \varphi_h \quad (9-153)$$

因此，利用系数 U 由有效光通 ϕ_{wp} 除以光源的总光通 F_l 求得。

$$U = \frac{\phi_{wp}}{F_l} \quad (9-154)$$

此外，在求有效光通时，因为照明器的配光特性受到与直接分量相对应的分布系数的影响，有必要求出铅直角 $0^\circ \sim 40^\circ$ 内的光通 $\phi(40^\circ)$ ，以便根据下式计算的值来决定与直接分量相对应的照明器的分类：

$$\frac{\phi(40^\circ) - 0.65I_h}{\phi_d} \quad (9-155)$$

9-6-4 美国的带域空间法

(1) 概述 虽然三配光法是以实验为基础的计算方法，但随着计算机的发展，已经有可能进行理论的分析了。美国 IES 的带域空间法就是在 Jones 的球带系数 [46]、有效反射率 [47]~[49] 中引入 O'Brien 的光通传递函数 [50] 完成的，它和 CIE 的带域空间法一起被认为是理论上、实验上最正确的方法。

(2) 室系数 如 9-6-2 [4] 节所述，在带域空间法中用室系数，把长方体的空间划分成图 9-59 那样的三个空间，按下式求出各自的系数：

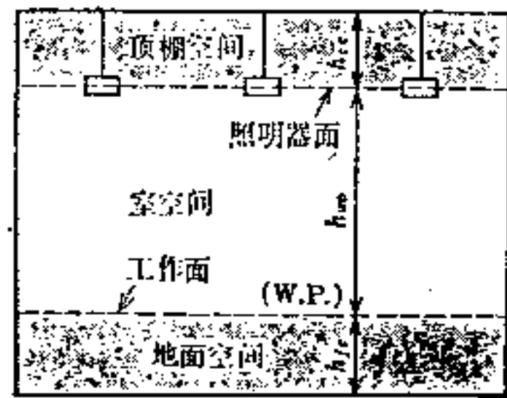


图9-59 室空间的划分

$$\left. \begin{aligned} \text{顶棚空间系数} \quad K_{cc} &= \frac{5h_{cc}(b+l)}{b \cdot l} \\ \text{室空间系数} \quad K_{rc} &= \frac{5h_{wp}(b+l)}{b \cdot l} \\ \text{地面空间系数} \quad K_{fo} &= \frac{5h_{fo}(b+l)}{b \cdot l} \end{aligned} \right\} \quad (9-156)$$

式中 h_{cc} ——从照明器到顶棚的高度； h_{wp} ——从工作面到照明器的高度； h_{fo} ——从工作面到地面的高度。

(续)

	球带 (带域) [°]	室 指 数 R_{re}									
		0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
$S/h_{wp} = 1.0$	0-10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	10-20	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	20-30	0.84	0.88	0.90	0.92	0.94	0.95	0.95	0.97	0.98	0.93
	30-40	0.23	0.41	0.52	0.61	0.68	0.76	0.80	0.84	0.88	0.90
	40-50	—	0.30	0.42	0.52	0.59	0.69	0.75	0.79	0.84	0.87
	50-60	—	—	0.26	0.38	0.48	0.60	0.68	0.72	0.79	0.83
	60-70	—	—	0.01	0.12	0.22	0.38	0.49	0.56	0.66	0.71
	70-80	—	—	—	—	—	0.05	0.15	0.24	0.40	0.50
	80-90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01
$S/h_{wp} = 1.25$	0-10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	10-20	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	20-30	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	30-40	0.41	0.56	0.64	0.72	0.76	0.83	0.87	0.89	0.91	0.93
	40-50	—	0.24	0.35	0.46	0.54	0.66	0.72	0.77	0.82	0.86
	50-60	—	0.16	0.28	0.39	0.47	0.59	0.67	0.72	0.79	0.83
	60-70	—	—	—	0.10	0.19	0.39	0.52	0.58	0.68	0.73
	70-80	—	—	—	—	—	0.05	0.14	0.25	0.40	0.51
	80-90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01
$S/h_{wp} = 1.5$	0-10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	10-20	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	20-30	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	30-40	0.40	0.85	0.88	0.91	0.92	0.94	0.95	0.98	0.97	0.98
	40-50	—	0.14	0.28	0.46	0.55	0.66	0.72	0.77	0.83	0.86
	50-60	—	—	0.22	0.33	0.42	0.55	0.64	0.69	0.76	0.81
	60-70	—	—	0.05	0.14	0.24	0.40	0.50	0.58	0.67	0.73
	70-80	—	—	—	—	—	0.04	0.14	0.25	0.40	0.51
	80-90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01

所示^[51]。另外，这里不用室系数而用室指数。

(5) 相互反射成分的计算 计算相互反射产生的光通时，虽然可以用相互反射的矩阵方程式进行近似计算，可是美国的带域空间法是用O'Brien的传递函数进行计算的。顶棚、墙壁、地面的传递关系可用下式表示：

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{L_w}{L_{ow}} &= \frac{1}{1 - \rho_w} \left(1 - \frac{C_w + C_f}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_w \cdot \frac{\rho_w}{1 - \rho_w} \cdot \frac{A_w}{A_w} \right) \\
 \frac{L_w}{L_{os}} &= \frac{1}{1 - \rho_s} \left(\frac{C_s}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_w \cdot \frac{\rho_w}{1 - \rho_w} \cdot \frac{A_s}{A_w} \right) \\
 \frac{L_w}{L_{of}} &= \frac{1}{1 - \rho_f} \left(\frac{C_f}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_w \cdot \frac{\rho_w}{1 - \rho_w} \cdot \frac{A_s}{A_w} \right) \\
 \frac{L_s}{L_{ow}} &= \frac{1}{1 - \rho_w} \left(\frac{C_w}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_s \cdot \frac{\rho_s}{1 - \rho_s} \right) \\
 \frac{L_s}{L_{os}} &= \frac{1}{1 - \rho_s} \left(1 - \frac{C_w + C_f}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_s \cdot \frac{\rho_s}{1 - \rho_s} \right) \\
 \frac{L_s}{L_{of}} &= \frac{1}{1 - \rho_f} \left(\frac{C_f}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_s \cdot \frac{\rho_s}{1 - \rho_s} \right) \\
 \frac{L_f}{L_{ow}} &= \frac{1}{1 - \rho_w} \left(\frac{C_w}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_f \cdot \frac{\rho_f}{1 - \rho_f} \right) \\
 \frac{L_f}{L_{os}} &= \frac{1}{1 - \rho_s} \left(\frac{C_s}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_f \cdot \frac{\rho_f}{1 - \rho_f} \right) \\
 \frac{L_f}{L_{of}} &= \frac{1}{1 - \rho_f} \left(1 - \frac{C_w + C_s}{C_w + C_s + C_f} \cdot C_f \cdot \frac{\rho_f}{1 - \rho_f} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (9-159)$$

$$\text{式中 } C_w = \frac{(1 - \rho_w)(1 - F_{c \rightarrow f}^2)}{\rho_w(A_c/A_w)(1 - F_{c \rightarrow f}^2) + F_{c \rightarrow f}(1 - \rho_w)}$$

$$C_c = \frac{(1 - \rho_c)(1 + F_{c \rightarrow f})}{1 + \rho_c F_{c \rightarrow f}}$$

$$C_f = \frac{(1 - \rho_f)(1 + F_{c \rightarrow f})}{1 + \rho_f F_{c \rightarrow f}}$$

L_{ow}, L_{oc}, L_{of} ——墙壁面、顶棚面、地面的初始面发光度;

L_w, L_c, L_f ——墙壁面、顶棚面、地面的最终面发光度;

ρ_w, ρ_c, ρ_f ——墙壁面、顶棚面、地面的反射率;

A_c/A_w ——顶棚面积对墙壁面总面积之比;

$F_{c \rightarrow f}$ ——从顶棚面向地面的形状因数。

求相互反射在地面(或工作面)产生的光通时, 首先把照明器的光通分为下半球光通和上半球光通, 对于下半球光通, 又可进一步分为由于地面(或工作面)的反射而重新落在地面(工作面)的成分和由于墙壁面的反射而落在地面(工作面)的成分。

对于下半球光通, 如果把存在于地面的成分用直射光通来表达, 就得(9-160)式:

$$\text{FCC} = \text{DR} \frac{L_f}{L_{of}} \quad (9-160)$$

式中 FCC——入射到地面的光通。

其次, 由于墙壁面的反射而入射到地面(工作面)的成分可以用(9-161)式表示:

$$\text{WC} = L_{ow} \left(\frac{L_f}{L_{ow}} \right) \left(\frac{1}{\rho_f} \right) \quad (9-161)$$

式中 WC——由于墙壁面的反射而入射到地面的光通。

取下半球光通作单位, 令顶棚面积为单位面积, 地面(工作面)上方直到照明器的高度为室空间系数(K_{rs})的1/10, 则墙壁面的面积为 $0.4K_{rs}$, 墙壁面的初始面发光度如下式所示:

$$L_{ow} = \frac{(1 - \text{DR})}{0.4K_{rs}} \cdot \rho_w \quad (9-162)$$

因此, 从(9-160)~(9-162)式, 可得地面(工作面)入射光通对下半球光通之比 DUF:

$$\begin{aligned} \text{DUF} &= \frac{\text{WC} + \text{FCC}}{1} \\ &= \text{DR} \left(\frac{L_f}{L_{of}} \right) + \left(\frac{1 - \text{DR}}{0.4K_{rs}} \right) \left(\frac{L_f}{L_{ow}} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right) \end{aligned} \quad (9-163)$$

从这个式中减去直射光通比 DR, 就得到相应于下半球光通的相互反射成分, 即(9-164)式:

$$\text{DRC} = \text{DR} \left(\frac{L_f}{L_{of}} - 1 \right) + \left(\frac{1 - \text{DR}}{0.4K_{rs}} \right) \left(\frac{L_f}{L_{ow}} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right) \quad (9-164)$$

式中 DRC——相应于下半球光通的相互反射光通。

这个式子, 在 $\text{DR} = 1$ 时, $\text{DRC} = \left(\frac{L_f}{L_{of}} - 1 \right)$, 在 $\text{DR} = 0$ 时, $\text{DRC} = \frac{1}{0.4K_{rs}} \left(\frac{L_f}{L_{ow}} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right)$

是 DR 的一次式。图 9-61~图 9-70 表示变换室指数时的 DR 和 DRC 的关系。

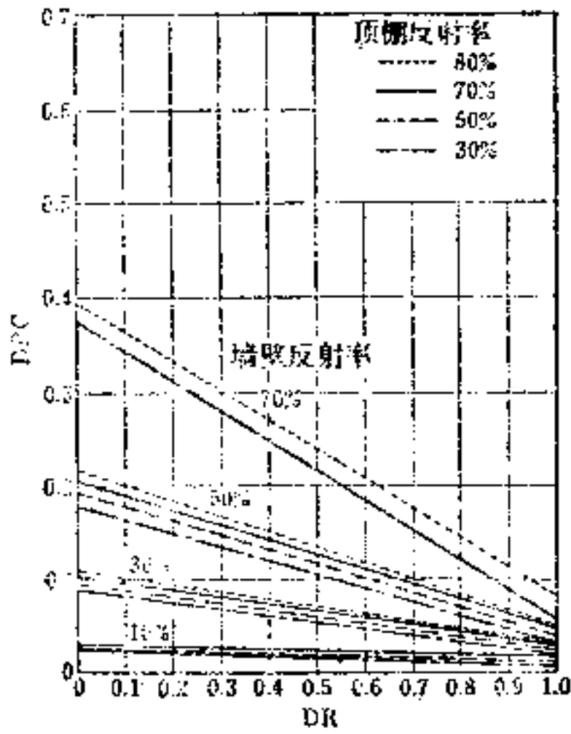


图9-61 DR和DRC的关系
(室指数 $R_r = 0.6$)

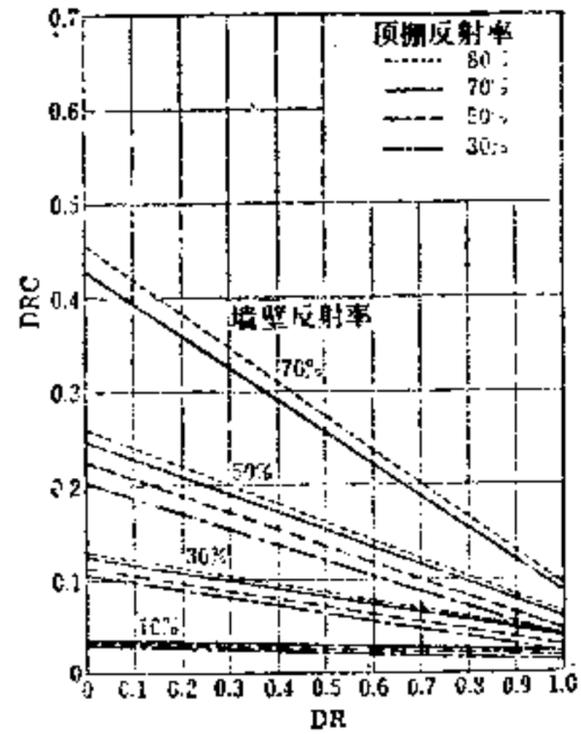


图9-62 DR和DRC的关系
(室指数 $R_r = 0.8$)

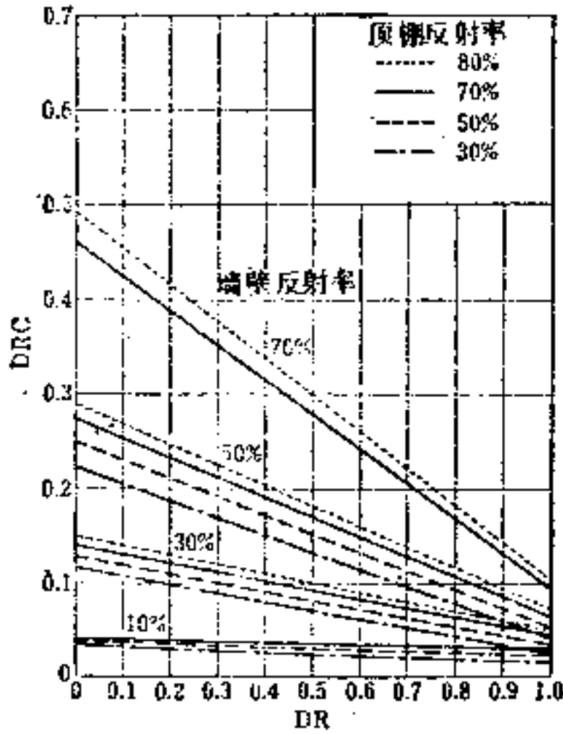


图9-63 DR和DRC的关系
(室指数 $R_r = 1$)

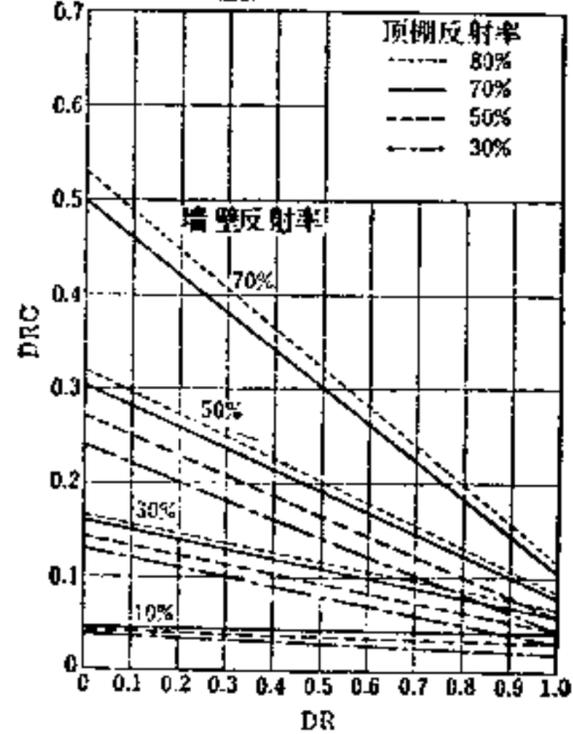


图9-64 DR和DRC的关系
(室指数 $R_r = 1.25$)

其次，对上半球光通进行同样的处理，就得到入射到地面（工作面）的成分：

$$UUF = \frac{L_f / \rho_f}{1} = \left(\frac{L_f}{\rho_f} \right) \left(\frac{\rho_c}{L_{oo}} \right) = \left(\frac{L_f}{L_{oo}} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} \right) \quad (9-165)$$

式中 UUF——与上半球光通相对应的入射到地面的光通。

表9-13是改变室指数时的UUF表。

(6) 利用系数的计算 计算程序如下：

(1) 从照明器的配光特性求照明器的最大安装间隔 (S/h_{wp})。如图9-71^[51]，就非常方便。

(2) 计算室指数，计算假想顶棚面、假想工作面的有效反射率。

(3) 用与 S/h_{wp} 相称的球带系数，对于以 (2) 求出的室指数计算直射光通，求出直

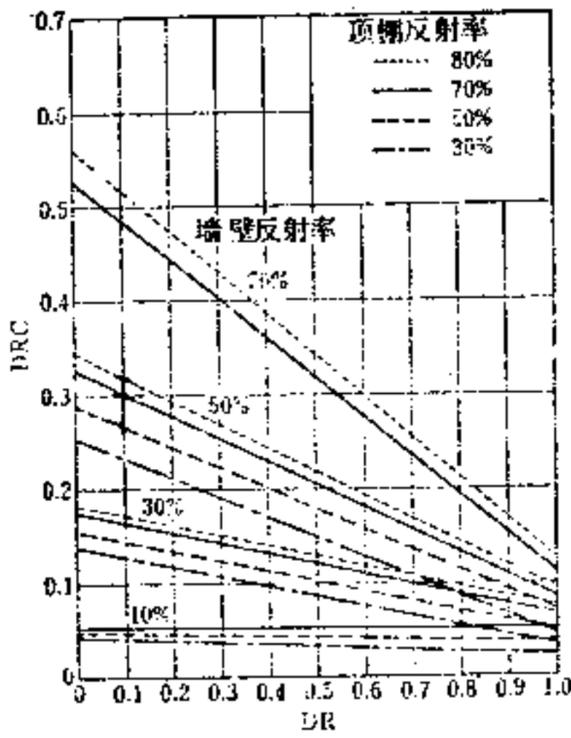


图9-65 DR和DRC的关系
(室指数 $R_r = 1.5$)

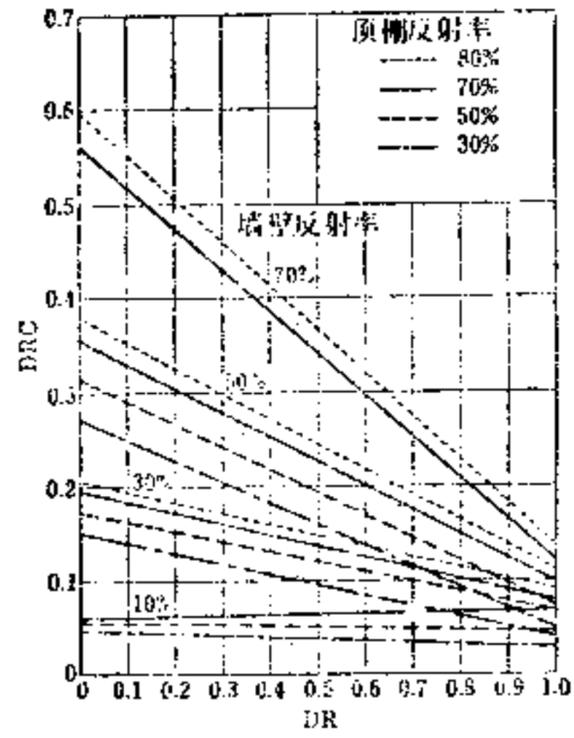


图9-66 DR和DRC的关系
(室指数 $R_r = 2$)

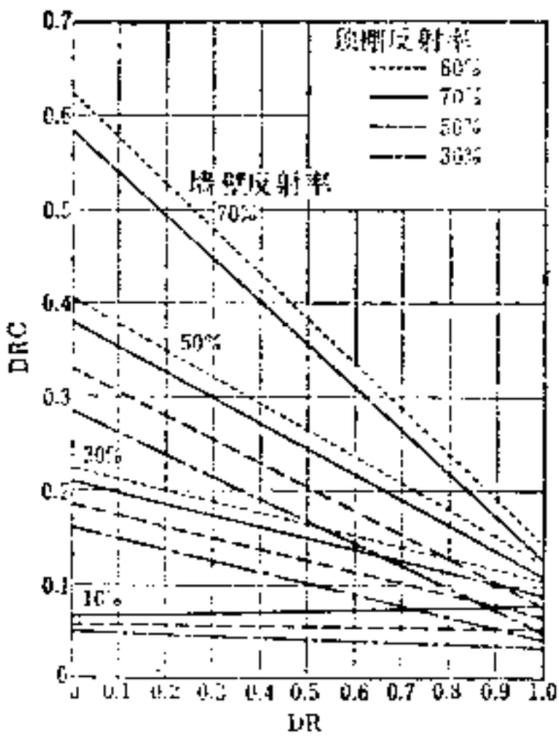


图9-67 DR和DRC的关系
(室指数 $R_r = 2.5$)

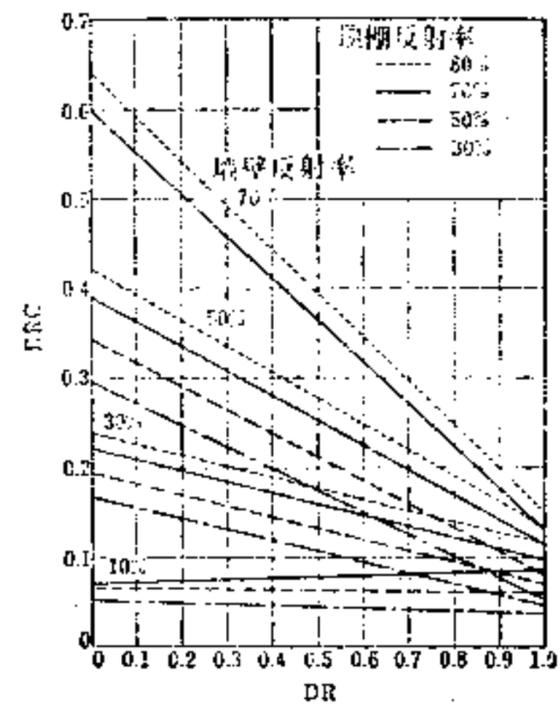


图9-68 DR和DRC的关系
(室指数 $R_r = 3$)

表9-13

求 UUF 的表

0.1205

室指数	顶棚反射率 [%]												
	80			70				50			30		
墙壁反射率 [%]	70	50	30	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10
0.6	0.455	0.340	0.270	0.390	0.295	0.230	0.190	0.205	0.165	0.135	0.120	0.100	0.080
0.8	0.535	0.405	0.355	0.460	0.370	0.305	0.260	0.255	0.215	0.185	0.140	0.125	0.110
1.	0.600	0.495	0.420	0.510	0.425	0.365	0.315	0.290	0.255	0.225	0.170	0.150	0.130
1.25	0.655	0.555	0.485	0.555	0.485	0.420	0.375	0.330	0.295	0.265	0.195	0.170	0.155
1.5	0.695	0.610	0.540	0.590	0.520	0.465	0.420	0.360	0.320	0.295	0.205	0.190	0.175
2.	0.750	0.680	0.615	0.640	0.580	0.530	0.485	0.395	0.370	0.340	0.225	0.215	0.200
2.5	0.785	0.725	0.675	0.670	0.625	0.580	0.510	0.425	0.400	0.380	0.245	0.235	0.225
3.	0.810	0.760	0.710	0.695	0.650	0.610	0.575	0.440	0.415	0.395	0.255	0.240	0.235
4.	0.855	0.800	0.760	0.725	0.685	0.655	0.620	0.470	0.450	0.430	0.270	0.260	0.255
5.	0.885	0.835	0.795	0.740	0.710	0.680	0.655	0.485	0.470	0.450	0.280	0.270	0.265

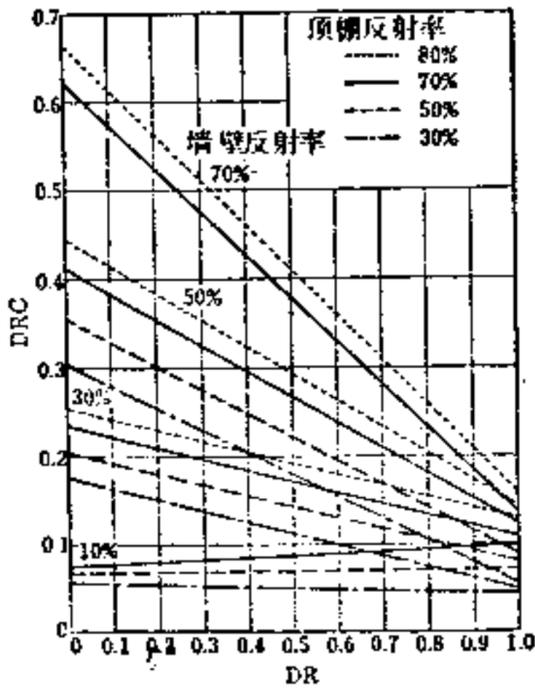


图9-69 DR 和 DRC 的关系
(室指数 $R_r = 4$)

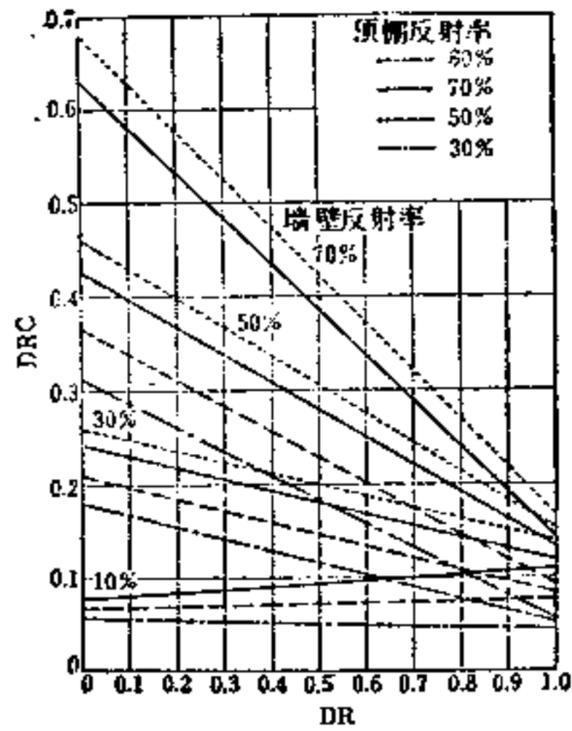


图9-70 DR 和 DRC 的关系
(室指数 $R_r = 5$)

接比 (DR)。

(4) 求出相应于下半球光通的相互反射成分 (DRC)。即用 (2)、(3) 所得的值, 从图9-61~图9-70选择所需要的图求 DRC。

(5) 计算出相应于下半球光通的利用系数 U_d

$$U_d = \frac{(DR + DRC) \times F_r}{F_t} \quad (9-170)$$

式中 F_r ——下半球光通; F_t ——光源的总光通。

(6) 计算出相应于上半球光通的利用系数 (U_u)。从表9-13求出相应于上半球光通的有效反射成分 (UUF), 则 U_u 如下式所示:

$$U_u = \frac{(UUF) \times F_u}{F_t} \quad (9-171)$$

式中 F_u ——上半球光通。

(7) 因此利用系数 (U) 由下式求出:

$$U = U_d + U_u \quad (9-172)$$

(8) 上面求得的利用系数是在地面反射率为20%的条件下得到的, 对于地面反射率为10%、30%的情况, 要用表9-14、表9-15对利用系数进行修正。

9-6-5 CIE的带域空间法

(1) 概述 这个方法是在要求较高的精度时使用的方法, 它把照明器的配光特性当作立体角和光通的函数, 而这个函数构成通过原点的S状曲线, 可用除去常数项之后的四次式来近似表示, 因此, 可以准确地求出投射在长方形面积上的光通。

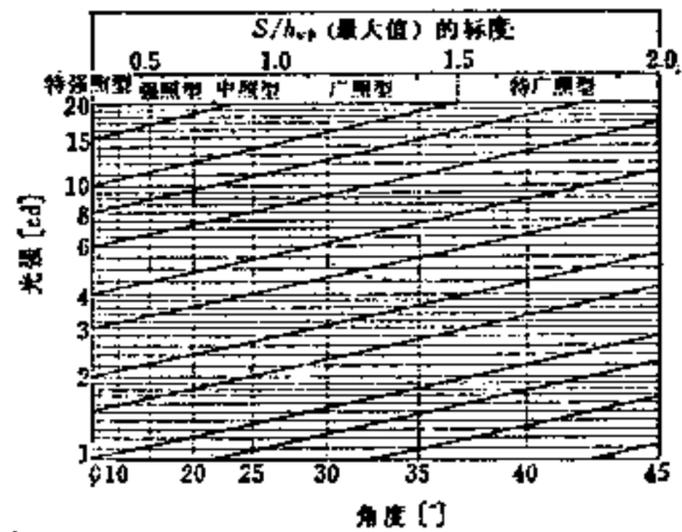


图9-71 从配光曲线求适当的 S/h_{wp} 的图

求法: 1. 纵轴乘以适当的倍数 10, 100, 1000 等; 2. 把配光曲线描在图上, 曲线必须画得平滑; 3. 在 0° 方向的光强(左边的纵轴上)的 1/2 的地方取点, 从该点引一条与图中斜线平行的线; 4. 从这条线与配光曲线的交点向上画垂线即可读出 S/h_{wp} 的标度。

表9-14

利用系数修正系数

$P_f: 10\%$

室指数	顶棚反射率 [%]		80				70				50			30		
	70	50	30	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10			
0.6	0.961	0.977	0.986	0.963	0.978	0.988	0.993	0.981	0.989	0.995	0.984	0.991	0.997			
0.8	0.954	0.970	0.981	0.959	0.973	0.983	0.989	0.978	0.985	0.992	0.982	0.989	0.995			
1.	0.949	0.964	0.976	0.954	0.968	0.978	0.985	0.975	0.983	0.989	0.981	0.988	0.993			
1.25	0.944	0.958	0.969	0.950	0.963	0.973	0.980	0.972	0.980	0.986	0.980	0.986	0.991			
1.5	0.940	0.953	0.964	0.947	0.960	0.969	0.976	0.969	0.977	0.983	0.979	0.984	0.989			
2.	0.935	0.947	0.956	0.943	0.953	0.962	0.969	0.965	0.972	0.978	0.977	0.981	0.986			
2.5	0.931	0.942	0.950	0.940	0.949	0.957	0.963	0.962	0.968	0.974	0.976	0.980	0.985			
3.	0.928	0.938	0.946	0.938	0.946	0.953	0.959	0.960	0.965	0.971	0.975	0.979	0.984			
4.	0.925	0.933	0.940	0.935	0.942	0.947	0.952	0.957	0.962	0.966	0.974	0.977	0.981			
5.	0.923	0.929	0.935	0.933	0.939	0.943	0.948	0.956	0.960	0.963	0.973	0.976	0.979			

注：地面反射率为20%时算出的利用系数(U)乘以本表的数值，就可得到所要的利用系数。

表9-15

利用系数修正系数

$P_f: 30\%$

室指数	顶棚反射率 [%]		80				70				50			30		
	70	50	30	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10			
0.6	1.042	1.025	1.015	1.039	1.023	1.015	1.007	1.020	1.012	1.006	1.017	1.009	1.004			
0.8	1.051	1.032	1.020	1.046	1.029	1.019	1.011	1.024	1.015	1.009	1.019	1.011	1.006			
1.	1.056	1.038	1.026	1.050	1.034	1.024	1.015	1.027	1.018	1.012	1.020	1.013	1.008			
1.25	1.062	1.045	1.032	1.055	1.040	1.029	1.021	1.030	1.022	1.015	1.022	1.015	1.010			
1.5	1.067	1.051	1.038	1.059	1.045	1.034	1.025	1.033	1.025	1.018	1.023	1.016	1.011			
2.	1.074	1.060	1.048	1.064	1.052	1.042	1.033	1.037	1.030	1.023	1.025	1.019	1.014			
2.5	1.079	1.066	1.055	1.068	1.057	1.048	1.039	1.041	1.033	1.027	1.026	1.021	1.017			
3.	1.082	1.070	1.060	1.071	1.061	1.053	1.044	1.043	1.036	1.030	1.026	1.022	1.019			
4.	1.088	1.077	1.068	1.075	1.066	1.059	1.052	1.047	1.041	1.036	1.027	1.024	1.021			
5.	1.092	1.082	1.075	1.077	1.070	1.064	1.059	1.049	1.044	1.040	1.028	1.026	1.023			

注：地面反射率为20%时算出的利用系数(U)乘以本表的数值，就可得到所要的利用系数。

这个方法假定照明器的配光特性是轴对称的，对于荧光灯灯具，如果用平均铅直配光，就可以相当准确地求出平均照度。

(2) 直射光通的计算 把照明器的配光 $I(\theta)$ 展开成 $\cos \theta$ 的三次四项式，把从 $\theta = 0$ 开始的积分光通值代替配光 $I(\theta)$ ，把这个光通值与从照明器正下方开始的立体角 ω 相对应地作图，就得到图9-72。虽然下半球的立体角是 2π ，但为了简单起见，用单位立体角表示。这个光通函数 F 通常形成通过原点的S状曲线，可用下式近似表示：

$$F(\omega) = P_1 \cdot \omega + P_2 \cdot \omega^2 + P_3 \cdot \omega^3 + P_4 \cdot \omega^4 \quad (9-173)$$

在 ω 为 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 、 1 时，利用 (9-173) 式可得下式：

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= P_1(1/4) + P_2(1/4)^2 + P_3(1/4)^3 + P_4(1/4)^4 \\ F_1 + F_2 &= P_1(1/2) + P_2(1/2)^2 + P_3(1/2)^3 + P_4(1/2)^4 \\ F_1 + F_2 + F_3 &= P_1(3/4) + P_2(3/4)^2 + P_3(3/4)^3 + P_4(3/4)^4 \\ F_1 + F_2 + F_3 + F_4 &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \end{aligned} \right\} \quad (9-174)$$

如果对立体角微分就得配光 $I(\theta)$

$$I(\theta) = \frac{dF(\omega)}{d\omega} = P_1 + 2P_2\omega + 3P_3\omega^2 + 4P_4\omega^3$$

$$= q_1 + q_2 \cos \theta + q_3 \cos^2 \theta + q_4 \cos^3 \theta \quad (9-175)$$

式中 $\omega \cong 1 - \cos \theta$

$$q_1 = P_1 + 2P_2 + 3P_3 + 4P_4$$

$$q_2 = -2P_2 - 6P_3 - 12P_4$$

$$q_3 = 3P_3 + 12P_4$$

$$q_4 = -4P_4$$

就是说配光可以看成是由配光为 $I(\theta) = 1$, $I(\theta) = \cos \theta$, $I(\theta) = \cos^2 \theta$, $I(\theta) = \cos^3 \theta$ 的四个照明器的配光组成, 可以先求出各个照明器投射到矩形内的光通, 也就是说可以先求出相应于各配光的直射光通比, 因此, 直接比可用下式表示:

$$DR = A'X + B'Y + C'Z + D' \quad (9-176)$$

式中 $X = \frac{F_1}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$

$$Y = \frac{F_2}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

$$Z = \frac{F_3}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

并且, (9-176) 式的 A' 、 B' 、 C' 、 D' 是由图9-73所示的 a 、 b 的函数所决定的值, 可以预先汇总在表中[52]。

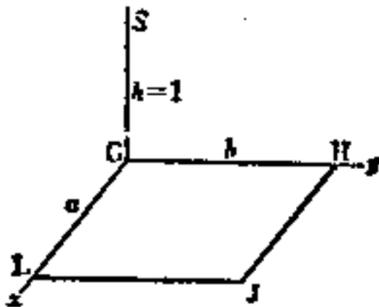


图9-73 光源和工作面的关系

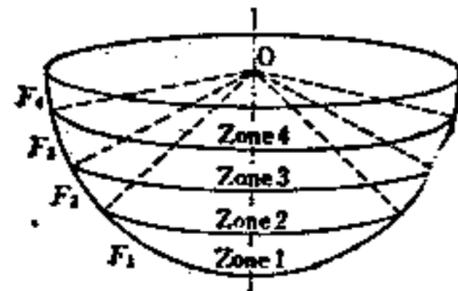


图9-74 下半球的四等分

如果求出图9-74所示的四个带域中的光通, 就可求得直接比。这四个带域的光通, 虽然是积分下式所得的光通, 但也有利用Russel角进行简单计算的方法[53]。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= F\left(\begin{matrix} 41^\circ 20' \\ 0 \end{matrix}\right) \\ F_2 &= F\left(\begin{matrix} 60^\circ \\ 41^\circ 20' \end{matrix}\right) \\ F_3 &= F\left(\begin{matrix} 75^\circ 30' \\ 60^\circ \end{matrix}\right) \\ F_4 &= F\left(\begin{matrix} 90^\circ \\ 75^\circ 30' \end{matrix}\right) \end{aligned} \right\} \quad (9-177)$$

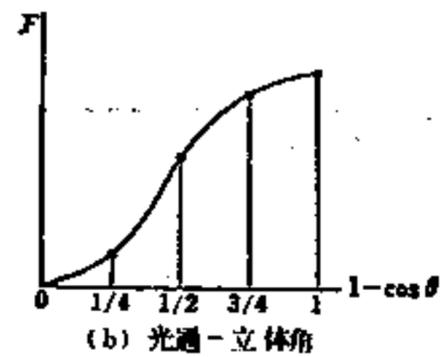
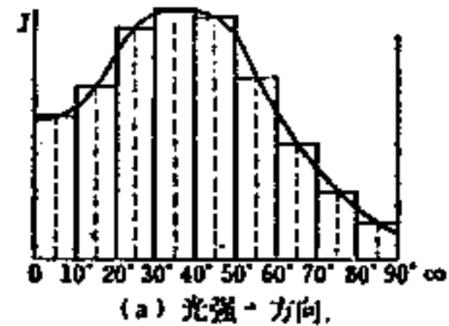


图9-72 配光的表示

(3) 总照度的计算 如果就长方体的相互反射成分进行计算, 就可以得到总照度。对于工作面来说, 总照度 E 如下式所示:

$$E = (\varepsilon F_0 + \varepsilon_T F_T + \varepsilon_s F_s) / A \quad (9-178)$$

式中 ε 、 ε_T 、 ε_s : 解相互反射的线性方程式得出的系数; F_0 : 照明器光通; F_T : 照明器下半球光通; F_s : 有效直射光通($F_s = \text{直接比} \times F_T$); A : 工作面面积。

这个 ε 的值汇总在悬挂比: $0 \sim 1/3$, 室指数 $R_r: 0.6 \sim 5$, 各面的反射率有各种组合的表中。

9-6-6 万能固有利用系数表

通常, 对每个照明器, 在生产厂的产品目录中都会有用室指数和室内各面的反射率求得的利用系数表。但是, 即使没有这种表, 在不要求精密计算的条件下, 有时用这里所示的万能固有利用系数表也可满足要求。

固有利用系数 U_0 是用下式表示的, 因此, 如果知道照明器的效率, 就可求得利用系数 U 。

$$U_0 = \frac{U}{\eta} \quad (9-179)$$

式中 η 为照明器效率。

表 9-16 是固有利用系数表。

9-6-7 利用系数计算的总结

(1) 发展经过 平均照度的计算大概发源于每单位面积的电力的概念。

在电力开发时期, 照明用电占 100%, 电力公司大力推进了照明事业的发展。虽然今天照明用电已下降到 25~20%, 但仍然有必要合理地使用电力。在这个发展过程中, 新光源的研制、灯泡效率和照明器效率的考虑、光通法的采用都对利用系数计算方法的发展起了有益的作用。

利用系数在当时也曾称为利用率、有效率等, 可以想见它们之间的关系。

光通法在后来作为主要的计算方法得到发展, 即使在今天, 仍然是照明经济和照明设计的基础。

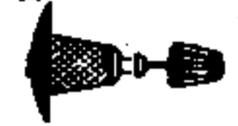
最初的大大的进步是 1916 年由 W. Harison 和 E. A. Anderson^[55] 两人提出的三配光法。他们整理了在模型室内的实验结果, 第一次发表了实用的利用系数表。

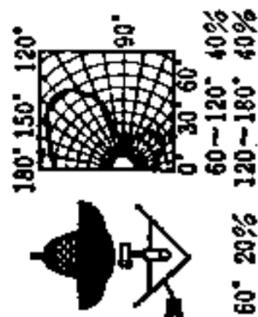
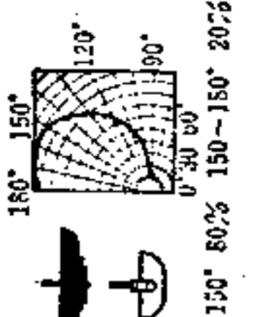
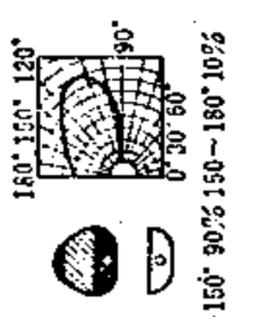
其方法是把光源的配光分为 (1) 垂直分量, (2) 水平分量, (3) 间接分量。(1) 采用面光源配光 $I \cos \theta$, (2) 采用垂直线光源配光 $I \sin \theta$, (3) 采用向上凹的垫子形的配光。对于这三个分量, 求出由于室的尺寸和室内面的反射率所产生的利用系数的变化, 提出室指数的概念, 导出配光和室指数与利用系数的关系。由于根据了实验、配光分析和室指数, 所得到的利用系数表具有正确、合理、实用等特点, 因此后来很长一段时间在世界各国得到了实际的应用。

接着, 山内^[56]论述了 n 面的相互反射系统, 证明了光通的直线性、可逆性和吸收性, 从而确立了理论的根据, 他指出, 如果令 $n \rightarrow \infty$, 就得到积分方程式。他还对平均法进行了深入的研究, 在建立今日的平均照度测定法的同时, 提出了测定光源光通的著名的山内公式, 此后, 在无限长圆柱面条件下, 用指数函数接近核而得到积分方程式的精确解^[57]。积分方程式的方法由 Moon 所继承。

B. 半直接照明型  向上10~40% 向下90~60%	B2			B3			B4			C2		
	0.6 0.8 1 1.25 1.5 2 2.5 3 4 5	0.23 0.27 0.30 0.32 0.34 0.36 0.37	0.21 0.25 0.27 0.29 0.31 0.32 0.33	0.23 0.27 0.30 0.32 0.34 0.36 0.37	0.21 0.25 0.27 0.29 0.31 0.32 0.33	0.21 0.25 0.27 0.29 0.31 0.32 0.33	0.23 0.27 0.30 0.32 0.34 0.36 0.37	0.21 0.25 0.27 0.29 0.31 0.32 0.33	0.19 0.23 0.26 0.28 0.30 0.32 0.33	0.18 0.22 0.25 0.27 0.29 0.31 0.32	0.18 0.22 0.25 0.27 0.29 0.31 0.32	0.18 0.22 0.25 0.27 0.29 0.31 0.32
 0~60° 37% 39% 120~180° 24% 60~120° 39% 120~180° 24%	0.57 0.62 0.70 0.76 0.82 0.90 0.95 0.99 1.04 1.07	0.23 0.36 0.43 0.50 0.56 0.63 0.72 0.77 0.86 0.91	0.22 0.29 0.35 0.41 0.47 0.56 0.62 0.68 0.77 0.84	0.26 0.34 0.39 0.44 0.48 0.55 0.60 0.64 0.70 0.73	0.21 0.27 0.32 0.37 0.42 0.48 0.53 0.57 0.63 0.67	0.23 0.30 0.35 0.40 0.45 0.54 0.60 0.65 0.71 0.75	0.26 0.33 0.38 0.43 0.47 0.53 0.57 0.60 0.65 0.68	0.23 0.31 0.36 0.42 0.48 0.54 0.61 0.67 0.74 0.76	0.19 0.26 0.32 0.39 0.44 0.52 0.59 0.63 0.69 0.73	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.63 0.66	0.18 0.26 0.32 0.37 0.41 0.48 0.53 0.57 0.63 0.66	0.18 0.26 0.32 0.37 0.41 0.48 0.53 0.57 0.63 0.66
 0~60° 50% 120~180° 17% 60~120° 33% 120~180° 17%	0.53 0.66 0.75 0.82 0.88 0.96 1.02 1.05 1.09 1.12	0.27 0.39 0.47 0.55 0.61 0.72 0.80 0.85 0.92 0.97	0.22 0.32 0.39 0.46 0.52 0.63 0.71 0.76 0.84 0.89	0.27 0.36 0.43 0.50 0.55 0.64 0.70 0.74 0.79 0.83	0.21 0.30 0.36 0.43 0.49 0.58 0.64 0.68 0.74 0.78	0.22 0.31 0.38 0.45 0.51 0.60 0.67 0.71 0.77 0.81	0.26 0.35 0.42 0.48 0.54 0.61 0.66 0.69 0.74 0.76	0.19 0.26 0.32 0.39 0.44 0.52 0.59 0.63 0.69 0.73	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.63 0.66	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.63 0.66	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.48 0.53 0.57 0.63 0.66	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.48 0.53 0.57 0.63 0.66
 0~60° 40% 120~180° 8% 60~120° 52% 120~180° 8%	0.51 0.62 0.71 0.78 0.83 0.91 0.96 0.99 1.04 1.07	0.25 0.34 0.41 0.48 0.54 0.61 0.72 0.77 0.85 0.90	0.18 0.26 0.32 0.39 0.45 0.54 0.61 0.67 0.75 0.81	0.24 0.32 0.38 0.44 0.49 0.57 0.63 0.67 0.72 0.76	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.66 0.70	0.19 0.26 0.32 0.39 0.44 0.52 0.59 0.63 0.69 0.73	0.23 0.31 0.37 0.43 0.47 0.55 0.59 0.63 0.67 0.70	0.19 0.26 0.32 0.39 0.44 0.52 0.59 0.63 0.69 0.73	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.63 0.66	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.63 0.66	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.48 0.53 0.57 0.63 0.66	0.18 0.25 0.31 0.37 0.41 0.48 0.53 0.57 0.63 0.66
 0~60° 36% 120~180° 33% 60~120° 31% 120~180° 33%	0.51 0.62 0.70 0.77 0.83 0.91 0.96 0.99 1.04 1.07	0.26 0.36 0.44 0.50 0.56 0.66 0.74 0.79 0.87 0.92	0.21 0.29 0.35 0.41 0.47 0.57 0.64 0.70 0.78 0.84	0.23 0.32 0.38 0.43 0.47 0.55 0.60 0.64 0.69 0.72	0.18 0.26 0.32 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.66 0.70	0.20 0.28 0.34 0.41 0.46 0.55 0.61 0.66 0.72 0.76	0.23 0.31 0.37 0.42 0.46 0.53 0.57 0.60 0.64 0.67	0.19 0.26 0.32 0.39 0.44 0.52 0.59 0.63 0.69 0.73	0.18 0.26 0.32 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.63 0.66	0.18 0.26 0.32 0.37 0.41 0.49 0.55 0.59 0.63 0.66	0.18 0.26 0.32 0.37 0.41 0.48 0.53 0.57 0.63 0.66	0.18 0.26 0.32 0.37 0.41 0.48 0.53 0.57 0.63 0.66

(续)

	ρ_f	0.3						0.1											
		0.8			0.5			0.8			0.5			0.3					
		0.8	0.5	0.3	0.8	0.5	0.3	0.8	0.5	0.3	0.8	0.5	0.3	0.8	0.5	0.3			
<p>C. 一般扩散照明型</p>  <p>向上 40~60% 向下 60~40%</p>	R_r																		
		<p>C3</p>  <p>0~60° 30% 120~180° 16%</p>	0.6	0.47	0.21	0.14	0.20	0.13	0.15	0.19	0.14	0.16	0.19	0.14	0.15	0.19	0.14	0.13	
			0.8	0.58	0.30	0.22	0.27	0.21	0.22	0.26	0.22	0.27	0.21	0.22	0.26	0.22	0.26	0.21	0.22
			1	0.66	0.37	0.28	0.32	0.26	0.27	0.32	0.26	0.32	0.26	0.27	0.32	0.26	0.32	0.26	0.27
			1.25	0.73	0.43	0.33	0.38	0.30	0.33	0.38	0.30	0.33	0.38	0.30	0.33	0.38	0.30	0.33	0.38
			1.5	0.78	0.49	0.39	0.43	0.35	0.38	0.43	0.35	0.38	0.43	0.35	0.38	0.43	0.35	0.38	0.43
		<p>C4</p>  <p>0~60° 28% 120~180° 22%</p>	0.6	0.47	0.21	0.14	0.19	0.14	0.16	0.19	0.14	0.16	0.19	0.14	0.16	0.19	0.14	0.13	
			0.8	0.57	0.30	0.21	0.26	0.20	0.22	0.26	0.20	0.22	0.26	0.20	0.22	0.26	0.20	0.21	
			1	0.65	0.36	0.27	0.31	0.24	0.27	0.31	0.24	0.27	0.31	0.24	0.27	0.31	0.24	0.27	
			1.25	0.72	0.42	0.32	0.36	0.29	0.32	0.36	0.29	0.32	0.36	0.29	0.32	0.36	0.29	0.32	
			1.5	0.77	0.48	0.37	0.40	0.33	0.37	0.40	0.33	0.37	0.40	0.33	0.37	0.40	0.33	0.37	
		<p>D2</p>  <p>0~60° 33% 60~120° 37% 120~180° 40%</p>	0.6	0.47	0.20	0.14	0.17	0.12	0.15	0.17	0.12	0.15	0.17	0.12	0.15	0.17	0.12	0.11	
			0.8	0.55	0.28	0.21	0.24	0.18	0.21	0.24	0.18	0.21	0.24	0.18	0.21	0.24	0.18	0.16	
			1	0.63	0.35	0.27	0.29	0.23	0.27	0.29	0.23	0.27	0.29	0.23	0.27	0.29	0.23	0.20	
			1.25	0.70	0.43	0.33	0.34	0.28	0.33	0.34	0.28	0.33	0.34	0.28	0.33	0.34	0.28	0.24	
1.5	0.76		0.46	0.39	0.39	0.32	0.39	0.39	0.32	0.39	0.39	0.32	0.39	0.39	0.32	0.27			

<p>1. 半间接照明型</p>  <p>向上 60~90% 向下 40~10%</p>	<p>D3</p>  <p>0~60° 20% 120~180° 40%</p>	<p>0.6 0.8 1 1.25 1.5 2 2.5 3 4 5</p>	<p>0.44 0.19 0.13 0.11 0.17 0.12 0.43 0.17 0.12 0.095 0.39 0.14 0.095 0.41 0.16 0.10 0.05</p> <p>0.55 0.27 0.19 0.23 0.23 0.17 0.53 0.25 0.17 0.14 0.15 0.48 0.15 0.11 0.10 0.06</p> <p>0.63 0.34 0.25 0.28 0.28 0.21 0.61 0.31 0.22 0.19 0.20 0.46 0.21 0.19 0.14 0.16 0.15 0.065</p> <p>0.69 0.42 0.32 0.33 0.33 0.26 0.68 0.38 0.28 0.23 0.25 0.50 0.25 0.27 0.27 0.22 0.19 0.13 0.085</p> <p>0.75 0.48 0.38 0.31 0.37 0.38 0.72 0.43 0.33 0.27 0.32 0.41 0.29 0.22 0.26 0.18 0.16 0.11</p> <p>0.82 0.58 0.48 0.38 0.44 0.48 0.88 0.66 0.56 0.44 0.48 0.92 0.72 0.62 0.53 0.48 0.51 0.50 0.40</p> <p>1.00 0.85 0.71 0.57 0.61 0.77 1.00 0.80 0.65 0.49 0.55 0.60 0.52 0.47 0.40 0.38 0.34 0.36</p>	<p>0.16 0.12 0.14 0.11 0.17 0.12 0.15 0.10 0.10 0.095 0.12 0.08 0.13 0.06 0.13 0.085</p> <p>0.22 0.16 0.20 0.23 0.23 0.17 0.20 0.14 0.40 0.095 0.17 0.08 0.16 0.095 0.13 0.06 0.065</p> <p>0.27 0.21 0.25 0.26 0.26 0.21 0.24 0.17 0.41 0.14 0.19 0.13 0.31 0.26 0.21 0.15 0.10 0.085</p> <p>0.32 0.26 0.32 0.33 0.33 0.26 0.29 0.22 0.27 0.23 0.32 0.19 0.22 0.17 0.25 0.19 0.16 0.11</p> <p>0.36 0.30 0.37 0.31 0.37 0.38 0.36 0.36 0.32 0.27 0.32 0.34 0.30 0.27 0.30 0.25 0.19 0.13</p> <p>0.42 0.36 0.46 0.38 0.44 0.48 0.46 0.46 0.41 0.34 0.41 0.30 0.26 0.20 0.25 0.19 0.16 0.11</p> <p>0.46 0.41 0.53 0.44 0.48 0.56 0.49 0.46 0.46 0.39 0.48 0.39 0.43 0.32 0.29 0.25 0.22 0.19</p> <p>0.50 0.45 0.58 0.48 0.53 0.62 0.50 0.50 0.56 0.43 0.53 0.42 0.43 0.34 0.32 0.29 0.26 0.22 0.19</p> <p>0.51 0.50 0.58 0.53 0.58 0.71 0.56 0.56 0.65 0.49 0.60 0.47 0.52 0.43 0.40 0.36 0.34 0.36 0.20</p> <p>0.57 0.53 0.61 0.57 0.61 0.85 0.67 0.67 0.75 0.55 0.69 0.58 0.58 0.49 0.55 0.43 0.40 0.35 0.22</p> <p>0.58 0.53 0.58 0.53 0.58 0.71 0.65 0.65 0.75 0.55 0.69 0.58 0.58 0.49 0.55 0.43 0.40 0.35 0.22</p>	<p>0.10 0.15 0.18 0.22 0.25 0.30 0.34 0.36 0.40 0.42</p>
<p>2. 间接照明型</p>  <p>向上 90~100% 向下 10~0%</p>	<p>E2</p>  <p>90~150° 50% 150~180° 20%</p>	<p>0.6 0.8 1 1.25 1.5 2 2.5 3 4 5</p>	<p>0.41 0.16 0.08 0.06 0.13 0.08 0.12 0.08 0.10 0.05 0.41 0.16 0.08 0.06 0.13 0.085</p> <p>0.49 0.21 0.12 0.12 0.15 0.095 0.55 0.27 0.17 0.12 0.19 0.12 0.095 0.31 0.24 0.16 0.11 0.065</p> <p>0.55 0.27 0.17 0.12 0.19 0.12 0.61 0.32 0.23 0.16 0.22 0.16 0.11 0.08 0.13 0.085</p> <p>0.61 0.32 0.23 0.16 0.22 0.16 0.66 0.38 0.28 0.19 0.22 0.16 0.11 0.08 0.13 0.085</p> <p>0.66 0.38 0.28 0.19 0.22 0.16 0.66 0.38 0.28 0.19 0.22 0.16 0.11 0.08 0.13 0.085</p> <p>0.73 0.48 0.37 0.24 0.31 0.24 0.73 0.48 0.37 0.24 0.31 0.24 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p> <p>0.79 0.56 0.45 0.35 0.35 0.28 0.79 0.56 0.45 0.35 0.35 0.28 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p> <p>0.83 0.62 0.52 0.32 0.38 0.32 0.83 0.62 0.52 0.32 0.38 0.32 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p> <p>0.88 0.70 0.61 0.37 0.42 0.37 0.88 0.70 0.61 0.37 0.42 0.37 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p> <p>0.91 0.75 0.68 0.40 0.44 0.44 0.91 0.75 0.68 0.40 0.44 0.44 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p>	<p>0.05 0.065 0.085 0.11 0.13 0.16 0.18 0.20 0.22 0.24</p>	
<p>E3</p>  <p>90~150° 90% 150~180° 10%</p>	<p>0.6 0.8 1 1.25 1.5 2 2.5 3 4 5</p>	<p>0.41 0.16 0.08 0.06 0.13 0.08 0.12 0.08 0.10 0.05 0.41 0.16 0.08 0.06 0.13 0.085</p> <p>0.49 0.21 0.12 0.12 0.15 0.095 0.55 0.27 0.17 0.12 0.19 0.12 0.095 0.31 0.24 0.16 0.11 0.065</p> <p>0.55 0.27 0.17 0.12 0.19 0.12 0.61 0.32 0.23 0.16 0.22 0.16 0.11 0.08 0.13 0.085</p> <p>0.61 0.32 0.23 0.16 0.22 0.16 0.66 0.38 0.28 0.19 0.22 0.16 0.11 0.08 0.13 0.085</p> <p>0.66 0.38 0.28 0.19 0.22 0.16 0.66 0.38 0.28 0.19 0.22 0.16 0.11 0.08 0.13 0.085</p> <p>0.73 0.48 0.37 0.24 0.31 0.24 0.73 0.48 0.37 0.24 0.31 0.24 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p> <p>0.79 0.56 0.45 0.35 0.35 0.28 0.79 0.56 0.45 0.35 0.35 0.28 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p> <p>0.83 0.62 0.52 0.32 0.38 0.32 0.83 0.62 0.52 0.32 0.38 0.32 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p> <p>0.88 0.70 0.61 0.37 0.42 0.37 0.88 0.70 0.61 0.37 0.42 0.37 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p> <p>0.91 0.75 0.68 0.40 0.44 0.44 0.91 0.75 0.68 0.40 0.44 0.44 0.26 0.20 0.15 0.10 0.065</p>	<p>0.05 0.065 0.08 0.10 0.12 0.15 0.17 0.19 0.21 0.23</p>		

不透明: 深半透明: 浅半透明或透明: 磨花玻璃, 滚花玻璃

相互反射论发端于热辐射。自从对由英国国家物理实验室的 Buckeey 的黑体炉构成的大型建筑物的中院所进行的广泛研究的结果发表之后就活跃起来。山内由此出发进行应用方面的研究,久野〔63〕更具体地把室作为长方六面体来考虑室内各面间的光通的反射吸收情况,把问题作成联立方程式来求解,给三配光法以理论的根据,提出新的利用系数算法,为室指数奠定了新的基础。但是,它只适合 $\rho_r = 0$ 的情况。此后,在配光分类方面,使精度有所提高。

P. Moon和D. E. Spencer〔59〕发展了用指数函数来近似积分方程式的核的方法,把庞大的数值计算结果用室指数 K_r 编成室内各面的亮度预测表,虽然已被刊载在美国 IES 的委员会报告中,但后来指出了在指数近似的界限方面以及直射照度分布均匀的假定方面存在缺点。

W. Harison和E. A. Anderson以后,相互反射论虽然由其他人在理论上逐步得到说明,但就实用性来说,给人的感觉是进步不大。

近来,美国的P. F. O'Brien〔60〕通过理论的研究,得到长方体情况的一般解,而且在处理相互反射中引入了新的概念。用通过光源中心的水平面和工作面把室分成顶棚空腔、室空腔和地面空腔等三部分,这样就把原来在顶棚和地面空腔内的计算换成在各空腔内的计算。在初期的利用系数的计算中,虽然注意了把表9-7和图9-14包含进去,但是数学处理比较复杂。最重要的是关于空腔的综合效果 ρ_{eff} 的想法,虽然 ρ_{eff} 的值本身是从各处借来的,但是可以说,由于有了 ρ_{eff} 的想法才使利用系数的计算具有实用性。可以看到,就直射光通的计算来说,存在着和D. Moon同样的(理论的)缺陷。一般叫做ZCM法。佐土根等人把英国的BZ配光分类引入到ZCM法中,并且引入新的有效的 ρ_{eff} 的式子,制作了包括BZ配光在内的适用范围很广而且很实用的表。

另一方面,法国的J. Dougnon〔65〕大致和W. Harison、E. A. Anderson同时期着手理论的研究,经过许多变化,最后他把下半球水平地分成四等分的球带(即水平地把立体角四等分,每份为 $\frac{\pi}{2}$ 球面度),从每个球带的光通找出配光成分 $I_n \cos^2 \theta$ ($n = 0, 1, 2, 3$),对每个成分计算 $(DR)_n$,然后把它们总合起来作为光源的下向光通DR。相互反射服从把前面所得的DR和顶棚面的IR作为立方体的三面看待条件下的一般解。

但是,目前使用的公式是 $T_{r,l} = (\sqrt{1 + K_r^2} - K_r^{-1})$ 。这个公式是黑沢〔61〕从正方形室和无限长带状室的等价性得到的,如果 $K_r > 0.75$,精确度可做到2.5%。由于把相互反射和DR分开的理论的清晰性,姑且作为CIE的标准方法,但其简易化、非对称配光情况下的计算、照明器配光的分类等已成为今后的问题。一般叫做CIE法。虽然高橋、藤井等人〔64〕求出了 $I_n \cos^2 \theta$ 的系数 I_n ,可是CIE法和从四等分球带光通 Φ_n 采用Chevichef的平均法 T_r 法进行手算的方法相反,是从 0° 开始在每 10° 的光强值上用光通的最小二乘法算出系数的,称为改良的CIE T法,也可以用电子计算机进行计算。

在德国,E. Wittig和K. Stolzenberg两人根据DIN的配光分类,对14种配光提出久野式的固有利用系数表,称为万能利用系数表。虽然不清楚他们制作利用系数表的方法,但从他们出席了CIE的委员会并忠实地遵守CIE的报告来看,可以认为是以CIE法为基础的。

其他国家的现状不清楚,大概除了W. Harison和E. A. Anderson的改良过的表外,还

有几个新的方法，它们都是争取有更好的实用性。

(2) 原理和方法的问题所在 在利用系数计算的基础方面，在原理上可分为(A)由积分方程式产生的方法和(B)由 n 元联立方程式产生的方法。P. Moon、D. E. Spencer法属于(A)的系统，ZCM法、CIET法及其他方法属于(B)的系统。

作为假定条件，有所谓(1)凸闭曲面，(2)完全扩散反射，(3)没有受到外来光影响的孤立系统。这些条件对(A)、(B)来说是共通的，而对(B)来说，还要求在每个面上，(4)反射率相等和(5)各次的反射照度 $E_i(x)$ ($i \geq 1$)一样。

各个假定条件有实用上的问题，首先是假定条件较少之故。从原理上说，似乎(A)是精密的公式，而(B)是近似的公式，但求解时则相反，从(A)可得近似解，而从(B)可得精确解，如果把假定条件考虑进去，由于两者都能保证光通分布的线性、光通传播的可逆性、光通的吸收性，从近似地求最终光通分布的角度来看，两者大体是一样的。P. Moon和D. E. Spencer在近似性和实用性方面之所以没有得到完全的成功，是因为方法的研究落后，虽然不是说(A)的方式根本上不好，但可以说它的方向是困难的。

将来，(B)的方式在精密的问题上行不通时，可以研究更新的方法(Montecarlo法以及其他电子计算机使用的新的方法等)，虽然也可能重新建立(A)的积分方程式，但就目前来说，在近似性和实用性方面，(B)比(A)优越。

我们来看看假定条件，首先，关于(1)凸闭曲面，如果不是凸而是凹时，相互反射就不能充分进行，理论上就无法分析，而且无法算出近似的 $\rho_{r,i}$ 。对于不是闭曲面而是有开口部分时，可以令该开口部分的反射率 $\rho = 0$ 来满足(3)没有外来光影响的条件。不是凸的部分，实际上起源于空间的障碍物、桌子及其他东西，更直接的原因是光源本身的外壳，因此有必要采取相应的措施。对于(2)完全扩散性，实际的反射体多是镜子、玻璃器具的表面反射以及其他非完全扩散程度很强的东西，完全扩散反射是物理的理性概念，几乎不可能见到这样的实物。对于(3)没有外来光影响的条件，如果考虑实际房间的窗、天窗的问题，以及通过窗和邻室连系起来的系统的话，就会产生诸如凹部等问题。对于(4)相同的反射率，虽然实际上这是问题比较少的条件，但是，在把墙壁上下之间的色度、明暗程度设计成有差别的时候，对于由于 ρ 而产生哪种误差的问题上还有必要采取相应的修正措施。对于(5)反射照度相同，这是相当不好办的根本的假定，是决定(B)解法的近似程度的主要因素。如果照度不均匀， $T_{r,i}$ 本身就产生变化，就要对增加面数 n 进行理论的研究，除了修正 $T_{r,i}$ 的实际效果之外别无其他办法。J. Dougnon虽然把墙壁面分为上下两部分，并编上2和3的号码，但总起来说，他也没有建立起完善的对策。这个问题虽然可以认为是将来在理论上必须解决的问题，但在实际上反射照度不均匀的情况较为严重的房间， K_r 也小，反射率也低，扩散照度本身就低，所以这种反射照度的不均匀不会产生大的问题。

与此相反，反射照度不均匀的情况较好的房间， K_r 大，所以可以把许多光源分散布置，而且反射率也高，所以相互反射也可以充分地进行，虽然扩散照度本身变大，但是反射照度不均匀不会在实际上引起大的问题。

从上面所说的情况可知，(B)方式实际上按长方体的三面进行处理，是主流，虽然可以有各种方法来达到实用上的目的，可是，就这些方法来说，在实用上各有各的优缺点，从理论的清晰性这个立场来说，原则上希望把直射照度和扩散照度严格区别开来，这也是提高精度的根本。

其次，以适当的配光分类为基础在应用上是必要的。把下半球光通和上半球光通分开大概也是大家所希望的。

现在的常用光源，上半球光通几乎没有，建筑方面做成低顶棚的也变得多起来，因为配光也存在均匀化的倾向，所以把下半球光通和上半球光通分开的效果也就不大了。

关于配光，有久野、猪狩的配光分类，DIN 的配光分类，BZ 的配光分类，黑沢的配光分类等等，除 BZ 外，都是以配光光通的分析为基础用数值表现出来的，虽然细致，但难以命名，数目也多，稍为繁杂。

BZ 分类则与此相反，虽然笼统，但非常实用。如果看一下实际的配光，用 BZ 分类法，则多是 BZ5、BZ8 等，BZ10 很少。与这些类相对应的分别是面光源，(均匀)点光源，线光源。线光源之所以少，是因为它相当于裸荧光灯的铅直使用状态，因此是可以理解的。

荧光灯几乎都装有反射板，其配光接近面光源的配光。虽然裸露的白色球形灯泡近似点光源，但装在灯罩里的灯泡则由点光源变成狭照型。装有反射罩的汞灯也大致如此。如果我们说一般照明采用荧光灯，局部照明采用灯泡的话，那么大概目前的使用状况就是：BZ5 为主，狭照型的 BZ3 之类的强光灯为辅。

(3) 实用性和今后的课题 从实用性、精度方面研究一下 CIE T 法和 ZCM 法。藤井、佐土根等人用实验进行了深入的研究，得出了妥当的结论，即在利用系数的计算方面，两者的数值大体上一致(大概相差 1% 以下)。W. Harison、E. A. Anderson 法得到的利用系数的值偏低，现在已不再使用。在 DR 的计算方面，虽然两者有若干差别，但在 $K_r > 0.7$ 时，其差别同样在 1% 以下，可以看成是一致。两者方法的差异在直射光通的计算中表现得很明显。

就 CIE T 法来说，下半球是以 DR 为基础，上半球则与此相反，是以 IR 为基础的。就 ZCM 法来说，忽略上半球配光的差别，用从上半球光通比和室的形状以及各面的反射率算出的 UUF 来对付，DR 是用每隔 10° 的光强值乘以球带系数然后把它们相加的方法求得的。虽然有这种方法上的差异，但应该说 1% 以下的一致性实际上是很好的结果。两种方法都是以三面相互反射论为基础的，可是三面相互反射论的误差或近似程度并没有表面化，这个事实是不可放过的。

从上面所述可得结论，CIE T 法和 ZCM 法都可归入由 CIE 所称的照度、亮度预测法的最精密级 A 中，它们只有手算和机械计算的差别，在实用性方面是大体相同的。

因此，可以认为，对于利用系数的计算来说，从理论和实用性方面早日解决下列问题就成为当前的课题。

(1) 实际的房间中存在着凹部、镜面反射、窗、桌子及其他用品的情况。

(2) 非对称配光的情况。

(3) 为了在靠近光源的地方预测照度，如何解决与直射照度的平方反比定律的偏离问题。

(4) 为了预测亮度，如何适应现实的室内各面的反射特性的问题。

虽然利用系数的计算大致达到了实用的阶段，但看一下(3)、(4)，就知道为了预测照度和亮度，势必要引入电子计算机，由于引入了电子计算机，DR 的直接计算，非对称配光等问题就自然得到解决，利用系数计算的精度也自然有所提高。大概唯有电子计算机化，才能获得真正的实用性。

9-7 照明场

9-7-1 照明场和光通矢量

自然辐射能是非相干的，它在各个方向偏振，并且包含各种位相和波长。

令单位时间内通过空间任意一点单位面积的波长 λ 的辐射能为 J_λ 。把这个 J_λ 在全部波长的积分写作 D_r ，则

$$D_r = \int_0^\infty J_\lambda \cdot d\lambda \quad (9-180)$$

令 V_λ 为眼睛的标准相对光谱灵敏度，引入

$$D_v = \int V_\lambda \cdot J_\lambda \cdot d\lambda \quad (9-181)$$

的量、这个 D_r 矢量称为辐射通量矢量， D_v 矢量称为光通矢量，辐射通量矢量 D_r 存在的空间称为辐射场，光通矢量 D_v 存在的空间称为照明场。令空间假想面 ds 在所有方向回转，令垂直于 ds 面入射的单位矢量为 n ，山内二郎氏把 $D_v \cdot n ds$ 为最大时的值称为照明场的强度〔68〕。P. Moon 和 D. E. Spencer 把这个 D 矢量称为照度矢量，山内、P. Moon 和 D. E. Spencer 等人以此为基础论述了光场的理论及其应用〔68〕，〔69〕。

9-7-2 照度和照度矢量

(1) 照度 设想在照明场的空间某点有微面元 ds 。光通矢量 D_v 入射在这个面上，令在光通矢量通过的一侧建立的这个面的法线方向的单位矢量为 n ，则这个面的照度

$$E = D_v \cdot n = |D_v| \cdot \cos\theta \quad (9-182)$$

θ 是 n 和 D_v 构成的角度，因此，照度就是 D_v 矢量和 n 的标量积。

(2) 照度矢量 照度虽然是由 (9-182) 式所给定的标量，但如果指定面元的方向，并规定这个面的法线方向的单位矢量 $n' = -n$ ，就可以定义

$$E = E \cdot n' \quad (9-183)$$

的矢量，这个矢量就称为照度矢量。如果和一个点光源所发出的光通矢量 D_v 垂直的面上的照度矢量为 E_0 ，则

$$E_0 = -D_v \quad (9-184)$$

E_0 通常是所谓法线照度的量，是照度矢量的特殊情况。

在被照面的切平面没有与光源相截的条件下，如果令被照面的方向和 E_0 矢量构成的角为 γ ，则照度

$$E = |E_0| \cos \gamma \quad (9-185)$$

而其相反一侧的照度

$$E = 0 \quad (9-186)$$

在直角坐标系中，如令 x ， y ， z 轴方向的单位矢量为 i ， j ， k ，则 E_0 可表示为

$$E_0 = iE_1 + jE_2 + kE_3 \quad (9-187)$$

某面的法线方向与三个轴分别构成 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 的角时，这面上的照度为：

$$E = E_1 \cos \gamma_1 + E_2 \cos \gamma_2 + E_3 \cos \gamma_3 \quad (9-188)$$

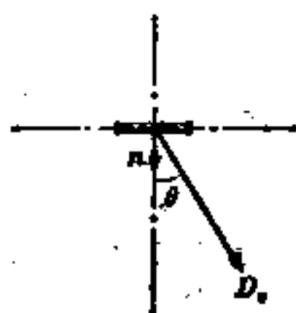


图9-75 光通矢量

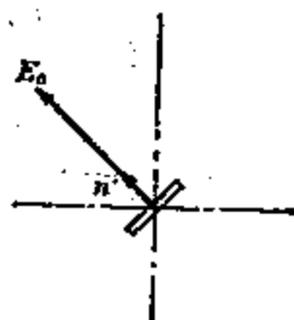


图9-76 照度矢量

必须注意，照度矢量的适用范围是由所考虑的被照面的切平面与光源不相截的条件决定的。而且，虽然把照度矢量安排到存在 D 矢量的照明场的体系中有困难，但是可以考虑不同于场的理论的别的体系。

应用照度矢量的例子有用各点的铅直面照度矢量分布图来表示阴影所造成的情况的方法。这个方法是这样的：把工作面分成矩形的网格，在各网格中央画出表示水平面照度的矢量 E_h ，以及表示互相垂直的两个垂直面的表里两面上的照度的矢量 $E_{v1}, E_{v2}, E'_{v1}, E'_{v2}$ ，的图（图 9-78(a)），并且画出只表示铅直面照度的分布图（图 9-78(b)）[112]。

9-7-3 照明矢量

在照明场的空间，把某点上假想的微面元的外表面的照度 E_e 和里面的照度 E_i 的照度差最大时的方向作为方向，把最大差值作为大小的矢量定义为该点的照明矢量 \vec{E} (illumina-nce vector) [70]。

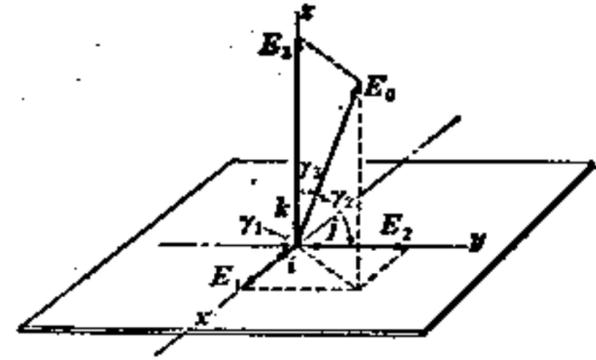
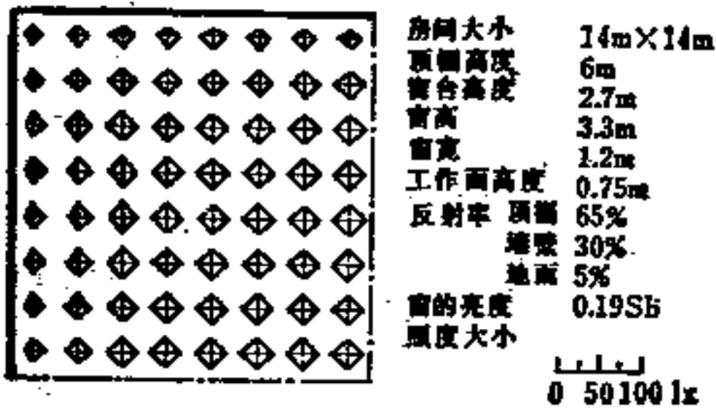
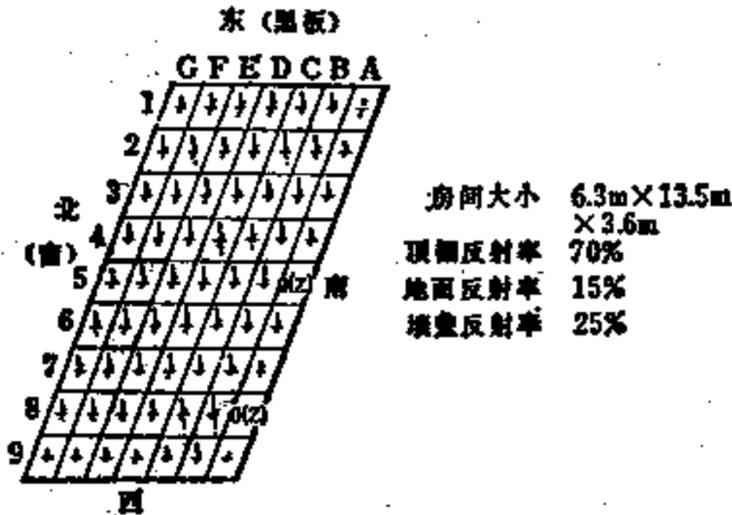


图9-77 照度矢量的直交成分

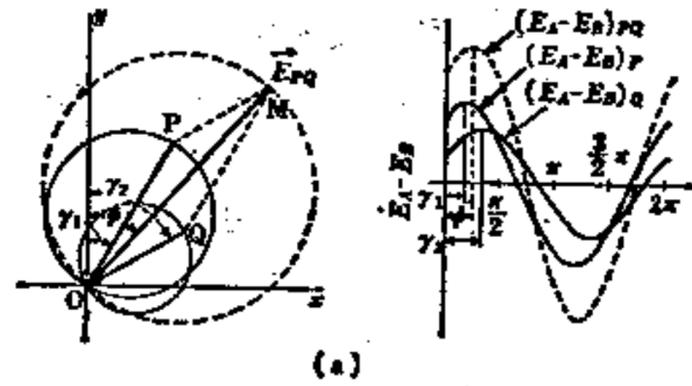


(a) 垂直面照度分布



1b) 由全间接照明产生的照度矢量分布

图9-78



(a)

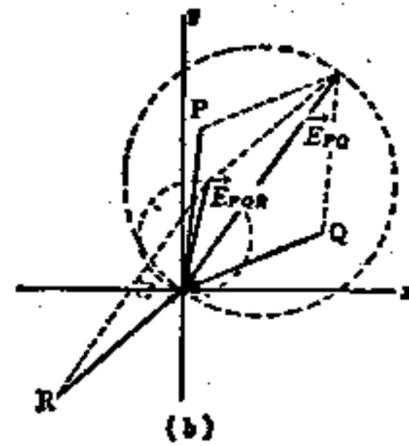


图9-79

令由一个点光源产生的 D_e 矢量和假想面的方向所构成的角为 γ ，则照度差为

$$E_e - E_i = |D_e| \cos \gamma = |E_0| \cos \gamma \tag{9-189}$$

照度差最大的方向，即在 $\gamma = 0$ 时，照明矢量 \vec{E} 和 D_e 矢量的方向和大小都一样。由图 9-79 (a) 所示的两个点光源产生的 D_{e1}, D_{e2} 矢量存在的条件下，则有

$$E_e - E_i = C E_0 \cos(\gamma - \varphi)$$

$$C = \sqrt{(\cos \gamma_1 + k \cos \gamma_2)^2 + (\sin \gamma_1 + k \sin \gamma_2)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\sin\gamma_1 + k\sin\gamma_2}{\cos\gamma_1 + k\cos\gamma_2} \quad (9-190)$$

它和 D_{rr} 、 D_{ro} 分别单独存在时的照度比较，是周期相等、振幅和相位都不同的正弦波。由两个点光源产生的照度差的振幅和相位可以按 D_{rr} 、 D_{ro} 矢量的合成矢量求得。图9-79(b)表示由三个点光源产生的情况。

一般来说，照明矢量根据各个光源产生的 D_r 矢量的矢量合成求得，它表示该点的主光线的通过方向。

D_r 矢量的合成值，即照明矢量的大小可以通过把具有余弦修正角特性的受光器背靠背连接起来，放在测定点 O ，读出两受光器的偏转值之差而测定出来。把这种受光器在所有方向回转，当其给出最大差时的方向就是照明矢量 \vec{E} 的方向，其偏转值之差就是 E 的大小。

在房间的各个位置测定 \vec{E} ，把连接这种矢量的矢量线称为“光流”(flow of light)。图9-80表示从单侧采光窗进入的昼光、室内的人工光和合成光的“光流”[71]。这样，为了使昼光和人工照明能适当地平衡，其中一个方法就是用 \vec{E} 作为指标。

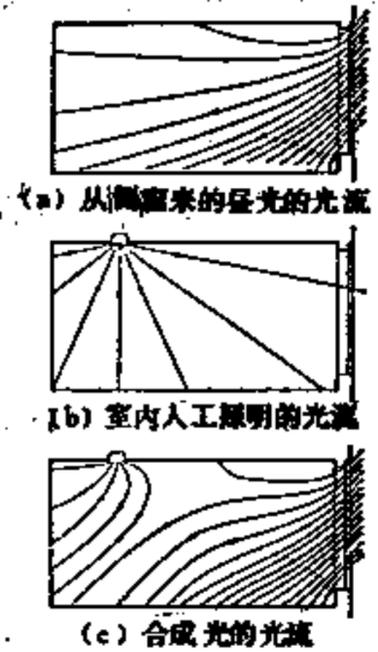


图9-80 根据照明矢量求得的光流

9-7-4 通过空间一点的光通密度

(1) 平均圆柱面照度 Gutorov (1963)[72]把“垂直放置的足够小的圆柱侧表面上的平均照度”称为平均圆柱面照度。不包括圆柱的上下底面。平均圆柱面照度 E_c 为

$$E_c = \lim_{\substack{D \rightarrow 0 \\ h \rightarrow 0}} \frac{\phi}{A} \quad (9-191)$$

式中 ϕ ——入射在垂直的圆柱侧面上的光通；

A ——圆柱侧面的面积；

D 、 h ——圆柱的直径和高度。

由点光源产生的 E_c 是注视点的“平均铅直面照度 E_{pm} ”的 $1/\pi$ [73]。

$$E_{pm} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_p(\varphi) d\varphi = \pi E_c \quad (9-192)$$

式中 $E_p(\varphi)$ 为水平角 φ 方向的铅直面照度。

由点光源产生的 E_c 可用 (9-193) 式表示 (图9-81)。

$$E_c = E_n \sin\theta / \pi \quad (9-193)$$

式中 E_n 为法线照度。

光从正上方入射时， E_c 为零，从正侧方入射的光， E_c 最大。Epaneshnikov (1965)[74]认为用平均圆柱面照度来评价展览大厅和地下铁中央大厅等公共建筑的照明比用水平面照度更好。

E_c 的测定器的研究[73]，有按照光通法计算安装有许多光源的立方体室的利用面上的 E_c 的平均值来推断的方法[76]。

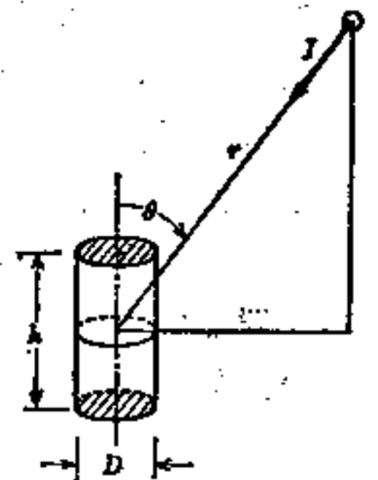


图9-81 由点光源产生的平均圆柱面照度

(2) 平均球面照度 以空间某点P为中心画单位球,把入射在该球面上的光通值的 $1/4\pi$ 称为P点的平均球面照度。

考虑以P点作顶点的小立体角 $d\omega$,令该方向的亮度为 L 。如果 $d\omega$ 的方向和包含P点的平面的法线所构成的角为 α ,则该平面上的照度由下式表示:

$$E = \int_{2\pi} L \cos \alpha d\omega \quad (9-194)$$

把这个平面转向所有方向时就能得到平均球面照度,可用下式表示

$$E_s = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} E d\omega \quad (9-195)$$

如果求与 $Ld\omega$ 有关的平均球面照度 dE_s ,则得

$$dE_s = \frac{Ld\omega}{4\pi} \int_{2\pi} \cos \alpha d\omega \quad (9-196)$$

式中 α 限制在锐角的范围内。因为

$$dE_s = \frac{2\pi Ld\omega}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \frac{Ld\omega}{4} \quad (9-197)$$

故得

$$E_s = \frac{1}{4} \int_{4\pi} L d\omega \quad (9-198)$$

例如,如果令由点光源产生的某点的法线照度为 E_n ,因为和这法线构成 α 角的面上的照度是 $E_n \cos \alpha$,故平均球面照度 E_s 为

$$E_s = \frac{2\pi E_n}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \frac{1}{4} E_n \quad (9-199)$$

即这种情况的平均球面照度为法线照度的 $1/4$ 。

在等亮度的空间内

$$E_s = \pi L = E \quad (9-200)$$

式中, E 是某平面上的照度。就是说,面的方向转向所有方向时的照度总是一定的,等于平均球面照度。

虽然Lynes等人(1966)[70]把“由所有方向入射光产生的在无限小的球的表面上的照度”称为标量照度,但它和平均球面照度是完全相等的量。

与平均圆柱面照度随入射角或圆柱轴的倾角的变化而变化的情况相反,球面照度无论测定器怎样回转也没有变化(图9-82)。

由一般照明产生的利用面的平均球面照度的平均值可以用(9-201)式的平均球面利用系数代替利用系数代入光通法的公式来计算。

$$\text{平均球面利用系数} = (\text{DLOR} \times \text{球面的直接比}) + \frac{1}{2} [C(1 + \rho_r) - C_s] \quad (9-201)$$

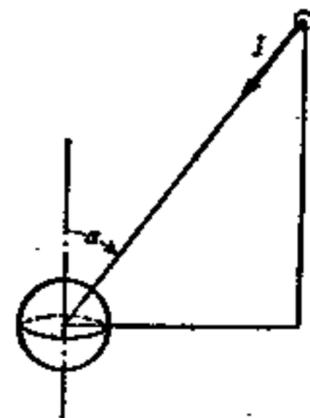


图9-82 由点光源产生的平均球面照度

DLOR 为照明器的下半球光通比, C 是用 BZM 法算出的水平利用面的利用系数, C_0 是室的各面反射率为零时的利用系数, ρ_r 为地面空腔的等效反射率, 球面直接比从表 9-17 求得。

表9-17 平均球面直接比

配光的 BZ 分类	SH/m	室 指 数										
		0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	Inf
BZ 1	1:1	0.14	0.17	0.20	0.22	0.23	0.25	0.26	0.27	0.28	0.28	0.31
BZ 2	1:1	0.12	0.16	0.18	0.21	0.22	0.25	0.26	0.27	0.29	0.29	0.33
BZ 3	1.25:1	0.12	0.15	0.17	0.20	0.21	0.24	0.26	0.28	0.30	0.31	0.38
BZ 4	1.25:1	0.11	0.14	0.16	0.18	0.20	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.42
BZ 5	1.5:1	0.09	0.12	0.15	0.17	0.19	0.23	0.25	0.28	0.31	0.33	0.50
BZ 6	1.5:1	0.07	0.09	0.12	0.15	0.17	0.20	0.23	0.26	0.29	0.32	0.71
BZ 7	1.5:1	0.06	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.22	0.24	0.28	0.31	0.84
BZ 8	1.5:1	0.05	0.07	0.09	0.12	0.14	0.17	0.21	0.24	0.28	0.31	0.93
BZ 9	1.5:1	0.04	0.05	0.08	0.11	0.13	0.16	0.20	0.23	0.27	0.31	1.00
BZ10	1.5:1	0.02	0.04	0.07	0.09	0.11	0.15	0.19	0.22	0.27	0.31	1.08

计算平均球面照度的简易方法有(9-202)式^[75]:

$$E_s = E_h (K + 0.5\rho_r) \quad (9-202)$$

E_h 为水平面的平均照度, ρ_r 和 (9-201) 式相同, K 是由照明器的配光 (根据 BZ 分类)、室指数、顶棚和墙壁的反射率所决定的常数, 从图 9-83 读取。

照明器只发出下半球光通时, 从相应的 BZ 分类曲线直接读取 K ; 照明器只发出上半球光通时, 则从虚线 C 直接读取 K 。两种光通都有时, 先心算出上半球光通和下半球光通之比, 然后用内插法求出 K 。

Lynes^[71]研究 E_s 和 E_h 的关系, 用 (9-203) 式近似计算:

$$E_s = 0.79E_h \quad (9-203)$$

但是, 在各面的反射率极低的室内安装狭照配光的嵌入型下投式灯时, E_s 和 E_h 没有关系, 几乎变成零。

在英国的 IES 规范里 (1977), 对于表 9-18 的照明设施, 是用平均球面照度 (在英国称为标量照

表9-18 平均球面照度的推荐值 (IES 规范)

标量照度 (lx)	照 明 设 施
75	○ 剧场的门廊 ○ 旅馆的进口大厅
140	○ 旅馆的休息室 ○ 一般建筑物的走廊通道
150	○ 一般建筑物的进口大厅、门廊、会客室 ○ 交通终点站大楼的通道
300	○ 交通终点站大楼的会客室

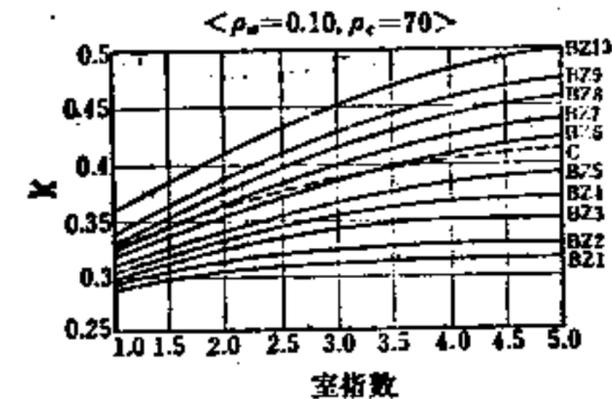
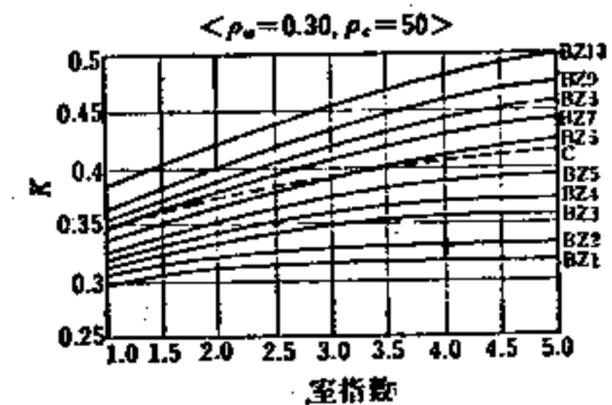
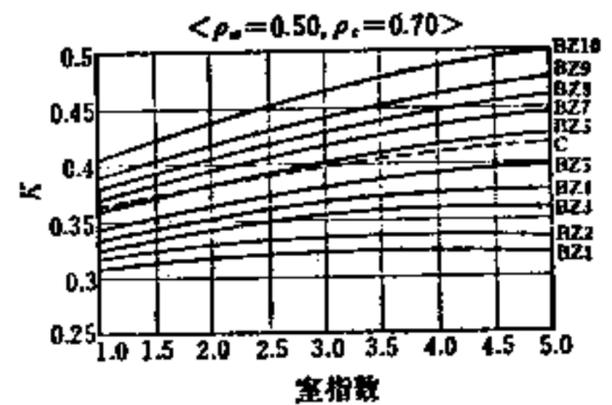


图9-83 从室的反射率、照明器配光的 BZ 分类、室指数求 K (ρ_w : 墙壁的反射率, ρ_c : 顶棚的反射率)

度)来代替以前的水平面照度的。

9-7-5 按照明矢量和平均球面照度之比来评价立体感效果

大小为 $1000lx$ 的照明矢量 \vec{E} , 在夜间的户外产生引人注意的戏剧性的效果, 但在平均球面照度 E_s 为 $700lx$ 的室内, 大概只是勉强使人注意到的程度。因为指向性的强弱是由照明矢量和平均球面照度的相对关系决定的, 所以, Lynes^[76] 等人提出以照明矢量与平均球面照度之比 (记号 \vec{E}/E_s) 作为指标, 把它和人脸的立体感的好坏对应起来进行研究。

\vec{E}/E_s 是照明矢量的大小和平均球面照度的比, 从 0 (相当于积分球那样的无指向性的光) 变化到 4 (由暗室内的点光源产生的光)。

平均球面照度 E_s 和最大照度 E_m 的比 E_s/E_m , 也表示着数值上的光线的扩散状况。看一下 E_s/E_m 和 \vec{E}/E_s 的关系: 在点光源的条件下, $E_s/E_m = 1/4$, 是 $\vec{E}/E_s = 4$ 的倒数。但是, 对于同样的整个球面光源来说, 虽然 $E_s/E_m = 1$, 但因为 \vec{E} 是 0, 故 $\vec{E}/E_s = 0$ 。

在室内一般照明产生的 \vec{E} 的方向是垂直向下时, 水平面上的 \vec{E} 的大小的平均值如下^[75]:

$$|\vec{E}| = E_m(1 - \rho_r) \quad (9-204)$$

如果把 (9-202) 式和 (9-204) 式联合起来, 则有

$$\vec{E}/E_s = (1 - \rho_r)/(K + 0.5\rho_r) \quad (9-205)$$

可见 \vec{E}/E_s 只由 K (图 9-82) 和地面空腔的等效反射率决定。把 (9-205) 式的关系与立体感效果的评价实验对应起来的结果就是图 9-84^[71]。一般来说, 在 ρ_r 低时, 为了防止僵硬的立体感, 采用能使 K 变大的广照型配光的照明器。在 ρ_r 高时, 采用狭照型配光的照明器来使 K 变小, 可知, 使立体感不过分柔和是比较好的。

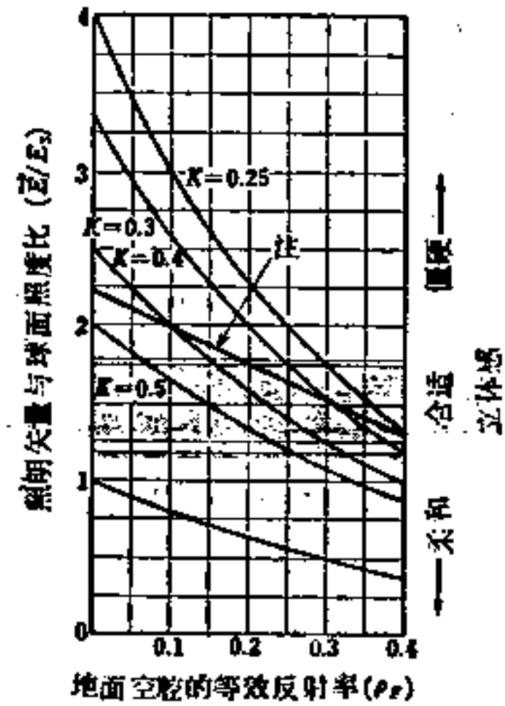


图9-84 从 K 和 ρ_r 求照明矢量与平均球面照明之比 (\vec{E}/E_s)
(注: 从这条线以上, E_s 比 $0.45 \times E_{m2}$ 还要小)

9-8 视空间的亮度分布

9-8-1 照明空间和视空间

包含光源、被照对象等的空间称为照明空间, 照明空间里面受到视野限制的空间称为视空间 (图 9-85)。

9-8-2 亮度和亮度分布

因为亮度是用光通量来定量地规定发光面的明亮程度的量, 把它当作视觉刺激量来处理是合适的。视空间的亮度分布和物体的可见度有密切的关系。例如, 在视空间中有亮度非常不同的物体时, 就可能感到不快、可见度减少等, 掌握视空间的亮度分布, 是论述物理条件和视觉的对应关系时的基础。

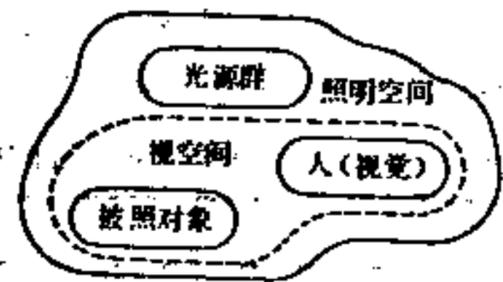


图9-85 照明空间和视空间

(1) 亮度的定义和单位^{[77], [78]} 亮度通常可以用发光面作原点, 从这个面发出的光通量来定义。另一方面, 又可以用观测点作原点, 从发光面到达观测点的光通量来定义。后一

个定义和 P. Moon、D. E. Spencer^[79] 所提倡的发光度 Helios 有同样的意义,是以所谓“看见”发光面的明亮程度的实际立场规定的量,从实用性方面来看,利用价值较大。

(a) **亮度的定义** 设发光面 A_1 和观测面 A_2 的位置有如图 9-86 所示的关系。以发光面上的点 P_1 作顶点、观测面的面元 dA_2 作底的立体角 $d\omega$ 内发射的光通为 dF , 以观测点 P_2 作顶点、发光面的面元 dA_1 作底的锥体的立体角为 $d\Omega$, 假定从 dA_1 到达 P_2 的光通为 $d\Phi_e$, 则发光面 P_1 点在观测点 P_2 方向的亮度 L 可定义为

$$L = k \frac{d^2F}{d\omega dA_1 \cos \alpha} \quad (9-206)$$

又假定该方向的光强为 dI_α , 则 (9-206) 式可改写为:

$$L = k \frac{dI_\alpha}{dA_1 \cos \alpha} \quad (9-207)$$

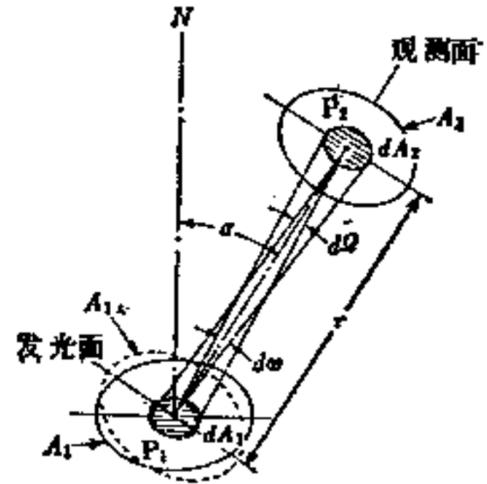


图9-86 亮度的定义

从观测点 P_2 见到发光面时的亮度 L' 为

$$L' = K \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega_d A_2} \quad (9-208)$$

假定面元 dA_1 的照度为 dE_1 , 则 (9-208) 式变成 (9-209) 式, 这个式子和 P. Moon 所提倡的 Helios 一致。

$$L' = k \frac{dE_1}{d\Omega} \quad (9-209)$$

假定发光面和观测面共同存在于没有吸收散射的理想介质中时, 因为 $dF \approx d\Phi_e$, 所以亮度 L 和 L' 变成

$$L = k \frac{d^2F}{d\omega dA_1 \cos \alpha} = k \frac{r^2 d^2F}{dA_2 dA_1 \cos \alpha} \approx k \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA_1} = L' \quad (9-210)$$

因此, 无论用发光面或观测面来定义都是一样。但是, 实际的照明设施能满足这个条件的很少。而且, 用亮度计测定的亮度, 由于从亮度计见到的视野的立体角 Ω 和覆在亮度计受光面上的立体角 ω 不一定收敛到零, 所以 L 和 L' 的值几乎不会是一样的。实际的亮度的测定没有用发光面来进行的, 而且, 因为与视觉相对应的是到达观测点的光通量, 从照明的实际情况出发, 可使用 (9-208) 式定义的亮度 L' 。

(b) **亮度的单位和各种亮度单位之间的换算** 亮度的单位有两种, 一种是把前面出现的常数 k 取作 1, 另一种是把 k 取作 π 。

(1) 选 $k = 1$ 的亮度单位 如果发光面的光强为 1 (cd), 面积为 1 (m^2)、(cm^2)、(in^2), 由于 $k = 1$, 亮度的单位分别是 (cd/m^2)、(cd/cm^2)、(cd/in^2)。

(2) 选 $k = \pi$ 的亮度单位 完全扩散面的亮度在所有的方向都是相同的, 它和面发光度之间有 (9-211) 式的关系:

$$M = \pi L \quad (9-211)$$

利用这个性质, 把具有 $1 lm/m^2$ 的面发光度的完全扩散面的亮度定为 1 asb, 以此为基准, 不仅完全扩散面而且所有其他的面的亮度都可以用这个亮度单位来表示。在面积为 cm^2 、 ft^2 的条件下, 分别叫做 (L)、(fL)。表 9-19 表示各种亮度单位之间的换算系数。

表9-19

亮度单位间的换算系数

A \ B	cd/m ² (nt)	cd/cm ² (sb)	cd/ft ²	cd/in ²	abs	L	mL	fL
cd/m ² (nt)	1	10 ⁻⁴	9.290 × 10 ⁻²	6.452 × 10 ⁻⁴	π	π × 10 ⁻⁴	π × 10 ⁻¹	9.290 π × 10 ⁻²
cd/cm ² (sb)	10 ⁴	1	9.290 × 10 ²	6.452	π × 10 ⁴	π	π × 10 ³	9.290 π × 10 ²
cd/ft ²	1.076 × 10	1.076 × 10 ⁻³	1	6.944 × 10 ⁻³	1.076 π × 10	1.076 π × 10 ⁻³	1.076 π	π
cd/in ²	1.550 × 10 ³	1.550 × 10 ⁻¹	1.440 × 10 ¹	1	1.550 π × 10 ³	1.550 π × 10 ⁻¹	1.550 π × 10 ²	1.440 π × 10 ¹
abs	1/π	1/π × 10 ⁻⁴	1/π × 9.290 × 10 ⁻²	1/π × 6.452 × 10 ⁻⁴	1	10 ⁻⁴	10 ⁻¹	9.290 × 10 ⁻²
L	1/π × 10 ⁴	1/π	1/π × 9.290 × 10 ²	1/π × 6.452 × 10 ⁴	10 ⁴	1	10 ³	9.290 × 10 ²
mL	1/π × 10	1/π × 10 ⁻³	1/π × 9.290 × 10 ⁻¹	1/π × 6.452 × 10 ⁻³	10	10 ⁻³	1	9.290 × 10 ⁻¹
fL	1/π × 1.076 × 10	1/π × 1.076 × 10 ⁻³	1/π	1/π × 6.944 × 10 ⁻³	1.076 × 10	1.076 × 10 ⁻³	4.076	1

注: A(单位) × (换算系数) = B(单位)

(2) 亮度分布的计算 某个面的亮度, 随照明条件、面的反射特性和观测方向而变化, 面的反射特性随入射到该面的光的方向而不同。图 9-87 是光从 45° 方向入射时的反射特性的例子, 是用面上一点的亮度 L_p (cd/m²) 和水平面照度 E_p (lx) 之比所决定的亮度系数 q (cd·m⁻²·lx⁻¹) 表示的。曲线 A 是完全扩散反射, $q = \rho/\pi$, 在所有方向亮度一样。曲线 B 是完全扩散反射和镜面反射的叠加, 在有光泽的油漆面之类的面上可以见到这种情况。曲线 C 是介于完全扩散反射和镜面反射之间的情况, 在纸和布料等类东西中可以见到这种情况。通常我们眼睛所见到的材料的反射特性大致可以分为上面三种情况。

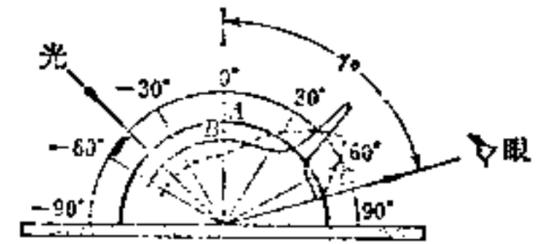


图9-87 面的反射特性

亮度分布的计算必须在观测方向进行。基本上在知道由光的入射方向所决定的反射特性 $q(\gamma)$ 之后, 可根据 (9-212) 式逐点计算。

$$L(\gamma_o) = q(\gamma_o) E_p \tag{9-212}$$

道路照明、户外体育场照明等可以只考虑直射成分, 室内照明还必须考虑相互反射成分。室内照明时, 观测角不是一定的, 构成面的材料也有不是完全扩散反射的, 但扩散反射性的居多, 并且, 由于光的入射角和反射角较大, 当作反射率一定的完全扩散面来处理大体上是可以的。就是说, 对于确定的顶棚面、墙壁面、工作面, 根据逐点法算出直射分量, 根据相互反射论算出扩散分量, 就可以计算出作为这两者之和的亮度 (9-5-3(2), 具体例子可参照 9-5-4(2))。

9-9 不舒适眩光的计算

在视野内，如果出现比已经和这个视野相适应的亮度还要高的亮度的东西时，就会感到晃眼。伴随着晃眼而在心理上感到不快时，就把这种晃眼称为不舒适眩光。

9-9-1 不舒适眩光的定量问题 美国的 Luckiesh 和 Guth(1949)^[80]发现，在均匀亮度 L_r (fL)、大小为 $2/3$ 的积分球的中央呈现亮度为 L_s (fL)、立体角为 ω (sr)的圆形眩光源下，由被验者调节 L_s ，使之满足 (9-213) 式并开始感到不舒适眩光时，刚好有 50% 的被验者达到 BCD 值 \ominus 。

$$L_s = 108 P L_r^{0.44} (\omega^{-0.21} - 1.28) \quad (9-213)$$

P 称为位置指数。 P 的求法如下：调整视野周围的眩光源的亮度 L_s ，使它和注视点的眩光源（亮度 L_s ，达到 BCD 值）有同样的眩光水平，这个时候的 L_{ss}/L_s 就被定义为 P 。

如图 9-88 所示，当眩光源在视线的侧边时，其位置指数比眩光源在上方偏离同样角度时还小，这表明即使在低亮度时也开始感到眩光。

另一方面，英国的 Petherbridge 和 Hopkinson (1950)^[81]把 5 种大小的正方形眩光源 ($2.7 \times 10^{-4} < \omega < 2.7 \times 10^{-2}$ sr) 固定在 5 种亮度水平 L_s (60~4500fL)，在水平视线正上方 10° 呈现，调整光源的周围亮度 F (fL)，使眩光的强度达到刚好受不了、刚好不舒服、刚好可以接受、刚好看不出，由此找出 (9-214) 式。

$$\text{眩光常数} = (L_s^{1.6} \omega^{0.8}) / F \quad (9-214)$$

当 L_s 、 ω 、 F 的组合使眩光常数分别为 600、150、35、8 时，就分别达到上述的 4 种不舒适程度。

把 (9-213) 式和 (9-214) 式变换为下面的一般式，称为单光源眩光公式：

$$M = L_s^a \cdot \omega^b / F^c \cdot P^d \quad (9-215)$$

a 、 b 、 c 、 d 是实验常数， M 正如上式所示是达到 BCD 或 4 种眩光的强度时，决定 4 个变数的关系的常数。算的值 a 、 b 、 c 、 d 虽然表示各变数给予眩光的权重，但从 (9-213) 式和 (9-214) 式也可以明白，因为实验方法和变数的变化范围等不相同，因此， a 、 b 、 c 、 d 是随研究者而异^[82]。这就是国际上不能建立统一的不舒适眩光评价方法的最大原因。

9-9-2 眩光指数的计算方法

英国、美国各自独立地发展了 (9-214) 式、(9-213) 式，确立了用眩光指数和 VCP(视觉舒适几率) 的指数表示室内一般照明的不舒适眩光的强度的方法，并把各种照明设施的眩光指数的推荐值编入照明规范中。加拿大也使用 VCP 指数。丹麦、挪威、瑞典、南非联邦都使用眩光指数^[83]。

(1) **眩光指数的计算** 用 1961 年在英国 IES 规范中发表的方法，从相应于 BZ 配光分类、室的大小、各面反射率等的表中可以直接读出眩光指数的值。

眩光指数表的制作过程^[84]和详细的数值表^[85]在日本都有介绍^[86]。从公式求眩光指

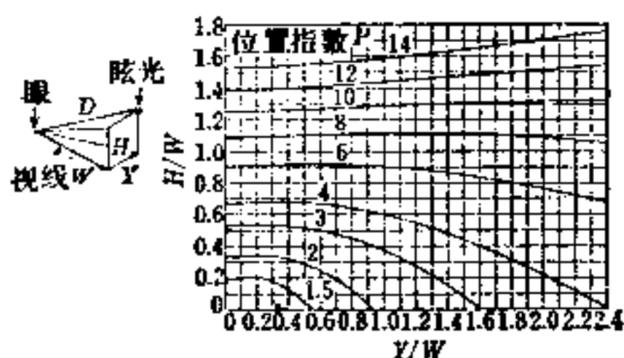


图9-88 从 H/W 和 Y/W 决定位置指数 P 图

\ominus 刚刚开始感到不舒适眩光时的眩光源的亮度称为 BCD 亮度。

数时, 可进行如下:

(1) 由一个照明器产生的眩光常数 G_i :

$$G_i = K \times L_i^{1.6} \omega^{0.8} / F \cdot p^{1.6} \quad (9-216)$$

式中 K ——亮度单位为 (cd/m^2) 时, 等于 0.478; 为 (fL) 时, 等于 1.0;

L_i ——观测者见到的照明器的平均亮度;

ω ——观测者见到的照明器发光部分的立体角 (sr), 等于正投影面积 (m^2) 除以观测者到照明器的直线距离 (m) 的平方;

F ——背景亮度。当其单位为 (fL) 时, 在数值上等于由顶棚、墙壁、地面 (不包括照明器) 来的光在观测者眼睛位置上产生的铅直面照度 $E_v (\text{lm}/\text{ft}^2)$, 而且 E_v 可以近似地用入射在墙壁上的平均扩散照度来表示;

p ——位置系数。在离开视线 $(\theta^\circ, \varphi^\circ)$ 位置上的照明器的 $P(\theta^\circ, \varphi^\circ)$, 采用图 9-88 的位置指数用 (9-217) 式计算出来。

$$P(\theta^\circ, \varphi^\circ) = \left[\frac{P(10^\circ, 0^\circ)}{P(\theta^\circ, \varphi^\circ)} \right]^{1.6} \quad (9-217)$$

(2) 由许多照明器产生的眩光常数 G 的计算:

$$G = \sum_{i=1}^n G_i \quad (9-218)$$

(3) 变换为眩光指数 GI :

$$GI = 10 \lg(0.5 \times G) \quad (9-219)$$

系数 0.5 是为了使眩光指数表的数值一致而在 1972 年引入的 [88], [89]。

GI 和不舒适眩光强度的关系, 以及和用日本语来表述的对应关系 [90], 如表 9-20 所示。刚好能识别的 GI 之差是 1.0 [91]。

(2) VCP 的计算 下面是 1966 年 3 月美国照明学会承认的方法 [92]。

(1) 由一个照明器产生的眩光 M_i :

$$M_i = K \frac{L_s \cdot Q}{L_r^{0.44} \cdot P} \quad (9-220)$$

式中 K ——亮度的单位为 (cd/m^2) 时是 0.5018, 为 (fL) 时是 1.0;

L_s ——从观测方向见到的照明器的发光部分的平均亮度;

$$Q = 20.4 \omega + 1.52 \omega^{0.2} - 0.075 \quad (9-221)$$

L_r ——视野的平均亮度。把顶棚、墙壁、地面的平均亮度 L_c 、 L_w 、 L_f 和照明器的亮度 L_i 用顶棚、墙壁、地面分别对观测者所张开的立体角进行加权平均得 (9-222) 式 (令全部视野为 5 sr)。

$$L_r = \left(L_c \omega_c + L_w \omega_w + L_f \omega_f + \sum_{i=1}^n L_{s_i} \omega_i \right) / 5.0 \quad (9-222)$$

表9-20 眩光指数和眩光的强度

眩光指数	眩光的程度
	} 太厉害
28.....刚好受不了.....开始感到太厉害
	} 不舒适
22.....刚好不舒适.....开始感到不舒适
	} 注意
16.....刚好可以接受.....开始注意
	} 有感觉
10.....刚好看得出.....开始有感觉
	} 没有感觉

(2) 用 DGR (不舒适眩光额定值) 表示由许多照明器产生的眩光:

$$DGR = \left(\sum_{i=1}^n M_i \right)^a$$

$$a = n^{-0.0914} \quad (9-223)$$

本式和计算眩光指数时的 (9-218) 式不同, 采用了幂函数, 幂的值随眩光光源的数目而异。

这里所说的视野, 对于顶棚面来说是指水平视线上方 53° 以内的部分, 对于其他面来说是指观测点前面的部分。

(3) 变换为 VCP:

VCP 是视觉舒适几率的略称, 表示“没有感到不舒适眩光”的人所占的比例 (%)。评价许多照明设施所得到的 VCP 和由计算求得的 DGR 之间的关系如图 9-89 所示 [93], [94]。如果把这个关系用适合机械计算的近似函数表示, 则成下式 [95]:

$$VCP = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t_0} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (9-224)$$

$$t_0 = 6.374 - 1.333 \ln(DGR)$$

美国照明学会 [92] 把办公室、学校等的 VCP 推荐值规定在 70 以上。

目前正在对日本的主要照明器的眩光指数和 VCP 进行计算比较 [96]。

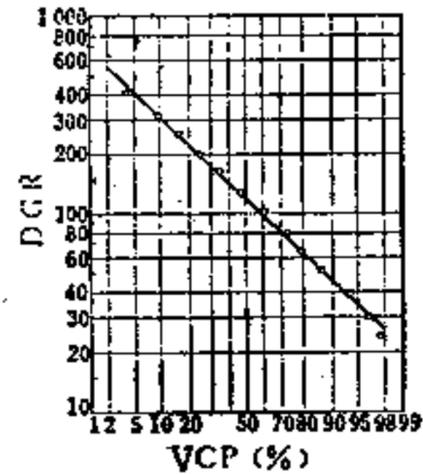


图9-89 DGR 和 VCP 的关系

9-9-3 照明器的亮度限制

用前面的眩光指数对眩光实行限制, 根据这种限制的程度和工作面的照度水平, 在照明器的铅直角 (γ) 在 45° 以上的范围, 有决定亮度界限值的方法。这是 Fischer (1972) [98] 在 Söllner (1965) [97] 的模型实验和实际照明的评价结果的基础上加以发展的, 已被编入奥地利、法国、联邦德国、意大利、荷兰的照明规范及推荐方法中。

眩光限制的对象是照明器在 $45^\circ < \gamma \leq \gamma_{max}$ 范围内的亮度。如图 9-90 所示, γ_{max} 是房间最深处的照明器在观测者眼睛方向的角度, 可用 (9-225) 式表示。

$$\tan \gamma_{max} = a_{max} / h_s \quad (9-225)$$

式中 a —— 从观测者到照明器的最大水平距离;

h_s —— 从眼睛的位置 (通常为 1.2 m) 到照明器的高度。

在 $45^\circ \sim \gamma_{max}$ 的范围内, 每隔 5° 算出照明器的亮度。在平行于照明器的较长的方向观测眩光时使用 BB 断面的配光, 在垂直于较长的方向观测时使用 AA 断面的配光。照明器的亮度 $L(\gamma)$ 根据 (9-226) 式算出:

$$L(\gamma) = I(\gamma) / S(\gamma) \quad (\text{cd/m}^2) \quad (9-226)$$

$S(\gamma)$ 是从 γ 方向见到的照明器的正投影面积。把 $L(\gamma)$ 画在图 9-91 的 (a) 和 (b) 中。

图 9-91(a) 在平行于照明器的较长的方向观测眩光时 (不管照明器的种类如何), 以及观测侧面不发光的照明器 (带平罩的嵌入式照明器) 时适用。

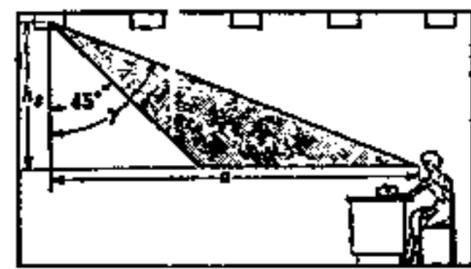


图9-90 对照明器的亮度必须加以探讨的范围(斜线部分)

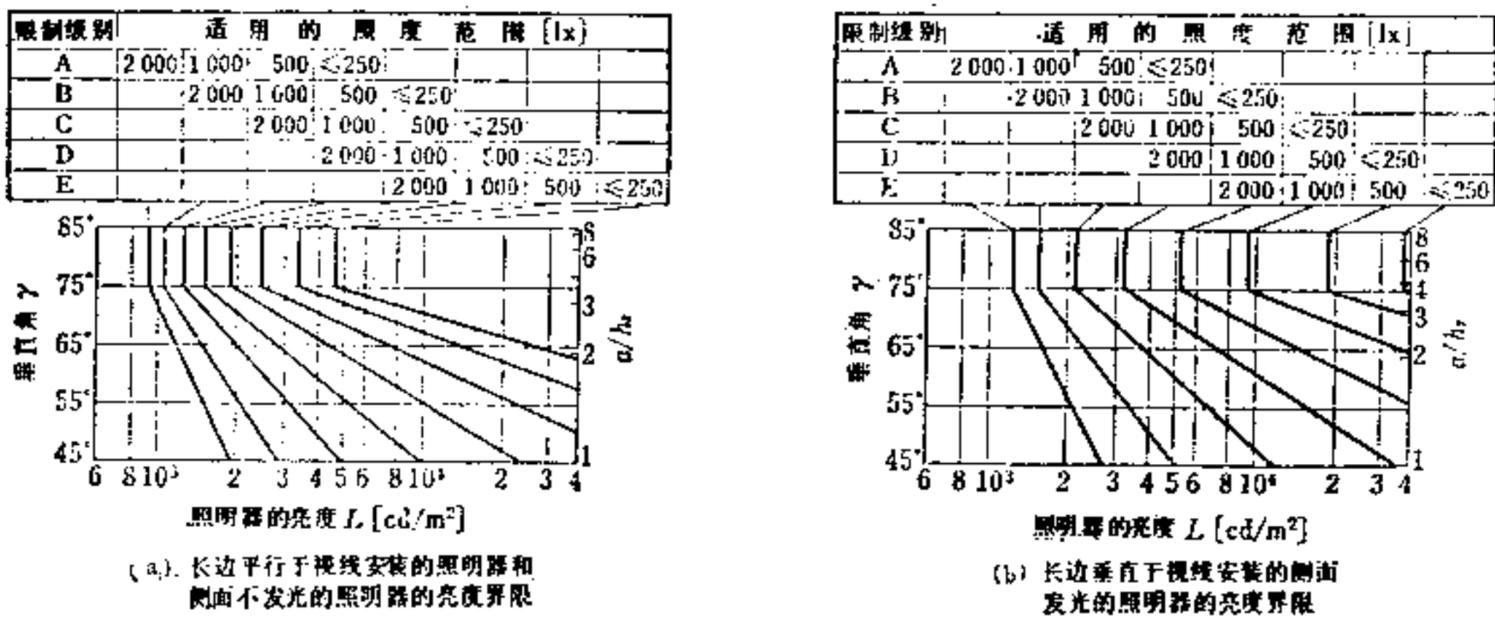


图9-91 照明器的亮度限制

图 9-91 (b) 在直角方向观测侧面发光的照明器时适用。

其次，根据设计照度和限制级别 (A、B、C、D、E 5 级)，从 8 条亮度界限曲线选择适用的，以此和拟评价的照明器的 $L(\gamma)$ 相比较。

在 $45^\circ < \gamma \leq \gamma_{max}$ 的整个范围内，如果 $L(\gamma)$ 比界限亮度线还低，就不会产生眩光。反之，在上述角度范围内，如果 $L(\gamma)$ 比界限亮度高，就可断定亮度不满足所选定的限制级别。

各国的照明规范是从 A、B、C、D、E 中，根据各国的实际情况，如表 9-21 那样选出 2~3 个标准的 [98]。

从图 9-91 可知，限制级别即使一定，愈是设计照度低的照明设施愈可以容许较高的照明器亮度，这是这种评价法的特点。而且，这个方法适用于房间开间宽为顶棚高度的 4 倍以上、顶棚、墙壁的反射率为 0.5、0.25 以上的工作室。对于门廊和进口大厅等用高亮度来造成愉快的气氛的设施，以及平常少人来往的走廊、通道、仓库等地方都不适用。

表9-21 欧洲各国的亮度限制的比较

国名	各国的限制水平	相当于图9-91中的限制级别
奥地利	质量等级1/同2	B/D
法国	等级1/同2	D/A
联邦德国	质量等级1/同2/同3	B/D/A
意大利	等级1/同2	A/B
荷兰	第一组/第二组	B/D

9-10 关于可见度的各种计算

9-10-1 根据 ESI 评价光幕反射

在工作照明时，印在纸上的文字由于发亮而看不清的情况是存在的。其主要的原因是由于不适当的照明使得文字和纸之间的亮度对比减少。这种现象称为光幕反射 (通常，设文字的亮度为 L_t ，纸的亮度为 L_b ，则亮度对比 C 用 $C = (L_b - L_t) / L_b$ 表示)。

为了评价由于光幕反射而造成的可见度的降低，1970 年美国照明学会推荐使用 ESI 的新标准 (ESI 是 Equivalent Sphere Illumination 的略称，暂译为等效球照度，单位为 lx)。并且如表 9-22 所示，根据 ESI 来决定办公室、学校等的推荐照度 [100]。

(1) **ESI的概念** 在没有光幕反射的照明状态(像积分球中那样,光从所有方向入射的空间,称为标准照明条件)下的对比为 C 的视对象,在实际的照明设施中,由于光幕反射,对比降低至 C' 。把由(9-227)式表示的对比的降低量称为CRF(对比显现系数)。

$$CRF = C'/C \quad (9-227)$$

另一方面,可识别的最小亮度对比(称为亮度阈对比 C_0),如图9-92所示,是随背景亮度的增加而减少的^[101]。因此,我们用相对于那时的亮度阈对比的倍数来表示具有很大对比的视对象的可见度。

利用上述关系,当背景亮度为 L_0 的视对象由于光幕反射而对比降至 C' 时(如同一图所示),相对于这时的亮度阈对比($C_{0,0}$)的倍数 n 为

$$n = C'/C_{0,0} \quad (9-228)$$

假定是没有光幕反射的状态,因为对比是 C ,所以即使背景亮度比 L_0 低,亮度阈对比也比 $C_{0,0}$ 大,存在着倍数刚好等于 n 的背景亮度。就是说,如果这时的背景亮度为 L_e ,亮度阈对比为 $C_{0,e}$,则

$$n = C/C_{0,e} \quad (9-229)$$

L_e 称为有效背景亮度,把它换算成照度就是ESI。

因此,ESI是没有光幕反射的照明条件下(例如积分球中)的照度,这时的阈对比倍数刚好等于产生光幕反射的照明条件下的可见度。这样就可以把由于光幕反射而产生的对比降低所给予可见度的影响,看成是和这个等价的没有光幕反射的照明条件下的照度的变化。

(2) **求ESI的方法** 美国照明学会把图9-92的亮度阈对比的倒数叫做对比灵敏度,把背景亮度为 10000cd/m^2 的对比灵敏度作为100%,导出图9-93所示的相对值,并称它为标准对比灵敏度曲线(略称RCS曲线)。并有背景亮度为 $10000 \sim 1\text{cd/m}^2$ 时的 L 和RCS(%)的详细对照表^[102]。

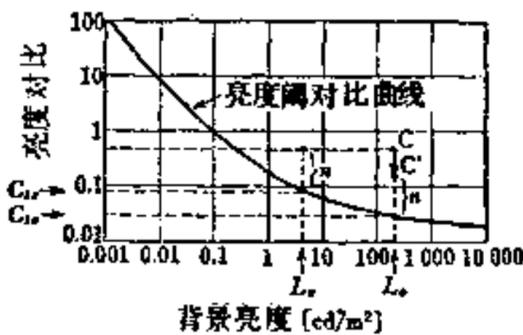


图9-92 亮度阈对比曲线和ESI的概念

表9-22 ESI照度的推荐值(美国)

工作场所或工作种类	ESI照度的推荐值 (lx)	
办公室	制图室	1600~2200
	会计室	1600
	一般办公室	
	· 低反差的复写字	1600
	· 硬铅笔写字	1100
	· 钢笔字	750
	会议室	320~1100
学校	看书	
	· 印刷字	320
	· 铅笔字	750
	· 复写字	320
	· 复写字 (好的/不好的)	1100
	教室	
	· 制图室	1100
	· 家庭科教室	750
	· 音乐教室	320
银行	营业室	750~1600
医院	护理室	750

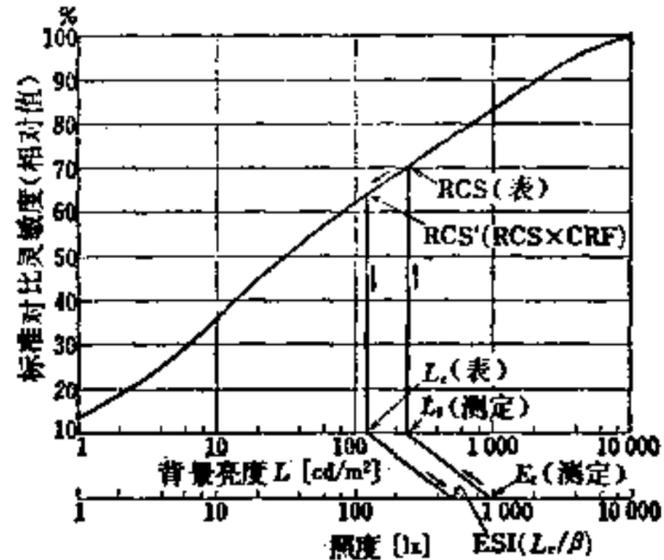


图9-93 标准对比灵敏度曲线和ESI的求法

求 ESI 的顺序如下:

- (1) 测量工作面的水平面照度 E , (lx) 和视对象的背景亮度 L_b (cd/m²), 计算亮度系数 β 。

$$\beta = L_b / E, \quad (\text{cd/m}^2/\text{lx}) \quad (9-230)$$

- (2) 根据测量或下面所述的计算, 由 (9-227) 式决定 CRF。

- (3) 对应于 L_b 的 RCS 乘以 CRF, 求出产生光幕反射时的相对对比灵敏度 RCS' 。

$$RCS' = RCS \times CRF \quad (9-231)$$

- (4) 与曲线反向地寻求对应于 RCS' 的有效背景亮度 L_e (cd/m²)。

- (5) 把 L_e 换算为 ESI

$$ESI = L_e / \beta \quad (\text{lx}) \quad (9-232)$$

上面的顺序和用前面图 9-92 说明的方法得到同样的结果。

(3) 照明设施的 ESI 的预测 光幕反射的程度依赖于视对象的反射特性、室的形状和照明条件、观测视对象的条件等, 如图 9-94 所示。因此, 为了对影响光幕反射的主要的照明条件进行评价, 需要假定下面的标准条件。

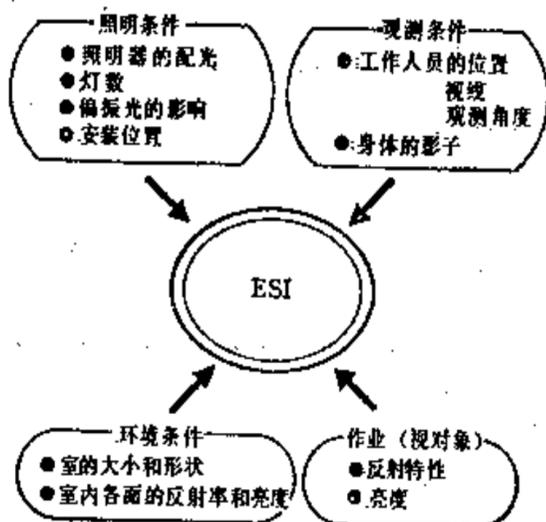


图9-94 影响 ESI 的因素

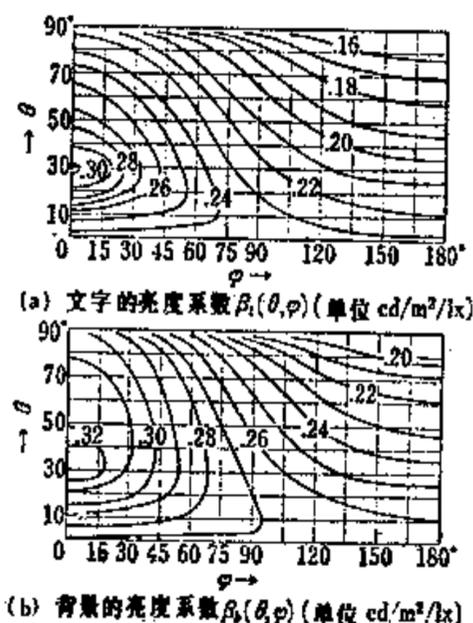


图9-95 计算 ESI 时作为标准的视对象的亮度系数 (观测角为 25°)

(1) 视对象的反射特性: 把写在白纸上的铅笔字作为视对象的标准, 根据入射光的水平角 φ 和垂直角 θ , 按图 9-95 决定亮度系数。在标准照明条件下的亮度对比是 0.1675。

(2) 观测角和身体的影子: 对办公室工作人员观看视对象的角度 (观测角) 作统计调查, 可以得到图 9-96 那样的频率分布, 因此决定和垂直线成 25° 作为观测角的标准。并且根据身体的阴影来决定入射在视对象上的光被遮挡的角度范围, 把它从计算对象中扣除。

在上面的假定的基础上, 把室的形状和顶棚、墙壁、工作面的反射率, 照明器的配置和配光, 照明器的安装方向和观看视对象的视线方向的关系, 以及 ESI 的测定点等作为条件, 根据 (9-233) 式计算处于那种状态的标准视对象的亮度对比 C' 和 CRF。

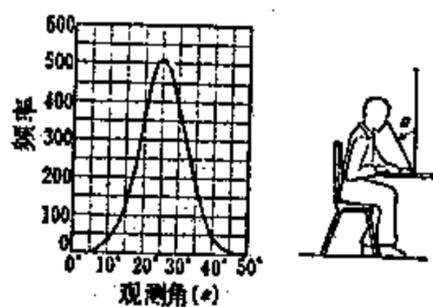


图9-96 办公室工作人员观看视对象的角度

$$\left. \begin{aligned}
 CRF &= C'/0.1675 \\
 C' &= (L_b - L_t)/L_b \\
 L_t &= \int dE(\theta, \varphi)\beta_t(\theta, \varphi) \\
 L_b &= \int dE(\theta, \varphi)\beta_b(\theta, \varphi)
 \end{aligned} \right\} (9-233)$$

L_t 、 L_b 分别是标准对象的文字和背景的亮度， $dE(\theta, \varphi)$ 是从 θ 、 φ 方向入射的照度，由直射照度和间接照度构成。 $\beta_t(\theta, \varphi)$ 、 $\beta_b(\theta, \varphi)$ 是从 θ 、 φ 方向入射的光产生的亮度系数。把顶棚、墙壁分割成小面元，把各面元看成由一定尺寸的均匀亮度面构成，计算出它们给予视对象的照度从而求得间接照度。

9-10-2 失能眩光的评价

眩光源有时使人们很难识别视对象。晚上相对行驶的车的前照灯使人难于看见障碍物就是一个具有代表性的例子。在照明工程中，把具有这种作用的眩光叫做失能眩光。

(1) 由眩光引起的阈值的上升 判断失能眩光的影响程度的浅近的办法，可以和不存在它的影响时相比较，看看阈亮度差（背景和视对象间可能识别的最小亮度差 ΔL ）增加了多少。

继 Helmholtz(1852)[104] 的观察之后，Holladay(1927)[105]、Stiles(1929)[106] 引入下面的“等效背景亮度”和“等效光幕亮度”的概念，使失能眩光的评价得以定量化。

如图 9-97 所示，在视野内显示一个眩光源，测量与背景亮度 L 相应的阈亮度差 ΔL 在没有眩光源的条件下，使背景亮度仅提高 $L_{..}$ 而变成 L' 时，就可以得到和有眩光源时相等的阈亮度差 ΔL 。

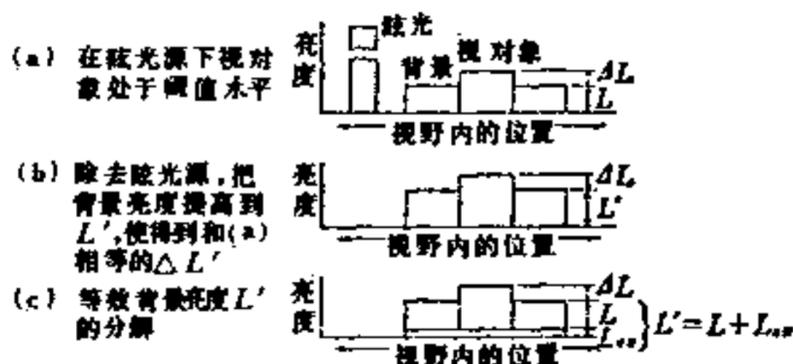


图9-97 等效背景亮度(L')和等效光幕亮度($L_{..}$)的概念
(L : 背景亮度, ΔL : 阈亮度差)

$$L' = L + L_{..} \quad (9-234)$$

这里， L' 称为“等效背景亮度”，(9-234) 式表明，眩光源给予背景亮度 L 的影响， ΔL 的效果可以表现为视对象和背景重合的均匀亮度 $L_{..}$ 的效果。这 $L_{..}$ 称为“等效光幕亮度”。

(2) 等效光幕亮度的计算 等效光幕亮度 $L_{..}$ 一般可用 (9-235) 式表示。

$$L_{..} = KE_v/\theta^n \quad (9-235)$$

式中， E_v 是眩光源在和观测者的视线成直角的面上产生的照度； θ 是视线和眩光源构成的角度， K 、 n 是实验常数。

(9-235) 式表明，不管眩光源是高亮度小面积还是低亮度大面积，都可以用观测者方向的光强来处理，这是和不舒适眩光的基本公式（参照 9-9 节）不同的地方。Holladay[105] 用 $2.5^\circ < \theta < 25^\circ$ ， $0 < L < 19(\text{cd}/\text{m}^2)$ ， $0 < E_v < 6(\text{lx})$ 的范围的实验，导出 $n = 2$ ， $K = 9.2$ 。Stiles[106] 用 $1^\circ < \theta < 10^\circ$ ， $0 < L < 11(\text{cd}/\text{m}^2)$ ， $0 < E_v < 11(\text{lx})$ 的范围的实验，得到 $n = 1.5$ ， $K = 4.16$ 的值。表 9-23 列示许多研究者的结果[108]。 $L_{..}$ 的单位是 (cd/m^2) ， E_v 的单位是 (lx) ， θ 是度。 n 可以看成是反映了眼睛的光学构造的角特性，大致在 1.5~2.5 的范围。 K 是对眩光的感受程度，它除了视对象的大小和提示时间之外，还随观测者的年龄而增

表9-23 等效光幕亮度公式中的常数

实 验 者	K	n	备 注
Holladay	9.2	2.0	
Stiles	4.16	1.5	
Stiles 和 Crawford	10.	2.0	4° < θ < 100°
Fry 和 Alpera	7.1	2.5	1° < θ < 8°
Boynton et al	4.85	2.	
Vos 和 Bouman	29.	2.8	

加(107)。

视野内有 n 个眩光源时的等效光幕亮度等于各个眩光源的等效光幕亮度之和:

$$L_{e,v} = \sum_{i=1}^n KE_{v(i)}/(0_i)^n \tag{9-236}$$

(3) 失能眩光的评价 Adrain^[109]提出了主要用阈亮度差的增加量来评价道路照明的失能眩光的方法,即如果没有眩光源时的阈亮度差为 ΔL,有眩光源时的增加量为 p(%),则这时的阈亮度差 ΔL' 为

$$\Delta L' = \frac{p}{100} \times \Delta L \tag{9-237}$$

用 Holladay 的常数 K = 9.2, n = 2.0, 从 (9-235) 式、(9-236) 式求 L_{e,v}, 再和平均路面亮度 L 联合起来, 从图 9-98 求得 p。

神部^[110]从两个日本人的实验, Bell^[111]则利用 CIE TC-4.1 的标准对比灵敏度曲线分别提出可以得到和图 9-98 同样倾向的图的评价方法。

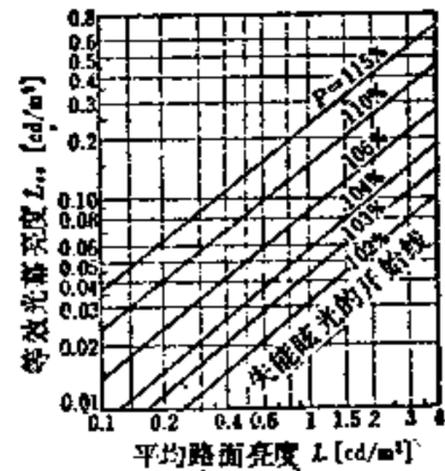


图9-98 对于 8 分视角的视对象, 作为平均路面亮度和等效光幕亮度的函数的阈亮度差的增加量

参 考 文 献

<p>(1) 寺村: 精密球帯係数表, 照学誌, 46-2 (昭 37) 63 (2) A. Wohlauer: Illum. Engng. (N. Y.) 3 (1908) 655 (3) 山内: 近似平均値の計算法と平均燭光, 測定上の応用 (2), 照学誌, 9-2 (大14) 411 (4) 関: 光束計算新方法及新配光曲線, 照学誌, 9-3 (大14) 360 (5) JIS C 7602 瞬時起動熱陰極ケイ光放電管 (6) JIS C 7601 けい光ランプ (7) 照明学会: 新編照明のデータブック, オーム社 (1968) 210 (8) 吉川, 猪野原: 屋内照明計算のための球帯係数の計算法と表, 照学誌, 58-9 (昭 49) 507 (9) 山内: 電試験 (昭 2) 194 (10) 文献 (7) 219 (11) 照明学会: 照明のデータブック, オーム社 (1953) 191 (12) 文献 (7) 221 (13) 文献 (11) 193 (14) 久野: 多角形光源に依る照度の図式計算法, 照学誌, 17-10 (昭 8) 252, 久野: 任意の形の平面光</p>	<p>源に依る照度の図式計算法, 照学誌, 17-11 (昭 8) 288 (15) 山内: 照明の場の理論, 照学誌, 13 (昭 4) 345 (16) 尾本: 照明計算, (昭 16, 第 5 版) 144 (17) 黒沢: 日照委 No. 7 (1970) (18) 齊藤, 浜二: 照明器具の傾きに伴う照射点の移動と水平面照度の変化, 照学誌, 49-2 (昭 40) 69 (19) 寺村: 平均照度算出の基礎理論, 照学誌, 49-6 (昭 40) 288~298 (20) 寺村: 平均照度の算定誤差について, 照学誌, 50-5 (昭 41) 196~208 (21) JIS Z 7612: 照度測定方法 (1968) (22) D. C. Hamilton, W. R. Morgan: National Advisory Committee for Aeronautics Technical Note 2836 (23) 山内二郎: 相互反射系の光束分布, 電試研 190 (昭 2) (24) 山内二郎: 等輝度矩形光源による直射照度の計算, 照学誌, 11 (昭 2) 241 (25) 松浦邦男: 室内の相互反射, 照学誌, 41 (昭 32) 539</p>
---	---

- (26) 佐土根範次, 猪野原誠: 屋内照明設計のための照明率, 輝度率表, 照学誌, 50 (昭 41) 272
- (27) 黒沢涼之助: 相互反射理論とその応用, 東芝レビュー, 17 (昭 37) 927
- (28) 伏見康治: 多重反射の問題, 数学セミナー, 4 (昭 41) 2
- (29) 山内: 相互反射面系の光束分布, 電試研報 No. 190 (昭 2)
- (30) P. Moon, D. E. Spencer: Lighting Design (1947), 照明設計 (昭 30) 309
- (31) O'Brien: Light Calculations for 35000 rooms Illum. Engng., 66 (1960) 215
- (32) 紀後, 室井: 反射面を含む放射系の相反定理について, 照学誌, 52-5 (昭 43)
- (33) J. Dourgnon et A. Godfert: Méthode pour le calcul des flux et des éclairagements en éclairage artificiel d'espaces clos. Cahier du CSTB, livraison 70, cahier 591 (1964) 12. 黒沢涼之助: 室内面の平均照度および平均輝度の計算に関する CIE 標準方法, 日本照明委員会ニュース No. 7 (1970) 2
- (34) 黒沢: 万能照明率表, 照学誌, 49-1 (昭 40) 23
- (35) 寺村: 照明計算法, 照学誌, 54-11 (昭 45) 589~602
- (36) 尾本: 照明計算 (昭 16 第 5 版) 132~133
- (37) 佐土根, 森田, 猪野原: 住宅用照明器具による室内相互反射, 照学誌, 49-4 (昭 40)
- (38) 横地: 多面体光束計の実用化 [I], 照学誌, 26-4 (昭 17) 29, 多面体光束計の実用化 [II], 照学誌 26-10 (昭 17) 105
- (39) W. Harison and E. A. Anderson: Coefficient of Utilization; Part II Paper., 15 (1920) 104~105
- (40) 久野清: 直六面体内の光束分布とその単純化尺度, 電気試験所研究報告, 第 394 号 (昭 11)
- (41) 山内二郎: The Amount of Flux Incident to Rectangular Floor through Rectangular Windows; Researches Electrotech. Lab., 第 250 号 (1929)
- (42) 石野幸三: 室内照明設計法, 森北出版 (1972) 5~7, 174
- (43) W. Harison and E. A. Anderson: Illumination Efficiencies as determined in an Experimental Room; T. I. E. S., 11 (1916) 67
- (44) W. Harison and E. A. Anderson: Coefficient of Utilization; T. I. E. S., 15 (1920) 97
- (45) 文献 (11) 216~217
- (46) J. R. Jones and J. J. Neidhart: Coefficients of Utilization for Luminaires with Concentrating Distributions; Illum. Engng., 46 (1951) 601
- (47) 松浦邦男: 作業面の等価反射率, 建築学会論文報告, 54 (昭 31) 509, 57 (昭 32) 225
- (48) D. E. Spencer: The Effect of Furniture on the Coefficient of Utilization, Illum. Engng 52 (1957) 35
- (49) 佐土根範次, 猪野原誠: 屋内照明設計における作業面照度および壁面, 天井面の輝度計算法の改善, National tech. Rep., 11 (昭 40) 216
- (50) 米国 IES: IES Lighting Handbook, 4th ed. (1966)
- (51) 米国 IES: The Calculation of Coefficients of Utilization; IES Technical Report No. 2 (1962)
- (52) CIE: Proposal for a CIE-Method for Computing mean Illumination on Working Plane and Walls of Rooms CIE E-3. 1.1.1 A.S. No. 109, 22.11. (1966)
- (53) 松下電器産業: 作業面直接光束の算定法に関する調査資料 (昭 42)
- (54) K. Stolzenberg and E. Wittig: Die Projektierung von Beleuchtungsanlagen für Innenräume nach dem Wirkungsgradverfahren (1961)
- (55) W. Harison, E. A. Anderson: Coefficients of Utilization Trans. I. E. S., 15 (1920)
- (56) 山内: 相互反射系の光束分布, 電試報 (昭 2)
- (57) 山内: On the blackness of cylindrical black-body, 電試研, No. 378 (昭 9)
- (58) H. Buckley: On the radiation from the inside of a circular cylinder, Phil. Mag., 4 (1927) 753
- (59) P. Moon, D. E. Spencer: Lighting Design (1947)
- (60) P. F. O'Brien: Zonal Cavity Method of Calculating and Using Coefficients of Utilization, Trans. Illum. Engng., 59 (1964) 309
- (61) 黒沢: 室内面の平均照度および平均輝度の計算に関する CIE 標準方法, 日照委 No. 7, p. 11.
- (62) 黒沢: 万能照明率表
- (63) 久野: 固有利用率の計算法, 照学誌, 21-3 (昭 12) 131
- (64) 高橋, 藤井ほか: 室内照明における照度予測の電子計算化, 照学誌, 34-12 (昭 45) 697~707
- (65) J. Dourgnon: Calcul du flux envoyé dans un rectangle par une source de révolution C. R., 16 e CIE Session (1967) 292
- (66) 佐土根ほか: 屋内照明器具の照明率の実験的検討, 照学誌, 52-4 (昭 43) 116
- (67) 寺村: 照明計算法, 照学誌, 54-11 (昭 45) 599
- (68) Ziro Yamauti: Theory of Field of Illumination, 電試研究報告, No. 339, Oct. (昭 7)
- (69) P. Moon, D. E. Spencer: Theory of The Photopic Field, Jour. Franklin Inst Jan. (1953) 33, P. Moon, D. E. Spencer: Some Applications of Photopic Field Theory, Jour. Franklin Inst Feb. (1953) 113
- (70) J. A. Lynes et al: The flow of light into buildings, Trans. Illum. Engng Soc., London, 31-3 (1966) 65
- (71) Interior Lighting Design, metric edition, Lighting Industry Federation Limited, 3rd ed. (1970)
- (72) Gutorov, M. M.: Die mittlere zylindrische Beleuchtungsstärke, Svetotekhnika, 9 (1963) H-10, S. 10-13
- (73) F. Haeger et al: Über die Messung der mittleren zylindrischen Beleuchtungsstärke, Lichttechnik, 22-12 (1970) 595
- (74) M. M. Epaneshnikov and T. N. Sidorava: Otsenka Nasyschennosti Svetom Pomeshchenii Obshchestvennykh Zdani, Svetotekhnika, 11, Jan. (1965)
- (75) C. Cuttle et al: Beyond the working plane, Proc. of the C. I. E. Conference, Washington (1967)
- (76) IES Code for interior lighting, IES (London) (1977) 64

- (77) CIE International Electrotechnical Vocabulary Group 45: Lighting, 45-10-080
- (78) 室井徳雄: 輝度 (Luminance) と Helios について, 照学誌, 50-2 (昭 41) 70
- (79) P. Moon: A System of Photometric Concepts, J. Opt. Soc. Amer. 32-6 (1942) 313
P. Moon and D.E. Spencer: Lighting Design (1948)
- (80) M. Luckiesh and S.K. Guth: Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD), Illum. Engng., 44-11 (1949) 650
- (81) P. Petherbridge and R.G. Hopkinson: Discomfort glare and the lighting of buildings, Trans. Illum. Engng. Soc., London, 15 (1950) 39
- (82) 真辺春蔵: グレア研究委員会報告, 照学誌, 55-1 (昭 46) 4
- (83) CIE: Guide on interior lighting, Publication CIE No. 29 (TC-4.1) (1975)
- (84) W. Robinson, et al: The development of the IES Glare Index System, Trans. Illum. Engng. Soc. (London), 27-1 (1962) 9
- (85) IES: Evaluation of discomfort glare: IES, Glare Index System for artificial lighting installations, IES(London)Tech. Rep. No. 10 (1967)
- (86) 真辺春蔵: イギリス照明学会, 照明要綱-屋内照明の推奨, 1961, 照学誌, 48-4 (昭 39) 154
- (87) R.G. Hopkinson and J. Longmore: Nomogram for Glare Index Calculation, Light and Lighting, 5 (1962) 146
- (88) L. Bedocs and R.H. Simons: The accuracy of the IES Glare Index System, Light. Res. Tech., 4-2 (1972) 89
- (89) IES Technical Committee: IES Tech. Rep. No 10, Evaluation of discomfort glare, the IES Glare Index System for artificial lighting installations, Light. Res. & Tech., 4-3 (1972) 172
- (90) 松田宗太郎, 洞口公俊, 吉川幸弥: グレアの感覚的評価に関する実験と考察, 照学誌, 53-1 (昭 44) 51
- (91) W.M. Collins: Trans. Illum. Engng. Soc., London, 27 (1962) 27
- (92) Committee on Recommendations of Quality and Quantity of Illumination, Report No. 2: Outline of a Standard Procedure for computing Visual Comfort Ratings for Interior Lighting, Illum. Engng., 61 (1966) 643
- (93) W. Allphin: BCD appraisals of luminaire brightness in a simulated office Illum. Engng., 56 (1961) 31
- (94) S.K. Guth: A method for the evaluation of discomfort glare, Illum. Engng., 58 (1963) 351
- (95) R.E. Levin: An evaluation for VCP calculations, Light. Des. Appl., 2, 6, (1972) 40
- (96) 金子直礼, 高橋貞雄, 藤井克人: 室内照明の不快グレア評価について, 照学誌, 55-9 (昭 46) 560
- (97) G. Söllner: Ein einfaches System zur Blendungsbewertung, Lichttechnik, 17-5 (1965) 59A
- (98) D. Fischer: The European glare limiting method, Light. Res. Tech., 4-2 (1972) 97
- (99) RQQ Report No.4: A method of evaluating the visual effectiveness of lighting systems, Illum. Engng., August (1970) 504
- (100) 米国 IES: IES Lighting Handbook, 5th ed., (1972) 9-81
- (101) 文献 (50) 2-16
- (102) CIE: A Unified framework of methods for evaluating visual performance aspects of lighting, Publication CIE No. 19 (TC-3,1) (1972) 76
- (103) RQQ Report No.5: The predetermination of CRF for the calculation of ESI, J. Illum. Engng. Soc., 2-2 (1973) 149
- (104) H.V. Helmholtz: Ann. Physik. Chemie, 86 (1852) 501
- (105) L.L. Holladay: Action of a light-Source in the field of view in lowering visibility, J. Opt. Soc. Amer., 14 (1927) 1
- (106) W.S. Stiles: The effect of glare on the brightness difference threshold, Proc. Roy. Soc. B 104 (1929) 322
- (107) A.W. Christie, and A.J. Fisher: The effect of glare from street lighting lanterns on the vision of drivers of different ages, Trans. Illum. Engng. Soc., London, 31-4 (1966) 93
- (108) 猪野原誠: 視覚研究の展望-周辺視野輝度分布と知覚閾値の関係について, 照学誌, 60-11 (昭 51) 38
- (109) W. Adrian et al: A simple method for the appraisal of glare in street lighting, Light. Res. Tech., 2-2 (1970) 61
- (110) 神部尚武: まぶしさの評価, 東芝レビュー, 23-9 (1968) 1100
- (111) R.I. Bell et al: Disability glare: the relationship between veiling luminance and threshold rise, Light. Res. Tech., 7-1 (1975) 56
- (112) 尾本義一: 照明計算, 第4版 (昭 15) 58

第10章

照明设计基础[⊖]

10-1 设计要求和目的

10-1-1 照明的目的

照明的目的就是给周围的各种对象以适宜的光分布，通过视觉，达到以下二个方面的要求：

- (1) 易正确识别人们所欲知的对象；
- (2) 易确切了解人们所处的周围的情况。

周围对象可分为：

- (1) 视觉工作对象：直接与正在进行的工作目的有关的对象；
- (2) 环境：不太有意识地注意的对象。

视觉工作对象不只限于一种，有最主要的和次要的视觉工作。在每个进行照明的范围内，最好恰当地提出视觉工作对象。

直到现在为止，将照明目的大致可分为，以功能为主的明视照明和以舒适感为主的气氛照明。做为照明目的，明视性虽然重要，而舒适感、高兴、心情舒畅也是非常重要的。前者与视觉工作对象的关系密切，而后者与环境的关系大。

还有从照明要素的属性看，可分为生理照明和心理照明，前者主要与视觉工作对象关系大，而后者主要与环境关系大。

当然，属于何种照明不能简单地决定，而是要看各种照明所占的比重大小。例如，在办公楼、工厂、商业设施各领域内，或在某一设施的使用目的方面，应当考虑这些比重大小是不同的。将此汇总，列于表10-1中。

此外，关于在各领域内的观点，可参照第12~26章的论述。

表10-1 照明对象与照明技术的关系

照明对象	照明技术	照明要求的属性
视觉工作对象	明视照明	生理照明
环境	气氛照明	心理照明

10-1-2 照明要求

以办公室为例，来说明照明环境的照明要求。图10-1表示办公室照明的示意图。而且将对每个对象所规定的各项要求列于表10-2中。

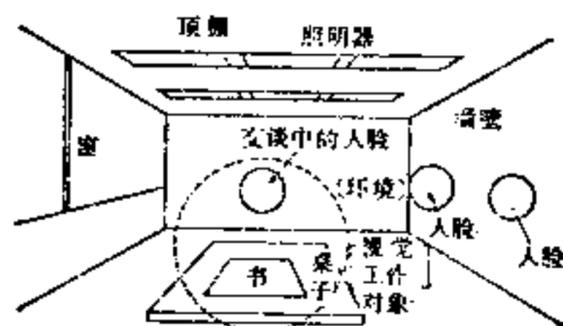


图10-1 办公室工作的视野示意图

⊖ 本章主要叙述一般室内照明设计基础性的而且共同性的观点，至于道路照明等室外照明设计，可参照20章以后各章。

表10-2 照明诸要素

照明设计对象		要求
视觉工作对象	工作面(书等)	照度 照度分布、阴影 光的方向性 { 阴影、材料质感 反射眩光、光亮 光源的光色和显色性
	交谈中人的脸	照度 光的方向性(立体感) 光源的光色和显色性
环境	室内空间(主要的:人脸)	
	表面(亮度高而且立体角大的表面)	顶棚 墙壁(窗) 地面
		光源
		照明器 窗
		照度 光的方向性 光源的光色和显色性
		亮度分布和照度分布 反射系数
		眩光
		附带的各项要求、恒定的人工辅助照明(PSALI)

表10-3 照明要求概要

要求	对象	照明技术或标准	所在章节
照 度	照度水平	除工作面外还有人脸	JIS 照度标准
	照度分布	工作面	10-1-3[1], 10-1-3[2], 10-1-4[1]
	阴影	工作面	10-1-5[1]
亮度分布和照度分布	照度分布	工作面及其周边	10-1-4[1]
	亮度分布 反射系数 照度分布	房间的各表面、顶棚、墙面、地面	10-1-4[2]
光的方向性和扩散性	阴影	遮挡形成的阴影	工作面等
		必要的阴影 立体感 材质感的表现	
	反射	反射眩光, 光幕反射 反射眩光	
		光亮、光泽、亮等 的材质感的表现	
亮度分布 (发光面为主)	眩光, 失能眩光 不舒适眩光	照明器和窗	眩光评价、限制法: 眩光指数法(英) 视觉舒适概率法(美) 亮度限制曲线法(德) CIE 暂行法
	亮和闪烁	照明器	
光 源	光源色		10-1-7[1]
	显色性		10-1-7[2]
美的考虑			10-1-8
经济性			10-1-9

另一方面，与此表相反，不按对象，而将按照要求重新汇总的材料列于表10-3中。以下将这些要求予以说明。

10-1-3 照度

作为照明要求，照明数量即照度是非常重要的。原因是没有光线，就看不见物体，照度越高，越能很好地识别物体。

(1) 工作面照度 到目前为止，在研究室内照明时，通常的工作面是水平工作面，例如桌子面。

至少应使放在桌子上的字较小的书能很好地看见，这是明视条件下有代表性的视觉对象，但在过去由于照明费用比其它物价高，达到此要求是有困难的。进行了一些以读细小文字为条件而求必需照度的实验，此结果已反映在日本工业标准（JIS）的照度标准中。

另一方面，近年来，对于作为必要照度所应具备的条件，从来就提出了不同的见解。所强调的重要意见是要为在某一环境中劳动和生活的人，提供舒适的环境。关于适宜照度，也进行了以房间的舒适感为标准的实验，其结果示于图10-2，图中表明大约 2000 lx 为最适宜的照度。

此外，在决定实际使用的照度时，多从经济方面来权衡。其中包括对各个国家各个时期经济能力、工作种类等的综合平衡和判断，以确定推荐的照度。

关于日本正在采用的最近的标准，可参照10-4节日本工业标准（JIS）照度标准。

(2) 人脸的照度

(a) 人脸的重要性 作为室内照明的视觉工作对象，非常重要的、数量仅次于书籍的是人脸。

为什么会想到人脸呢？因为人脸虽然想像上重要，但过去从来没有有意识地把它做为设计对象。而在社会生活中，人们将大多数的时间用于同周围的人们面谈。在面谈中，人脸的表情是表达意志的重要途径。因而，同一般人谈话时，不露脸面被认为是失礼的。

(b) 必要照度 对于处在通常亮度的墙壁前面的人脸，要辨认出他的表情所必需的亮度，一般认为：

- I. 最适宜 240 cd/m²
- II. 允许 17 cd/m²
- III. 刚刚能识别 1 cd/m²

如以人脸的反射系数为30%，换算成照度，则变成：

- I. 最适宜 2400 lx
- II. 允许 170 lx
- III. 刚刚能识别 10 lx

通常在采用荧光灯照明器的一般照明情况下，因为要考虑能得出垂直面照度为水平面照度的0.4~0.6倍，如果将水平面照度设计成700~1500lx，则可得垂直面照度为280~900lx，大体可满足上述II的要求条件。

此外，人脸的背景特别亮时（如白天的窗户）所必须的条件，可参照8-4节恒定的人工辅助照明（PSALI）。

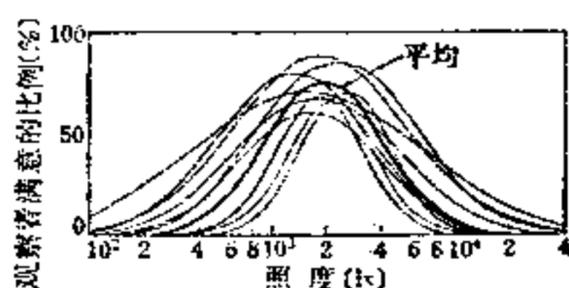


图10-2 照度和主观满意程度

10-1-4 照度分布和亮度分布

(1) 工作面上的照度分布 (均匀度) 视觉工作对象的正确布置和它如何变化, 通常难以预测。因而希望工作面照度处于某种程度的均匀度以内。

在全部平面内, 照度不必都一样, 但变化必须平缓, 现将推荐值的例子表示如下:

(a) 作为均匀度, 局部工作面的照度值最好不大于平均值的25%。总之, 最低值应尽量不低于推荐值。工作面的照度比应为10:3以下 (CIE指南^[8])。

(b) 对于一般照明, 最小照度与平均照度之比规定为0.8以上 (IES 室内照明标准^[9])

除上述的均匀度外, 还应如后面10-1-5(1)所述的, 注意防止由于手遮挡而产生阴影的问题。

(2) 室内各表面的亮度分布和照度分布 为了形成良好视看的照明环境, 而且是舒适的环境, 需要有适当的亮度分布, 这可通过规定室内各表面的适宜的反射系数范围, 以组成适当的照度分布来实现。

(a) 亮度分布 在视野内亮度分布适当的场所, 最易视看物体。在室内亮度分布变化过大而且视线不固定的场所, 眼睛由于到处环视, 其适应情况经常变化, 从而引起眼睛的疲劳和不舒适。因而亮度分布的均匀程度, 最好作出某种规定。另一方面, 过于均匀的亮度分布, 会使室内过于呆板, 形成阴暗感, 也不能令人满意。

此外, 在没有明视中心, 而以气氛照明为主的照明场合, 宁愿有一定程度的变化, 使室内不单调, 从而形成愉快的气氛。

例如, 在接待室和食堂等处, 桌子上的照度为周围照度的3~5倍, 被认为有可能起到有中心感的效果。

(b) 推荐值 包括亮度分布和室内各表面的反射系数推荐值, 或各表面照度分布同各表面的反射系数相配合的推荐值。

① 美国照明工程学会

(i) 室内各部分的亮度分布的限度^[10], 见表10-4。

(ii) 室内各表面反射系数的推荐值^[10]见表10-5。

② 英国照明工程学会^[9]

1973年提出的关于照度分布和室内各表面的反射系数推荐值, 如图10-3所示。

③ 墙面照度的推荐值。令人满意的墙面亮度是随工作面照度而变化的, 而且还会随墙面的反射系数而异。因为在反射系数低的墙面而照度高的场所和在反射系数高

表10-4 亮度比的推荐值 (美国照明工程学会)

	办公室	工厂
工作对象与周围之间(例如书与桌子之间)	3:1	3:1
工作对象与离开它的表面之间(例如书与地面或墙壁之间)	5:1	10:1
照明器或窗与其附近之间		20:1
在普通的视野内		40:1

表10-5 室内反射系数的推荐值 (美国照明工程学会)

	反射系数推荐值
顶棚	80% (80~90%)
墙壁	50% (40~60%)
桌子、工作台、机械	35% (25~45%)
地面	30% (20~40%)

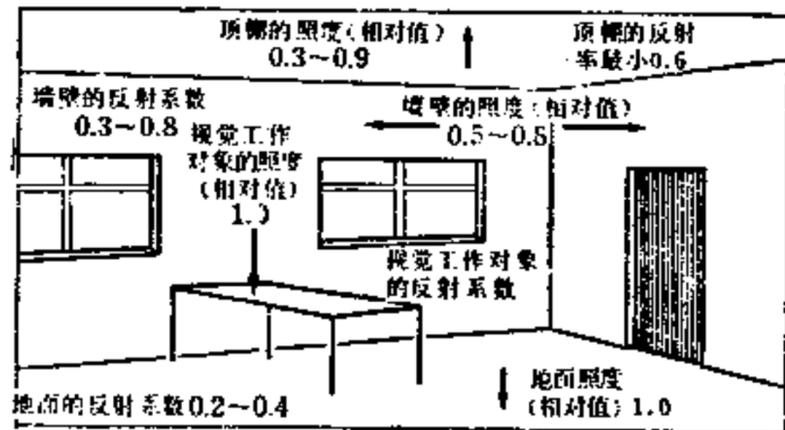


图10-3 室内各表面的反射系数和相对照度的推荐值

的墙面而照度低的场所，虽然亮度相同，然而造成的心理效果是不同的。

一般的照明计算以照度计算居多，而且为了方便，将所需的墙面亮度，用图10-4所示的照度形式来表示。这是田渊^[12]将Fisher^[11]的资料加以变换得出的。

按上述(1)、(2)的推荐值，设定墙面的反射系数为40~60%时，则很容易决定满意的墙面照度。

10-1-5 光的方向性和扩散性

这里阐述有关光通的空间分布。由于光照射到对象上的方向不同，在对象上产生的阴影、反射状况和亮度分布均不同，从而产生使人满意和不满意两种情况，如表10-6所示。

光照的方向性、扩散性或光源的立体角和亮度等，作为照明条件，给对象的表现以微妙的影响。

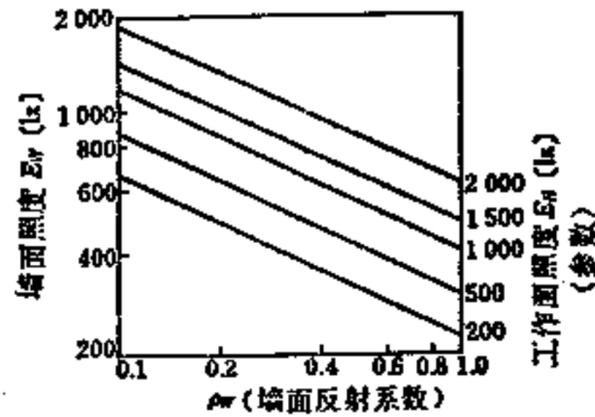


图10-4 对应于工作面照度的满意的壁面照度

表10-6 由光照射在对象上产生的亮度分布

	不满意状态	满意状态
阴影	由遮挡形成的阴影	立体感、表现材质感的阴影
反射	反射眩光	光亮、光泽、亮等的材质感的表现

(1) 阴影 有两种阴影，即由遮挡形成的阴影和为表现立体物体的立体感所必需的阴影。

(a) 由遮挡形成的阴影 当视觉工作对象上产生阴影时，则使对象的亮度和亮度对比降低。在工作面上产生手的阴影和身体的阴影，或者人脸由逆光照明所形成的阴影，都不能令人满意。为了防止产生这种现象，可将照明器作成扩散性的，并在布置上加以注意。将方向性强的光源布置得太分散也不理想。

关于由阴影造成工作照度降低的允许界限值，请参考10-1-4(1)均匀度的数据。

(b) 必要的阴影

① 立体感 为了表现立体物体的立体感，需有适当的阴影。对于房间的结构和需清楚表现出室内人的形态这样的立体视觉工作对象，当形成适宜的阴影时，则可改善其可见度。为此，光不能从几个方向来照射，而是几乎由一个方向照射来实现。所谓立体感这一术语是指用光来表示立体对象形态优劣的。

为了实现有理想的立体感的照明条件，一些国家进行了若干研究^{[13]~[17]}。由于还没有建立确定的学说，故仅介绍其代表性的资料。

Moon 和 Spencer 阐述了当立体的明亮部分同最暗部分的亮度比为2:1以下时，形成呆板的感觉，造成10:1以上时，则印象强烈，最理想的是3:1^[13]。

为了阐述照明条件，Cuttle 等定义了如下立体感指数，以求得人脸上有理想的立体感条件^[14]。

(i) 标量照度 (Scalar illumination E_s) 某一点小球面上的平均照度。

(ii) 照度矢量 (illuminance vector \vec{E}) 某一面的表面和里面的照度差的最大值，方向为从亮面向暗面的方向。

(iii) 矢量与标量之比 (vector: Scalar ratio \vec{E}/E_s) 照度矢量的绝对值与标量照度之比。

实验结果

(i) 照度矢量的方向

当方位角 $\varphi = 0^\circ$ 、 180° 时，立体感不理想； $\varphi = 30^\circ \sim 120^\circ$ 的范围理想；当 $\varphi = 90^\circ$ 和高度角 $\alpha = 15^\circ \sim 45^\circ$ 时最好。 $\alpha = 90^\circ$ 时最不好。

(ii) 矢量与标量之比

在普通的房间内，由于难于确定固定的视线方向，因此，视线可能是任意的视线方向。将方位角 φ 为 30° 、 60° 、 90° 、 120° 等情况时，求出的矢量与标量之比的范围加以汇总，其结果如图10-5所示。

此外，上述结果只适用于采用立体角比较大的光源照明时，采用点光源照明时，不一定适用。

在现实的室内照明中，多属于顶棚上的照明器为规则布置的一般照明，这种光从正上面来的照明，在人的脸上可有完全理想的立体感照明条件。将 ρ_f 作为地板空腔的等效反射系数。

(i) $\rho_f < 0.15$ 时，立体感效果强烈。

(ii) $\rho_f = 0.15$ 时，配光为 BZ5~6 (英国的分带法) 的照明器，可得到良好的效果。

(iii) $\rho_f = 0.25 \sim 0.3$ 时，除 BZ7~10 外，大体可得到良好的立体感效果。

(iv) $\rho_f = 0.35$ 时，BZ 号数大的立体感效果不佳。

(v) $\rho_f > 0.4$ 时，立体感效果过于呆板^[15]。

Fischer 进行了同样的实验，说明从上面来的照明，对于人脸最理想的矢量与标量之比约为 1.5，对于静物约为 2.0^[16]。

此外，详细的计算方法可参照9-9节。

② 材质感的表现 是靠产生小的阴影来表现物体的粗糙和凹凸等来变化质地、材质感的表现方法^[15]。通常当安设从斜向来的指向性光照明时，可强调材质感。最好利用点光照明或壁面照明，从而形成愉快的照明效果。

要特别注意商店照明和检查照明，请参照各章。

(2) 反射 由于亮的照明器或窗能使视觉工作对象表面闪闪发光，当光反射到眼睛方向时，可产生如下二种情况：

(a) 反射眩光 这里有如下的二种形式，即可由下述之一或两者同时所引起。

① 在视觉工作对象上产生对比降低：特称此现象为光幕反射 (Veiling reflection)。

② 视觉工作对象旁的反射眩光：解决反射眩光的方法是按照工作面的照度大部分是由最理想的方向得到的方法进行照明装置的设计。用在工作者视线的垂直面上不布置照明器来实现。

视线方向因视觉工作不同，其主要方向、变化幅度和频率是不同的。关于最标准的视觉工作，如读书和写字工作，可得出图10-6所示的结果^[18]。

此结果用视线与桌子的垂线所形成的角度来表示，85%的角度处在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内，中心值为 27° ，以 25° 为面向桌子做工作人的代表性视线。

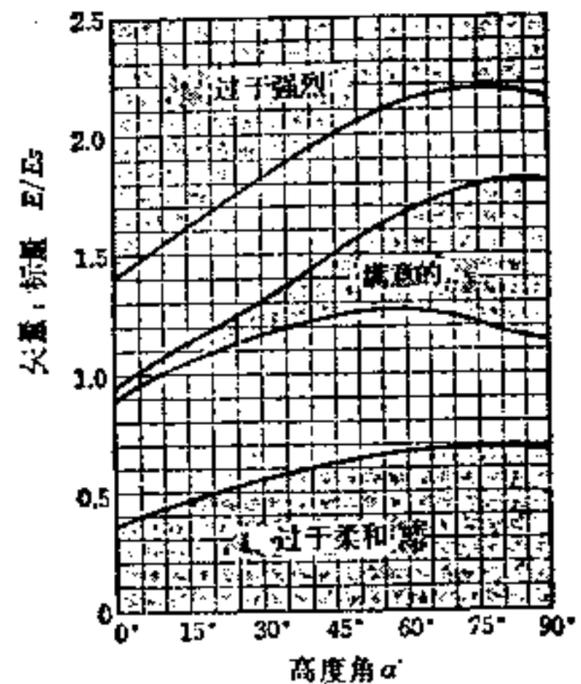


图10-5 满意的矢量与标量之比

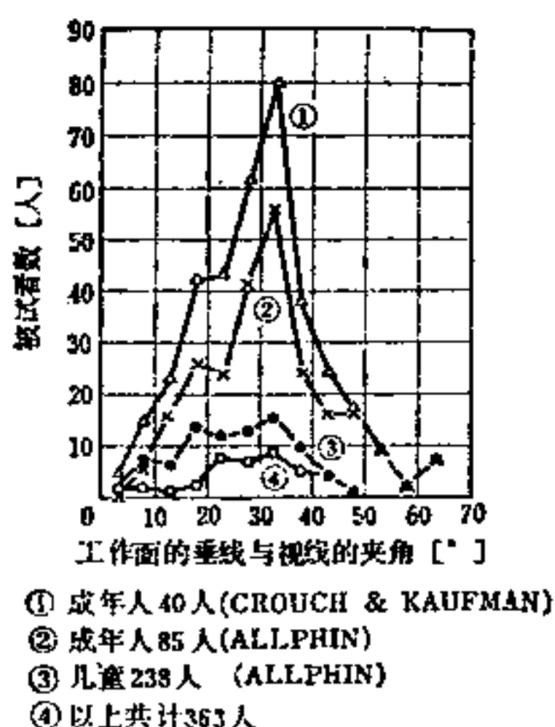


图10-6 面向桌子工作的人的视线方向

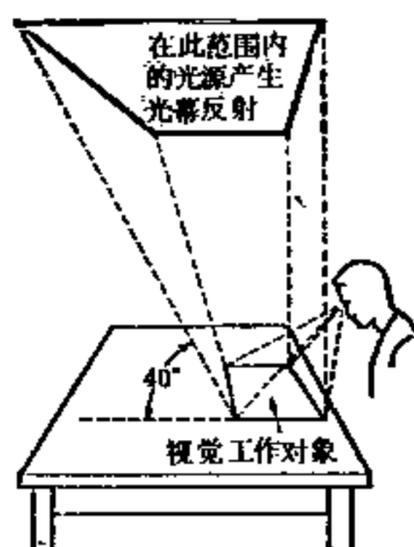


图10-7 使水平视觉工作对象的对比降低的光源反射的不舒适范围
 (约85%办公室的视觉工作对象, 从垂直起在0°~45°范围内观看)(IES标准, 1973)

视线的活动范围如图10-7所示, 从工作者的眼睛向桌子表面上的垂线, 以及与此垂线成40°角的直线所包括的范围, 可大致认为是正方形的。

反射眩光产生于当光源同眼睛的位置刚好保持正反射关系时。图10-7表示在水平工作对象上不产生反射眩光, 和最好不布置照明器的范围〔19〕。

(b) 材质感的表现: 光亮、光泽、亮 贵重金属或宝石等的发光, 珍珠和磁器的光泽, 或者刚刚烧好的饭等的光亮, 给人以豪华的或者诱人的美, 或者使人心情高兴。可用立体角小的高亮度光源来强调这样的效果〔15〕。

在商店等照明中, 要特别注意。

10-1-6 亮度分布——特别是发光面

在视野内的高亮度的点或面, 如光源、窗和光泽的表面等, 由于高亮度, 有时可形成最好的条件, 有时产生眩光。这里仅阐述①由遮挡形成的眩光; ②满意的亮和闪耀。

(1) 眩光 在视野内因看见亮度过高的点和面所引起的障碍, 称为眩光。它可引起不舒适感、眼疲劳、可见度降低等。

(a) 直接眩光和反射眩光 对于亮度高的物体, 如光源、照明器、窗等。如果其光线直接进入眼内, 则产生直接眩光。其光线在光泽面上被反射后, 进入眼睛, 则产生反射眩光。关于反射眩光已在10-1-5(2)叙述。

(b) 碍视眩光和不舒适眩光 眩光有两种形式, 它们可分别产生或同时产生。第一种称碍视眩光或失能眩光(disability glare), 它使看清物体的能力降低。第二种是不舒适眩光(discomfort glare), 人们长时间停留于某一室内, 使人感到不舒适。在室内照明中, 实际上不舒适眩光比碍视眩光问题更大。

(c) 不舒适眩光的评价法 关于由照明装置形成的眩光的评价法, 已进行了许多研究〔20〕,〔21〕, 形成眩光的主要因素可列举如下:

- ① 光源亮度;
- ② 看见的光源大小和数量;
- ③ 光源位置;

(4) 周围亮度。

各国已研究出若干眩光限制法，分别为各自国家单独采用。代表性的有：

(i) 英国照明工程学会的 IES 眩光指数法^[22]。在通常的室内照明中，眩光指数最好在19以下。

(ii) 美国的视觉舒适概率法 (VCP 法)^[23]。在室内照明中，视觉舒适概率一般在 70 以上。

(iii) 联邦德国的亮度限度曲线法 (luminance curve method)^[24]。

(iv) CIE 暂行法^[25]。

关于这些方法的详情，请参照9-8节。

(2) 亮和闪耀 不论是高亮度的光源，还是熊熊燃烧的火焰和夕阳映照下的波浪的闪耀，均给人的心情带来兴奋和刺激，使人心情愉快。在照明中，采用较多的球形电灯，给人带来辉煌的陶醉感，发光天棚的闪耀给人们带来愉快的刺激。不应忘记，高亮度光源能带来愉快的积极的效果。

不管眩光也好，还是舒适的闪耀也好，依各自场所和状态，各具其最适宜的光源亮度条件和符合这个条件范围的舒适性，而且还应当考虑过度的眩光问题。

现在，关于亮和闪耀的效果，还不能实现定量化，应根据设备的目的要求，确定与场所相适应的光源和立体角。

在实际的设计中，可按各自所属范围参照各章。

此外，现在的眩光限制法，以眩光尽可能少为最好，但也有人认为，有适当的眩光，反而开朗、满意。因此，在将来，需要规定各种场所的理想条件，超过此条件的场所，有眩光，但在此条件以下的场所，需有解决所谓阴暗感的评价法。

10-1-7 光源色和显色性

(1) 光源色

(a) 色温及其感觉 因光源的色温不同，有如表10-7所示的冷暖感的变化^[26]。

表10-7 色温及其感觉

色 温 (K)	感 觉
>5000	冷 中 暖
3300~5000	
<3300	

(b) 色温度和照度 有表 10-8 所示的关系^[26]。

表10-8 对照度和色温的一般感觉

照 度 (lx)	对 光 源 色 的 感 觉		
	暖	中 间	冷
≤500	愉 快	中 间	冷
500~1000	↑	↑	↓
1000~2000	刺 激	愉 快	中 间
2000~3000	↓	↓	↓
≥3000	不 自 然	刺 激	愉 快

此外, 由于气候不同, 对色温的爱好也不同。例如在温暖的国家, 喜欢色温高的光源。

(2) 显色性 必须能令人满意地看出室内物体的本来颜色, 光源所表现的物体色的性质称为显色性。详情请参照 4-2 节所述。

做为显色性的评价方法, 现在广泛采用的是 CIE 法, 或 JIS (JIS Z 8726-1967) 法, 其基本点可归纳如下:

用天然光或完全扩散体作为标准光源照明时, 同用给定光源照明进行比较时, 所看见的物体颜色的相差程度, 相差少时, 评价为好, 从某种意义上说, 这亦可称为显色真实性的表现法。

如果从实际的照明设计立场来考虑, 显色指数不是 100 时, 它表示物体的颜色比标准光源照明时的颜色有偏离的情况, 这种偏离方向也会有偏向主观评价不理想的方向, 或者相反, 也会有偏向理想的方向。因此, 即使显色指数小的灯, 也不能一概地说比显色指数大的灯不适宜于照明。

如在 10-1-3 节所述, 作为室内的一般的视觉工作对象, 重要的是书和人脸。但是白色的物体不着色时使人有纯白的感觉 (这是因为有所谓“纯白色”好的说法), 人的脸色好看是特别重要的。

对于上述两点, 通过放置一个观察目标来观察评价, 而且从显色性的数量上来评价, 从而提出了远比期望的有理想效果的显色性改善型的荧光汞灯的实例报告〔27〕。

此外, 在表 10-9 列出了灯的显色性和用途作为参考用〔28〕。它已刊载于 CIE 指南中。在日本非常广泛使用的荧光灯, 为一般显色指数 (R_a) 为 64 的白色荧光灯, 虽然现状的数值是稍低于此表的数值, 但在将来将广泛使用显色指数高的荧光灯。

表 10-9 灯的显色性和用途 (CIE, 1975)

显色性分组	显色指数 R_a 的范围	对光源色的感觉	使用场所举例
1	$R_a \geq 85$	冷 中 暖	纺织工厂、玻璃工厂、印刷工厂 店铺、医院 住宅、旅馆、饭店
2	$70 \leq R_a < 85$	冷 中 暖	办公室、学校、百货店、精细工作的工厂(暖和的南方国家) 同上(在温暖气候的地方) 同上(在寒冷的北方国家)
3	$R_a < 70$ 但是对于一般室内工作 完全能忍受的显色性的灯		显色性不那么重要的室内
S(特殊)			特殊用途

此外, 因为也有上面所论述的问题, 所以在选择灯时, 不只按显色指数, 而每当实际使用时, 还要将使用的灯点燃, 用眼睛来观察确认。

10-1-8 美观的考虑

到 10-1-7 节为止, 只注意所述要求的舒适性, 关于制做的照明设备, 在美观方面, 有深加考虑的必要。

除照明设备和照明器本身的设计要良好外, 它们作为室内装修的一部分, 其设计、颜色、形式、材质方面要同建筑和室内的构思在形式方面统一协调。

在照明器设计方面,例如花吊灯和壁灯等,直接给室内环境带来装饰的效果。选择照明器如同挑选汽车、钟表、服饰用品一样是一件快乐的事。所谓形式统一感,意味着同选择领带时同样愉快和需要慎重考虑。

在功能与美观方面,如空调照明器那样,使照明器同空调器送风口和回风口一体化,从而使顶棚简洁。

就照明器布置上的功能和构思的合理化来说,有用设备板连结成的体系化顶棚等。

10-1-9 经济性

按照前节的要求,一方面应尽可能提高照明质量、明视性和舒适性,另一方面,必须使照明做到最经济。

应注意的基本点是:

(1) 力图最有效地利用能源。为了提高照明的综合质量,高于或低于各项要求的各自水平的差别不能太大,也即使有限的能量有最适当的分配。

(2) 使效果(质量)同效率(能源)相平衡,效果和效率本来是对抗两立的难题,随着效果的提高,效率降低。然而不能仅使一个因素的水平无限增大而达到极点。因此,在即将达到极点之前,用变化极点使之平衡,有效的方法是使效果效率积 = (效果 × 效率) [假定名称] 达到最大^[29]。

具体的要求是:

(1) 实行最适宜的有效的光通分布,特别要有效利用生理照明和心理照明方面的照明技术成果。

(2) 为了保持必要的照明质量,在规定的范围内应尽可能选择效率高的灯和照明器具。

要注意的是在执行节电技术中,不能出现因节电导致超出节电要求的光量减少,结果效率降低了。

(3) 设有易进行维护的设备,进行必要的仔细地维护。

(4) 完全确保开关回路和调光回路可在小范围内点灭和调光,必要时,最好充分确保必要的光线。

此外,适当地利用天然光也是有效的方法(参照8-4节)。

10-2 设计程序

10-2-1 照明设计的目的

设置照明设备的目的和最终功能是利用该设备使设施得到光线分布。

多数照明器的单体能满足最终功能要求是没有的,只有将其安装在建筑设施内,形成所要求的照明状况才是有用的。因此,在照明技术中,按照明设备的各种要求,确定综合解决方法的技术,比灯和照明器的单体制作技术还重要。这对于一般的建筑设备均可以这样说。

所谓设计就是为了最大限度达到某一设施的目的和要求,能够形成适宜的照明环境,这就是所谓灯和器具如何布置的技术。

最近,强调对人的尊重,因此必须提高各种环境的质量水平。另一方面,由于资源的枯竭已达到危险可怕的程度,强烈要求省能。因此,对照明设备的要求是:如何将有限的能源

进行最适当的分配，以达到最大的效益。

关于各项要求，要给出各自要求的质量等级的分级，对于总的设备等级，有必要考虑使各项要求的等级取得平衡。若仅使某一要求高等级，因质量过高，而不经济。另一方面，当某一要求的等级过低时，它就变成制约的因素，使总的等级变低了，也是不经济的。

对于总的照明等级的水平，到目前为止尚未建立起按一定的程序，适当选择各项要求的等级的照明设计法，这是今后的研究课题。

10-2-2 设计程序

现在，尚未建立将10-1节所述的各项要求联系起来，同时解决上述要求的照明设计方法。现状是大体以确保水平面的照度为目标，根据大致的经验，选择灯和照明器，进行所需台数的计算后，进行布置的探讨，为了达到所需的照度，这样反复进行多次。此后，进行其它照明要求的检验，按照场所，在再选择的基础上，采取再计算和再布置的情况是很多的。可是为了开发在技术上经过探讨的新设备，宜按以下程序进行设计：

- (1) 明确照明设施的用途和目的；
- (2) 照明设施功能意图的确定；
- (3) 关于光环境构思的确定；
- (4) 光通分布的初步确定；
- (5) 照度、亮度等要求的确定；
- (6) 照明方式的选择；
- (7) 光源的选择；
- (8) 照明器的选择；
- (9) 照明器布置的确定；
- (10) 对照明要求的检验。

以上程序仅列出原则上的顺序，可以改变程序，或者可以省略清楚明瞭的步骤。

10-2-3 明确照明设施的用途与目的

规定从此进行建筑设施照明设备的设计，例如，有必要明确制定办公大楼、体育馆、店铺等的用途和使用目的。因为是太过于平常的事，开始设计时不是很有意识地注意，从来就很容易被忽视，因此，当设计开始时，有必要明确设施的目的。如果设施有多种目的，在确定满足其目的要求的照明设备的同时，还需要决定有可变的照明设备。

例如，日本式的房间就是多种使用目的的房间，在体育馆进行音乐演出，在食堂进行讲演的情况也是不少的。

最好细致地将这些目的列出来。例如，在办公室至少要同书和人进行接触。关于各领域的详情，可参照第12~26章。

10-2-4 关于照明设施功能意图的确定

本节抓住稍带有抽象的意图，把从来未提到的设施目的提出来了。例如，在法庭，表现“法的威信和尊严的照明”这种形式的意图，就是希望确定的功能意图（参照10-3节）。

10-2-5 关于光环境构思的确定

对于形成的房间照明的最终情况，可用与光有关的语言来表现光环境。

例如，以理想的办公室为例，也可采用这种状态的照明，如用“办公室照明如花荫下”来表现。

10-2-6 光通分布的初步确定

如上所述,若确立了光环境的构思后,关于这种环境的光通分布,有必要变为用物理条件来表示。例如,为了实现花荫下状况,采用扩散光,尽量形成柔和的阴影状况,而且不能变成阴雨天那样的阴沉沉的阴暗气氛。关于视野内的亮度分布,要避免极度的亮和闪耀,使其缓慢地变化。

10-2-7 照明要求的确定

关于在 10-1 节所述的设计要求,最好确定适当的规定值。

关于每个领域里的详情,可参照各章。

(1) 所需照度的确定

(a) 视觉工作对象的确定 视觉工作对象,即主要是看什么,有明确规定的必要。由此决定必要的照度。以办公室照明为例,重要的视觉工作对象是桌子上的书和人的脸。

(b) 照度

① 工作面照度 通常,照度是指水平工作面的照度。如在照明要求中所述,室内最理想的照度为 2000 lx,因为要直接达到此照度是困难的,所以实用上是参照现行的照度标准 JIS Z 9110-1975 或参照 10-4 节。

② 人脸的照度 如在 10-1-3(2)所述,规定为 170 lx 以上。

(2) 室内各表面的亮度分布和照度分布 参照 10-1-4(2),确定适当的反射系数后,便可由此确定适宜的照度。

(3) 光的方向性和扩散性 此项与下述的光源选择有关。

一般需要有明显的阴影和光泽面的光亮场合,选择有指向性的光源,如近似点光源的灯泡,特别要选择反射型的电灯等。为了尽量得到无阴影的照明,应选择有扩散性的光源,例如带扩散板的荧光灯具等。

此外,关于立体感所要求的条件,可参照 10-1-5(1)。

还有,关于检验照明等的技术手法,可参照 19-5 节。

(4) 眩光、亮、闪耀

(a) 眩光 在选定适当的眩光评价法后,这里要参照该法所附的推荐值,以确定限制标准。一般,如果采用 IES 眩光指数法,则眩光指数应在 19 以下。如果采用 VCP 法,VCP 最好在 70 以上,详细的可参照 9-8 节。为了防止眩光,宜采用遮光的灯具和带棱镜板的灯具。

(b) 亮和闪耀 商店的照明设备,因为亮和闪耀,可带来愉快的感觉,在希望招引顾客的场所,要考虑使用透明型电灯、花吊灯、壁灯等。具体的可参照各章。

(5) 反射眩光 为了防止反射眩光,在图 10-7 所述的限制范围内不布置照明器。最好不采用亮度过高的光源。还有发光天棚乍一看好像令人满意,但是用变换视觉工作方向和稍扭一下头和眼睛来防止反射眩光是困难的,结果怎样做也不能解决反射眩光的问题,因此就不太推荐用发光天棚。这可联想手拿照片看时的情况。

此外,桌子面最好不做成有光泽的,桌子上不放玻璃。

10-2-8 照明方式的确定

要决定采用下述方式中的哪一种方式。

(1) 一般照明^[30] 在一个房间内全部采用同样的照明方式,多在办公室中采用。其

优点是:

- ① 即使室内的工作布置变化,也勿需变更照明器的种类和布置。
- ② 照明设备的种类少,并将所有建筑作成统一的方式,使维护容易。

(2) 局部照明^[30] 在小范围内,对各种对象采用个别照明的方式,富于灵活性,其优点是:

- ① 按要求的条件,给每个必要的对象进行照明。易于部分地开关。
- ② 通过给某一对象特别高的照度,有效地突出对象。

但是,为了防止眼睛适应亮度的过度变化,应同时采用至少为局部照明照度20%以上的一般照明。

(3) 局部的一般照明^[30] 是将工作对象和工作场所按功能来布置照明的方式。而且,用这种方式照明所用的照明设备,也兼作房间的一般照明方式。要特别注意此方式与其它设备的协调,有必要确定用什么办法使整个房间有足够的一般照明。

这种方式的优点是,工作场所的利用系数高,由于可变更照明器的位置,能防止产生使人厌烦的阴影、直接眩光和反射眩光。

(4) 上述各方式并用。

10-2-9 光源的选择

各种光源在效率、光色、显色性、点灯特性等方面各有特长,将其归纳整理列于表10-10中。表中所载的是大致情况,是现在有代表性的数值,详情请参照灯的规格表。

表10-10 主要光源的特征和用途
(a) 白炽灯

灯名	种类	效率 (lm/W)		显色性	亮度	控制配光	寿命 (h)	特征	主要用途
白 炽 灯	普通型 (扩散型)	10~15	低	优	高	容易	通常 1000 (短)	一般用途,易于使用,适用于表现光泽和阴影。暖光色适用于气氛照明	住宅、商店的一般照明
	透明型	10~15	低	优	非常高	非常容易	同上	闪耀效果,光泽和阴影的表现效果好。暖光色,气氛照明用	花吊灯,有光泽陈列品的照明
	球型 (扩散型)	10~15	低	优	高	稍难	同上	明亮的效果,看上去具有辉煌温暖的气氛照明	住宅 商店的吸引效果
	反射型	10~15	低	优	非常高	非常容易	同上	控制配光非常好,点光。光泽、阴影和材质的表现力非常大	显示灯、商店、气氛照明
卤 钨 灯	一般照明用 (直管)	约20	低 稍良	优	非常高	非常容易	2000 (短,稍良)	形状小,大瓦数,易于控制配光	适用于投光灯 体育馆的体育照明等
	微型卤钨灯	15~20	低 稍良	优	非常高	非常容易	1500~2000 (短,稍良)	形状小,易于控制配光,用150~500W,光通量也适当	适用于下射光和点光 等的店铺照明

(续)

(b) 荧光灯和高强气体放电灯 (HID灯)

灯名	种类	效率 (lm/W)		显色性	亮度	控制配光	寿命 (h)	特征	主要用途
荧光灯		30~90	高	从一般到高显色性	稍低	非常困难	10000 (非常长)	效率高, 显色性也好, 露出的亮度低, 眩光较小, 因可得到扩散光, 故难于产生物体的阴影。可做成各种光色和显色性的, 灯的尺寸大, 因此照明器大, 不能做大瓦数的灯	最适用于一般房间、办公室、商店等的一般照明
汞灯	透明型	35~55	稍高	不好 (蓝色)	非常高	容易	12000 (非常长)	显色性不好, 易控制配光, 形状小, 可得大光通	用投光器的重点照明 (最好同其他暖色系的光源混光)
	荧光型	40~60	高	稍差	高	稍易	同上	涂红色的荧光粉, 可使颜色稍微变好	工厂、体育馆、室外照明、道路照明等
	荧光型 (显色改进型)	40~60	高	稍好 (实用上足够)	同上	同上	同上	涂以掺加红色荧光粉的蓝绿色荧光粉能得到一般室内照明足够用的显色性, 瓦数种类多	银行、大厅、商店、商店街等, 大瓦数用于高顶棚, 小瓦数用于低顶棚
金属卤化物灯	透明型	70~90	比汞灯高	好	非常高	非常容易	6000~9000 (长)	控制配光非常容易, 大体同荧光型的光色相同	体育场、广场、投光照明
	扩散型	70~90	比汞灯高	同上	高	稍易	同上	在显色性好的灯中效率最大, 与某些色有差别	体育设施、高顶棚的办公室、商店、工厂
高压钠灯	透明型	90~130	非常高		非常高	容易	12000 (非常长)	在普通照明所使用的光源中, 有最大的效率, 适用于省能	体育、投光照明、道路照明
	扩散型	90~125	非常高		高	稍易	同上	在普通照明所使用的光源中, 有最大的效率, 适用于省能	高顶棚的工厂照明、道路照明

注: 表(a)和(b)中的数值是选自主要品种的大概数值。

10-2-10 照明器的选择

按照照明方式、光源的种类、照度、设备费等选择适合的照明器。

特别在照明要求中, 也要从限制不舒适眩光角度预选可首先使用的照明器。图 10-8 是用房间进深与眩光指数关系的形式, 表示各种照明器在某一房间条件内安装时的眩光程度^[29], ^[31], ^[32]。

关于办公室照明的眩光程度的实际感觉, 暂定如表 10-11 所规定的眩光指数^[31]。

按图 10-8 和表 10-11 选择照明器, 可说明如下的情况:

- (1) 外露形照明器, 随房间进深的增大, 眩光也变大。
- (2) 下面开敞型的也有上述的同样倾向。
- (3) 下面开敞型半截光照明器 (带遮光罩) (保护角 15°), 眩光增加不多, 当眩光程

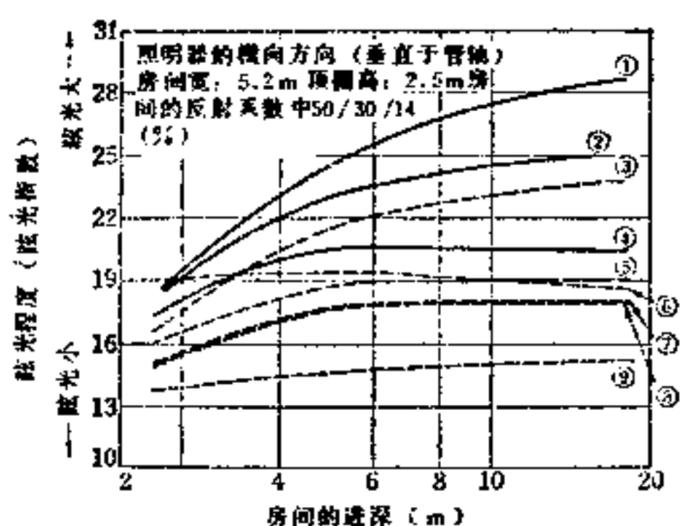


图10-8 各种荧光灯具的眩光程度

- ① 逆富士型；② 下面开敞型；③ 带乳白板；④ 下面开敞半截光型保护角15°；⑤ 带棱镜板；⑥ 镜面截光型（不带遮挡）；⑦ 带塑料格片；⑧ 带金属格片；⑨ 镜面截光型（带遮挡）保护角30°

表10-11 办公室照明的眩光程度与实际感觉的关系

眩光指数	实际感觉
19以下	非常好，特殊用途
19	好
22	稍好
25	介于稍好和稍差之间
28	稍差
31	差

(1978年暂行草案，田渊)

度在“好~稍好”时，非常适用于办公室等的一般室内照明。

(4) 镜面型截光照明器（带遮挡）的眩光最少，适用于对眩光限制有特殊要求的场所。

(5) 镜面型截光照明器（不带遮挡）、带棱镜板型照明器均具有限制眩光的效果。

(6) 带塑料格片、金属格片的照明器均有限制眩光的效果，但灯具效率低。

此外，考虑构思也是重要的。

10-2-11 照明器布置的确定

(1) 所需照明器台数的确定 若按上述选择了光源，则对于照明器可用 9-6 节所述的方法，计算所需的照明器台数。

(2) 布置的确定 根据上面(1)求出的照明器台数，考虑柱和梁的位置，先试用有规则地布置的方法，一般计算所需台数同布置的数量是不一致的。而且如果有显著的差别，就要改变灯的瓦数，再进行计算，重新布置照明器到大体相一致，此时计算出的最终照度，就是房间的照度。

10-2-12 照明条件的检验

根据上面的布置结果和在 10-1 节所述各项要求的规定值进行检验。根据检验结果，如果有必要对各步骤进行修正时，在重新选择灯和照明器后，进行修正计算。

以上所述仅是概括的理论，关于各个设施领域的具体设计，可参照各章。

10-3 设计时应考虑的事项

10-3-1 和建筑、设备设计者的协调

照明设计者同建筑师和设备的综合设计者的协调方法可分为三种：(1) 全部委托照明设计者设计；(2) 两者协商设计；(3) 照明设计者仅协助照明计算和照明器的选定。

如(1)那样全部委托的情况比较少见，一般只限于能从建筑设计独立出来的部分，如门厅的装饰照明，它能够发挥照明设计者的创作意图。尽管如此，也要很好理解建筑师的意

图，能设计成谐调可取的照明。

(2) 的两者协商的情况最多，也是最难的。照明设计者从计划的最初阶段，就同其他设备技术人员一起参加设计，加深对此建筑和设施的用途和功能理解。更进一步很好地听取建筑师等综合设计者的意见，了解他们打算要什么样的照明空间，即仅仅是重视功能上的视环境，还是重视立体感等的舒适的视环境。还有，对建筑师想要造成的某种独创气氛的空间也应很好理解。同时，照明设计者也应事先要求建筑师能对照明设备（光源、灯具、方式）和技术（设计方法）以及经济性等有很好的理解。

利用模型试验作为此时取得相互理解的必要的共同语言，是非常有效的手段。由模型也有可能预测照度等，但预测主观亮度（亮度）的分布和立体感等则是困难的。建筑师同照明设计者通过边实际观察模型边讨论设计方案有很大好处（图 10-9）。有效地利用模型试验来消除两者之间的分歧的例子是很多的〔33〕~〔37〕。



图10-9 用模型进行照明设计
(照明设计者和建筑师在讨论)

(3) 的情况比较单纯，但也应尽可能使与(2)的见解相接近。

10-3-2 照明节能方法

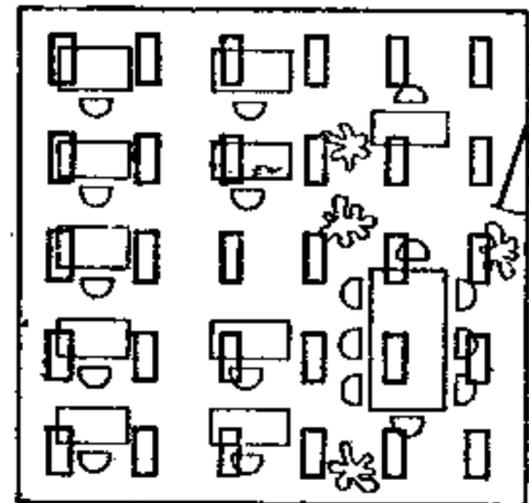
根据 1972 年 Lemons 等人的报告〔36〕，警告由地球上能得到的能源是有限的，1973 年秋突然爆发石油问题，带来了现实的能源危机。它对照明界有直接影响，但一部分有过头的情况，消除能源的浪费是今后经常性问题，是在照明设计中需经常考虑的问题，重要的是不能降低照明质量，不能多用资源，即所谓减少电能。

在 1974 年，照明学会的照明合理化委员会研究了此问题〔39〕，同照明普及会一起，推荐了七种照明节能方法，1975 年由《照明教室》加以整理〔40〕。据此，叙述了以下设计注意事项。

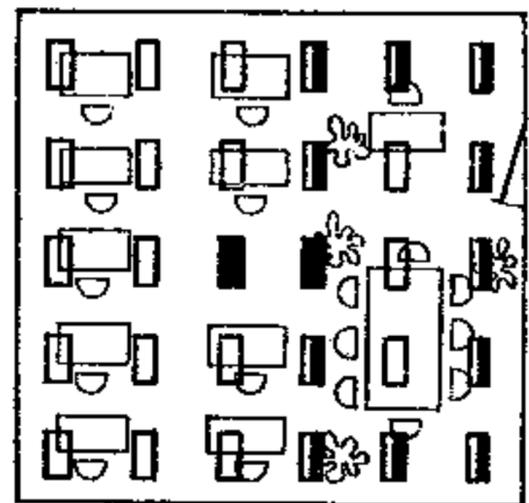
(1) 符合要求的照明 根据现有的光通法计算一般照明，在宽大的办公楼、工厂等处与桌子和工作台的布置无关，给出了全都一样的平均照度。这对于视觉工作固定的场所，是不必要的。而应按照场所不同，规定适合其目的要求的照度。图 10-10 是办公楼的例子，降低了通道部分和接待部分的照度，推荐将开关回路与其他系统分开，平时可以减少点灯数。这种方式称为局部的一般照明。在视工作面以外实行局部照明，对于办公楼和工厂，最好将照度降低到 1/3，对于住宅应降低为 1/10。

此外，视觉工作固定，而且要求高照度的场所，应尽量采用局部照明。

(2) 使用高效率的光源 即使包括镇流器的能耗，荧光灯和其他放电灯也比白炽灯效率高，寿命长。而且众所周知，功率高的灯效率也高。但是，从显色性和光色选择来看，则以白炽灯最好，最好采用近似白炽灯光色的荧光



(a)



(b)

图10-10 办公楼的二种
一般照明方法

灯。特别是要采用效率高的大功率光源，可使照明器的安装距离大，但要注意有照度分布不良的情况。

(3) 照明器的选择 应当采用效率高的、清扫和换灯容易的照明器。采用设计不合理的照明器和使用方法不当，是造成不舒适眩光的原因，对此应予以注意。

光源和镇流器所消耗的电能，通过辐射、对流和传导最终变成热量。为了在冬季将此热量回收再利用，而在夏季则将所产生的热量排至室外，可以采用空调照明器，从而使空调用电量减少。采用空调照明器，可以保证荧光灯有最适宜的管壁温度，能够使灯有最大的光通（参照 12-1 节）。

(4) 天然光的利用 这里的问题是建筑物的窗户越大，则冷、暖气、空调的负荷越大，因而把窗户开大来利用天然光，从全局看是不省能的。可是窗户对于居住者和工作者的精神上 and 卫生上是必需的，因此设置大小适当的窗户，总可以有效地利用由此而来的天然光。恒定的人工辅助照明（PSALI）主要是关于侧窗的方法（参照 9-4 节）。

(5) 对照明环境的考虑 假若将室内表面装饰得明亮，则可增加反射光，无论是用天然光或人工光，均可因此提高照度，而且光质量也好。表 10-12 说明办公室的一般照明因采用明亮装修而提高利用系数的例子。

(6) 有效的配线 对于因利用天然光而需关掉窗边灯の場合，如果确定了关灯范围，则能够设计出与之相适应的配线及开关。应在适当的位置设置光接收器，也要考虑设置自动开关器及其组合方式（参照 9-4 节）。在街灯、庭院灯和安全照明中，希望采用自动开关器和时间开关。每个照明器分别与开关接通，并能用手开关。为了防止忘记关灯，还可采用带标志的灯开关。

表 10-12 因房间装修的反射系数提高而利用系数增加（藤井克人）

房 间 尺 寸 (m)				9×9	9×36
室 形 指 数				2.25	3.60
利 用 系 数	明亮的装修	反射系数 (%)	顶棚 80 墙壁 50 地板 30	0.75	0.85
	暗的装修	反射系数 (%)	顶棚 50 墙壁 30 地板 10	0.60	0.67

(7) 易于维护管理的设计 由于光源和照明器的污染，使光通降低，这是造成能源使用上的浪费的原因。因而换下寿命到期、光通降低的灯是重要的事。设计时，应采用维护管理容易的照明方式、照明器和光源，这与节能很有关系（参照 12-5 节）。

10-4 照 度 标 准

10-4-1 制订照度标准的目的是与历史

照明中的一个重要因素是照度，在日本过去所提出的照度标准中，有助于照明发展的是在 1958 年制订的日本工业标准照度标准 JIS Z 9110。

在那以前制订的标准，有 1953 年照明学会制订的室内照明标准。在此标准以前，在 1940 年，同样由照明学会制订了照明调整纲要。这些标准作为反映当时的时局，是以节约电力，改善生产效率，提高国民体格标准为目标的标准，以及根据照明方式决定的。日本最初的照度标准是照明学会于 1928 年编制的工厂照明标准规定。

10-4-2 照度标准的修订经过

如上所述,日本工业标准照度标准 JIS Z 9110 是 1958 年制订的,尔后,由于光源、照明器具的进步,照明理论的发展,社会形势的变化等,逐次予以审查,于 1960、1964、1969、1975 年进行了四次修订。

到 1976~1977 年,根据第五次审查,由通产省工业技术院委托照明学会来修订。照明学会组成了修订标准委员会,并进行了工作,于 1977 年 3 月末,向工业技术院提出了修订标准。

这一修订标准又经过在工业技术院下设置的日本标准调查会电气部门会议照明标准专门委员会的审议,正式批准为日本的工业标准。本书内提出的最新的照度标准,是照明学会于 1977 年 3 月完成的修订标准。

10-4-3 JIS Z 9110-1975 的修订要点与原则

(1) **照度分级和照度范围** 在 JIS Z 9110-1975 (以下称旧标准)中,各附表的左端表示照度分级,它表示出某一照度范围的代表性数值,不是具体的照度值,而且为了想知道此照度范围,还需要参见另外的表,此表已载于前文,一般只看附表的情况多,造成表示的照度范围和等级同代表数字的混淆,以错误的概念来使用。

为了防止此问题的产生,在修订标准中,在各附表中表示出照度等级,将其范围改成易懂的情况。

(2) **所需照度** 在各附表中,工厂以及商店的附表形式有相当大的变动,所需要的照度也同附表的形式一起变动了。

在工厂的项目中,旧标准中的附表是按工作的种类详细划分的,由于现代工业中的工作形态、自动化等的发展,这种分类和工作内容同现状已不符合,因此以视觉工作种类和程度来划分工作内容,并改成了与之相适应的照度标准。

在商店的项目中,由于经营法和流通形式等的发展,各商店的实际情况同旧标准附表中的行业分类有很大的差异,因此,修改成与最近实际状况相一致的行业分类。

(3) **同各国标准的关系** 以 CIE (国际照明委员会) 为首,在各国推荐的照度标准中,照度等级为 1.5 倍的间隔。从省能的观点,最好将照度等级分细些,因此将旧标准中的 2 倍间隔变为约为 1.5 倍间隔的照度分级。

10-4-4 JIS Z 9110 修订全文

按照在 10-4-2 节所述的理由,这里将 1977 年 3 月由照明学会编制的日本工业标准照度标准的修订标准全文转载。

日本工业标准

照度标准(修订) Z 9110

Recommended Levels Illumination

1. 适用范围 本标准规定了以下各设施的人工照明的照度标准:

办公楼	附表 1
工厂	附表 2
学校	附表 3

医院、保健所	附表 4
商店、百货店、其他	附表 5
美术馆、博物馆、公共会馆、旅馆、公共浴池、美容室、理发店、 饮食店、娱乐场所	附表 6
住宅、公寓的公共设施	附表 7
车站	附表 8
道路、广场、公园	附表 9
停车场	附表 10
码头	附表 11
运动场、比赛场	附表 12
船舶	附表 13

2. 作为照明要素的照度 通过人工照明来照射前项各设施的场所，为了给人们形成良好的生活环境，一般必须考虑以下各项：

(1) 照度及其分布

(2) 眩光

(3) 阴影

(4) 光色

在这些要求中，在设计照明设备时，首先以计算对象为目标，用照度表示其标准。

3. 所需照度 各设施的照度可由附表1~13查出。

该照度表示主要视觉工作面上的水平照度(不特别指定时的视觉工作面为地板以上85厘米，走廊、室外等为地板面或地面)，根据工作内容不同，也有的表示垂直面或倾斜面的照度。

附表中印有○的工作场所，最好由局部照明来获得此照度。这种场合的一般照明的照度，最好为局部照明照度的1/10以上。

此外，相邻房间、房间同走廊之间的照度差别，不要太显著。

4. 照度分级及照度范围 在附表左面表示照度分级，在附表的右栏横线间表示照度范围。

照度分级数值系列如表1的规定。

表1 照度分级 (lx)

20000	2000	200	20
15000	1500	150	10
10000	1000	100	5
7500	750	75	2
5000	500	50	1
3000	300	30	

各附表栏内的场所名称和工作名称的排列顺序不同，不意味着上面的照度高，而表示在同一个栏内具有相同的照度范围。

附表1 办公楼

照度(lx)	场	所①
2000		
1500		
1000	办公室 a ②、营业室、设计室、制图室、门厅(白天)③	○设计 ○制图 ○打字 ○计算 ○按键穿孔
750	—	
500	集会室、接待室、等候室、食堂、厨房、文印室、休息室、守卫室、门厅(夜晚)、电梯厅	办公室 b、职员室、会议室、印刷室、电话交换室、电子计算机室、控制室、诊疗室、 ○电气室和机械室等的配电盘、仪表盘、○传达室
300		
200	—	书库、工作室、金库室、电气室、礼堂、机械室、电梯间
150		洗衣房、开水房、浴室、走廊、楼梯、洗脸室、厕所
100	茶室、休息室、值班室、更衣室、仓库、正门(台阶)	—
75		
50	室内事故用楼梯	
30		

- ① 关于室内停车场，可参照附表10。
- ② 精细视觉工作以及由于天然光影响，室外明亮而室内感到暗时，最好采用 a 的情况。
- ③ 在门厅，眼睛适应着几万勒克斯的白天的室外天然光照度，因而厅内看起来暗，故希望门厅的照度高。再者，门厅的照明在夜间和白天宜按分档开关进行调节。

附表2 工厂

照度(lx)	工 作	场 所④
3000	精密机械和电子零件的制造、印刷工业等的很精细的视觉工作 ○装配 a、○检验 a、○试验 a、○挑选 a、 ○设计、○制图	○控制室等的仪表盘、控制盘
2000		
1500	纤维工业的挑选、检验，印刷工业的拣字、校对，化学工业的分析等精细视觉工作 ○装配 b、○检验 b、○试验 b、○挑选 b	设计室、制图室
1000		
750	一般制造业等的普通视觉工作 ○装配 c、○检验 c、○试验 c、○挑选 c ○包装 a、○仓库内的办公	控制室
500		
300	小件制品的包装等视觉工作 包装 b 捆扎 a	电气室、 空调机房
200		
150	大件制品的包装等视觉工作 包装 c 捆扎 b、c	出入口、走廊、通道 有工作的仓库、 楼梯、洗脸室、厕所
100		
75		
50	—	室内事故用楼梯 仓库 室外动力设备
30		
20	—	室外(原料、材料等的堆置场、通道、厂内 警备用)
10		

④ 对于办公和管理部门，可参照附表1的办公楼。而且工厂这一项与其它附表不同，它以工作为主体确定照度，右边则为场所栏。

- 说明：1. 对于同一种工作名称，按识别对象以及工作性质分以下三种情况，
- (1) 附表中的 a 表示精细的物体、暗色的物体、对比小的物体、特别贵重的物体、与卫生有关的场合、要求高精度的场合和工作时间长的场合。
 - (2) 附表中的 b 表示介于(1)同(3)之间的物体。
 - (3) 附表中的 c 表示粗糙物体、浅色的物体、对比大的物体、粗大的物体、并不那么贵重的物体。
2. 对于危险工作，识别对象的反射系数低时，规定为 1.5~2 倍的照度。

附表3-1 学 校 (室内)

照度(lx)	场	所	工 作
1500	—	制图室、缝纫教室、电子计算机室	○精密制图 ○精密实验 ○缝纫机缝纫 ○按键打穿孔 ○图书阅览 ○精密工作 ○工艺美术制作 ○黑板上写字 ○天平计量
1000	—		
750	—		
500	教室、实验实习室、实习工厂、研究室、图书阅览室、书库、办公室、教职员室、会议室、保健室、食堂、厨房、给餐室、广播室、印刷室、电话交换室、守卫室、室内运动场	礼堂、集会室、休息室、存衣柜、上下口、走廊、楼梯、洗脸室、厕所、公务员室、值班室、渡廊	
300	—		
200	—		
150	—		
100	—		
75	—		
50	仓库、车库、事故用楼梯		
30			

说明：听力和视力弱的儿童和学生使用的教室、实验实习室等场所，规定为2倍以上的照度（主要有助于听力弱的儿童和学生能看见他人的嘴唇动作，因而能理解语言的内容）。

附表3-2 学 校 (室外)

照度(lx)	场	所
150	篮球场	—
100	排球场	
75	网球场	
50	垒球的投手和接手处	
30	游泳池	
20	—	徒手体操场、器械体操场、田径场、足球场、橄榄球场、手球场、垒球场
10	—	—
5	院内通路(夜间使用)	
2		

附表4-1 医 院

照度 (lx)	场 所	工 作
10000		
7500	视功能检查室(眼科教室)⑤	—
5000		
3000		
2000		
1500		
1000	手术室⑥	○解剖检验 ○助产 ○急救处置 ○诊断 ○注射 ○制剂 ○调剂 ○技工 ○检查 ○窗口办公
750		
500	诊室、处置室、急诊室、分娩室、护士室、药房、制剂室、调剂室、解剖室、病理细菌检验室、图书室	—
250	院长室、医务室、研究室、会议室、食堂配餐室、一般化验室(血、尿、便等的检查)、生理检验室(脑电波、心电图、视力等的检查)、技工室、中心材料室、同位素室、办公室、门诊	
200	婴儿室、记录室、候诊室、会见室、门诊外廊	○病床上看书 ○换绷带(病房) ○打、拆石膏
150	病房, X光室(照像、操作、看片等)、理疗室、温水浴室、水浴室、运动器械室、听力检查室、消毒室、药品仓库	
100	麻醉室、恢复室、太平间、更衣室、洗脸室、厕所、污物室、洗衣房、衣袋房、值班室、楼梯	
75	内视镜检查室⑦、X光透视室⑦、眼科暗室⑦、台阶、病房走廊	
50	动物室、暗室(照像等) 事故用楼梯	
30		
20		
10		
5		
2		
1	深夜的病房及走廊⑧	

⑤ 最好能调光到50 lx。

⑥ 对于手术范围内的照明,在直径为30cm的手术范围内,由无影灯形成的照度规定为20000 lx以上。

⑦ 规定能调光到0 lx。

⑧ 由脚灯等来照明。

说明:门诊所的照明,规定按医院的有关标准执行。

附表4-2 保 健 所

照度 (lx)	场 所	工 作
2000		
1500		
1000		○诊断 ○检查 ○注射 ○窗口办公 ○预防接种
750		
500	诊室 处置室	
300	礼堂、展览室、营养室、谈话室、候诊室	—
200	所长室、医务室、妇女保健室、办公室、统计室、计划室、心电图室、消毒室、检查室、会议室	
150	X光室(照相、操作、看片等)	
100	值班室 厕所、走廊	
75	X光透视室、眼底检查室	
50		

附表 5 商店、百货店及其它

照度 (lx)	商店的一般共同部分	日用品店 (杂货、食品等)	超级市场 (无人售货)	大型商店④ (百货商场、批发商店、分期付款商店)	流行物品店 (衣料、随身物品、眼镜、钟表等)	文化用品店 (家用电器、乐器、书籍等)	玩具店 (像机、手工艺术品、花卉、珍品等)	生活用品专卖店 (木工制品、儿童用品、食物等)	高级品专卖店 (贵重金属、衣服、艺术品等)
3000				重点橱窗	橱窗的重点	橱窗的重点			橱窗的重点
2000	重点陈列部分		特别陈列部分	展览 店内重点陈列		橱窗陈列			
1500				同事处 店内陈列		店内用品的重点		橱窗的重点	店内重点陈列
1000				重点层的一般照明、专卖会场的一般照明、咨询处	重点陈列 设计处 试装处	店内陈列 咨询处 试装室 橱窗的一般照明	店内陈列的重点 特别儿童表演橱窗的一般照明	展览	一般陈列
750	重点陈列部分 金线记录器 电动扶梯等上下口 包装台	重点陈列	店内一般照明(市中心店)	一般层的一般照明 高层楼层的一般照明	特别部的高陈列 店内一般照明 (特别部除外)	店内一般照明 以强烈吸引人为目的的高陈列	店内一般照明 特别陈列部 咨询处	咨询处 店内一般照明	咨询处 设计处 试装处
500	电棒厅 电动扶梯 一般陈列品 洽谈室	重点部分 橱窗	店内一般照明(郊外店)				店内一般照明		接待处
300	接待室	店内一般照明							
200	洗脸室、厕所、楼梯、走廊				特别部的一般照明	戏剧用品陈列部的一般照明			店内一般照明
150							特别部的一般照明		
100	休息室、最低店内一般照明								
75									

④ 在大型商店,有必要按售货地点规定营业种类的效果时,准许采用相应项目的标准。
⑤ 实验室等最好能用调光装置减光。

说明: 1.白天朝向窗外的玻璃窗的重点,照度最好为10 000 lx以上。
2.重点陈列局部照明的照度,最好为一般照明照度的3倍以上。

附表 6 美术馆、博物馆、公共会馆、住宿设施、公共浴池、理发店、美发店、理发店、美容店、美发店、美发店、理发店、理发店、美发店、理发店

照度 (lx)	美术馆、博物馆	公共会馆	住宿设施 (日本式旅馆、旅馆)	公共浴池	美容店、理发店	食堂、饭店、商店	娱乐场所的飲食店	剧场、电影院、其他娱乐场所
1500—	○雕刻(石、金属)	○准备室的椅子 ^①	○门厅		○梳头			
1000—	○透形物	○特别展品	○收款处		○染发	○样品柜		
750—	○模型				○卷发			
500—	○雕刻(石膏、泥、木、纸)	图书阅览室教室	台阶、正门、办公室、	金柜、金柜、金柜、金柜	○理发	集金室、烹调室	出入口	小化妆室
300—	○油画	宴会厅、会议厅、大礼堂、展览会、集会室	物品交付台	衣架、更衣室、脱衣室	○剃发	○候客室	出入口	小化妆室
200—	○调查室、调查室、小卖店、入口大厅	礼堂、休息室、酒吧、大礼堂	客房、浴室、洗手间	脱衣室、浴室、淋浴间	○染发	○候客室	出入口	小化妆室
150—	○带玻璃罩的	结婚、结婚、结婚、结婚	大房、大房、大房、大房	入口衣室、浴室、淋浴间	○洗发	○候客室	出入口	小化妆室
100—	○日本画、工画、工艺品、工艺品、工艺品	总室、书、化妆室、洗澡室、厕所	大厅、洗脸室、厕所		○洗发	○候客室	出入口	小化妆室
75—	○制标本、标本、制标本、制标本	结绳、结绳、结绳、结绳	走廊、楼梯、浴室	走廊	○洗发	○候客室	出入口	小化妆室
50—	○制标本、制标本	杂品、堆置场			○洗发	○候客室	出入口	小化妆室
30—	○制标本、制标本				○洗发	○候客室	出入口	小化妆室
20—	○制标本、制标本				○洗发	○候客室	出入口	小化妆室
10—	○制标本、制标本				○洗发	○候客室	出入口	小化妆室
5—	○制标本、制标本				○洗发	○候客室	出入口	小化妆室
2—	○制标本、制标本				○洗发	○候客室	出入口	小化妆室

① 主要规定人物的垂直照度。

② 不包括舞台照明。

附表7-1 住宅

照度(lx)	居室	书房	儿童室 学习室	客厅 (西洋式)	客厅 (日本式)	厨房	餐厅	卧室	家务室 工作室	浴室 更衣室	厕所	走梯 楼梯	贮藏室	正门 (内侧)	门、正门 (外侧)	车库	庭院
2000																	
1500	○ 手工艺								○ 手工艺								
1000	○ 裁缝								○ 裁缝								
750	○ 读书	○ 学习	○ 学习						○ 缝纫机								
500	○ 化妆 ^⑬	○ 读书	○ 读书					○ 读书	○ 工作					○ 镜子			
300	○ 电话 ^⑭					○ 餐桌		○ 化妆	○ 洗濯	○ 刮胡须 ^⑮				○ 脱鞋		○ 清扫	
200	○ 团聚			○ 桌子 ^⑮	○ 沙发	○ 烹调台				○ 洗脸				○ 装饰品 的台架	○ 检查		
150	○ 娱乐 ^⑯		○ 游戏	○ 壁龛		○ 水槽								一般照明			○ 院内集 会场所
100			一般照明						一般照明								○ 用餐
75		一般照明					一般照明				一般照明						
50	一般照明			一般照明	一般照明							一般照明			○ 名牌、门牌	一般照明	阳台
30													一般照明	○ 信箱			一般照明
20								一般照明									
10																	○ 通道
5																	
2								深夜									
1																	防犯

⑬ 相对于一般照明，局部形成数倍亮度的场所，目的是为了形成室内明暗变化不平淡的照明。
 ⑭ 浏览书籍可看作娱乐。
 ⑮ 其它场所的也按此标准。

说明：1.按各场所的目的，最好一般照明同局部照明并用。2.居室、接待室、卧室最好能调光。

附表7-2

公共住宅的公共设施

照度(lx)	场 所	
500	事务管理室	—
300	电话交换室	—
200	—	○传达室 集会室 大厅
150	—	浴室、更衣室
100	—	楼的出入口 走廊、楼梯
75	—	
50	仓库、事故用楼梯、住宅楼下商店、车库	
30	—	
20	—	
10	—	
5	院内广场	
2	—	

说明：居住部分，按附表7-1采用。

附表8

车 站

照度(lx)	A 级 站			B 级 站			C 级 站		
	旅客用	窗 口	办公用	旅 客 用	窗 口	办公用	旅 客 用	窗 口	办公用
1500	—	○检票口 ○收票口 ○补票口	—	—	—	—	—	—	—
1000	—	—	—	—	—	—	—	—	—
750	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	会合处 候车室	问事处	办公室	—	—	—	—	—	—
300	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200	有棚月台 通道 洗脸室 厕所	—	站长室 小件行李 寄存处	会合处 候车室	—	—	—	—	—
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	门口台阶	—	—	—	—	—	—	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	无棚月台	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—

说明：按一日内上下车旅客数分为三种站级。例如，A级站为15万人以上，B级站为1~15万人，C级站为1万人以下。按此选择相应的照度。

附表 9 通道、广场、公园

照度 (lx)	通 道		与交通有关的广场	公 园
	地 上	地 下		
1000				
750	有拱廊街 道⑩的商店 街(繁华)	商店街⑦ (繁华)		
500		商店街⑦ (一般)		
300	有拱廊街 道⑩的商店 街(一般)	连接通道⑪ (交通量大)		
200		连接通道⑪ (一般)		
150				
100				
75	商店街 (繁华)		站前广场 机场广场 (交通量大)	
50				
30	商店街 (一般)		站前广场 (一般)	
20				
10				
5		住宅地		其他场所
2				
1				

⑩ 在深夜, 按1/10~1/20的照度开灯。

⑪ 在出入口部, 最好考虑同地上建筑的联系, 要增加灯。关于交叉部分, 希望规定较高的照度。

说明: 1. 本表主要规定步行者的公共设施标准。

2. 在连接地下街各构筑物的地下道处, 设置事故照明设备, 确保地面照度在10lx以上。

3. 关于主要以汽车交通为对象的照明, 按以下标准采取, 主要供汽车行驶用的隧道为 JIS Z 9111 (道路照明标准); 主要供汽车行驶用的隧道为 JIS Z 9116 (隧道照明标准); 人行横道为 JIS Z 9114 (人行横道照明标准)。

附表10 停 车 场

照度(lx)	室 内、地 下			室 外			
	300	机械停车装置 的出入口部分	车 道 (交通量大)	—	—	—	—
200							
150	—	车 道 (一般)	—	总 站 卡车站 (交通量大)	—	—	—
100				—			
75		—	—		—	—	
50		—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—
20			—	—	—	—	
10	—	—	—	—	—	—	—
5			—	—	—	—	

⑯ 有停车时间表的路上停车场除外。

说明：在室内停车场的出入口处，为了与白天外部照度相适应，必须增加灯。

附表11 码 头

照度(lx)	一般货物、集装箱停放场			运输车辆停放场、旅客停留处			危险物停放场、海上停放处		
	300	—	—	—	—	—	—	—	—
200									
150	—	—	—	—	—	—	—	—	
100									
75	前沿	—	—	—	—	—	—	—	
50	—								
30	—	堆场	—	—	—	—	—	—	
20	—	—	—	—	—	—	—	—	
10			—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	

说明：1.在前沿、堆场进行卸货等粗糙工作场所的工作面照度，由局部和其他方法来的照度为75lx以上。
2.有公园时，按附表9采用。

附表12 运动场、比赛场

照度(lx)	田径比赛(跑道场地)		游泳	柔道、剑道、西式摔跤	相扑、柔道、摔跤	射箭		网球	乒乓球、羽毛球	篮球、排球	足球、橄榄球、冰球、手球	棒球		垒球	足球	排球	滑冰、旱冰	高尔夫球		
	正式比赛	一般比赛	正式比赛	正式比赛	职业比赛	室内	室外	正式比赛	正式比赛	正式比赛	正式比赛	职业比赛	一般比赛	职业比赛	正式比赛	一般比赛	室内	室外	(练习场)	
10000																				
5000																				
3000																				
2000																				
1500																				
1000	正式比赛	一般比赛	正式比赛	正式比赛	职业比赛			正式比赛	正式比赛	正式比赛	正式比赛	职业比赛	一般比赛	职业比赛	正式比赛	一般比赛	正式比赛	一般比赛	正式比赛	一般比赛
750																				
500	正式比赛	一般比赛	正式比赛	正式比赛	职业比赛	一般比赛	职业比赛	正式比赛	正式比赛	正式比赛	正式比赛	职业比赛	一般比赛	职业比赛	正式比赛	一般比赛	正式比赛	一般比赛	正式比赛	一般比赛
300																				
200	团体操	一般比赛	一般比赛	练习	练习	一般比赛	职业比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛	一般比赛
150																				
100																				
75																				
50	观众席	练习	练习	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席	观众席
30																				
20																				
10																				

注：① 垂直面照度

说明：1.在拍彩色电视时，要特别加以考虑，最好在500 lx以上

2.在营业设备中，对于能容纳人数不特别多的业余比赛，应采用栏中最高照度。

附表13

船 舶

照度(lx)	场	所
750		
500		○工作机械的工作面 ○手术台
300		
200	阅览室、茶室、酒吧间、休息厅、体育室、食堂、文娱室、船长室、 诊室、无线电室、理发及美容室、机械控制室、装卸控制室	○办公桌 ○各房间的桌子上 ○烹调桌 ○各种工作台 ○机械操作场所 ○仪表盘 ○操纵台 ○无线电室工作台 ○海图台
150		
100	机械室、辅机室、锅炉房、事故用发电机室、机械室出入口、配餐室、 烹调室、船长卧室、办公室、客舱、船员室、干燥室、病房、旅客出入 口、各种工作场所、抽油净机室、电话交换室、洗衣机室、陀螺仪室	洗脸室、浴室等的镜子 卧铺的枕边 ○阀门等的操作场所
75		
50	各种电动机室、电动发电机室、电梯机械室、海图室、操纵室、操纵 机室、提货机室、卷扬机室、电油室、各种仓库、洗脸室、浴室、厕 所、装油泵室、船内通道、车辆用甲板、汽车用甲板	
30		
20	冷冻货物舱、食品库、货物舱、救生艇及救生包的场所、甲板货物	
10	外部通道的重要场所、卷扬机和系泊用具	
5	救生艇的进水面（海面上）	
2		

JIS Z 9110 照度标准说明

制订标准的目的和修订宗旨 照明的目的是使光为人们的生活服务。为此，要在所有的生活环境中，形成舒适的生活环境，并容易进行视觉工作，因此，需谋求效率高和疲劳少的照明。

本来，为了很好地识别物体，物体的大小、物体同其周围的对比、允许识别时间以及光的数量和质

量必须适当。所谓光质量是指因有无眩光、阴影状况、光色、视野内外的照明条件和照度均匀度而定的照明环境的光质量。所谓光的数量是指物体所接受的照度和因物体的反射系数而定的亮度。如果确定了物体和物体所在的场所，以及视看物体的位置，则物体的大小(即对可见度直接有影响的视角)以及与物体周围的对比就确定了。因一般需在短时间内视看物体，而且是不太变动的物体，故除特殊情况外，由照明变化仅仅形成各种照明环境和物体的亮度，而照度是良好识别物体的重要条件。

关于照明中的重要因素之一的照度，已在照度标准JIS Z 9110规定了其标准。自1958年制订出标准后，随着照明理论的发展，光源的进步，社会形势的变化等，于1960、1969、1975年进行了四次修订。

本次修订时，主要对以下各点进行了调查和研讨。

(1) 旧标准的照度分级表示某一照度范围的代表值，由于附表中记载的是数字内容，为了知道其范围，尚需看另外的表，所示的范围和等级同代表数字混淆，常常以错误的概念来使用。因此，此次在各个附表中，由于表示了照度等级，从而容易判断其范围。

(2) 在各附表中，变更特别大的是工厂(附表2)和商店(附表5)，对其它的附表只是作了尽可能小的修改。

近年来由于产业结构、商业流通形式的发展变化显著，在工厂项目中，以前的附表是按行业种类来细分的，由于工作形态、自动化的发展等，这种细分与实际状况不一致，因此，改成与视觉工作类型相适应的照度标准。当然，最好按行业种类和工作种类定标准，从而需要进行各工厂现状的调查，但因时间的关系而有困难，故这次未能进行调查。

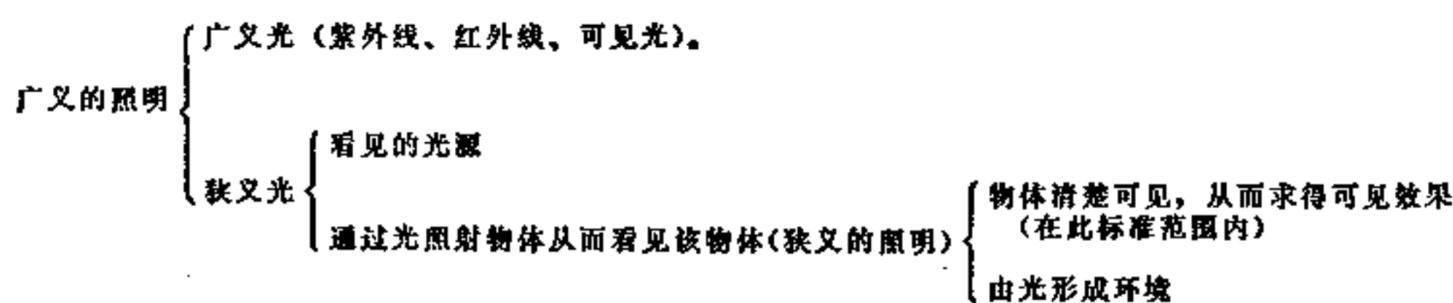
关于商业方面，由于流通形式和各种经营法的发展，同以前附表的行业种类的分类有很大的差异。因此，修改成与最近实际情况相一致的行业种类和行业形态的分类。

1. 适用范围 适用范围最好应能包括人的所有活动场所，按现阶段的调查和研究，如“标准”本文附表1~13所载的场所。

此外，关于主要供汽车行驶用的道路照明标准，已分别制订了：JIS Z 9111(道路照明标准)、JIS Z 9114(人行横道照明标准)和JIS Z 9116(隧道照明标准)，请参照。

如最初所述，照明是以光为人类生活服务的一种技术。在此光线中不仅含有可见光，还有紫外线、红外线。而且作为光源，除人工光源外，还包括太阳等天然光源。作为本标准的使用范围，大体如“标准”本文所规定的那样。

在光的使用方法方面，除“标准”本文第2条所述的照射视觉对象物外，也把看见的光源本身作为传递信息的手段，如信号、标志、显示牌、霓虹灯等，但这些都不包括在本标准中。



因作了这样的规定，故使物体清楚可见，从而促进了有关文化、经济、保健方面的活动，除有此效果外，还有用光来形成光环境的方法，此时虽要求的光量不大，但由于实际上从数量上难以设计光环境，故也未将此包括在标准内。

2. 作为照明要素的照度 作为优良照明的要素，通常大体有如“标准”本文所推荐的四项要素。其中关于眩光，国际照明委员会正在对各国的评价方法进行研究比较，尚未达到国际上的统一。至于阴影和光色问题也正在进行研究，尚未达到从数量上进行设计的阶段。目前可在数量上进行设计计算的只有照度，因此，在本标准中只提出照度问题。其它要求的重要性也不比照度差，而且随着调查研究的进展，正在考虑用另外的方法来表示照明标准。

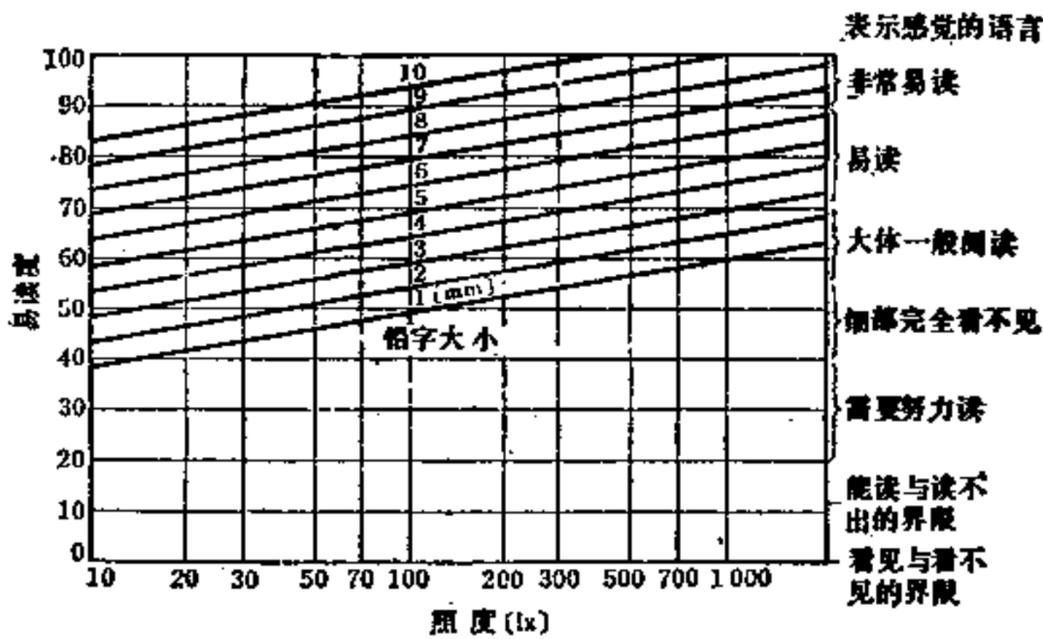
此外，虽然作为诉说最终感觉的物理量是亮度，但是作为计算上所需的量，是利用同亮度有简单关系的照度量。

此外，除本文的四项要素外，还应考虑维护问题，以及包括维护的经济问题。

3. 所需照度 如果照明方法适当，而且照明质量好，则照度越高，视力越好，越易看清物体，从而在工厂照明中，工作效率也提高了。换言之，照度与视力成正比，一般要求照度要高，但在高照度下，工作效率提高的程度逐渐变差了，而照明费用同照度则大体按比例增加。在这里，当把两者同时考虑时，应当存在一个有利点，在现在的经济条件下，此点的照度是相当高的，但同目前的常用值比较，也并无很大的偏差。

一方面要试图从经济观点来解释如此的适宜照度问题，但也还要从主观的舒适性来解释。

照明学会的照度调查委员会，采用心理学中的新方法和系列分类法，进行易见程度的计量，这对于解决适宜照度问题，有了很大的进步。选择普通杂志上出现的 300 个汉字，以其不同的大小以及同纸的对比的铅字做为视标，让被试者在 12.5~1120 lx 之间阅读，将易读的程度用预先确定的语言来表示，根据计算，将此语言数值化。如果将所得的这种结果的例子用图表示出来，则变成如解说图 1 所示情况。得到易读度为 100 时，需要相当高的照度。一般情况 70 就大体可以了。为了得到此易读度，当字同纸的对比为 80% 时，将 2 毫米视角的铅字，在 30 厘米的视距阅读，则需要 2000 lx，如果易读度为 55 时，则约为 150 lx。如果为 4 毫米的视角，易读度为 70 时，可得出 300 lx 的照度。



解说图 1 照度与易读度的关系

文字同周围的亮度对比为 80%，观察距离为 30 厘米，根据印东太郎、河合悟所介绍的实验结果定出如下的一般式：

$$S = 11lgE + 0.5C + 9\sqrt{D(A - 1)} + 32$$

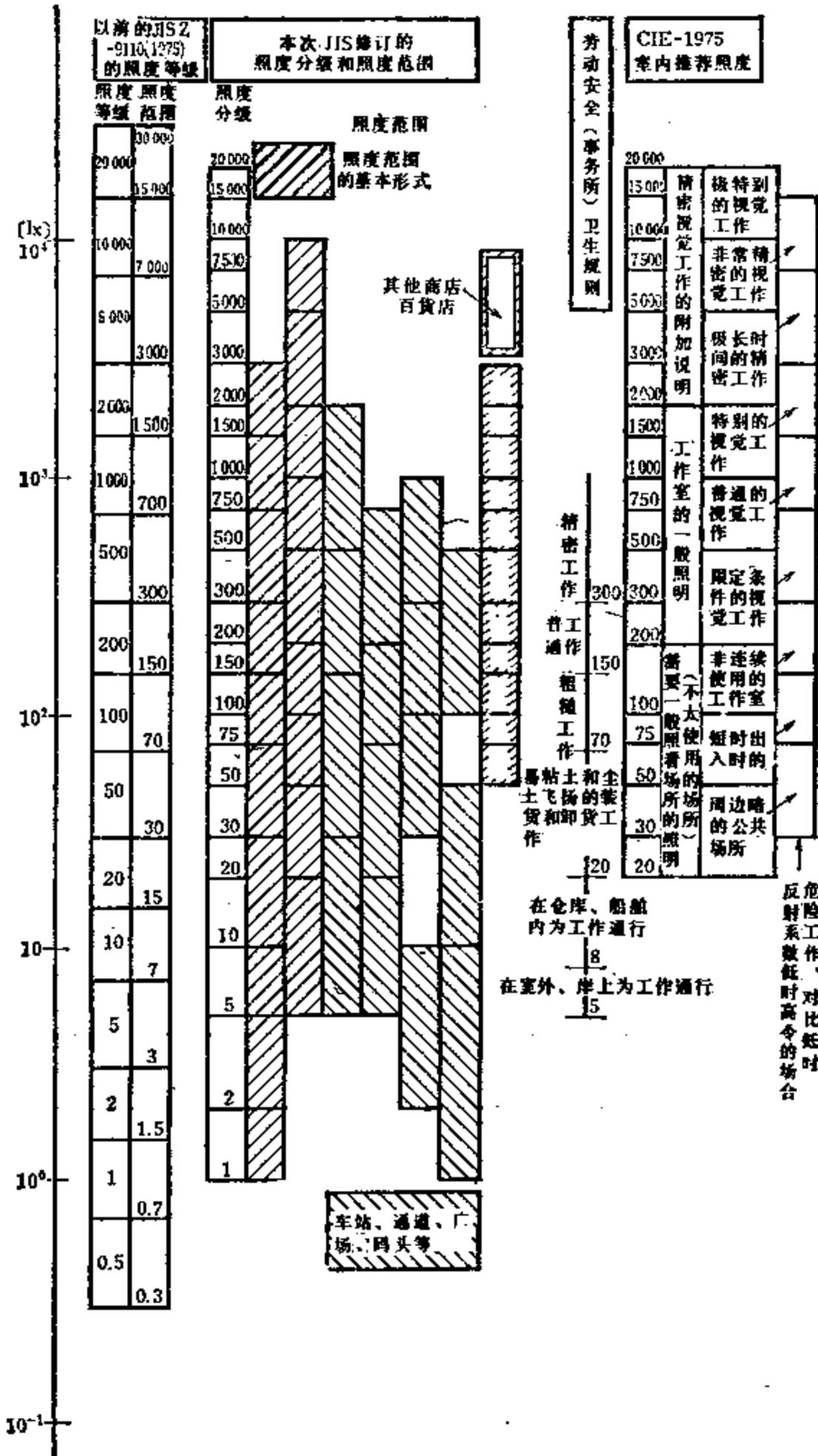
式中，S 为易读度；E 为照度，由 12.5~1120 lx；C 为亮度对比，由 9~94%；D 为观察距离，由 30~200 厘米；A 为铅字大小，由 0.2~1.0 厘米

这样一来，应根据易读要求的程度来决定与阅读文字有关的工作的适宜照度。如果以此想法进行实验，要确定各种工作的适宜照度，则需要相当的人力、时间和费用，现在还未进行到这种地步，可是我们知道，物体的可见度可用视角、对比、亮度和时间大概地决定。阅读文字以外的工作的适宜照度，也能从上面的结果推定出来。此时，不应忘记，应根据可见度最低要求程度来决定适宜的照度。

“标准”本文附表 1~13 就是根据上述方法确定的，并可做为照明设计的指针。当采用此附表时，在本文内也载出根据识别对象和工作性质应注意的事项，特别是由于长时间持续进行同一工作时，可造成疲劳，所以最好应根据工作的持续性来调整设计照度。

此外，根据对年龄与视力关系的研究，年龄越大，所要求的照度越高，根据国家不同，对于高龄的工作者，可规定为二倍乃至数倍高的照度。

在日本有关照度标准的资料中，几乎没有特别载明年龄问题，有待于今后调查研究，这是面临的工作。由于各种调查资料大体是以青年为对象，当按照照度标准决定照度时，对于高龄者，最好有二倍乃至数倍高的照度。



解说图2 JIS Z 9110 与 CIE 推荐照度的比较图

在工厂、办公室、教室等相当宽广和出入人多的场所的一般照明，室内的照度应尽量均匀。因而，在这些场所，不仅使室内平均照度接近此标准值，而且使每处的照度均应与此相近，最好一样。

采用局部照明主要是出于经济上的原因，希望它与此合并用的一般照明的差别尽可能的小。关于此点，在此标准中，规定了局部照明的照度与一般照明照度之比在10以下。

关于照度测定方法，请参照JIS C 7612-1969(照度测量方法)。在解说图 2 列出了JIS标准与国际推荐值的比较，供参考。

在图的左端，表示以前的照度等级和照度范围，中间表示本次修订的JIS的照度等级和照度范围，右端表示为CIE的推荐照度。本次修订的照度范围的基本形式同图中所示的CIE推荐照度大体一致。关于不以视觉工作为主的场所，形成与基本形式不同的照度范围。例如在车站，根据上下车人数分为 A、B、C 三级后，照度范围变广了，对于室外通道、广场等，为了使与周围的亮度相协调，照度范围也变广了。

对于商店以每种营业形式为指针定照度，故照度范围变窄了。

此外，在下面列出了劳动安全卫生规则的要点作为参考：

(1) 第604条

业主为工人提供的经常工作的场所的工作面照度，必须符合下表的标准。但是，在处理感光材料工作的场所，坑内的工作场所，以及进行其他特殊工作的场所，不受此标准的限制。

工作的区分	标准
精密工作	300 lx 以上
普通工作	150 lx 以上
粗糙工作	70 lx 以上

(2) 第 367 条、第 406 条、第 523 条

当为露天采掘、采石工作、在高为 2 米以上的场所进行工作时，业主必须保持有为该工作安全进行所必需的照度。

(3) 第 367 条、第 434 条

当进行堆货或把货物运出的工作，或港口装卸工作时，业主必须保持有为该工作安全进行所必需的照度。

关于所需照度，应以如下的标准为指导，还要附带考虑以下两个与照度有关的项目。

场所	标准
进行货物或把货物移开工作的场所 在岸上和船舶内进行装货、卸货、运货等工作的场所	20 lx 以上
在仓库内，为工人工作所通行的场所 在船舶内，为工人工作所通行的场所	8 lx 以上
在室外，为工人工作所通行的场所 在岸壁上，为工人工作所通行的场所	5 lx 以上

注：1. 所谓露天挖掘，即大开挖施工方法。

2. 所谓货物就是在仓库建筑中或在场地内堆积起来的货物群（小麦、大豆、矿石等散装货物除外）。

4. 室内装修 投射到工作面上的有效光,不仅有来自光源的直射光,还有由顶棚、墙壁、地面、家具等来的反射光,而且相互反射光占有相当的部分。

因而,这些表面的装修的反射系数,对照明带来很大的影响,为了提高照明的效率,应使表面尽量做成亮而光泽少的装修。

还有,为了改善视野内的照明环境,最好施以适当的色彩处理。

5. 照度的保持 照明设备在使用中,由于光源减光、照明器的污染、室内表面变色和退色等,其性能降低,对于这一点,在设计上需把余量计算在内。

但是,初装设时的照度应是本文附表1~13的照度除以减光系数。

关于光源的减光,不用说达到点不亮的程度,而是暗到一定程度时就算到了有效寿命,要迅速地换新灯。

关于光源以及照明器的污染,由于照明方式和照明器种类不同,污染程度不同,而且还有清扫难易问题,应定期地清扫。

一般最经济的清扫周期为:

$$\sqrt{2C_0/C_e \cdot \varepsilon} \quad (\text{月})$$

式中 C_0 ——清扫一次的费用;

C_e ——设备折旧、电费、包括换灯泡费、除清扫费外的照明费(每月);

ε ——仅由污染引起照度减少的比例,这可由实测得出。

参 考 文 献

- (1) 松井瑞夫ほか: 照度と目の疲労に関する研究, 照学誌, 47 (昭38) 176
- (2) Blackwell, H.R.: Specification of Interior Illumination Levels, Illum. Engng., 54(1959)
- (3) 印東太郎ほか: 適正照度に関する心理学的実験, 照学誌, 49 (昭52) 40
- (4) CIE Publication No.29: Guide on Interior Lighting, CIE Paris (1975) 3
- (5) Balder, J.J.: Erwünschte Leuchtdichten in Büroräumen, Lichttechnik, 9 (1957) 455
- (6) Fischer, D.: Optimale Beleuchtungsniveaus in Arbeitsräumen (Teil II), Lichttechnik, 22 (1970) 103
- (7) Fischer, D.: Beleuchtungsstärken, Leuchtdichten und Farben in Arbeitsräumen, Lichttechnik, 24 (1972) 411
- (8) CIE Publication No.29: Guide on Interior Lighting, CIE Paris (1975) 7
- (9) IES Code for Interior Lighting, IES London, (1973) 16
- (10) IES Lighting Handbook, 5th ed. IES, New York (1972) 11-3~5
- (11) Fischer, D.: Bevorzugte Leuchtdichten von Wänden und Decken, Lichttechnik, 28 (1976) 92
- (12) 松下電工: 照明設計資料 (照 c-19) (昭51) 56
- (13) Moon, P. and Spencer, D.: Modeling with light, Jour. Franklin Institute, 251 (1951) 453
- (14) Cuttle, C. et al.: Beyond the working plane, Proc. CIE, 12 (1967) 67
- (15) Cuttle, C.: Lighting patterns and the flow of light, Lighting Res. and Technology, 3 (1971) 171
- (16) Fischer, C.: The European approach to the integration of lighting and air-conditioning, Lighting Res. and Technology B (1970) 150
- (17) 阪口忠雄ほか: 立体を好ましく見せるための照明条件に関する研究 (1), (2), 照学誌, 59 (昭50) 11-19
- (18) Crouch, C.L. & Kaufman, J.E.: Practical Application of Polarization and Light Control for Reduction of Reflected Glare, Illum. Engng., 58 (1963) 277
- (19) IES Code for Interior Lighting, IES London, (1973) 20
- (20) Petherbridge, P and Hopkinson, R.G.: Discomfort glare and the lighting of buildings, Trans. Illum. Engng. Soc., London, 15 (1950) 15
- (21) Luckiesh, M and Guth, S.K.: Brightness in Visual Field at Borderline Between Comfort and Discomfort (BCD), Illum. Engng., 44 (1949) 650
- (22) IES Technical Report No.10: Evaluation of Discomfort Glare, the IES Glare Index System for Artificial Lighting Installation, IES London (1967)
- (23) IES Lighting Handbook, 5th ed. IES New York (1972) 3-24
- (24) Handbuck für Beleuchtung, 4 LiTG (1975) 181
- (25) CIE Publication No.29: Guide on Interior Lighting, CIE Paris (1975) 12
- (26) CIE Publication No.29: Guide on Interior Lighting, CIE Paris (1975) 25
- (27) 岩間克昭ほか: 高圧水銀ランプの演色性最適化, 照学誌, 60 (昭51) 41
- (28) CIE Publication No.29: Guide on Interior

- Lighting, CIE Paris (1975) 28
- (29) 田淵義彦：下面開放けい光器具のグレア規制の検討，昭和52年照明学会全国大会 52
- (30) IES Lighting Handbook, 5th ed., IES New York (1972) 10-11
- (31) 田淵義彦：グレア評価速算図の提案，照学誌，59 (昭50) 26
- (32) 田淵義彦：屋内照明の不快グレアとその対策，昭和51年電気関係学会関西支部連大，S10-5
- (33) 神坂 祥：新宮殿松の間の照明，照学誌，53-5 (1969) 225
- (34) H. J. Wald: The Place of Models in the Lighting Design System, L. D. A., 1-1(1971) 46
- (35) 照明のデータシート No. 344: 照学誌, 56-4 (1972) 同 No. 347: 照学誌, 56-5 (1972)
- (36) T. M. Lemons et al.: Scale Models Used in Lighting System Design and Evaluation, L. D. A., 2-2 (1972) 30
- (37) 松田宗太郎ほか：最高裁判所・新庁舎の模型実験および照明設計への展開例について，照学誌，59-83 (昭50) 129
- (38) D. H. Meadows et al.: The Limits to Growth Universe Books (1972) (和訳，ダイヤモンド社)
- (39) 照明合理化委員会報告，照学誌，58-12 (1974) 64
- (40) 照明学会・照明普及会：省エネルギー照明，照明教室 38 (1975)

第 11 章

照明系统设计的因素

11-1 照明和空调

11-1-1 照明和空调的关系

近年来，人们普遍认为环境设计是建筑的一个重要问题。实际上，这就是如何设计居住环境使住户感到舒适的问题。照明和空调是这种环境设计中比较大的因素。以前，照明和空调是分别设计和施工的，现在，必须把它们统一起来考虑。

为了改善室内住户的视看条件，照明设备取得了日新月异的进步，随着光源的发展和经济水平的提高，在新建筑物中，照度变得越来越高。这就发生如何利用和处理照明设备产生的热的问题。

照度增加，照明产生的热对采暖房间的负荷有利，如果能把它有效地利用起来，在一般情况下就可以不要采暖设备。另一方面，冷房负荷和所需要的风量则增大，有可能要为照明设备而增加制冷设备。与高照度相对应的是荧光灯的高输出，这样，照明器内的温度和灯管壁的温度上升，从而使灯的光输出下降，为了适当控制灯管壁温度，可以考虑利用空调的空气。

表11-1 照度和暖房负荷

照 度	照明产生的热	暖房负荷减轻①
200lx	1 倍	10%
500	2.5	25
1000	5	50
2000	10	100
4000	20	200

① 设200lx照度时产生的热量为全部暖房负荷的10%并可以有效地加以利用的情形。

表11-2 照度和冷房负荷

照 度	照明产生的热	冷房负荷①	所要风量②
200lx	1 倍	1 倍	1 倍
500	2.5	1.15	1.3
1000	5	1.4	1.7
2000	10	1.9	2.6
4000	20	2.9	4.5

① 设200lx照度时产生的热量为全部冷房负荷的10%的情形。

② 在上述条件下，居住空间的冷房负荷为全部冷房负荷的55%的情形。

所用的照明器一多，为了处理由其产生的热，空调管道就大，在顶棚空间照明器和空调管道就容易发生矛盾。另外，为了在室内产生均匀的照度和进行均匀的空调，照明器和空调出风口、进风口所要求的安装位置发生矛盾。特别在改变、移动间壁时，照明和空调的功能受到阻碍而变得很难处理。

为了解决这些问题，把照明和空调有机地结合起来进行设计是很有必要的。

11-1-2 照明和它产生的热量

光源所消耗的电能，转变为辐射能（可见光、红外线、紫外线）和对流及传导热能，其

比例随光源而不同。但不管其能量的形态如何，包括可见光在内，最后都全部变成热能。而且，镇流器所消耗的电能也全部变成热能。因此，由照明消耗的电能，可以简单地按 $1\text{kW} = 860\text{kcal/h}$ 进行换算。

在一定光通的情况下，光源所消耗的电能大大不同。根据表 11-3，与荧光灯相比较，汞灯的发热量是它的 3.3 倍，白炽灯的发热量是它的 4.4 倍，但必须注意，这只是光源的发热量，由于照明器、照明方式的不同，对于最后被利用的光（照度）来说，与发热量的比例是不同的。

表 11-3 光源的种类及其发热量

	灯效率 (lm/W)	总合效率① (lm/W)	发 热 量	
			(kW/1000 lm·h)	比
荧光灯(40W)	89	64	13	1.0
汞灯(400W)	55	50	17	1.3
白炽灯(100W)	15	15	57	4.4

① 包括镇流器损耗

照明器所消耗的能量最初作为辐射散播在室内，这是能量的第一次散播。剩余的能量变成热使照明器温度上升，从而能量又第二次散播在室内和顶棚空间。如图 11-2 所示，使空调的空气回流，就使流向室内的热显著减少。进入顶棚空间的热使顶棚空间的温度上升，这样，能量又通过其周围的表面进行第三次散播。如果按照图 11-3 所示，那么在冷房时，由于顶棚空间的温度和室外温度之差非常小，空间内的热几乎没有移动，照明产生的热量就几乎全部变成冷房的负荷。而在暖房时，由于顶棚空间的温度和室外温度之差大，照明产生的热就有一部分由顶棚空间向室外散播，可供室内暖房利用的热就减小。

图 11-4 概括了上述情形。照明器中发生的热经过各种途径散播。在冷房时，通常照明产

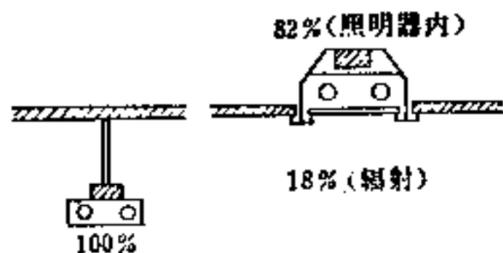


图 11-1 悬吊式照明器发生的热全部向室内辐射

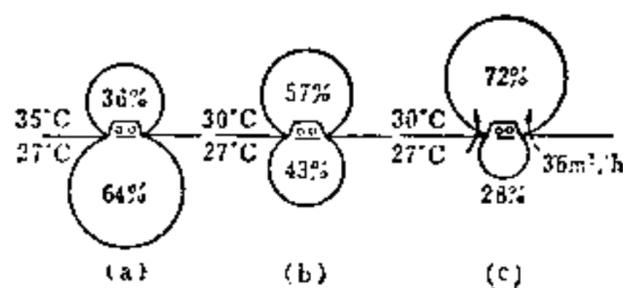


图 11-2 照明器的热分配

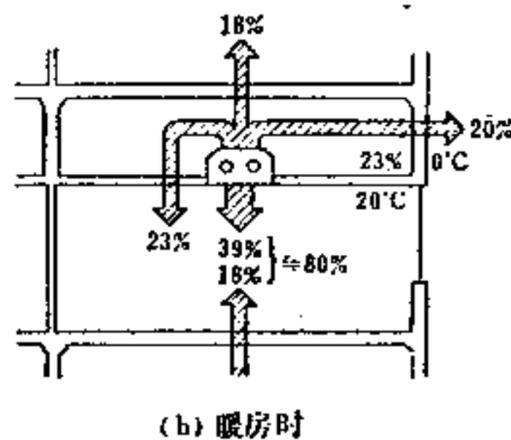
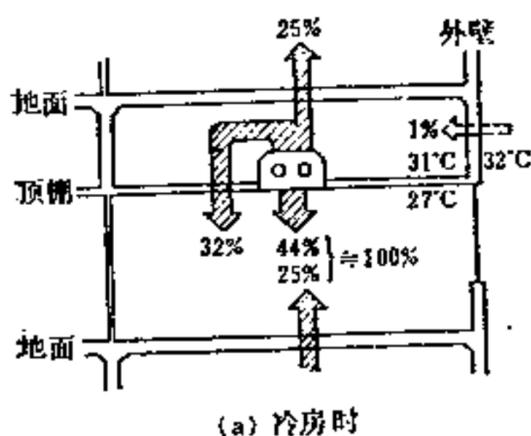


图 11-3 进入顶棚空间的照明热的去向

生的全部热量最终成为室内的冷房负荷，用某些方法使这种冷房负荷减少，就能够使冷房设备变小。在暖房时，减少跑到室外的热就能减少暖房负荷。

11-1-3 空调和照明器

空调照明器是让空调的空气通过照明器的内部或周围使照明器冷却，并带走照明产生的热量的照明器。



图11-4 来自照明器的热的移动

在使用从室内排出（或吸入）的空气时，就用它把从照明器散播到顶棚空间的热带到室外。因此，室内空调所需要的空气只要处理一部分照明产生的热就行。可见，把照明和空调结合起来有很大的优点。

在使用供给（或排出）室内的空气时，就由这种空气把理应散播到顶棚空间的热直接带入室内。因此，空调所需要的空气必须处理照明器产生的全部热量。

不论哪种情况，由于照明器被所通过的空气冷却，荧光灯管壁温度下降，如果所使用的

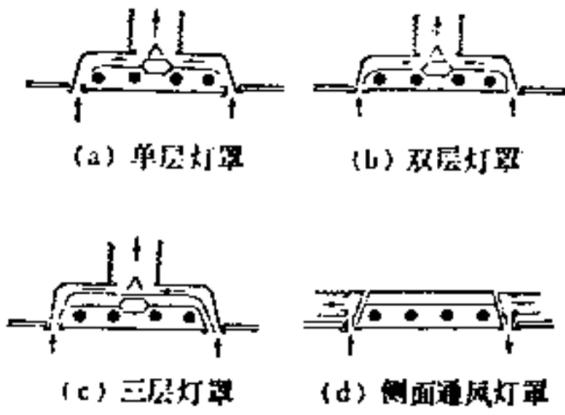


图11-5 空调照明器的种类

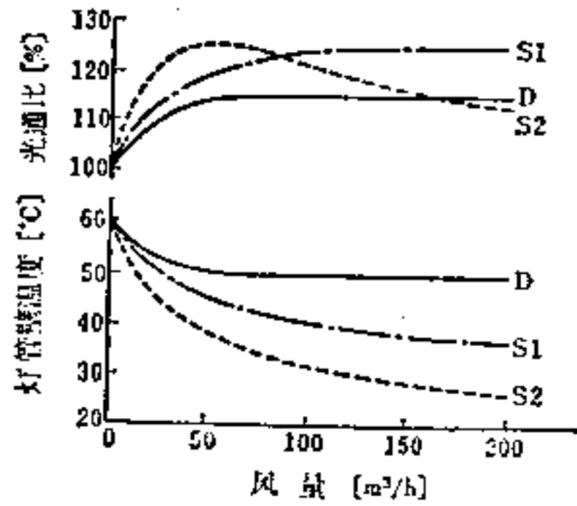


图11-6 空调照明器光通增加的例子

D—双层灯罩； S1—单层灯罩(1)
S2—单层灯罩(2)

照明器的空气温度、风量和构造都适当的话，就可以增加光输出。而且，由于空调的排气（吸气）口和照明器在同样的位置，就可以同时得到良好的空气分布和照度分布，室内设置间壁的灵活性也增加了。

空调照明器有图 11-5 所示的几种类型。图 11-6 表示光通增加的例子。图 11-7 表示热分配的例子。

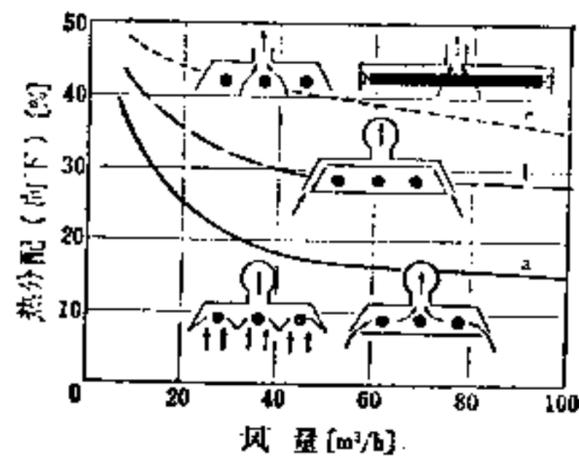


图11-7 空调照明器的热分配的例子⁽²⁾

作为传递照明产生的热的媒质，除空气外还有水。因为水的热容量比空气大，因此可以用比空调管道更细的水管作热处理。但是，为了把新鲜空气供给室内，仍需设置空调管道，即两种管道都需要。

11-1-4 照明器发生热的消除方法

(1) 以前的方法 图 11-8 表示以前的空调方法，用一般的专用排气口和吸气口进行空调，照明产生的热全部变成室内的冷房负荷。

(2) 照明热的回授方法 图 11-9(a) 表示从室内返回的空气全部通过照明器，然后

通过直接与照明器连接的隔热管道返回空调器(其中一部分向外排出)的方法。因此,使照明器和顶棚空间的温度上升的热量就可以不进入室内而排出。但是,通过照明器时温度升高了的空气则加入到空调器中。

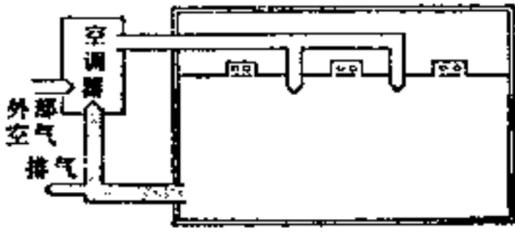


图11-8 以前的方法

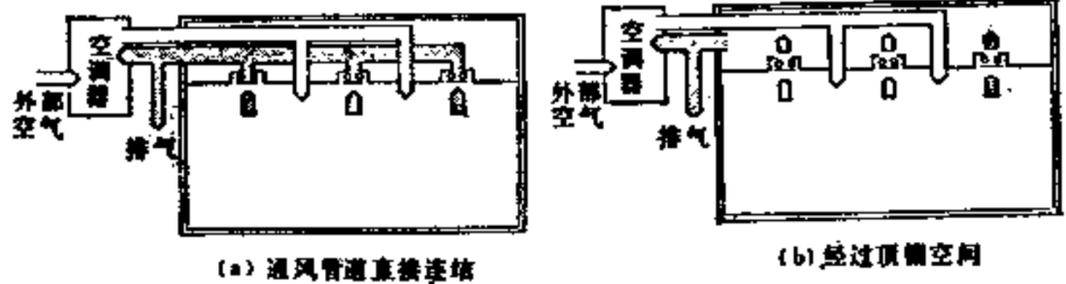


图11-9 照明热的回授方法

图 11-9(b) 所示的方法, 虽然和 (a) 基本上没有什么变化, 但它为了节省管道设备, 让通过照明器的空气直接进入顶棚空间, 由顶棚空间返回空调器。因此, 热量通过顶棚空间的上表面和下表面向室内转移。这种热变成室内冷房的负荷。要防止或减少这种热转移, 顶棚上侧面和下侧面的隔热和气密性必须很好。

(3) 照明热的排出方法 如图 11-10 所示, 只有与所引入的新鲜空气相当的空气量通过照明器和隔热管道向室外排出。这样, 通过每一台空调器的风量比回授方法少很多, 带走的照明器的热量就少, 返回空调器的空气由照明热引起的温升也少。

这个方法也能省去排气管道, 即把通过照明器的空气向顶棚空间排出, 也可以向室外排出, 但顶棚空间的上侧面和下侧面的隔热和气密性必须很好。

(4) 分离方法 如图 11-11 所示, 室内空间和顶棚空间把发光顶棚的透光嵌板等作为隔板, 使通风系统完全分离。这样, 从照明器散播到顶棚空间的热就由顶棚空间内的别的系统的换气装置带到外面。室内居住空间用以前的方法进行空调, 其冷负荷可大大减少。但是, 因为通风系统变成两套, 设备费较高。

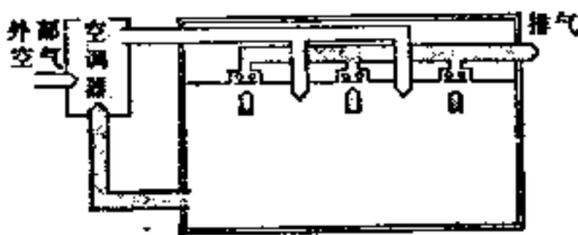


图11-10 照明热的排出方法

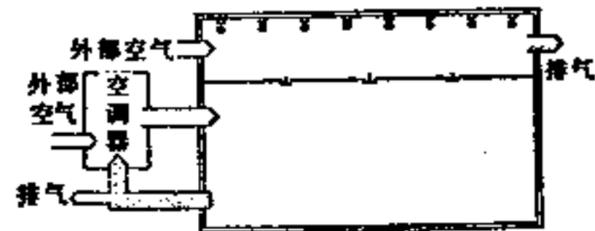


图11-11 分离方法

11-1-5 照明与空调结合的优点 (表 11-4)

(1) 空调用的空气量减少 由于照明热在进入室内之前已被排除, 就可以减少空调用的空气量, 相应地可以减少空调设备、管道、鼓风机等的容量。

(2) 冷房容量减少 由于把照明热排出室外, 可以减少冷房处理的热量。

(3) 暖房热量减少 由于可以有效地利用照明器发生的热量并加以重新分配, 因此可减少暖房的热量。

(4) 改善室内居住环境 如果任由照明器产生的热量放出, 那么照明器和顶棚面就成为二次热源, 通过辐射而产生热感觉。由于除去了空调照明器的热量, 辐射能减少, 室内的热舒适性增大。而且, 随着空调用空气量的减少, 室内气流速度下降, 也减少了通风。

表11-4 照明与空调结合的优点

优点	单层灯罩		双层灯罩		三层灯罩	
	下面嵌板	下面开放	下面嵌板	下面开放	下面嵌板	下面开放
由于照明器和空调排风口(进风口)一致						
改善顶棚外观	○	○	○	○	○	○
可灵活设置间壁	○	○	○	○	○	○
合理使用顶棚空间	○	○	○	○	○	○
由于照明器被冷却						
光通(照度)的增加	◎	○	◎	—	—	—
镇流器线圈温度降低	○	○	○	○	—	—
辐射能的减少	○	○	○	○	—	—
由于用吸入(排出)的空气除去照明器产生的热						
室内热负荷减少	◎	◎	◎	—	○	—
空调用空气量减少	◎	◎	◎	◎	○	—
冷房处理的热量减少	◎	◎	◎	—	○	—
暖房热量减少	◎	◎	◎	◎	◎	—
暖房热量的重新分配	◎	◎	◎	—	○	—
	吸入	吸入	吸入	排出	吸入	排出

◎：效果大；⊙：效果中；○：效果小或有效果；—，无效果

(5) 光通(照度)增加 由于照明器产生的热量使荧光灯的管壁温度升高，通常使光通下降。当空气通过照明器而除去它产生的热量后，由于管壁温度趋于正常，光输出(照度)又增大。

(6) 镇流器温升降低 由于使照明器冷却，因镇流器的温升而引起的损害可能性减少。

(7) 设置间壁的灵活性增加 因为照明器和空调吸气口(排气口)融成一体，照度分布和气流分布有相同的起点，设置间壁的灵活性因而增加。

(8) 可合理使用顶棚空间 因为管道尺寸减少和统一考虑照明与空调，就可以合理使用顶棚空间，消除照明和空调的矛盾。

(9) 改善顶棚的外观 以前照明器和空调排气口在不同的位置，现在融成一体，顶棚面的外观度好。

11-2 调光装置

11-2-1 调光装置的范围

调光照明的范围非常广，从剧场和电视演播室之类的演出照明到宴会厅、饭店等的效果照明和一般家庭的照明，根据其规模和目的而有各种应用。从广义上说，“调光”还应用于隧道照明。关于剧场、电视演播室等的大规模调光装置和隧道调光照明，将分别在第26章和第23章讨论。这里只介绍一般家庭、会议室、教室和旅馆的宴会厅等所用的一般的可控硅整流器调光装置的设计因素和设计实例。

11-2-2 调光装置的设计因素

下面所述各项是基本的设计因素。

(1) **调光照明的应用范围和调光装置的规模** 调光照明虽然开始于舞台照明,但现在看来其应用范围越来越广。有必要设计出与各个应用范围最相适应的调光装置。例如,为了在一般家庭的起居室和卧室,尤其是旅馆的会客室等创造出和谐的气氛,可以用标准小型调光器,它能够只对亮度进行任意的调节。但是,在饭店的休息室、小宴会厅等处,虽然也用同样的调光方法来创造气氛,但负荷的种类变成多系统,例如枝形灯、下投灯、托架等的情况比较多,因此,就有必要具备各个系统分别调光和成批调光的两种功能。而且,即使是宴会厅,其规模为中等以上并具有舞台的机能时,除了观众席照明的调光外,为了舞台照明的调光,必须具备预调机能,有必要采用大型的调光装置。这样,根据调光照明的用途的不同,调光装置的规模也不同,相应地其机能和操作方法也不同。表 11-5 是各种应用范围的例子。

表 11-5

调光照明的应用范围

调光装置的规模	应 用 范 围
标准小型调光器	一般家庭的客厅、卧室,旅馆会客室、大楼单人房间,医院单人房间,小会议室,陈列室、陈列窗,旅馆门廊、柜台,酒吧间、饮茶店等
标准中、小型调光装置	视听教室,会议室,宴会厅(大、中、小),饭店、俱乐部,休息室,小酒馆,一般办公室,研究室(测量仪器室),特殊工厂用调光,调热用,广告灯等
大型调光装置	市民、县民会馆等的舞台,舞厅,剧场,电视演播室,电影演播室等

(2) **负荷的种类、容量和调光系统** 虽然照明器和灯泡根据使用目的的不同而有许多类型,但可以连续平滑地进行调光的灯泡只有白炽灯和荧光灯。在用荧光灯调光时,必须使用调光用的镇流器和灯泡。关于调光的容量,在白炽灯时,可以对原来的灯泡功率进行加算;在荧光灯时,就有必要把电源电压和调光用镇流器的输入电流两方面加进去进行计算。

把白炽灯负荷和荧光灯负荷当作不同的调光系统,有必要安装与它们相适应的调光器,而且,不论是白炽灯负荷还是荧光灯负荷,在分成几组,每组分别进行调光时,有必要安装与各个组相适应的调光器。

(3) **调光控制的操作方法** 可控硅的调光控制,通过给予可控硅控制极的微弱的直流信号的变化,可以进行负荷为 0~100% 的连续调光控制,通常在这种控制操作中,大都采用分压计(电位器、混频管电位器等)。在小容量负荷时,可以使用图 11-12 那样的标准小型调光器,但在容量超过它时,就用和这个调光装置不同的、如图 11-13 那样的操纵盘进行控制。在许多系统要进行调光时,就把单个系统的调光和成批调光组合到同一个操纵盘里,放在最方便使用的地方进行操作。操作方法除了手动操作外,还有自动(电动)控制操作方法,即图 11-14 所示的用亮、停、暗的推力开关进行电动调光的操作方式,也有用小型马达带动电位器旋转的方式和用集成电路使调光时间可变的方式等等。在这种自动控制操作时,同一系统的调光操作,可以根据需要在任何地方进行。

此外,用受光器(光电池)经常检查从窗口进来的光,并和预先设定的照度的信号水平相比较,把信号送给调光装置,使调光控制方式和作为特殊效果用的音乐步调一致。例如,也有与高音、中音、低音或音的强弱相对应的用各种颜色灯泡调光的颜色音乐装置等(图 11-15)。

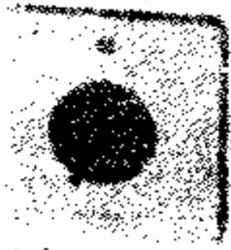


图11-12 标准小型调光器



图11-13 手动操纵盘



图11-14 自动(电动)操纵盘

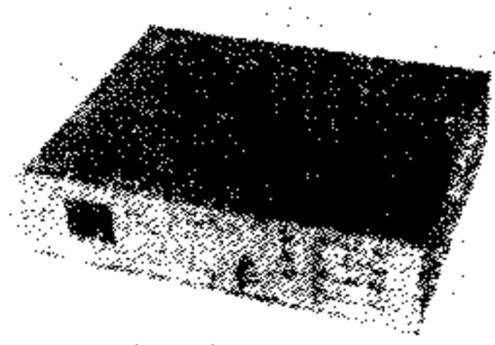


图11-15 颜色音乐装置

(4) 安装条件 安装时, 必须考虑周围环境的条件和施工条件。

(a) 周围环境条件 因为调光器使用了各种半导体, 通常要保证周围温度为 $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。而且大型的调光装置有其本身由于可控硅的功率损耗而引起的发热, 需要用强制空气冷却, 且房间至少也要换气 (如果可能就进行空调)。此外, 负荷电流由于相位控制而变成锯齿状波形, 使调光器中用来降低杂音的电抗器等产生一些噪声, 因而可以设置在不要特别安静环境的地方。

(b) 施工条件 关于电源, 用相位控制的调光照明电源的配电方法, 其中性极限于 $1\phi 2\text{W}$ 、 $1\phi 3\text{W}$ 、 $3\phi 4\text{W}$ 的任意一个, 电源变压器的容量也有必要比实际上最大的调光容量大。对中型以上的装置来说, 为了避免杂音, 不要从调光照明电源给通讯音响设备配电。关于机器的设置, 就像标准小型调光器那样, 虽然对于可以和通常的墙壁开关同样方便地安装的机器来说没有多大问题, 但就容量大的机器来说, 为了适应各种应用范围, 最近正在普及墙壁安装式的标准分电盘型调光装置 (图 11-16) 和不要背面保护的薄形标准立式盘型调光装置 (图 11-17), 使用这些可以节省费用。

图 11-18 是宴会厅的设计实例。

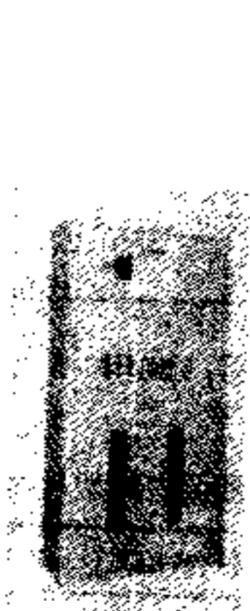


图11-16 标准分电盘型调光装置

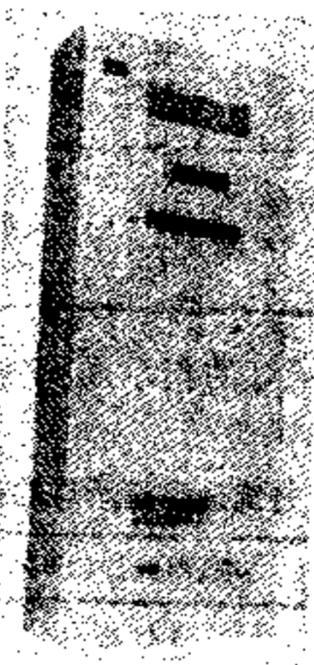


图11-17 标准立式盘型调光装置

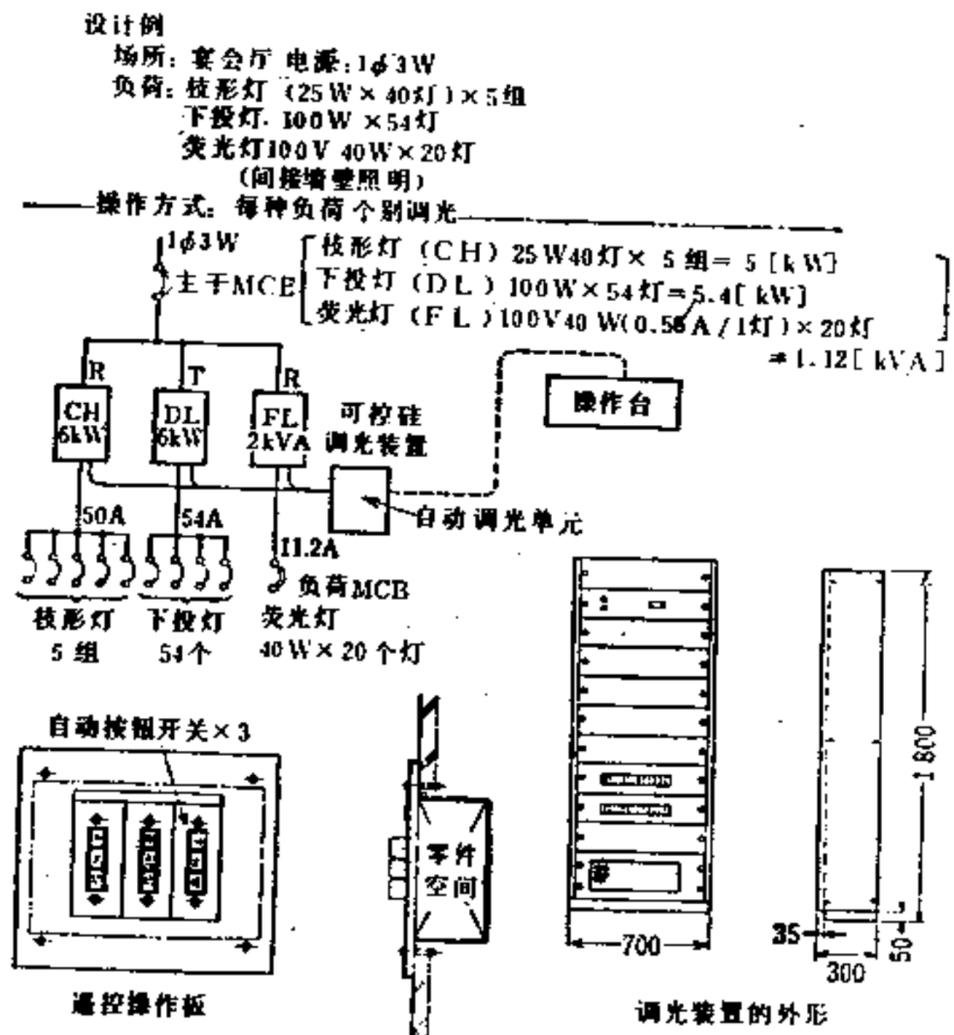


图11-18 宴会厅的设计实例

11-3 安全照明

这里，就消防法中规定的指示灯（在法令中用“指示灯”）和建筑基准法中规定的事 故照明装置中关于事故照明器的概要，特别加以说明。

11-3-1 指示灯

指示灯 是在火灾等发生时指示避难口或其方向，或者产生有助于避难的照度，以确保有效地避难的灯，它安装在消防用设备（灭火设备、警报设备、避难设备）之一的避难设备之中。

指示灯有避难口指示灯、通路指示灯和观众席指示灯等，通常用常用电源点灯，常用电源停电时，会自动地接到事故照明电源点灯。

避难口指示灯就是表示避难口的指示灯。

通路指示灯有室内通路指示灯、走廊通路指示灯和楼梯通路指示灯。

室内通路指示灯是设在居室内的避难道路和较宽敞地方的指示灯，表示避难的方向，产生对避难有效的照度。

走廊通路指示灯是设在变成避难通路的走廊的道路指示灯，表示避难的方向，产生对避难有效的照度。

楼梯通路指示灯是设在变成避难通路的楼梯和倾斜道路的指示灯，在路面产生对避难有效的照度。

观众席指示灯是设在观众席走道部分的指示灯，产生对避难有效的照度。

(1) 构造和性能

(1) 指示灯的种类和指示面积的大小如表 11-6 所示。

表11-6 指示灯的种类和指示面积的大小

种 类		长边的长度 (cm)	长边和短边之比
避难口指示灯 室内通路指示灯	小型	36以上50以下	从1:1到5:1 (规定短边的最小长度为12cm)
	中型	50以上100以下	
	大型	100以上	
走廊通路指示灯	小型	25以上33以下	从1:1到5:1 (规定短边的最小长度为8cm)
	中型	33以上50以下	
	大型	50以上	

(2) 安装在墙壁上的通路指示灯，从墙壁到该指示灯的指示面积的距离，由表 11-7 根据不同的通路指示灯的规格决定。

(3) 电源由下面①和②决定：

① 电源是蓄电池或室内的交流低压干线，在通到电源的配线途中，从没有别的配线分叉的地方取。

② 开关要用指示灯专用的开关。

(4) 指示灯要安装非常电源。

(5) 以蓄电池作非常电源时，除了要使其容量能让该设备有效地工作 20 分钟以上外，

表11-7 走廊通路指示灯的指示面积的典型尺寸

种类	从墙壁到指示灯的指示面积的距离 (cm)	
小型	1 以上	6 以下
中型	2 以上	8 以下
大型	3 以上	10 以下

还要以消防法实施规则第24条第4号的规定为准设置。

(6) 配线除了根据与电气材料有关的法令的规定外, 还要根据下面①和②的规定:

① 指示灯的引出线和室内配线直接连接。

② 在指示灯的回路中, 不设置分开关(藏在指示灯的蓄电池设备内或者用三线式配线、经常充电的分开关除外)。

(7) 避难口指示灯规定用表示避难口意思的绿色灯。

(8) 避难口指示灯的亮度, 在直线距离30米的地方, 指示面积内的文字和色彩应该很容易识别。

(9) 设置在地面的通路指示灯, 要有加上重物也不被破坏的强度。

(10) 规定通路指示灯是表示避难方向的绿色灯。但是, 设置在楼梯的指示灯, 不要规定表示避难方向的颜色。

(11) 指示灯必须符合消防厅规定的标准。

(2) 设置

(1) 规定在表11-8所示的防火对象或其一部分中设置指示灯。但是, 在避难容易而且可以辨认的地方, 在自治省法令的规定中就没有这种限制。

(2) 在上述规定的例外条款中, 就避难口的指示灯来说, 从室内各部分容易看见主要的避难口, 而且可以识别时, 其步行距离在表11-9所列的距离以下时, 即使不设置也可以。就通路指示灯来说, 在容易看见主要的避难口而且可以识别时, 其步行距离在表11-9所列的距离以下时, 即使不设置也可以。

(3) 避难口指示灯设置在防火对象或该避难口的上部。

(4) 避难口指示灯设置在离避难口下面的高度为1.5米以上的地方。

(5) 通路指示灯设置在防火对象或该走廊、楼梯和有别的避难设备的通路等地方, 使该地方的照度有助于避难。

(6) 通路指示灯要根据下面①~④的规定进行设置:

① 亮度, 从通路指示灯的正下方离地面0.5米处测量为 $1lx$ 以上(设置在楼梯的指示灯, 在踏板和休息板的中心线上测量为 $1lx$ 以上)。

② 设置在离地面的高度为1米以下的地方(对设置在楼梯的指示灯来说, 设在面向楼梯的最高处的室内的部分或墙壁等地方)。但对室内通路指示灯来说, 就没有这个限制。

③ 除了设置在楼梯或倾斜道路的指示灯外, 在每层中, 从该道路或走廊的各部分到一个道路指示灯的步行距离在10米以下的地方和拐弯处, 都要设置。

④ 设置在不妨碍通行的地方。

(7) 观众席指示灯, 根据自治省法令的规定, 观众席的照度应该在 $0.2lx$ 以上。

(8) 观众席指示灯在观众席产生的照度应该在观众席走道地面的水平面上测量。

11-3-2 事故照明装置

事故照明装置是在发生火灾和地震等事故时, 即使由一般电源供电的照明灭掉了, 为了确保避难和灭火所需要的最低照度而设置的装置。它对于人员不多的特殊建筑物和超过一定规模的建筑物也适用。

事故照明装置由照明器、配线和电源构成。

表11-8 设置指示灯的对象和由指示灯决定的设置分类

政令另表第1的防火对象		设置对象 (政令第26条)		大型、中型、小型指示灯的设置分类 (部令第28条之3)						
		避难口 指示灯	观众席 指示 标志	避难口指示灯				室内通路指示灯 走廊通路指示灯		
				设置在(A)或(B)地 方的(注)		设置在(C)或(D)地 方的(注)				
		通道指 示灯	指示 标志	总面积 1000m ² 以上	总面积 1000m ² 以下	总面积 1000m ² 以上	总面积 1000m ² 以下	楼地板面积 1000m ² 以上	楼地板面积 1000m ² 以下	
(1)	① 剧场、电影院、演出场所或观览场所	全部 (除去指示灯有效范围)	全部					小型以上		
	② 会堂或集会场所									
(2)	① 小酒馆、咖啡馆夜总会以及类似的场所		全部		大型	中型以上	小型以上		中型以上	小型以上
	② 游艺场或舞厅									
(3)	① 候车室或候诊室、饭店以及类似的场所		全部							
	② 饮食店									
(4)	百货商店、市场、经营其他物品的店铺或展览场所		地下室、无房间、11层以上的部分							
	① 旅馆或住宿的场所									
(5)	② 宿舍、公寓或公共住宅						小型以上			
(6)	① 医院、诊疗所或助产所		全部		大型	中型以上	小型以上		小型以上	
	② 老人福利设施, 收费的老人收养所, 救护站									
	③ 幼儿园、盲人学校、聋人学校或保育学校									
(7)	小学、中学、大学、高等专门学校以及类似的各种学校		地下室、无房间、11层以上的部分					小型以上		
(8)	图书馆、博物馆、美术馆以及类似的建筑物									
(9)	① 公共浴室中的蒸汽浴室		全部		大型	中型以上	小型以上	中型以上	小型以上	
	② ①以外的公共浴室						小型以上	小型以上		
(10)	停车场、船舶或飞机的出发和到达的地方			大型	中型以上		中型以上			
(11)	神社、寺院、教会以及类似的地方									
(12)	① 工厂或工作场所	全部								
	② 电影摄影棚或电视演播室						小型以上	小型以上		
(13)	① 汽车库或停车场	全部								
	② 飞机库									
(14)	仓库									
(15)	前面各项以外的企业									
(16)	① 多用途的防火对象中供(1)项~(4)项、(5)项之①、(6)项或(9)项之①所列的防火对象用的部分	全部	(1)项的用途部分	大型	中型以上	小型以上	中型以上	小型以上		
	② ①之外的多用途防火对象	地下室、无房间、11层以上的部分					小型以上	小型以上		
(16)之2	地下街道	全部	(1)项的用途部分	大型	中型以上		中型以上			

备考(注) (A) 从室内直接通向外面的出入口和该楼房的出入口(部令第28条之3第一项第一号之①)
 (B) 直通楼梯。直通楼梯的楼梯间和它的附属房间的出入口(部令第28条之3第一项第一号之②)
 (C) 通过(A)或(B)所列的出入口的走廊, 或通向通路的出入口(部令第28条之3第一项第一号之③)
 (D) 通过(A)或(B)所列的出入口的走廊, 或者设在通路中的防火大门有可以直接用手开门的措施(包括有便门那样的防火措施)的地方(部令第28条之3第一项第一号之④)

表11-9 不需要设置指示灯的防火对象或其它部分

分类	步行距离 (m)					
	避难口指示灯		通路指示灯		观众席灯	指示标志
	避难房 (除去无窗房)	避难房以外的房子 (除去地下室、无窗房)	避难房 (除去无窗房)	避难房以外的房子 (除去地下室、无窗房)		
(1)	① 剧场、电影院、曲艺场或观览场					
	② 公众集会厅或会场					
(2)	① 带舞场的酒馆、咖啡馆、夜总会以及类似的地方			20		
	② 游艺场或舞厅					
(3)	候车室、候诊室、饭店以及类似的地方			30		
	饮食店				20	
(4)	百货商店、市场、出售其他物品的店铺或展览场			20		
(5)	① 旅馆、饭店或住宿的场所					
	② 宿舍、公寓或公共住宅			30	30	
(6)	① 医院、诊疗所或助产所			20		
	② 老人福利设施、收费的老人收养所、救护设施、整容设施、儿童福利设施(除去母子宿舍和儿童保健设施)、残疾人整容救护设施(限于收容残疾人的设施)或精神病人救护设施	(1)项~(16)项	(1)项~(16)项	30	20	
	③ 幼儿园、盲聋学校或保育学校					
(7)	小学、中学、高等学校、高等专门学校、大学以及类似的各种学校	20m以下	10m以下			30
(8)	图书馆、博物馆、美术馆以及类似的建筑			20		
(9)	① 公众浴室里面的蒸汽浴室以及类似的浴室					
	② ①之外的公共浴室					
(10)	停车场、船舶或飞机的出发和到达的场所(限于旅客的乘降或等候用的建筑物)					
(11)	神社、寺院、教会以及类似场所			30	30	
(12)	① 工厂或工作场所					
	② 电影或电视演播室			20	20	
(13)	① 汽车库或停车场					
	② 飞机库			30	30	
(14)	仓库					
(15)	前面各项以外的企业				20	
(16)	① 多用途的防火对象(包括(1)~(4)、(5)之①、(6)、(9)之①)			20		
	② 上述各项以外的多用途防火对象			30	30	
(16)之②	地下街道					

(1) 构造和性能

(a) 必须是直接照明，而且要能保证在地面上有 1 lx 以上的照度。

(b) 照明器(包括照明保护层即附属于别的照明器的东西)中，主要的部分必须用不燃材料制造或覆盖。

(c) 必须设置预备电源。

(d) 除了上面的规定外，为了确保事故时的照明，必须规定其构造要适合建设大臣认为有必要而制定的标准。

参考：建设省告示第 1830 号(昭和 45 年 12 月 28 日)确保事故用照明装置的机能的构造标准。

(2) 设置

(a) 必须设置事故照明装置的场所如表 11-10 所示。

表 11-10 必须设置事故照明装置的场所

		建筑物的种类和构造	设置场所
特殊建筑物	与总面积完全没有关系的对象	剧场、电影院、演出场所、观览场所、公共会堂、集会场所、医院、饭店、旅馆、公寓、公共住宅、集体宿舍、养老院、儿童福利设施、助产所、残废人整容救护设施、妇女保健设施、精神病人救护设施、老人福利设施、收费的老人收养所、母子保健设施、博物馆、美术馆、图书馆钻探场所、体育练习场所、滑雪场、滑冰场、游泳场、百货店、市场、展览场所、舞厅、咖啡馆、夜总会、酒吧间、跳舞场、游艺场、澡堂、饭馆、饮食店、售货店(地面面积 10m^2 以内的除外)	(1) 居室 (2) 避难道路、从居室到地上去的变成避难道路的走廊、楼梯等。 (3) 类似于居室、通路的部分
其他建筑物	超过 500m^2 的对象	层数在 3 层以上(包括地下室)的建筑物	
	超过 1000m^2 的对象		
所有建筑物	与总面积完全没有关系的对象	所有的建筑物	(1) 无窗的住房 (2) 避难通路

(b) 可以不设置事故照明装置的场所, 举例如下。详细情况可参考建设省的有关告示。

- ① 一户独用住宅、简易房屋或公共住宅中的各个住户。
- ② 医院的病房, 住宅或集体宿舍的卧室, 以及类似的其它住房。
- ③ 学校或体育馆。

11-3-3 其他

作为包含在安全照明范围里的装置, 设置在事故用的进出口的红色灯和设置在连接地下街道各构成部分的地下道的事事故照明装置, 已被规定作为与建筑基准法有关的设备。

11-4 配线工程和配线器具**11-4-1 设计**

电气设备随着建筑的进步、发展和社会机构的复杂化, 使之对设计提出了比较高的要求。另一方面, 由于设备的高级化, 在设计中要有节省资源和能量的观点, 控制适当的工程费用, 并要对现状作认真的调查。

在这里主要就室内照明配线的必要事项和有关部分的外围工程进行阐述。

(1) 配线设计要点 照明配线设计的主要因素如下:

- (a) 合于各种法规;
- (b) 使用安全而且方便;
- (c) 能充分发挥照明的功能;
- (d) 经济;
- (e) 要合理的考虑节省资源和能量。

(2) 有关的法规和标准 与照明有关的主要法规和标准如下:

- (a) 电气设备的技术标准;

- (b) 电气用品管理法, 以及国家法令、各省法令;
- (c) 室内配线规程;
- (d) 消防法, 以及国家法令、各省法令、条例;
- (e) 室外广告物法及条例;
- (f) 航空法;
- (g) 工业标准化法 (JIS);
- (h) 建筑基准法, 以及国家法令、各省法令、条例;
- (i) 劳动安全卫生标准;
- (j) 火药类管理法, 以及国家法令、各省法令;
- (k) 停车场法。

(3) **配线设计程序** 照明设计的最终目的是决定出灯具的配置和数量, 可按下列程序进行 (图11-19)。

(a) **供电方式和电压** 负荷是根据一定的供电方式和电压来使用的。日本电源的供电方式和电压, 大多数使用表 11-11 所列, 电线所需的耗铜量是随电压增高而减少的。在同一电压降下和以容许电流作为基准时, 耗铜量的比较如表 11-12 所示。照明器连接在分支回路中, 一般使用单相二线制。

在 400 V 级的供电方式中, 若照明与动力共用变压器时, 照明电源应使用三相四线制, 而且希望各相负荷平衡。其理由如下:

- ① 变压器各相负荷达到平衡, 使得变压器容量得到有效利用。
- ② 不平衡负荷就意味着引起逆相分电压的发生。

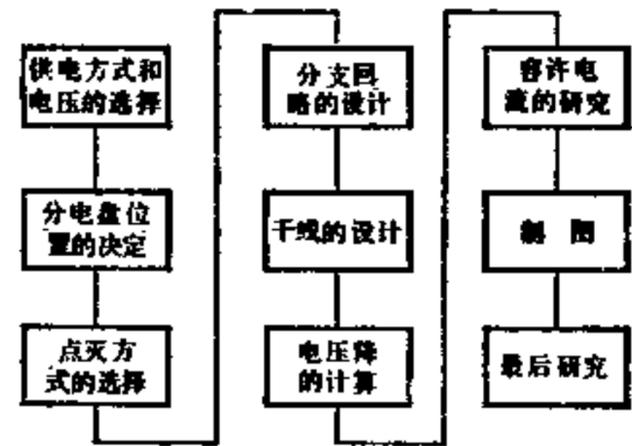


图11-19 设计程序

表11-11 供电方式和电压

交直流类别	相线数	频率 (Hz)	额定电压 (V)	主要用途和特长
交流	单相二线制	50	100 240(50Hz) 200 265(60Hz)	100 V 使用于一般住宅、小型建筑物, 也可以使用于大型建筑物中的白炽灯。200 V、240 V、265 V 使用于荧光灯、职业用加热器、电动机
	单相三线制		100/200	中性线和火线之间100 V 和单相二线制100 V 同样使用, 或火线之间200 V 和单相二线制200 V 同样使用, 单相三线制100/200 V 在大、中型建筑物的干线中广泛使用
	三相三线制		100 200	主要作为动力用, 大部分采用200 V, 或作为荧光灯使用, 使用于单相二线制200 V 的各相
	三相四线制		60	100/173 240/415(50Hz) 265/460(60Hz)
直流	二线制	—	100 60 48 24	100 V 使用在大型建筑物的备用灯和直流电动机中。60伏以下的电压主要作通讯使用

表11-12 由于供电方式不同所需的耗铜量

供电方式		所需耗铜量 (%)	
		以电压降为基准①	以容许电流为基准②
单相二线制	100V	100	100
	200	25	35
	240	17	26
单相三线制	100/200V	37.5	53
三相三线制	100V	75	66
	200	19	23
三相四线制	100/173V	33.3	38
	240/415	5.8	10.4
	265/460	4.7	9.0

- ① 不考虑回路的电抗、功率因数的影响。
- ② 容许电流是以导体截面积乘以2/3的比例求出。
- ①、② 都是除单相二线制以外，总负荷要平衡，而且中性线的粗细与火线相同。

照明回路的电压，相对于同一电压下降率时，以高电压有利。

(b) 电压降 在配线中被接上负荷，受电端（负荷侧）的电压因线路的电阻和电感的影响，就要比输电端（电源侧）的电压下降，故把这个叫做电压降。若这个电压降太大，将会发生负荷功能下降，所以应规定出适当的电压降。在室内配线规程中，低压配线的电压降原则上规定于线和分支回路分别为2%以下。另外，当长度超过60米时，可以放宽使用表11-13。在表11-14中，是表示由于电压降而引起电气设备性能的下降。如上所述，在室内配线的负荷端的电压，比电源的电压低，其关系式如下：

$$E - V = RI \left(\delta + \beta - \frac{\delta p \beta}{100} \right) \quad (11-1)$$

式中 E 为电源电压 (V)； V 为负荷点电压 (V)； R 为电线电阻 (Ω)； I 为负荷电流 (A)； $\delta = \cos \varphi + \frac{X}{R} \sin \varphi$ ； $p = \frac{RI}{V} (\%)$ ； $\beta = \frac{p}{200} \left(\sin \varphi - \frac{X}{R} \cos \varphi \right)^2$ ； φ 为相位角； X 为线路电抗 (Ω)。

在直流回路中，仅仅是电阻电压降 RI ；而在交流回路中，交流电压降则应考虑式 (11-1)。一般情况下，在交流时，只考虑电阻引起的电压降，用表11-15计算，但对 50mm^2 以上的粗大电线，包括式 (11-1) 在内，只有电阻电压降就不正确了，应考虑表11-16的值。并且在大电流值时，由于集肤效应而引起电阻值的增加，由表11-15、表11-16求出电线的

表11-13 长度超过60米时的电压降

配线长度	电压降 (%)	
	高压配电	低压配电
120m 以下	5 以下	4 以下
200m 以下	6 以下	5 以下
200m 以上	7 以下	6 以下

表11-14 由于电压降而引起电气设备性能的下降

电气设备	电压下降1%时的性能下降①
白炽灯	变暗3%
荧光灯	变暗1~2%
交流感应电动机	转矩减少2%②
电热器	发热量减少2%③

- ① 是以额定电压作基准的比较。
- ② 转矩与电压的平方成正比。
- ③ 发热量与电压的平方成正比。

表11-15 电压降的公式

回路的供电方式	电压降	电线的截面积
直流二线制和单相二线制	$e = \frac{35.6 \times L \times I}{1000 \times A}$	$A = \frac{35.6 \times L \times I}{1000 \times e}$
三相三线制	$e = \frac{30.8 \times L \times I}{1000 \times A}$	$A = \frac{30.8 \times L \times I}{1000 \times e}$
直流三线制、单相三线制和三相四线制	$e' = \frac{17.8 \times L \times I}{1000 \times A}$	$A = \frac{17.8 \times L \times I}{1000 \times e'}$

注：e 为各线间的电压降 (V)；e' 为火线或相线和中性线间的电压降 (V)；A 为电线的截面积 (mm²)；L 为每一根电线的长度 (m)；I 为电流 (A)。表中将电线的导电率定为 97%，并且三线制、四线制的各线电流是在平衡的情况下。

表11-16 电压下降的倍数 (金属管工程) (60Hz)

功率因数	1.00			0.90			0.80			0.70			X/R 比
	3	6	10	3	6	10	3	6	10	3	6	10	
电压降 (P%)													
1.6mm	1.00	1.00	1.00	0.91	0.91	0.91	0.82	0.82	0.82	0.73	0.73	0.74	0.02
2.0mm	1.00	1.00	1.00	0.91	0.91	0.91	0.82	0.83	0.84	0.73	0.73	0.74	0.03
2.6mm	1.00	1.00	1.00	0.92	0.92	0.93	0.83	0.84	0.85	0.75	0.75	0.76	0.05
8 mm ²	1.00	1.00	1.00	0.93	0.93	0.94	0.84	0.85	0.85	0.76	0.76	0.77	0.07
14 mm ²	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	0.96	0.87	0.88	0.88	0.80	0.80	0.81	0.12
22 mm ²	1.00	1.00	1.00	0.98	0.98	0.98	0.91	0.92	0.92	0.84	0.84	0.85	0.19
30 mm ²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.95	0.95	0.87	0.88	0.88	0.24
37 mm ²	1.00	1.00	1.00	1.03	1.03	1.03	0.98	0.98	0.99	0.92	0.92	0.92	0.30
50 mm ²	1.00	1.00	1.01	1.07	1.07	1.07	1.03	1.03	1.03	0.98	0.98	0.99	0.38
60 mm ²	1.00	1.01	1.01	1.11	1.11	1.11	1.08	1.08	1.08	1.04	1.04	1.05	0.47
80 mm ²	1.01	1.01	1.02	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.13	1.13	1.13	0.60
100 mm ²	1.01	1.02	1.03	1.24	1.24	1.24	1.27	1.27	1.27	1.26	1.26	1.26	0.78
125 mm ²	1.01	1.03	1.04	1.31	1.32	1.32	1.37	1.37	1.37	1.38	1.38	1.38	0.95
150 mm ²	1.02	1.05	1.08	1.41	1.41	1.41	1.48	1.48	1.48	1.52	1.52	1.52	1.1
200 mm ²	1.03	1.06	1.10	1.55	1.56	1.57	1.67	1.68	1.69	1.74	1.74	1.75	1.5
250 mm ²	1.05	1.10	1.14	1.72	1.74	1.76	1.92	1.93	1.94	2.03	2.04	2.05	1.8
325 mm ²	1.08	1.15	1.23	1.94	1.97	2.01	2.19	2.21	2.23	2.34	2.35	2.36	2.3
400 mm ²	1.12	1.22	1.34	2.16	2.20	2.26	2.47	2.50	2.53	2.67	2.68	2.69	2.9
500 mm ²	1.16	1.30	1.49	2.41	2.49	2.58	2.83	2.87	2.92	3.09	3.11	3.13	3.3

粗细后，再乘上表 11-17 所示的系数来求出。

(c) 所需要的电功率 将总建筑面积乘以单位面积的电功率 (W/m²) 就可求出设备功率的概算来 (表 11-18)。

在表 11-18 中，是以荧光灯输出功率的 1.25 倍或使用电动机输出功率的 1.5 倍作为电灯的统一负荷。

(d) 大型建筑物的变配电所和控制室的面积 一般大型建筑物的变配电所的面积，应根据总建筑面积，按图 11-20 和图 11-21 求出大概的面积。但是，在实际计划中一定要考虑到各种不同类别的建筑物和实际情况。

(5) 电线的容许电流 电线是根据它的导体、绝缘层的种类、芯线周围的温度，以及配线状态等来确定应有的容许电流。关于这个容许电流，可参照电气设备技术基准通告、日本电线工业会标准和室内配线规程等。

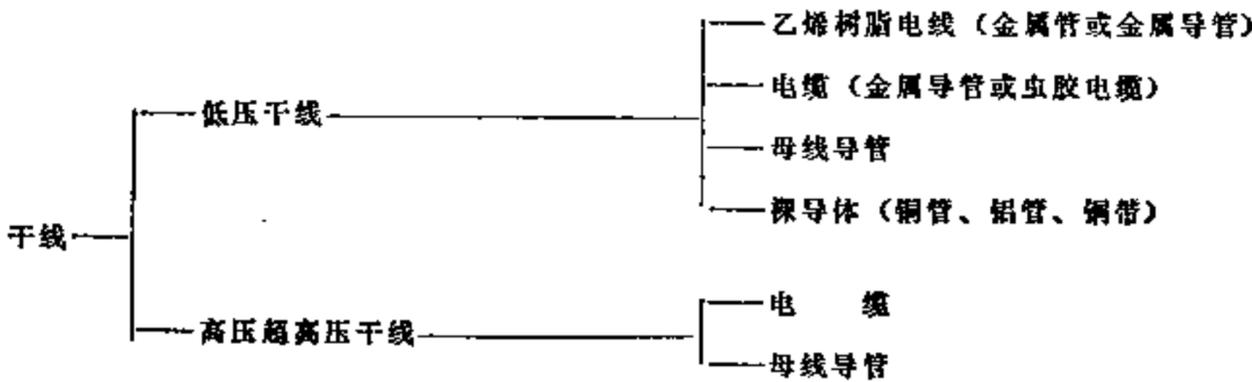
表11-17 由于集肤效应而引起电阻增加的系数

电线粗细(mm ²)		30	38	50	60	80	100	125	150	200	250	3.5	400	500		
50Hz	非金属包皮	1.00										1.01	1.02	1.04	1.06	
	金属包皮	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.07	1.10	1.13	1.16	1.22					
60Hz	非金属包皮	1.00										1.01	1.02	1.03	1.04	1.07
	金属包皮	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.10	1.13	1.18	1.22	1.30			

表11-18 各种不同用途建筑物的电力负荷调查

项目 建筑用途	电力负荷设备容量 (W/m ²)						变压器设备容量(kVA) 电力负荷设备容量(kW)			最大功率(kW) 电力负荷设备容量(kW) %			自备发电设备容量(kVA) 合同最大功率(kW) %	
	电灯统一负荷	一般动力	空调动力	合计			中心值	平均值	标准误差	中心值	平均值	标准误差	中心值	平均值
				中心值	平均值	标准误差								
办公室	29.4	41.3	41.3	112	126	58.2	1.08	1.08	0.29	59.9	60.6	15.9	26.2	30.1
旅馆	30.0	33.0	32.5	95	106	43.9	0.99	1.02	0.25	59.0	60.0	15.6	22.5	26.0
百货大楼	55.0	55.0	52.0	172	189	74.9	1.11	1.13	0.24	59.7	61.7	12.6	18.6	16.1
公共住宅	—	—	—	79	85	43.0	—	—	—	27.7	27.7	9.6	—	—

表 11-19



(4) 干线 所谓干线,是由电源侧来看,从最靠近负荷的自动断路器到电源一侧,在设计时要注意以下几点:

(a) 供电方式和电压,参照表11-11。

(b) 干线的配电方式 干线配电方式的形式是多样的(图11-22)。形式的选择是根据建筑的目的和规模等,还要考虑施工性、安全性、经济性和维修性等来决定。

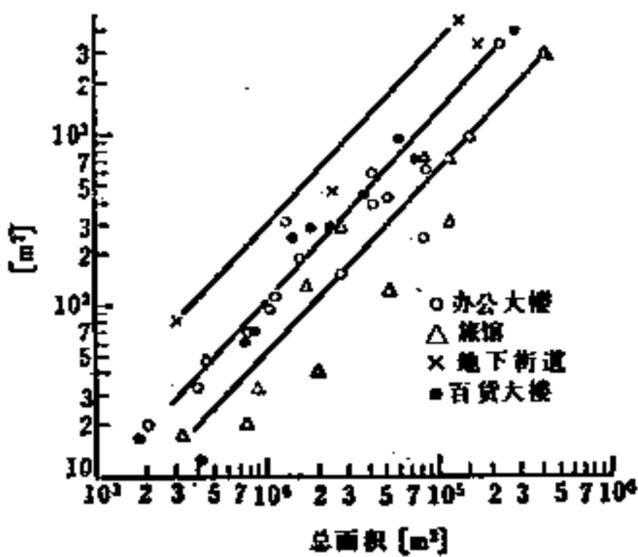


图11-20 变配电所的面积

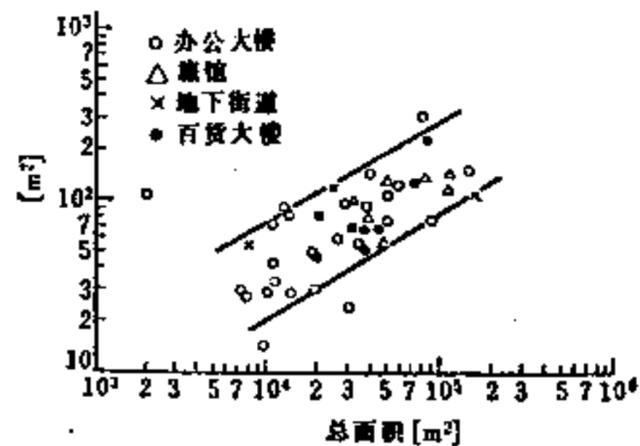


图11-21 控制室的面积

(c) 保护 在干线中, 为了保护电线, 在电源侧必须装设过电流断路器。

① 在低压室内干线上, 使用细电缆连接它的室内低压干线时, 按图 11-23 装设过电流断路器。

② 作为低压室内干线保护而装设的过电流断路器, 其额定电流一定要在它的低压室内干线的容许电流以下。但是, 当在干线上连接电动机等时, 把电动机等的额定电流总和的 3 倍, 加上其它使用的电气设备的额定电流, 所得的值 (干线的容许电流低于此值的 2.5 倍时, 把容许电流更换成 2.5 倍) 要小于此干线的额定电流 (干线的容许电流超过 100 A 时, 如果此值不符合额定等级, 应选择此值的直接上一挡的额定值) 才能使用。

在表 11-20 中是表示干线的粗细、开关和过电流保护装置的容量之间的关系。

(5) 电路的遮断容量 低压电路的遮断容量, 一般有几千安培, 在大型建筑物中的电

表11-20

干线粗细、开关和过电流保护装置的容量

规定最大负荷电流(A) 以下	根据配线种类而使用干线的最小尺寸 (mm)或(mm ²)				开关的 额定值 (A)	过电流保护装置的额定值 (A)	
	铜 线		铝 线			B种熔断器	A种熔断器 及配线用的 断路器
	绝缘子引线	金属管内穿入 3根以下的电 线时及VV电 缆等	绝缘子引线	金属管内穿入 3根以下的电 线时, 或VV电 缆等			
20	2 (9m) [18]	2 (9m) [18]	2.6 (9m) [18]	2.6 (9m) [18]	30	20	30
30	2.6 (10) [20]	2.6 (10) [20]	2.6 (6) [12]	3.2 (9) [18]	30	30	30
40	3.2 (11) [23]	14 (19) [38]	22 (18) [37]	22 (18) [37]	60	40	50
50	3.2 (9) [18]	14 (15) [31]	22 (14) [29]	22 (14) [29]	60	50	50
75	14 (10) [20]	22 (16) [32]	22 (10) [22]	38 (16) [33]	100	75	75
90	22 (13) [27]	30 (18) [36]	38 (14) [28]	50 (18) [36]	100	100	125
100	22 (12) [24]	38 (21) [41]	38 (12) [25]	50 (16) [32]	200 (B种熔断器时) 100	100	125
125	30 (13) [26]	50 (21) [42]	38 (10) [20]	80 (20) [40]	200	125	150
150	38 (14) [27]	60 (22) [44]	60 (13) [26]	100 (22) [44]	200	150	175
175	50 (15) [30]	80 (25) [50]	80 (15) [30]	125 (24) [48]	200	175	200
200	60 (16) [33]	100 (28) [56]	100 (17) [34]	150 (26) [52]	200	200	200
250	80 (18) [35]	150 (34) [68]	125 (17) [34]	200 (28) [56]	300	250	250
300	125 (23) [46]	200 (36) [72]	150 (17) [34]	250 (28) [56]	300	300	350
350	150 (24) [48]	250 (40) [80]	200 (19) [38]	325 (30) [60]	400	300	400
400	200 (27) [54]	325 (45) [90]	250 (22) [44]	400 (34) [68]	600 (B种熔断器时) 400	400	500

备注: 1. () 内的数值是表示在 100 V 单相二线制中, 电压降为 2% 时的电线长度;
 2. [] 内的数值是表示在 100 V / 200 V 单相三线制中, 电压降为 2% 时的电线长度;
 3. 在单相三线制或三相四线制的干线中, 为了减少电压降, 即使用粗电线时, 中性线也没有必要比表的值粗;
 4. 在单相三线制的干线中, 最大假想负荷电流超过 200 A 时, 中性线可以比表中第一列的值还细;
 5. “电线管内穿入 3 根以下电线时及 VV 电缆等”的铜又指金属管、合成树脂管、金属线、合成树脂线等在可挠管内穿入 3 根以下的电线的情况, 及在地面导管、金属导管内穿入电线的情况以及 VV 电缆等。

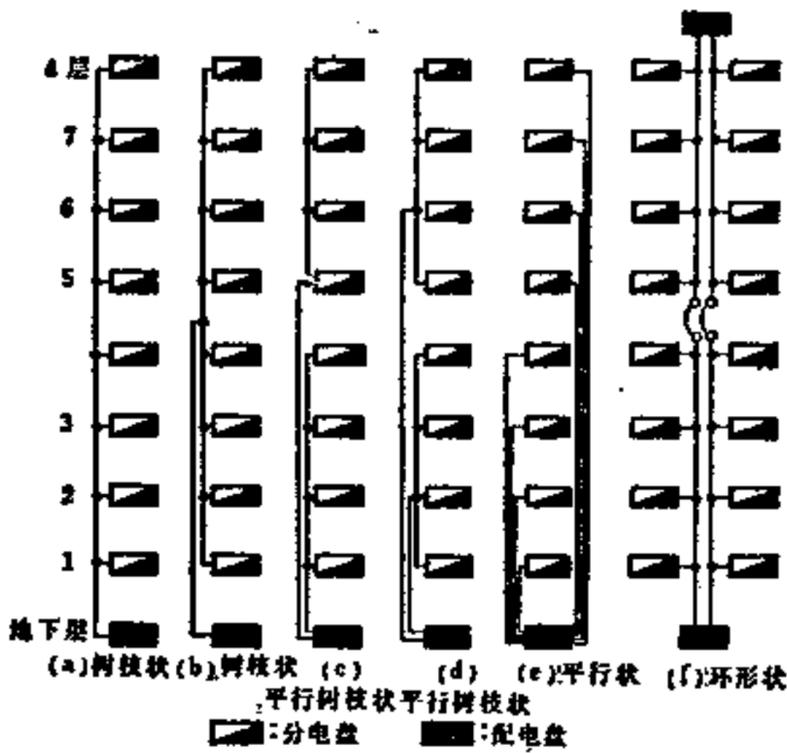


图11-22 干线配电方式的形状

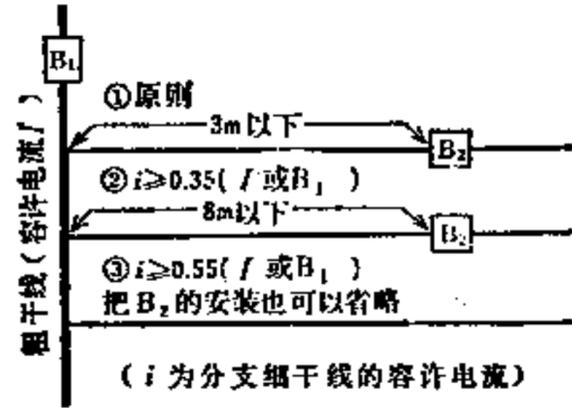


图11-23 干线的过电流断路器的安装图

图中，粗干线和分支细干线使用的材料（铜或铝）和种类相同时，分支干线的截面积在②中为粗干线的1/5以上，在③中为1/2以上都是合适的。

源容量则更大，并且在大多数情况下，电源的阻抗小，而电流大。因此，遮断容量的选择必须慎重，可使用图11-24、图11-25来求出这个概略值。

(6) 分支回路 从低压室内干线到分支线，即从使用的电气设备到低压室内配线叫作分支回路，此分支回路在设计时应考虑如下几点：

(a) 分支回路的种类

① 使用电灯和电气设备的分支回路，以表11-21来区分。

② 类似于电动机等而使用分支回路，因起动电流大，可参照技术基准第186条第1项第六号。

表11-21 分支回路的种类

分支回路的种类	分支过电流断路器的额定电流
15 A 分支回路	15 A
20 A 配线用的断路器分支回路	20 A (限于配线用断路器)
20 A 分支回路	20 A (限于熔断器)
30 A 分支回路	30 A
50 A 分支回路	50 A
超过50 A 分支回路	配线的容许电流以下

(b) 电线 分支回路的电线如表11-22所示。

表11-22 分支回路的电线粗细

分支回路的种类	一般分支回路			从分支点到插座(除万能插座外)部分 (长度限制在3m以下时)	
	铜线	铝线	照明导线	铜线	铝线
15 A, 20 A 配线用断路器	直径1.6mm (横断面积1.0mm ²)	直径(2.0) 2.3mm	15 A 或 20 A	—	—
20 A (限制在熔断器)	直径2.0mm (横断面积1.5mm ²)	直径2.6	20 A	直径1.6mm (横断面积1.0mm ²)	直径(2.0) 2.3mm
30 A	直径2.6mm (横断面积2.5mm ²)	直径3.2mm	30 A	直径1.6mm (横断面积1.0mm ²)	直径(2.0) 2.3mm
50 A	横断面积14mm ² (横断面积10mm ²)	横断面积22mm ²	—	直径2.0mm (横断面积1.5mm ²)	直径2.6mm
超过50 A 者	当该过电流断路器的额定电流有以上的容许电流者			—	—

注：1. 铜线的 () 表示MI电缆，铝线的 () 表示硬铝线。
 2. 在光电信号回路中，当负荷一定时，最大使用电流在5A以下者，则整个回路普遍用铜导线1.6mm，半硬铝导线2.3mm，硬铝导线2.0mm。
 3. 照明导管，在导管本身表示出额定电流。

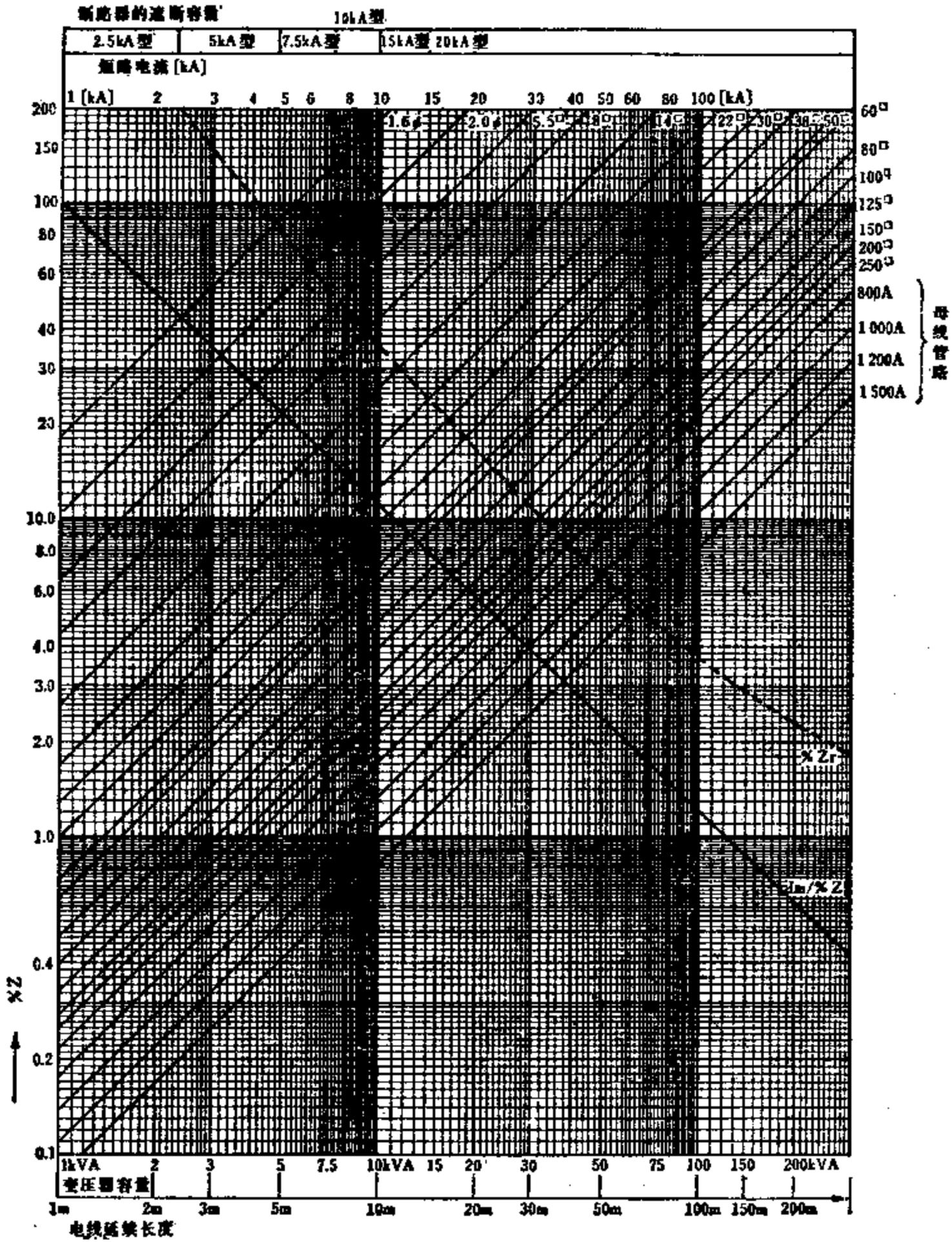


图11-24 1φ2W, 100V 短路电流的计算图表

计算程序:

① 求出变压器的阻抗百分数%

将变压器容量(kVA)与%Z_r曲线的交点向左边移动即可求出变压器的阻抗值的百分数

② 求出线路的阻抗

从变压器到短路点的电线延续长度与使用不同的电线粗细的直线交点向左边移动即可求出线路的阻抗百分数

③ 决定短路电流

将①与②得到的阻抗值百分数之和与纵轴I_m/ %Z直线上移动, 求出短路电流值

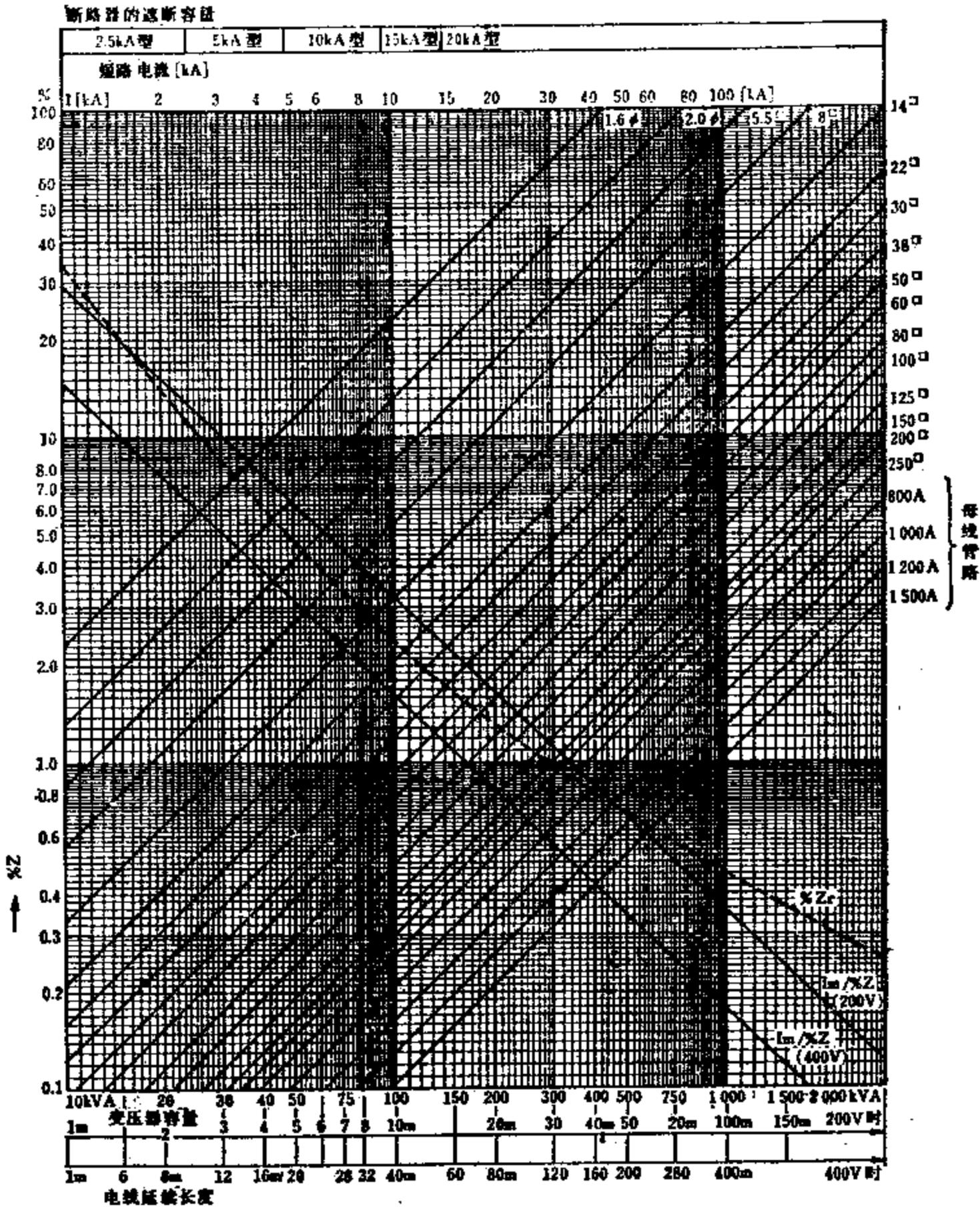


图11-25 3φ3W, 200V, 400V短路电流计算图表

- ①这个短路电流的图表，是表示变压器的1次/2次电压为6000、3900V, 200、100V时，用不同的二次电压 电线延续长度，表示为 $I_m / \% Z$ 。
- ②这个短路电流的图表，是在短路后1/2周期时含有直流分量作标准。
- ③从这个表中得到的%阻抗，都换算成100kVA。

(3) 自动断路器 在电灯用的分支回路等处安装自动断路器，可参照上述分支回路种类表。

在本分支回路中，从低压室内干线的分支点到电线长度为3米以下的地方，装设开关和过电流断路器。但是，分支点到开关和过电流断路器的容许电流，是连接该分支电线的低压室内干线过电流保护断路器的额定电流的55%（分支点到开关和过流断路器的电线长度在8

米以下时,用35%)以上时,可以装设在从分支点到超过3米的地方,已在图11-26中表明。

(7) 接地工程 接地对人身安全和电气设备的保护也是非常重要的,主要是为了以下目的而进行。

① 由于设备的绝缘物老化损伤等而引起的漏电,为防止触电用……设备接地。

② 由于高低压混合接触,而高压电流对人畜产生危险电流,通过大地放出,为防止触电用……系统接地。

③ 用来防止雷电灾害……屏蔽用。

④ 输、配线,高低压母线等,当接地网络发生故障时,使继电器迅速而准确动作……接地效果。

⑤ 在设备和配电线发生不正常高压时,抑制对地电位,将减轻绝缘强度……接地效果。

(1) 接地工程的种类和接地电阻值 接地工程有四种,在表11-23中表明。并且,把与设施场所相应的接地工程的种类一览表,在表11-24中表示。

(2) 接地线的粗细 接地线的粗细一定要满足以下条件:

- ① 有足够的机械强度;
- ② 有优越的耐腐蚀性;
- ③ 能使故障大电流安全通过。

在表11-25、表11-26、表11-27中表示出各种接地工程的接地线的粗细。

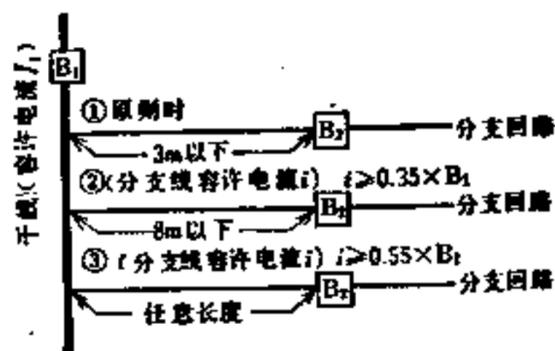


图11-26 分支回路的开关和过电流保护装置的安装图

注: 1. 只限于电灯回路和电动机负荷的合计,当电灯负荷的合计增多时,可以把 B_1 换成 I_1 。
2. 在干线与分支线使用电线的种类和材料(铜或铝)相同时,对于图中②的分支截面积是干线的1/5以上,在③中的1/2以上时,都可以认为是合适的。

表11-23 接地工程的种类及其接地电阻值

接地工程的种类	接 地 电 阻 值
第一类接地工程	10Ω以下
第二类接地工程	欧姆数应在变压器的高压侧或超高压侧的电路之一线接地电流的安培数除以150(变压器的高压侧的电路和低压侧的电路之间交叉接触,当低压电路对地电压超过150V时,设置有2秒以内高压自动断路器时,就要除以300)的值以下。但是,在5Ω以下时,就不需要这个值
第三类接地工程	100Ω以下(关于低压电路,当在该电路中设置电流动作型的额定敏感电流在100mA以下,动作时间为0.5秒以下的漏电流断路器时,则为500Ω)
特别第三类接地工程	10Ω以下(关于低压电路,当在该电路中设置电流动作型的额定敏感电流在100mA以下,动作时间为0.5秒以下的漏电流断路器时,则为500Ω)

表11-24 与设施场所相对应的接地工程种类一览表

接地工程的种类	内 容	电 技
第一类接地工程	①由于超高压电路中的变压器被耦合到高压电路的放电装置 ②超高压计量仪器使用的变压器的二次侧电路 ③高压用的机械设备的铁台座或金属外壳 ④高压电路中设置的避雷器或放射保护筒及其它代替避雷器的装置 ⑤在房屋附近设置的高压电路,管及其它容纳电缆防护装置的金属部分,金属制成的电	第25条 第26条 第28条 第43条 第102条

(续)

接地工程的种类	内 容	电 技
第一类接地工程	线接线盒和电缆包皮使用的金属体* ⑥超高压架空电线和弱电流架空电线等相接近或交叉时用的保护网 ⑦在房屋附近的高压电路和在室内的高压配线使用管及其它容纳电缆的防护装置的金属制品部分, 金属制成的电线接线盒和电缆的包皮使用的金属体* ⑧放电灯用的镇流器的外壳和放电灯用的灯具的金属制品部分 (在管灯回路中使用电压为高压时, 而且, 放电灯用的变压器的二次短路电流或管灯回路的动作电流超过1A时) ⑨在房屋附近或室外设施管灯回路的使用电压超过1000V的放电灯 ⑩电极式温泉升温器的屏蔽装置的电极 ⑪牵引用水下照明灯等使用的绝缘变压器的一次线圈和二次线圈之间装设金属制成的防护接触板	第136条 第217条 第221条 第233条 第2款 第245条 第247条
第二类接地工程	①高压电路和低压电路相耦合的变压器在低压侧的中性点或一个接线柱 (使用电压为300V以下时, 该变压器的中性点接地工程难以施行时) ②将高压电路和低压电路耦合的变压器, 高压线圈和低压线圈之间设金属制成的防护接触板 ③使用多芯型电线时的中性线或使用有绝缘层的内导体作接地电线	第23条 第24条 第72条
第三类接地工程	①高压计量仪器用的变压器的二次侧电路 ②300V以下的低压用的机械设备的铁台和金属制成的外壳 ③在低压架空线或高压架空线中使用的电缆, 架通讯网络的支架和使用金属体的电缆包皮 ④使用多芯型电线作为通讯网络时, 使用绝缘物作包皮的内导体 ⑤高压架空电线和交流电车线等在交叉时, 架空电线在交流电车线等的上面设置时的高压架空电路的金属横担之类 ⑥保护网 ⑦保护线 ⑧管、暗沟及其地下敷设电线防护装置的金属制品部分, 金属制成的电线接线盒和地下电线用金属体做的包皮 ⑨在隧道内装设电路, 在高压场合使用电缆时的防护装置的金属制品部分, 金属制成的电线接线盒和电缆用金属体作的包皮 ⑩为了防止高频电流的障碍用的电容器和霓虹灯点灭器的防止高频发生装置的接线柱 ⑪在300V以下的合成树脂管工程中使用的引线箱或粉末防爆型挠性接头 ⑫在300V以下的金属工程使用的管 ⑬在300V金属槽板工程使用的槽板 ⑭在300V以下的挠性电线管工程使用的挠性管 ⑮在300V以下的金属导管工程使用的导管 ⑯在300V以下的母线管路工程中使用的管路 ⑰在300V以下的照明导管工程中使用的导管 ⑱在地面导管工程中使用的导管 ⑲在300V以下的电缆配线使用的管, 及其它穿入电线保护装置的金属制成部分, 金属制成电线接线盒和电线金属体的包皮 ⑳放电灯用的镇流器的外壳和放电灯用的灯具的金属制品部分 (第一类接地工程, 特别第三类接地工程的条件以外情况) ㉑大于300V而小于1000V的管灯回路的配线中符合以下条件者 a. 合成树脂工程中的引线箱或粉末防爆型挠性接头 b. 金属工程中的金属管 c. 金属槽板工程中的金属槽板 d. 挠性电线管工程中的挠性管 e. 电缆工程中的管及其它容纳电缆保护装置的金属制品部分, 金属制成的电线接线盒	第26条 第28条 第71条 第72条 第86条 第92条 第93条 第146条 第150、151、152条 第183条 第193条 第194条 第195条 第196条 第197条 第198条 第200条 第199条 第201条 第221条 第222条

(续)

接地工程的种类	内 容	电 技
	和电缆用金属做的包皮 ②在自动扶梯内的管灯回路的配线中,与电线相接触的金属制造材料 ③容纳霓虹灯变压器的金属制成的外壳部分 ④在房屋附近或室外,安装管灯回路使用的电压为1000V以下的放电灯 ⑤交通信号灯的金属制成的外壳 ⑥电热丝或与电热丝直接连接的电线用金属做的包皮和防护装置 ⑦电热厚板用金属制成的外壳或电热薄板用金属制成的包皮 ⑧电极式温泉用升温器中使用的绝缘变压器的铁芯和金属制成的外壳 ⑨电浴器上使用的绝缘变压器的铁芯和金属制成的外壳 ⑩容纳电气防腐蚀用的电源装置的金属制成的外壳 ⑪电弧焊接装置的被焊接材料或与这个电气连接的手持工具、平台等的金属体 ⑫X光线发生装置的变压器和电容器的金属制成的外壳等 ⑬X光管露出的导线,接近带电部分在1米以内的金属体	第222条 第223条 第233条 第242条 第243、 244条 第243条 第245条 第246条 第248条 第251条 第252条 第252条
特殊第三类接地工程	①超过300V低压用的机械设备的铁台和金属制成的外壳 ②在超过300V合成树脂管工程使用的引线箱或粉末防爆型挠性接头* ③超过300V金属管工程中使用的管* ④超过300V挠性电线管工程中使用的挠性管* ⑤超过300V金属导管工程中使用的导管* ⑥超过300V母线管路工程中使用的管路 ⑦超过300V电缆工程中使用的管及其容纳电线防护装置的金制品部分,金属制成的电线接线盒和电线用金属体*做的包皮 ⑧放电灯用的镇流器的外壳和放电灯用的灯具的金属制成部分(管灯回路使用的电压超过300V的低压,并且放电灯用的变压器的二次短路电流或管灯回路的起动电流超过1A时) ⑨房屋附近或室外安装管灯的回路使用电压为1000V以下的放电灯 ⑩容纳牵引用的水下照明灯等使用的自动断路装置等用金属制成的外壳 ⑪容纳牵引用的水下照明灯等的照明灯的容器和防护装置的金制品部分	第28条 第193条 第194条 第196条 第197条 第198条 第201条 第221条 第233条 第1款 第247条 第247条
	注:1.带有*的是指设施不怕人接触时,可以作为第三类接地工程。 2.没有作规定的其它接地工程,按所定的接地工程进行时,有如下情况者,施工方法往往可以放宽: (1)将高压用的机械设备,容纳在金属制成的箱中时 (2)高、低压架空线路和悬索等相接近或交叉 (3)高、低压架空电线和烟囱等有接触危险时 (4)低压室内配线和弱电流电线等相接近或交叉 (5)在室内装设有低压载重滑车线的工程 (6)电极式温泉用升温器的设施 (7)集电气装置等的设施	第30条 第83条 第94条 第204条 第214条 第245条 第250条

表11-25

第一类接地工程的接地线的粗细

第一类接地工程的接地线部分	接 地 线 的 种 类	接 地 线 的 粗 细	
		铜	铝
使用固定的电气机械设备施行接地工程时,和使用移动的电气机械设备施行接地工程时,不必要用挠性的情况下	—	2.6mm以上 (5.5mm ² 以上)	3.2mm以上
使用移动电气机械设备施行接地工程时,必须用挠性的部分	第三类或第四类氯丁二烯汽车轮胎被覆绝缘电缆,高压用的汽车轮胎被覆绝缘电缆或高压用的汽车轮胎被覆绝缘电缆的屏蔽金属体或接地用金属线	8mm ² 以上	—

注:此表是表示非接地式电压电路中连接电气机械设备时的最低基准。

表11-26

第二类接地工程的接地线的粗细

相对于1相变压器的容量总和			接地线的粗细	
100V级	200V级	400V级、500V级	铜	铝
到5kVA为止	到10kVA为止	到20kVA为止	2.6mm以上	3.2mm以上
到10kVA为止	到20kVA为止	到40kVA为止	3.2mm以上	14mm ² 以上
到20kVA为止	到40kVA为止	到75kVA为止	14mm ² 以上	22mm ² 以上
到40kVA为止	到75kVA为止	到150kVA为止	22mm ² 以上	38mm ² 以上
到60kVA为止	到125kVA为止	到250kVA为止	38mm ² 以上	60mm ² 以上
到75kVA为止	到150kVA为止	到300kVA为止	50mm ² 以上	80mm ² 以上
到100kVA为止	到200kVA为止	到400kVA为止	60mm ² 以上	100mm ² 以上
到125kVA为止	到250kVA为止	到500kVA为止	80mm ² 以上	125mm ² 以上

注：所谓“相对于1相变压器的容量总和”是指被1个断路器保护的变压器组的一相部分的最大容量总和。

表11-27

第三类或特别第三类接地工程的接地线粗细

接地的机械设备金属制成的外壳、配管等在低压电路电源侧装设过流保护装置当中最小的额定电流的容量	接地线的粗细				
	一般情况		使用移动的机械设备中，施行接地时，必须用挠性的部分，使用软线或汽车轮胎被覆绝缘电缆时		
	铜	铝	单芯时的粗细	使用双芯接地线时单芯的粗细	
20A以下	1.6mm以上	2mm ² 以上	2.6mm以上	1.25mm ² 以上	0.75mm ² 以上
30A以下	1.6mm以上	2mm ² 以上	2.6mm以上	2mm ² 以上	1.25mm ² 以上
50A以下	2.0mm以上	3.5mm ² 以上	2.6mm以上	3.5mm ² 以上	2mm ² 以上
100A以下	2.6mm以上	5.5mm ² 以上	3.2mm以上	5.5mm ² 以上	3.5mm ² 以上
200A以下		14mm ² 以上	22mm以上	14mm ² 以上	5.5mm ² 以上
300A以下		22mm ² 以上	38mm以上	22mm ² 以上	14mm ² 以上
600A以下		38mm ² 以上	60mm以上	38mm ² 以上	22mm ² 以上
800A以下		50mm ² 以上	80mm以上	50mm ² 以上	30mm ² 以上
1000A以下		60mm ² 以上	100mm以上	60mm ² 以上	30mm ² 以上
1200A以下		80mm ² 以上	125mm以上	80mm ² 以上	38mm ² 以上

注：此表的过电流保护是指设施干线用或分支线用的进线口装置（包括兼作过电流保护装置的开关），不包括象电动机的过负荷保护装置的电磁开关。

（3）接地极 作为埋入或打入在地下的接地极，一般采用铜板、铜棒、铁管、铁棒、镀锌钢板、覆炭钢棒等，尽可能选择在潮湿的地方，而且不怕气体、酸之类的腐蚀，敷设在地下时，必须打入。

11-4-2 配线工程

（1）配线工程的种类 配线工程的种类很多，设施低压室内配线，除在特殊场所以外，均列在表11-28、表11-29中。设施场所，归根到底一定要根据工程的使用来区分。

（2）绝缘子的引线 把绝缘电线支撑在绝缘子上，是安装在建筑材料上的配线方法。这个配线按照它的设施场所不同，用如下的配线方法。而且，设施一定不要让人容易接触（使用电压超过300V时，注意不要让人接触到）。

① 室内的外露场所的绝缘子引线；

② 需要检查的隐蔽场所设施的绝缘子引线；

③ 装设在房屋附近和300V以下室外的绝缘子引线（限于露天场所和需要检查的隐蔽

表11-28 设施场所和配线方法 (300V 以下)

配 线 方 法	能 否 设 施									
	室 内						房屋附近			
	外 露 场 所		隐 蔽 场 所				的 室 外			
	干 燥 场 所	湿 气 大 的 场 所 或 有 水 的 蒸 汽 的 场 所	干 燥 场 所	湿 气 大 的 场 所 或 有 水 的 蒸 汽 的 场 所	干 燥 场 所	湿 气 大 的 场 所 或 有 水 的 蒸 汽 的 场 所	雨 线 内	雨 线 外		
绝缘子引线的配线	○	○	○	○	×	×	④	④		
金属管配线	○	○	○	○	○	○	○	○		
合成树脂管配线	○	○	○	○	○	○	○	○		
挠性管配线	1 类 挠 性 管	○	×	○	×	×	×	×		
		2 类 挠 性 管	○	○	○	○	○	○	○	
金属槽板配线	○		×	○	×	×	×	×		
合成树脂槽板配线	○	×	○	×	×	×	×			
地面导管配线	—	×	—	×	①	×	—	—		
金属导管配线	○	×	○	×	×	×	×	×		
照明导管配线	○	×	○	×	×	×	×	×		
母线管路配线	○	×	○	×	×	×	③	③		
汽车轮胎被覆绝缘电缆配线	2 类	乙烯树脂汽车轮胎被覆绝缘电缆	○	○	○	○	×	×	②	②
		氯丁二烯汽车轮胎被覆绝缘电缆	○	○	○	○	×	×	②	②
			橡胶汽车轮胎被覆绝缘电缆	○	○	○	○	×	×	×
		3 类	氯丁二烯汽车轮胎被覆绝缘电缆	○	○	○	○	○	○	○
橡胶汽车轮胎被覆绝缘电缆	○		○	○	○	○	○	×	×	
除汽车轮胎被覆绝缘电缆以外的电缆配线	○	○	○	○	○	○	○	○		

注：符号的含义如下：

- (1) ④限于露天场所及需要检查的隐蔽场所可以装设。
- (2) ②限于混凝土地面。
- (3) ③限于使用室外用的导管的情况下（除不能检查的隐蔽场所外），可以装设。

场所)；

④ 敷设在房屋附近和 300V 以上的绝缘子引线（限于露天场所）。

绝缘子引线，以前在各种木结构建筑物上施工用，而现在将使用其它配线方法。

(3) 金属管配线 将绝缘电线穿入金属管内的配线方法，是可以作为工程施工的方法，几乎不受设施场所的限制。

(1) 电线 在金属管配线中，使用的绝缘电线，若为绞线，其直径应超过 3.2mm (对铝线则为 4.0mm)。

(2) 电线管 作为电线管用的金属管，有厚钢电线管，薄钢电线管，螺旋软电线管和铝电线管等（表11-30）。将管敷设在混凝土内的金属管工程，使用管的厚度要在 1.2mm 以上，在日本墙壁和木结构墙壁等的暗配工程，可以使用厚度在 1mm 以上的金属管。但是，在接头内的长度为 4 米以下的干燥外露场所装设时，管厚不妨在 0.5mm 以上。

(3) 管的粗细选择 必须根据使用电线的粗细和根数来选择金属管所需要的粗细。

这就是在表 11-31~表 11-34 中表示的。

并且，管的长度在 6 米以下，中间不是非常弯曲，易于更换时，可以不管前表如何，而

表11-29

装置场所和配线方法 (超过300V)

配线方法	能否设施							
	室内						房屋附近	
	外露场所		隐蔽场所				的室外	
	干燥场所	湿气大的场所或有水或蒸汽的场所	干燥场所	湿气大的场所或有水或蒸汽的场所	干燥场所	湿气大的场所或有水或蒸汽的场所		
绝缘子引线配线	○	○	○	○	×	×	Ⓐ	Ⓐ
金属管配线	○	○	○	○	○	○	○	○
合成树脂管配线	○	○	○	○	○	○	○	○
挠性管配线	1类挠性管	ⓑ	×	ⓑ	×	×	×	×
	2类挠性管	○	○	○	○	○	○	○
金属导管配线	○	×	○	×	×	×	×	×
母线管路配线	○	×	○	×	×	×	×	×
汽车轮胎被覆绝缘电缆配线	乙烯树脂汽车轮胎被覆绝缘电缆	×	×	×	×	×	×	×
	2类	氯丁二烯汽车轮胎被覆绝缘电缆	×	×	×	×	×	×
		橡胶汽车轮胎被覆绝缘电缆	×	×	×	×	×	×
	3类	氯丁二烯汽车轮胎被覆绝缘电缆	○	○	○	○	○	○
橡胶汽车轮胎被覆绝缘电缆		○	○	○	○	○	×	
除汽车轮胎被覆绝缘电缆以外的电缆	○	○	○	○	○	○	○	

备注：符号的意义如下：

(1) Ⓐ限于露天场所，能装设。

(2) ⓑ在连接电动机的短小部分，限于需要挠性部分的配线，能装设。

表11-30

电线管的尺寸

(单位: mm)

种类	粗细 (管的名义称呼)	外径	厚度	备注	种类	粗细 (管的名义称呼)	外径	厚度	备注
厚钢电线管	16	21.0	2.3	名义称呼用内径的偶数表示	螺旋形软电线管	E15	15.9	1.0	名义称呼用外径加E表示
	22	26.5	2.3			E19	19.1	1.2	
	28	33.3	2.5			E25	25.4	1.2	
	36	41.9	2.5			E31	31.8	1.4	
	42	47.8	2.5			E39	38.1	1.4	
	54	59.6	2.8			E51	50.8	1.4	
	70	75.2	2.8			E63	63.5	1.6	
	82	87.9	2.8			E75	76.2	1.8	
	92	100.7	3.5						
104	113.4	3.5							
薄钢电线管	15	15.9	1.2	名义称呼用外径的奇数表示	铝电线管	19	19.1	2.0	名义称呼用外径表示
	19	19.1	1.6			25	25.4	2.0	
	25	25.4	1.6			31	31.8	2.0	
	31	31.8	1.6			39	38.1	2.0	
	39	38.1	1.6			51	50.8	2.0	
	51	50.8	1.6			63	63.5	2.5	
	63	63.5	2.0			75	76.2	2.5	
75	76.2	2.0							

表11-31

厚钢电线管粗细的选择

电 线 粗 细		电 线 根 数									
单 线 (mm)	绞 线 (mm ²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		电线管的最小尺寸(mm)									
1.6		16	16	16	16	22	22	22	28	28	28
2.0		16	16	16	22	22	22	28	28	28	28
2.6	5.5	16	16	22	22	28	28	28	36	36	36
3.2	8	16	22	22	28	28	36	36	36	36	42
	14	16	22	28	28	36	36	36	42	42	54
	22	16	28	28	36	42	42	54	54	54	54
	30	16	36	36	36	42	54	54	54	70	70
	38	22	36	36	42	54	54	54	70	70	70
	50	22	36	42	54	54	70	70	70	70	82
	60	22	42	42	54	70	70	70	70	82	82
	80	28	42	54	54	70	70	82	82	82	92
	100	28	54	54	70	70	82	82	92	92	104
	125	36	54	70	70	82	82	92	104	104	
	150	36	70	70	82	82	92	104	104		
	200	36	70	70	82	92	104				
	250	42	82	82	92	104					
	325	54	82	92	104						
	400	54	92	92							
	500	54	104	104							

注：1.是相对于1根电线的数据，适用于接地线及直流回路的电线。
2.本表是根据实验结果和经验来决定的。

表11-32

薄钢电线管粗细的选择

电 线 粗 细		电 线 根 数									
单 线 (mm)	绞 线 (mm ²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		电线管的最小尺寸(mm)									
1.6		15	15	15	25	25	25	25	31	31	31
2.0		15	19	19	25	25	25	31	31	31	31
2.6	5.5	15	25	25	25	31	31	31	31	39	39
3.2	8	15	25	25	31	31	39	39	39	51	51
	14	15	25	31	31	39	39	51	51	51	51
	22	19	31	31	39	51	51	51	51	63	63
	30	19	39	39	51	51	51	63	63	63	63
	38	25	39	39	51	51	63	63	63	63	75
	50	25	51	51	51	63	63	75	75	75	75
	60	25	51	51	63	63	75	75	75		
	80	31	51	51	63	75	75	75			
	100	31	63	63	75	75					
	125	39	63	63	75						
	150	39	63	75	75						
	200	51	75	75							
	250	51	75								
	325	51									
	400	51									
	500	63									

注：1.是相对于1根电线的数据，适用于接地线及直流回路的电线。
2.本表是根据实验结果和经验来决定的。

表11-33

螺旋软电线管的粗细选择

电 线 粗 细		电 线 根 数									
单 线 (mm)	绞 线 (mm ²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		电线管的最小尺寸 (mm)									
1.6	5.5	E15	E15	E15	E19	E25	E25	E25	E25	E31	E31
2.0		E15	E15	E19	E25	E25	E25	E25	E31	E31	E31
2.6		E15	E19	E25	E25	E25	E31	E31	E31	E39	E39
3.2		E15	E25	E25	E31	E31	E31	E39	E39	E39	E51
	14	E15	E25	E25	E31	E39	E39	E51	E51	E51	E51
	22	E19	E31	E31	E39	E51	E51	E51	E51	E63	E63
	30	E19	E31	E39	E51	E51	E51	E63	E63	E63	E63
	38	E25	E39	E39	E51	E51	E63	E63	E63	E63	E75
	50	E25	E51	E51	E51	E63	E63	E63	E75	E75	E75
	60	E25	E51	E51	E63	E63	E63	E75	E75		
	80	E31	E51	E51	E63	E63	E75				
	100	E31	E63	E63	E75	E75					
	125	E31	E63	E63	E75						
	150	E39	E63	E63	E75						
	200	E51	E75	E75							
	250	E51	E75								
	325	E51									
	400	E51									
	500	E63									

备注: 1.是相对于1根电线的数据,适用于接地线及直流回路的电线。
2.本表是根据实验结果和经验来决定的。

表11-34

铝电线管的粗细选择

电 线 粗 细		电 线 根 数									
单 线 (mm)	绞 线 (mm ²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		电线管的最小尺寸 (mm)									
2	5.5	19	19	19	25	25	25	31	31	31	31
2.6		19	25	25	25	31	31	39	39	39	39
3.2		19	25	25	31	31	39	39	39	51	51
	14	19	25	31	31	39	39	51	51	51	51
	22	19	31	39	51	51	51	51	63	63	63
	30	25	39	39	51	51	51	63	63	63	63
	38	25	39	39	51	51	63	63	63	75	75
	50	25	51	51	51	63	63	75	75	75	
	60	25	51	51	63	63	75	75	75		
	80	31	51	51	63	75	75	75			
	100	39	63	63	75						
	125	39	63	63	75						
	150	39	63	75							
	200	51	75	75							
	250	51									
	325	51									
	400	63									
	500	63									

备注: 1.是相对于1根电线的数据,适用于接地线及直流回路的电线。

2.本表是根据实验结果和经验来决定的。

3.铝电线管,在普通的混凝土构造时,虽然不要特殊的保护,但在混凝土中含有盐类时,应涂上沥青涂料,但是不能进行半埋设工程。

用表 11-35。

前表是以包括绝缘层在内的截面积乘以电线的根数值，在管内径为 40% 以下那样计算的。

将不同粗细的电线，穿入同一管内的钢管粗细，由表 11-36~11-39 查出时，必须以电线的被覆绝缘层包括在内的截面积的总和，在管内径为 40% 以下那样来选择。

表11-35 管长在 6 米以下，中间不是非常弯曲易于更换电线时的最大电线根数 (IV 电线)

电 线 粗 细		厚 钢 电 线 管		薄 钢 电 线 管		
单 线 (mm)	绞 线 (mm ²)	16	22	15	19	25
1.6		9	15	6	9	15
2.0		6	11	4	6	11
2.6	5.5	4	7	3	4	7
3.2	8	2	4	1	2	4

表11-36 电线 (包括被覆绝缘层) 的截面积

电 线 粗 细		截 面 积 (mm ²)	电 线 粗 细		截 面 积 (mm ²)
单 线 (mm)	绞 线 (mm ²)		单 线 (mm)	绞 线 (mm ²)	
1.6		20		60	186
2.0		23		80	224
2.6	5.5	32		100	302
3.2	8	43		125	350
				150	405
	14	58		200	531
	22	88		250	647
	30	104		325	774
	38	121		400	913
	50	163		500	1134

注：此表是表示RB电线的截面积，而对DV电线，IV电线时此表也适用（这里IV电线的滑动性比RB电线差）

表11-37 厚钢电线管的内截面积的40%和60%

电线管的粗细 (mm)	内截面积的40% (mm ²)	内截面积的60% (mm ²)	电线管的粗细 (mm)	内截面积的40% (mm ²)	内截面积的60% (mm ²)
16	81	126	54	919	1373
22	150	225	70	1520	2281
28	251	376	82	2126	3190
36	427	640	92	2756	4135
42	574	862	104	3554	5331

注：内截面积60%的一栏，适用于表11-35中的14mm²以上时。

表11-38 薄钢电线管的内截面积的40%和60%

电线管的粗细 (mm)	内截面积的40% (mm ²)	内截面积的60% (mm ²)	电线管的粗细 (mm)	内截面积的40% (mm ²)	内截面积的60% (mm ²)
15	57	85	39	382	573
19	79	118	51	711	1066
25	154	231	63	1116	1667
31	256	385	75	1636	2455

注：内截面积60%的一栏，适用于表11-35中的14mm²以上时。

表11-39 螺旋软电线管的内截面积的40%及60%

电线管的粗细 (mm)	内截面积的40% (mm ²)	内截面积的60% (mm ²)	电线管的粗细 (mm)	内截面积的40% (mm ²)	内截面积的60% (mm ²)
E 15	60	90	E 39	391	586
E 19	87	130	E 51	723	1084
E 25	166	249	E 63	1141	1712
E 31	264	396	E 75	1654	2482

作为表 11-36~11-39 的应用, 举例如下。

【例】: 求能把 2mm 4 根和 8mm² 3 根穿入的电线管的粗细。

$$2\text{mm} \ 4 \text{根} \cdots \cdots 23\text{mm}^2 \times 4 = 92\text{mm}^2$$

$$8\text{mm}^2 \ 3 \text{根} \cdots \cdots 43\text{mm}^2 \times 3 = 129\text{mm}^2$$

$$\text{合计} \quad \quad \quad 221\text{mm}^2$$

应用这些表, 可以求出在内截面积为 40% 的情况下, 厚钢管为 28, 薄钢管为 31, 螺旋软电线管为 31。

(4) 挠性管配线 这种配线使用的电线管, 有一类挠性管和二类挠性管。在技术基准第 196 条中提到, 在工程中使用的是二类挠性管。但是, 可以用一类挠性管施工的是限制在展开的场所或通向检查的隐蔽场所, 干燥的场所。室内配线使用电压超过 300 V 时, 与电动机连接部分必须使用可挠性部分。二类挠性管商品名叫做普列卡管。有三层可挠性外波的管, 具有如下特长:

- ① 同一类挠性管一样, 有可挠性, 并且弄弯的地方, 可以保持原样。
- ② 具有气密性, 富有耐热、耐温、耐振性, 机械强度也高, 耐药品性能也好。
- ③ 和一类挠性管同样, 有很长的尺寸, 容易切断和加工。
- ④ 管子用手工弯曲, 因为尺寸很长, 所以没有必要做接头。

虽然有以上令人满意的特长, 还要为了在现场作业方便, 也有必要谋求利用率的提高, 因此也就要考虑以下不足之处。

- ① 二类挠性管比金属管价格高。
- ② 附件价格高。
- ③ 二类挠性管是用细金属网制成, 多少有点吸湿性。因为是用混凝土浆注入而把细金属网粘合住的。
- ④ 有挠性, 所以对穿导线来说比金属管摩擦要大。

(5) 金属导管配线 金属导管配线, 多用于从主配变电室出来的干线配线部分, 并且规格不统一。电线导管, 或小截面者被叫做带电线, 由厂家规格化后出售。凡是幅度超过 5cm 的, 铁板厚度在 1.2mm 以上的叫做金属导管。因为导管的尺寸没有规格, 往往对照建筑图在现场制作。另外, 应注意与空调和卫生设备的导管和配管在现场的配合。

导管内的配线, 和金属管同样要考虑电磁的平衡, 而电线的根数, 包括它的绝缘层在内的截面积的总和, 必须限制在导管截面积的 20% 以下。

将弱电流电线和高压电缆及低压配线穿入同一导管内时, 如在导管内设有可靠的隔离层, 则此导管必须按特别第三种接地工程施工。

(6) 合成树脂管配线 合成树脂管配线, 大多用来代替原有的金属管配线, 有如下特

- 点:
- ① 电气绝缘性能和耐电压相当好。
 - ② 具有卓越的耐腐蚀性和耐药性。
 - ③ 由于重量轻,所以作业性能好。
 - ④ 由于加工容易,所以工程费用低。
 - ⑤ 强度比金属管稍差,在施工时要注意。
 - ⑥ 热膨胀系数大,在施工时应注意。
 - ⑦ 比金属管的容许电流稍小。
 - ⑧ 由于是非磁性体,就不要象金属管那样把一个回路放在同一配管内。
- 合成树脂管的规格和管径粗细的选择,在表 11-40 和表 11-41 中表示。

表11-40 合成树脂管的规格和尺寸

粗细(管的名义称呼)	外 径	厚 度	粗细(管的名义称呼)	外 径	厚 度
14	18	2.0	42	48	4.0
16	22	2.0	54	60	4.5
22	26	2.0	70	76	4.5
28	34	3.0	82	89	5.9
36	42	3.5			

注:名义称呼表示内径。

表11-41 合成树脂管的粗细的选择

电 线 粗 细		电 线 根 数									
单 线 (mm)	绞 线 (mm ²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		合成树脂管的最小尺寸 (mm)									
1.6		14	14	14	16	16	22	22	28	28	28
2.0		14	14	16	16	22	22	28	28	28	28
2.6	5.5	14	16	16	22	28	28	28	36	36	36
3.2	8	14	22	22	28	28	36	36	36	42	42
	14	14	22	28	28	36	36	42	42	42	54
	22	16	28	36	36	42	42	54	54	54	70
	30	16	36	36	42	42	54	54	54	70	70
	38	16	36	36	42	54	54	54	70	70	70
	50	22	42	42	54	54	70	70	70	82	82
	60	22	42	54	54	70	70	70	82	82	82
	80	28	54	54	70	70	70	82	82		
	100	28	54	70	70	82	82				
	125	36	70	70	70	82					
	150	36	70	70	82						
	200	42	70	82	82						
	250	42	82	82							
	325	54									
	400	54									
	500	70									

(7) 金属槽板配线 这种金属槽板配线,把绝缘电线放置在金属槽板内,主要在进行

明配线时用。如从已经设置的电灯位置上增设开关的引下线等，或使用于混凝土建筑改变外观的场所。

(8) **母线管路配线** 随着近代建筑设备的高级化，电气的使用量增大，因而干线的容量也变大，电缆和母线管路的使用也增加。

(a) 母线管路的种类 使用的导体是铜或铝，有如下种类 (表 11-42)：

表11-42

母线管路的种类

名称	型式		备注
供电母线管路	室内用	通风型 非通风型	在中途不能连接负荷
	室外用	非通风型	
插入式母线管路	室内用	非通风型	在中途装设与负荷连接用的压入式插头
滑接式母线管路	室内用 室外用		在中途可以连接移动负荷，如触轮用的接触式构造

(1) 供电母线管路 在变压器和低压配电盘，以及配电盘相互之间的分支内干线等处使用。额定电流大约从 200 A 到 5000 A 的范围。

(2) 插入式母线管路 每隔一定的间隔，由插头构造可以把电源在中途分支，主要使用在工厂的电动机干线上。

(3) 滑接式母线管路 把内导体作为滑触线使用，集电子与导体接触，作为移动电源使用。

除此以外，还有绝缘母线管路和低阻抗管路。

(b) 接地 使用电压为 300 V 以下时的母线管路的接地工程为第三类接地，而在 300 V 以上时，为特别第三类接地工程接地。但不怕人接触的设施，可以用第三类接地工程。

(9) **地面导管配线** 在近代建筑中大多采用幕墙施工法，在隔墙方面也多采用称做轻质隔墙的简易隔墙。为了建造特别高层的办公大楼，就要在墙面装设万能插座和电话插座，在地板底下敷设地板导管，用这种配线方式，就可以在任意的位置引出。

(a) 电线 在地板导管配线中，使用的绝缘电线，是直径超过 3.2 毫米 (铝线为 4.0 毫米) 的绞线。而且电线的连接必须在接线盒内进行。

将绝缘导线穿入同一地板导管时，包括电线的绝缘层在内的总面积，应为地板导管内截面积的 40% 以下。

(b) 接地 地板导管，作为第三类接地工程接地。如果把强电回路的电线和弱电回路的电线穿入在同一地板导管内和接线盒内时，应该采用特别第三类接地工程接地。

(10) **合成树脂槽板** 主要用于建筑物的增设配线中，为了现场的方便，在新的建筑物中也有使用的。合成树脂槽板最好使用以聚氯乙烯为主要材料的。

(a) 电线 在合成树脂槽板内，使用绝缘电线。在槽板中间的电线不能设置连接点。但是，在使用接线盒时，不受其限制。

(b) 合成树脂槽板的选择 合成树脂槽板的沟宽和深，是在 3.5 厘米以下，并且厚度必须在 1.2 毫米以上。但是，设置在人不容易触及的情况时，宽度也可以在 5 厘米以下。

(11) **照明管路配线** 照明管路通过插销向照明器和小型电气设备供给电源，插销能在管路的任意地方转移。这种配线大多数在百货商店和商店等处使用。

表11-43 照明管路的种类及额定值

种	类	额定电流 (A)	额定电压 (V)
照明管路	固定型	15, 20, 30	125, 300(250)
	滑触型	15, 20	125, 300(250)
插头	固定型	6(5), 10, 15, 20, 30	125, 300(250)
	滑触型	6(5), 10, 15, 20	125, 300(250)

(a) 额定值 照明管路和附属装置的额定值见表 11-43。

(b) 接地 在照明管路中施行第三类接地工程。但是，对地电压在 150 V 以下，而且当管路的长度在 4 米以下时，可以将接地装置省略。

(12) 电缆配线 电缆配线，只要不受外伤，无论什么样的地方都能施工。使用电缆进行室内低压配线，应按下面各项施工。

(1) 在有重物的压力或怕受明显机械冲击的场所安设电缆，应适当设置防护装置。

(2) 把电缆安装在建筑材料上，电缆的支撑点之间的距离为 2 米(不怕人触及的场所，垂直安装时为 6 米)以下，用汽车轮胎电缆时为 1 米以下。在安装时不要损坏它的绝缘层。

(3) 使用电压 300 V 以下，管及其穿入的电缆的保护装置的金属制品部分，采用第三类接地工程。使用电压超过 300 V，保护装置的金属部分，采用特别第三类接地工程。但是，设施不怕人触及时，可以使用第三类接地工程。

(a) 乙烯树脂外皮、氯丁二烯外皮或聚乙烯外皮电缆的配线 这些电缆，不能直接敷设在地板、墙壁、顶棚、柱子等处。可是，如果把电缆穿入非常粗大的金属管、煤气铁管或合成树脂管内时，则可以埋进木结构房屋的露柱墙中，和设施在隐柱墙的空洞部分，顶棚夹层等处。但是，因为怕钉钉子，故在电缆上面使用厚为 1.2 毫米以上的镀锌钢板保护。

(b) 混凝土直接埋入电缆 由以前把电缆直接敷设在混凝土中而发展成一种新的电缆及其施工法，并且，在昭和 51 年 8 月修正的技术基准中被采纳了。在电缆表面上使用印刷符号：CB-VV, CB-VV-E, CB-VVF, CB-VVF-E, CB-EV, CB-EV-E, CB-EVF 或 CB-EVF-E 来表示。使用这种电缆能得到方便。

(c) 汽车轮胎电缆配线 这和其它电缆没有什么不同，考虑采用软线包皮，因而具有丰富的可烧性。使用这种电缆配线，必须根据表 11-28 和表 11-29 来使用。

(d) MI 电缆配线 导体相互之间，或与铜管之间，填充绝缘性粉末状的氧化镁等无机物，并将它压延成形。这种电缆是由无机物做成，耐热性特别好。

11-4-3 配线器具

在照明设备中关系密切的主要有下列几种类型。

(1) 室内使用的小型开关 有一类是照明和家庭用的小型电气设备开关。在交流 300 V 以下，额定电流 30 A 以下者，表示在表 11-44 中。

(2) 遥控配线 使用于交流 300 V 以下电缆的电灯点灭等，也可以用作遥控。在遥控继电器的开关接点为交流 24 V，而开关的操作线有

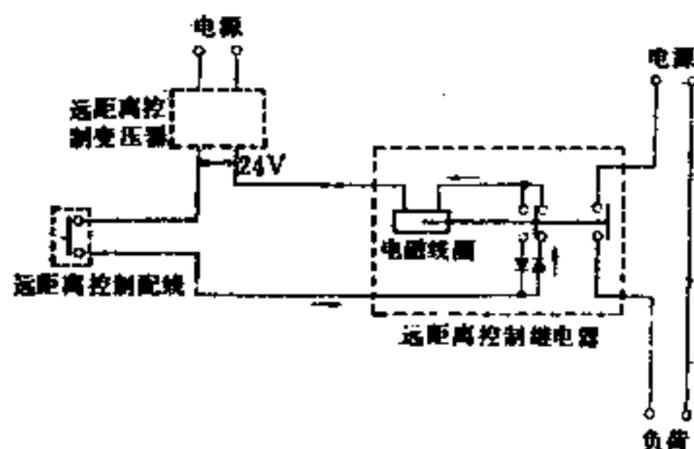


图11-27 遥控继电器和遥控开关的动作

表11-44

室内使用的小型开关

种 类		类 别		额 定 电 流 (A)	额 定 电 压 (V)
类 别	级 别	极 数			
倒顺开关	A	1		0.5, 1, 3, 6, 10, 15, 20, 30	125
旋转开关		2			
压扭开关					
拉线开关, 顶棚开关	B	2		0.5, 1, 3, 6, 10, 15	250
代码开关, 吊灯开关					
门开关		1			

用三线制, 也有用二线制的。将二线制组成的回路表示在图 11-27 中。

(3) 卡口接线器 使用在交流 250 V 以下的电路中, 包括多插头插座和卡口插头等 (表 11-45)

(4) 自动点灭器 有应用光电池对外来光线反应以进行电灯开关的型式和给定时间的电钟型式。

表11-45 卡口接线器的种类和额定值

种 类 名 称	类 别	极 数	极 配 置 ¹⁾	额 定 值	
				额 定 电 流 (A)	额 定 电 压 (V)
卡口插头 多插头插座 挠性接线器底盘	普通型·防雨型·防浸型	2		15A	125V
				15A	250V
				20A	250V
				30A 250V 50A 250V	
		2 (接地型)		15A	125V
				15A	250V
				20A	125V
				20A	250V
		3		15A	250V
				20A	250V
				30A	250V
				50A	250V
		4		15A	250V
				20A	250V
				30A	250V
				50A	250V
挂勾型卡口插头 挂勾型多插头插座 挂勾型接线器底盘	普通型·防雨型	2		15A 125V-10A 250V (两种规格) 20A 250V	
		3		15A 125V-10A 250V (两种规格) 20A 250V	
		4		20A 250V	
多插头插座	普通型	2		10A 125V	

1) 为不规定防浸型的极配置。
2) 在使用上没有必要加上极性或因构造上的困难, 可以不附加极性。
注: 1. 极数是表示以经常通电为目的的闸刀和刀座的极数 (不包括接地极)。
2. 极配置表示刀座孔的配置。

11-5 维护和管理

11-5-1 维护和管理

照明设备的维护，对防止照明设备的性能下降和保证安全是很重要的。

维护如图 11-28 所示，一定要有检查计划，查明故障原因，并必须进行修补、修理。并将这些维修工作的记录保留下来，有效地利用统计资料，就能得到对设施本身的寿命评价，适当修正维护间隔，实行有计划地供应维修零件，在发生故障之前，能作适当的处理，这些都是管理所希望的。

11-5-2 一般维护管理

在照明设施中，应有维护管理人员和保证必要的维护管理经费，掌握照明设备的现状，建立维修计划，组织好管理。

起草维护计划时，把如下项目作为检查要点（项目的选择和追加照明设施的规模也应适当）。

- (1) 维护管理人员（分派的职务，资格）
- (2) 维护管理经费（分别开列项目）
- (3) 维护管理组织（内部和外部的关系、联络人的电话等）
- (4) 有关的法律规定（收集、保管）
- (5) 设备配置图（建筑图、设备配置图、配线图、危险场所、特殊场所的明确区分）。
- (6) 设备总帐（设备名称、台数、主要规格、选择的经过、设置年月日、价格、制造者、保修联络者）。
- (7) 教育训练（知识、技能、安全知识等内容和教育体制等）。
- (8) 检查标准（检查设备的选定、检查项目、检查的方法、检查时间、鉴定标准等）。
- (9) 检查卡片（设备名称、设置场所、设置年月日、检查年月日、检查者、检查项目、鉴定、处理、测定仪器、负责维修者、形式等）。
- (10) 修补和修理（使用说明书、分解组装方法、试验方法、构造、配线图、制造者、保修联络者等）。
- (11) 各种报告（报告一览表、报告者、报告日期、报告内容和形式、法规之间的关系等）。
- (12) 维修零件（零件名称、适用设备的名称、保管数、更换时间、价格、制造者、购买者、保管场所、负责保管者、供应标准等）。
- (13) 维修器材（器材名称、台数、主要规格、价格、制造者、保修联络者、购买年月日、操作方法、负责操作者）。
- (14) 维修计划书的重新评价，标准等的修改。
- (15) 其它。

11-5-3 一般维修工作

检查分为日常检查、定期检查、临时检查等，检查的内容和间隔应根据各种照明设施的

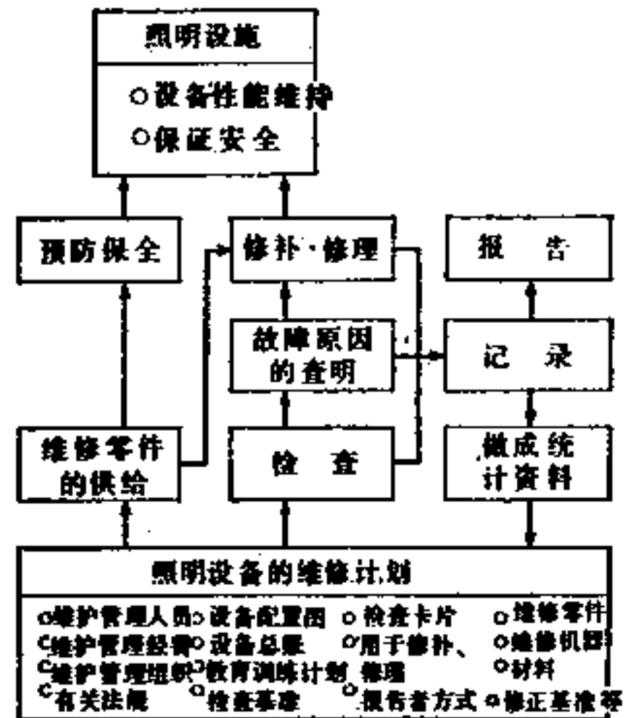


图11-28 照明设备的维护制度

法规和设备的种类、设置场所（环境条件）、设备的重要程度等来确定。应把照明装置、照明设备、检查的种类，作成检查卡片，预先进行记录和保存，以防遗漏。

检查发现异常时，要查明异常原因。为了判断良好与否，要预先建立起判断基准，这样对事后采取符合法律的行动对策和提高检查效率等都是重要的。

查明原因后，进行修补、修理，这时候要进行机器的分解、组装，设备试验等作业，这时提供机器的构造、配线图、使用说明书、试验成果书、制造者、联络者等是有用的，因此，这些有关资料的整理和保管是很重要的。对维修人员必须注意实施经常性的教育训练。使对设备机器、测定仪器、维护器材等有关的知识、技能、经验和安全知识不断提高。

11-5-4 照明计划与设计时的注意点

为了适当地进行维护，应该确保容易而安全地靠近照明设备的空间。在装有照明器的场所，通常必须特殊考虑的问题有：

- (1) 立起支架，使手能够达到照明器。
- (2) 支撑梯子要十分半靠。
- (3) 进出塔吊时，要有充分的通路和空间。
- (4) 吊车的升降，要使手容易达到操作位置。
- (5) 在建筑物上应留有维修用的通道。
- (6) 尽可能使照明设施、生产设备等在不停止运行的情况下进行维修。

在选择照明器时，从维修方面来考虑，希望尽量使用标准件。其理由是灯罩、插座，镇流器等有受损坏或发生故障的危险时，容易得到零件。维修照明器的灯罩、插座等要容易移动拆装。当选用标准件后，还能容易更换电灯和清扫。在进行这些作业时，可以不用工具来进行。高空作业的安全性希望能特别考虑，不要使松弛螺丝之类落下。

11-5-5 维护系数

照明计算中使用的维护系数为

$$M = \frac{E}{E_0}$$

式中 E 为设计照度 (lx)；

E_0 为初始照度 (lx)。

由于在点灯过程中光通量下降、在使用时照明器和灯由于污染而致实际效率下降以及由于室内装修材料污染而使反射率下降等的比率不同，维护系数会有不同的数值。即

$$M = M_1 \times M_2 \times M_3$$

式中 M_1 ——由于灯的老化部分的维护系数；

M_2 ——由于灯和照明器的污染部分的维护系数；

M_3 ——由于室内表面污染部分的维护系数。

维护系数随着灯的更换、照明器和灯的清扫间隔等维护程度而有变化。维护是由环境条件、照明器的形状、构造及灯的种类而产生的作用程度等很多变量构成的，因此在确定维护系数时，多数情况是从已运行的同类照明设施的实际效果来推算。但在积极进行维护的情况下，维护系数会有大的数值，初始设备费和电力费便宜，而维护费要高，希望在照明计算时将两者均衡考虑。

11-5-6 灯的光通量维护系数

点灯后，随着时间的推移，光通量逐渐缓慢降低。一般以点灯 100 小时的光通量为基准，与经过一定时间以后的光通量之比，称做这时的光通量维护系数 $f(t)$ 。

$$f(t) = \frac{F(t)}{F(100)} \times 100$$

式中 $F(t)$ 为点灯 t 小时灯的光通量 (lm)， $F(100)$ 为点灯 100 小时灯的光通量 (lm)。

将光通量维护系数与点灯时间的关系在座标图上表示出来，称做灯的运行曲线 (图 11-29)。

光通量维护系数越高，经过时间的变化越小，初期设备费和电力费就越少。

11-5-7 保存率

点灯后，随着时间的推移，灯就逐个不亮。这时以开始时的灯数为基准，与经过一定时间后还保留点亮的灯数之比，称做这时的保存率 $n(t)$ 。

$$n(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \times 100$$

式中 $N(t)$ 为点灯 t 时间后保存灯数； $N(0)$ 为初期点灯时的灯数。

将点灯时间与保存率之间的关系在坐标图上表示出来，称做保存率曲线 (图 11-30)。

保存率曲线对于确定灯的更换时间和维修灯的供应计划提供出有效情报。

11-5-8 换灯方式

在换灯方式中有个别更换、个别集团更换和集团更换等三种。对这些方式作以下说明。

个别更换方式就是在点灯时如果有灯不亮，即直接进行换灯的方式。这是换灯方式中最经济的方式。在特定周期内更换次数多而规模小的照明设施和点灯时间短的照明设施中，这种方式适用。

个别集团更换方式就是点灯初期不亮的灯随时予以更换 (个别更换方式)；在适当时期当不亮的灯数开始显示出增加的倾向时，则将新灯旧灯全部更换 (集团更换方式)。最普通的灯的更换方式是在一般场所使用荧光灯，其集团更换期约为三年一次，前后上下半年对经济的影响不大，可将年末或期末按习惯加在一起计算。

集团更换方式就是不亮灯数在达到维修期间(时间)或达到预定不亮灯数以前并不进行灯的更换，待达到维修时间时全部进行更换的方式。这种方式适用于难于更换灯的场所和新旧灯混在一起使美观成为问题的场所，一般费用要增高。在使用荧光灯的一般场所，每隔二年作为集团更换期。这时不亮的灯约有3%。在维修末期三个月内有3%的灯不亮，这在美观上是不允许的，这时如果大约隔一年半进行集团更换，在统计时就不存在着不亮的灯。

11-5-9 光源的维护

对于一般照明设施中常用的光源，为了使用安全而要求的禁止和注意事项，归纳起来表

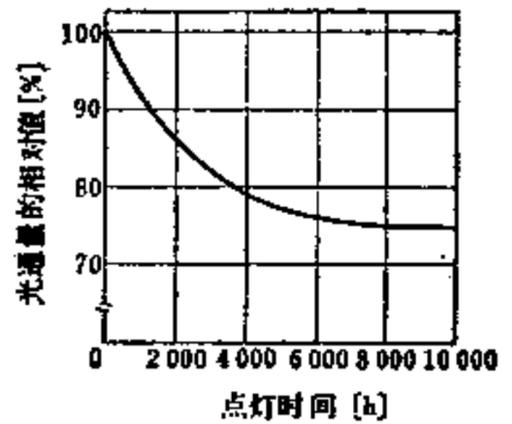


图11-29 荧光灯的运行曲线举例

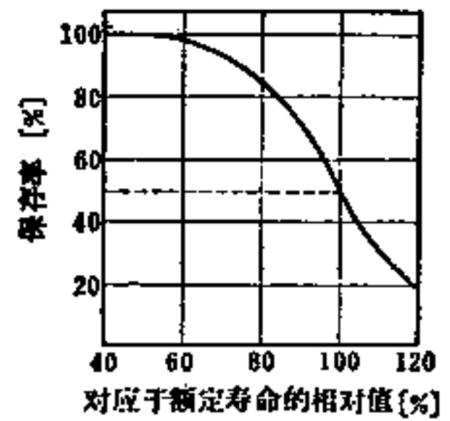


图11-30 荧光灯的保存率曲线举例

示在表 11-46 中。又对于光源的故障与原因以及措施,也归纳起来表示在表 11-47、表 11-48 和表 11-49 中。

11-5-10 照明器的维护

对于主要照明器,为了使用安全而要求禁止与注意的事项,归纳起来表示在表 11-50 中。有关特殊照明器的安全使用方法,应由制造厂家确定。

11-5-11 照明的改善

即使照明设备维护良好,也会由于照明设施的使用目的和业务范围发生变更,及在原有设备中不能适用,因而要进行照明改善,以便适应要求。改善工作照明的调查一览表见表 11-51。

表 11-46 光源的安全使用方法

编号	项目	禁止和注意事项	一般照明用白炽灯	荧光灯	高压放电灯 (HID灯)	卤素灯	反射型白炽灯	起辉器
1	禁止 (破损)	由于是玻璃制品,因而不得落下、碰撞物体、加以强制力或有裂纹	○	○	○	○	○	○
2	禁止 (过热)	不要在玻璃表面上贴布和纸等以及涂刷涂料	○	○	○	○	○	—
3	禁止 (火灾)	不要把布或纸等接近点灯处或接近易燃物体点灯	○	—	○	○	○	—
4	注意 (火灾)	有引火危险的物体(煤气、喷雾、喷漆等)不要安置在附近使用,处理引火煤气和发爆物等时必须使用防爆器具	○	○	○	○	○	○
5	禁止 (烫伤)	点灯中或刚刚熄灯后的电灯,由于尚热,绝对不能用手或皮肤触摸	○	—	○	○	○	—
6	注意 (使用条件)	在白炽灯上标明的电压下使用	○	—	—	○	○	—
7	注意 (使用条件)	荧光灯、HID灯要求与镇流器组合使用。器具(镇流器)的使用要保证适合于灯的种类、额定电压、额定功率	—	○	○	—	—	—
8	注意 (使用条件)	起辉器的使用要适合于荧光灯和插座	—	—	—	—	—	○
9	注意 (点灯方向)	对指定点灯方向的灯要按指定方向使用	—	—	○	○	—	—
10	注意 (灯头温度)	灯头部分的温度不得在超过指定温度状态下使用(一般照明用白炽灯为160°C,卤素灯的密封部位的温度在350°C以下)	○	—	○	○	○	—
11	注意 (安装牢固)	灯的起辉器要在插座上安装牢靠(在插座上安装不完善时,要注意灯不亮或有发热现象)	○	○	○	○	○	○
12	禁止 (更换清扫)	灯、起辉器更换和器具清扫时必须切断电源	○	○	○	○	○	○
13	禁止 (器具)	灯的器具(镇流器)必须按规定使用	○	○	○	○	○	—

(续)

编号	项目	禁止和注意事项	一般照明用白炽灯	荧光灯	高压放电灯 (HID灯)	卤素灯	反射型白炽灯	起辉器
14	禁止 (紫外线、亮度)	开着的灯不得直视 (将会眼痛)(杀菌灯开灯时绝对不能直视)	—	○	○	○	—	—
15	注意 (处理)	扫除时不要用扫除工具损坏表面 (对于环形荧光灯, 不要从灯中间强行伸入器具)	○	○	○	○	○	○
16	注意 (使用)	不要在受雨和水滴的状态下使用灯 (在室外使用反射型白炽灯的情况除外)	○	○	○	—	○	—
17	注意 (器具)	在受雨和水滴及潮气多的场所使用时, 必须使用防水构造的器具	○	○	○	○	○	○
18	注意 (器具)	在有振动和冲击的场所, 必须使用抗振构造的器具 (灯)(在有振动和冲击的场所, 不得使用卤素灯)	○	○	○	○	○	○
19	注意 (器具)	在有受酸等腐蚀的危险时, 必须使用耐酸构造的器具	○	○	○	○	○	○
20	注意 (器具)	在粉尘多的场所, 必须使用密闭构造的器具	○	○	○	○	○	○
21	注意 (开关)	开关频繁寿命就短	—	○	—	○	—	—
22	禁止 (异状)	当灯的外管、球壳偶然有破裂时, 绝对不许开灯 (由于有紫外线的危害和有破损、掉落等的危险)	—	—	○	—	—	—
23	注意 (处理)	开灯中的管壁温度处于 250℃以下的状态不能使用 (造成黑化和寿命短)	—	—	—	○	—	—
24	禁止 (处理)	安装白炽灯要带上干净手套, 不能用手直接接触 (也有根据品种特点用手直接安装的)	—	—	—	○	—	—

表11-47 白炽灯的故障与措施

故障	原因	措施
1. 一开灯就不亮	(1) 电源不规格 (2) 灯头与插座的接触不良 (a) 安装不完善 (b) 灯头变形 (3) 灯不良 (a) 在运输中受到异常冲击而使灯丝断线 (b) 灯在安装时, 由于落下撞上坚硬物体等安装事故	(1) 用万用表、电压表检查 (2) 将电灯充分插进 (3) 换灯
2. 灯一亮后就灭	(1) 将电源电压弄错 (2) 玻璃球破裂, 空气完全进入, 称做闷漏, 在玻璃球内部会有白色附着物 (3) 电源的断路器、保险被烧断	(1) 与灯的额定电压不同, 电源不合格, 用万用表检查 (2) 换灯 (3) (a) 插座异常, 在能见距离内检查

(续)

故 障	原 因	措 施
		(b)包括其它电气设备在内,将消耗功率(电流)调节到配线容量以下
3.在比较短的时间内不亮	(1)电源电压太高 (2)振动太大 (3)外来撞击 (4)器具的大小和灯的大小(功率)不相配合,使温度上升过大 (5)开关频繁 (6)灯不良	(1)用万用表检查所用电源电压要与灯适应 (2)改变安装方式,改用抗震型灯 (3)改变安装方式,改用抗震型灯 (4)改变使用器具或灯,使灯和器具相适应 (5)避免过度开关 (6)换灯
4.灯亮后发暗	(1)电源电压不适合灯的使用 (2)寿命末期 (3)灯、灯具被污染	(1)使电源电压适合灯的使用 (2)更换新灯 (3)经常清扫
5.灯泡的破裂	(1)室内使用的灯沾上水滴 (2)器具的一部分接触到玻璃球 (3)与物体碰撞 (4)在灯的外面涂、贴、油漆等 (5)灯不良	(1)改变安装场所,作防水处理,不使水沾在灯上 (2)正常安装 (3)安装保护罩,不受碰撞 (4)更换新灯 (5)换灯
6.灯头破裂	(1)灯具的尺寸与灯不相配合,灯头部分的温度太高 (2)灯不良	(1)使灯具与灯相配合 (2)换灯

表11-48

荧光灯的故障与措施

故 障	原 因	措 施
荧光灯、起辉器全都不亮	○没有供给正常的电压 (a)电压不标准 (b)电压低 ○镇流器不合规格 ○器具内接线错误,断线或接触不良 ○灯丝断开 ○在快速起动型的情况下使用的镇流器弄错,电源连接的极性错误,或没有接地,或接地不良 ○起辉器不良或不合适,或寿命终结	○谋求电源部分正常化 用万用表检查,改正低值 ○换用合适的镇流器 ○矫正接线,修理断线的地方,使接触完全良好 ○用万用表检查,或用其它灯替换,用好灯更换断丝灯 ○将电源极性与镇流器的配线图进行比较,改正成正确极性,或更换成无极性镇流器,安装接地板进行安全接地 ○更换起辉器
起辉器亮而荧光灯完全不亮	○电压低或有超负荷状态 ○器具内接线有错误 ○灯不亮	○使电源正常或配线正规 ○矫正接线 ○换灯
灯不亮 只有荧光灯的两端发红,却点不亮	○器具的接线有错误 ○防止噪声用的电容器短路 ○起辉器不良(双金属片熔合,或电容器短路)	○矫正接线 ○更换电容器 ○更换起辉器

(续)

故障	原因	措施	
	<ul style="list-style-type: none"> ○在快速启动型的情况下, 它的启动辅助装置不完善 ○灯不良, 或寿命终结 	<ul style="list-style-type: none"> ○启动辅助装置完善 ○换灯 	
灯点亮, 随后就灭(再点不亮)	<ul style="list-style-type: none"> ○镇流器不合规定, 或有一部分短路 ○器具内接线有错误 	<ul style="list-style-type: none"> ○更换镇流器 ○矫正接线 	
冬季, 起辉器虽亮, 而荧光灯闪烁不亮	<ul style="list-style-type: none"> ○低温 	<ul style="list-style-type: none"> ○换用低温用的荧光灯 	
起辉器不亮, 荧光灯两端都亮	<ul style="list-style-type: none"> ○起辉器或其并联电容短路 	<ul style="list-style-type: none"> ○更换起辉器 	
灯亮得不正常	灯一半亮, 一半灭	<ul style="list-style-type: none"> ○电压低或器具内接线有错误 ○灯或起辉器不良或寿命末期 ○灯的接触不良 ○寿命、电极劣化 	<ul style="list-style-type: none"> ○使电源部分正常, 配线正规 ○更换灯或起辉器 ○检查改正灯的安装状态 ○换灯
	光线起伏(呈蛇形状)	<ul style="list-style-type: none"> ○好灯而暂时有起伏, 若始终起伏, 则电压过大、器具不适当或灯不好 	<ul style="list-style-type: none"> ○关灯片刻后, 再开灯矫正。数次开关或隔数分钟后再开灯, 即消除异常, 如仍没有改进, 就将电压调到正常, 或更换灯, 或更换器具
	荧光灯虽点着但不十分明亮或闪烁	<ul style="list-style-type: none"> ○电压低或有超负荷现象 ○在快速启动型的情况下, 其启动辅助装置不完善 ○灯到了寿命末期 	<ul style="list-style-type: none"> ○使电源部分正常配线合理 ○使启动辅助装置完善 ○换灯
	亮灯时间过长	<ul style="list-style-type: none"> ○电压低或有超负荷现象 ○在快速启动型的情况下, 其启动辅助装置不完善 ○起辉器的动作时间过长时, 起辉器不良, 或寿命终结 ○灯的启动时间过长时, 灯不良 	<ul style="list-style-type: none"> ○使电源部分正常, 配线合理 ○使启动辅助装置完善 ○更换起辉器 ○换灯
	两灯之中一灯亮得迟缓	<ul style="list-style-type: none"> ○闪烁镇流器的进相一侧, 迟缓一、二秒不算故障。迟缓严重, 是由于电压太低 	<ul style="list-style-type: none"> ○使电源正常
在短时间内发生异常现象	灯具发声	<ul style="list-style-type: none"> ○镇流器和变压器的铁芯振动 	<ul style="list-style-type: none"> ○放入胶垫, 改正器具, 严重时就要更换
	灯具过热, 沥青和油发生恶臭	<ul style="list-style-type: none"> ○电压错误, 频率错误, 频率低, 散热不充分, 连续开关, 两灯只用一灯, 开灯不良或灯具不良、周围温度太高等 	<ul style="list-style-type: none"> ○检查电源电压和频率, 与灯具牌号查对, 使之合适, 不要过分密闭, 更换能够开关的灯, 更换不亮的灯; 若灯没有异常, 就更换器具
	在较短时间内, 灯的两端发黑(黑化), 当灯点亮以后就消失	<ul style="list-style-type: none"> ○电压太高(电流过大) ○镇流器规格不同, 或有短路 ○灯具内接线有错误, 或接触不良 ○在快速启动型的情况下其启动辅助装置不完全 ○灯不良 	<ul style="list-style-type: none"> ○使电源部分正常 ○更换镇流器 ○矫正接线 ○完善启动辅助装置 ○换灯
	长向、格栅的接触面或灯的正中间有黑色沉淀	<ul style="list-style-type: none"> ○水银粒子 	<ul style="list-style-type: none"> ○实际上没有害处

(续)

故障	原因	措施	
机械故障	一端或两端变黑	<ul style="list-style-type: none"> ○灯或镇流器不良 ○开关过度 ○在快速启动型的情况下接触器不良 ○没有供给正常的电源电压 ○接线错误 	<ul style="list-style-type: none"> ○更换灯或镇流器 ○减少开关次数 ○完善灯的安装 ○使电源部分正常 ○矫正接线
	灯头脱落	○在一般情况下, 发生这种现象, 是由于灯不良	○换灯
	灯头栓断了, 灯无法安装在灯座中	<ul style="list-style-type: none"> ○在一般情况下, 栓的折断, 是灯不良 ○插座的间隔与规格不同, 无法安装 	<ul style="list-style-type: none"> ○换灯 ○改正插座间隔或更换灯具
	灯座破损	○灯头错误塞进	○将灯安装在灯座时, 要加以注意
寿命	达不到额定寿命	○由于灯的寿命的统计误差, 其中有寿命短的, 短寿命的灯多数出现乃由于灯或镇流器不良, 电压、频率的低下	<ul style="list-style-type: none"> ○调整电源, 使之正常 ○更换不适当的镇流器 ○采用统计法, 调查原因
	只有某个灯具内灯的寿命特别短	○灯具不良	○更换灯具
光色	颜色不一致	○略有不一致, 不算不良	○荧光灯的色稍有差异, 但不妨碍照明效果。并排安装时, 要挑选一致的灯
	青色或红色过多	○严重偏离标准色温	○换灯
	光色和物体色都使人感到不舒适		○必要时, 更换成天然色, 或与白炽灯并用
亮度	两灯不一致	<ul style="list-style-type: none"> ○略有不一致, 不算故障 ○闪烁镇流器的频率下降 	○更换镇流器
	用直流电点灯, 有一端变暗	○在阳极一侧已无水银	○更换极性(每隔数小时进行一次)
	气温在0℃左右发暗	○气温过低	○为了保温, 使用密闭型灯具
收音机噪声	起辉器有喀嗒声	○发生感应时的冲击电压	○在起辉器上并联0.006μF的电容器
	发出喳喳声	○荧光灯发出的噪声	<ul style="list-style-type: none"> ○将灯离开收音机3米远或在起辉器上并联0.006μF的电容器 ○更换无噪声的荧光灯 ○线路接入滤波器, 以消除更小的噪声
闪烁	观看移动物体时发生闪烁	○不算不良	○若影响情绪, 就更换成无闪烁型, 或采用多相电路开灯

表11-49

汞灯的故障与措施

状态	在同一场所内(在相同电源下)另外有灯	检查方法	检查结果	主要原因	措施	编号
不开始放电	不开灯	测量电源电压(交流电压表, 交	没有电压(0V)	停电, 配线错误、开关切断、保险丝切断等电源不良	对电源进行全部检查	1

(续)

状 态	在同一场所内 (在相同电源下) 另外有灯	检查方法	检 查 结 果	主 要 原 因	措 施	编号
		流检验器, 量程与下面 相同)	有电压 (180~220 V或90~110V)	镇流器的品种错 误, 配线或规格弄错	检查配线电源电 压, 在灯上换上合适 电压的镇流器	2
			电压降低 (在额定 电压的80%以下)	电源不良, 超负荷	检查电源、配线, 采用升压变压器, 用 特殊额定镇流器	3
	有开灯的, 也 有不开灯的	测量电源 电压	电压降低 (在额定 电压的80~90%)	电源不良, 镇流器 连接错误	检查电源、配线, 镇流器的分接头切 换, 或采用升压变压 器	4
	齐灯	测量电源 电压 (一次 电压) 和镇 流器二次无 负荷电压	没有电源电压 (一 次电压)(0V)	电源开关断开、电 路断线等电源不良	检查其它灯的电 源电路	5
			有电源电压 (一次 电压) 二次电压下降 (180V以下)	镇流器的规格弄 错, 灯的电配管不 良	检查配线, 更换镇 流器	6
			有二次电压(180~ 220V)	灯安装不完善或灯 不良	灯头没有充分进 入, 或更换灯	7
	开始放电 时就不明亮 (荧光型时 呈桃红色 光)	相同状态	测量电源 电压	有电压 (180~220 V或90~110V)	水银蒸气达不到足 够的压力	在汞灯的一般特性 中不算不良, 约点5 分钟, 则可变明亮
电压下降 (额定电 压的80~90%)				电源不良, 超负荷	检查电源、配线。采 用升压变压器, 变换 镇流器电源分接头	9
没有异常		换灯观察	变明亮 (经过5分 钟的状态)	灯不良或寿命低	换灯	10
			不能明亮	镇流器不良, 或接 线错误	更换镇流器, 或修 改分接头	11
放电开始 不久就忽亮 忽灭	相同状态	测量电源 电压	电压下降 (额定电 压的90%以下)	电源不良或超负荷	将电源电压提高, 变换镇流器电压分接 头, 或检查配线	12
			有电压(波动大)	电压波动	开灯期间电压下降 而熄灭, 一旦熄灭, 隔数分钟后再点不 亮, 研究配线电源换 成稳压型镇流器	13
	没有异常	测量灯具 插头的电压	有电压 (额定电压 的90%以下)	镇流器不良或接线 错误	更换镇流器或修改 接线	14
开始放电 后不久就熄 灭	相同状态	测量电源 电压	没有电压(0V)	电源不良, 或因开 灯初期(数分钟)的大 电流而引起电源保险 器烧断等	检查电源, 换用低 起动电流型或稳压型 镇流器	15

(续)

状 态	在同一场所内 (在相同电源下) 另外有灯	检查方法	检 查 结 果	主 要 原 因	措 施	编 号
开始放电 后不久就熄 灭	没有异常	研究灯的 安装(观察 是否拧紧)	没有熄灭	灯的安装不良或灯 头接触不良	将灯头拧紧	16
			同样熄灭	灯或镇流器不良, 或接线错误	换灯, 更换镇流 器, 修正接线	17
		换灯观察	没有熄灭	灯不良	换灯	18
			同样熄灭	镇流器不良, 或接 线错误	修正镇流器的接 线, 更换镇流器	19
灯亮后在 短时间内灯 亮得不良 (早期寿命)	相同状态	测量电源 电压	没有电压(0V)	电源断线(保险器 被切断等)	检查电源配线	20
			有电压(额定电压 的80%以下)	电源不良, 超负荷	检查电源、配线管, 采用升压变压器	21
			有电压(180~220 V或90~110V)	镇流器的品种弄 错, 或接线错误	更换镇流器, 或修 正接线	22
			有电压(额定电压 的120%以上), 镇流 器具有异常高的温度	由于灯的超电流, 而使寿命缩短	更换镇流器(用高 电压)或使电源电压 正常	23
			有电压(变动大)	电压波动	检查电源、配线, 采用稳压型镇流器	24
	没有异常	测量二次 无负荷电压 (灯具插头 的电压)	有电压(180~220 V或90~110V)	灯不良	换灯	25
		测量电源 电压	有电压(180~220 V或90~110V)镇流 器略有异常, 高温	镇流器不良, 配线 错误, 或品种错误	更换镇流器, 或修 正接线	26
	没有异常	测量电源 电压	有电压(额定电压 的110%以上或90% 以下)镇流器有异常 高温	镇流器品种弄错或 不良	更换镇流器	27
	相同状态(限 于在同类型照明 器的情况)	测量电源 电压和二次 无负荷电压	有电压(180~220 V或90~110V)再起 动时间非常长	照明器的球形灯罩 过小或通风不良	更换灯具(改用大 的尺寸)或将灯和镇 流器换成小功率的	28
	没有特别显著 的倾向	镇流器的 安装场所	照明温度非常高	沥青流出, 镇流器 的绝缘降低	更换镇流器安装的 场所, 或使镇流器冷 却	29
		灯具的安 装场所	振动非常大	由于振动使灯损 坏, 或接触松弛	换用抗振型灯具	30
灯具镇流 器的安装场 所		灯具镇流器内有浸 水的危险	灯具镇流器的线间 短路, 绝缘下降	采用防水灯具、镇 流器, 检查安装场所	31	

(续)

状 态	在同一场所内 (在相同电源下) 另外有灯	检查方法	检 查 结 果	主 要 原 因	措 施	编 号
一次熄灭 后,立即换 通开关,而 长时间不亮	相同状态	检查到达 亮灯的时间	5~10分钟范围	汞灯的一般特性, 不是不良	有碍工作时,可与 白炽灯或荧光灯并用	32
		测量电源 电压和二次 无负荷电压	有电压(180~220 V或90~110V)	照明器的灯罩过 小,或通风不良,或 灯不良	更换器具(改换大 的尺寸),将灯和镇 流器换成小功率的或 更换灯	33
			电压下降(额定电 压的90%以下)	由于电压下降,使 其再起灯时间变长	使用适合电源电压 的镇流器,研究对电 源的关系	34
	没有异常(限 于在相同照明器 的场所)	换灯	和其它的灯不相同	灯不良	换灯	35
			依然相同	镇流器不良,或接 线错误	更换镇流器,或矫 正接线	36
	不能正确 识别色彩 (特别对红 色识别不 良)	相同状态	用荧光汞 灯(HF型) 代替透明汞 灯(H型)	大体上能满足	灯的品种选择错误	用荧光汞灯(HF 型)代替(在一般情况 下足够)
不能满意				受荧光汞灯(HF 型)的限制	参照下列或与白炽 灯并用	38
用显色改 善型荧光汞 灯替换荧光 汞灯(HF 型)			大体能满足	灯的品种选择错误	用显色改善型荧光 汞灯替换	39
			不能满意	受(全部品种)汞灯 的限制	与白炽灯并用	40
有闪烁 (观看灯时 会有感觉)	相同状态	测量电源 电压	有电压(180~220 V或90~110V)	镇流器的品种弄错 或接线错误	更换镇流器或矫正 接线	41
			有电压(额定电压 的90%以下)	电压下降	研究电压,使用升 压变压器,更换镇流 器电源的分接头	42
	没有异常	更换灯	没有闪烁	灯不良	换灯	43
			依然相同	镇流器的品种弄 错,或规格不符或接 线错误	更换镇流器或矫正 接线	44
有闪烁 (在运转时 和观看移动 物体时有感 觉)	相两状态	对工作有 无妨碍	无妨碍	交流放电灯的开灯 性质	不是不良(一般汞 灯不比荧光灯的闪烁 大)	45
			有妨碍	交流放电灯的开灯 性质	对安装于二相三线 制、三相三线制(三 相四线制)等各相的 灯进行混光,或与白 炽灯并用	46

注: 1. 氟磷汞灯也用上述方法检查故障原因。电源电压以额定的95~105%为合适值。

2. 需用的镇流器的额定电压、频率、适合灯的功率(瓦数)一定要与实际使用状态一致。

表11-50

照明器的安全使用方法

编号	禁止和注意事项
1	在确定电源电压、频率的基础上必须采用适当的照明器
2	需要接地者,一定要接地使用
3	除电源插头和顶棚上有关吊灯用的挂勾外,都要请专业电工进行配线和安装
4	连接外部配线时,电线不能接触或靠近高温的地方;指定用于某个场所的电线,必须采用适当的电线
5	无特别限制规定的器具,要在周围温度为5~35℃下使用
6	室内用的器具不能在室外使用
7	电气、煤气、煤油炉等采暖器具的直接上面及其附近或直接遇到蒸汽的场所,不能安装
8	灯具要按照规定进行安装;特别防水灯具等要注意安装方向,否则不能确保防水性能
9	在坚硬的地方安装要牢固
10	嵌入器具要按照规定嵌入,将四周加固
11	在安装重器具时,要加固顶棚,并注意由开关引出的软线不要振动落下
12	器具的搬运,要按照规定进行;特别不能用导线担负器具的重量
13	更换器具内部配线时,不要进行部件的加工
14	在组合器具的情况下,必须使用适当的机械配件来组合
15	使用合适的灯,特别不能使用超过指定瓦数的灯
16	不能将纸和布之类放置于器具的远处,或盖住器具
17	换灯、拆卸罩子和保险时,必须切断电源
18	不能在有煤气、蒸汽等危险场所进行器具的修理,而要在一般场所进行;不得已而进行时,要确实保证不存在煤气
19	对诱导灯、事故用照明器应作定期检查,以确保不发生异常;不是事故灯,而开灯时间短,要按照规定更换电池
20	事故用照明器在高温气体(140℃)下,紧急开灯后即不再使用,应该更换新的器具
21	要用温水擦洗或拧干浸肥皂水的布擦洗器具。不要用汽油、挥发油、喷漆等药品或杀虫剂擦洗,这样会使器具受到伤害
22	金属部分不能随意使用擦亮粉
23	将灯卸下,要用干布擦抹
24	玻璃罩要用干布擦抹,并要处理指纹和油污不得残留
25	用干布或掸子清扫器具顶背的灰尘
26	在使用中发生异常时,应停止使用,切断电源,到购买处或厂家指定的商店洽谈

表11-51

改善工作照明的调查表

	检查要点	主要原因	措施
1	在工作时感觉到发暗的场所	照度不足,灯具配置不适当	增加照度,适当配置灯具,更换灯具等
2	阴天和雨天工作时,往往难于工作	照度不足,灯具配置不适当	增加照度,适当配置灯具,更换灯具等
3	仅在工作场所明亮而周围感觉黑暗的场所	照度不足,灯具配置不适当	增加照度,适当配置灯具,更换灯具等

(续)

	检 查 要 点	主 要 原 因	措 施
4	进行精细工作时,要凝视才能看见	照度不足,灯具配置不适当	增加照度,适当配置灯具,更换灯具等
5	在进行工作的整个场所,感到忧郁的气氛	照度不足,内部装修不够恰当	增加照度,适当配置灯具,更换灯具等(改善内部装修)
6	在工作时,要靠近眼前进行	照度不足	增加照度
7	有妨碍工作的阴影存在的情况	灯具布置、配光不适当	改正灯具布置,更换灯具等
8	在工作中,常常看到物件摇动	照度不足,灯具布置、配光不适当	增加照度,改正灯具布置,更换灯具等
9	由于机械和部件的反射光,往往难以看到物件的细节部分	灯具的位置、配光不适当	改正灯具布置,更换灯具等
10	从横向观看物件时,难以看到	灯具的位置、配光不适当	改正灯具布置,更换灯具等
11	对机器和部件往往感到缺少轮廓或立体感等	灯具的位置、配光不适当	改正灯具布置,更换灯具等
12	在工作场所感到有眩光	灯具的位置、配光不适当	改正灯具布置,更换灯具等
13	反射罩中的灯在工作时能进入眼内	灯具的位置、配光不适当	改正灯具布置,更换灯具等
14	直接使用裸灯	灯具不适当	更换灯具
15	面向窗工作,从窗而来的光妨碍工作	工作场所不适当	改变工作场所
16	闪烁和发生频闪效应,妨碍照明	灯不良	更换灯或适当选择灯
17	工作一天结束后,眼睛感到疲劳	照度不足,灯具的位置和配光不适当	增加照度,改变灯具或灯具的位置
18	周围的人的皮肤颜色使人感到比在室外观看时显得不良	显色性差	用高显色型荧光灯、白炽灯等
19	感到红色的彩度特别低	显色性差	用高显色型荧光灯、白炽灯等
20	深蓝色和黑色难以区分	显色性差	用高显色型荧光灯、白炽灯等
21	对全部的颜色都难以区分	显色性差	用高显色型荧光灯、白炽灯等

11-6 照 明 经 济

11-6-1 照明经济

研究照明设备的经济性,是为了在相同的照明效果下能提出以尽量少的设备费选择灯和

照明器的情报；又在照明效果不同时可以用来判断对于这种效果的适当费用〔根据这种概念在欧美称之为经费利益 (cost-benefit)〕。因此，按照进行经济比较的结果，必须注意并非根据每年照明费用的低额就单纯判断为良好的照明设备。对于构成每年照明费的早期设备费、电力费、维修费等的组合比率，也希望分析它们的内容。

此外，还要计算设备折旧时间和折旧以后的结果，并加入其它信息来决定采用的照明设备。必须了解每年照明费也是由于灯的更换方式和更换时间的不同而变化的。

照明经济主要在照明设施的计划、设计中广泛使用，但在创制时也用来决定光源和照明器的规格。

11-6-2 照明经济的比较

照明经济的比较，主要是计算各个照明方式的一次设备投资费、电力费和维修费，求出每年照明费。但由于利用计算机，可将照明计算和照明经济的比较联机进行，而使设计时间缩短。计算流程图揭示在图 11-31 中，说明如下：

(一) 照明计算输入数据

(1) 计算年月日；(2) 照明设备的名称；(3) 照明器的型号；(4) 灯的型号；(5) 计算照度；(6) 照明设备的宽度；(7) 照明设备的深度；(8) 每一照明器的平均灯数；(9) 灯的光通量；(10) 利用系数；(11) 维护系数。

(二) 照明计算

面积 (12) = (6) × (7)

每一器具中灯的平均光通量 (13) = (9) × (8)

$$\text{器具数 (14)} = \frac{(5) \times (12)}{(13) \times (10) \times (11)}$$

(三) 照明计算输出

(3) 器具型号

(14) 器具数

(四) 布置的研究

这一程序使用分时系统的末端机，输入端和输出端能以打字机与机械对话。输出器具数量以后，根据建筑物的大小、最大安装间距等研究器具的布置，决定使用数量。此数量在下一步骤输入。

(五) 照明经济输入数据

(15) 使用器具数量；(16) 器具单价；(17) 器具安装配线单价；(18) 灯的单价；(19) 折旧年数；(20) 每年开灯时间；(21) 灯的寿命；(22) 灯的更换人工费单价；(23) 清扫费单价；(24) 器具的输入功率；(25) 电气材料费 (表 11-52)。

(六) 照度计算

$$\text{初始照度 (26)} = \frac{(15) \times (13) \times (10)}{(12)}$$

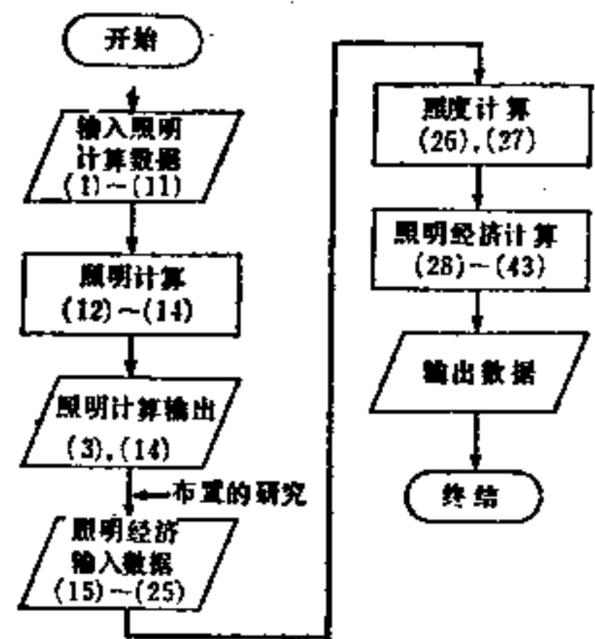
$$\text{实际设计照度 (27)} = (26) \times (11)$$


图 11-31 照明计算、照明经济计算的流程图

表11-52 电费单价 (日元/kWh)

公司名称 合同种类		北海道	东北	东京	中部	北陆	关西	中国	四国	九州	按9个公 司计算
		电灯	额定电灯	13.00	11.32	10.10	10.63	9.44	10.31	12.99	
	从量电灯甲乙(甲)	19.41	19.57	18.81	18.99	18.49	18.37	17.95	19.60	19.31	18.85
	从量电灯丙(乙)	22.10	23.65	22.45	22.75	21.99	20.35	21.26	23.08	23.17	22.24
	其它电灯	11.62	11.45	10.80	9.99	8.97	11.53	11.53	11.77	13.48	11.14
	电灯小计	19.19	19.77	18.93	19.06	18.52	18.32	18.01	19.57	19.48	18.92
电功率	业务用功率	18.45	18.49	18.34	19.77	18.17	18.27	17.32	19.50	19.76	18.57
	小功率	15.79	17.20	16.30	17.26	13.72	15.82	15.88	18.12	18.08	16.48
	大功率	10.00	9.65	10.27	11.04	8.89	10.72	9.88	10.56	10.86	10.36
	临时功率	18.68	21.75	26.01	22.71	22.24	23.76	19.25	29.75	28.59	23.41
	深夜功率	9.45	9.65	9.78	9.70	9.48	9.85	9.75	10.58	10.34	9.83
	农业用功率	6.74	7.01	7.10	10.16	12.31	11.06	12.63	15.11	12.77	8.70
	功率小计	12.68	11.77	12.95	13.07	10.64	12.88	11.40	12.73	13.45	12.63
电灯功率合计		14.63	13.58	14.51	14.19	11.81	14.12	12.71	14.15	15.10	14.09

(七) 照明经济计算

器具费 (28) = (16) × (15)

器具安装配线费 (29) = (17) × (15)

灯费 (30) = (18) × (8) × (15)

初始设备费 (31) = (28) + (29) + (30)

每年设备折旧费 (额定法, 包括利息和各种税)

$$(32) = (31) \times \left\{ \frac{0.9}{(19)} + 0.085 + 0.016 \right\}$$

$$\text{每年灯的更换只数 (33)} = \frac{(87) \times (15) \times (20)}{(21)}$$

每年更换灯费 (34) = (18) × (33)

每年更换灯的人工费 (35) = (22) × (33)

每年清扫费 (36) = (23) × (15)

每年维护费 (37) = (34) + (35) + (36)

$$\text{每年用电量 (38)} = \frac{(20) \times (15) \times (24)}{1000}$$

每年电费 (39) = (25) × (38)

每年照明费 (40) = (32) + (37) + (39)

$$\text{每年照明费率 (41)} = \frac{(40)}{\text{标准器具的 (40)}}$$

每 1m²每年的照明费 (42) = (40)/(12)

每 1m²·lx 每年的照明费 (47) = (40)/(27)

(八) 输出数据

在表 11-53 中列出经济比较。

表11-53

照明经济比较(例) (1) 1977-5-22 (2) 体育馆

区分	符号	项 目	方式		1	2	3	4	
			单位						
照明计 算条件	(3)	照明器型号			高顶棚反射罩	高顶棚反射罩	高顶棚反射罩	高顶棚反射罩	
	(4)	灯的型号			HF400X	HF400F	D400	MF400	
	(5)	设计照度	lx		500	500	500	500	
	(6)	设备的宽度	m		40	40	40	40	
	(7)	设备的深度	m		30	30	30	30	
	(8)	器具平均灯数	个/只		1	1	1	1	
	(9)	灯的光通量	lm		24000	47500	20000	32000	
	(10)	利用系数			0.5	0.5	0.5	0.5	
	(11)	维护系数			0.7	0.7	0.7	0.7	
		(12)	照明面积	m ²		1200	1200	1200	1200
		(15)	使用器具只数	只		70	35	80	54
经济计 算条件	(16)	器具单价	日元/只		20570	36270	44070	27370	
	(17)	器具安装配线单价	日元/只		(69170)	(86636)	(79662)	(78242)	
	(18)	灯的单价	日元/个		5850	21300	12800	12700	
	(19)	折旧年数	年		10	10	10	10	
	(20)	每年开灯时数	小时		1500	1500	1500	1500	
	(21)	灯的寿命	小时		12000	12000	6000	12000	
	(22)	换灯人工费单价	日元/个		500	500	500	500	
	(23)	清扫费单价	日元/只		500	500	500	500	
	(24)	器具输入功率	W/只		423	435	460	423	
	(25)	电费	日元/kWh		18.6	18.6	18.6	18.6	
	(26)	初始照度	lx ¹¹		700	693	693	720	
	(27)	实际设计照度	lx		490	485	485	504	
设备费	(28)	器具费	日元		1439900	1269450	3525600	1477980	
	(29)	安装配线费	日元		4841929	3032536	6372964	4225082	
	(30)	灯费	日元		409500	745500	1024000	685800	
	(31)	一次设备投资费	日元		6691329	5047486	10922564	6388862	
	(32)	每年设备折旧费	日元		1278044	964070	2086210	1220273	
维护费	(33)	每年更换灯数	个		9	4	20	7	
	(34)	每年换灯费	日元		52650	85200	256000	88900	
	(35)	每年换灯人工费	日元		4500	2000	10000	3500	
	(36)	每年清扫费	日元		35000	17500	40000	27000	
	(37)	每年维护费	日元		92150	104700	306000	119400	
电 量	(38)	每年电量	kWh		44415	22837	55200	34263	
	(39)	每年电费	日元		826119	424777	1026720	637292	
合 计	(40)	每年照明费	日元		2196313	1493547	3418930	1976964	
研 究	(41)	同上的比率	%		100	68	156	90	
	(42)	每年照明费/面积	元/m ²		1830	1245	2849	1647	
	(43)	每年照明费/面积·照度	元/m ² ·lx		3.735	2.567	5.870	3.269	

11-6-3 照明费用和灯的更换

在这里研究灯的更换方式和灯的更换时间与照明费之间的关系。对荧光灯的光通量维护系数与保存率按表 11-54 来考虑。

在个别换灯时，开灯时间与此时的开灯时间的明细揭示在表 11-55 中。开灯时间与不开灯数、不开灯的累积数、平均开灯时间以及此时的平均光通量维护系数揭示在表 11-56 中。

表11-54 荧光灯的光通量维护系数与保存率的举例

项目 \ 开灯时间[h]	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000
光通量维护系数	1.00	0.91	0.87	0.84	0.82	0.80	0.78	0.77	0.75	0.74	0.74	0.73	0.73
保存率	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	0.94	0.88	0.78	0.66	0.50	0.31	0.13

表11-55 开灯时间与灯的开灯时间明细一览表举例

开灯时间 (h)	灯的开灯时间的明细 (%)												
	0 h	1000 h	2000 h	3000 h	4000 h	5000 h	6000 h	7000 h	8000 h	9000 h	10000 h	11000 h	12000 h
0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3000	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4000	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
5000	3	0	0	0	0	97	0	0	0	0	0	0	0
6000	3	3	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0	0
7000	6	3	3	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0
8000	10	6	3	3	0	0	0	0	78	0	0	0	0
9000	12	10	6	3	3	0	0	0	0	66	0	0	0
10000	16	12	10	6	3	3	0	0	0	0	50	0	0
11000	19	16	12	10	6	3	3	0	0	0	0	31	0
12000	18	19	16	12	10	6	3	3	0	0	0	0	13
13000	13	18	19	16	12	10	6	3	3	0	0	0	0
14000	1	13	18	19	16	12	10	6	3	2	0	0	0
15000	2	1	13	18	19	16	12	10	6	2	1	0	0
16000	4	2	1	13	18	19	16	12	10	4	1	0	0
17000	5	4	2	1	13	18	19	16	12	7	3	0	0
18000	9	5	4	2	1	13	18	19	16	8	5	0	0
19000	9	9	5	4	2	1	13	18	19	11	6	3	0
20000	15	9	9	5	4	2	1	12	17	13	8	4	1
21000	17	15	9	9	5	4	2	1	11	13	10	3	1
22000	15	17	15	9	9	5	4	2	1	8	9	5	1
23000	10	15	17	15	9	9	5	4	2	1	6	5	2
24000	8	10	15	17	15	9	9	5	4	2	0	4	2
25000	8	8	10	15	17	15	9	8	4	3	1	0	2
26000	5	8	8	10	15	17	15	8	8	4	2	0	0

开灯 t 小时后的照度 $E(t)$ 为

$$E(t) = E(0) \times f_m(t) \times M_d(t)$$

式中 $E(0)$ 为初始照度； $f_m(t)$ 为 t 小时后的平均光通量维护系数； $M_d(t)$ 为由于灯及器具污染的维护系数。

表11-56 个别更换时开灯时间与不开灯数、平均开灯时间、平均光通量维护系数的举例

开灯时间 (h)	不开灯数 (%)	不开灯 累计 (%)	平均开灯 时间 (h)	平均光通量 维护系数 (%)	开灯时间 (h)	不开灯数 (%)	不开灯 累计 (%)	平均开灯 时间 (h)	平均光通量 维护系数 (%)
0	0	0	0	100	14000	1	101	3740	83.3
1000	0	0	1000	91	15000	2	103	4550	81.5
2000	0	0	2000	87	16000	4	107	5160	80.5
3000	0	0	3000	84	17000	5	112	5680	79.8
4000	0	0	4000	82	18000	8	121	5810	80.2
5000	3	3	4850	80.6	19000	9	130	5890	80.4
6000	3	6	5670	79.1	20000	15	145	5410	82.1
7000	6	12	6250	79.1	21000	17	162	4640	83.9
8000	10	22	6450	79.1	22000	15	177	4030	84.8
9000	12	34	6370	80.2	23000	10	187	3870	84.4
10000	16	50	5770	82.5	24000	8	195	3950	83.6
11000	19	69	4370	84.7	25000	8	203	4150	85.0
12000	18	87	3260	86.4	26000	5	208	4650	83.7
13000	13	100	2830	86.4					

这里按个别更换方式维护时，平均光通量维护系数的最小值是79%，应用此值进行照明计算。

为了计算简单，取 $M_d(t) = 1$ ，初始照度与设计照度 E 的关系为

$$E(0) = \frac{E}{f_m(t)_{min} \times M(t)} = 1.27E$$

式中费用计算是对单位灯、单位时间的计算，按 11-6-2(1) 的项目编号表示，则设备费 (元/只·h)

$$C_{es} = 1.27 \times C_e = 1.27 \times \frac{(16) + (17) + (18)}{(8) \times (20) \times (19)}$$

电费 (元/只·h)

$$C_{ps} = 1.27C_p = 1.27 \times \frac{(24) \times (25)}{1000 \times (8)}$$

使用期间的平均维护费 (元/只·h)

$$C_{ms} = 1.27C_m = 1.27 \times \frac{\{(18) + (22)\} \times \Sigma N_s}{(20) \times (44)}$$

式中 ΣN_s 为在使用期间的 1000 小时内不开灯比率 N_s 的累计系数，(44) 为使用期间(年)。在 1000 小时内发生的维护费

$$C_{m_s}(t) = 1.27 \times \frac{\{(81) + (22)\} \times N_s(t)}{1000}$$

式中 $N_s(t)$ 为 1000 小时内不开灯比率。

在个别更换时，1000 小时内发生的维护费对使用期间的平均维护费的比率揭示在图 11-32 中。

设备折旧的照明费 (元/只·h)

$$C_d = C_{es} + C_{ps} + C_{ms}$$

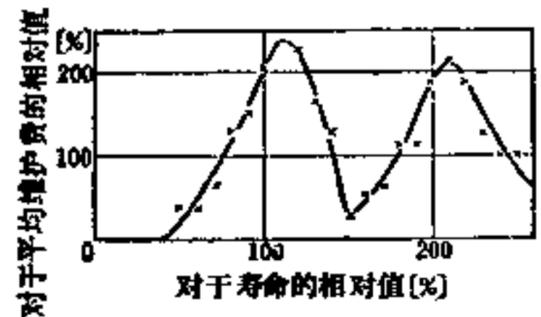


图11-32 个别更换方式期间发生的维护费

设备折旧之后的照明费 (元/只·h)

$$C'_i = C_{pt} + C_{ms}$$

在集团更换时, 开灯 t 小时以后的照度 $E(t)$

$$E(t) = E(0) \times f(t) \times n(t) \times M_d(t)$$

式中 $E(t)$ ——初始照度;

$f(t)$ —— t 小时以后灯的光通量维护系数;

$n(t)$ —— t 小时以后灯的保存率;

$M_d(t)$ —— t 小时以后灯、器具等由于污染的维护系数。

假设在 t 小时以后对灯集团更换, 则 $E(t)$ 可以考虑为设计照度。为了简化计算, 取 $M_d(t) = 1$, 照度维护系数可由

$$\frac{E(t)}{E(0)} = f(t) \cdot n(t)$$

表示, 因此设备比率为

$$E(0)/E(t) = 1/f(t) \times n(t)$$

到集团更换时的开灯时间的数值揭示在表 11-57 中。

表11-57 集团更换时, 光通量维护系数、保存率、照明维护系数与设备比率的举例

时 间 t (h)	光通量维护系数 $f(t)$	保 存 率 $n(t)$	照明维护系数 $\frac{E(t)}{E(0)}$	设备比率 $\frac{E(0)}{E(t)}$
0	1.0	1.0	1.0	1.0
1000	0.91	1.0	0.91	1.1
2000	0.87	1.0	0.87	1.15
3000	0.84	1.0	0.84	1.19
4000	0.82	1.0	0.82	1.22
5000	0.80	0.97	0.78	1.28
6000	0.78	0.94	0.73	1.37
7000	0.77	0.88	0.68	1.47
8000	0.75	0.78	0.59	1.70
9000	0.74	0.66	0.49	2.04
10000	0.74	0.50	0.37	2.70
11000	0.73	0.31	0.23	4.35
12000	0.73	0.13	0.10	10.0

在集团更换时, 各项费用为:

设备费 (日元/只·h)

$$C_{c2}(t) = \frac{C_c}{f(t) \times n(t)}$$

电费 (日元/只·h)

$$C_{p2}(t) = \frac{C_p}{f(t) \times n(t)}$$

维护费 (日元/只·h)

$$C_{m2}(t) = \frac{(18) + (22)'}{f(t) \times n(t) \times t}$$

式中 (22)' 为集团更换时的换灯的人工费 (一般比个别更换时便宜)。

设备折旧期间的照明费 (日元/只·h)

$$C_g(t) = C_{eg}(t) + C_{pg}(t) + C_{mg}(t)$$

设备折旧后的照明费

$$C'_g(t) = C_{pg}(t) + C_{mg}(t)$$

个别的集团更换时, 至完全更换时间为止进行个别更换。至完全更换时间为止不开灯的累计系数与设备费比率揭示在表 11-58 中。表中 9000 小时以后的设备比率由于换灯比率增多而变小, 成为至此为止的最大值。其理由是在进行完全更换以前这段时间内并不存在设计照度以下的时间带。

在个别的集团更换时各项费用为:

设备费 (日元/只·h)

$$C_{eg}(t) = C_e / f_m(t)$$

电费 (日元/只·h)

$$C_{pg}(t) = \frac{C_p}{f_m(t)}$$

维护费 (日元/只·h)

$$C_{mg}(t) = \frac{\{(18) + (22)\} \times \sum_{i=0}^t N_p(t)}{f_m(t) \times (t)} + \frac{(18) + (22)'}{f_m(t) \times t}$$

式中的第一项表示个别更换时需要的维护费, 第二项表示完全更换时的维护费。

设备折旧中的维护费

$$C_{ig}(t) = C_{eg}(t) + C_{pg}(t) + C_{mg}(t)$$

设备折旧后的维护费

$$C'_{ig} = C_{pg}(t) + C_{mg}(t)$$

在一定条件下换灯方式不同的照明费揭示在图 11-33 中。

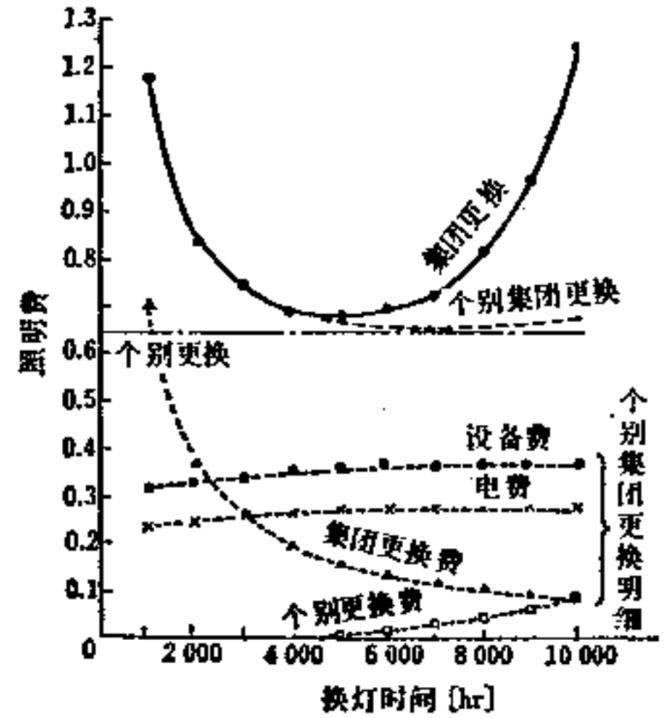


图11-33 换灯方式中的照明费

表11-58 个别集团更换时不开灯的累积系数和设备费比率的举例

时间 t (h)	不开灯累积系数 $\sum N_p$	设备费比率 $\frac{E(0)}{E(t)}$	时间 t (h)	不开灯累积系数 $\sum N_p$	设备费比率 $\frac{E(0)}{E(t)}$	时间 t (h)	不开灯累积系数 $\sum N_p$	设备费比率 $\frac{E(0)}{E(t)}$
1000	0	1.1	5000	0.03	1.24	9000	0.34	1.25→1.27
2000	0	1.15	6000	0.06	1.27	10000	0.50	1.21→1.27
3000	0	1.19	7000	0.12	1.27	11000	0.69	1.18→1.27
4000	0	1.22	8000	0.22	1.27	12000	0.87	1.16→1.27

参 考 文 献

(1) 吉川孝福, 安永弘孝: 照明と空調との結合, 松下電工技報 No.2 (昭46) 35~55

(2) Handbuch für Beleuchtung (1975) 200

(3) 日本電球工業会: 蛍光ランプ適正使用ガイドブック

第 12 章

住宅照明

12-1 生活环境和照明

12-1-1 利用天然光和人工光的照明

住宅是人们过着居住生活的生活环境，人们对于住宅非常关心，同时环境对于过着生活的人们的影响程度也日益增大。因此仅仅依靠空间的扩大和明亮的关系来处理住宅的照明是不够充分的，根据居住在其中的家族的生活状况，不仅要考虑室内装修，还要考虑家具之类的设计和布置等等，以便构成以居住功能为主的室内装饰。

在白昼，一般来说住宅的室内空间是向明亮的窗口敞开的，但是室外变黑以后，这种现象便会暗淡下来，人们要以照明的明亮为中心过着生活。因此从感觉上反映出来的室内装饰构图在白昼和夜间会有一些差别，而要考虑生活周期，可以说最好还是明确一下这种差别。

尽可能利用天然光是符合要求的，但是由于受到建筑物的限制，除了天窗以外多从一个侧面采光，这样根据场所不同容易产生明暗对比，因此有时就需要补偿这一点的照明。

进行视觉工作的照度，随着年龄不同在需要值方面有一些差别，但是根据工作面的照度可见度当然是不相同的。

在工作面上即使得到充分的照度，但在低位置上采用周围不很发光的照明器时，还会感到房间黑暗。这样，由于对整个房间进行照明，便得到对房间的明暗感觉。因此，在选用照明器时，除了设计和效率而外还须考虑配光来选择，而且要研究它的安装位置。

12-1-2 居住功能和亮度的平衡

在住宅里不是使用仅仅一间特定的房间，而是日常往来于住宅里面的各处过着生活的，因此住宅里的各处要避免极端明暗，同时对于主要的起居室来说，联系它们的走廊也不要过度明亮。应该注意到这些主要部分和附属部分的亮度平衡。

在住宅里对房间的全部面积一般不是均等使用的。除了极窄的房间以外，在房间内用均匀的照度进行照明以后，往往变得呆板，容易失掉起居室的安静的居住功能，因此要创造照明的重点，突出中心感来。

在顶棚上安装照明器，一般在其直射下面最亮，在其周围照度逐渐降低，自然会创造出中心感，但是如果这样的照明的中心感和室内装饰的重点并不一致，就失掉了房间的统一性，破坏了居住功能。因为人们的意识是朝着明亮的方向的。

如果日本式房间的四间比房间中部明亮，就会失掉安静，虽然起居室的接待用家具或厨房兼餐室里的餐桌离开房间中部设在一旁，而照明器却安装在顶棚中央，这时仍然不会得到安静气氛，往往由于相互有关的位置而给实际生活带来不便。

在西式房间的顶棚中央安装花灯，用小型调光器对布置于其周围的下射灯进行调光，当

下射灯明亮以后，便感觉房间扩大。而一旦限制了下射灯的亮度，则扩大的房间又逐渐变小，注意力因而集中到中央部分上去。在宽度一定的房间里明亮的地方有一部分受到限制，就会感到室内空间变小，但如果在墙上设置壁灯，就至少免除了这一方向的空间变小。

这样，亮度的平衡发生了变化，气氛也就会发生变化，往往因此而失掉居住功能。对于亮度的平衡，还必须注意到照明器的安装位置同样也会产生大的影响。

为了照亮墙面而显出房间扩大，采用壁灯是有效的。另一方面，这还消除了墙面所具有的压迫感，增大了生活空间安静的效果。但因此就要求壁灯的安装高度应在通常的视线范围内，如果高度超过1.8米，只不过具有顶棚照明的延长的价值，而失掉对居住功能的各种效果。

12-1-3 住宅照明的基本事项

住宅的各个部分都具有应满足各自目的和用途的功能，为了顺利地满足这些功能，需要充分的照度自不待论，而为了保持生活环境的居住功能，仅仅依靠明亮还不够充分，必须考虑亮度的平衡和创造气氛，以便继续过着舒适的生活。这种考虑并非一般的，而是根据居住在这一住宅中的家族的生活而进行的。

当然，优等的照明设计如果不从日常生活中产生出来，便没有意义，因此，为了维修容易，使用方便，开关的安装位置就要适当。

这样，住宅照明的基本的事项，可以归纳为以下几点：

1. 满足各项功能的亮度；
2. 为了圆满地过生活，应保持各部分亮度的平衡；
3. 要求的气氛足够；
4. 光源和照明器容易维修；
5. 开关的位置适当。

关于维修的难易，除了选定照明器而外，还要考虑楼梯等处特别是脚手架来选择安装位置，在梯井的空间中应该避免采用暗装式照明器或吸顶灯。

就寝所用的房间原则上在室内安装开关，其它则在室外，这是便利的，因为日常生活有着稍微多走两三步就感到厌烦而不去利用的倾向，所以开关的安装位置必须经过充分研究来确定。因此要研究生活上的交通路线，选择最便利的位置来安装开关。

在楼梯处当然采用三路开关，而在成为通道的走廊和房间里多半要求三路开关，所以要注意。在卧室的房间入口处和枕边附近要设置一具在两方面都能开关的照明。

12-1-4 住宅照明和经济性

在住宅照明中也要节约能量消耗，提高经济性，还要以居住功能为主来考虑安装位置，使照明能够有效地利用，而不致有所浪费。

为了得到亮度，以荧光灯为光源，当然比白炽灯有效，但是在显示气氛方面白炽灯却具有大的效果。

生活中进行实际活动的范围是离开照明器的安装位置的，为了得到必要的亮度，就必须消费过多的电力。特别在一些各自独立而也可作多功能使用的房间，虽然增设了照明器的数量，但从长期生活的实际情况来看，能够选择符合使用要求的照明可以说是经济的。

12-2 照 明 器

照明具有使房间发挥功能、舒畅心情的作用，同时利用光线和阴影的效果创造出不同于白昼的夜间表情。直接照明可以创造出光线和阴影的效果，间接照明利用反射光得到了柔和的光线，半直接照明利用塑料或玻璃灯罩等的透射光减少了眩光。这些照明使房间里保持着平均亮度，着重照射重要部位，在房间内突出重点。这些适合房间用途而采用的照明手法是很重要的。

住宅照明容易使装饰性居于优先地位，但是正如上面所述，它是适应房间的功能而创造照明方式的工具，所以要考虑照明器的特征而进行选择。

12-2-1 照明器的种类

按照大的类别，除了根据直接照明、间接照明、半直接照明、半间接照明等需用的配光分类而外，还可以根据照明器的安装方法来区分。

(1) 暗装式照明器、下射光式照明器 在住宅内使用的暗装式照明器，有多管荧光灯(2~5管)用的和白炽灯泡用的。主要用于一般照明上，但是白炽灯泡用的由于形状较小，往往单独用于走廊转角或房间出入口内部的顶棚上。白炽灯泡用的和荧光灯用的相比，有着富于变化的附件和配光上的方案等等，种类繁多，用途广泛，但是受到形状的限制，容易忽视照明效果，因此要加注意。特别是多个灯泡组合布置、进行一般照明时，往往不能得到所要的明亮度。但是由于暗装式照明器的模数化较为进步，因此通过换装附件，在一定程度上可以改善。

(2) 吸顶式照明器 这和暗装式一样在使用上要加注意，但是由于向下突出部分更多，因此为使房间入口或收纳部位的门在开关时不致造成阻碍，就必须考虑位置和选择照明器的高度(或厚度)。又为了防止昆虫或尘埃侵入照明器的放热孔或照明罩的缝隙，还有称做防虫式的类型。

然而灯罩和灯具本身的配合方法有许多种，如果不选择容易判断的或附有拆装方法说明书的，那么在换装或清扫灯时便不熟悉照明罩的拆卸方法，也许会损坏照明器，因此要加注意。

(3) 墙装式照明器、壁灯 有直接安装在墙面或搁板下面等处，用作辅助照明或重点照明；有在走廊或镜子上面等处用作象征性装饰，与花灯相对作为装饰性重点；有安装在厨房洗涤池上面，但要研究配光方案，以便控制视线方向的光线，而提高身边的照度。总之，它涉及多种不同的用途。

如何在墙面上设法用壁灯表现出房间的宽阔是重要的关键，但是如壁灯比居于中心的照明器(客厅的花灯等)还亮，那就会失掉房间的中心感，因此要一并使用调光器，至少将开关回路分开，以便能与中心照明器分别开关。

由于照明器在形式上和配光上变化较多，因此必须包括配光形状在内确定安装位置。例如，在顶棚附近的较高位置安装向上光通量多的照明器，就会只有一般照明的延长的效果，而冲淡了墙面的照明效果。

(4) 悬挂式照明器、吊灯 它的光源有荧光灯(多用环形)、白炽灯等，要根据耗用电量、光色的爱好等条件选择使用，但对于起居室兼餐室等的餐桌灯，还有使这些特征分开的

兼用类型。此外，还有附带软线卷绕器和平衡器的自由升降式吊灯等，种类丰富。

另一方面，照明器设计上的自由度也大，配光会有相当的差别。因为还有上半球光通量大于下半球光通量的照明器，所以如不根据它和室内装修的关系来选择照明器，那么在下面的照度就要出现不足。

如果在顶棚表面上预置吊挂用顶棚接线盒或吊挂式插座，那么就比较容易地安装或替换，而当采用花灯或大型灯时，必须检查顶棚结构，进行加固，以便达到足够的强度。

(5) 台灯 它的安装不需要电气工程，因此增设容易而且便利。由学习、读书用的直到附属用的种类很多。光源则使用荧光灯、一般照明用电灯，或内装变压器的12伏汽车用电池等，种类也多。

从构造来看，有桌上、地面上及具有各种自由构造的形式，作为辅助光源用于照明设计中，或作为机械制的室内装饰的一部分来布置，都是便利的。由于移动使用轻便，而其连接部分和内部配线却复杂，所以要选择制造坚固、稳定性好的类型。

(6) 防水式照明器 在有溅水之虞的情况下或多湿气的地方，必须采用防水式。在防水式中有防滴式、防雨式、防湿式等，都具有适于各种用途的防水性能。这就是说，在檐端等处有屋顶的地方(45度的雨线内)采用防滴式，在门灯或没有屋顶的地方采用防雨式，又在浴室等湿气多的地方采用防湿式(表12-1)。

表12-1 防水式的类别和适用场所

防水的类别	适 用 场 所
防 滴 式	在室内地下室、冷气管道下面、地下通道等处 在屋旁室外几乎不受风的影响之处及檐下等处 在船上不直接受波浪冲击的甲板下面等处
防 雨 式	在屋旁、室外不受风吹雨打之处 道路照明设备、控压式高压受电设备等处
防 淋 式	如安装在高铁塔上的航空障碍灯之类，受横向风或斜上风之处 在船上直接不受波浪而受淋之处
防 喷 流 式	按周期进行清洗的公路隧道、车辆等的清洗等处
耐 水 式	在船的甲板上等直接受波浪之处 不适用于陆用机械
防 浸 式	非水中专用，池旁等有时可能浸水之处
水 中 式	在水中专用之处(在水上不能使用)
防 湿 式	浴室、厨房、锅炉房等处

JISC 0920“电工机械器具及配线材料的防水试验通则”(说明书)

防湿式由于用填料等防止湿气浸入，当然雨水不会进来，但是在照明器内一受阳光照射，填料及其他的防水性能往往比室内的还要早期衰退，因此有时反而是具有排水构造的防雨式要好一些。

无论是哪一种类型都容易附着尘埃，因此要大约每几个月进行一次检查。这在安全方面或照明器寿命方面都是切望的。

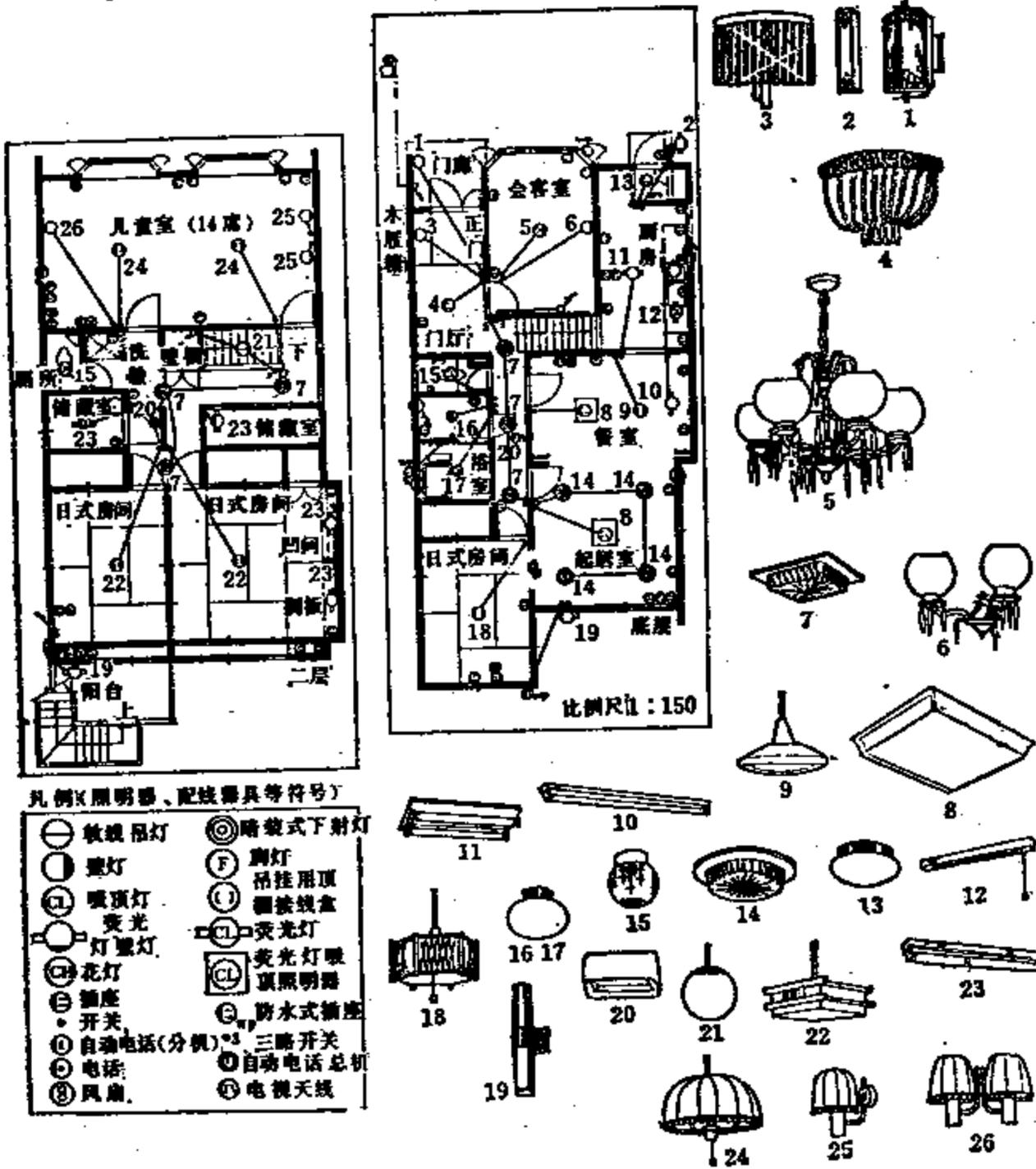


图12-1 住宅中使用的照明器举例

12-2-2 光源的耗用电力和亮度

照明器的亮度不应单独比较，而应在考虑设置它的房间内的内部装饰的基础上来讨论。这就是说，由于顶棚、墙面、地面的反射系数，未必能说下方配光大的照明器就亮。还往往要进行使用光源的耗用电力(W)的比较，前面所述的考虑自不待论，进一步对于它的光源效率(lm/W)、或在多灯用照明器的情况下灯位相互之间的布置也要进行检查。

举一例说，通常环形荧光灯比直管形荧光灯效率要低，形状和瓦数相同的环形荧光灯上下重叠的双灯用照明器的向下光通量，要低于直径和瓦数不同的环形荧光灯组成同心圆形状的照明器的向下光通量。

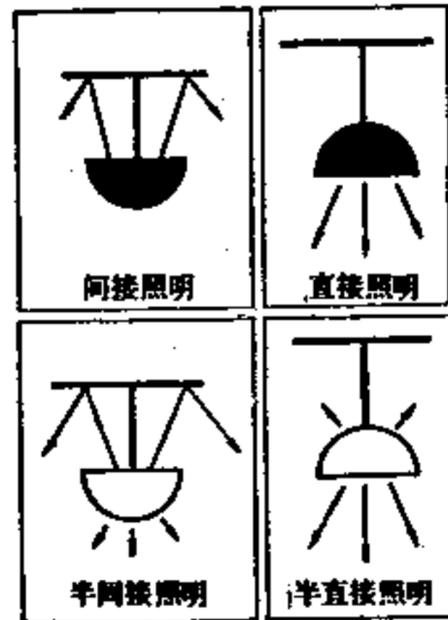
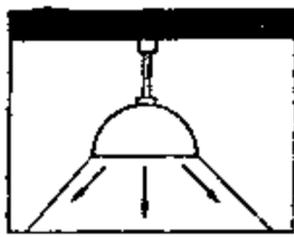
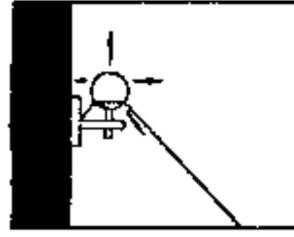


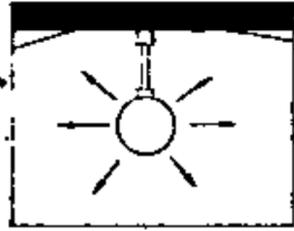
图12-2 照明器按照配光的类型



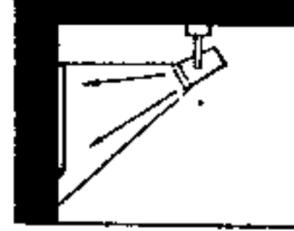
- 最适于得到局部照明
- 可得到照明器的亮度和光色的美观 (内插、布类的色彩效果)
- 也可用于小房间的一般照明



- 在墙面上得到美观的光线重点效果时使用壁灯照明器,这时的照明器设计与全部照明器的设计统一是适合的
- 使用低功率灯泡,避免眩光

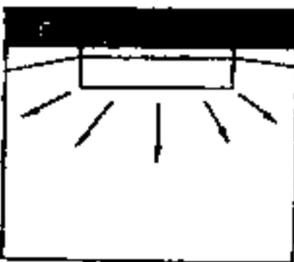


(a) 悬挂式照明器的照明



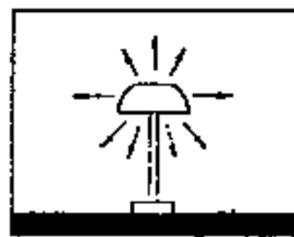
(b) 壁灯照明

- 荧光灯的壁灯适于镜上照明或洗澡池上照明
- 绘画、钢琴、装饰品等需要局部照明时,要使用聚光灯照明



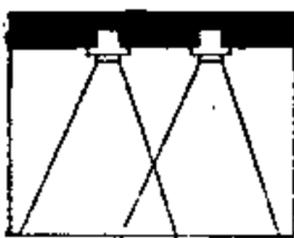
(c) 吸顶式照明器的照明

- 多数情况下用作一般照明
- 整个房间明亮,形成有效率的气氛
- 应用吸顶式顶棚表面容易出现阴影,因此应用在侧面也出现光线的照明器是适合的



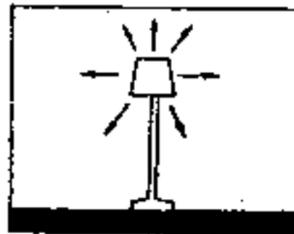
- 当要使一般照明做成在气氛中心的安静的照明时,为了充分照亮身边,使用桌灯、落地台灯

- 由于台灯接近于视线,最好在灯罩上方略微透光



(d) 下射式照明器的照明

- 容易保持建筑装修的美观
- 由于照明器小,没有阻力的感觉
- 可以得到光线变化 (阴影效果)
- 可以得到安静的气氛
- 由于使用调光器更加富于气氛



(c) 台灯照明

- 落地台灯容易移动,可将光线重点放在任意地方,可在顶棚表面得到美观的光线强弱,附带调光器的台灯能自由控制光线,可以改变房间的气氛

图12-3 照明器根据设备方法的类型

表12-2 对家庭用悬挂式荧光灯列为参考表的房间面积和瓦数 (JISC 8115)

在家庭的各个房间中使用照明器时特别应考虑的事项就是经过考虑经济性的亮度,但是家庭照明不仅是要求亮度,而且是在房间的气氛中符合使用目的,进而选择照明器,作为创造室内装饰的要素。
 当采用悬挂式荧光灯时,根据配光的区分,将照明器类型分为1~3种型式,按照JIS Z 9110 (照度标准) 中提示的住宅照度标准 (30~150lx) 得到房间主要部分的平均照度,从而估算出房间面积和瓦数,由参考表揭示出来供作参考。但这参考表是应用白色荧光灯而不包含灯具、灯光的经年陈旧的早期数值,以需要的亮度最低标准作为标准的。

参考表 使用悬挂式荧光灯照明器时的房间面积和瓦数估算

房间大小 m ²	~5 (3席)	5~8 (4.5席)	8~11 (6席)	11~14 (8席)	14~17 (10席)
型式 1 W	20~30	30~40	40~60	60~80	70~100
型式 2 W	20~30	30~60	40~80	60~100	80~120
型式 3 W	40~60	60~120	80~160	—	—

- 注: 1. 参考表是为了得到主要部分的平均照度而需要的瓦数的估算。在阅读、缝纫等处再并用局部照明,最好得到更高的亮度。
 2. 参考表的瓦数是合计瓦数,因此要将适当瓦数的灯组合起来。又并用白炽灯泡时,在灯泡的瓦数内要乘以大约1/4进行叠加。
 3. 这些数值是以房屋的反射系数 (中等) 计算出来的,因此当反射系数高时和低时分别在各自的瓦数上乘以0.9和1.1来确定。
 4. 房间的宽深比适用到3/4为止。在比它细长的房间中最好用1排以上或两处以上的照明器来照明。
 5. 参考表中的照明器是以一般照明器的效率换算成瓦数,特别是用乳白色透光罩、灯罩遮光时,最好选用1排以上的照明器。
 6. 荧光灯由于光源的光色在总光通量 (光量) 方面会有差额,自然光色和白色相比大约为90%。
 7. 当用于厨房等易于污染之处时,最好选用1排以上的照明器。

12-3 各种房间

12-3-1 客厅（日式房间）

客厅是招待客人的房间，着重于安静的气氛。在房间的中央进行谈话、就餐，有时这里还成为卧室，因而是多功能的房间。日本房屋的材料以木材、纸张为基础的情况居多，因此照明器采用了自然材料（木材、竹材、纸张、玻璃），便会得到安静的气氛，适用吸顶式或悬挂式照明器。当顶棚饰面美观时，最好选用悬挂式而光线可以达到顶棚的照明器。除了这些由顶棚安装的一般照明之外，还为照亮凹间的画轴又不直接看到光源而安装照明器，或对书房式窗扇进行照明，都可使房间宽阔。

在客厅凹间的照明中有根据它的面积采用荧光灯的情况和采用白炽灯的聚光照明的情况，无论哪一种情况都要不损伤珍贵的画轴，又从均匀度方面要求取得一定程度的距离。此外，亮窗、发光窗扇还要求能够清扫照明箱内部，以便容易换灯。

在客厅中多设日式台灯（灯笼）或在装饰搁板上设置照明而作为辅助照明或重点照明。

12-3-2 起居室（日式房间）

起居室是家庭团聚和休息的场所，比客厅更加要求多功能的性质。亮度和气氛最好适应房间的使用目的而能够变化。

形成亮度变化的调光设备除了安装在箱内取代墙上开关而外，还有装入照明器内的形式。为使气氛变化，要选用荧光灯和白炽灯或光色不同的荧光灯等等。光源的组合，要分别适合于团聚、听音乐、看电视等情况。要考虑每个照明器的电源分别设置，无论单独或组合都可使用。

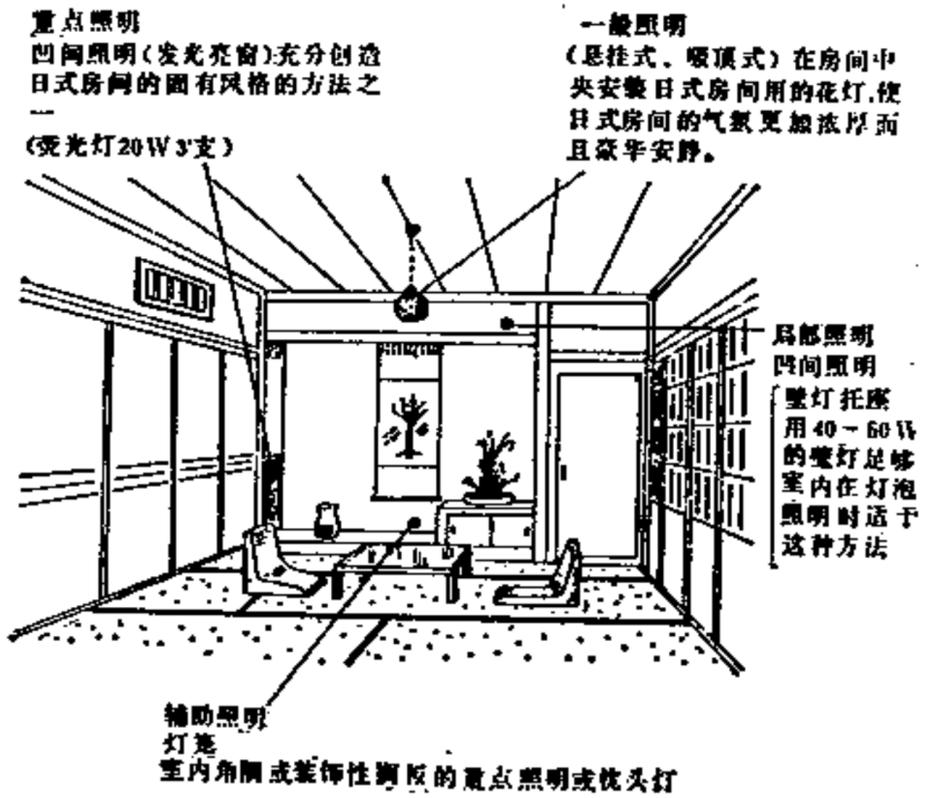
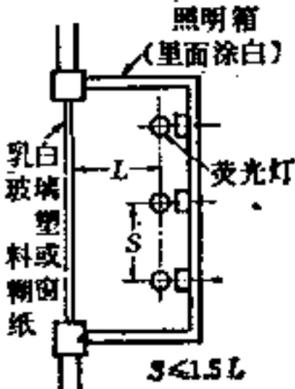


图12-4 客厅照明设计举例

发光墙面、发光窗扇的灯位间距



客厅的重点，凹间的发光窗扇的照明

在凹间侧面设置组装在照明箱内的发光亮窗，光线从侧面发挥特有的效果。如果是小的发光亮窗，可采用大约3支20W荧光灯。

亮窗、发光窗扇要设计得易于对照明箱内进行清扫和换装灯光。

这种方法不仅是凹间，而且在窗少的房间中用作墙的一部分，便可感到房间宽阔，特别在白天可以得到气氛良好的照明效果。

虽然采用特别良好的照明，但如果使瓶花等的颜色难看，还是没有达到目的，因此可以选用荧光灯，使物体显示出自然的颜色。

图12-5 客厅凹间的发光窗扇的照明

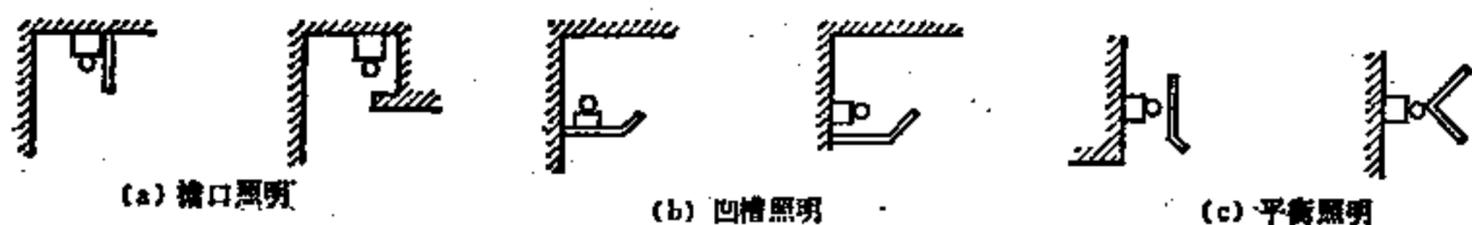


图12-6 建筑化照明举例

在照明器中有的将这些不同的光色的灯组合起来；可以选择开关自由启闭的组合。由于房间中多数人同时做着不同工作的情况居多，因此要进行均匀性的一般照明，在这基础上进行适合各种工作的照明。日式台灯等类可以一并使用。

又起居室往往用做卧室，因此夜间有着附带灯泡的顶棚灯或枕边灯是便利的。

12-3-3 接待室

接待室并不像日式客厅那样具有多功能的性质，它的使用目的限于接待客人，所做的室内布置是一般的。因此希望采用建筑照明，即对商谈有效率的明亮的荧光灯。如在柔和的白炽灯光下与亲密朋友欢谈时，可以采用改变气氛的照明。

选择照明器的关键是它与室内装饰的协调和明亮相比要居于首位。为了得到高贵的气氛也可采用花灯，如果将荧光灯的凹槽照明组合起来，就会更加显目。无论壁灯或花灯都要选用统一的形象。开关方法要按照房间的出入口设置三路开关。窗帷照明、装饰搁板及酒瓶搁板的照明都要有助于感觉房间广阔，防止平淡。

12-3-4 起居室

由于起居室是在多功能方面使用，因而照明设备必须按照各种用途来设计。

从家具开始要着重与室内装饰的协调，希望考虑到家族的行动和交通路线来布置照明器及其配光。

采用带有乳白色丙烯罩的荧光灯照明器的吸顶式而在周围布置几盏白炽灯的暗装式照明器，或中央有白炽灯的花灯而并用荧光灯的凹槽照明器等例子，都富于光色的变化和利用调光设备等的亮度的变化，从而能够改变气氛。这时，如果不检查沙发、桌子或电视机桌等的位置和照明器的位置，例如坐在沙发上阅读杂志时，就会由于自己的阴影而使纸面变暗，或使照明器的光线反映到电视机的画面上去。

起居室要求的照明是使多数人同时进行自己随意的行动而不致干扰别人。希望根据面积有效地使用地面台灯或桌灯。要选用具有稳定性而坚固的台灯类型。特别是地面台灯由于家具等往往会践踏软线，可以使用铠装的电源软线。

12-3-5 书房和学习室

在住宅中书房、学习室和厨房一样，是重视工作环境的空间。

桌上的照明根据它的视觉工作大致分为三类：

1. 精细工作用：制图或不断阅读字典或细小文字的视觉工作。
2. 读书、学习用：比上述1. 的文字要大的情况或较短时间的视觉工作。
3. 一般用：比上述1. 2. 要轻的视觉工作，如阅读杂志或画册等的情况。

如与这些对应采用荧光灯的桌灯，便各有 AA 型、A 型、一般型的区别，要确定出需要的桌面照度。

但是，只有桌灯，视场内的对比就会强烈（亮度对比大），长时间疲劳积累下去，便使眼

睛疼痛，因此必须与适当的一般照明并用。

又书房、学习室是进行思考的房间，会有离开桌子稍事休息的时候，因此要用窗帷照明或调光等显示出宽阔畅快的空间。

表12-3 按照JIS C 8112桌灯（学习、读书用）确定的类型（上）及其照度表（下）

按照桌面照度的区分	按照灯的电力区分	按照型式的区分
AA型	普通型	移动式
A型	高照度型	固定式
一般型①		

注：①一般型并不规定桌面照度。

按照桌上照度的类型	照 度 (lx)	
	桌灯前面半径50cm的1/3圆周上	桌灯前面半径30cm的1/3圆周上
A型	150以上	300以上
AA型	250以上	500以上

12-3-6 儿童室

儿童室是兼作学习室用的儿童起居室，应重视室内装饰和明亮温暖的气氛。

一般照明要按充分明亮而且均匀来考虑。根据年龄要选用能扩大游戏空间的吸顶式或接近成人气氛的装饰性悬挂式等类型。除了桌上的视觉工作需用的照明而外，许多情况下对欣赏音乐时的气氛照明采用了桌灯、下射灯等。

12-3-7 卧室

卧室要选用对创造安静柔和的休息场所有效的照明。安装在顶棚上的照明器要选择眩光少的深罩型或乳白色半透明型，而不要设置在人卧床时头部的上面。要进行符合功能的设计，如布置壁灯或落地台灯而创造出宽绰悠闲的空间，同时在床下设置脚灯，和在入口和床旁设置两方面都能开关的三路开关等。

为了使化妆台照明反映出自然颜色，现在出售显色性优越的光源。

12-3-8 食堂和餐室

在食堂和餐室中家庭团聚、进餐、欢谈。它的照明要将人们的情绪集中到食桌上。

局部照明要采用悬挂式照明器，以突出食桌的效果为目标。

还要设计一般照明，使整个房间在一定程度上明亮，显示出清洁的感觉。作为组合的一例，要选用荧光灯的多灯照明器做成吸顶式或暗装式，拉下悬挂式照明器，使其下端达到餐桌上方大约60~70厘米的位置。悬挂式照明器要选用容易修理的类型，以便经常保持清洁，而且当餐桌移动或来客增加、人数增多时，为了扩大照射范围，一般要使用软线夹子固定软线长度（1.5~2.0米）的类型。

为了取得餐桌用悬挂式照明器的电源，往往在一般照明的照明器上设置拉挂式或插入式插座。

在餐室兼厨房的餐桌的情况下，通常面积狭窄，过度装饰的照明的器成为阻碍，会形成呆板的气氛，因此最好选用设计得尽量富有功能而且简单的类型。用送餐窗口或其他隔墙等与厨房分开的食堂有着起居室的的功能，因此为使整个房间维持一定程度的亮度、家庭多数成员能够自己随意行动而设置的照明回路，要和使意识集中到餐桌上的餐桌用悬挂式的回路分开

设置, 设置方法最好根据需要能够显出照明。

12-3-9 厨房

这是主妇活动的场所, 为了能够愉快而有效率地做饭, 要考虑以功能为中心的照明。

对做饭场所的面积和设备要考虑到交通路线, 设计不出现阴影的一般照明。当开启冰箱或吊柜等的门扇时光线应能入射到里面, 在不得已时要设置专用的辅助照明。

由于受照明的拘束, 又经长时间做饭, 工作就容易疲劳而感到非常辛苦。为了洗涤池灯不致黑暗和不出现眩光, 要安装在洗涤池的上面和餐具搁板的下面。这些照明器也和餐桌上的一样要选用容易清扫难于生锈的类型。做饭用的照明器要尽量运用和餐桌照明用的相同的类型, 或显色性没有大的差别的类型。

12-3-10 浴室

洗澡不仅能擦洗身体, 而且能宽舒已经疲劳的身体, 消除精神的疲劳。要用明亮柔和的光线均匀地照亮整个房间。

在墙上安装壁灯时, 要将照明器安装在与窗垂直的墙面上, 以免在窗上反映出来阴影。顶棚灯要避免安装在锅炉或蒸汽直接笼罩的浴缸的上面。

照明器必须选用防湿式、难于生锈而容易清扫的类型。

12-3-11 厕所

厕所必须在卫生方面明净。如果发暗, 就会不便清扫, 难于保持清洁。

由于它是开关频繁之处, 所以适用白炽灯, 在荧光灯的情况下要用电子启动式的类型。

照明器的安装要避免从便器的上面或背后照射而致出现阴影的位置。为了明确了解开关状态, 还要使用附带表示开灯的指示灯的开关, 以防忘掉关灯。

在浴室有着用帷幔隔开设置便器的设备, 在这种情况下便器旁边的照明器要使用防湿式。

12-4 门厅、深入室内部分、走廊、楼梯

12-4-1 门厅和深入室内部分

门厅是得到建筑物内部的最初印象的地方, 因此特别要求十分明亮和内部装饰的布置。一般来说, 从进门处与深入室内处、走廊、楼梯连续起来, 在其中间没有隔断。因此, 门厅的门开启后进入室内时, 在视场内反映到的范围必须取得一面映象。

根据注视这视场内的某一点而成为视点来确定视场内的重点, 从而决定照明的主要部分。

进门处狭窄而深入室内处宽阔时, 通常重点要放在深入室内处。因而以深入室内处的照明器为主, 进门处和走廊等处为次来处理。这种主次关系对于照明器的亮度、大小、设计等在原则上确定次序后, 便比较容易布置。

在门厅内包括进门处和深入室内处用一个照明器进行照明时, 要安装在进门处和深入室内处的交界附近, 使来访者和接待者隔着照明器相对。由于进门处的地面低, 往往在这顶棚上设置照明器而照射到深入室内的地面, 但是常会从来访者的头上或背后照射, 致使来访者的脸上出现阴影, 或进门处的地面部分狭窄, 使其头上感到光和热, 因此是不可取的。在进门处和深入室内的地面两者都安装照明器, 就可以缓和这样的缺点。

在鞋箱端部悬挂小型吊灯, 或在墙面上安装壁灯, 会感觉到门厅内空间宽阔, 内部装饰

呈现变化,但要注意这些照明比顶棚上的主要照明不要过亮。又由于门厅狭窄而只得依靠墙面照明,就会出现不够自然的阴影,因此最好避免。

吸顶式照明器并无妨碍,但是悬挂式照明器在同一视场内重复出现,是纷乱的,因此在深入室内的地面处安装悬挂式照明器时,在进门处地面部分和进入视场内的走廊等处要采用吸顶式或暗装式照明器,以免重复。当不得已而采用两具以上的悬挂式照明器时,最好使照明器的悬挂高度尽量具有高低差,例如将进门处地面的照明器悬挂在靠近顶棚的较高位置或将鞋箱的照明器吊低一些,而免视感纷乱。

12-4-2 走廊

这是将各处联系起来成为通道而在生活上利用率高的地方,因此为了安全需要较均匀的亮度,但要注意不要比主要起居室的亮度明亮。否则,当由明亮的走廊进入暗些的起居室时就常会感到阴郁的不舒适感觉。

照明器的安装位置不仅按照走廊长度确定,而且要在明确房间的出入口、壁橱、特别是楼梯起步和方向后,为在需要的地方得到充分的亮度而确定其数量和位置,并根据所应照明的面积来选择亮度。

在图12-7中(a)和(b)表示类似的平面图的一部分,在(a)中②由楼梯和卫生间的入口位置而定,③由走廊对面的餐室兼厨房和起居室的入口以及6席日式起居室和楼梯下面的壁橱而定。而在(b)中楼梯、起居室入口、6席日式起居室、卫生间等都可由②解决。但是为了照亮大约 6.5m^2 的范围,必须选择比(a)中的②还亮的照明器。

又在(a)中进入门厅时好容易才看到②,因此仅将①分开选定,但在(b)中当进入室内时,由于①、②都进入到视场之内,因此二者的设计要取得协调,由于门的位置可以主要考虑①,但考虑到以在门厅内接待为重点,还是以深入室内的地面的照明②为主来布置,是富有效果的。

在走廊用下射式进行照明时,如果不考虑照明器的配光使安装间距在大约3米以下,那么在地面和墙面上就容易出现阴暗不均。在宽敞的房间内形成的光线分布富于内部装饰的变化,会使人畅快,但在大约90厘米的狭窄墙面之间明暗不均,便会使人纷乱,所以要避免。

将悬挂式照明器用于走廊照明时,为使搬运什物等不致出现障碍,要吊挂在高处,照明器的下端至少要在地面1.9米以上。

房间没有出入口等且墙面连续大约5米时,就要在墙面上安装壁灯,从而改变单调的气氛,但当走廊宽度狭窄,只有90~120厘米时,往往妨碍步行,尽量不要在墙面上设置突出物。当设置壁灯时,要选择从墙面突出宽度小的类型。

在走廊或深入室内的地面的一角设置洗脸盆时,除走廊或深入室内的地面的顶棚而外,为使不致黑暗必须安装照明,并在身边能够开关。

12-4-3 楼梯

为了上下楼梯的迈步不致危险,需要充分的亮度。回转楼梯部分由于踏步板的宽度有所

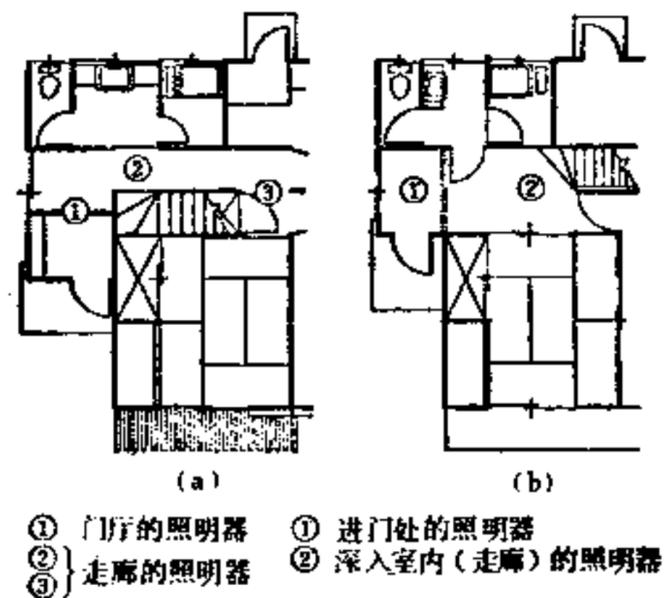


图12-7 门厅、深入室内部分、走廊照明举例

变化，必须特别注意。楼梯照明原则上要使安装在上下楼层的地面或走廊顶棚上的照明器的光线相互交织。

在图12-8中表示出单跑楼梯的例子。由于难支高凳、难于进行清扫或换装光源等维修工作，因此不要在楼梯的踏步板部分的上面安装照明器。

在楼梯的中途有平台时就可将照明器安装在平台的顶棚上，但是照明器的位置对于平台上面的楼梯容易变低，在下楼时便进入视场，因此要选用在视线方向亮度小的照明器，利用来自楼上的光线，从而在照射范围内不致出现极端明暗的差别。

在有梯井的楼梯中在多跑梯段之间有空间余地时，将照明器吊低，往往形成从楼下地面见到的内部装饰的重点，而在这种情况下楼梯照明不应仅仅依靠悬挂式照明器，而要充分考虑到来自楼上的照明进行。当然应从不致妨碍照明器的维修为前提，必须研究不要由于振动等等碰到扶手，而致破损。

楼梯上或平台的照明器要使用白炽灯或瞬时开关式的荧光灯照明器，并使用三路开关，以便从楼梯的上下都能够开关。

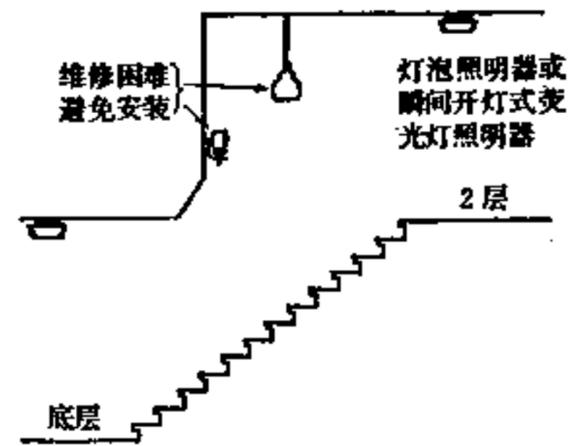


图12-8 楼梯照明举例

12-5 室外和屋旁

住宅外围的照明不仅是夜间的目标或为防止盗窃，而且起着显示建筑物或庭园美观的作用。如大致分类，可分为门灯、门廊灯、露台灯、阳台灯、庭园灯等。安装在室外的照明器有受雨淋之虞，因此必须使用防水式的类型。

12-5-1 大门

大门是住宅的入口。门灯要能容易看出宅名牌、蜂鸣器、电话机等，从防止盗窃方面也要能以适当的亮度照亮门的周围。照明器的形式有安装在门柱上的门柱灯，将名牌、信箱等组装在内的邮筒灯等。

这些都要求具有防雨式的性能。又从器材质量来看，特别要考虑生锈、变色、变质、变形等，和室内相比必须能抵抗恶劣的条件。如果配线能在室内开关，在照明器上安装自动开关器，是便利的。

12-5-2 门廊

门廊照明以从大门处引导进入为目的，因此照明器要安装在避开深入处或建筑阴影部分的位置。当照明器安装在门厅附近时，为了开门之际不要碰撞照明器，不要由门遮挡光线，可以安装在和门相对的墙面上。虽然有屋檐，往往也容易受淋，因此照明器可以采用防雨式或防滴式。

12-5-3 露台和阳台

露台或阳台的照明有助于扩大夜间生活的场地，而且在防止盗窃方面也是重要的。照明器要选择在从室内不显眼的位置。由于雨淋，当然要用防雨式，最好是抗锈性强的照明器。开关要设在身边的走廊等处。

从露台、阳台对于庭园的花木进行投光照明的重点照明，和庭园灯并用，也有助于显示

室外的美观。

12-5-4 庭园

庭园不仅能够滋润生活，而且还是生活的重要场地，必须考虑有效地利用绿化的照明。庭园的照明器除了要求成为景物点缀之外，还要求具有防止盗窃的功能。

在庭园灯方面，有照射范围较为广阔的球型、限定某一场所的固定式、利用池边或花木而配置的支架式等。在与邻户的距离短时，可以利用高度低的固定式。在球型方面还可调节高度的类型。

根据季节，观赏娱乐的植物会有变化，因此也希望适应它来移动庭园灯。如果在几处预装防水式插座是便利的。

由于多用移动灯，因此创制了双层绝缘构造的照明器，以防止触电。为了防止盗窃，多半在夜间也要开灯，所以组装自动开关器在内的类型较多，最好将开关安装在室内，做成防水插座能够开关。

第13章

事务所照明

13-1 事务所的类别

13-1-1 事务所的分类

事务所和办公室的分类可能有种种分类法，这里按照以下事项考虑：

- (1) 高度——超高层建筑的事务所（这里指20层左右以上）、高层建筑的事务所。
- (2) 用途——租赁建筑的事务所，本公司建筑的事务所。
- (3) 面积——大房间式办公室，分间式办公室。
- (4) 工作内容——一般办公室，特殊办公室（设计室、报务室等）。

其中超高层建筑、高层建筑从照明技术的立场来看应注意的事项较多，对这些建筑的情况要加以阐述。

13-1-2 超高层建筑的事务所的照明设计注意事项

- (1) 施工要容易，工期要缩短；
- (2) 与其他设备（空调、防灾、声学等）的关系及系统化；
- (3) 抗震措施；
- (4) 眩光的防止；
- (5) 自然光的利用及不良影响的防止；
- (6) 开关回路对于隔断的变更的措施。

在超高层建筑的情况下由于层数多，因而同一方式的照明设备也就多，所以要和空调、防灾、声学等的顶棚设备形成系统化、一元化，促使施工容易，这些都与建筑造价的合理化有着联系，因此是重要的事项。

从利用天然光和防止不良影响来说，在超高层建筑中包括天然光的优缺点在内影响很大，因此对窗玻璃的透射系数或遮帘等最好从照明技术的立场阐述意见（例如8-4节“PSALI”的概念等可供参考）。

13-1-3 高层建筑事务所的照明设计注意事项

它和超高层建筑的情况基本上没有变化，但在高层事务所的照明中，与超高层的情况下由于同一类型的重复操作而致造价降低的问题相比，建筑整体设计思想的表现、内部装饰的统一等问题却要突出起来。多数情形，还要明确建筑物的用途、办公室的使用目的，特别在本公司建筑的情况下要富有个性。

在这样的情况下，当进行照明计划、照明设计时，必须尊重建筑师的意见和主张，而作为照明技术人员也不应该失掉办公室照明的基本概念的功能性和舒适性。

在大约8~9层建筑的情况下，根据有关法规的规定，其层高较低，因而顶棚内部空间只

寸较小,这样必须研究照明器的构造、布置等。为了参考,在表13-1中〔1〕列举出最近事务所10余处的层高、顶棚内部空间尺寸的一览。

表13-1 事务所的层高和顶棚内部空间尺寸(根据实例)

层数	层高(mm)(平均)	顶棚内部空间高度(mm)(平均)
8~9层	3250~3600(3360)	570~770(690)
13~36层	3560~3950(3700)	900~1250(1080)
32~60层 (国外实例)	3600~4010(3800)	900~1150(1050)

13-2 事务所照明的状态

13-2-1 事务所照明的基本概念

良好的事务所照明当然应该是长时间进行各种细微办公工作的明视照明,因为它是在这里工作的人们过着相当一部分人生的生活场所,所以不能只单单考虑工作面的照明,而且要做成整个房间的视觉环境舒适的照明。

根据最近的照明研究,趋向于重视舒适性,虽然都称做舒适性,但是舒适和愉快必须明确地加以区别。这种区别在日本常常不够明确,而在西欧、特别是在英国似乎有着明显的区别〔2〕。

在办公室照明中所谓舒适应该解释为多数人共有的舒适,无论哪一人都会不舒服,而且没有威胁生活的危险的意思。

在一般办公室的视觉环境中有关舒适的事项列举如下:

- (1) 照度;
- (2) 眩光(从光源中的直接眩光);
- (3) 反射眩光(光源在桌上等处的眩光);
- (4) 光色、显色性;
- (5) 室内亮度分布;
- (6) 室内空间的光流方向和强度;
- (7) 房间的形状和色彩;
- (8) 窗的有无;
- (9) 窗的形状和大小;
- (10) 窗外的景观。

这里的(8)、(9)、(10)等有关窗的事项从来似乎与人工照明没有关系,而相反也有这样的考虑:从没有窗而可减少空调负荷这一点出发,对于节约能源是适合的。还必须考虑:由于窗的大小和入射的光量会使空间在心理方面的大小有所变化。

一般来说,房间显得宽敞是符合愿望的,窗越大,就越增大视觉上接受空间显得大的感觉,也就是开敞感。

根据有关这种开敞感的实验报告说明,由于室内人工照明的照度变大,即使窗洞的大小一定,也会增大开敞感。

按照以上所述,事务所照明的状态不仅要单单考虑有关桌上水平面照度的效率本身,还

必须做成使整个室内环境舒适的照明。

从这一观点出发,包括事务所的实际调查在内,对于在各方面舒适的视觉环境进行着种种研究,希望尽快建立能够简单地用于具体的照明设计上的方法。

13-2-2 照度的确定方法

在确定设计照度时首先应该参照 JIS 的照度标准(参阅10-4节),但 JIS 的照度标准具有一定的幅度,因此采取其中的哪一数值,还要相当慎重。

在确定照度时,不仅对视力方面而且对心理方面的需要程度也必须考虑。例如,还有这样的实验报告^[5],在 1 lx 下能够阅读 7 号活字的文章。但是在为了能看而需要的最低照度和适于看的照度之间却有相当的差距。根据日本从心理学的观点的研究^[6],通常在读书之类的视觉工作中至少需要 500 lx,为了进一步减少眼睛的疲劳就需要 1000~2000 lx。根据 1975 年出版的国际照明委员会室内照明手册^[7]中所报告的各国的调查研究,多数观测人员所希望的照度平均值为 2000 lx。

美国报告了关于为节约能源而降低照度标准时对生产能力的关系的实验^[8]。据说对于键盘穿孔机从 1500 lx 降低到 500 lx 后会降低生产能力 12%,对于仓库作业在 500 lx 上增高 50 lx 会提高生产能力 13.5%,从 1000 lx 降低到 500 lx 会降低生产能力 30%。

这样,办公室的照度如果为了在短期间勉强去看是可以降低的,但是事务工作的时间过长,从人的关系和其他心理方面来说会存在着种种问题,因此在情况允许的范围内最好提高照度。

从节约电力的观点出发,毫不注意地降低照度,便有带来降低工作效率、减退勤劳愿望、增加近视等实际弊害的危险,即使从考虑照明耗能量占全部能源的观点来说,也应该在照明热量的合理处理方法、不使用时光灯等方面考虑采取措施。此外,在提高光源和照明的效率方面当然也应注意。

13-2-3 照度和建造费用

如前所述,事务所的照度在 JIS 照度标准的幅度内如情况允许最好采用高照度,但是所谓“情况”大部分是经济。换句话说,就是建造这幢大楼的费用分配。

建筑的艺术处理、结构、空调、卫生、变电、电力、弱电以及照明等方面的建造费用的分配是困难的问题,其中有关设备方面的分配举例在表 13-2 和表 13-3 中列出^[9]。

表 13-2 设备方面的建造费用分配举例(其一)

设备名称	建造费用比率(%)
照明(500lx)	25
动力(一般动力、空调动力)	11
变电、发电	34
弱电	17
电话总机	13
共 计	100

注: 1. 不包括电梯设备。
2. 在弱电设备中包括火灾报警、指示、电钟、扩声广播、电视共听、电话配线。
3. 总建筑面积 30000 m² 左右。中等程度的装修。照度平均为 500 lx。

表 13-3 设备方面的建造费用分配举例(其二)

设备名称	建造费用比率(%)
照明(300lx)	34.5
动力(一般动力、空调动力)	6.5
变电	17.5
弱电	28
电话总机	13.5
共 计	100

注: 1. 不包括电梯设备。
2. 空调为热风供暖。
3. 弱电设备不包括电视共听。
4. 总建筑面积为 1500 m² 左右。中等程度的装修。照度平均为 300 lx。

上述二例都是装修为中等程度的事务所大楼的例子。在这些照明设备费用中包括照明器费和配线工程费。希望今后不仅对于这些单项设备，而且对于全部设备进行系统的技术改造，以节约资源、节约能源，并且节省人力、提高质量。

13-2-4 环境绿化的办公室和工作照明的处理方法

(1) **环境绿化的办公室** 这是从德国创始的办公室新构图方法，它的外观特征如图13-1、图13-2所示，采用了不规则式桌子的布置，又为了改善环境、保持不受干扰，采用了盆栽植物、高度较低的屏风、柜橱等。还从隔声的要求考虑，在地面上多铺地毯。

环境绿化的办公室未必是以照明为主导形式的，但是作为以视觉环境为主导形式的空间却是饶有风趣的。以下几项是它的目的。



图13-1 环境绿化的办公室举例

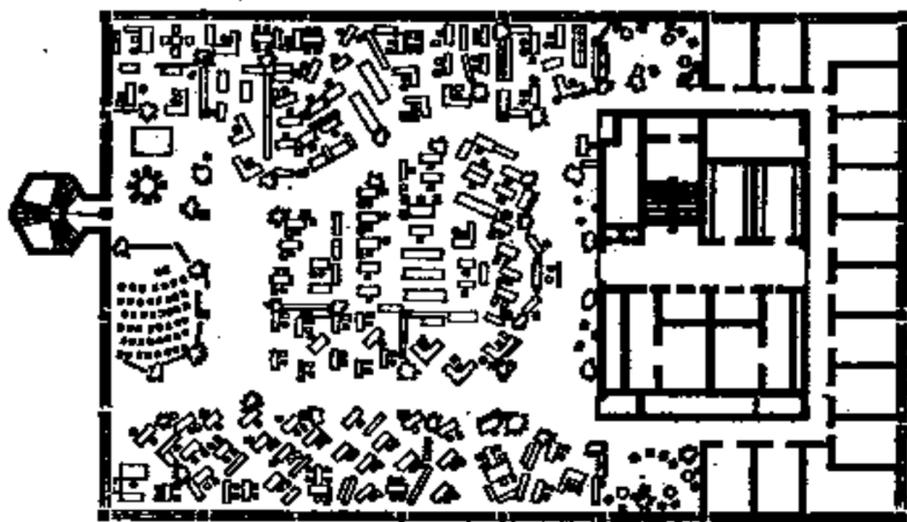


图13-2 环境绿化的办公室的室内布置举例

① 改善全部的透视，能使个人和部门之间的联络畅通，较好地保持人们的关系，创造舒适的环境。

② 布置桌子尽量使部门之内和部门之间的工作流动能顺利进行。

③ 适应工作内容的变化，能立即变换桌子、橱柜、屏风、盆栽植物的布置，而使办公室的气氛经常保持新鲜的感觉。

环境绿化的办公室是这样的环境的综合改善，所以不仅单纯改善空间的构成，而且在照明、空调、声学方面也要进行种种考虑。

在环境绿化的办公室中应该在照明方面注意的事项如下：

① 一般在宽大房间中顶棚的光源容易产生眩光，因此要注意防止眩光。

② 大面积且亮度均匀的发光顶棚会给出郁闷的感觉，因此多数情况是反而要创造出适当不均匀的亮度。

③ 因为以桌子、橱柜可以简单移动为前提，所以空调也要适应这种变化，在设计时要力求空调和照明的协调。

(2) **工作照明的处理方法** 最近在美国针对环境绿化的办公室创造出一种称做工作照明法的新的处理方法。

这一方案是不依靠安装在顶棚上的所谓一般照明，而是利用组装在桌上或橱柜等处的向下或向上照明器，得到没有眩光而符合各个使用者的特性的舒适的照明。在图13-3〔10〕中表示出它的有代表性的例子。

能源危机以来，为了节约能源，在世界各国探讨了各种新的照明设计方案。工作照明就是其中之一。但它也有以下的问题需要考虑：

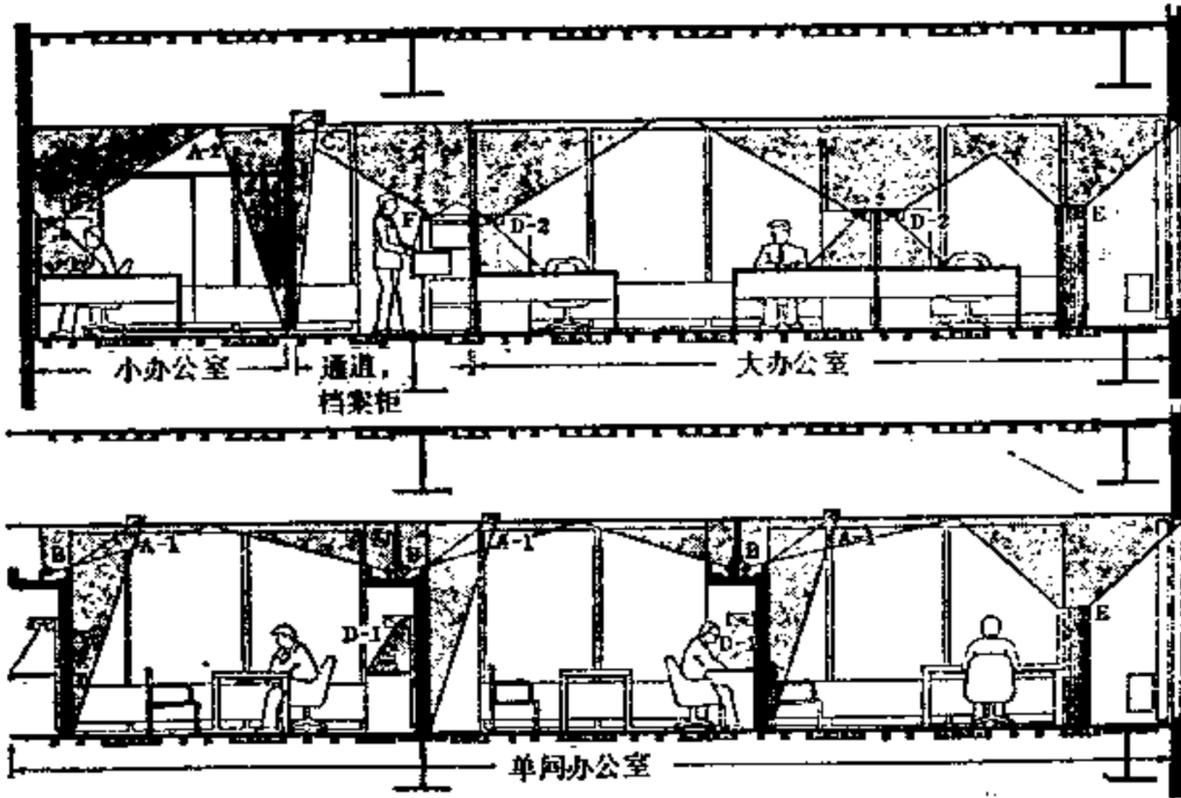


图13-3 工作照明处理方法的例子

A-1: 墙面照明用暗装式照明器 (空间主要照明、重点照明); A-2: 墙面照明用吸顶式照明器 (空间辅助照明、重点照明); B: 隐蔽光源的顶棚面照明用照明器; C: 墙面照明用顶棚暗装式照明器 (空间主要照明); D-1: 个人房间用工作面照明 (光源可动); D-2: 宽阔办公室用工作面照明 (光源可动、向上照明兼用); E: 顶棚照明用可动照明器 (稍暗的空间照明); F: 档案柜用照明

(1) 安装在橱柜等处的工作面用照明光源容易引起反射眩光。

(2) 对于照射到顶棚表面的间接照明的明暗分布的亮度值等还有进一步探索的必要。

(3) 按照惯用的顶棚的一般照明的情况, 要进行200~400 V级的布线, 因而可以减少电流容量, 但是在橱柜等处安装照明器时要变为100 V级的布线, 因此在电容方面是不经济的。

然而如果对每人所占面积明确了具有经济和节约能源方面的优点, 那么从视觉环境的主导形式这一点来看, 在今后的事务所照明设计方面也许会占重大位置。

13-2-5 节约电力用白天人工照明的控制方法

事务所的工作时间几乎都是白天, 一般来说, 有大量的天然光从窗口入射进来。因此事务所的人工照明设备应该与天然光相结合而成为合理的舒适环境。

从窗口入射进来的天然光由于时间、天气而要大幅度地变化, 在对能源问题漫不经心的时代, 也有这样的想法: 只要相当增多室内人工照明量, 就可以忽视由于这种变化引起的不良影响。但是不得不考虑合理使用能源的现在, 就必须具有极力利用天然光, 同时保持室内舒适的视觉环境的方案。也就是说, 对应着从窗口入射进来的天然光的变化, 必须进行室内人工照明的调光或部分开关。

这种调光或开关操作如用繁重的人力方法是很难追随天然光的变化, 采用自动装置则比较便利。

按照“白天人工照明控制装置”使人工照明的照度变化的方法大致分为以下两种:

(1) 连续调光方式: 室内照度平稳变化, 因此比开关方式要舒适, 但在经济方面稍微价昂。

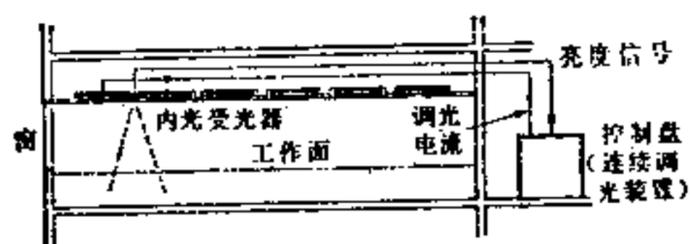


图13-4 白天人工照明控制装置(连续调光方式)感觉天然光变化的受光部分暗装在顶棚内,测出了桌上范围稍广的亮度

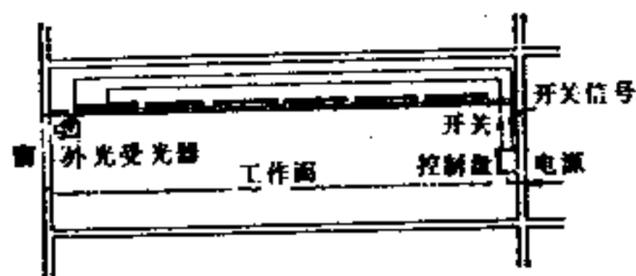


图13-5 白天人工照明控制装置(开关方式)感觉天然光变化的受光部分越过窗口测出了天空亮度等

(2) 部分开关方式: 例如只有窗侧灯自动开关的方法。这是进行节电的最简单的方法, 实用性强。

在图 13-4 和图 13-5 中表明各自的控制方法的构成。

在图13-6中表明部分开关方式情况下照明器布置方法的例子。图上的照明器中涂黑部分表示在白天关灯的照明器。在这种布置中荧光灯照明器垂直于房间纵向, 这是眩光少的照明器的情况。而在裸露型荧光灯照明器等情况下平行于房间纵向, 从防止眩光方面来看自然是好的。

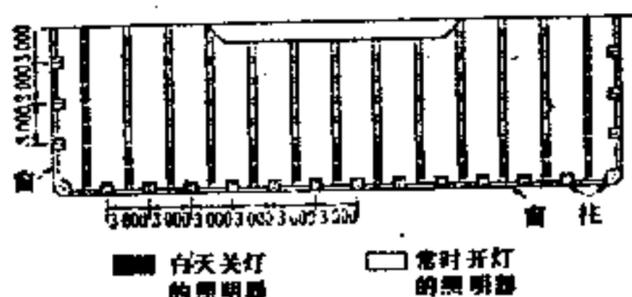


图13-6 部分开关方式情况下的照明布置的例子

13-3 营业办公室的照明

营业办公室指银行、证券公司等以及交通公司导游处、航空公司、导游所等接客用的办公室。

一般情况下的布局是在接近于室外或进口处有客厅, 用柜台隔开, 有办工面积。

13-3-1 营业室的照度

按照 JIS 的照度标准为 $1500 \sim 750lx$, 比一般办公室有较高的照度。这是因为这里是接待客人的地方, 多数情况是房间的布局直接与室外相连, 所以要防止从明亮的室外进来时感觉黑暗。

此外, 这还是为了防止隔着柜台对面的客人以明亮的窗口为背景形成轮廓, 以致他们的表情等显得难看。

因此, 营业办公室的照明必须采用提高桌上的水平面照度, 同时还使客人面部等处得到足够的垂直面照度的照明方法。提高了垂直面照度即提高了墙面照度的照明方式会使房间看着宽敞, 创造出活跃的气氛, 因而对于营业办公室是重要的。

13-3-2 照明器的散热

正如上面所述, 营业办公室需要相当高的照度, 而多数情况是由于建筑艺术的要求较强, 照明器的散热措施不够完备。这就是说, 在建筑艺术方面过于优先, 和照明器的容量相比灯数过多, 因而没有得到预期的照度, 或照明热量的大部分往往容易成为冷负荷。

图 13-7 是在实验上没有考虑温度的影响而制做的荧光灯照明器的亮度实测例子^[11]。左图是考虑了散热而制做的照明器(例如标准制品)的情况, 右图是对同一照明器安灯大约 2

倍的情况。左图的标准制品在开灯后2小时之内几乎同样明亮，而右图的照明器在开灯后大约10分钟就很快地降低了亮度。

在这种情况下，例如在照明器外部即使安装镇流器，而由于灯的温度上升会增加灯的电流，因而镇流器可能过热。

不论哪一种情况，这种现象在理论上是熟知的，但是实际上多数情况似乎是没有得到活用，因此希望加以注意。

13-3-3 照明器的维修

营业事务室特别是银行营业室是建筑艺术堂皇的建筑，而且整个营业室多数成为顶棚高的空间。更由于需要高照度，所以灯数非常多。因此从换灯开始，对照明器、镇流器的维修、检查要能容易进行。构造必须做得尽可能进入顶棚里面进行操作。此外，还希望在顶棚里面设置检查灯。

又由于它和建筑艺术的关系，往往在高空间的顶棚上采用大型花灯，这时会有相当的重量，所以应用电动式或手动式链滑轮是安全便利的。

13-3-4 顶棚高度和照度的关系

在银行营业室等建筑中，从建筑比例和给予客人的印象等方面来考虑，多数情况要提高顶棚。提高顶棚即提高照明器的安装高度，为了在同一桌面上得到照度，就需要多设光源，这从经济或维修作业方面都认为不利，因此这是在照明设计时各种意见的分歧所在。

大家熟知：在点光源的情况下照度与距离的平方成反比，而在非常长的线光源和非常大的面光源的情况下则遵守其他的定律（在理论上无限宽阔的房间中整个顶棚为均匀的面光源时，与顶棚高度无关，地面照度是一定的）。

在宽阔的房间中照明方法是整个顶棚为发光顶棚或与其近似时，对提高顶棚而减少地面照度或增加耗电量的程度等要预先了解其大致倾向，这从建筑设计、设备设计和维修等方面来考虑是有用的。

在图13-8〔11〕中说明在面积为30×160米的房间中净高按4、6、12米变化时与在7×7米的房间中净高按2.6、4、6米变化时地面照度的变化状况作为一例。图中的4根线表示4种反射系数条件的情况。这4种条件如图的附表所示。

照明器的类型为嵌装下面露明型或嵌装乳白板型等具有圆配光的配光特性的制品。

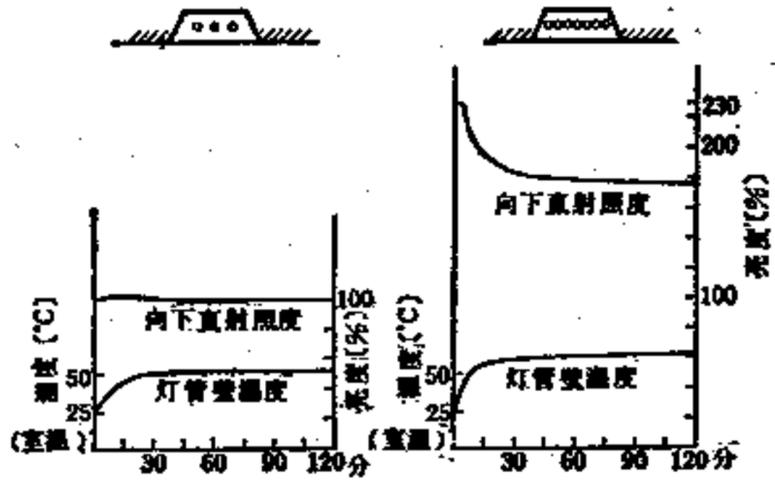
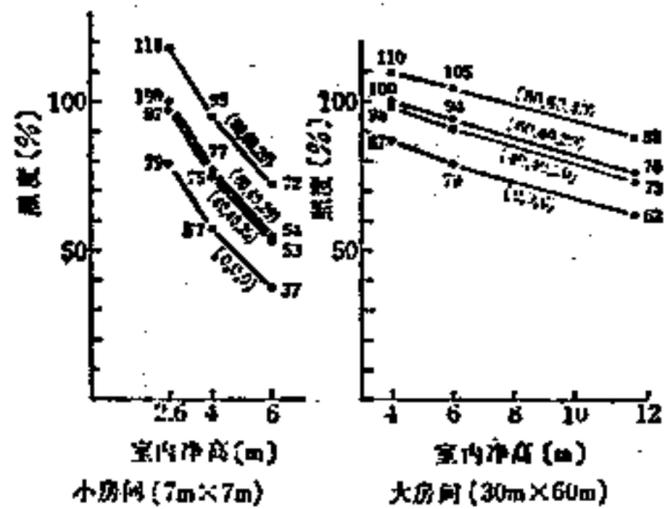


图13-7 没有考虑温度影响而制做的照明器的亮度降低的例子

左图为考虑温度影响而制做的普通荧光灯照明器(FLR40×3标准制品)开灯后经过2小时亮度也一定，右图为在同一照明器上安灯大约2倍的情况，虽然希望照度也达到2倍以上，但由于散热不良，开灯后大约10分钟亮度就很快降低



- 计算条件
- 大房间 30m×60m，室内净高4m，6m，12m
 - 小房间，7m×7m，室内净高2.6m，4m，6m
 - 照明器的类型，顶棚嵌装乳白板型
 - 室内反射率〔%〕

类型	部位	顶棚	墙面	地面
No.1		80	60	20
No.2		60	40	20
No.3		40	40	20
No.4		0	0	0

图13-8 净高和地面照度的关系

以顶棚、墙面、地面的反射系数为 60、40、20% 时作为标准，用曲线的横向数字表示照度比。

从图中可以了解：在 7×7 米程度的小房间中和一般净高 2.6 米时相比，达到净高 6 米后的地面照度大约为 50%。而在 30×60 米的大房间中对于净高 4 米时的地面照度，虽然净高达到了 3 倍的 12 米，照度的减少只是大约 25% 的程度。反过来说，即使大幅度降低了净高，照度的增加却是微量的。

因此，在确定净高时，即使从节约能源的观点来探讨，在大房间中也与照度方面很少关系，反而从空调等方面来探讨是重要的。

13-4 其它场所的照明

13-4-1 门厅照明

门厅是办公楼的进出口大厅，给出最初印象的重要场所。它以白天使用为主。多数情况是入射多量的天然光。而且因为它是通行、通过的地方，所以在照明设计时采用使它只有若干水平面照度的设计方法是没有意义的。

在门厅的照明设计时应该考虑以下事项：

(1) 应该照明的场所和对象 要在图纸上充分调查天然光入射状况或从大厅内观看时的亮度分布情况。探讨在白昼应该进行人工照明的场所和对象。

(2) 光源的光色和色温 从门厅的结构和风格考虑，应该创造出与室外相连的感觉的空间或与室外隔绝的感觉的空间等等，要和建筑设计人员很好地协商，以确定人工照明的光源的光色和色温。

(3) 墙面和人的面部 要考虑提高门厅主要墙面和行人面部的垂直面照度（天然光为背光时面部的照度）的照明方法。

垂直面照度值应该考虑进入门厅时或相反时眼睛的适应状态来确定。一般来说，人的面部由于天然光的入射状况或门厅的种类、风格而不相同，但是需要大致能够识别程度的照度。可由表 13-4 和表 13-5 进行核算。

根据经验，即使在天然光的影响少的门厅中在背光的情况下（面部）也需要 150 lx 左右。

表 13-4 防止人的面部轮廓显像需要的面部照度与背景亮度之比 (R_1)⁽¹³⁾

阶 段	$R_1 = \frac{\text{面部照度}}{\text{背景亮度}} \text{ [lx/(cd/m}^2\text{)]}$
I 为使人的面部不出现轮廓的下限	0.07
II 为能看到人的面部的眼鼻的下限	0.15
III 稍好一些	0.30

表 13-5 对于各种累积出现率的天空亮度⁽¹⁴⁾ (kcd/m^2)

累积出现率(%)	北	东	南	西
50	4.4	4.2	7.2	4.6
75	6.0	6.5	10.9	7.3
90	7.4	10.2	15.8	11.3
99	9.8	18.0	26.6	25.5

图 13-9 是门厅墙面照明的例子。



图13-9 门厅白天用的墙面照明举例^{〔1〕}

在这一门厅中对于白天行走时人的垂直面照度,由于可以得到充分的天然光,因而不需要照亮整个大厅的人工照明。这幢建筑是地上32层的超高层建筑,它的设计原则是创造出从外面来看这幢建筑时,得到宏伟的筑筑由中央白色的核心强劲地支撑着的感觉,因此采用了用射灯照在白色核心的墙面的照明方法。此外,在夜间在接近外围的玻璃顶部有下射灯,由于它斜墙面照明,

使厅内的地面照度达到300~500lx

13-4-2 经理室和理事会议室的照明

因为进行重要的商谈或会议的情况较多,所以要清晰地看到人们的表情。

而且这些房间从风格上要求多数要设置相当大的窗口,在白天靠窗的人们会出现轮廓,因而他们的表情往往不容易看到。但只要使人们的面部具有足够的垂直面照度就能够解决这种现象。当进行这些房间的照明设计时,应该比水平面照度更加重视垂直面照度来设计。

这就是说,这些房间的照明要重视与内部设计相配合的装饰要素,但也要充分注意这些照明器的配光状态来设计,根据情况只重视艺术性的照明器而使人们的面部得不到需要的垂直面照度时,就应该考虑采取另外追加不显目的照明器等措施,以保证投向人们的垂直照度。

对于没有窗的房间的情况,就没有这样考虑的必要性,因为一般可由桌子的反射等得到相当的垂直面照度。无论哪一种方法,必须注意不要成为只考虑艺术而忽视配光的照明。

在有窗的情况下防止靠窗的人们显出轮廓而需要的面部照度,可由表 13-4 求出。例如,假设窗的亮度为 $4000\text{cd}/\text{m}^2$, 由表 13-4 对于面部的垂直面照度需要值的最低下限就是 $4000 \times 0.07 = 280\text{lx}$ 。

又为求得各个方向的窗的亮度可以应用表 13-5。

此外,为了在会议室中放映幻灯或电影,希望预先做出可调光的设备。

参 考 文 献

- | | |
|--|---|
| (1) 青藤英夫:超高层ビルの設備システムと照明・第Ⅱ回照明設計公開講座,(昭48)20 | No.29(1975) |
| (2) 乾 正雄:これからの照明設計,建築界,7(1976)97 | (8) Electr. World, 12(1975)86 |
| (3) 乾,他:日本建築学会論文報告集 No.192,(1972)49 | (9) 青藤英夫:照学誌,11(昭45)643 |
| (4) 安富重文,他:照学誌,11(昭50)552 | (10) 日経アーキテクチャー,12(1976)86 |
| (5) 須田棟介:照学誌,23(昭14)329 | (11) 松田宗太郎:照学誌,12(昭52)728 |
| (6) 照明学会:やさしい明視論,(昭52)61 | (12) 照明のデータ・シート No.398,照学誌,8(昭48) |
| (7) Guide on interior lighting CIE publication | (13) 田淵義彦:照明教室 No.36 照明学会,照明普及会,(昭49)37 |
| | (14) 田淵義彦:照明教室 No.36 照明学会,照明普及会,(昭49)40 |

第 14 章

学校和图书馆照明

14-1 阅读和可见度

在工作和阅读等场所，如果照明方法合理，照明质量好时，照度愈高，视力则愈好，看东西也愈容易。但是，适宜的照度，不仅要从经济上考虑是否合算的问题，而且也要从人的主观感觉是否舒适来考虑。

日本照明学会的照度问题调查委员会在定量评价可见度方面，采用系列分级法，对解决适宜照度问题是一个大的进步〔1〕。

于是，从一般的杂志中选取 300 个大小不同，与纸的亮度对比也不同的汉字作为视标，在 12.5~1120lx 的照度范围里，由被试者进行辨认。辨认时的难易程度用预先确定的相应用语来表示，经计算，所得结果如图 14-1 所示。对易读性为 100 的情况，所需的照度是相当高的。一般情况，易读性为 70 时就可以了。易读性为 70，字和背景（纸）的对比为 80%，视距为 30cm，阅读 2mm 的方块铅字（10 级，7 磅）时约需 2000lx 的照度。对易读性为 55 时，所需照度为 150lx。若阅读 4mm 的方块铅字（20 级，14 磅）时，易读性为 70 所需照度为 300lx。

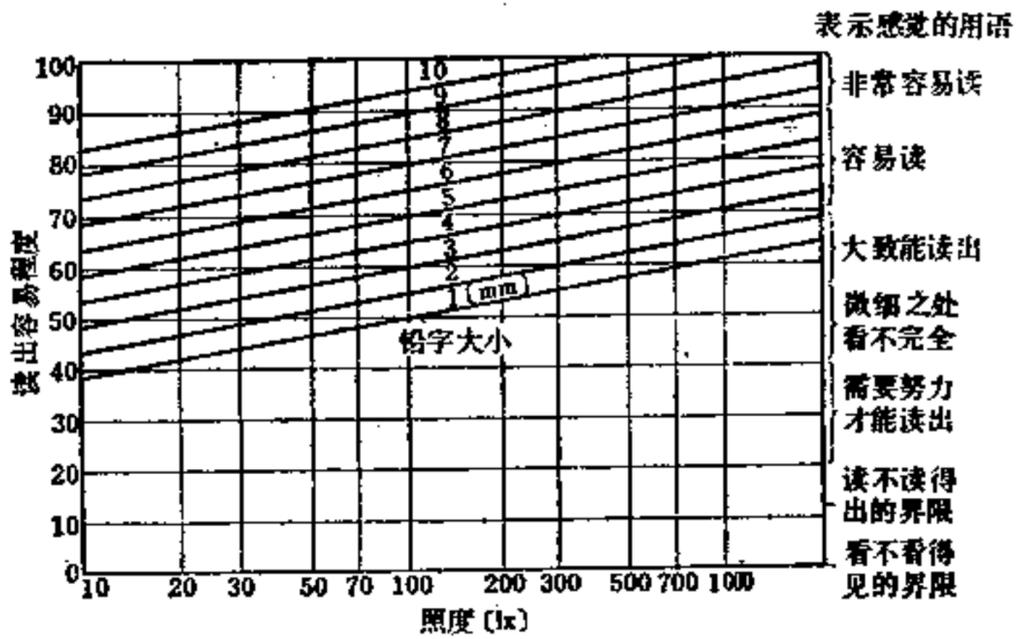


图14-1 照度和易读性关系

(当汉字和背景的亮度比为80%，观察视标距离为30cm时)

这样按照文献〔1〕的试验结果（图 14-1）可用以下一般公式来表示：

$$S = 11 \lg E + 0.5C + 9 \sqrt{D} (A - 1) + 32$$

式中， S 为易读性； E 为照度（12.5~1120lx）； C 为亮度对比 = 9~94%， D 为观察距离 = 30~200cm， A 为铅字大小 = 0.2~1.0cm。

由上面所述看出，关于阅读汉字的视觉工作的适宜照度是根据相应的易读性大小来确定的。不过物体的可见度大体上是取决于视角、对比、亮度和时间四个因素。对阅读文字以外的视觉工作的适宜照度也可按可见度的要求和控制在什么程度来推断〔2〕。

14-2 学校的照明

14-2-1 学校照明的方法

学校照明的目的是为学校教育的视觉工作创造出光的数量和质量适当、环境明亮的照明条件。从防止学生近视考虑，对教室和住宅学习室的良好照明需要进行探讨。

对白天上课的学校，从校舍的位置、教室的结构等考虑采用单侧采光，这样靠窗部分和靠走廊部分的亮度差很大。特别是日本的北海道等地区，由于日照和气候关系，在冬季时，就是白天也很暗。因此，需要设置人工照明设备。这些照明设备按分区进行开关控制，用人工照明补充教室内照度不足的部分，使照度分布均匀。在阴天、雨天和冬季等期间，因照度低，上课时教师可随时把灯打开；在晴天时，由于直射阳光照进教室，为保护学生视力健康应设立窗帘或百页帘等。

在晚上教学的学校，特别需要有足够的照明设备。由图 14-1 看出，小的铅字要求的照度高，特别是高年级教室，照度要求更高，从降低视疲劳考虑，应创造良好的照明环境〔3〕。

14-2-2 良好照明的主要条件

在阐述良好照明的主要条件之前，我们首先介绍一下良好照明所带来的效果：

- (1) 学生——降低视觉疲劳，注意力集中，学习效率高；
- (2) 教师——讲课轻松，注意周到，教学效果好；
- (3) 学校管理——环境变好，设备利用率高并防止事故灾害。

(1) **照度适当** 学校设计时，照度可按 JIS Z 9110 照度标准中的附表 3-1 学校(室内)和附表 3-2 学校(室外)选取(参阅 10-4 节)。

一般说，制图室和缝纫教室可按 1500~300lx 设计，一般教室和试验实习室可按 750~200lx 设计。

(2) **减少眩光** 观察物体的照明，当光源的直接眩光大时，就降低物体的视度。图 14-2 说明了这个关系。光线方向和视线所夹角度愈小，视度愈低。另外，还应尽量减小射进眼睛中的光源的发光面积。

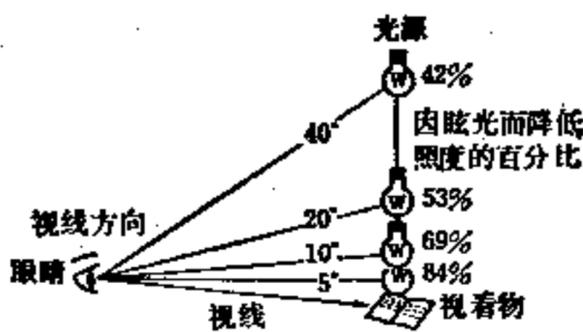


图14-2 因眩光而降低照度实例

表14-1 教室的最大亮度比

视看对象和背景表面之间	3
视看对象和离开它的表面之间	10
灯具、窗口和附近表面之间	20
普通视野内面与面之间	40

(美国照明学会, 1947年)

随着射入眼睛的照度的提高，光幕现象也增强，物体视度也相应下降。为了防止光幕反射，对荧光灯照明场所，如图 14-8~图 14-11 所示，把灯具和黑板面垂直布置，使学生看到的灯具发光面积减小。

另外，明暗对比太大，有眩光时，就会使人感到不舒适，有时看不见东西，并引起视觉疲劳。

眩光主要是取决于视野内的亮度比，表 14-1 所推荐的亮度比值，在设计时不能超过。

(3) **黑板照明** 由于黑板是垂直的,若单靠顶棚照明,黑板面的垂直照度是不够的,有必要设置专用灯具。对黑板照明的要求条件如下:

① 学生方面——要求不能由黑板产生反射眩光,容易看清黑板,从黑板照明灯具来的直射光不要射进学生眼中。

② 教师方面——要求教师上课时不感到眩光,黑板照明灯具的位置应在水平视线以上的仰角 45° 之外。当教师在黑板上书写时不应感到光源的反射眩光。

③ 教师和学生共同要求——黑板面垂直照度要高,上下左右的照度分布要均匀,看东西容易看得清。

图14-3表示黑板照明和教师与学生的相互关系。黑板照明灯具的位置由 l 变到 l' 以上时,第一排学生会产生反射眩光。背向黑板站在讲台上的教师的视平线以上 45° 范围内,要注意黑板照明灯光产生的直射眩光。

为提高黑板面的垂直照度,在决定黑板照明灯具的位置时,图14-3所示黑板中心的仰角大约为 55° 。

图14-4表示黑板照明灯具的高度和灯具离黑板面距离 l 的关系。图14-5所示宫岛小学的黑板照明就是利用图14-4设计的。

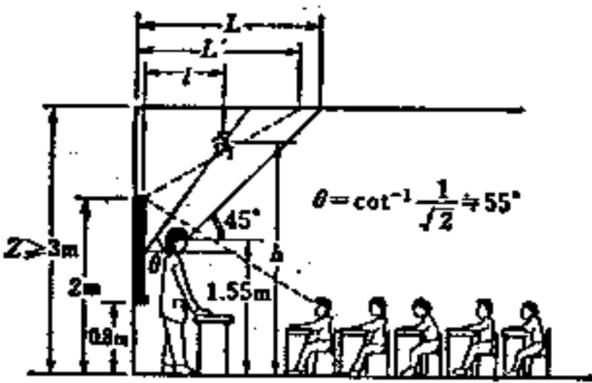


图14-3 黑板照明和教师与学生的相互关系

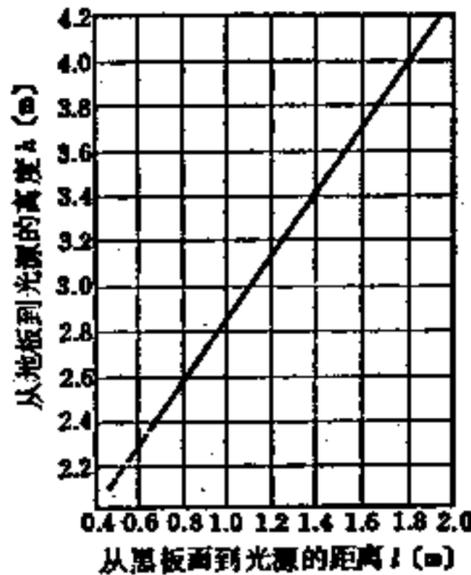


图14-4 确定黑板照明灯具位置的关系图



图14-5 宫岛小学黑板照明的实例

当教室地板面积大于50平方米时,学校教室的顶棚高度应在3米以上。但是,按日本建筑基准法实施条例等21条的规定,各种学校的幼儿园应在2.1米以上。

(4) **室内装修** 教室各表面应用明亮的无光泽的色彩装修,以造成明亮而稳重的室内环境。反射率可按图14-6的数据设计。室内的色彩调节设计可用以下颜色:

(5) **侧面采光** 对一般的单侧走廊式教学楼,按标准教室的单侧窗一直设计到顶棚处。这样,晴天时白天的照度可达 $600lx$,平时可达 $300lx$,室内最低天然采光系数为2%。可是在阴天,教室平均照度只有 $100lx$,靠内墙处就更暗了,因此,需采取措施把靠窗处的光线传送到教室深处。

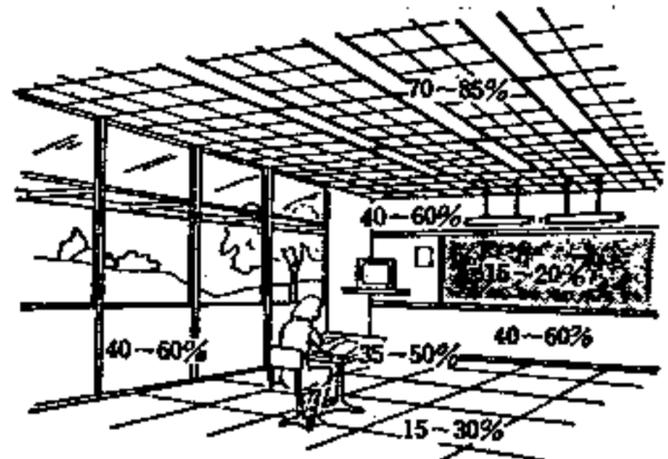


图14-6 教室内表反射率的推荐值

- 顶棚: 白色
- 墙面: 高年级教室用浅蓝或浅绿色
低年级教室用浅黄或浅红色
- 地面: 用耐脏而不刺眼的颜色
- 黑板: 用无光泽的绿色

图 14-7 表示出几种一般教室的剖面形式和侧面采光的照度分布曲线的实例。图 (a) 表示侧窗中部带和不带遮阳板的情况。图 (b) 表示在侧窗上采用定向性玻璃砖的情况。这是最佳方案，因为它可将光线有效地传送到教室的深处。图 (c) 表示一般采用遮阳百页板的情况，百页板的角度可变或可折叠，这种方案有适应室外光线的变化的优点。百页板要用明亮的白色装修。另外，图 (d) 表示在教室内侧墙面设置高侧窗，使教室深处变得明亮的情况。这样的双侧窗采光情况，加之考虑遮阳的措施，就能得到稳定而良好的采光效果〔4〕。

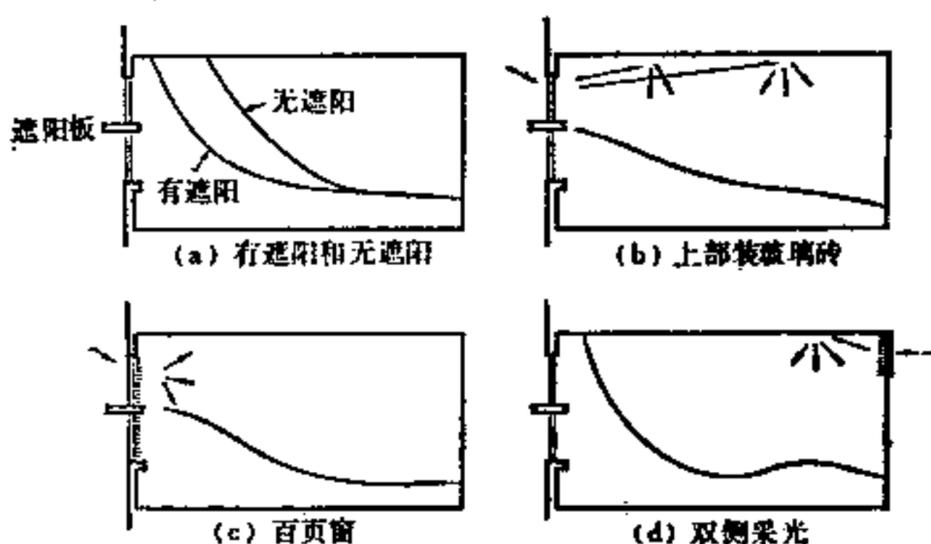


图14-7 教室剖面 and 侧面采光的照度分布曲线

然而，目前在日本的小学里，通常把视力不好的儿童安排在前面的座位。另外，按纵行分组，每一纵行为一组，每隔一周，小组由靠走廊一侧顺次向靠窗一侧移动。这一规定对各年级学生都是一样。因为窗户附近有直射阳光、日照通风和从走廊侧的缝隙来的凉风等，使教室各部分的条件差别很大。所以从教室的设施考虑应很好地加以注意。

这样，若不考虑上述建筑设计问题，必须在教室内设置人工照明。那些不考虑人工照明的单侧采光教室，可以说是明亮不均的教室采光〔5〕。

14-2-3 学校照明的实践

(1) 一般教室的照明 图 14-8 表示顶棚高 3 米，面积为 7.5×9 米的一般教室的照明设施布置的实例。教室一般照明用 15 盏 2 根 40 瓦的荧光灯灯具分三排连续布置。当室内用浅色装修，维护管理良好时，如表 14-2 所示的使用不同类型的灯具，在课桌面上可得到的平均设计照度和初始照度值。

表 14-2

荧光灯灯具种类	设计照度 (lx)	初始照度 (lx)
逆富士型吸顶安装灯具	760	1060
嵌入式下面开敞型灯具	750	1040
嵌入式下面带乳白罩灯具	440	710
嵌入式下面带棱镜透光罩灯具	570	920

上述情况，为了降低眩光程度，按 4-2-2〔2〕的方法将灯具垂直黑板面布置，和逆富士型或嵌入式下面敞开的灯具比较，用带乳白罩和有机棱镜玻璃罩灯具，虽然照度有所降低，但是对防止眩光有利，可提高照明质量。

黑板照明如图 14-8 所示，使用单管荧光灯并安装在带侧面反光器的灯具内，灯具吊装，角度可自由变动。当两个灯靠近安装时，黑板面上产生的平均初始照度为 350lx。

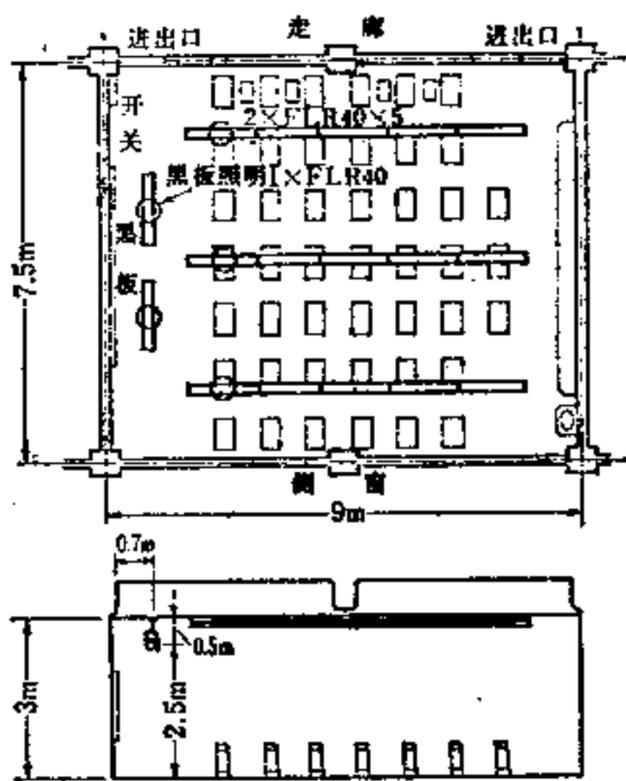


图14-8 一般教室的灯具布置举例

图 14-9 表示使用半嵌入式双管 40 瓦荧光灯灯具照明的实例。图 14-10 表示由教育设施研究部门所研究出的标准系列的顶棚照明的实例。灯具嵌在 1.8×1.8 米模数的顶板里, 灯具使用嵌入式下面敞开的双管 40 瓦荧光灯灯具。这是为缩短工期, 降低建筑造价的最新的照明方法。

(2) 特种教室的照明

制图室和缝纫教室属于精细的视觉工作, 要求高照度, 可在 $1500 \sim 3001x$ 的照度范围内选取适当照度进行设计。

理工科教室的试验台和技术课教室的工作台等, 由于工作位置和方向多变, 并且往往需要分组进行工作, 灯具应布置在工作台的正上方, 以便防止产生手影和头影。

语言学习室中, 因学生座位用隔断隔开成小格, 学生身边较暗, 在灯具布置时应注意这一特点。

美术教室要求正确识别色彩, 应采用显色性好的高级荧光灯 (delux 型荧光灯)。另外对有雕塑特点的绘画工作, 可使用投光灯之类的设备照明模特儿。

在电化教室里, 由于有幻灯、16毫米电影机、实物投影仪、高架电影放映机 (OHP) 等设备, 同时为了在教室播送电视, 需要设有调光设备。包括安装在窗口的暗幕 (安装在教室一侧的浅色布帘) 能在讲台上遥控, 自动地开关就更好了。

图 14-11 为小学低年级的电化教室的实例。该教室使用下面装有乳白有机玻璃罩的 40 瓦双管嵌入式荧光灯灯具和 60 瓦下射式灯具, 并为连续排列的照明方法。一般照明和黑板照明设备的开关通常是设计在教室出入口旁边的墙上或讲台处的电气控制板上。教室里的视听设备有电视机、高架投影仪和放映 16 毫米电影用银幕等。

阶梯教室一般能容纳 2~3 个班的学生, 由于顶棚结构关系, 通常用平行于黑板的连续布置的荧光灯照明。在这类教室, 为了防止给学生产生眩光, 应使用装有乳白或透明棱镜的有机玻璃罩灯具, 也可用间接照明, 防止直射光进入学生眼里。另外, 由于阶梯教室不便安放梯架, 对光源和灯具的维护管理, 应考虑能在顶棚里进行。

图 14-12 为阶梯教室的实例。该教室为折板结构顶棚, 在顶棚下部开口, 在连续排列的荧光灯下使用乳白有机玻璃罩, 目的是为了防眩光。在电视机、高架放映机用的银幕外, 将能上下活动的黑板迅速向上移动后, 幻灯和 16 毫米电影就能在外面的银幕上放映。

(3) 开放式学校的照明 最近, 通过对学校教学环境的评价所得结果, 为了实行开放式教学, 学生的学习使用分组教学方式。这种开放式学校, 在日本得到推广〔5〕。



图14-9 日本工学院专科学校的教室照明



图14-10 加平小学教室的最新顶棚照明系统



图14-11 宫岛小学电化教室的照明

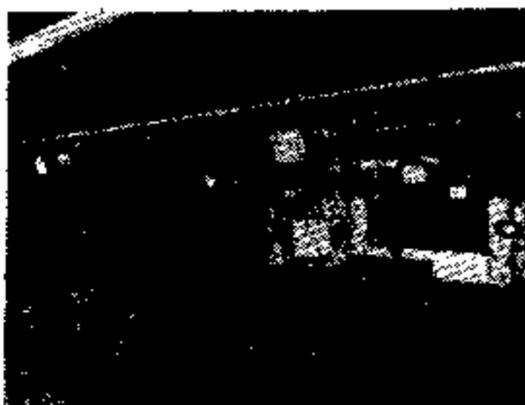


图14-12 日本工学院专科学校的阶梯教室的照明

图 14-13 为分组教学的实例。每一组学生有 120~150 名儿童。图 (a) 表示主要教师在规定位置讲课，两位辅导老师，一名开高架放映机，一名在坐着的儿童中巡回，对学生进行启发、指导和辅导。随后，3 名教师按不同主题，分别对三个小组如图 (b) 那样轮流进行教学。或是如图 (c) 那样按不同主题或不同进度，用不同的讨论方式进行小组学习。还有如图 (d) 那样按不同进度学习，进度快的自学，进度慢的集中由二名教师辅导，对一般进度的学生由一名教师进行辅导。

对这类教室，由于房间里有黑板、布告牌、银幕等设施，并混在一起，平行地进行各种教学活动。因此，它的照明应考虑使用方便，并能调光和分区开关。

图 14-14 为开放式学校照明设计的二个实例，一例为使用嵌入式下射窄光束照明器照明，另一例是隐蔽式反射顶棚（荧光灯和吸声顶板的组合）。对空间这样大的教室，上述照明设备显得有些简陋，最好是做成带格片的发光顶棚那样的照明设备。

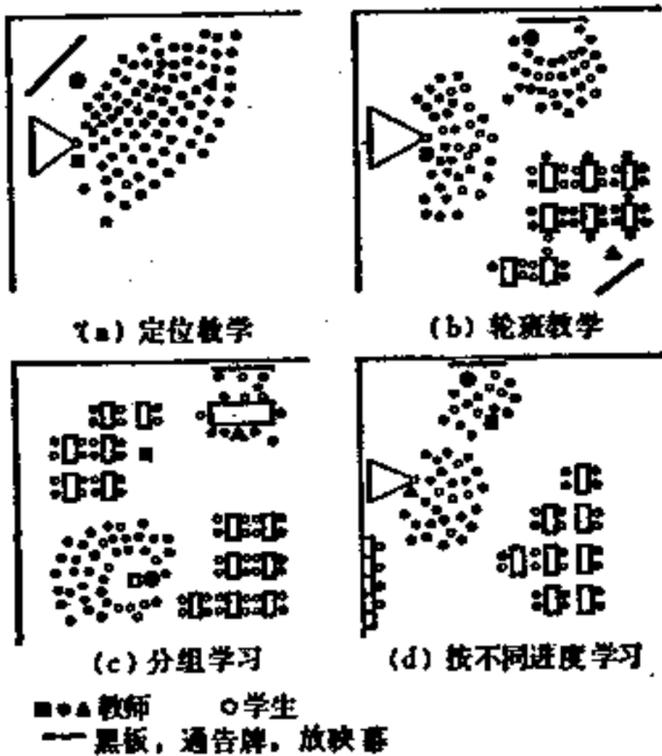


图14-13 开放式学校分组学习的举例

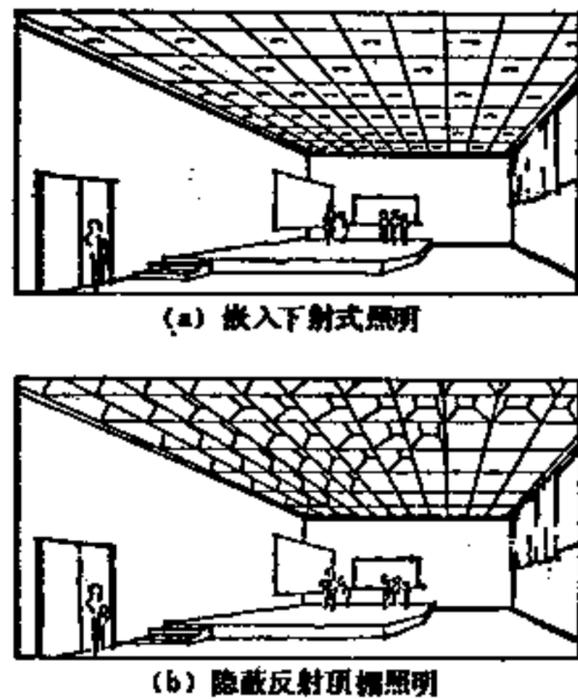


图14-14 开放式学校照明设计实例

(4) 其他照明 走道、楼梯是学生经常走动的场所。如果这些地方比教室过于阴暗，也会导致设计的失败。因此，要求达到教室照度的 1/3 为宜。JIS 规定按 300~75lx 设计。如果考虑节能，采取间隔开关灯的办法是不大好的。

通常在学校不设计安全照明，但是对有观众席的体育馆和作课堂使用的房间则需设计安全照明。太平门的标志灯和疏散用的指路灯应按消防法规实施通则来设置（参阅 11-5 节）。

有关学校的体育馆和操场可分别参考 21-1 节和 21-2 节来设计。最近作为体育设施的整个设备补助费，日本政府规定由国家负担 1/3。国家补助项目的条件如下：

(1) 定时制高等学校的室外体育设施：

室外运动场——平均照度 50lx 以上场地面积为 900~6000m²

室外游泳池——平均照度 100lx 以上池面积至 600m²

(2) 对居民开放的学校体育设施：

室外运动场——平均照度 50lx 以上场地面积为 900~6000m²

体育馆——平均照度在 200lx 以上馆面积至 400m²

这些场所的减光补偿系数按白炽光源的 0.77 考虑, 汞灯和荧光灯按 0.56 考虑。也就是说, 按 JIS 标准的上限设计即可满足上述条件。还有, 学校体育设施在夜间开放时, 除运动场应考虑照明外, 还需考虑厕所、更衣室、谈话间和吸烟室的照明。

14-3 图书馆的照明

14-3-1 图书馆照明方法

图书馆有公共图书馆、学校图书馆、专用图书馆和保存用图书馆等, 特别是公共图书馆近来变化很大, 如藏书量增加, 由收费变为免费, 由闭架变为开架, 工作重点是借书, 馆内还设立咨询服务和拥有复印、缩微胶卷阅读设备。即使如此, 人们不可否认, 日本和欧美比还有一定差距。

14-3-2 图书馆照明实践

(1) 阅览室照明 图书阅览室应按 $750\sim 200lx$ 的照度设计。同时要求避免扩散光产生的阴影, 光线要充足, 不能有眩光, 应尽量减小书面和背景的亮度比。通常是用荧光灯照明。从发展看, 有从灯具直接明装在顶棚面上转用嵌入式下开敞形、嵌入式下带乳白玻璃或透明棱镜罩的灯具的趋势。

图 14-15 和图 14-16 是两个地方市立图书馆照明的实例。它们都是使用 H 型 40W 双管荧光灯灯具, 直接吸顶明装在顶棚上, 而且在同一室内可看到开架书库。



图14-15 气仙沼市市立图书馆阅览室的照明情况



图14-16 气仙沼市市立图书馆儿童阅览室的照明

在特别阅览室里, 经常使用单人小室阅读机。在这类场所, 最好使用荧光灯台灯, 书面照度应是 $1500\sim 300lx$ 的高照度。这样, 长时间阅读也不致有不良影响。

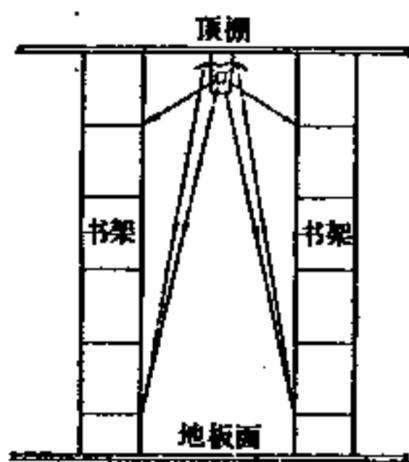


图14-17 书库内的书架照明



图14-18 东芝中央图书馆的书库用40W反射式荧光灯组交错布置的下射式照明实例

(2) 书库照明 因图书馆由闭架向开架转移, 故书库照明和阅览室同样按 $750\sim 200lx$ 设计。需注意的点是不能让顶棚的光源的光线直射到人眼里, 不能有眩光, 书架的垂直面照度要均匀, 特别是要确保书架下部的照度要求。

像图 14-17 那样设计使用反射面的效果是好的。又如图 14-18 那样, 在书架的底部交错布置装有反射荧光灯灯箱照明, 对图书的出纳管理是很有好处的。还有, 为了出纳需在书架上安装照明开关的作法, 对节能来说, 特别是以往的闭架式书库是很有效的方法。

参 考 文 献

- (1) 印東, 河合: 照学誌, 49, 2 (昭 40) 52~53
- (2) JIS Z 9110-1978 照度基準解説
- (3) 瀧山久夫: 病院・学校の照明, 日本電子工学院第 1 回照明設計公開講座テキスト (昭 47)
- (4) 日本建築学会・建築設計計画規準委員会編: 採光設計, 設計計画パンフレット, 16 (昭 38) 38
- (5) 長倉康彦: 開かれた学校——そのシステムと建物の変革, NHK ブックス 189, 日本放送出版協会 (昭 48)
- (6) 教育施設開発センター: RIEF/CEF BUILDING SYSTEM (昭 51) 32
- (7) 日本体育施設協会監修, 中山克己編: 体育館, 体育施設全書 3, 第一法規 (昭 49)

第 15 章

医 院 照 明

15-1 医院照明的特点

医院照明是以能充分发挥医院的功能，直接或间接地对医疗起作用为目的。因此，医院照明若没有关于医院功能的丰富知识，就不能期待得到良好的结果，所以很好地听取医务人员和病人的意见是很重要的，但仅是听而不理解它的本质，那也是会失败的。

在医院的照明设计时，应该考虑和其它建筑物不同之点是：

第一，医院是许多工种的人各按不同的目的在各个工作场所活动的地方。为此，照明条件是很不相同的。例如在极端的清洁环境下进行精密作业的手术室需要 100000lx 的照度，而在深夜巡回或看护观察却只需要 10lx 即可。

第二，在医院中，很多地方一方面应考虑各种工作需要，同时对生活方面的种种因素也要看到。多数病人是同医院的工作没有直接关系，而是处于使用者的地位。对住院部的病房或休息室以及候诊室等部分，其照明的目的不在功能，而是宽敞舒适的气氛的好坏。

第三，医院各部门使用的时间范围相差很小，病房和急诊部是 24 小时生活和工作的地方，门诊部和管理部分多数是傍晚以后便成无人状态。那就是说，门诊部的照明是以白天为主，所以照度只需考虑和日光保持均衡。病房的 24 小时，是医疗场所和病者生活场所的组合，在同一个地方有许多工种的人在进行不同的工作，所以照明亦必需对应这些情况来考虑。

15-1-1 照度

一般照度可按 JIS Z 9110 “照度标准” (第 10 章)，各国推荐的照度列于表 15-1。

表 15-1 各国医院各部门的推荐照度

照度 (lx)	国名	法 国	德 国	英 国	美 国	日 本
病 房	一般 床头 傍晚 深夜	70	80~120	150	220	100~200
		300	200	一般 30~50	320	
		15	5~20	看书 150	22	
手 术	一般 手术视野	500~3000	1000	400	2200	750~1500
		特别	20000~100000	特别	26900	20000 以上
检 查	一般部 局部	500	500~1000	500	540	200~500
			1000 以上		1100	750~1500
监 护 室	一般部 局部		80~500	30~50	320	
			1000	400	1100	
诊 察 处 置	一般部 局部	500	500	300	540	300~750
			1000	500	1100	
走 廊 (病房)	白天 傍晚 深夜	70	250	300	220	50~100
				30	150~200 5~10	32

15-1-2 光源和色彩调节

光源和周围环境的色彩是医院的重要问题。例如，在对病人诊断时，需要正确地认识病人皮肤的颜色。同样，对于处理室和检查室等这也是重要的事项。医院几乎所有部门，由于照明和墙壁装修的色彩，可使医院的气氛变得柔和，在对前厅和病房等给予舒畅的印象方面起很大的作用。

因此，有关病房和检查室等所用的光源，即使牺牲点光效，也应选用显色性良好的。

从色彩调节的基本原理看，色彩不仅是取决于感觉，而且也要从功能上考虑人的生理学和科学上的要求，当然这也不是固定不变的。

最近人们往往是用BG代替GY的，用YR代替R色彩系统。这是因为多数人的皮肤组织或体液和新的色彩系统较为接近的原因。

15-2 医院照明的实践

15-2-1 门诊部

诊疗部门是医院的中枢，所以要考虑在舒适的环境下充分发挥它的功能作用。因这部分的使用时间是在白天，所以对一楼只靠人工光照明的房间，应考虑从大门射进的天然光的照度的平衡问题（图15-1）。

（1）**门厅** 为使病者有安定的情绪，并造成旅馆似的感觉，门厅不宜使用亮度高或太华丽的照明灯具。

（2）**通道** 要考虑从入口大门射进的天然光照度的平衡。例如一楼通道即使在白天，也要比二楼明亮。用运输床运送病人时，因病人面向顶棚，所以灯具需考虑带罩，以免眩光。

（3）**诊疗室** 一般说多数诊疗室依靠天然采光，或考虑照明与天然光并用。尤其是病人面向上面的场合，应注意照明器具的位置和亮度。诊疗室内往往用屏风间隔，故在照度分布上应充分地考虑这一点。

对于耳鼻喉科的测听室，当使用荧光灯照明时，应将镇流器放在室外。

眼科的暗室和X光透视室，以不使用荧光灯为宜。这是因为关灯后的残余荧光会妨碍工作。

（4）**药房** 为提高药品架的垂直面照度，一般照明要合理选择灯具形式和布置方式。

对于使用天平的场所，应按需要设置局部照明，但应避免使用妨碍工作的台灯，宜用从上部照射的方式。

（5）**牙科室** 牙科室照明可参考诊察室、处理室和小手术室的作法。

顶棚宜用白色，反射率在70%以上，墙壁用浅色，要没有光泽，反射率在60%以上，地板的反射率用20~40%为宜。牙科室的颜色用天然光虽然适合，但是不能经常可得。所以一般照明的色调，应注意和填充材料和牙齿的颜色协调。

口腔照明的照度高，但不能让光线投进病人的视野内。牙科大夫依靠这照明判断填充材料和牙齿的颜色是否协调，观察假牙的吻合状况，还要正确地判断钻孔深度，观察填充材料



图15-1 候诊室及大厅

是否坚固。

为在病人的下颚部位具有 $10000lx$ 的照度，而且在口腔内不产生阴影，照明灯具可参照使用类似手术室的无影灯。

(6) 急诊部 大部分急诊病人的治疗是不依靠医院的其它部门而是在急诊室进行。因此，它的照明应考虑从能进行简单的手术以至种种检查的要求。这样，照明近似于小手术室或检查室的照明情况。

15-2-2 检查室 (图15-2)

检查室是检查身体的部门，也是以病人为对象的生理检查室。检查身体部分的照明可按一般化学实验室那样来考虑。但考虑光源的显色性时，即使效率低点，也应满足光色的要求。

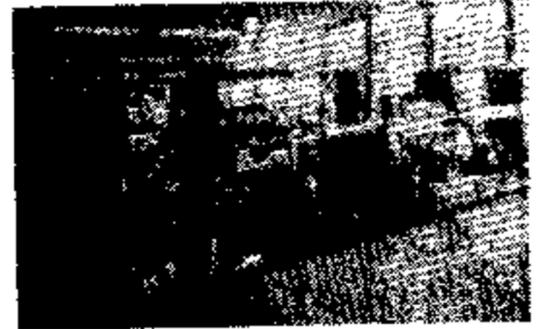


图15-2 检查室

对以病人为对象的生理检查室，由于场所的压迫感，考虑怎样使病人感到安全和轻松的气氛也是很重要的。

(1) 放射线室 有关放射线各工作室不需太高的照度，但要求调光。X光透视室在机械维修和调整时需 $200lx$ 的照度。在透视阶段，为了进出房间需 $50lx$ ，透视时可用脚踏开关，将红灯从 $20lx$ 调到零。

钴、电子感应加速器等机器因有重压感，在照明上至少也应考虑使病人不致有压力的感觉。

对于放射线污染的范围应设有冲水设备，有时也需考虑调光。

处理放射线、放射能的房间，为了避免放射线的直射，多设置隔墙，所以要注意照明灯具的布置，顶棚上的照明灯具的位置经常受到放射线机械的制约。

(2) 眼科检查室 眼科检查室有亮室和暗室。

亮度可从 $10000lx$ 变化到 $50lx$ 。从检查内容来说，也可以不用连续调光，部分关灯即可，但在灯少照度低的场合，则应设置调光器为宜。

暗室可从 $50lx$ 变化到零，但对荧光灯低照度场合的调光，因易出现闪光，故使用滑线电阻调压器。

(3) 脑电和心电图室 由于电子器械的发展，现在为了作心电和脑电图测定，不需特别地设置防护室。但心电计等因要测定微电压，为了克服由于静电感应和电磁感应而导致发生故障，有必要设置防护室。

防护室的照明灯具使用直流电源。若光源使用交流电，可以用直径为 0.8 mm 的、网眼为 $5\sim 10\text{ mm}$ 的磷青铜丝网把灯具罩上，并将铜网连接到等电位的接地母线上。

15-2-3 住院部

病房是对住院病人进行诊疗和看护的地方，也是病人生活的地方，把病房的照明设计好，不仅对病房设计，而且在医疗上也是很重要的。

(1) 病房 病房的照明，从大夫和病人的立场来看，要求如下：

从大夫方面来说，要求和诊疗室一样，尽可能光亮一些。

从病人方面来说，要求卧床时在视野内感觉不到眩光，同时要求有接近于家庭的居室和吃饭间的感觉。

除了以上的要求外，若还要考虑晚上需要的脚下照明，则应把多数的照明器组合在一起

来考虑。

一般照明的照度为 $100 \sim 200lx$ ，要注意使向上或向横卧着的病人不致感到眩光。对于单人病房或双人病房，由于可在床头的墙面上装设照明灯具，所以问题不大。但对于六床室那样把床位排成二列时，多是把照明灯具设置在房间中央，这对病人眼睛的位置和照明灯具的配光就有必要作充分的研究。一般照明灯具希望能二级调光。

这里必须注意的是，光源色温高而照度不高，就会使人感到阴暗，所以使用荧光灯时，要选用显色性好的灯种。另外在病房顶棚上用间接照明式装设杀菌灯时，应注意灯的紫外线经二次反射而损伤病人眼睛。

考虑病房是病人长时间利用的场所，所以照明要充分考虑上述问题。

除一般照明外，在病人床头要装设为看书和料理日常生活的床头灯。固定式床头灯使用不便，而移动式则易损坏。

床头灯的设计条件如下：

- (1) 要使病人能自己开关。
- (2) 开灯时，要使周围的病人，特别是对面的病人不致感到眩光。
- (3) 要能改变照明的方式。
- (4) 要不易损坏，便于维修。

近来有人把病人床头的许多装置，如床头灯，呼唤按钮，医疗用气体或吸引装置的电源插座，监测器的接头等组装在一起，并把一般照明和局部照明装在一个配电盘上。这种装置的外形整齐美观，病房内部装修效果好。可以预料今后将会不断出现类似的床头装置（图15-3）。

因床头灯难于兼供医疗处置时使用，故往往使用移动式立灯，但也有时在病床的上方把标准照明灯具设置在顶棚面上的作法。例如图 15-4 所示。

病房的值班照明，有的用墙壁或顶棚的常夜灯，有的用脚灯。查房时用常夜灯为好，但对灯的位置需作充分的考虑，使病人不致于感到过于明亮。另外对走廊照明灯具的位置也需加以考虑，以免走廊的灯光射进室内。

(2) 其它 看护室是进行事务性工作和简单处置的场所，它的照明应能适应各种作业的要求。

床上用品贮藏室、配餐室、盥洗室等均是需较清洁的场所。它的照明使用一般效率适宜的实用器具为妥。

15-2-4 手术部

手术是在无窗的比较狭窄的场所，持续长时间进行的紧张工作。故手术室照明必须考虑减轻有关人员的疲劳问题。从手术室到准备室通道为止的范围，一般照明照度要高，要求照明灯具扩散性好、带罩、结构牢固和不落尘。

(1) 手术室 这是医院中进行最精密的工作的场所。局部的手术范围的一般照明的照



图15-3 病房床头的灯具一体化。床头灯的配光能自由地变化

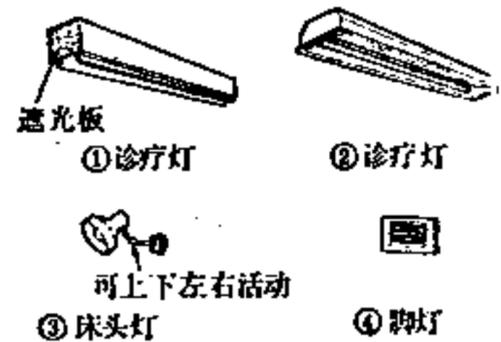
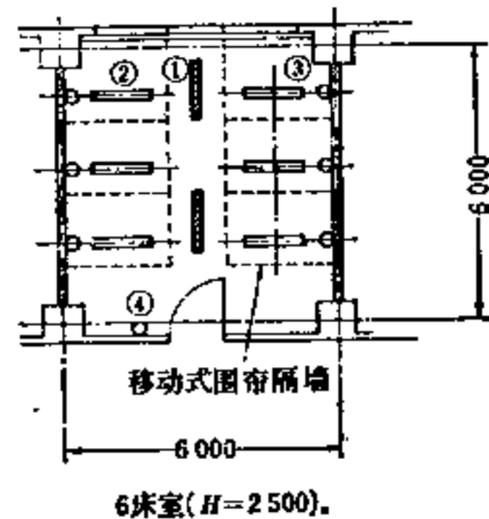


图15-4 六床室照明灯具配置图(1)

度水平要求很高，水平照度通常是 $1000lx$ 。为了使亮度分布良好，垂直面照度不应低于水平照度的50%。

最近，在手术室的顶棚面上，多设置有X光装置和无菌设备的排气装置（图15-5）。这些装置占据了一大半顶棚面，而且位置又是在手术台的上部，所以手术室一般照明的照明灯具配置很容易同空调设备发生矛盾，故设计时应作综合考虑。

眼科和耳鼻喉科的手术室照明要求能减光。

手术室的局部照明使用无影灯。无影灯的条件如下：

- (1) 照度要求 $20000\sim 100000lx$ ，而且在原则上要求能调节照度；
- (2) 照明光束范围为 $10\sim 25cm\phi$ ，而且要求能调节光束大小；
- (3) 配光上要没有光斑，显色性要好；
- (4) 尽量消除包含在照明光线中的热量；
- (5) 对进行手术的创伤面，无影度要高；
- (6) 需要一定程度的照明的焦点深度。通常是 $15cm$ 以上；
- (7) 照明的位置、方向要容易调节。

无影灯最近的动向如下：

- (1) 胸部外科使用的是 $60000\sim 100000lx$ ；
- (2) 光源是多灯式卤钨灯；
- (3) 无菌式手术室，为了不致扰乱通风的气流组织，有的用嵌入顶棚的固定式无影灯或露出顶棚的传动式无影灯。

手术室使用的麻醉剂多数是可燃性的，最近由于麻醉剂的进步，防爆问题一般已得到解决。对防爆问题，应从整个手术室来考虑。

(2) 监护室 一般由麻醉医师管理的监护室（ICU）虽然不是手术部门，但是应按手术部门来考虑（图15-6）。

从病人生活方面来说，监护室也可以说是病房。因为这是治疗需要监护的重病患者的房间，所以照明不可按一般的病房处理。

为了进行复杂的医疗工作，在病床周围设置的检验器和各种装置，并要求局部照明灯具在病床面上产生 $1000lx$ 的照度。在看护上，因为大房间内多数是并排着两个以上的病床，所以顶棚照明需考虑相邻病床的影响。

一般照明可用扩散性和显色性好的带罩荧光灯，照度为 $300lx$ ，并希望是能够调光的。

15-2-5 其它

(1) 管理部门 管理部门可按办公室的照明来考虑。

(2) 杀菌灯 用紫外线杀菌灯，对空气的杀菌最为有效，除了要考虑空气的对流循环外，因强烈的杀菌线会把眼睛弄伤，安装时要注意不使光线直接射到病人的视野内（参照27-2节）。

装设的灯数可按下式决定：

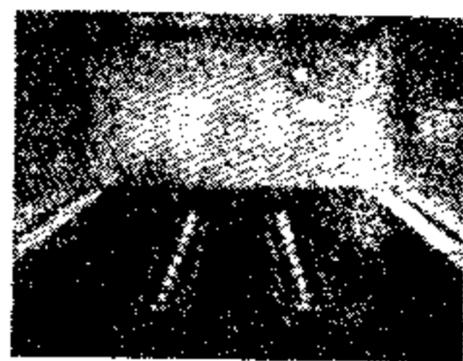


图15-5 无菌手术室顶棚部分有空气排出口

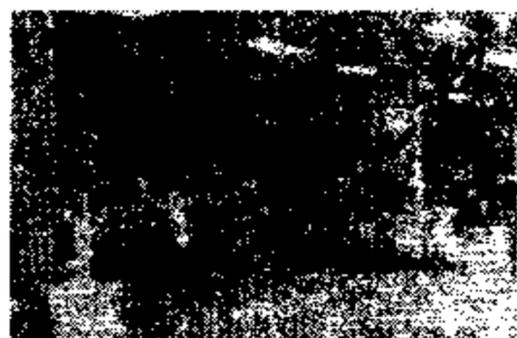


图15-6 监护室

按一般卫生要求： $N = 4P^2/HVF$

按高度的空气杀菌要求： $N = 0.05V/HF$

式中， N ：灯数， P ：室内人数， H ：照明灯具和顶棚的距离 (m)， V ：房间体积 (m^3)， F ：灯具效率 = 0.8

有关传染病的诊察室、厕所等只有在无人时进行杀菌灯的直接照射，以求得到良好的杀菌效果。实例如图 15-7 所示。

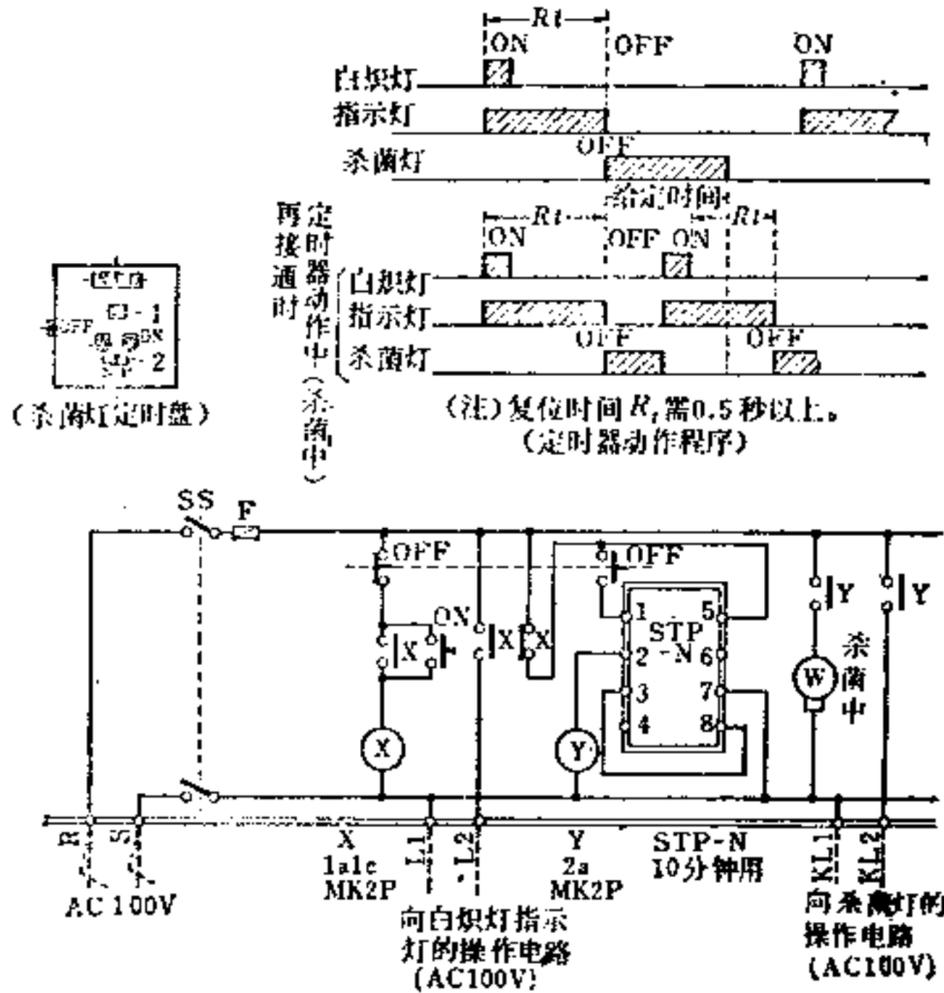


图15-7 定时盘线路连接图及照明程序表

参 考 文 献

(1) 市島, 伊藤: 東京都立駒込病院の電気設備, 電設工業, 22, 3 (昭51)

(2) 国鉄: 鉄道病院照明基準, 鉄道施設照明委員会資料

第 16 章

美术馆、博物馆和寺庙、教堂的照明

美术馆和博物馆是观赏和进行学术研究的场所，寺庙和教堂是宗教举行仪式的场所，它们对照明的要求是各不相同的。

在美术馆和博物馆的内部，有大厅、陈列室、贮藏室、准备室、讲堂、会议室、研究室、图书室、有关管理及机械设备的各种房间。陈列室是其中的主要部分，它的照明技术有自己的特点。

在寺庙和教堂中，前殿、正殿、圣堂则是主要部分，周围有办事处，僧侣宿舍，客厅，宝物殿，结婚礼堂等。进行宗教仪式的主要厅室的照明技术也有自己的特点。

16-1 照明环境的形成和设计

美术馆、博物馆、宝物馆等陈列场所，因观看者的立场和动机的不同，有的以观赏为对象，有的以学术研究为对象。以观赏为目的时，要求视看对象的亮度对比和色彩能尽量理想地表现出来。当以调查研究为观察目的时，就需要把视看对象的形状、色彩、质感等正确地表现出来。

另外，为了使陈列品不致由于可见光、紫外线和湿气而受到热的和化学的损伤，需要同收藏物的维护和防灾，以及入馆者的安全等因素进行综合考虑，求出适宜的照度值。

对寺庙、教堂等进行宗教仪式的场所的照明，考虑心理效果比起生理上的好坏更为重要。依靠亮度分布使场所中心感强，同时照明对造成建筑物内部气氛的作用也是很大的。建筑物外部的照明则是表现寺庙和教堂各种宗教环境的主要手法。

鉴于最近来馆观光和观赏的人数的增多，需要从技术和心理两个方面来进行研究。

16-1-1 陈列室的视觉条件^{〔1〕}

陈列室中墙面陈列、立体陈列、橱窗陈列的展品，都是观赏的对象。为了使人对展品本来的形状、色彩和质感等看得正确并感到美，其照明和一般照明不同，应具有下述的视觉条件：

(1) **光的质量好** 为此应选用光色和显色性接近于日光的人工光源。

(2) **室内色彩合理** 由于室内表面的相互反射，以致表面色彩会影响光线的颜色，从而有损展品的显色性。为了避免这个情况，室内色彩要使用接近于无彩色的。

(3) **防止镜像反射** 平滑的光泽面，尤其是通过玻璃来看展品时，观览者本身或周围物体的映像常会映现到光泽面上，以致有碍于对展品的观察。为了防止这个情况，使暗色的展品也能看得清，展品面的照度和亮度就必须比观览者一侧高一点。

(4) **防止反射眩光** 亮度高的人工光源或采光窗映现成反射映像时，会使人感到眩光，所以必须把光源的位置外移到视线的正投影方向。

(5) **防止光幕反射** 对有光泽的绘画展品, 它小的笔触或凹凸布纹, 在相对视线的光源的光线照射下, 画面上小粒状或线状的光泽反射会在画面上展开而形成光幕, 以致有损于展品本来的色彩和样子, 因此, 需要采取相应的措施, 来防止光幕反射的影响。

(6) **阴影的调整** 对雕刻、造形物等立体展品, 照明阴影的情况如何, 对观赏价值有很大的影响。即使是墙上展品, 当陈列面和主光源光线的夹角在 20° 以下时, 会使表面凹凸的阴影变强, 而且画框也会产生阴影, 这些都对观赏效果不利, 所以应把主光源的照射方向和光照强度等予以调整, 克服不良阴影的影响。

16-1-2 陈列品的背景

作为展品背景的墙面, 明度高、饱和度低而无彩色时最好用 N8, 有彩色时则用 5Y8/2^[2]。通常是用明度 7 以上、饱和度 2 以下, 光泽少而表面纹理适中的方案。为了把陈列品的色彩能凸出地显现出来, 需特别选用和画面协调、饱和度高、色彩强烈的背景。对于金属或陶瓷器展品, 为了使其表面的色彩和光泽显眼, 有青色或茶色系统的颜色的粗纹布或日本纸作为背景是适宜的。

背景的面积若大, 明度又高, 则眼睛适应高的明度, 但对于明度低的小展品的细节就难于看清。这时可用中等明度的局部背景以达到缓和眼睛的不顺应现象。

为了减少由于展品表面的反射而发生的眩光、光幕或映像等对视觉的影响, 本应把全部顶棚和观览方向的墙面刷黑, 但按理论上这样考虑, 又会使人心理上感到不愉快。

16-1-3 陈列室照明要点

为了确保展出效果, 让观众注意力集中到展品上, 需考虑以下几点: (1) 照明强弱; (2) 光的质量; (3) 实体感的好坏。

照明应把展品的形状、色调和质感显示出来, 给人强烈的印象, 需要使展品比背景更为明亮而凸出, 但又不能过于强调而失去展品和背景的协调。

展品面^[3~5]的照度高要考虑光和热的影响, 其推荐值为: 西洋画是 $300\sim 750lx$, 日本画是 $150\sim 300lx$ 。对于雕刻, 造形物和模型则幅度大一些, 木料、石料的雕刻是 $300\sim 1500lx$, 金属雕刻为 $750\sim 1500lx$, 展品暗时则照度要高一些。要使观赏者在馆内观看时感到安定, 舒适, 疲劳少, 应尽量设计成不单调而又舒畅的照明环境。

16-1-4 陈列室的采光

照明用光源从显色性来看, 从来都认为日光的采光是主要的。近来因为已经获得从质量和控制方面胜过日光的人工光, 所以把人工光源和日光一并使用, 甚至进而只用人工光源的作法, 已经逐渐多起来了。在这一情况下, 希望做到即使日光变动, 整个照明状况也不致于变化, 在天窗、窗、光源的前面拉上布帘的柔光手法能获得好的效果。

若采光方式不好, 则由于展示面的反射而出现眩光、映像、光幕等的影响。

各种采光方式的优劣如下:

(a) 采取天窗的顶光方式, 若顶棚不太高时, 则展出面由于天窗的反射而受到不良影响。

(b) 用陈列室两侧墙面的高窗采光的方式, 若窗大时, 则展示面不能避免由于窗的反射而发生的不良影响。

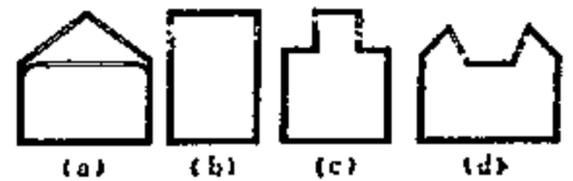


图16-1 日光的采光方式

(c) 顶窗采光方式, 窗设置在接近于观赏者头部上方, 虽然可以减少在展示面上产生的窗的反射光, 但却降低了画面照度的均匀性。

(d) 为了改善前述方式的缺点, 把采光窗做成倾斜的顶侧光方式是最好的, 但这方式因顶棚垂下, 使人有笨重之感。

(e) 侧窗采光以不用为宜, 不得不使用时, 则宁愿用比视点低的下射光, 而且宜用上方的天空光。

(f) 用透过率约为 50% 的灰玻璃代替透明窗玻璃, 以降低外界景物的亮度, 减轻人工补助照明。这是目前一个新的倾向。

16-1-5 光源的光色

陈列室的自然光照明, 不宜用太阳的直射光。天窗或高侧窗采光, 是仰角约为 45° 以上的天空光, 色温范围约为 $6000\sim 10000\text{K}$, 平均约为 7500K 。低侧窗的采光仰角约为 15° , 色温范围约为 $5700\sim 8400\text{K}$, 平均约为 6850K 。都市因大气混浊, 色温要降低很多。窗上挂布帘时, 光线虽可变得柔和, 但色温下降很大。

从理论上讲, 人工光最好应该接近于自然光的平均光色, 实际上喜用色温低而有温暖感觉的光色。 $2800\sim 3000\text{K}$ 的白炽灯或卤素灯最便于使用。对白色 4500K 的普通型荧光灯和白炽灯光进行混光, 在改善显色性的状态下使用, 但是在应重视显色性的美术馆、画廊和博物馆中, 却使用普通荧光灯而不使用高显色型荧光灯, 这是有矛盾的。

在采光窗的扩散板内侧使用高输出高压放电灯时, 今后的趋向是使用金属卤化物灯, 其光色、显色性、经济性都是优越的。

16-2 墙面展品的照明

16-2-1 墙面的展示照明

像浮雕那样在墙面上展出的物品需要得到立体感好的照明, 但大部分展品是属于图画、书籍、照片或挂在墙上的装饰品等平面的东西。在展出这些物品时, 重要的是要容易看得清, 以及对展品的保护和防止损伤。

墙面的展示照明要考虑的因素有: 正确的显色性, 不加重凹凸画面的扩散性, 画面上的照度及其均匀度, 反射眩光和光幕反射以及防止种种眩光, 陈列室内的照度和扩散性, 还有展示墙面的色彩等, 这些因素都必须对应于展品的特点而综合地加以研究。

16-2-2 垂直面的展示方法

以前美术馆的照明主要是依靠天然采光, 对改善画面上的照度及其均匀度等问题想出了种种办法。近年来人工照明技术有很大的发展。

如图 16-2 (a) 所示的实例就是利用光源变动少而不会有直射阳光入射的北面天空光, 把观赏者的位置设于阴影的部分, 使其映像不致映现在画面上。图 (b) 的例子是为了使画面上的照度均匀良好, 把 A, B, C, …… C' , D' 的位置放在相同的圆周上, 使从画面的上端和下端看到天窗的角度相等。

最近不少美术馆同时用日光和人工光, 或只用人工光。图 16-2 (c) 和 (d) 即表示用日光和人工光的状态。图 (c) 是格片顶棚的天然采光和带有反射板的悬吊型荧光灯照明的实例。图 (d) 表示使用活动板用作展出墙面的例子, 活动板带有能调整位置和反射板的人

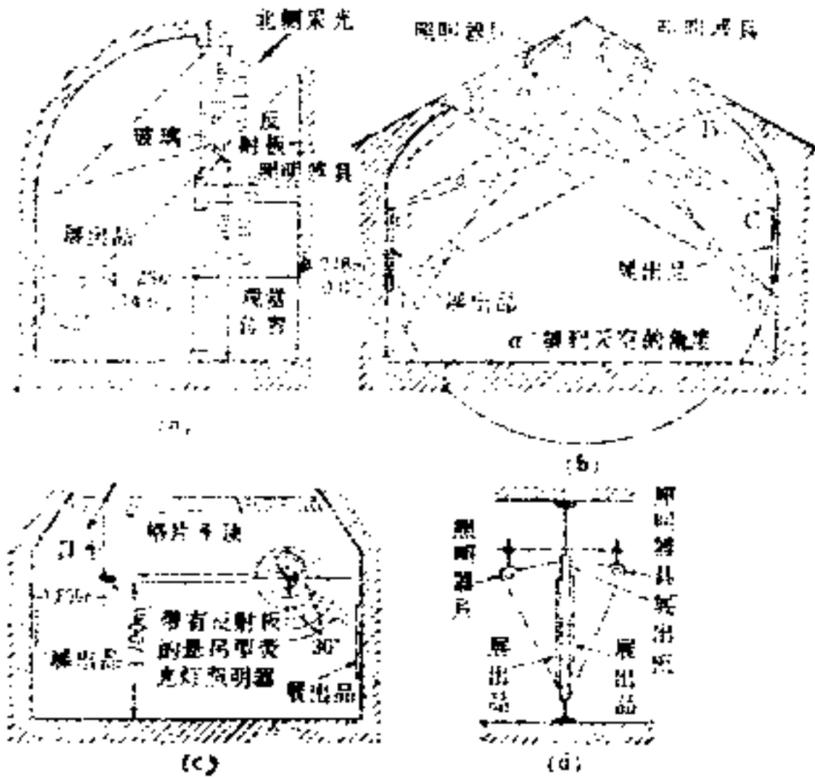


图16-2 垂直面的展示实例

工照明器具，移动活动板即可自由地构成展示墙面。

最近一般照明多使用直接安装在顶棚面的荧光灯，局部照明使用白炽灯或狭照型卤钨灯具。为了降低荧光灯正下面观赏者位置的照度，研究发展了格片式指向型照明器具，荧光灯直接装在顶棚面上，使展品面的照度高而均匀，这样的例子最近是不少的〔图 16-2(c)〕。

16-2-3 绘画的展示——尤其是油画场所

(1) 画面上照度和亮度 照度一般推荐 200~500lx，平均亮度在 25cd/m² 以上。若低明度的彩色图画平均亮度比高明度的彩色图画的低，则人们会感到照明过暗。若把亮度提高到低照度画面以上，必会引组眩光，还会有损伤画面的危险。这种情况应予避免。

(2) 画面上照度的均匀性 画面上的最低照度和最高照度之比在 0.75 以上时观赏者不会注意到照度的不均匀性。到 0.7 左右时观赏者会注意到，因此画面上照度的均匀性希望在 0.75 以上〔7〕。即使是特别大的画面，整个画面的均匀度也应在 0.3 以上。

(3) 防止反射眩光 对于有光泽的画面或放进玻璃画框的展品，要注意不要有光源在画面正反射时所发生的眩光，以免妨碍观赏。解决办法是很好地选择光源和展品的相对位置。

如图 16-3 所示的油画，对高度在 1.4m 以下的图画，展品的中心可离地板 1.6m，对于更大的图画，其下端应离地板 0.9m，这是下限，对于画面的倾斜度(t/l)，小型的绘画可在 0.15~0.03，大型的绘画可在 0.03 以下〔8〕。

观赏绘画的视距离可放在图画长边的长度的 1.5 倍的位置（这和图画的对角线的 1.2 倍的一般说法大体是一致的）。日本成人眼睛的高度平均约为 1.5m。该图中考虑了画面上的正反射，为了扩散光线而计算时应有 10° 的余量。因光线入射角接近于平行画面时，画面的凹凸便显眼，而画框的阴影亦落到画面上，所以光源设置的位置应避免在入射角和画面成 20° 的范围以内。

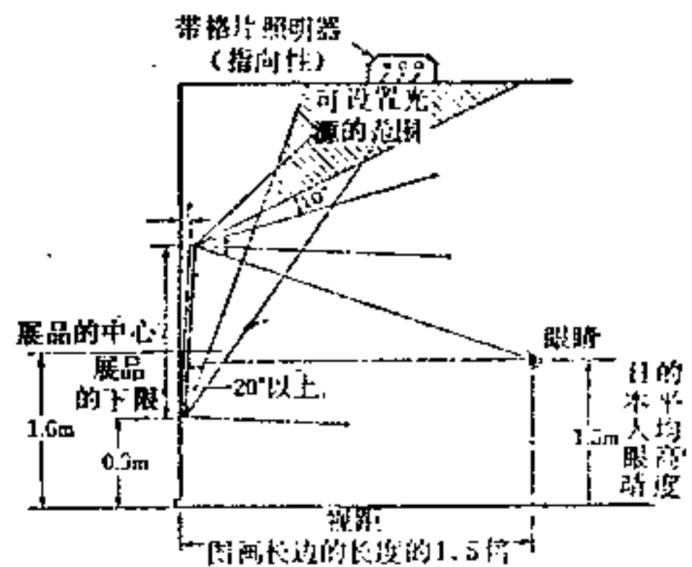


图16-3 展品位置示例

(4) **防止反射映像和陈列室的一般照明** 有光泽的展品，放在玻璃镜框或玻璃橱内的展品，要完全防止观赏者不致因光泽面的映像而看不清是很困难的。一般情况，观赏者位置的亮度推荐为展出面亮度的 $1/2$ 以下。

陈列室一般照明的照度，考虑观众行动的需要，设计取 $50 \sim 100lx$ 即可。对于观众的周围，例如当窗户及其它展出面等发生映像或眩光时，则需设置屏蔽物或认真地考虑展出位置的合理的几何关系。

16-3 立体展品及造形美术的照明

立体的雕刻、造形、陶瓷艺术、工艺品等的照明，除了一般照明外，还应有突出各种各样的形状、纹理、色调等特征的优美的照明，例如把照明对象一个个地照得很亮，或造成适当的实体感。

16-3-1 雕刻和造形展品的照明 (图 16-4)

雕像是通过表情和姿态来表现其性格的，阴影是表现效果的主要因素，阴影强烈给人以夸张之感，阴影柔弱则有缓和之感。为了使雕像有适当的实体感，研究表明，大面积顶棚面的扩散光的效果较好。但是一般情况下，从对象的侧前上方 $40^\circ \sim 60^\circ$ 位置设置指向性聚光灯作主要照明，照度为一般照度的 $3 \sim 5$ 倍，对于青铜像及其它暗色的对象则应为 $5 \sim 10$ 倍为宜^①。

除了雕刻以外，造形作品以利用玻璃、金属等素材造成自由的形状或构成抽象的作品较多，属于大型作品的也不少。作为展示照明，对于前者，可采用对雕像同样的手法，对于后者，可根据素材、形状、构成等情况，例如也有采用从对象的周围、上部或下部，或从正上部投射光线等特殊的手法来提高展示效果。

这些附加的展示照明，必须根据对象来调整它的照射角度和范围，对于有可能替换展品的房间，按照情况，为满足照明灯具的位置及照明上其它的要求，而考虑使用灵活性较大的设备。

16-3-2 陶瓷等工艺品的照明

对于陶器、玻璃等作品的形状及质感，色彩的微妙的美，对于金工、木工、漆器等工艺作品，特别是他们的材料固有的美，构成和技术的精致性等，都是人们要仔细观赏的。

这些作品多数是属于小件，容易破损，一般是放在橱窗内展出的。把小展品放在架子的上下层来展览，或用专用的橱窗单独地陈列的例子也不少。总之，陈列品需要光线把它照得一样的明亮，使之能很好地看出其细节，照度以 $200 \sim 500lx$ 为宜。

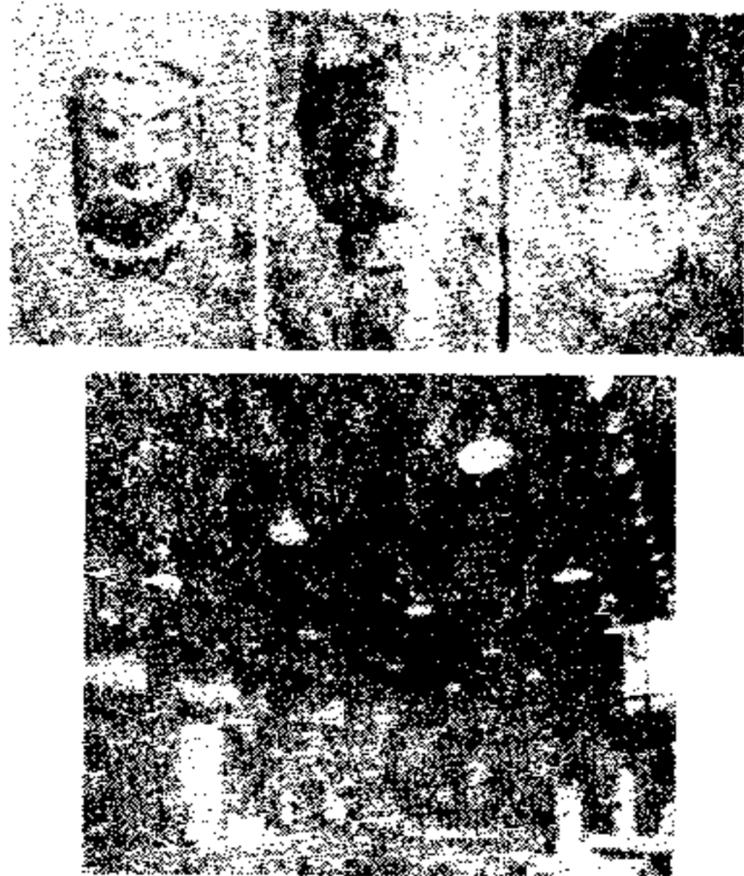


图16-4 雕像和造形的照明实例
(上图表示阴影不同导致感觉上的差异的例子)

① 这里表示的是主要照明和一般照明的照度之比的倍数，但也有以矢量照度和标量照度之比（参照5-9节）的方法表示。使用哪一种方法，应以照明的用途和计量的难易而定。

照明方法是在橱窗上部配置荧光灯。按展品的特点，也可在橱窗的下部也设置荧光灯，或附加聚光灯。

16-4 陈列橱内展品的照明

展品本身的照明根据 16-2 节、16-3 节所述的要求进行设计即可，但对于陈列橱内的展品，特别需要注意以下各点。

(1) 防止直接眩光 橱窗内的光源发出的直射光不要投射到观众的眼帘，要注意照明灯具的配置及遮光板的设置。

(2) 防止展品面的正反射 为防止光源的光线通过展品的光泽面的正反射而投射到观众眼中，应很好地调整其光源和展品的相互关系〔参照图 16-5 (a)〕。

(3) 防止由于玻璃面的反射而发生的眩光 为使眼睛的位置不在光源或窗之类的高亮度物体的玻璃面的正反射方向，必须注意其相互关系〔参照图 16-5 (b)〕。

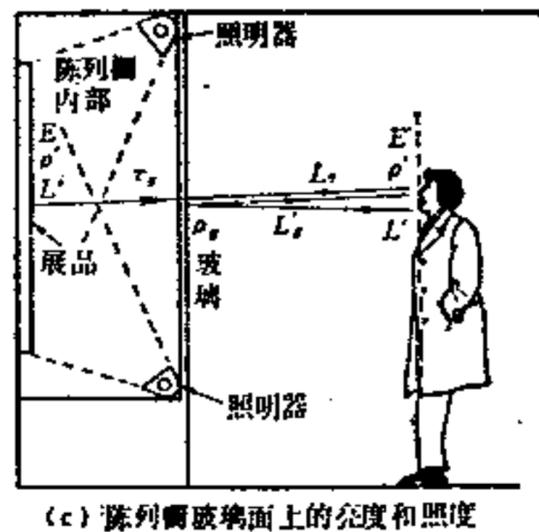
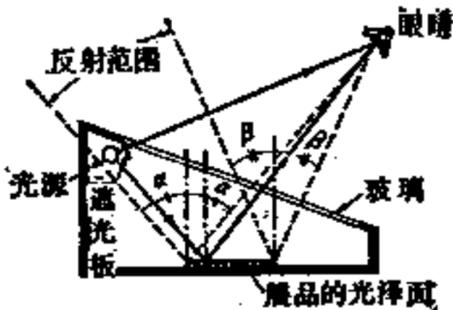
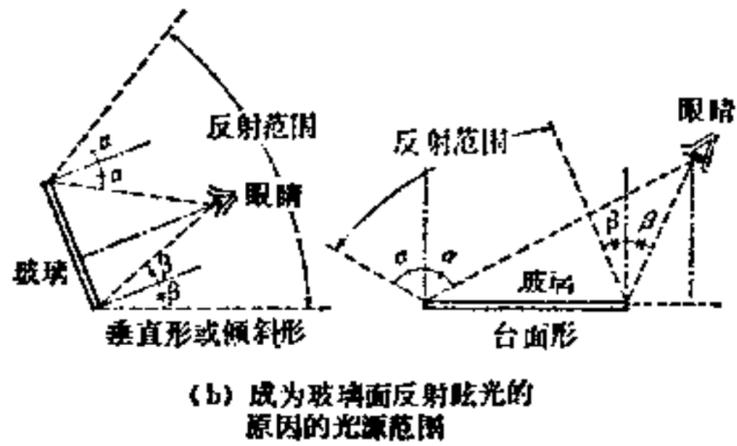


图 16-5

(4) 防止镜像反射 为了防止由于玻璃面的反射而产生观众本身及其周围的反射像以致影响观览，反射像的亮度 L'_s 和展品通过玻璃被看到的亮度 L_s 之比必须小。根据实验，若 L_s (cd/m^2) 为背景的 L'_s 的最小对比为 C_{min} 时，则亮度 L'_s 的反射像不致影响观览的临界条件如下：

$$\frac{L'_s}{L_s} \leq 8 C_{min}$$

图 16-5 (c) 所示的展出面的照度若为 E (lx)，反射率为 ρ ，观众位置的垂直面照度为 E' ，反射率为 ρ' ，这些都假设为是完全扩散反射时，当玻璃的透过率 $\tau_g \approx 0.9$ ，反射率 $\rho_g \approx 0.09$ 时，则

$$L_s \approx \frac{E\rho\tau_g}{\pi} \quad L'_s \approx \frac{E'\rho'\rho_g}{\pi}$$

防止反射像影响的界限条件为

$$\frac{(E'\rho')}{(EP)} \leq 80C_{\min} \quad \frac{E'}{E} \leq 80C_{\min} \left(\frac{\rho}{\rho'} \right)$$

假定 E 和 ρ , 从文献〔12〕求出对应 $L_g = 0.286EP$ 的 C_{\min} 的实验值, 计算 $80C_{\min}$, 得知 $E'\rho'/EP$ 的上限, 从 $(80C_{\min})^{-1}(\rho'/\rho)$ 的计算, 即知 E/E' 的下限。

例如若 E 为 $300lx$, ρ 在 $0.02 \sim 1.0$ 范围变化, ρ' 假定为 0.6 , 计算结果示于表 16-1。 EP 约为 $50asb$ 以上, 而 L_g 约为 $15cd/m^2$ 以上时, 若 $E'\rho'$ 是 EP 的 $1/2$ 以下, 就没有妨碍观赏。

表 16-1 为了不致妨碍观赏的 $E'\rho'/EP$ 和 E/E' 的计算例

$EP(asb)$	$L_g(cd/m^2)$	C_{\min}	$E'\rho'/EP$ 的上限	E/E' 的下限*
6	1.72	0.0117	0.91	32.0
15	4.29	0.0085	0.68	17.6
30	8.58	0.0073	0.58	10.3
50	14.3	0.0066	0.53	6.8
150	42.9	0.0055	0.44	2.7
300	85.8	0.0049	0.39	1.5

*是假定 $E = 300lx$, $\rho' = 0.6$ 的计算值

此外, 也还有把垂直的玻璃面做成向上或向下倾斜 15° 到 30° , 使反射的映像从正面离开, 或使照明器只照到玻璃板的内部, 以提高展品和观众侧的对比亮度等方法, 也有采用曲面玻璃使反射像完全消失的方法, 来防止反射像的影响。但这样的实例在美术馆和博物馆尚未见到。

展出古美术书面的橱窗进深若浅, 则正面上下墙面的照度分布就难以达到均匀。例如可通过照明灯具的配光特性的调整来改善上下部分照度分布〔13〕。

16-5 发光面的展示

发光展示板有好几种, 它们是根据不同的原理发展起来的。利用荧光灯的发光展示板, 在 1960 年前后开始得到普及。这是把摄影胶片放在盒子中, 外面盖上乳白有机玻璃等扩散板, 在它的后面把荧光灯铺设成帘状, 用作宣传和室内图案的工具。用逼真的彩色底片, 以其美丽的色彩和光量来提高照明设施的效果。最近, 从博物馆以至航空港、百货公司, 应用范围是很广泛的。

发光展示面周围的亮度, 若在展出面亮度的 $1/10$ 以下, 周围便看到阴暗而呈现剪影效果, 展示面的亮度若达到周围的 50 倍以上, 就会感到眩光, 所以有必要把展示面和周围的对比亮度调整适度。

最近还盛行使用电视显像管的表现方法, 这不仅在展示方面, 而且在照明艺术的应用方面。从广义上看, 也可以说是进入了一个新的照明领域。

16-6 寺庙和教堂的内部照明〔14〕

寺庙和教堂等宗教建筑内部的气氛, 按宗教和宗派的不同而异, 有的简朴整洁, 有的豪

华绚丽。虽然形式各有不同，但都保持着它的严肃性，一般不必那么明亮（ $20lx$ 即可）。只是在牧师举行仪式和教徒进行礼拜需要短时间阅读经文或圣经时的照度（约 $100lx$ ）。

作为礼拜对象的神圣部分或圣像，从礼拜者的位置来看，要提高其求心性和注目性，把它照得比周围更为明亮，这是适当的。

光源可用接近于传统供神佛前的明灯的光色（原则是白炽灯），照明灯具尽量不要露出，或者把它组成装饰物，或者采用建筑化照明。

16-6-1 神庙

神庙建筑，尤其是前殿是日本古代传统的而又朴素严肃的空间，所以照明方式应和它协调，照明灯具露出来，使人感到单纯明快。

神前结婚礼堂多数是在建筑物内部另设一室。虽然它的空间具有和神庙的前殿相同的功能，但因专供结婚仪式使用，希望它的设计和照明做到既严肃又富丽堂皇。常用的方式以格栅顶棚为主，在荧光灯的建筑化照明或间接照明中，配合下投灯式照射。若设置调光装置，就有可能随着仪式的进行随时改变场内的气氛。平均照度要求较高，通常在 $100lx$ 以上。

16-6-2 寺院

寺院正殿的内部多布置有豪华的装饰，而且要求能在礼拜席上举行集合，所以有要求做得很明亮的倾向。对于大的佛殿，则光源不限于白炽灯，有使用荧光灯或新式的高压放电灯的，但希望特别注意不要破坏庄重的气氛。

使用荧光灯的例子示于图16-6(a)〔15〕，它用144只40W荧光灯放在顶棚中，40只放在吊灯中，以得到 $50\sim 70lx$ 的照度。

在属于国家指定为重点保护文物的古典木结构寺院中设置照度时〔图16-6(a)〕，是用和其建筑式样及规模相调和的方式，光源用白炽灯，设置在看不见的场所，特别是要考虑过热问题。对于佛像要求有良好的实体感表现的照明，而且对礼拜来说还需有严肃气氛〔16〕。

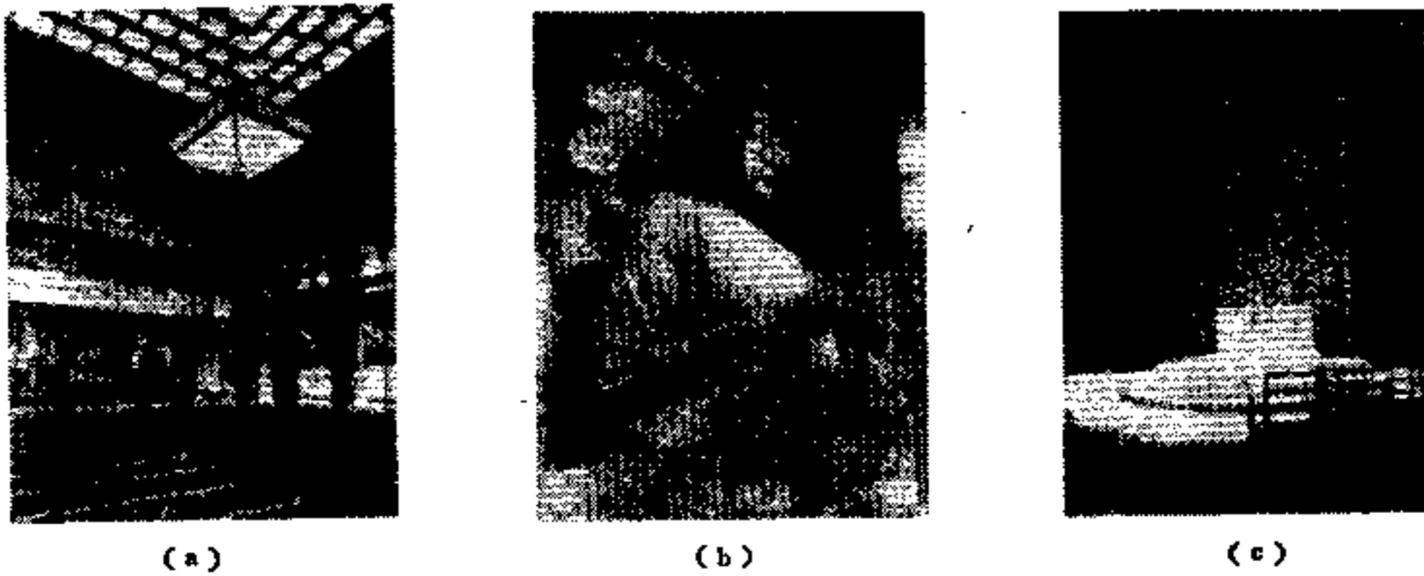


图 16-6

(a) 津村别院正殿的照明(大阪)；(b) 东大寺大佛殿的照明；(c) 美国麻省理工学院教堂的照明

16-6-3 教堂〔17〕

以下主要叙述的是现代的基督教堂。

最近新建的教堂没有罗马式和哥德式那样的明确的建筑式样，通常是随建筑师的个性不同而作出各式各样的设计。因此，照明也没有对所有场合都能适用的方式。

现代的教堂建筑的设计，一般是简洁明快的，照明也必须与此相协调。基督教堂自古就

从它的升天思想而以强调纵线条的高顶棚的空间为特征,新的教堂也可以看到有这样的倾向。因此,多数采用下投式灯或投光器,以强调垂直方向的光流,或采用从顶棚吊下纵长形吊灯的照明方式。

图 16-6 (c) 即为这样考虑的祭坛附近的照明的例子。这是采用彩色玻璃,周围墙壁的浮雕、壁画、雕像等传统的装饰手法的现代化设计实例。这样的设计也可使彩色玻璃在晚上也从它的背后照上灯光,或者是对壁画和浮雕雕像进行没有反射眩光的良好实体感表现的投光照明。

包含以上的装饰的照明,把殿内尤其是祭坛附近造成剧场那样的演出照明(有生气的照明)的例子,美、澳等国有,英国的古教堂也有采用。它依靠调光使光线加上变化,在照明光线中用饱和度高的各种色光,以致和祭式一起造成戏剧性的表现效果。

16-7 彩色玻璃和镶嵌玻璃窗

光照效果好的彩色玻璃窗,是把小片的彩色玻璃造成的图案或人物固定在细的骨架上。这种形式从拜占庭时期开始,到 Cavoling 朝(8~10世纪)时代,出现了各种颜色的玻璃组合的彩色玻璃。

依靠天然光构成戏剧性的感觉,以提高宗教气氛的彩色玻璃窗,为欧洲中世纪群众所爱好,尤其是在法国东北部和德国西南部得到发展,产生了很多优秀的设计。到了13世纪哥德建筑样式完成后,在 Chartre、Reim、Amien 等哥德式大圣堂的建设中,造成了耗费和建筑工程费用大致相同的优秀的彩色玻璃窗。

此后,随着绘画的发展,产生了各种各样的式样,近几年由近代绘画大师 Rauault、Léger 等产生了很多作品。在晚上以彩色玻璃窗后部的照明,使人看到美丽的光亮镶嵌玻璃的幻想图案,以加深人们的赞美心情,这样的作品逐渐变得多起来了。

在宗教建筑上最近的趋势是彩色玻璃镶嵌窗不用特定的宗教上的主题和图案,而在这个传统上进一步积极采用新的图案。其中

如 Le Corbusier 设计的 Ronchamp 教堂^[14], Eiermann 设计的 Wilhelm 皇帝纪念教堂^[15](西柏林)便是近年的杰作。后者是以间隔为 3 m 的钢铁双重墙构成,在墙面的镶嵌窗上嵌有青色为主的彩色玻璃。在双重墙中间,以 200W 灯泡的反射型照明器造成庄严的照明环境[参照图 16-7 (b)]

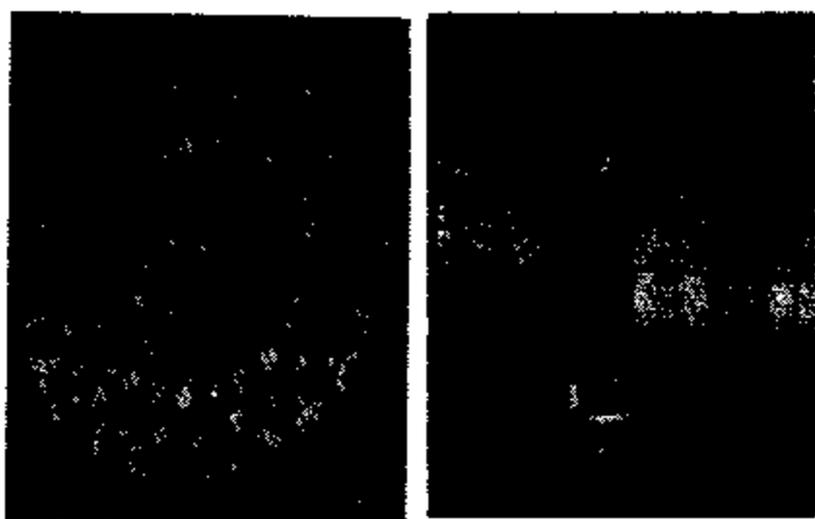


图 16-7

(a) 歌德教堂的彩色玻璃窗, (b) 威廉皇帝纪念教堂

16-8 寺庙和教堂外部的照明

神庙、寺院、教堂等的外部照明,具有宗教建筑物照明的特殊效果,能延长参观者的观赏时间,也能给信徒和市民造成宗教的气氛。照明的手法从对象的地点位置出发,充分考虑

和周围环境的影响,而决定设计目标。

现就宗教的寺庙和教堂的外部照明叙述于下:

16-8-1 照明对象的环境条件

首先从宗教感觉出发,确定被照明的建筑物大多数是从哪一方向眺望的,光线要照到哪一面,要强调横线条还是竖线条等。

若把整个建筑物均匀照明,则看起来会显得平坦。所以巧妙地分别使用如下的技术手法,譬如把左右边的照明适当地加上对比以强调立体感的方法;以广角型投光器作一般照明,而对主要的部分则以狭角型投光器强烈地照明的方法;用少数高功率灯和多数低功率灯相配合的方法;以使注目之处安稳地表现出来,这些对表现立体感是很重要的。

典型的照明实例示于图 16-8。

16-8-2 光源的选定

为了实现宗教的照明气氛,要考虑建筑物使用的装修材料的色彩和光源色彩的组合情况,以及建筑物的特征来选定光源。例如对于涂饰朱红或铁丹的寺院、金色的佛塔山门等的照明,就适于用白炽灯、卤化物灯、高压钠灯等色温低的光源,对于在绿树丛中的庄严的神庙、教堂或寺院等,则以使用绿色表色性好的金属卤化物灯、汞灯等高色温的光源为好。

16-8-3 视觉明亮程度的确定

宗教建筑物的照明,除了建筑物的条件外,还要看城市的周围环境是否明亮,郊外树丛间的环境是否阴暗,而把建筑物的亮度稍加变化,使之比一般照明有一定对比亮度是适当的。

若忽视和传统的灯火和篝火等古典的灯光的调和,而造成一般照明那样的对比亮度,就会损害宗教的气氛,以致和建筑物不协调。

现将神庙、寺院、教堂的外部装修、色彩、反射率的实例和照度的参考值示于表 16-2 及表 16-3 供参考用。设计者在应用时,可根据周围的光线,尘埃的污染,其它的特殊情况等作出判断,适当乘上倍率。

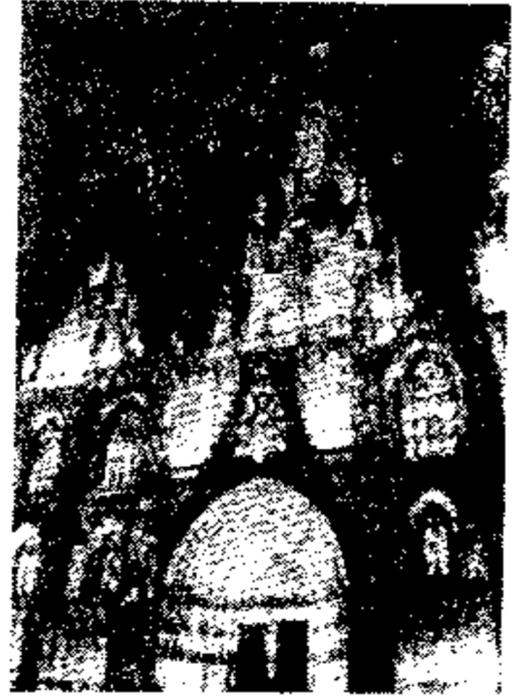


图16-8 教堂的外部照明的典型实例

表16-2 寺庙、教堂的外表面的色彩数据

表面的状况	色相 H	明度 V /	饱和度 C
新的柏木结构	5 Y R ~ 10 Y R	6 ~ 8	4 ~ 6
旧的柏木结构	5 R ~ 5 Y R	2 ~ 4.5	1 ~ 2
旧的榉木结构	7.5 R ~ 7.5 Y R	1.5 ~ 3	0.5 ~ 1.5
鲜明的朱红涂饰	5 R ~ 10 R	5 ~ 6	8 ~ 12
稍暗的朱红涂饰	10 R ~ 5 Y R	4 ~ 5	6 ~ 10
带白色的墙面	N	8 ~ 9	0 ~ 0.5
明亮的墙面	N	6 ~ 7	0 ~ 0.5
明色调砂浆	5 Y ~ 10 Y	7 ~ 8	0 ~ 1
暗色调砂浆	5 Y ~ 10 Y	5 ~ 6	0 ~ 1

表16-3 寺庙、教堂外面的明度和照度的参考值

外面的明度	9/	7/	5/	3/
反射率(%)	78.7	43.1	19.8	6.56
参考照度(lx)	25	50	90	150

注：周围明亮时为1.5倍，暗时为0.6倍左右，视表面的污染程度，用1.5~3倍

16-8-4 光源的配置

光源要尽量隐蔽，特别要注意不能让它显露出来。光源的配置要使过路人不会感到眩光。

从杆上进行投光照明时，要考虑和建筑物的结构和色彩的协调，要照顾到不致损害白天时的美观，这对宗教设施照明是特别重要的。

16-9 美术品的展示照明和保存问题^[20]

(1) **美术品和珍宝的照明** 在适当的照明条件下展示，应把它作为人类的宝贵财产而考虑其保存问题。在展出时要消除损伤的原因，采用的照明必须是对展品损害最小的。

(2) **由于光化学反应而发生的损伤及其防护** 光能被展品吸收即成为损伤的原因。会引起损伤的波长特性的一例示于图16-9。根据它的特性求得各种光源的结果示于表16-4。

为了减少损伤，必须使用损伤度小的光源，避免过高的照度，缩短照明时间。

(3) **由于温度上升而发生的损伤及其防护** 展品的温度上升大致和辐射照度成比例，故使用单位照度的辐射照度低的光源便能减少温度上升。但由于照明的开关，致使展品的温度反复地上升和冷却，从而产生膨胀和收缩，也会成为损伤的原因。

为了降低灯泡的辐射照度，可使用隔热滤光片，为了降低荧光灯的辐射照度，使用普通玻璃即可。

各种光源的单位照度的辐射照度的例子示于表16-5。

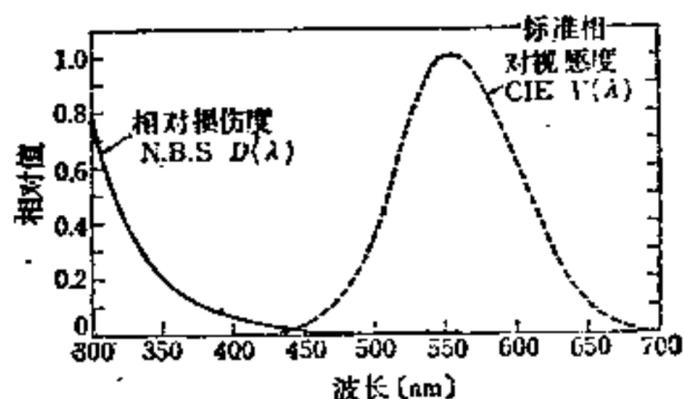


图16-9 损伤的分光特性的一例

表16-4 单位照度的损伤系数(相对值)

光源的种类	单位照度的损伤系数(%)	除400mm以下之外的单位照度的损伤系数(%)
背空、天顶的天空光	100.0	8.5
层天的天空光	31.7	5.1
太阳的直射光	16.5	4.0
日光色荧光灯(FL-D)	6.3	4.5
白色荧光灯(FL-W)	4.6	3.3
温白色荧光灯(FL-WW)	4.5	3.0
防紫外线荧光灯(FL-W·NU)	3.0	3.0
高表色性荧光灯(FL-EDL-42)	3.1	2.7
白炽灯泡(3200K)	5.1	1.2
白炽灯泡(2856K)	3.1	1.4

表16-5

各种光源的单位照度的辐射照度

光 源	单位照度的辐射照度($\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{lx}$)
白炽灯泡(Ld500)	45
带有红外线透过反射镜的灯泡(PAR150)	17
带有红外线吸收膜的灯泡(PAR150)	33
荧光灯(FL40W)	10
荧光水银灯(HF400X)	12
金属卤化物灯(MF400)	10
高压钠灯(NH400)	8
太阳光	10

(4) 由于湿度的变化而发生的损伤 展品的温度若变化, 则其近傍的空气中的相对湿度亦起变化。相对湿度达到40%以下时, 木雕品表面或厚漆的隔扇画就有发生剥离可能, 相对湿度超过60%时, 刀剑或金属镜面等就有生锈之虞。所以希望把相对湿度维持到40~60%。

例如, 灯泡以约3300lx的照度投射到黑色的油画颜料面上时, 温度约上升10°C, 而相对湿度降低约20%, 设计时需予以注意。

参 考 文 献

- (1) 松浦, 伊藤ほか: 照明教室, 34 (1974) 53
- (2) 中村 洋: 建築学会講演梗概集, 建築学会 (1969-8) 115
- (3) 池田栄一ほか: JIS Z 9110-1975, 日本規格協会 (1975) 付表-5, 16
- (4) IES: IES Lighting Handbook, 5th ed. (1972) 9~81
- (5) IES (London): IES Tech. Rep., 14 (1970) 1~17
- (6) L.G. (独, 換, 瑞): Handbuch für Beleuchtung (1975) Ausstellung, Museum p.327, Kirchen p.311
- (7) 小木曾, 永田, 中村: 建築学会論文報告集, 建築学会 (1966-10) 487
- (8) 中村 洋: 建築学会講演梗概集, 建築学会 (1966-8) 115
- (9) 平山 嵩: 照学誌, 4 (昭12) 140~171
- (10) 満山久夫ほか: やさしい明視論, 照明学会(1977-2) 76~78
- (11) IES (London): IES Tech. Rep., 14 (1970) 22
- (12) 中根, 伊藤: 建築学会論文報告集, 建築学会 (1975-3) 105
- (13) 松田泰太郎: 照学誌 (1976-6) 482
- (14) 江川麟之介ほか: 照明のデータブック, 第9編, 9・3, オーム社 (1968) 339~343
- (15) 松浦, 山口: 照学誌 (1976-4) 168~172
- (16) J. Jansen: Internat. Lighting Rev., 16, 6 (1965) 226
- (17) IES: IES Lighting Handbook, 5th ed. (1972) 12-2
- (18) J. Jansen: Internat. Lighting Rev., 16, 6 (1965) 196
- (19) J. Jansen: Internat. Lighting Rev., 16, 6 (1965) 237
- (20) J. Jansen: Internat. Lighting Rev., 16, 6 (1965) 245
- (21) 江川麟之介ほか: 照明のデータブック, 第9編, 9・2・7, オーム社 (1968) 337~338
- (22) L. S. Harrison: Illum. Engng., 49, 5 (1954) 253
- (23) 登石健三: 古美術品保存の知識, 第一法規出版 (1970) 29~34

第 17 章

服务行业建筑的照明

17-1 饮食店及其它

17-1-1 饮食店照明方法

即使同样说是饮食店，它的业务种类、规模、店内的结构（例如西式，日本式等）等也是很不相同的。从大的一流旅馆的宴会厅、高级饭店、餐厅，以至小的个人营业的饭馆和饮酒店，虽然不能以相同的照明方式来论述，但它的基本的考虑方法是没有什么变化的。

饮食店，尤其是在就餐房间的照明设计，最重要的是要创造出良好的气氛。为此，光源和照明器具的选择，必须充分注意采用和建筑结构和家具能很好地配合的照明手法。

17-1-2 表面亮度的考虑

标准 JIS Z 9110 “饭馆、餐厅、饮食店”。已列出各房间的照度，如表 17-1 所示。

选择各部分的照度时，需分为重视气氛和重视功能两方面来考虑。重视气氛的部分有进口大门、等候室、集会厅、就餐室、饭桌等，重视功能的部分有管理处、帐房、存物台、厨房等，至于盥洗室、厕所、走廊、楼梯等可作为中间性部分来考虑。

菜样陈列橱有设置在店面进口附近，也有像百货公司的食堂那样设置在建筑物内部的。前者要避免外面光线的直射，照明器的光源必须注意不要直接照射到客人的眼里。

17-1-3 光源和灯具的选择

(1) 光源的光色和气氛 一般而言，色温低的光线可以得到暖和的气氛，色温高的光线可以得到阴凉的气氛，这是大家所熟知的。

表 17-2 列出各种光源的冷暖感和相应色温。

根据实验结果，低照度时喜欢低色温光源，随着照度变高就有喜欢白色光的倾向。对照度水平高的照明设备，若用低色温的光源，就会感到闷热。对低照度环境，若用高色温的光源，就有青白色的阴沉气氛。所以光色的感觉若不和照度联系起来考虑，就不能得到良好的照明效果和气氛。

对于饮食店，除上述情况外，为了很好地看出饭菜和饮料的颜色，还应选用一般色指数高的光源，依靠暖冷光色光源和高显色性光源的适当组合，才有造成舒适气氛的可能。

(2) 光源的选择方法 饮食店的照度一般和办公室的不同，并不要求照度很高，所以

表 17-1 照度标准

1000	~	500	~	200	~	100(lx)
○菜样陈列橱		集会厅 ○饭桌 ○管理处 ○帐房 ○存物台		进口大门 等候室 就餐室 厨房 盥洗室 厕所		走廊 楼梯

注：附有○的部分是和基本照度合在一起的照度

表 17-2 光源光色的感觉

相关色温(K)	光色的感觉
>5000	阴凉(带青的白色)
3300~5000	中间(白色)
<3300	暖和(带红的白色)

各种灯泡和荧光灯等光源，可供选择的范围很广。对于旅馆的大宴会厅那样顶棚高的房间，也可采用显色性好光效高的金属卤化物灯等高强度放电灯（HID灯）。

如表 17-3 所示，荧光灯也有色温从 3000K 到 5000K 的，也就是从暖光色到冷光色的，所以和灯泡的混光要做到一点也不失调是可能的。因此，若是大房间，也可用以荧光灯为主，而以灯泡为辅的照明方式，若系小房间，则用以灯泡为主的自由照明设计。

表 17-3 饮食业使用的各种光源的色温和显色指数

种 别	灯 的 名 称	型 式	色温(K)	平均显色指数 R_a
白 炽 灯 泡	一般照明用灯泡	LW100V100W	2850	100
	聚束灯泡	CRF100 100	2870	100
	卤化物灯泡	JL100 100	2900	100
荧 光 灯	白色	FL40S.W	4200	64
	日光灯	FL40S.D	6500	77
	温白色	FL40S.WW-A	3500	59
	白炽灯泡色	FL40S.WW-SF	3200	65
	高表色型	FL40S.W-DL-X	5000	92
汞 灯	透明型	H400	5800	23
	荧光型	HF400X	4100	44
金属卤化物灯	高表色型	D400	5000	92
	扩散型	MF400	5000	65
高 压 钠 灯	扩散型	NH400F	2100	28

(3) 灯具的选择方法 如前所述，饮食店照明的良好气氛是很重要的，灯具的选择也需从造成气氛上来考虑。

配合建筑构造，尤其是顶棚的作法来设计照明灯具是最好的方法，但除旅馆的宴会厅和高级饭店、餐厅等场合以外，还需要考虑灯具的造价。

现有的灯具，从高级品到普通品，种类增加很多。选择特殊的需要单独定货的灯具也不困难。

选择灯具时，需要注意之点是：荧光灯不论是直接装在顶棚面的，还是嵌入的、悬挂的，都要选用不使光源直接外露的带罩灯具。对于灯泡灯具，不论是悬挂的，还是嵌入的、半嵌入的，都不必带罩，重要的是光源应选用一般照明用灯泡（白色硅玻璃灯泡），如球状灯泡、反射型灯泡、光通屏蔽型灯泡、卤化物灯泡等眩光少而正下面光度高的光源。

(4) 建筑化照明 一般的方法是把照明灯具装设在顶棚上，有的利用全部顶棚作为照明灯具，也有利用顶棚作为反射板，目的是使大的房间具有均匀度高的照明效果。这就是所谓建筑化照明。

图 17-1 所示是发光顶棚的照明方法。它是在顶棚面上铺上扩散透过材料（乳白或透明棱镜的塑料），在顶棚内部配上荧光灯，以取得柔和而整洁的照明效果。为了不使光线照到的透光面上出现光斑，重要的

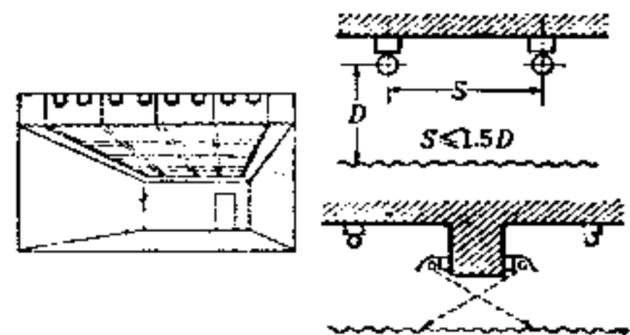


图 17-1 发光顶棚照明方法

是要把照明灯具的间隔及灯具和透光面的距离保持到如图所示的关系。

图 17-2 所示是格片顶棚照明方法。它用塑料或金属格片代替扩散透过材料。一般说,格片的保护角是 30° 和 45° 。在设计时,为了使格片面不致出现光斑,照明灯具的间隔,灯具和格片的距离可参考图上的数字。用金属格片时,因墙面变暗,故能得到安定的气氛,但要得到豪华的感觉时,就必需再加墙上照明。

图 17-3 所示是穹窿照明方法。它是把光源装在顶棚或墙面上,使它的直接光反射到穹窿的墙或顶棚上,依靠它的反射光束照明的方法。由于这种方法效率低,只在照度较低的房间作为气氛照明或同其它的照明并用。

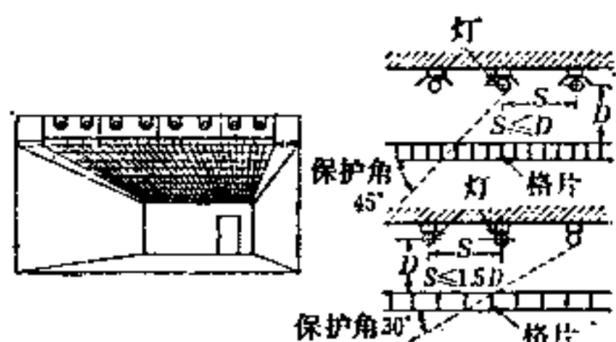


图17-2 格片顶棚照明方法

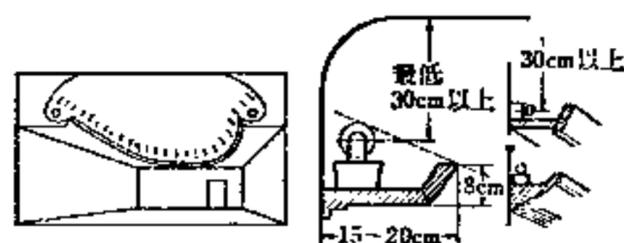


图17-3 穹窿照明方法

图 17-4 所示是围箱式照明方法。它是把顶棚面切成圆形或四角形,内部嵌进照明灯具,使顶棚不使人感到单调的照明方法。

图 17-5 所示是下投式照明方法。它是把光源嵌进顶棚内,光线从小洞向地板面照射的方法。它和直接装在顶棚面上或吊灯的照明不同,其特点是顶棚面看起来整洁大方。光源主要是白炽灯泡,最近把低功率高效高压放电灯应用在大房间的例子也在不断增加。

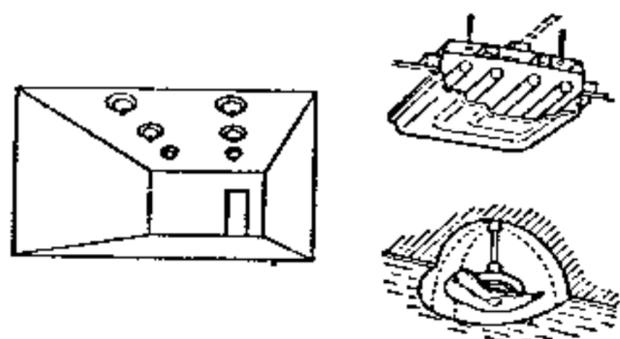


图17-4 围箱式照明方法

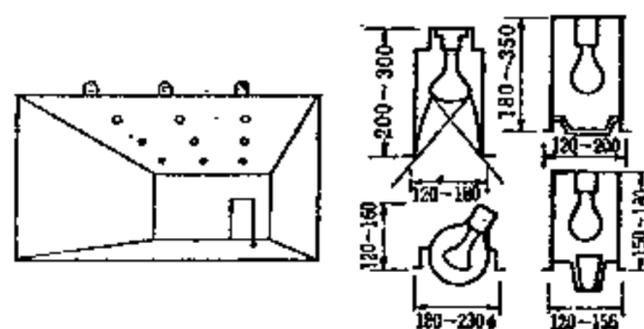


图17-5 下投式照明方法

17-1-4 照明设计举例

现将上述各照明设计方案的内容和特征阐述如下。

(1) 餐厅的照明 (图17-6)

(1) 主要照明——这是依靠埋藏在内的槽型荧光灯灯具和有机玻璃罩的建筑化照明方式。

○光源 FLR40SW-DL-X 2600 lm

○照明利用系数 (U) 0.40

○减光补偿系数 (M) 0.62

○设计照度 (E) 250 lx

(2) 辅助照明——依靠墙边的管口照明,进口部分用下投灯,小院用下投灯、聚光灯等。本例中因一般照明影响不大,故不包括在上述的照度之内。

(3) 特点——主要照明都是嵌入式，使顶棚看起来整洁，光源配以高显色性的40W荧光灯，由于亮度适当，显色性好，可以得到情绪愉快的照明效果。辅助照明在两个地方进行墙面照明，不用担心墙边阴暗。另外需要设置事故照明设备，这里省略了指示照明灯及事故照明灯。

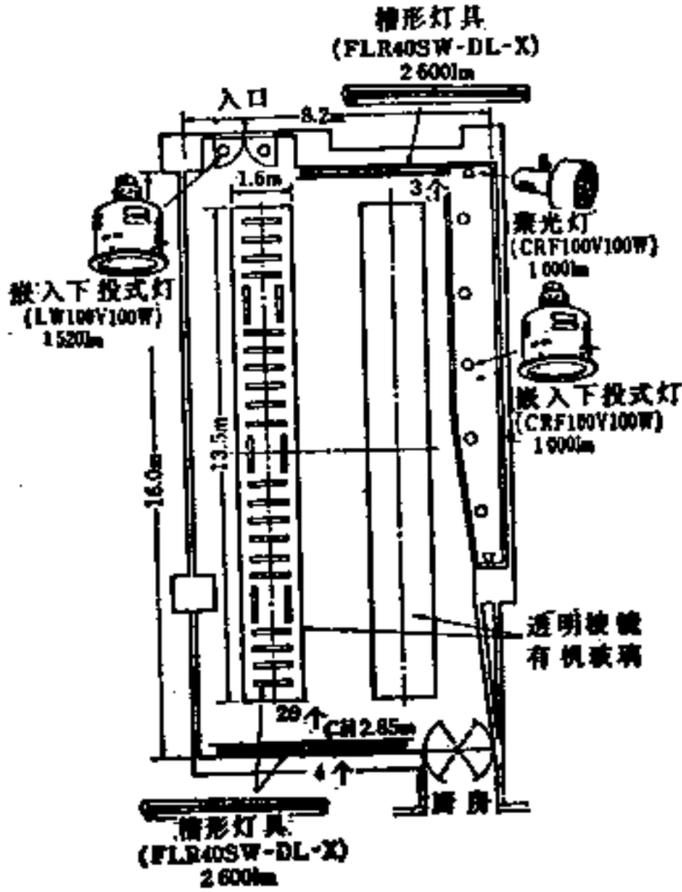


图17-6 餐厅的照明

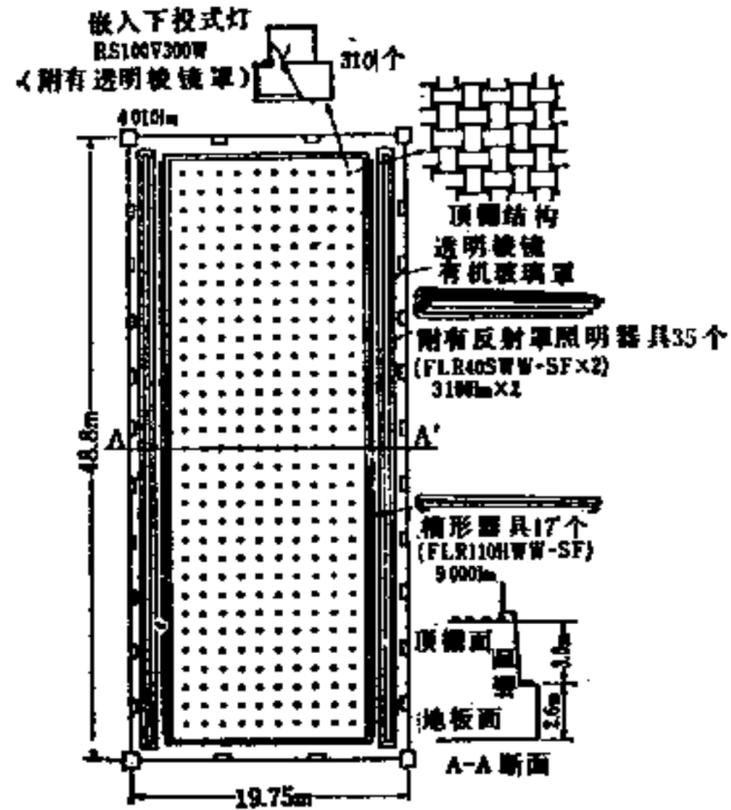


图17-7 旅馆宴会厅的照明

(2) 旅馆的宴会厅照明 (图17-7)

(1) 主要照明——这是依靠嵌入式下面附有透明棱镜有机玻璃罩的建筑化照明方式。

- 光源 RS100V300W 4010 lm
- 照明利用系数 (U) 0.50
- 减光补偿系数 (M) 0.65
- 设计照度 (E) 560 lx

(2) 辅助照明——依靠埋藏在两侧顶棚内的带有反射罩和透明棱镜有机玻璃罩的双管荧光灯灯具来照明。

- 光源 FLR40SW-SF3100 lm
- 照明利用系数 (U) 0.5
- 减光补偿系数 (M) 0.62
- 设计照度 (E) 140 lx

其它，依靠两侧墙面的槽形器具 (FLR110HWW-SF) 作墙面照明 (对地板面的照明利用系数推算为 0.1 以下，故照度不应计算)。

(3) 特点——采用豪华的建筑化照明方式，顶棚结构编成井字形，在它的隙缝间大量配置嵌入式灯具，加之灯泡适宜，光色暖和，从而提高了宴会厅的气氛。最高照度达 560 lx，光线充足，所有照明灯具都有调光可能，按需要控制照度。两侧顶棚及墙面用的荧光灯，为了和主要照明的光色相配合，采用暖色白炽灯，光色没有不愉快的感觉。和 (1) 同样，省略了事故照明灯具的设置。



图17-8 旅馆宴会厅的照明实例

17-2 旅馆设施及其它

日本的旅馆设施有西式旅馆和日本式旅馆，旅馆建设需要大量资金，而利用率和收益则比较低，为了降低人事费和提高工作效率而推进机械化和多方面经营是旅馆的方向。

17-2-1 旅馆的分类

旅馆的经营是以它具有特色的建筑和富有吸引力的设施为手段，用气氛和服务质量为客人服务。这样大致可按表 17-4 所示进行分类。

表17-4 旅馆的分类

	分 类	名 称	说 明
城市旅馆	一般社交的设施完备，有最大限度的收容能力，住房和公共场所的关系在功能上予以充分考虑。	居住性旅馆	以商业、事务上的旅行者，观光者，短期旅行者对象，设备高级
		商业性旅馆 (事务性旅馆)	主要是供商业、事务上的旅行者利用，建设在城市中心、交通方便的地方
		终点站旅馆	是和交通部门合建的旅馆；有车站旅馆，港口旅馆，空港旅馆等
		公寓旅馆	是适合于客人长期居住的旅馆，各住室有炊事设备
娱乐旅馆	充分考虑眺望及其它环境的条件，旅馆内外建有娱乐设施	海滨旅馆	分别按照地点而增加特色
		山区旅馆	
		温泉旅馆	
		体育旅馆	以体育设施为主
其 它		青年旅馆	国立和国定公园等设置的供青少年用的旅馆
		汽车旅馆	是供汽车旅行者利用的旅馆，具有一般旅馆的设施

城市旅馆为了提高住宿和饮食的营业率，提高收益，它的地理条件和建设内容都是重要的因素。

在交通方便而地价昂贵的城市，建设高级旅馆或商业旅馆，因住室的营业率有一定的限度，故多以活动集会或饮食部门来提高收益。为此必须提高内部的设计和空间环境的标准，而照明设备负有一定的作用。

娱乐旅馆，因一般是以事务性和娱乐性为对象，建设费虽然便宜，但收益仅限于住宿费，远离城市中心的旅馆，因晚上住客总是呆在旅馆，为了提高娱乐和饮食方面的收益，需要造成良好气氛的照明设备。

17-2-2 旅馆的各部门

旅馆的设施可根据国际旅馆配备法规来决定，按使用的目的可区分为前厅、公共场所、客房和后厅等部门。

各部门的照度可参考 JIS 的照度标准来决定，根据建筑基准法和消防法设置事故照明和指示照明设备，饮食部门则需根据食品卫生法和有关法令保持一定的照度。

17-2-3 前厅照明

前厅包括客人能从外部自由出入的进口大厅，以及传达和会计等事务处理兼用的柜台。

(1) 外部 旅馆建筑一般具有特定的外观，所以晚上应对建筑物和塔等加以投光照明。

在这种情况下，要注意不使室外的照明射进室内，以致打扰住客。尤其是面对住宅的墙面照明，要避免把住房顶棚照亮。

设有庭园时，从室内向外眺望，会看到玻璃窗上的室内映像，为了减弱这情况，需使用庭园灯或投光照明把庭园照亮。

(2) 进口大厅 这是对外来客人产生的第一个印象的地方。为了从这里看到主厅的华丽，可选用下投式灯等不显眼的照明手法。为了和屋外的照度变化相配合，要能通过调光或开关来调节照度。

(3) 柜台 这是传达收发和事务处理的场所，为了既要从进口大厅看起来显眼，又要能提高工作效率，所以要求亮一些。

柜台内的照明如图 17-9 所示，可用格片顶棚或发光顶棚的低亮度手法。为了使前厅照明的气氛柔和，另外可加上直接安装在顶棚的灯或吊灯，为了表示是收发传达及会计等地方，可在柜台上部加上内部有光线的标志。

17-2-4 公共场所

主厅和食堂等通常是从住房的收客人数来决定其最低面积的，但它不仅是房客，而且也是一般客人能够利用的场所。

为了从饮食部门提高收益，需设有宴会厅和酒吧间、茶室等，尤其是城市旅馆，还设有与此相应的集会厅和结婚礼堂等。

(1) 主厅 设有沙发和台子，这里是进行休息、等候、接待的场所。

商业旅馆和娱乐旅馆做成如图 17-10 所示的建筑化照明和下投式照明，能使人感觉到



图17-10 主厅的照明



图17-11 主厅的照明

轻松明快，但经营饮茶时，则可用有华丽感的枝形花灯或用可以得到安定气氛的立灯的手法。这些手法可和下投式组合起来进行照明。

如图 17-11 那样把墙面照亮的手法，可使主厅看起来开阔而华丽。

(2) 餐厅 主要餐厅不仅要供房客，而且也要供外来客人利用，不一定和宴会厅那样华丽也可以。

这里即使只有一个客人也必须把灯开亮，所以要采取效率良好的照明手法，要能在明亮的气氛下舒适地就餐。

娱乐旅馆的餐厅，要求能使人在那里舒畅地进行饮食，对应它的环境，也可采取图 17-12 那样的手法。

旅馆除设置一般餐厅外，还有设置如图 17-13 那样的小餐室和茶室。这些场所的照明设备，可参照 17-1 节来决定，但需要保持食品卫生法和有关法令所规定的照度。

(3) 活动集会场所 为了提高饮食部门的收益，备有各种集会场所，能举行欢庆宴会、



图17-9 前厅柜台的照明

茶话会等大小宴会。这里装饰豪华，照明也具有华丽的枝形灯或建筑化照明手法等特色。为了用聚光灯提高演出效果，可设置调光装置。

图 17-14 为小宴会厅的照明实例。即使为了不使和其它类似的会场搞错，各种宴会厅也可以采用不同的照明手法为好。



图17-12 餐厅的照明



图17-13 酒吧间、小餐室的照明



图17-14 小宴会厅的照明

从有效地利用宴会厅考虑，可设置结婚礼堂，附设摄影室、美容室、候客室等。这些房间的照明设计要能把宴会厅的照明突出出来。结婚礼堂的照明如图 17-15 那样，既要严肃，又要华丽。摄影室的照明可参照 26-4 节，美容室的照明可参照 17-3 节。

除图 17-16 那样的大会议室外，还有设置几个中、小会议室（或集会室）的，这些设施也要做成像宴会厅照明一样的显眼。

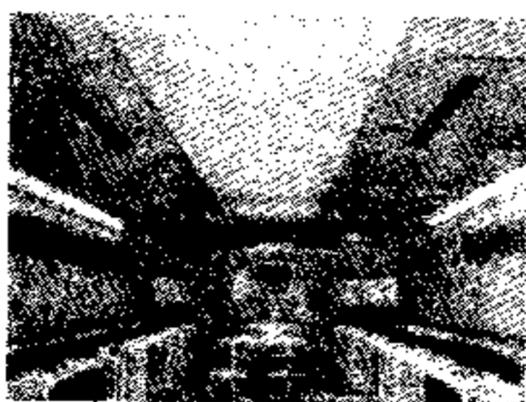


图17-15 结婚礼堂的照明

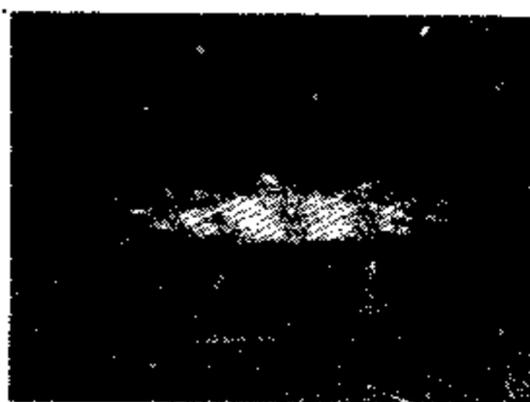


图17-16 大会议室的照明

(4) 走廊 通向公共场所的走廊，是不熟悉旅馆情况的客人通过这里去展览室、会议厅，茶室等的通道，照明要明亮些，要像图 17-17 那样采取不会阴暗的手法。

通行不多的通向客房的走廊，电灯间距可做成图 17-18 那样，使其稍为暗一些，但晚上若把一部分关掉，就会使人有不安感觉，可用调光装置做成减光照明。

17-2-5 客房照明

经营旅馆的主要场所是供客人住宿之用的客房。客房主要定员以在二名以内为宜。按规定，附有浴池卫生间的地板面积为 13m^2 以上的客房，日本六大城市是 30 间以上，其它地方是 15 间以上，并且要占总客房数的二分之一以上。

客房的设备按规模等情况不同而异，一般是如图 17-19 那样以具有洗脸池、便池、浴缸

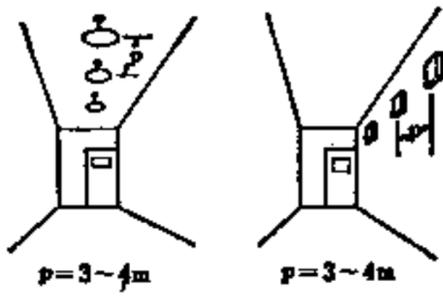


图17-17 通向公共场所的走廊照明

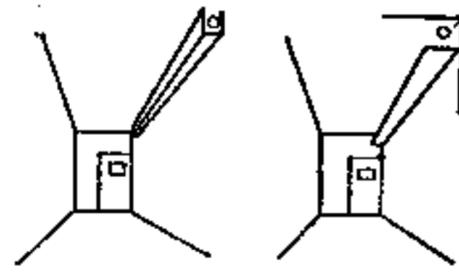


图17-18 客房周围的走廊照明

的卫生间和放有桌子的起居室兼卧室所构成。

(1) 客房 由客房而得的收益是固定的，因此设备情况要保证不致损害它的使用效果。

客房入口顶棚可用直接装置在顶棚面上的照明灯具或下投式灯具，房间的一般照明，从它的构成来考虑，也可不用顶棚灯而改设落地灯，或在墙面用壁灯或荧光灯的均衡照明。要用能从入口和床头两方面操作的三路开关。

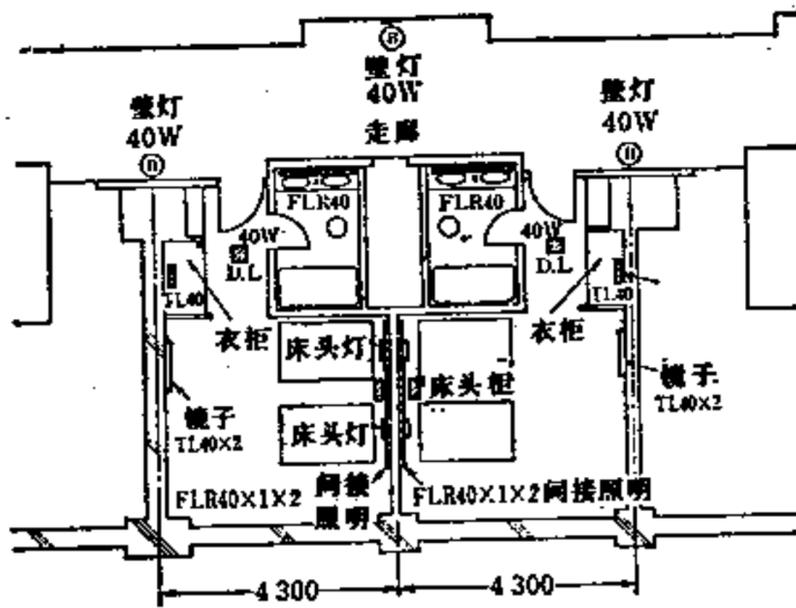


图17-19 客房布置实例

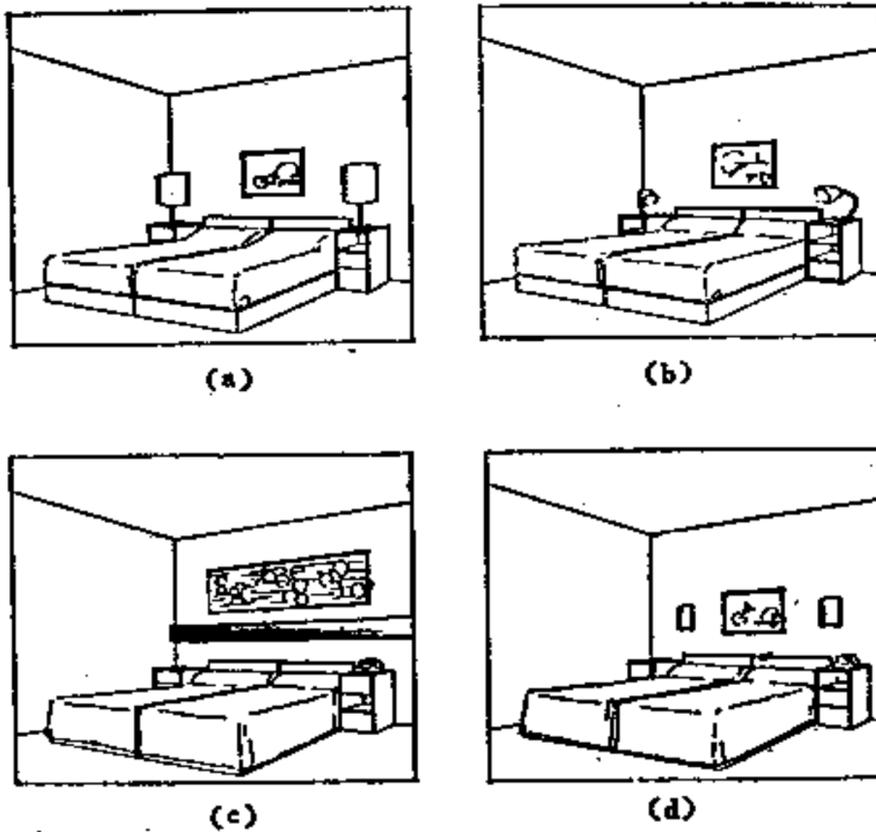


图17-20 各种床头照明

(2) **床头灯** 床头的照明要在就寝和看书时设有眩光和手影, 而且要在伸手范围内能开关。

图 17-20 为床头灯的设计实例, 双人客房用床头灯要选用光线不相互干扰睡眠的灯具, 床侧设床头柜时, 可在这里设脚下灯作通宵照明用。

17-2-6 后厅照明

旅馆营业需要有管理室、厨房和机械室等。其中厨房在卫生和作业上, 要求阴影少和照度适当的照明。选用光源的光色要做到看见的饭菜色彩和拿到餐厅或宴会厅时的相同。要用不易积尘的照明灯具及照明方式。

17-3 美容和理发店照明

美容理发店是在清洁感中造成美的技术的工作场所, 对工作人员来说要求能帮助其发挥技术, 对顾客来说, 要求照明能保证外部装修、进口处以至内部装修都能创造出美的环境。

但美容理发店以规模中等的居多, 所以设计时应就该店所在地区的顾客性质, 他所期待的印象和气氛而异。有的具有豪华的一流旅馆或剧场沙龙大厅的气氛, 有的是富有精致小品的感觉, 像小卖店中看到的轻松感, 总之, 必须使照明适应该店经营的服务方针。尤其是美容店, 必须把它作为最重要的事项来考虑。

17-3-1 美容店照明

(1) **外部装修** 美容店设在大楼内时, 内部的照明灯具的装饰性从表面看, 要和外部设置的招牌立灯等相协调。

若设在马路边时, 要加上墙面照明。因一般建筑形式多半具有自己的特色, 所以要在墙面照明的照度分布上多下功夫, 当墙面稍向后退时, 可在檐口下配置下投式灯具, 当墙面后退较深, 则可配置庭园灯。入口部分则需设置配合建筑形式的吊灯或壁灯。

(2) **出纳柜台和顾客等待场所** 外墙装设大玻璃的美容店, 往往可从外部通过窗帘看到内部。这一部分的照度随邻近状态而异, 可采用 $300\sim 1000lx$ 的照度。一般照度低时, 出纳部分及商品陈列部分的照度要有一般照度的二倍, 照明灯具应考虑它的外表, 可使用枝形花灯、吊灯、立灯等有装饰性的灯具。

(3) **烫发处** 理发员是朝向镜子站在客人后面的位置, 这里的照明要没有眩光, 要能看出造形的表现、头发的光泽和柔和感。在荧光灯的基本照明中, 可加下投式灯及吊灯的灯泡照明, 总照度希望有 $1000lx$ 左右 (图 17-21)。

(4) **吹风处** 这里的作业照明除考虑修指甲外, 还要考虑顾客能阅读书报 (约 20 分钟)。

(5) **洗发处** 因顾客在这里是面向顶棚的姿势, 故在其视线方向不要看到外露的光源。可用带罩荧光灯, 照度为 $300\sim 500lx$ (图 17-22)。

(6) **专用小房间** 染发、化妆、美容等多在个别小房间内, 这里的照明要能转换, 要求能在白炽灯、荧光灯和合成日光等下面看发样, 房间装修必须给人以丰富活跃的感觉。

(7) **其它** 结婚礼堂另设有穿衣室, 照明设计时可先决定结婚宴会厅的照明, 按照它的照明效果来考虑穿衣室镜子前面照明的照度、光质和照度分布。

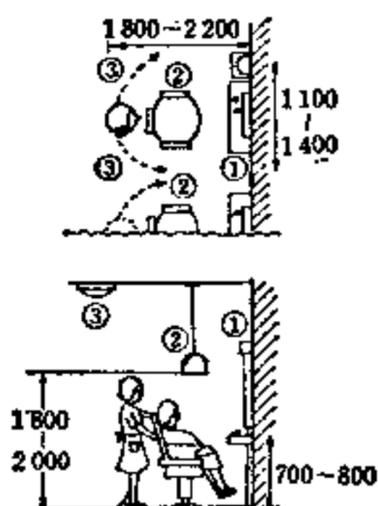


图17-21 烫发处灯具实例
①或②之外另有一般照明③

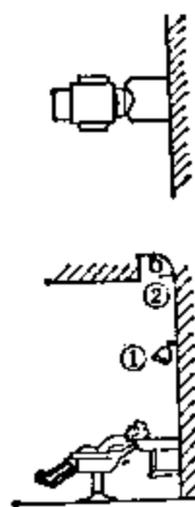


图17-22 洗发处灯具实例
①之外另有一般照明③

17-3-2 理发店照明

理发店的照明基本上是要有清洁感。和美容店一样，要根据所在地区是住宅区、商店区、公寓内、办公大楼内、旅馆内、百货公司内或车站大楼内等条件，重点是体现出照明效能和气氛的轻松感。为了得到好的效能，可用荧光灯连续排列的照明方式来提高照度，造成500lx以上的一般照明。对于轻松感，则应避免排列成线形的一般照明，根据情况的不同也可采用间接照明。

无论哪一种方式都应避免眩光，即使是荧光灯，在它的下面也要用防止眩光的灯罩。

第 18 章

商店照明

18-1 商业和照明

在商品出售中，把商品的构成和内部装修、陈列方法等巧妙地配合起来，以提高空间造型感，这对提高出售率和相应的附加价值具有重要的意义。

随着社会经济的变化，必须敏感地抓住消费者的心理，满足顾客的欲望，总之，必须以顾客为主体来设计照明。消费者的想法有从量的方面向质的方面转变的倾向，商业设施的照明设计也要适应这一情况。例如在小卖店、百货公司、时装店等商业空间，装饰性效果尤其重要，也就是说照明必须适应各种各样的商业空间的功能要求。这些照明不仅要使人能看见商品，而且还要创造出商品陈列和高级品的价值感和购买乐趣，增进购买欲望。

考虑顾客的特点的不同，是设计时不可放过的要素之一。例如新家庭妇女、职业妇女等，是把购买商品作为生活的一种乐趣的。对于这些顾客，需造成明亮而感觉良好的气氛。对于年轻妇女那样富有冲动性购买者，照明就需表现出富有强烈的感染力的色彩。

不管哪一方面，在商店的展出功能中，照明是不可缺少的要素之一，对造成商店气氛的良好环境是很重要的。

18-1-1 购买心理和照明

为了造成“愉快而舒适地购买商品的场所”，重要的是使商店的构成和陈列相协调。必须把称为商店形象的形态因素，和商品展出及店铺利用的因素加以综合考虑。在这样的前提下，满足顾客购买心理要求的照明能把顾客吸引到店里来。

一般说，对路过商店的顾客的心理，可分为表 18-1 所示的九个阶段。

表 18-1 顾客心理和照明

阶 段	表 现 效 果	照 明 要 点	
①不关心	展出效果 陈列效果	店铺形象 (外部装修、招牌等设备充足)	
②注意		使之显眼 (照度与亮度协调)	
③兴味		和商品形象的调和 (照明器设计，功率大小的平衡，光色效果的利用)	
④联想		好印象 (愉快舒适的气氛，立体感的表现)	
⑤欲望		诱导 (照度及其分配，装饰效果)	
⑥比较		容易看得清 (照度充足，没有眩光，光质效果的利用)	
⑦信赖		表色性 (实用上必要的显色性，光色的考虑)	
⑧行动		} 照明的均衡	
⑨满足			

从照明方面来看，过路的顾客在①阶段时，重要的是外部装修、色彩、店面设计等要造成易于接近的气氛，这不仅关系到把老顾客固定下来，而且对争取新顾客也有好处，也即关系到提高对顾客的吸引力。依靠店面和陈列窗的展示和照明的效果，把人的眼睛吸引住的②，以及给与兴味和联想的③、④是重要阶段。在⑤阶段，为了诱导客人到商店来，需要适当的照度分配及装饰的效果。⑥以后几个阶段，希望有充足的照度和适合于该商品的光色（实用显色性）的照明。最后在⑨阶段，这些照明要和全部商店很好地协调起来，使人在购买物品时留下好的印象，变成让人下次还想再到商店来的重要因素。

顾客这样的购买心理，按业务的种类而有所不同，有时大有时小，照明亦需按对应情况而作适当处理。

18-1-2 照明的作用

即使都是商店，但业务种类也有各式各样，它的构成也是多种多样。即使同样是以贩卖为目的，但在像饮食店那样的场所，店内没有陈列品，对这样容易使人扫兴的商店，应使其内部巧妙地与照明调和起来，有时可把照明灯具的豪华性鲜明地表现出来，造成强烈的气氛。出售物品的商店照明，基本要求是把商品适当地显示出来，若照明（灯具）较商品本身更为显眼，则煞费苦心的商品陈列就完全得不到有效的利用。因此，巧妙地利用光作用是很必要的（图18-1）。

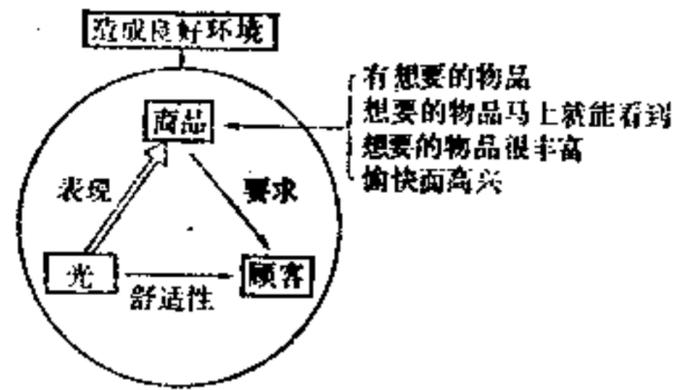


图18-1 造成良好的照明环境

照明是依靠光线的功能，让灯光作用于顾客的眼睛，使其注视到商品上，这对推动顾客的希求心理，有重要的作用，而且对出售率的提高也有很大的帮助。

18-1-3 灵活性

不管商店的规模如何，商店内部，尤其是商品的陈列场所和陈列方法，必须考虑经常进行变动。在变更时要是把所有设备根本来一个大改变，则停业中的损失将是莫大的。

因此，在开始设计和施工时，就必须考虑以后变动的灵活性。例如墙面及地板面的万能插座，顶棚面的配线槽，或全部顶棚的系列化等，希望预先考虑设备的可变性。

18-1-4 能量的有效利用

在商店经营中，设备的运行费对提高收益占很大的比例。包括照明在内的设备的总的能量的有效利用，例如依靠空调设备和光源光色心理效果的能量的减少，和照明控制系统（开关、调光等）的有效利用，就能谋求全部商店的能量的有效利用。

此外，还必须积极有效地利用荧光灯等高效光源。例如，可以取得安定气氛效果的基本照明，依靠与建筑、内部装修协调的建筑物照明，就能减轻全部的设备能量。对于聚光灯的利用，在选择容量及照射位置时要仔细研究，以提高它对商品的照明效果。

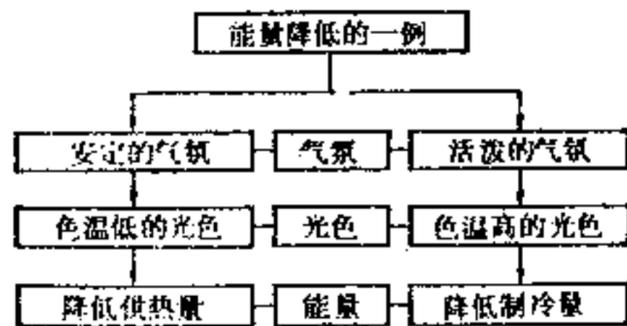


图18-2 能量有效利用的一例

18-2 光源的选择

18-2-1 光源的特性

在商店照明中,光源的光色和显色性对店内的气氛、商品的质感等,都有很大的影响,作为特性之一,灯泡可得指向性的光,而荧光灯可得扩散性的光,很好地利用这些性质,即可取得商品的质感。

现在有很多商店采取了巧妙地使用荧光灯的照明手法,今后,尤其是在大型的商店中,使用效率高、显色性好、寿命长的高强气体放电灯(HID灯),将变得愈来愈多。表18-2所示

表18-2 主要光源的种类和特性

种	类	功率 (W)	特 性
荧光灯	白 色	20~220	效率高,寿命长,用于商店的一般照明。强调黄、白系统的色彩,红色系统不适合
	日 光 色	20~110	以冷色光使商品看出鲜明的美。玻璃器的照明。强调青色系统
	高 级 光 色	20~110	显色性良好。效率不太高。重视色彩、花纹的照明
	白 炽 灯 泡 色	20~40	可得和灯泡光色相同的柔和感和灯泡混合时及有失调感觉
	色 评 价 用	20~40	显色性极高。因效率低,故不适于一般照明
高强气体放电灯 (HID灯)	萤 光 汞 灯	40~400	寿命长,比较便宜。适于不重视显色性的照明
	金 属 卤 化 物 灯	250~400	效率高,显色性也大致和白色荧光灯相同。用于高照度的一般照明
	高显色型金属卤化物灯	125~400	显色性优良。效率不太高。适于重视色彩、花纹的照明
白炽灯	卤化物灯泡 (单端灯头)	100~500	非常小型,寿命长,配光控制方便,要注意热处理
	卤化物灯泡 (双端灯头)	500~1500	效率也高,寿命长,要注意热处理。中、高顶棚的照明用
	一般照明用灯泡	20~100	小型而便宜,效率低。适于吊灯、下投式灯
	球 形 灯 泡	20~100	小型而简单。也可用作装饰照明,较一般型式寿命长
	梯 形 灯 泡	20~100	适于装饰照明用。效率低,较一般型式寿命长
	反射型聚光灯泡	40~100	小型,局部照明。寿命较短,辐射热多
	屏蔽光束型聚光灯泡	40~100	小型,可得集光型配光,较热线遮新型约亮10%
	屏蔽光束型聚光灯泡 (红外线遮断型)	60~150	小型,可得集光型配光。辐射热(红外线)非常少

注:表中功率为主要商店中使用的数据。

为主要光源的种类和特性。

从白炽灯泡是小型而价钱便宜这点来说，能够很容易设计得和商店的商品形象相调和的灯具。白炽灯泡本来效率就低，应充分考虑它的有效利用，避免造成忽视效率的照明灯具。

荧光灯适合于作为高效率的基本照明，对大的光源需考虑和空间装饰协调。使用于多灯的照明器时，若不充分注意照明器内的热处理也是危险的，这会带来降低效率的结果。

对于顶棚高度为3.5~4m的售货处和顶棚高的进口大厅等，从降低照明灯具数量和维修来说，适于采用可充分有效利用 HID 光源特性的照明手法。

18-2-2 光色（色温）和照明

（1）与内部装修材料质感相配合的光色 内部装修设计重要的是要造成能显出素材具有的材质感的形象。依靠光源的光色（色温），或使素材的形象得到衬托，或者使其柔和。这效果是由于光色和经验及联想相结合，而引起各种各样的感情效果之故。

如图 18-3 所示，色温高的光线，不仅有凉爽的感觉，而且能够得到健壮的、清澈的、活动的气氛。色温低的光线能够得到暖和的、柔和的、暗淡的、安定的气氛，所以能够强调木料、布料、地毯等的柔软的触感。

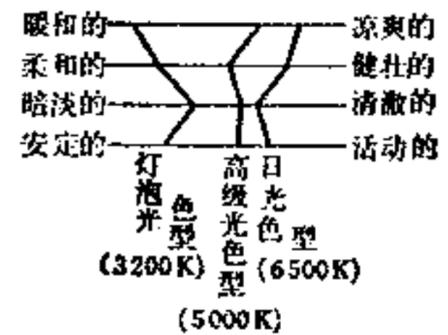


图18-3 光的色温和气氛

（2）与内部装修材料色彩相配合的光色 有关内部装修色彩设计和光色的关系，前项（1）也能适用。基调色用冷色系统（青、青绿）而显示清洁、明亮、沉静的感觉时，与其相称的是约5000K以上的光线。要是想以暖色系统（红、红黄、黄、红紫）造成家庭温暖的感觉，则用白炽灯泡和低色温荧光灯是适合的。

（3）配合照度的光色 作为选择适当光色的一个要点，是不能无视照度水准和光色。如图 18-4 的实验例那样，若把高色温系统的光使用于低照度的场所(200lx 以下)，就会增强冰冷、微暗的感觉。反之，若把低色温系统的光使用在约1000lx 以上的场所，就会完全变成闷热的感觉。

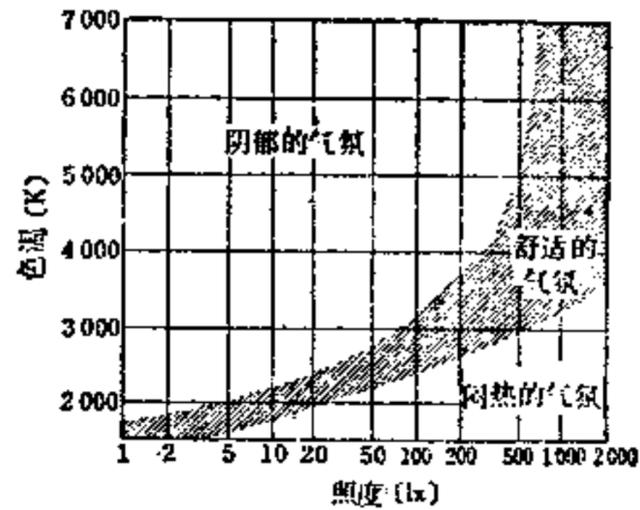


图18-4 照度色温和房间的气氛

(A. H. Willoughby, 1947)

欧洲多以白炽灯为照明的主体，日本则荧光灯（主要是白色型）得到普及，若考虑对高色温的习惯性，则图 18-4 的实验结果多少是有差异的，但遗憾的是日本没有发表过正式数据，所以图 18-4 只能作为一种趋向来参考。

18-2-3 色彩效果（显色与显色性）和照明

（1）使商品的色彩能正确显示出来 依靠光源使商品显示出来的方法有两种。一种是把照射物的色彩正确显示出来的方法，另外一种更加使色彩显得好看的方法。

一般常使用的灯泡以红色系统的光量为多，青、绿系统的光量是不足的。普通的荧光灯光色系统不足，以青色系统的光量为多。因此这两种光源显示出来的色彩都不能说是很好的，即显色并不太好。

这里说的显色，是指看到照射物的色彩的情况。而显色性则是指光源具有的光的性质。

一般用显色性好的灯光来照明，商品原有的色彩显示出来的情况（显色）也变得好。二者虽然可以做为同样的函义来使用，但要正确地区分和理解。

荧光灯中也有以显色性为中心的，最适宜于西服、布料、化妆品等的色彩和花纹的色彩显色。这里应注意的是，为了能正确地辨别色彩，就需要有一定程度的照度。即使是选用高显色性的光源，在100~200lx程度的低照度时，感觉到的色彩鲜明度就变得很淡薄。一般而言，要很好地灵活地运用一般照明和局部照明，至少也要考虑能得到500lx以上的照度。

（2）更加强调商品的色彩 为了更加强调商品的色彩，希望让它看起来很美时，可利用在一定的波长内发出强烈光线的光源，即提高它的光泽感，也增加它的价值感。例如用聚光灯、吊灯等向红色的鲜鱼或苹果等照射，就能得到把红色格外显示出来的效果。

这是因为除了灯泡的光色外，灯泡的高亮度的光线从商品反射出来，使它加上光泽的效果之故。即使是使用相同的灯泡，若亮度低（加上乳白球形罩），就不能得到上述那样的光泽效果。又如用高亮度的光源从各方面照射，宝石、玻璃器皿、贵金属等就能增加美的效果。

（3）实用显色性和照明环境 围绕在商品周围的光环境是各式各样的，不能说只是使用高显色性光源就可以了。重要的是要充分考虑到售货场所的主要使用环境，使照明在这里起到它的功能作用。例如要显示在天然光下使用的商品，以高显色性光源为好，但在室内照明下使用的商品，则可用荧光灯、灯泡或其混合光，或把商品放到专用的高显色性的一角，使顾客对商品看起来更为确切，觉得可以放心地买回去。这就是所需要造成的照明环境。

18-3 商店照明的分类和方法

18-3-1 商店照明的分类

良好的商店照明是依靠和商店空间协调的光线，来满足人的舒适感，以及生理和心理要求，从而引起购买者的兴趣。商店使用的照明器，除外形要求美观之外，更重要的作用是发出的光线，要使商品看起来真实，室内气氛好。

商店照明基本上是由一般照明、重点照明和装饰照明三部分构成。这三部分的构成比例适当，就能得到良好的照明。

（1）一般照明 作为店内的一般照明，应按各种商店的营业状态，商品的内容，所在地区的条件，商店构成，陈列方式等来考虑，其照度和重点照明的照度要有适当的比例，要在店内造成一定的风格。不仅是水平面照度，垂直面照度在很多情况下也是很重要的，都要重视。

通常对一般照明，很容易被人认为明亮就可以了，但若只考虑明亮，就容易产生平淡感，这样的设计作为商店照明不一定是适当的。照度可以按JIS照度标准选取，但明亮程度要适当，若把一般照明的照度取得很高，则为了使顾客注目就要增加几倍重点照明的照度，结果是增加冷气负荷，浪费电力。

此外，即使是一般照明，也有些商店需要考虑显色性的好坏。

（2）重点照明 这是为了重点地把主要商品和主要场所照亮，以增加顾客的购买欲望。照度随商品的种类、形状、大小、展出方式等而定。必须有和店内一般照明相平衡的良好照度。在选择光源及照明方式时，也不能忽视商品的立体感、光泽及色彩等情况。

重点照明的要点是：

- ① 和一般照明的比例一般是 3 ~ 5 倍, 以突出商品的形象。
- ② 以高亮度光源突出商品表面的光泽。
- ③ 以强烈的定向光突出商品的立体感和质感。
- ④ 利用色光突出特定的部位和商品。

(3) 装饰照明 这是表现商店业务状态和顾客性格的气氛照明。如通过照明器的外形美和把它排列成装饰性图案(顶棚面灯具的布置和悬吊照明器具的排列),使店内产生富有生气而热烈的理想的光线;或对物品造成良好的照明效果;或依靠墙面的照明造成室内的气氛效果;所有这些,都应注意把它作为内部的装饰因素而协调组合起来。

这里重要的是在使用装饰照明时,不能把它兼作一般照明用,不然,就会减弱商品的印象,而商品的印象是极为重要的。原则的做法是单以装饰为目标的照明只能独立地来考虑,而不能把一般照明和重点照明省略掉。

18-3-2 照明设计方法

(1) 照明设计的程序 进行商店照明设计时,一般应注意如下几点:

(a) 注意事项 在进行商店照明设计时,首先要充分理解商店设计者的设计方案(设计构思和平面布置等)。只靠设计图,要看出设计者所要求的商店的概念形象和空间的气氛是困难的。设计者总想把要设计的商店的空间,以透视图的形式浮现在头脑中,并把它表现在图面上,但微妙之处是难以表现出来的。在着手照明设计前,应尽量通过面谈,把不易理解的部分要求用透视方法在纸上画出草图,尽量使设计者理解清楚。

在进行商店的照明设计时,若没有很好熟悉它的业务种类和售货处的布置、顶棚高度、内部装修以及商店标准,而要作出良好的设计是不可能的。所以重要的是在设计前的调研工作要做得充分。

(b) 照明设计的程序

- ① 对售货处的照明方法的研究。
- ② 选定售货处的设计照度。
- ③ 选择适合于其业务种类和商品的光源。
- ④ 选择并设计照明灯具。
- ⑤ 从选用的光源和灯具,计算店内各部分的照度。
- ⑥ 考虑售货处的规模和照度以及应强调的效果,以决定灯数。研究照明器的布置排列并作图。
- ⑦ 研究商店照明用的电力容量和照明光源的辐射热的处理。
- ⑧ 研究商店照明的自动开关、调光和操作装置。
- ⑨ 研究陈列橱的电源用的万能插座。
- ⑩ 研究全部电力容量的电源和开关。
- ⑪ 商店照明的配线设计。
- ⑫ 商店照明设备费用的概算。

(2) 照明设计方法 进行商店照明设计时,必须对照明在商店内的作用和商品特点两个方面预先加以考虑。前者是作用于人的方面,也就是作用于顾客的心理的部分,目的是为了吸引他到店里来。后者是针对物的方面,也就是充分发挥商品的特征,主要是为了提高其附加价值感。也就是依靠这些方法,引起顾客购买商品的欲望。

在考虑这样的照明效果时，应由商店的相应气氛形象来决定。可以用“有生气的愉快感”、“爽快的清洁感”、“安定的平静感”、“戏剧性的幻想感”等语言来考虑（参照表18-3）。

表18-3 商店气氛形象的分类

(1) 有生气的愉快感		(2) 爽快的清洁感	
热闹感	华丽感	自由	朴素
嘈杂感	跃动的	开放感	功能的
轻松感	热烈的	明快感	近代的
大众的	花哨的	健康的	冷静
家族的	新鲜的	人情的	透明感
暖和感	年青	自然感	尖锐感
亲热感	玲珑	单性	都会的
随机的	魅力的	事务性生活	
明亮的	妖艳		
(3) 安定的平静感		(4) 戏剧性的幻想感	
浪漫的	理性的	神秘的	惊险
调和	高级的	幻想的	不安
细腻	清秀	非日常的	异国情调
优雅	传统的	超现实	奥妙的
高尚	古典的	未来的	轰动的
安祥	格调	意外性	强烈的
优美	豪华	无风趣的	陶醉的
社交的	形式的	异常的	瞎的
时髦的			

(a) 引人注目的照明 这是为了使在商店街中从远处就显眼，让人明显地看出商店的存在。为了使过路人对商店有强烈的印象，正面部分的照明尤其重要。

照明方法如下：

- ① 从邻近商店把店面装修部分照得明亮。
- ② 利用彩色灯光。
- ③ 以开关或调光使照明变化。
- ④ 设置有特征的电气标志或招牌灯。

(b) 使过路人站住的照明 这是为了吸引在店前通行的顾客的注意，使在店前站住的特效照明。主要是橱窗的照明担当这个作用。这里应注意的是要把商品或展出的意图最有效地引人注目。

照明方法如下：

- ① 依靠强光使商品显眼。
- ② 强调商品的立体感、光泽感、材料质感和色彩等。
- ③ 利用装饰的照明器以引人注目。
- ④ 使照明状态变化。
- ⑤ 利用彩色灯光，使商品和展示显眼。

图 18-5 表示橱窗的亮度和过路人被吸引站住的比率。可知橱窗愈亮愈容易被吸引站住。在白天，由于天然光的影响，橱窗上会发生反映附近建筑物和景色的镜面现象，应研究依靠照明加以解决的方法。

图 18-6 即表示防止镜象的方法。

(c) 吸引进来的照明 这是把在店面站住的顾客吸引进来的特效照明。本来多数客人是带着某一目的来店里购买商品的, 这样的照明, 把很多本来不准备购买物品的人作为目标, 引起他们购买的心思。客人进店后, 就能期待由此而增加一定程度的收益。

照明方法如下。

① 把从商店的入口看进去的深处正面照得亮一些 (参照图 18-7)。

② 把深处正面的墙面陈列, 作为第二橱窗来考虑, 重点把它照得明亮。

③ 在主要通路的地板面上做成明暗相间的图案, 表现出水平面的韵律感 (图 18-8)。

④ 把沿着主要通路的墙面照得均匀而特别明亮。

⑤ 把沿着主要通路的墙面做成明暗相间的图案, 表现出垂直面的韵律感 (参照图 18-9)。

⑥ 在重要的地方设置醒目的和装饰用的照明器。

(d) 使顾客在店内能顺利走动的照明 这是使进店的顾客能很好地知道各售货处的位置, 并使顾客能顺利走动的照明。走动包括顾客在同一层楼地板上走动的平面流动和向上层或下层地板走动的立体流动。为此需要标志, 但基本上必须依靠一般照明、重点照明、装饰照明等灯具的种类、配置和照度的差别等的有效处理。

照明方法如下。

① 改变一般照明的灯具种类和配置 (参照图 18-10)。

② 对售货处照明和主要通道照明, 要研究其照明效果, 使之有变化。

③ 售货处设置华盖、柱饰等内部装饰时, 要把照明一同加以考虑。

④ 用特殊设计的照明器, 在下部设置脚下照明, 使之走动时有安心感觉。

⑤ 按不同的售货处, 以光线划分其区域 (参照图 18-11)。

(e) 使商品显眼而容易看得见的照明 为了使店内陈列的商品看起来很美, 必须考虑一般照明和重点照明的亮度的比例, 使之取得平衡。一般照明, 灯具有显眼的场合和不显眼的场合, 为了把商品突出地显示出来, 以使用后者为佳。重点照明时, 要考虑是从哪个方向

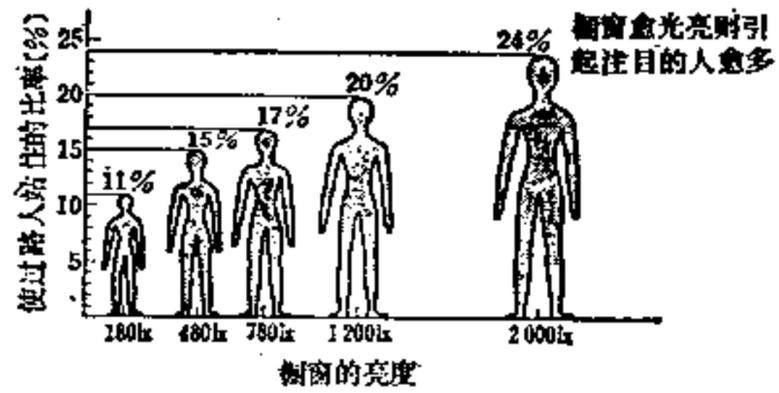


图 18-5 橱窗的亮度和过路人被吸引站住的比率 (德国的例子)

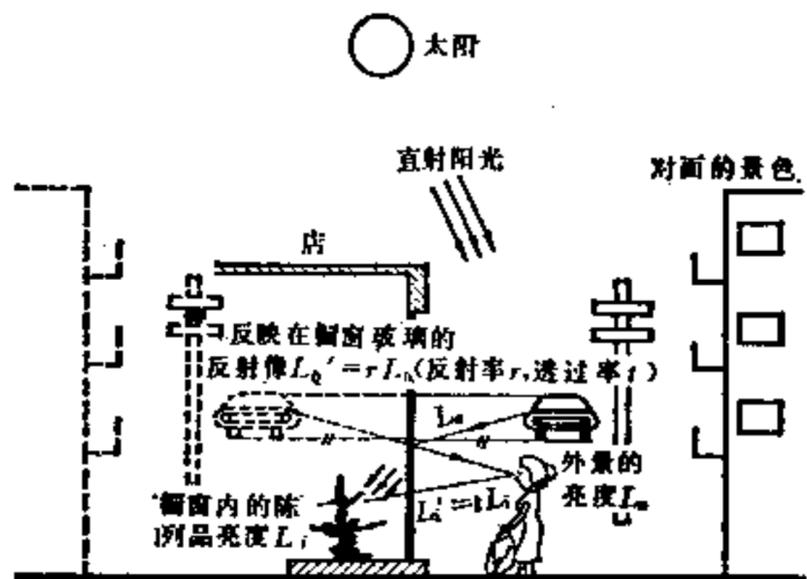


图 18-6 橱窗的镜象及防止方法⁽³⁾

防止镜象的条件

本图是表示橱窗的陈列品和外景亮度的关系。为了使在观看陈列品时不致被外景的反射像所妨碍, 最低限度的条件有如下的关系:

$$L_i \geq \frac{\text{玻璃的反射率}(r)}{\text{玻璃的透过率}(t)} \times \text{外景亮度}(L_o) \dots \dots (1)$$

通常光线垂直向 5 mm 厚的透明玻璃入射时, 大致是 $r = 0.08$,

$t = 0.9$ 左右, 所以 (1) 式等于

$$L_i \geq \frac{0.08}{0.9} \times L_o, \quad L_i \geq 0.1 \times L_o \dots \dots (2)$$

即陈列品的亮度必须至少有外景亮度的 10% 以上。

一般而言, 大致的最低标准有 20% 即可。

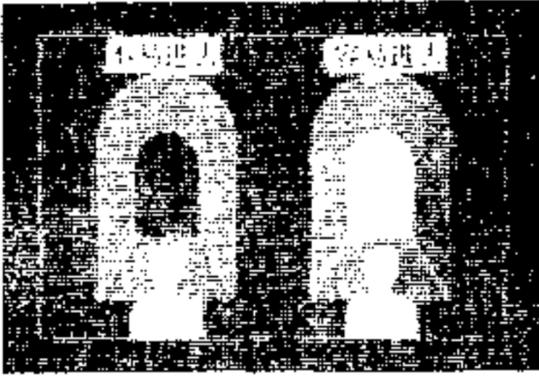


图18-7 拱形进口和深处正面的明亮照明
注：人类在有光之处，具有向光的性质

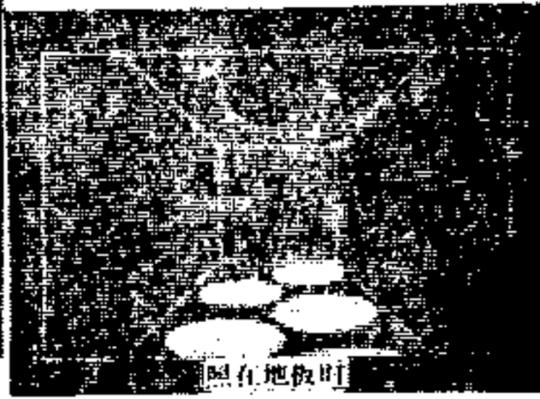


图18-8 下投式照明在水平面上的韵律感

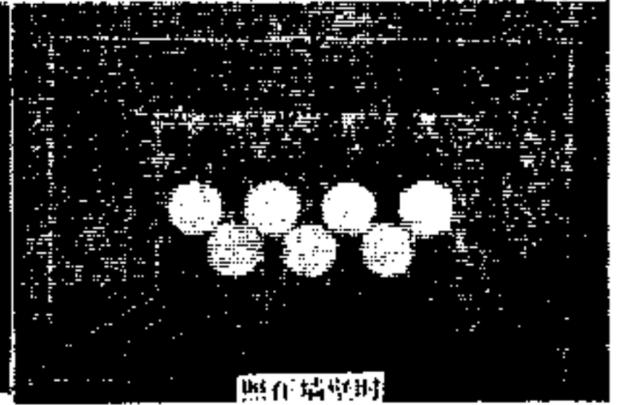


图18-9 聚光灯照在垂直面的韵律感

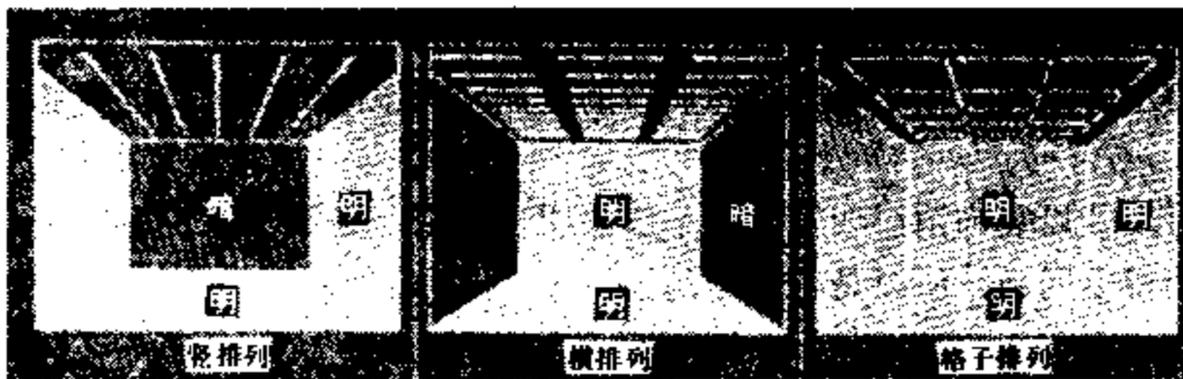


图18-10 一般照明所看到的效果（灯数相同）

纵 排 列
露出型照明器也可以。有寂寞感。没有引入性。平行方向的墙面变得明亮。地板面照度分布平均。适合于售货处的布置。

横 排 列
适合于嵌入式照明器（露出型则有眩光）。热闹的感觉。引入性一般。深处的墙面和进口变得明亮。地板面照度分布均匀。不需配合售货处的布置。

格 子 排 列
希望是嵌入式照明器。统一的感觉。适合于通路有两个方向的情况。墙面光线平均而明亮。地板面中央部分变得明亮，靠墙部分稍暗。不需配合售货处的布置。

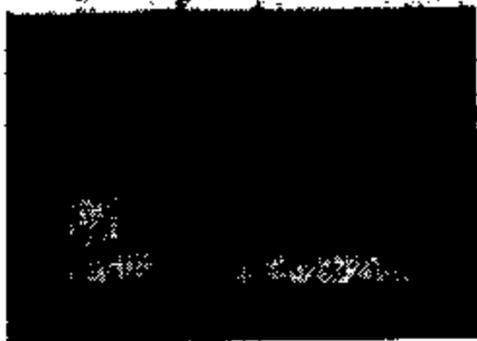


图18-11 依靠光线划分区域

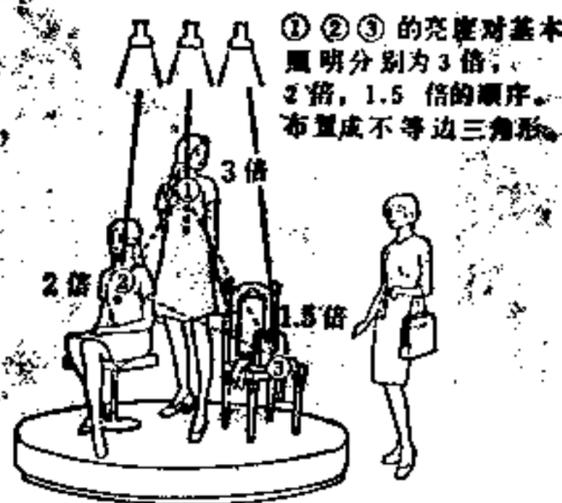


图18-12 依靠聚光灯的中央陈列的照明

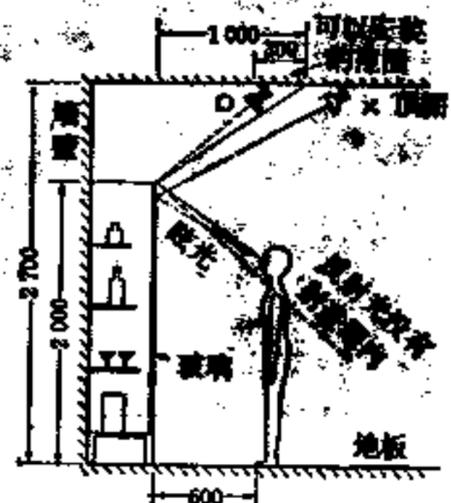


图18-13 聚光灯的安装位置

来看商品，必须以把垂直面照得明亮来决定照射方向和照射角度。决定错误，效果就低，而且浪费电力。

照明方法如下：

① 一般照明使用以格片等来遮挡光线的不显眼的灯具。

② 重点照明的场合。

○中央陈列部分用聚光灯（参照图18-12）。

○向高处橱窗、陈列架照射时用聚光照明（参照图18-13）。

○向陈列橱、陈列架内设置荧光灯。

○向陈列橱上部设置吊灯。

尤其是重点照明，必须研究其灯具的种类和安装位置，使在视线方向不发生眩光。

(f) 眼睛不疲劳的照明 必须保持店内舒适的视环境，使顾客和店员的眼睛不容易疲劳。亮度高的光源在视线附近时，就易发生不舒适的感觉，降低视力，这是眼睛发生疲劳的原因，所以在光源外露时，这是应当予以考虑的。用亮度高的光源照射商品时，还需注意由于反射光而发生的眩光。由于装饰用照明器的过剩，在耀眼的店内，也容易使眼睛发生疲劳。

在设计时，若以装饰用照明器兼作一般照明来使用，则除了出现上述缺点外，还容易使照明的目的变得不明确，所以是不适当的。

照明方法如下。

① 眩光少的一般照明。

② 重点照明要通过研究它的照射方向和角度来决定，还要预先考虑它的反射光。

③ 为了重点照明，用强光向商品照射时，光源要充分遮挡以防止眩光。

④ 装饰用照明器不可兼作一般照明和重点照明用。

⑤ 采用背景照明方式⁽⁴⁾，即照明器组合式照明，使朝下方向的配光多一点，把商品照射得明亮，使朝上方向也稍为漏出一点光，以改善顶棚面的阴暗的照明（参照图18-14）。有时也不一定采用上述形式，可把顶棚吊下，也可得同样效果。

⑥ 提高墙面照度，使商店有明亮的感觉（参照图18-15）。

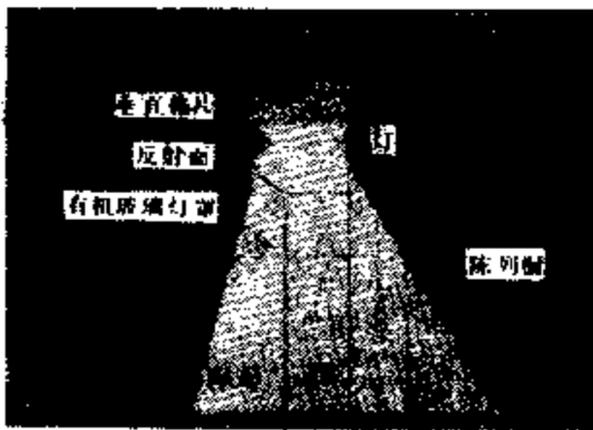


图18-14 背景照明

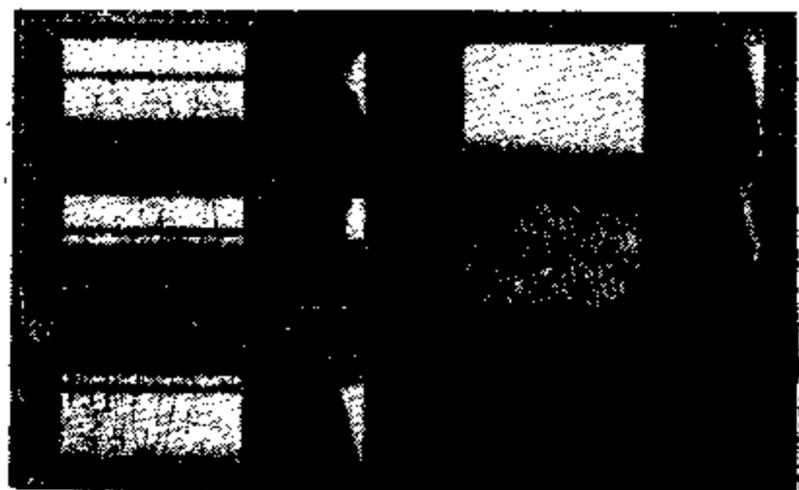


图18-15 荧光灯的墙面照明

⑦ 以荧光灯聚光型灯具对墙面和隅角照明，有时也有效果。

18-4 商店照明的热量处理

为了达到出售商品的效果，巧妙地利用局部的高照度照明和光源的光质是不可缺少的方法。这时照明发出的热量就成为有待解决的问题。照明热量的本身，给商品以不良的影响，并使顾客感到不舒适。对顾客的影响，只要考虑聚光灯的照射方向和通过空调设备，是比较容易解决的，但在向商品照射时，辐射热的影响很大。作为店内全部热处理的一个方法，可依靠通风把积存在顶棚部分的热空气排除掉，这样就可减少冷气量，从而节约电能。

18-4-1 光源发出的热

主要光源消耗电能的情况示于表18-4。白炽灯泡输入为100%时红外线辐射量约为72%。若把这红外线减少，即可降低商品的温度上升。如表所示，使用红外线输出少的光源是有效果的。

表18-4 主要光源消耗电能的情况(概数)

种 类	灯泡输入	辐 射 束 (W)				对流传热
		紫外线	可视光	红外线	合 计	
白炽灯泡	(100W) 100%	(0.04)%	10%	72%	90%	18%
屏蔽光束型聚光灯泡 (红外线遮断型)	(100W) 100%	(0.04)	10	29	39	61
荧光灯	(40W) 100%	(0.2~0.5)	25	30	55	45
金属卤化物灯	(400W) 100%	4	24	25	53	47
高显色型金属卤化物灯	(400W) 100%	3	23	27	53	47

一般地说，可如图18-16所示那样，在光源的内面，加上吸收或反射红外线的涂层，以减少红外线。作为极端减少热线的方法，也有在照明器的前面，使用遮断热线的玻璃滤光片的方法。但从价格而言，采用图中所示的方法较多。

图18-17表示由于屏蔽光束型聚光灯泡(红外线遮断型)的照明，致使商品的重量变化(水分蒸发量)的实验。以10000lx照射二小时后，一般的屏蔽光束型聚光灯蒸发量为50%，而用红外线遮断型灯时则为24%，约减少二分之一。

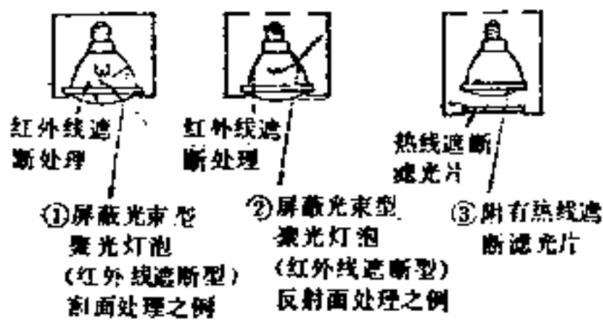


图18-16 热线处理的方法

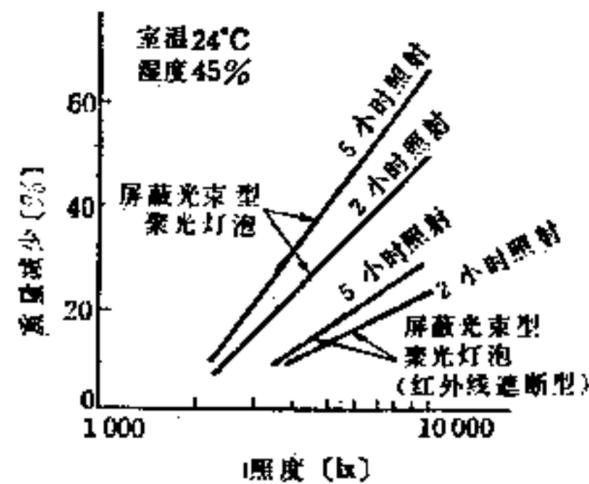


图18-17 照度和重量变化的实验
(商品：色拉菜)

18-4-2 热量处理的注意事项

密闭的陈列橱内多数是使用荧光灯，但也要看商品性质，有时不利用灯泡的光质就得不到预想效果时，这时因光源（照明器）和商品的距离极为接近，所以必须适当选择光源（例如低功率的小型灯泡）或在照明器前面加上热线遮断玻璃滤光片。在以自然通风不能降低橱内温度时，就需要强制通风。这时应尽量在橱内设置小型风扇，视业务种类，也有要求安静的商店，在这种情况下，采用的风扇应尽量是低噪声的。

一般白炽灯泡的灯具若过小，散热就不充分，灯泡的玻璃温度就上升，因而寿命就要缩短，灯座部分也容易烧坏。所以对于有特别要求并和商店装饰相协调的特种照明灯具，应对装饰和功能这两个方面加以全面而充分的考虑。

参 考 文 献

- | | |
|---|---|
| (1) A. H. Willoughby: IES Lighting Rev., 10
(1974) 119 | bearbeitete Auflage, 270~271 |
| (2) Handbuch für Beleuchtung, 4, Vollig neu | (3) 松田, 田淵, 森田: 照学誌 (昭 43-8) 486 |
| | (4) Internat. Lighting Rev., 2 (1976) 52~53 |

第 19 章

工厂照明

19-1 总 论

19-1-1 工厂照明的目的

工厂照明的目的主要有三个方面：(1) 提高生产率，(2) 确保安全，(3) 形成舒适的视环境 (图 19-1)。

合理的照明有助于提高工作效率，降低生产成本和提高生产率。机械设备或危险场所的照明可防止发生工伤事故，在紧急情况时，人们可由安全照明引导到避难的安全场所。在这些方面，照明均起着重要的作用。加之，随着劳动人员情况的变化 (青年劳力的不足，工资提高等) 以及在生产上的技术革新 (自动化装置的采用等)，还应着重考虑生产者的要求。为提高人们的劳动热情和干劲，要求有舒适的生产环境，在这方面，照明也具有十分重要的意义。

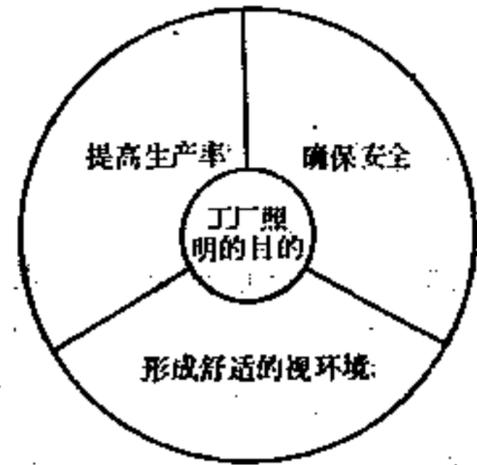


图 19-1 工厂照明的目的

即使说是工厂照明，根据工种的不同，其工作对象、操作方法、工作环境等是有很大差异的。本章不准备对各工种的照明方法作一一说明，只重点地对工厂照明的一些带共性的基本问题作一些介绍。对于工厂内部的办公室、运动场、厂内道路和外墙照明等，可参看有关章节。

19-1-2 照度的演变

对于照明技术说来，照度是应首先被满足的最基本的指标，而其它质量指标的研究也具有重要的意义。

图 19-2 所示为机械工业的推荐照度值的变化。从图中看到，照度随着年代而提高，而且，劳动安全卫生条例中规定的照度只是最低值，这个值自 1947 年制订以来至 1972 年的 25 年间提高了三倍。这种提高是为了创造更加舒适的劳动环境而引起的不可避免的变化。图 19-3 是各国的推荐照度的比较。这是 1975 年所作的比较，而将来或多或少是会发生变化的。由图可见，日本的 JIS 的推荐照度与欧洲各国大体相同。另外，各国之间的差异也在缩小，只有美国比其它国家高出二倍多。

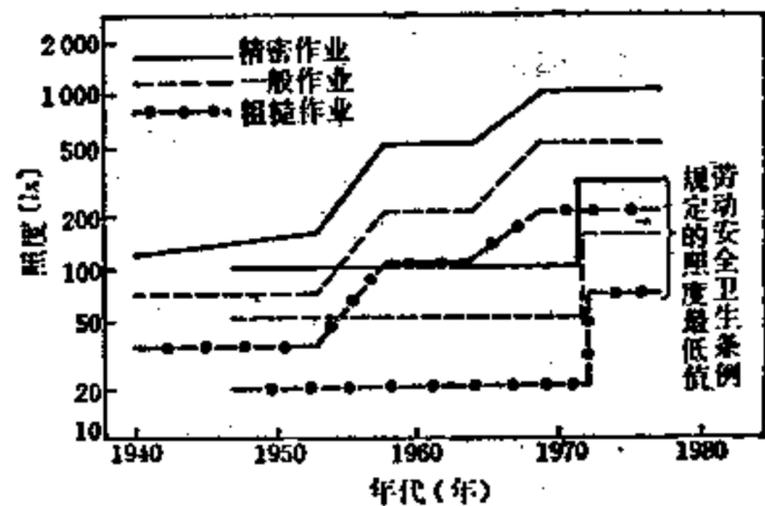


图 19-2 机械工业的推荐照度值的变化
(1958 年后照度值取自日本工业标准 JIS，
1958 年以前取自照明学会指南)

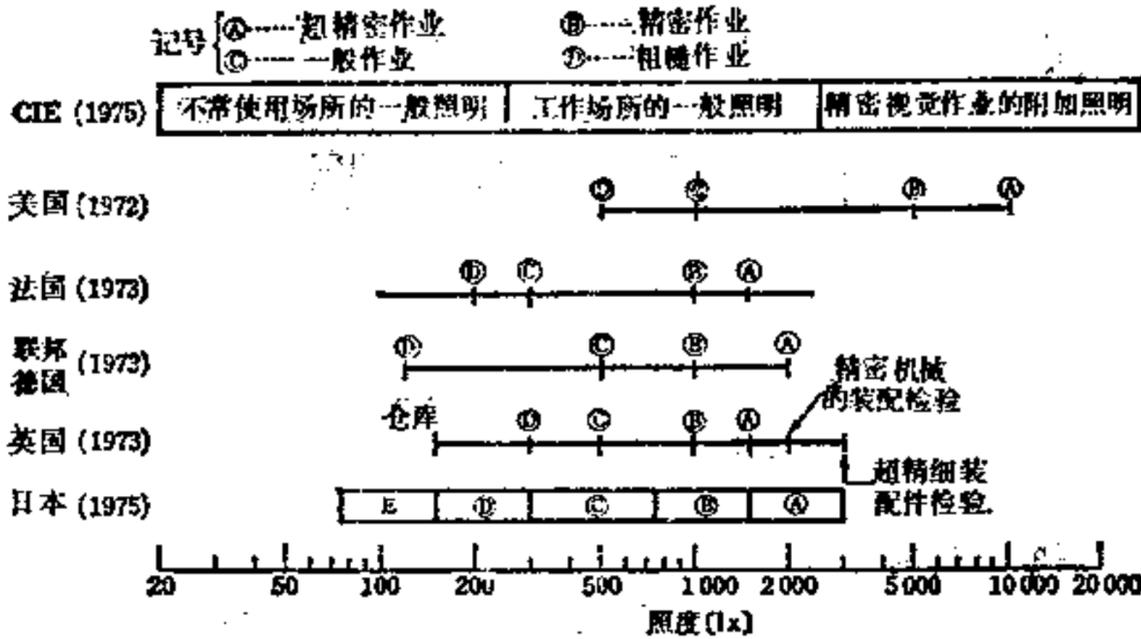


图19-3 各国机械工业的推荐照度^[1]

19-2 照明的基本要求

19-2-1 良好照明的作用

照明设计时，首先成为问题的是以怎样的照明水准为目标，希望对照明的投资及由此所获得的效果间的相互关系进行探讨，因此，科学地掌握照明对生产率、安全及环境舒适感的影响是很重要的。

把良好照明的效果整理出来即得图19-4。图中，粗线所包围的项目表示已积累的一些由于照明改善而具有一定效果的定量数据，这些资料包括有因视功能的改善而使得生产率提高或出勤率提高方面的内容。

19-2-2 照明和生产率

1970年至1972年，照明学会关西分会就改善照明的效果作了实际调查，并将调查结果整理成表19-1。从表中看出：

(1) 由于产量的增加，改善照明所需费用仅8天即可收回。

(2) 机械厂由于提高了照度而产量显著提高，约需一个月就把改善费用收回。

(3) 其结果除了由于照明的改善外，还包含着因熟练程度比上一年提高及无次品运动的效果等因素。

(4)和(5)显示出勤率的提高。

外国的同样例子示于表19-2。这里收集的是1960年以欧洲为中心的照明改善实例。由此可见，照明改善的效果首先是视觉功能（视力、亮度对比的识别、色彩的识别）的提高，

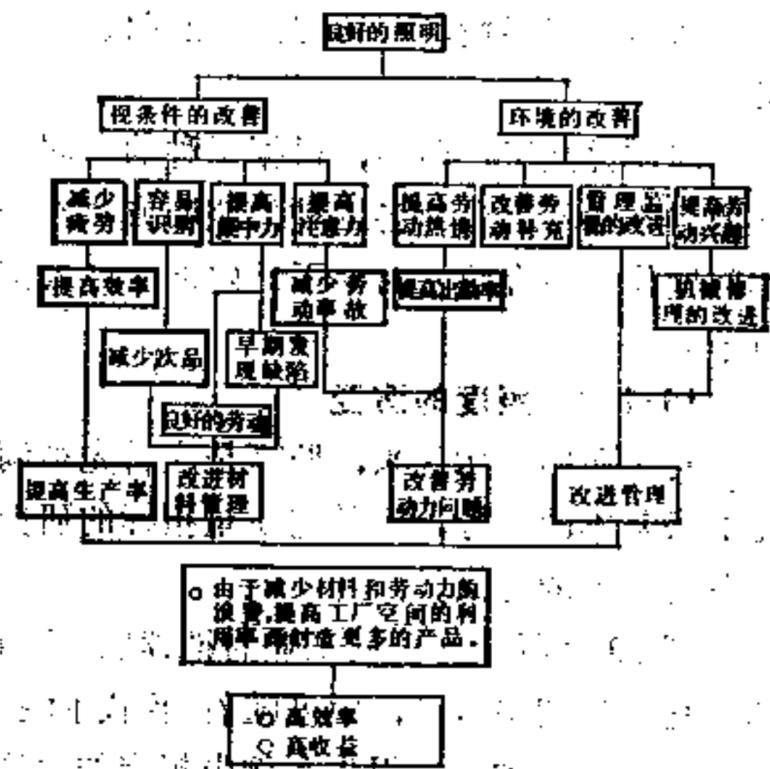


图19-4 良好照明的效果

表19-1 改善照明所产生的效果的实测 (照明学会关西分会)

工 种	照 度 (lx)		改 善 效 果 (%)	
	改善前	改善后		
(1) 合成纤维精纺室	160	230	○产量增加	0.08
(2) 机械厂	机械加工	40	180	○产值增加 4.2 ○工作损失费减少 7.9
	机械装配	30	170	○产值增加 12.2 ○工作损失费减少 1.3
(3) 自动售货机的零件制造	150~300	250~500	○提高生产率 9.5 ○有关差错减少 5.0 ○工伤事故减少 66.6	
(4) 机械用仪表厂	100	300	○产量提高 15.0 ○出勤率提高 30.0	
(5) 电度表组装、修理、检查	旧工厂 平均 430	新工厂 平均 720	○生产件数增加 8.2 ○不合格率减少 3.0 ○出勤率提高 2.8	

表19-2 由于改善照明而提高效率的实例⁽²⁾

工 种	照 度 (lx)		工作效率提高 (%)	次品减少 (%)	事故减少 (%)
	改善前	改善后			
照相机装配	370	1000	7.4	*	*
皮革冲压成型	350	1000	7.6	*	*
珍珠挑选	100	1000	6.0	—	—
钩针编织	100	1000	8.0	22	—
装配室	100	1000	30	18	*
螺丝挑选	100	1000	10	22	*
电话接收机装配	150	250	36	57	*
无摩擦轴承制造	60	250	13	*	*
屋顶瓦片制作	50	200	4	*	*
飞机零件装配	500 (一般照明) 1000 (局部照明)	4000	*	90	*
工具厂	500	1600~2500	10	20	50
机械厂	300	2000	16	29	52

* 无特别显著效果

其次是随之而来的心理上的工作变得容易以及劳动热情的提高。这两方面都可认为是由于照明改善所带来的结果。

这些在生产现场所收集的数据可能存在有不统一的因素, 即有不能重复的缺点。为了补偿这个缺点, 以实际的作业在实验室内进行研究, 把它的结果作为参考。

图 19-5 是对 5 种作业的实验结果, 是以 100 lx 时的工作量或工作速度作基准所表示的相对值。对于以白纸为背景进行穿针线⁽³⁾或珍珠分类的精密切作业, 受照度的影响极明显, 照度由 100 lx 变成 1000 lx 时, 工作量提高约 10~13%。对于印刷品文字校正、打字等普通视作业⁽³⁾, 受照度的影响就较小, 而且在照度高时有影响不再增加的趋向。Jacob 的数据⁽⁴⁾是对很多实验的总结所得到的结果。

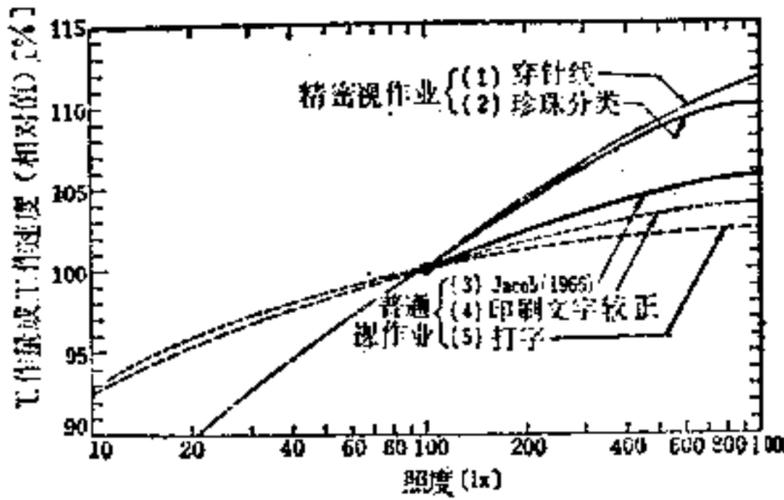


图19-5 有关照度和工作量的实验数据

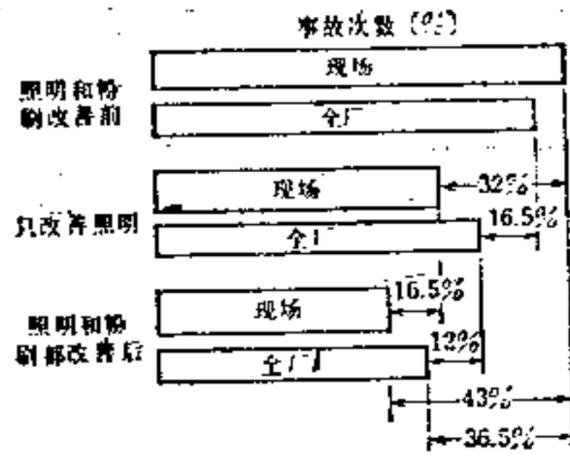


图19-6 由于改善了照明和粉刷而减少事故 (Eageler, 1951)

照明影响生产率的主要因素，除了以上所述的照度外，还有光源的眩光和光色、环境的亮度分布等因素，因为这些都和视环境的舒适感有密切的关系，所以在 19-2-4 节予以叙述。

19-2-3 照明和安全

照明在维护工作人员安全以及在机械设备安全运转上均有作用。

图 19-6 表示在美国的重型机械厂由于改善了照明和粉刷而减少事故的材料。从中可以看出仅仅改善了照明，现场事故就减少 32%，全厂事故减少 16.5%。

图 19-7 的例子^[5]也说明，在制造厂用同一设备生产相同产品，当照度由 50lx 提高至 200lx 时，工伤事故次数和错做件数减少的情况。以上这些以及在表 19-1 和表 19-2 中所看到的例子，足可证明照明与安全之间有相当密切的关系。

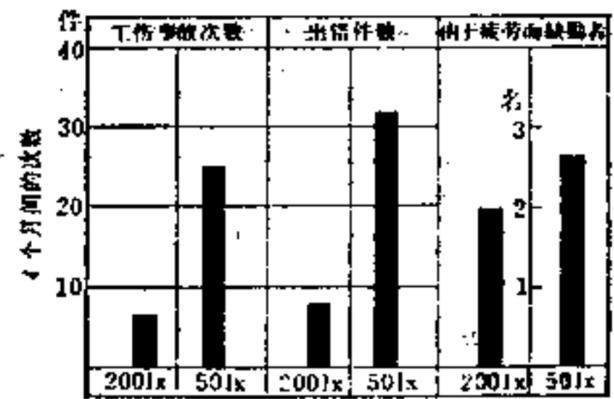


图19-7 用同一设备生产同一产品的新车间(荧光灯 200lx)与旧车间(白炽灯 50lx)的比较

另外，由于设置安全照明而有如下的效果：

- (1) 对于动力、燃料、机械等工种的紧急措施，造成十分明亮的环境，可以防止灾害事故的发展。
- (2) 使用安全用照明器和指引灯，可以把遇难工作人员从车间引导到安全场所。

19-2-4 照明和工作环境的舒适感

形成舒适的工作环境的重要手段之一就是对照明的合理利用。这里，工作面的照度分布、室内各面对工作面的亮度比、光源（灯具）造成的眩光、光源的光色与显色性等都应作为重要因素来考虑。

在多数场合下，这些照明特性，只要将照明方式、光源和灯具很好地配合起来，就可能获得合适的条件。所以，照明环境的舒适感就在于如何巧妙而合理地利用照明技术。作为设计目标，现将照明环境有关的指标介绍如下。

(1) **室内的亮度比** 即使是在工作中，作业者的视线也是在视场内不停地转动着。调整室内各部分对工作面的亮度比可以减少疲劳，使注意力集中，当瞭望室内各处时也可防止产生阴暗的感觉。

表 19-3 是工厂的推荐最大亮度比的一个例子^[6]。亮度由各面的照度和反射率来确定，首先要设法满足表 19-4 的反射率推荐值，然后再考虑照明器的配光与布置，以及是否需采用

表19-3 工厂的推荐亮度比 (最大值)

	环 境 类 别		
	A	B	C
1.工作对象与相邻的暗场所	3:1	3:1	5:1
2.工作对象与相邻的明亮场所	1:3	1:3	1:5
3.工作对象与远离它的暗场所	10:1	20:1	—
4.工作对象与远离它的明亮场所	1:10	1:20	—
5.照明器 (包括窗、天空) 与相邻场所	20:1	—	—
6.整个视场	40:1	—	—

注: A: 为了造成最良好的视场状态, 使室内反射面的反射率能很好地满足表19-4的场所。

B: 可以调整工作面附近的反射率, 但远离工作面处反射率不能满足表19-4的场所。

C: 调整反射率或改变环境条件都无法满足表19-4的场所。

—: 表示亮度比的调节有困难。

表19-4 室内反射率 (适用于表19-3的A、B类环境)

		反 射 率 (%)
顶	棚	90~80
墙	壁	60~40
桌、椅、机械等		45~25
地	面	20左右

注: 表中数字为力求达到的反射率数值

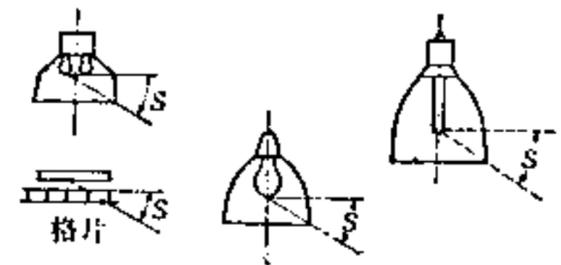


图19-8 遮光角(S)的测定

局部照明等。

(2) 眩光的限制 为了限制眩光, 通常在灯具上装格片或对安装高度进行调整。

遮断式灯具 (附有反射罩、灯伞与格片等) 的遮光角 (防止眩光的保护角——译注) 的控制范围可参考 CIE 室内照明指南〔7〕。

遮光角 (S) 的测定按图 19-8 进行。然后按下述步骤, 利用表 19-5 的规定。

表19-5 遮断式灯具的遮光角推荐值

场 所 种 类	光 源 亮 度 (cd/m ²)				
	20000以下	20000~500000		500000以上	
办公室、学校、有非常精密视觉工作的工厂内部	30° (同时考虑配光的AA及BB断面)	灯泡光通在3000lm以上者不推荐采用下敞式灯具, 应采用装有密的格片的其它形式的灯具			
一般工厂内部	15° (只考虑AA配光断面)	灯泡光通	从地面算起的安装高度		
			10m以上	5~10m	5m以下
		3000lm以下	20°	30°	30°*
30000lm以上	20°	30°*	40°*		
仓库、通道等	0°**	20°			

* 在这种场合, 可采用带低亮度镜面反射板的灯具, 扩散性反射的由于看起来耀眼, 不推荐使用。

** 如果在附近的工作场所仍看到灯泡, 则必须有适合该工作场所的遮光角。

(1) 求出所用光源的光通与亮度。

(2) 一般荧光灯情况下 (光源亮度在 20000cd/m² 以下), 按表 19-5 的第一列选择适

合的遮光角。

(3) 使用亮度在 $20000\text{cd}/\text{m}^2$ 以上的白炽灯或气体放电灯时, 由表 19-5 的第二列或第三列决定遮光角。

(3) 光源的光色与显色性 光色和冷暖的印象有密切关系。显色性在一般照明场合下, 主要从作业者的皮肤颜色、机械设备的颜色、安全标志色彩的识别等的要求来考虑。对于有色彩的工件或进行颜色的检查作业等场合, 有特别慎重考虑的必要。

19-2-5 照明和工作者的关系

(1) 对工作者年龄的考虑 由于劳动者的越来越高龄化, 而工作者的视力随年龄而下降(参照图 19-9), 因此在规定必要的照度时也必须考虑工作者的年龄。图 19-9 是视力检查所得的 5 米远的视力。但通常视觉工作中成问题的是 30 厘米至 1 米的近距离视力, 在这距离范围中对老花眼的影响特别大。日本对于考虑到近距离视力的研究^[9]在下面说明。

图 19-10 是对青年(平均年龄 33 岁)中年(平均年龄 46 岁)和老年(平均年龄 56 岁)男女, 在 50 厘米距离处观看汉字, 而能够十分容易地读出来时字的大小程度的研究结果。这时

近距离视力(测定距离为 30 厘米)的平均值, 青年为 1.05, 中年为 0.82, 老年为 0.53。这可以认为是老年人在观看近距离物体的视觉调节能力低下之故。

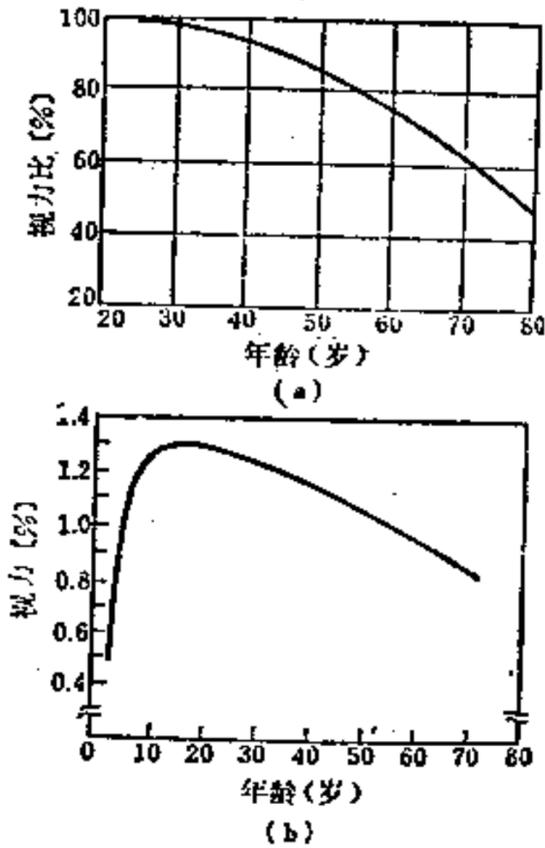


图 19-9 视力随年龄变化^[8]

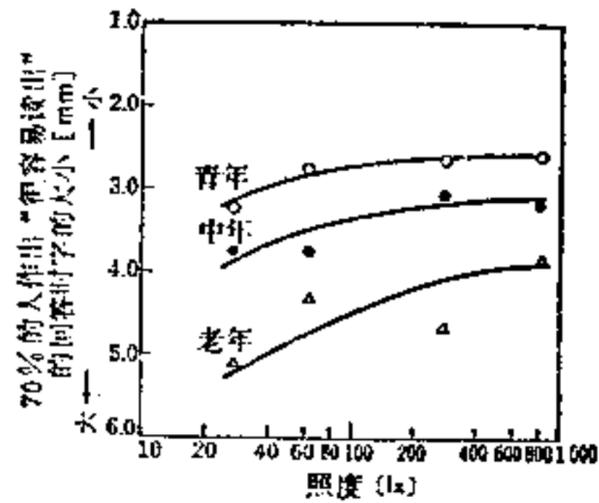


图 19-10 文字判读随年龄和照度而变的关系^[9]

从图 19-10 中可以看出, 越是提高照度, 则中年和老年人视力提高的效果越显著。对青年人, 照度提高到 200lx 以后, 再提高照度就不大看得出效果了; 而中年与老年人, 即使照度提高至 800lx 时仍有作用, 甚至小的汉字也能读出, 但在高照度下仍然不及青年那样看得出更小的字。

从这方面看来, 在老年人较多的工作场所的照度, 希望考虑比标准照度高出二倍以至数倍。

(2) 光对眼睛的损害 使用照明光源时, 要注意到紫外线与红外线对眼睛的损害(参照 27-4 节)。

这里所造成的伤病主要有紫外线眼炎、黄斑烧伤、红外线白内障等。这些都可以戴上适当的遮光镜作防护。因此, 重要的是要事先准备好防护用具。

19-3 工厂照明的设计

19-3-1 照明设计概要

图 19-11 说明照明设计的步骤。业主、建筑工程人员和电气工程人员以及设备管理人员要互相密切地配合。对于设计,显然包括以下几件事:

①照明设计说明;②照明用电量;③设备预算;④非常状态时照明用装置的设计等。在进行具体设计时要灵活地运用。

19-3-2 掌握工厂概况

不但要掌握建设场地内各项设施的配置,了解将来的扩建计划等全部情况,而且还要考虑建设顺序及特殊设施的需要时间等。

具体地说,要掌握①工厂规模,②道路、房屋等的布置,③将来的发展规划,④房屋主要尺寸,⑤柱、梁的间距和顶棚的构造,⑥窗的形式等。

19-3-3 掌握作业内容、机械设备、作业者情况以及特殊场所的区别

掌握作业内容、机械设备配置和作业者的情况,对于确定照度和制订维护计划是很重要的。为此,调查设备的最终使用者对照明的要求和希望,和对有关类似设施的意见以及改善事项是有效果的。

其次,要正确判断设置照明器的场所是一般场所还是特殊场所,要选定适合该场所的灯具。选择不适当不仅会缩短灯具的使用寿命,而且有可能造成触电、火灾、爆炸等重大事故(参照 19-6 节)。

19-3-4 照明设计

确定照度后,选定照明方式、光源和灯具,确定照明布置,进行照明经济的探讨,是照明设计中各个阶段的内容。

就照明的经济性来说,就是要能够用较少的费用来获得相同的照明效果。而对于照明效果不同的场合,要研究与该种照明效果相适应的费用问题。

19-3-5 灯具的安装与配线设计

考虑一般照明的灯具布置,首先要决定灯具的安装高度。其高度应高于机械设备、产品和桥式吊车等的高度。另外,在有倾斜的顶棚桁架的场合,也要考虑沿着它的形状安装灯具,或把所有灯具都布置在相同的高度。

此外,还应考虑配合照明设计的配线设计。

在进行照明设计时,要先掌握以下几点基本事项:

- ① 电器设备的布置(配电盘和进线口的位置);
- ② 负荷类别及供电方式(单相二线、单相三线、三相三线,三相四线);
- ③ 线路电压降;
- ④ 电线的容许电流。

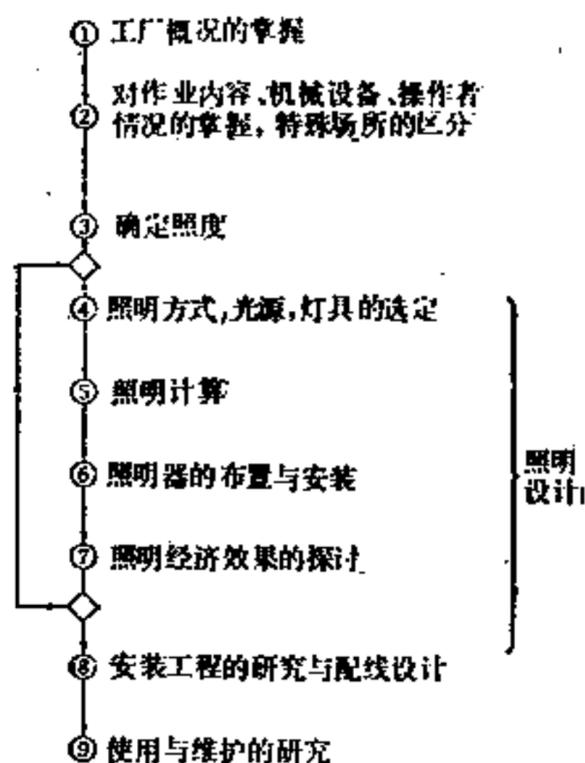


图 19-11 工厂照明设计步骤

19-3-6 运行与维护的研究

就有关维护的问题与设备管理者进行商量是非常重要的。

为此，事先应研究好以下几件事：

- ① 维护方法与维护的日程安排；
- ② 维护的部件；
- ③ 能提供的维护费用等。

以上几点，是合理确定维护系数，选择易于维护的构造的灯具，进行正确的照明经济比较等的前提，也是合理地选用照明设备的基础。

19-4 一般照明**19-4-1 自然采光**

由于从窗户射入的天然光随气候、时间、季节和窗的方位而变动，所以，很多工厂就是在白天也多有采用人工照明的。人们一向是设法使光线能均匀地引进房间内，对此，与一般照明有关的有以下两点必须注意：①窗户不应对作业成为眩光的原因；②因为窗户容易污染，必须尽量勤于清扫。

窗用材料有玻璃和合成树脂。表 19-6 给出有代表性材料的透光特性和透过率^[10]。

表19-6 窗用材料的透光特性与透过率

试 料	透 光 特 性	透 过 率 (%)
透明玻璃	透 明	90 (垂直入射)
透明玻璃	透 明	83 (漫射光入射)
磨砂玻璃	{ 半透明 半扩散	75~85 (垂直入射)
花样玻璃	半透明	85~90 (垂直入射)
花样玻璃	半透明	60~70 (漫射光入射)
吸热玻璃	透 明	25~50 (漫射光入射)
乳白透影玻璃	扩 散	40~60 (漫射光入射)
全乳白玻璃	扩 散	8~20 (漫射光入射)
半透明塑料 (白色)	半透明	30~50 (漫射光入射)

19-4-2 光源的选择

一般照明的目的在于维持工作环境的安全和行动的方便。照明必须设法不使有损视觉和辨别错误的情况发生。为此，在照明技术中应慎重研究：①照度及其分布；②眩光；③光色与显色性；④阴影；⑤亮度对比等问题，以选择合适的光源。

一般照明通常是在顶棚或墙壁上部，按一定间隔均匀地布置光源，它的照明效果和经济性都好。从效果和经济性两方面来考虑，作为选定光源的主要因素，兹分为光源的安装高度、显色性和眩光三项来说明。

(1) **光源的安装高度** 从光源安装高度来考虑，通常在6米以下的采用荧光灯，6米以上的适宜于采用荧光汞灯、金属卤化物灯、高压钠灯或高功率型荧光灯等。

表 19-7 给出与安装高度相适应的光源的大致标准。

(2) **显色性的重要性** 根据作业的内容，光源的显色性对有些场合是很重要的。检查

表19-7 与安装高度相适应的光源的大致标准

工 作 场 所	光源安装高度 (m)	光 源 种 类
炼钢、重型 机械、仓库	20	700~400W高压钠灯 1000~700W金属卤化物灯 1000~700W荧光汞灯
	15	
造船、机械组装、铸造、机械加 工、汽车组装、发电厂、电车车库、 仓库	10	400~250W高压钠灯 400W金属卤化物灯 400W荧光汞灯 110W高功率荧光灯
	5	
精密机械组装、烟草加工、食品 加工、印刷、制版、装订	5	220W超高功率荧光灯 110W高功率荧光灯 40W荧光灯

或管理产品色彩的场所宜选用高显色型荧光灯，而且照度不应低于 700 lx。

不对色彩作严格检查与评价，而只是希望能真实地见到所观察的色彩，除了可用显色改善型荧光灯外，也推荐采用高显色型金属卤化物灯。

图 19-12 是烟叶加工厂高显色照明的例子。采用色温 6100K，平均显色指数 (R_a)94 的 40W 调制烟叶用荧光灯，工作面上照度为 1200 lx。

(3) 眩光的防止 在视场中经常看到裸露荧光灯时，就会由于眩光而感到不适。只要装上反射罩就可以相应地减少眩光的感受。把重点放在防止直接眩光时，宜使用透光率良好的棱镜罩或带有格片的灯具。不存在上面那样问题的场合可以用下敞式灯具、反射罩、逆富士型、H型、灯盒等灯具。

高压放电灯在安装高度较高时，通常作业状态远离视线，采用反射型灯或下敞式高顶棚用反射罩，比较简单而效率也好。但是，若安装高度低，则因亮度高而眩光强烈，宜选用带格片或乳白扩散罩或带遮光滤光片的灯具。

19-4-3 照明方式

一般照明中的代表性照明方式，按照建筑物顶棚高度，大体可分为如下三类。

(1) 高顶棚场合 光源安装高度在 10 米以上者，根据工厂规模和作业对象，可用 250~1000W 的高压放电灯安装在高顶棚反射罩中，大体上均匀地布置在顶棚上。图 19-13 是重型机械厂的例子，光源高约 15 米，平均照度约 200 lx。

高顶棚用反射罩从配光形状上可分为极狭照型、狭照型、中照型、广照型和特广照型等形式。一般说来，顶棚相对于地面比较高，在要求较高照度时宜用狭照型，地面面积大时宜



图19-12 烟叶加工厂的高显色照明

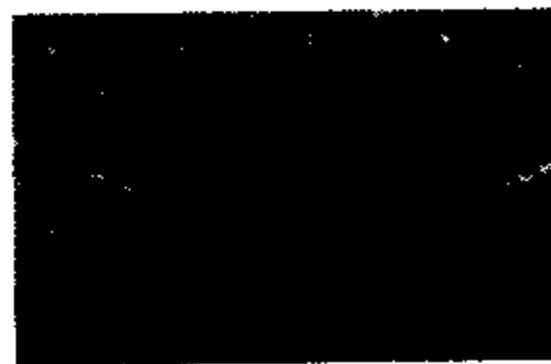


图19-13 采用荧光汞灯(400W)的高顶棚工厂的一般照明

用广照型。然而，在不单要考虑工作面的平均照度，而且也希望有一定垂直面照度并防止强烈阴影，要求有明亮墙面的场所，则以采用广照型或特广照型灯具为宜。

反射罩材料有精制电解抛光梨皮铝板和搪瓷铁板（只用于广照型）二种。前者较轻而灯具效率较后者约高出10%。搪瓷罩表面牢固且耐腐蚀，适用于污染严重和有腐蚀性气体的场所。

顶棚高度达到20~30米的炼铁等工厂，与其采用高顶棚用反射罩，反不如用投光灯作一般照明为好。特别是要用耐震和耐热性能好的灯具构造，也要考虑镇流器放置的场所。

另外，要事先考虑能保证安全的、用于照明设备维护和检修的通道，以及检修的方式。

（2）中等高度顶棚的场合 光源安装高度在6~10米的场合，除可用高顶棚用反射罩外（参照前项），可利用顶棚桁架直接安装或用吊管的方法安装反射型高压放电灯，或是利用壁柱顶部安装反射型灯，采用由上向下斜照的方法。因为反射型灯的反射面不会受污染变脏，在不过份考虑眩光问题的场合，是一种经济的方法。

在中等高度顶棚情况下，用配以高功率型或超高功率型荧光灯的、带反射罩的灯具作一般照明也是有效的，而且它还有使受照面照度均匀、不形成强烈阴影的优点。由于荧光灯反射罩比高压钠灯反射罩配光较广，所以安装高度愈高则地面照明利用系数就愈低。为此，适当降低安装高度，使室内总的照度维持到某种程度，是工作台或工作场所得到高照度的方法。

如图19-14所示，机械加工等作业场所有需要高照度的情况。这时可安装台灯作辅助照明，其安装位置和角度要能任意调整。这种场合，若工作场所的照度与一般照明的照度差别过大即成为不舒适和疲劳的原因。通常，一般照明照度不应低于工作场所照度的1/10。

图19-15是电器零件组装工厂的例子。采用由顶棚桁架吊下的110W高功率荧光灯反射罩作一般照明，平均照度可得500lx。加上组装流水线作业台上一米高处的40W荧光灯一灯用反射罩作连续排列照明，可得到高达1500lx的照度。工作的精密程度越高就越需要高的照度，而它和周围的照度分配对良好作业环境的关系也变得重要起来。

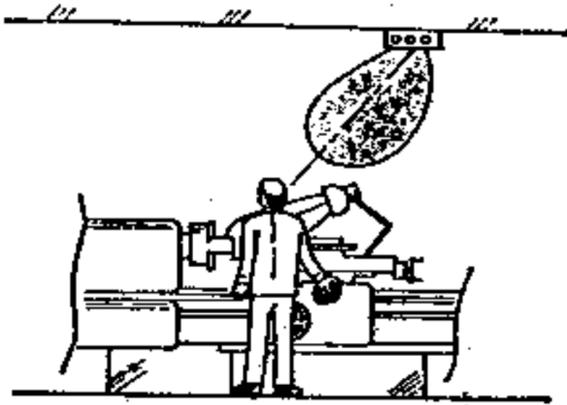


图19-14 作业场所的照明

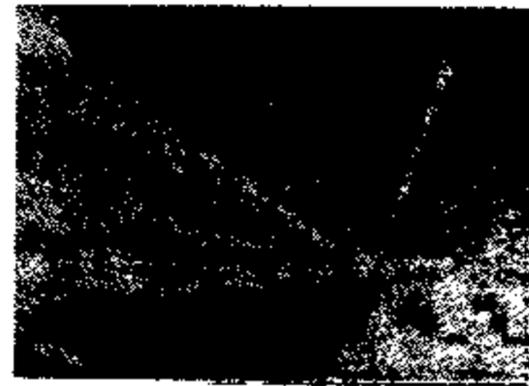


图19-15 用荧光灯作中等高度顶棚车间的照明

（3）低顶棚场合 光源安装高度在5米以下的低顶棚场合，由于是进行较精密的作业，所以需要高照度。通常用40W以上的荧光灯具作一般照明。

在不过份考虑眩光问题时，可以用灯盒、反射罩、逆富士型、H型灯具。为了防止眩光，有装上扩散性反射罩或格片以降低光源亮度的所谓直接的方法，对于荧光灯灯具，也有用提高它的背景面亮度的方法。

例如，在反射罩的一部分开了很多小孔，让光源光通的10~15%从上方射出。这样，使

顶棚变得较明亮而达到降低整个环境的眩光的效果。同时，通过开孔的换气也能减少附着在反射板上的尘埃。

19-4-4 合理的照明用电

一般照明的用电量 (Wh)，是和每个灯具的消耗功率 (W) 与开灯时间的乘积以及灯数成比例。若把灯数分解，则照明用电量就如图 19-16 那样，与七个因素有关。由该图可以看出，若图中右边的分子小而分母大，则是用电合理化。

这七个因素可归纳成如下几点。括弧内的数字表示各因素的号码。

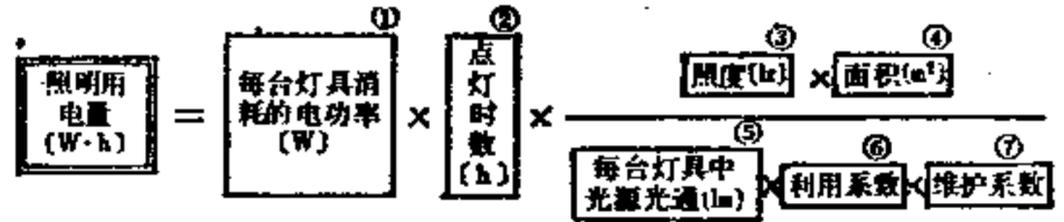


图19-16 照明用电量的要素分解图

(1) 高效率光源的使用

(①, ⑤);

(2) 效率高、利用系数也高的灯具的使用 (⑥);

(3) 采用可小范围开关的布线 (②, ③, ④);

(4) 对照明设备的适当维护 (⑦)。

(1) 高效光源的使用 图 19-17 为各种光源的实效效率比较。除了白炽灯外，为了点亮荧光灯或高压放电灯都必须使用镇流器，所谓实效效率就是考虑到包含镇流器的功率消耗在内的光源的效率。各种灯的功率越大，则实效效率也就越高。

从省电角度来说，高压钠灯最优越。在对荧光汞灯的一般照明进行改装时，可考虑采用高压钠灯或用一般的汞灯镇流器点灯的金属卤化物灯。特别是高压钠灯，在保持相同的平均照度条件下，比荧光汞灯省电约 40%。

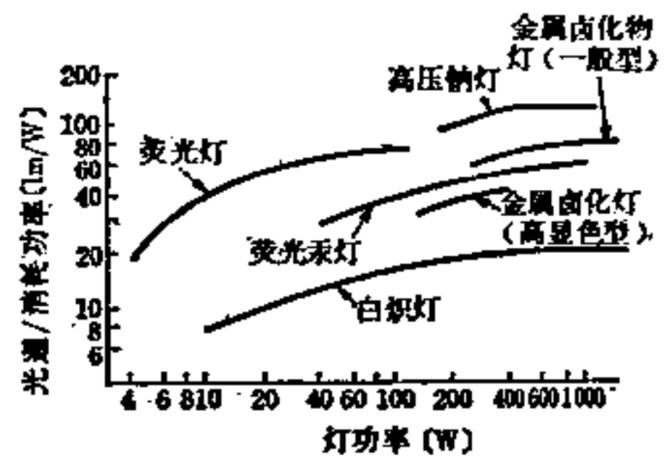


图19-17 各种光源的实效效率

表 19-8 是假定被照面积为 5000m² 的工厂内采用各种照明方式所消耗电力的比较。

(2) 高效灯具的使用 虽然使用了高效率光源，但若所用的灯具效率低，也不能很好的对光进行充分的利用。最终所利用的光通是随灯具效率和利用系数而变的，应该选择效率和利用系数都高的灯具。

表19-8 各种照明方式所消耗电力的比较

照明方式 项目	1	2	3	4
光源	高压钠灯 400W	高功率型白色 荧光灯110W	金属卤化物灯 (一般型) 400W	荧光汞灯 400W
灯具	高顶棚用反射罩	反 射 罩	高顶棚用反射罩	高顶棚用反射罩
灯具个数	90	200	120	160
单位面积消耗的功率 (W/m ²) (相对值)	8.3 (100%)	9.6 (116%)	11.0 (133%)	13.5 (163%)

(3) 容易开关的布线与维护 线路的布置希望能随照明的必要的时间、必要的场所和必要的场合而开关。能够利用由窗户射入昼光的场合，或在大工厂内存在没有作业的部分时，把灯关上可以避免不必要的电力消耗。

照明设备的维护与合理用电有密切的关系，这方面的问题可参照 19-8 节。

19-5 检验作业的照明

19-5-1 检验对象和照明条件

与维持工作环境的安全性为主的一般照明相反，检验照明则是要求使所进行的工作更迅速、准确而减少疲劳。为此，其发展方向应是使检验工作本身的机械化。但是，对于产品的各种各样的缺陷和颜色的判别工作，多数仍然有赖于依靠肉眼作视感觉上的判断。

对于一般的检验工作，通常是采取一系列的视觉探索工作，以判断或辨别被检物有无可见的异常，从而作出必要的处理。所以，检验人员的视力与适应性以及熟练程度是非常重要的。因此，对检验人员存在的个人差异是首先要考虑的重要因素。

图 19-18 是检验照明的主要因素关系图。被检验物的性质与照明方式则是第二位与第三位的重要因素。检验对象中，对于视觉工作最为困难的是：(1) 被检验对象非常小时，(2) 与背景亮度和颜色对比很小时，(3) 物体高速运动着时，(4) 要辨别有微小颜色差异的场合等。

即使是眼睛非常好的人，在良好的照明条件下视力的限度是 2.5。这相当于视角大小为 0.4 分，视距为 0.3 米时，观察物的大小约为 30 微米。象这样非常小的检验对象，因为接近视觉上的界限，辨别起来就变得困难，而必须使用放大镜一类的器械。

对于被检验对象与背景亮度对比或颜色对比小的场合，或作颜色检验以及高速运动物检验的场合，采用合适的照明方式能使眼睛的辨别工作变得容易起来。想要观察的东西有明暗、有无光泽、颜色差异、凹凸、裂纹、污点等情况。为了找出合适的照明方式，需要很好研究上述三个主要因素的基本关系，有时，还必须进行照明效果的预备性评价实验。

19-5-2 检验作业照明的一般方式

取决于检验对象性质的检验工作照明的方式有如图 19-19 所示的基本形式。要观察物体有无光泽、明暗的程度时，照明方式的影响很大。恰当地采用集光型灯具或扩散型灯具，调整照明与观察的方向和角度，都可以使观察的东西更加容易引人注目。

以下按被检物的检验内容，说明照明上应注意的事项。

(1) 反射率低而带黑色的场合 照度即使相同，愈是带黑色的东西则亮度愈低，不容易

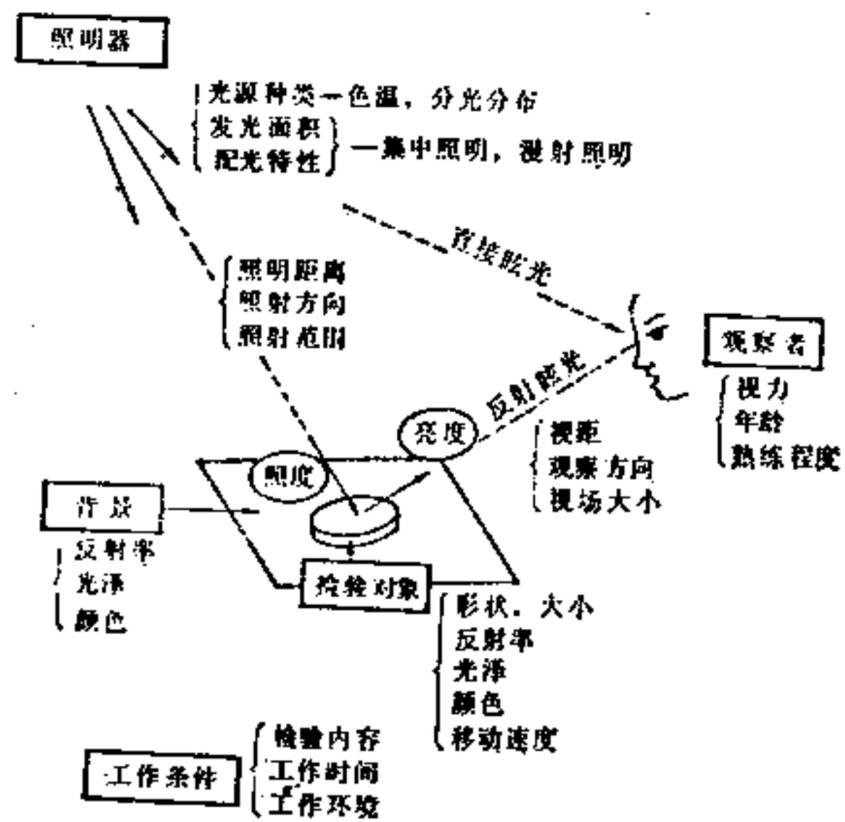


图 19-18 检验工作照明的关系因素图

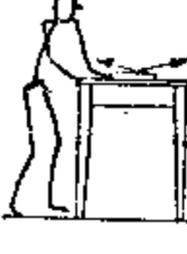
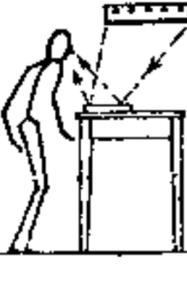
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
基本形式					
光源	置于被检物上方	置于被检物前方	置于被检物前下方	漫射性面光源	漫透射面光源
漫射型灯具	光泽平面上的凹凸、弯曲(金属、塑料板等)	半光泽面上的亮斑、凹凸(铅字、活板等)	强调平面上的凹凸(布、纺织物的纺织不匀、疵点、起毛等)	光泽面上的一致性、瑕疵(金属、玻璃等)光泽面的翘曲,凹凸由反射像的变形来观察光源面上的条纹、格子的直线样子	透明体内的异物、裂痕、气泡 (玻璃、液体等)半透明体的异物、不均匀(布、棉、塑料等) 但是,对于带有白色的异物,要用黑色背景,以聚光性灯具照射
集光型灯具	光泽面的瑕疵、划线、冲孔、雕刻等	粗面上的光泽部分(金属磨损部、涂料的剥落等)	强调平面上的凹凸(板材、铅字、纸板等的翘曲、凹凸)		

图19-19 检验工作照明的基本形式

看得清楚。观看物体时物体亮度的影响很大,所以反射率愈低的东西就愈要有更高的照度。

图19-20表示轧制钢板表面缺陷检出成积与亮度的关系^[11]。亮度与表面的照度成比例,因此,检验的效果取决于照度的高低。

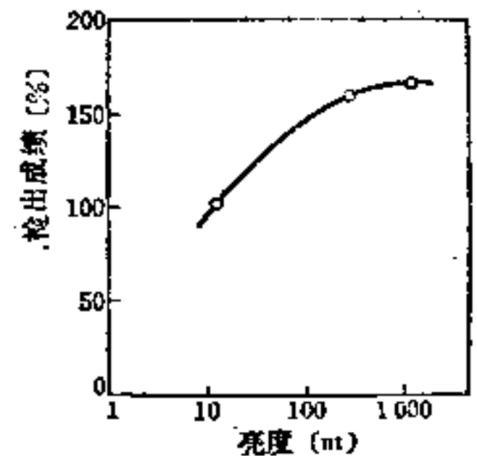


图19-20 轧制铁板表面瑕疵的检出成积与亮度的关系举例

(2) 有光泽表面的场合 被检物表面有光泽时,对光线产生强烈的局部反射,从而使观察变得困难。在这里,要考虑好光线照射方向和观察方向。照射方向与观察方向相同的场合,可减轻表面反射,但若由于头或手造成阴影时,则让光线从观侧方向的左右侧面入射即可。

如图19-21所示,要观察象冷轧钢板那样有光泽表面上的缺陷,可用亮度低而发光面积大的灯具作漫射照明即可。

(3) 表面上凹凸或缺陷的检查 通常使用集射型灯具

时,使照射角和观察方向对被检面成倾斜方向是有效的。图19-22说明由倾斜入射的光线使表面凹进部分容易令人注目的原理。

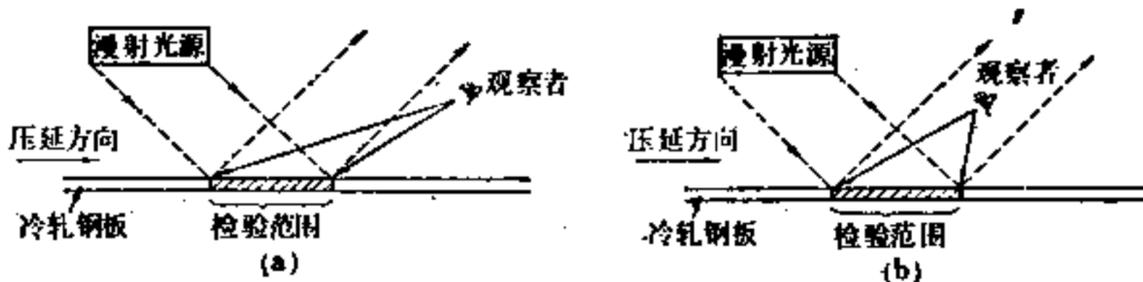


图19-21 有光泽的冷轧钢板上划痕检查的照明示例

冷轧钢板上的划痕与压延方向有关,(a)的场合,与延压方向成直角的划痕看来白而亮,成平行的划痕看起来发黑,也有时看不见。(b)的场合与压延方向无关,可见到划痕比板面为黑。(b)是通常所采用的照明方式。

这样的斜照光线，不仅对金属表面，就是对纺织品、木材、纸张等也都有效果。

(4) 移动着的物体的情况 对于在流水作业中用肉眼进行检查，被检物在不停地运动着时，物体在观察者视场内的移动速度越大，就越难观察。移动速度大，眼睛就不能跟踪，漏检的就增多。

图 19-23 说明，在白纸上描绘黑色视力检验视标，从左向右移动时，视力受到移动速度与照度的影响。要得到同一视力，速度愈增加，就需要有更高的照度。

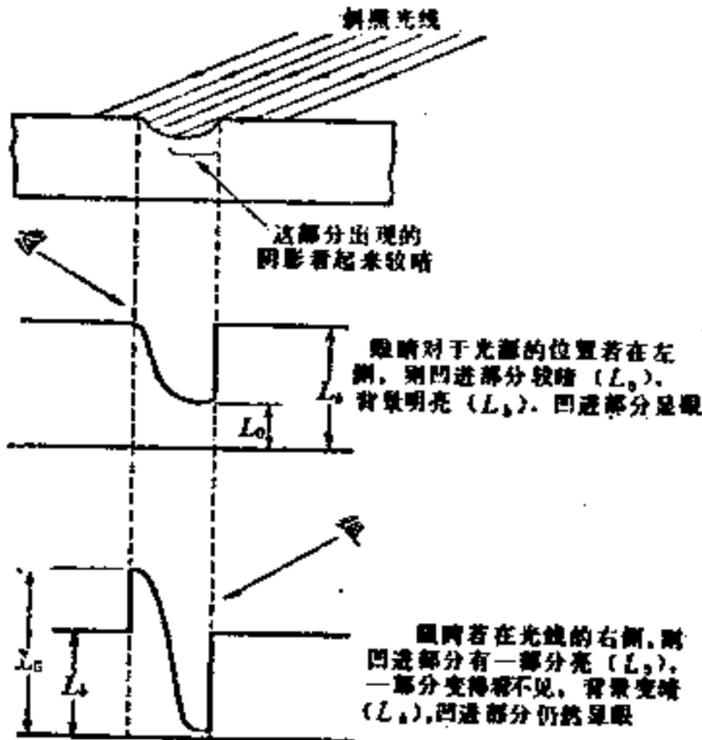


图19-22 表面上的凹进部分显眼的原理

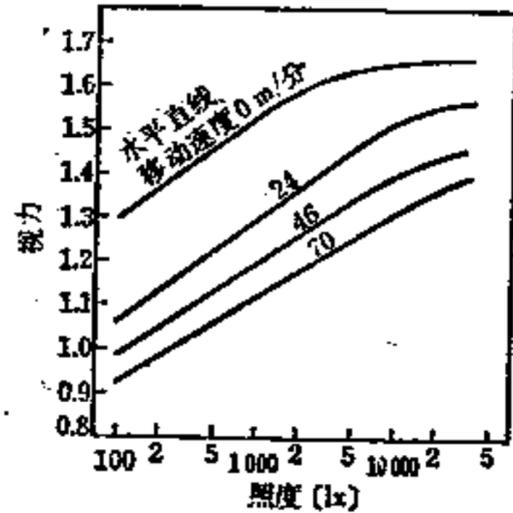


图19-23 对移动着的视标的照度与视力的关系 (视标显示时间: 0.5秒, 视距: 1.5米)

另外，物体移动方向与视线方向之间的关系也很重要。如图 19-24 所示，视线在左右横的方向运动，即所谓平行检查方法，比交叉检查（纵向移动）的方法容易观察。这方面报告可见参考文献[12]。

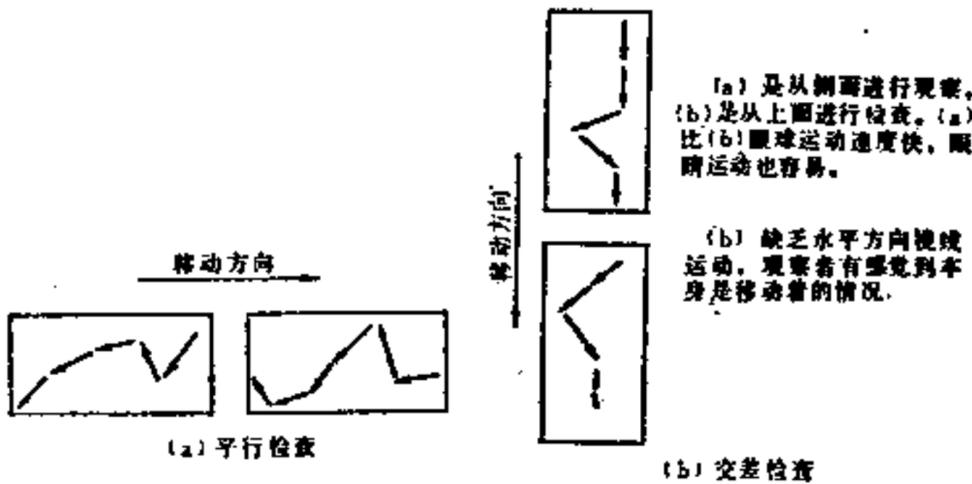


图19-24 视标移动方向与视线的移动 (箭头方向)



图19-25 用扩散性光源作透明玻璃容器内的异物检查

(5) 透明玻璃容器内的异物的检查 如图 19-25 所示，把受检查的容器置于扩散性发光面的前面，若对着发光面透着光来观察，则容器内的异物黑而可见，容易发现。

(6) 着重考虑色彩的场合 首先要仔细考虑检查内容，选择具有合适的分光分布或显色性的光源。其次是不使检查对象的表面产生正反射，而是用扩散性照明。另外，要对检查室或小检查间内部进行无光泽的灰色的装修。照度不应小于 700lx。

19-5-3 检验作业照明的特殊方式

对于特殊的检验内容，各自有它的有效的特殊照明方式。

(1) **偏光照明** 如果被检查物表面有反射眩光或有从光源本身来的直接眩光时，采用偏光照明灯具或偏光眼镜是有效的。

(2) **黑光灯照明** 检查金属、玻璃等表面有无微小缺陷时，可在被检物表面上涂荧光探伤剂并用黑光灯照射。只有缺陷处才发光，这样使得缺陷容易发现。此外，对荧光性有机涂料的物体也能适用。

(3) **色光照明** 用色光来对涂色不均匀的物体作检查是有益的。例如，在黄色的底漆上涂绿色的表漆时，若用黄色光照明，则只有黄色部分看来光亮，因此，涂得不够的部分就显得易于发现了。

(4) **人工昼光的照明** 与印刷、纺织等有关的部门，颜色的检查是极为重要的。过去是用北窗入射的天然光作为基准。但是，天然光随季节或气候而变动，很不稳定，而且晚上又不能工作，希望有人工昼光以资采用。

为了获得近似于北窗光的人工昼光，要注意以下几点：

- ① 要考虑选用合适的光源的色温和分光分布。
- ② 必须是漫射照明，发光面要足够大。
- ③ 必须保证有必要的照度。

特别是当选择光源时，希望用实际的试件为对象，进行预备性实验来决定。

19-6 事故照明

事故照明必须在由于某种原因而造成通常的照明停电时，能自动地接上备用电源或其它用途的电源，以便能够完成照明的功能。在日本，按照建筑基准法和消防法规的规定，工厂也必须根据条件设置事故照明装置与安全疏散用指引灯。

这里，除了为防止灾害事故的通常的照明外，介绍在可能产生灾害时应考虑的照明，作为事故照明的一般的处理方法。

19-6-1 危险场所的照明

为了强调危险场所，引起对它的注意，要有显著的照明与色彩的效果。要确切地看清用红色表示危险、黄色给予注意或警惕等的安全色彩，有必要选用显色性较好的光源作照明。光源本身也可作为一种标志，但要注意不产生眩光。

19-6-2 应急照明

在发生停电紧急事态时，为了防止灾害事故，首先必须对动力、燃料、机械等采取适当的紧急措施。为此而设置的照明可以用备用电源作常时的照明供电，或用在停电时能自动切换的预备电源进行供电。对于后者，因为汞灯或金属卤化物灯的再启动点燃时间需几分钟甚至十几分钟，在此不宜采用。应采用白炽灯或瞬时启动型荧光灯。

在日本，没有为应急照明用的照度标准。按英国的规定，通常要维持在平时照度的5%以上，而且，若该场所有年龄较高的工作者时，则应保持在10%以上的照度^[13]。日本规定的工作照度最低值为70lx（劳动安全卫生规则），以此为准并参照英国标准，则应急照明的照度应高于3.5lx或7lx以上。

作为参考,表 19-9 [14]列出美国的工厂照明标准所规定的安全照明用的最低照度。

19-6-3 疏散照明

建筑基准法与消防法规规定了设置事故照明灯具与避难指引灯。

作为直接照明,事故照明应保证地面照度在 1lx 以上(建基令第 126 条第 5 项)。

指引灯是用以指明太平门或避难点通道的。通向屋外的出入口要有避难指引灯,走廊和楼梯及住室内通道要设通道指引灯。

表 19-9 安全照明的照度*

危险程度	小		大	
	低	高	低	高
通常活动的频繁程度				
照度 (lx)	5.4	11	22	54

* 能保证人员安全行动的最低照度(摘自美国工厂照明标准)

19-7 特殊场所的照明

特殊场所可分类如下:

- (1) 环境条件特殊的场所;
- (2) 作业内容特殊的场所。

对于第(1)类情况,必须对该场所的条件作出正确判断,以便选定适合该场所的照明器和器材。如果选择不当,不仅会缩短照明器(包括光源、镇流器等)的寿命,而且可能会招致触电、火灾、爆炸等重大的灾害事故。

对于第(2)类情况,有必要就作业内容对照度、眩光、光色、显色性等条件的要求很好地进行探讨,采用合适的照明方式。

19-7-1 危险场所

(1) **有爆炸性气体的场所** 过量的爆炸性气体与空气混合会发生爆炸或燃烧,其危险程度可按照危险气氛的存在时间与频度分为三种。爆炸性气体有可燃性气体与引火性物质的蒸气,按其易燃程度、爆炸等级进行分类。电气设备、照明器等要按照爆炸性气体的种类来决定它的构造。

为了使这种场所的电气设备,在发生操作错误或事故时,不致成为着火的根源,要根据所使用的爆炸性气体的种类和表 19-10 所示的危险场所的种类,选择适合这些条件的电气设备。

电气设备和照明器的防爆构造及性能,应根据日本工业标准(JIS)[15]和工厂电气设备防爆指南的规定,工程施工方法要按照电气设备技术标准的规定执行。

(2) **粉尘多的场所** 是指存在爆炸性粉尘、火药类的粉末、可燃性粉尘等的危险场所。这些粉尘大量在空气中浮游或飞散的场所,有可能形成燃烧源或达到爆炸浓度的危险。

如表 19-11 所示,应选择适合于该种粉尘和场所的电气设备。电气器材的构造与工程施工方法,应按照日本工业标准(JIS)[16]和电气设备技术标准的规定执行。

(3) **有危险品的场所** 易燃危险品制造场所、贮藏场所和使用场所,虽然比(1)、(2)类场所的危险性小,但是一旦发生火灾就有迅速蔓延的危险。

表19-10 有爆炸性气体的场所

	0 种 危 险 场 所	1 种 危 险 场 所	2 种 危 险 场 所
容易发生危险的场所	<ul style="list-style-type: none"> ○易燃性液体的容器、油罐等液面上部空间 ○可燃性气体的容器、贮气罐等的内部 ○在敞开的容器内的易燃性液体的液面附近 	<ul style="list-style-type: none"> ○充灌易燃性液体的容器开口部附近 ○排放爆炸性气体的开口部附近 ○在室内或空气不流通的场所，容易溢出爆炸性气体的地方 ○在容易漏出爆炸性气体的场所，在坑槽那样存贮气体的地方 	<ul style="list-style-type: none"> ○有容易破损漏出危险性物品的容器的场所 ○存在有由于操作错误而放出危险性物品或有易破坏的装置容易漏出危险品的场所 ○强制排气装置易于发生故障，爆炸性气体停滞不能排出，而产生危险的场所
危险状态	爆		炸
照明器的构造*	不可装置	耐压防爆构造	耐压防爆构造安全加强型防爆构造
施工方法	电气设备技术标准第208条		

*照明器为白炽灯（瞬时点燃灯）、荧光灯、汞灯。

表19-11 粉尘多的场所

粉尘种类	○爆炸性粉尘 ○火药类粉末	○可燃性粉尘	其它粉尘
危险状态	爆炸燃烧		温度上升，绝缘恶化
易发生危险的场所	<ul style="list-style-type: none"> ○筛分场所 ○粉碎场所 ○分装场所 ○贮藏所 ○混合或配合场所 ○干燥场所 ○用传送带输送的场所 		[例]碾米厂、制粉厂、弹花厂、捻丝厂、水泥厂、矿石粉碎场等
照明器的构造	粉尘防爆，特殊防粉尘构造	粉尘防爆，普通防粉尘构造	防尘装置，全封闭构造
施工方法	电气设备技术标准第207条		

用于这类场所的电气设备，应按照表19-12的规定执行。作为燃烧源之一的电气机械，应采用牢固而全密闭型的。有关的工程施工方法，也应按规定执行。

表19-12 有危险品的场所

危险品的种类	赛璐珞，火柴，石油类，其它易燃的危险品
危险状态	火灾急剧扩大
易发生危险的场所	危险品制造场所、贮藏场所、使用场所
电气设备的构造	除电热器外应采用全密闭型构造
施工方法	按电气设备技术标准209条和消防法规定

19-7-2 有腐蚀性气体的场所

照明器或绝缘材料等，易被有挥发性的酸、碱等腐蚀性气体或溶液所侵蚀。

在这样的场所使用的照明器，要对该场所的气体或溶液的种类、浓度、使用范围和周围

温度等使用环境进行调查。采用与其相应的、能耐腐蚀的优质材料（氯化乙烯树脂，尿素树脂，铝合金等）或涂上耐腐蚀涂层。另外，灯头、镇流器等导电部分，希望采用不易被腐蚀的密闭结构（参见表19-13）。

表19-13 有腐蚀性气体的场所

散发腐蚀性气体或液体的场所	酸类、碱类、氯酸钾、漂白粉、染料、化肥等制造厂，铜、锌等冶炼厂，电解铜厂，电镀车间，蓄电池室等
危险状态	腐蚀、绝缘恶化、接触不良
照明器构造	适当的油漆，合适的材料和构造
施工方法	见电气设备技术标准第211条

19-7-3 潮湿和有水滴的场所

电镀厂、洗涤厂等用水场所使用的照明器，有本身密闭并在开闭处以橡皮垫等防止湿气入侵的密闭防湿型与即使湿气侵入器具内部也不碍事的局部防湿型二种〔17〕。

如表19-14所示，在构造上应选择适合相应环境条件的灯具。

表19-14 潮湿、有水滴的场所

有湿气的场所，有水滴的场所	散发水蒸汽的场所，水滴飞扬的场所，雨线的外侧，水中
危险状态	绝缘恶化、接触不良、腐蚀
照明器构造	防水构造种类：防滴型，防雨型，防溅型，防湿型，防喷射型，耐水型，防浸型，水中型

19-7-4 多振动场所

没有防振措施的照明器，由于振动会使灯的接触不良甚至发生灯泡掉落等事故。

振动的大小取决于振幅，振动频率和振动时间的长短。如起重机等搬运重物的设备，在起动和停止时会产生大的加速度。这种振动并不单纯，它的振动程度随场所的条件而异〔18〕。

减少振动的方法如表19-15所示，有使用对灯泡握着力强的耐振灯座，有以吊具部分使之减振的耐振结构的照明器，或在照明器的安装台上安装橡皮或弹簧等吸收振动装置等方法。

为了满足耐振性能上的要求，对照明器所受的振动频率、振幅、振动时间长短、加速度或共振等情况，作具体的、全面的了解是很重要的。

表19-15 振动频繁的场所

振动频繁的场所	动力车间，吊车行驶下，冲压车间等
造成危险的状态	短路、接触不良、掉落
照明器的构造	耐振型灯，耐振型灯座，在灯具安装上采取措施（采用耐振装置、挠性配件、止振配件），防松装置（采用双螺帽，涂料封固等）

19-7-5 低温场所

为了谋求食品流通机构的合理化，伴随着低温、输送机构的发展，冷藏库的设施正在日益增多。照表19-16所示，冷库按其温度范围分成三类，作为储藏对象的商品（食品）也各有其相应合适的温度。

表19-16

冷藏库分类与相应的储藏食品

等级	区分	温度(°C)	主要储藏品名称
C 1	冷冻库	-25以下	冰淇淋、虾、金枪鱼
C 2	冷冻库	-25~0	咸鱼干、牛肉、马肉、羊肉、鲸肉、冻鱼
C 3	冷藏库(恒温室)	0~10	

冷库由货物搬入通道、前室与分选室、冷藏室组成,被搬入的商品(食品)卸下后经挑选入库。

(1) **光源的选择** 从节省用电方面考虑,希望采用效率高的光源,不要因照明而过份地增加整个冷藏系统的用电负荷。一般照明用电不过占整个冷藏系统全部用电的2~3%左右。所以考虑工作环境(极寒)较考虑用电量更为重要,希望使用容易维护(灯泡替换等工作)而寿命长的光源。

(2) **灯具的选择** 根据各冷藏间功能的不同,选用灯具的构造亦不同。表19-17给出主要场所的灯具的构造。

表19-17

冷藏场所

主要场所	搬入通道	前室	分选室	冷藏间
室内状况	通常处在常温,但在工作时由于前室来的冷气,易在通道结露	低温10~-30°C	0~10°C,处于低温室与常温室交界处,可能在空气中形成多量的水滴	
造成危险的状态	绝缘恶化、接触不良			
照明器的构造	防湿型、防锈型	防湿型	防湿型、防锈型	防湿型

因为在极寒冷条件下工作,容易出现安装粗劣的情况,所以希望所用灯具的构造应是容易安装而牢靠的。

19-7-6 监控作业场所

由于引进了电子计算机,扩大了监控室、工业电视(ITV)监控等领域的工作,而使监控成为完全自动控制工作。这里,监控人员只是进行及时辨认的单纯作业。另一方面,虽然很少发生事故,但是为了检测不知什么时候会发生这样情况的信号的变化,必须使注意力高度集中。因此,由于紧张而容易造成精神上的疲劳。

在进行照明设计时,除了要考虑以上情况,使其具有充分的照明功能外,还必须考虑到人的心理作用以形成舒适的工作环境。

兹将应注意的事项叙述于下:

(1) 照明应尽量使控制盘盘面上亮度均匀。为此,要注意灯具的配光和安装位置。

(2) 要注意到所表示的信号、文字、图形等与周围背景的亮度对比要合适,必要时希望采用能调光的装置。

(3) 不要使从照明器来的光在盘面或仪表罩面上产生反射像。要考虑视线范围,研究照明器的安装位置。

(4) 不应使照明器对监控操作者产生直接眩光。为此,希望在配光上采用防止眩光的灯具。

(5) 作设计时,要考虑到照明应形成合适的视觉环境、眼睛的适应(白天进出监控室时)、桌上作业的必要照度等条件,要能根据情况进行调光。还要注意所用光源的光色和显色性。

总之,舒适的工作环境,不仅和照明有关,同时还要进行室内环境设计(引进色彩、内部装修、观赏花木等)才能达到。

19-8 维护管理

19-8-1 维护的必要性

照明设备如不进行维护,则使用一段时间后,光线就会减少。减光的原因有:(1)光源光通的减退,(2)由于灯具的污染而造成灯具光通的减退,(3)由于顶棚或墙壁的污染而降低了工作面的照度。所以,为了维持设备最初的性能,对照明设备进行维护是不可缺少的工作。特别是对工厂说来,从工作需要和安全的观点出发,要有计划地对照明设备进行维护。

图19-26是由于不作维护而致有效光通损失一半以上,而经维护后又恢复原状的一个例子。

不注意维护不仅有生产上或安全上的问题,而且会造成照明用电的浪费。因为得不到本来应该得到的光通,而造成不必要的能量损失。工厂规模越大,照明设备越大,也就更加必须紧紧抓住作为节约能源的相应措施的这一环节。

19-8-2 维护管理

为了进行维护,需要有劳动力和经费,首先,工厂管理人员对维护的必要性应有很好的认识,要把它作为重要任务提出来,要制订必要的实施计划。对于维护管理的体制,各个工厂有各种不同的考虑。图19-27是维护管理组织的例子。

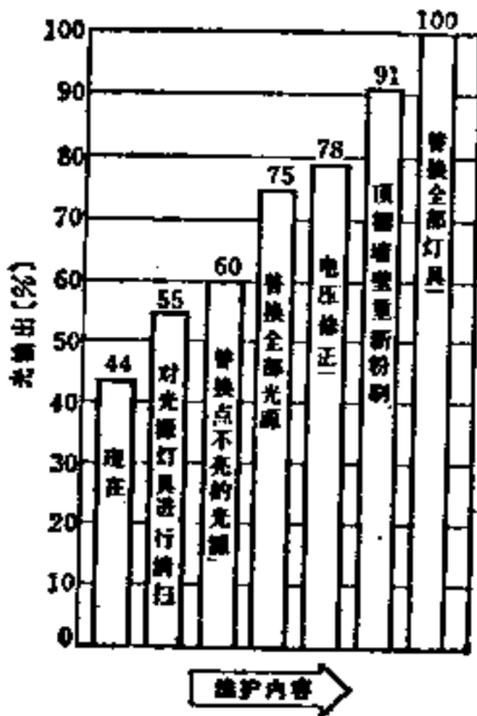


图19-26 维护不善的工厂经维护后的效果

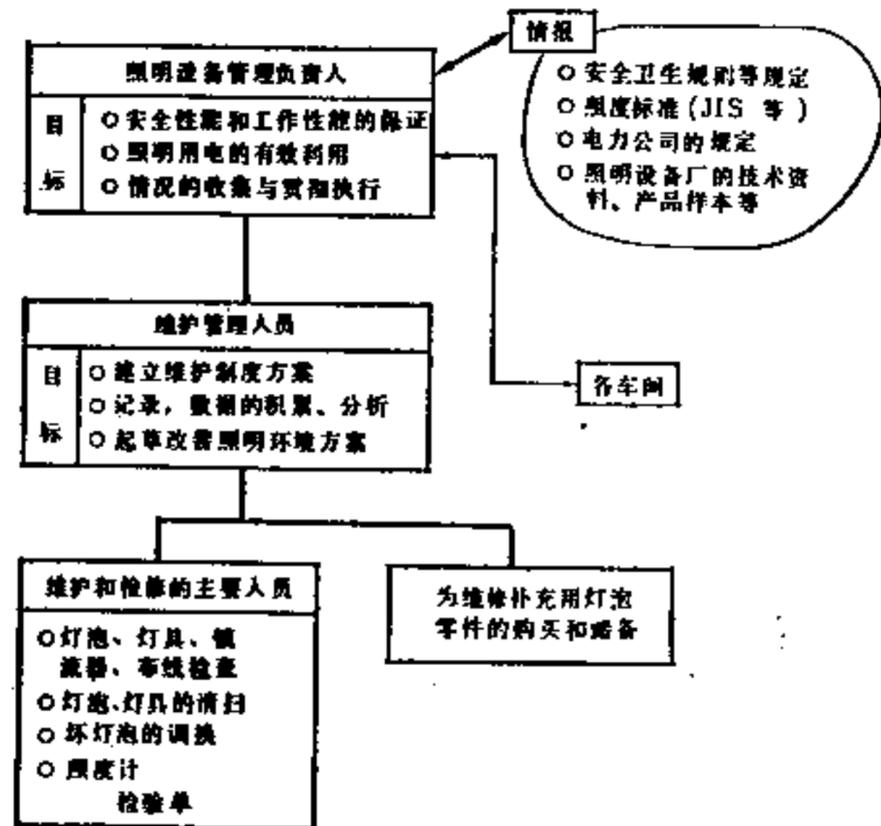


图19-27 维护管理组织示例

在维护业务的执行上，需要注意之点如下。

(1) **照明设备的检查** 要检查光源是否在正常电压燃点，有无不能燃点或已到寿命末期不大中用的灯，照度是否不足以及辅助照明的使用方法是否有问题，显色性怎么样，灯具与镇流器有无异常，眼睛所能见到的大多数灯具的污浊程度如何。同时，对于由这些缺陷的影响所造成的照度和显色性等照明效果和工作效率之间的关系，应有十分正确的认识。收集情况和掌握知识有非常重要的意义。

劳动安全卫生规则是规定每六个月检查一次以上。

(2) **维护作业** 对不能燃点和已到寿命末期的光源的替换和灯具的清扫工作，应执行怎样的日程计划，有很多理论上的研究。但是对应实际方面是不一定充分的。因为光源的性能（光通和寿命）和灯具的污染情况随使用的环境的不同而不同。所以要掌握现场的实际数据，根据它的资料来定出维护的日程计划。在缺乏上述资料情况下，为了维持设计照度，可把过去采用过的维护系数作为大致标准。

维护作业必须有脚手架或工具，也可采用方便维护的灯具升降装置。图19-28给出把照明器连接在不锈钢丝绳上用卷扬机使灯具升降的方式。另外，应尽量采用容易维护的灯具，因此，有必要注意照明厂商的情报，灯具的选定是首先要研究的事项。

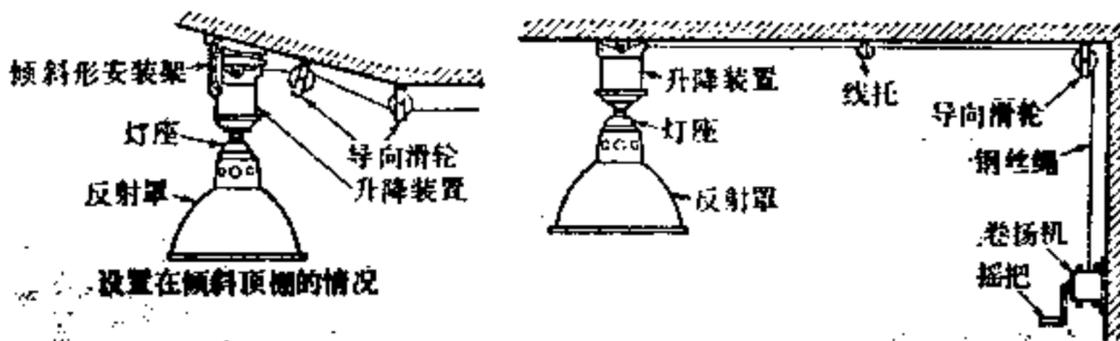


图19-28 高顶棚用反射罩的升降装置示例

(3) **注意照明的改善** 光源和灯具的性能有日新月异的进步。只靠过去的使用实绩，恐怕是赶不上时代要求的。从安全、省电、质量、经济等方面来重新评价照明设备，根据需要谋求照明的改善，这样就可使环境安全，提高工作效率并起到节省电力的效果。掌握好照明知识，对于进行可靠的日常管理是有非常重要意义的。

19-9 工厂照明的实践

19-9-1 高大厂房的照明

(1) **照明的基本条件** 高大厂房多数属于如炼铁、炼钢、大型机械工厂等重要的骨干生产行业。这类工厂有连续操作，高温，用吊车等起动设备处理重物的工作较多，工作的危险性大等特点，所以在照明上必须特别注意。另一方面，因为高温、振动、污染等不利条件多，所以在光源和灯具的选用上需要慎重。

虽然工作对象较大，对比也较大，且多为简单的视觉工作，但在灯具布置上要注意不致形成照度不均匀和阴影。根据作业内容，在有的场合，垂直照度可能显得更为重要。

一般照明的照明方式和光源的选择可按19-3节所叙述的那样，通常可采用大容量、高效率 and 照明经济上优异的荧光汞灯、金属卤化物灯、高压钠灯等高功率的光源。

(2) 照明方式 顶棚高度在15米以上, 具有大面积、大空间的工厂, 照明器的安装、维护检修工作是有危险的。在对照明的考虑上, 特别有必要重视防止劳动事故上的安全性问题。以下叙述照明方式的例子。

(a) 使用反射罩的一般照明 图19-29是炼铁厂热轧工场照明的例子。

(b) 投光照明 在侧墙、侧柱上设置照明专用台架, 在台架上安装灯具(投光灯)作投光照明(图19-30)。

这种场合, 必须对眩光、照度均匀度等问题, 对安装高度、灯具配光、投射方向等进行充分的研究。图19-31所示是施工的例子。

(c) 链悬式照明 是一种在建筑物上设置链悬线(长架线), 在它的上面装设很多灯具使照度均匀的照明方式。

这种方式, 灯具电线和零配件等的安装位置大体上处于同一高度, 使得高处作业既安全又迅速, 比灯具挨近侧墙的照明方式有容易维护检查的优点。

另外, 在很多场合实施起来也有困难, 有必要考虑到建筑结构等条件来进行研究。

图19-32说明灯具的安装构造, 图19-33说明施工的例子。

(3) 带升降装置的灯具 为方便维护作业用的升降装置, 大体上由固定部分(电气接触部、导轨等)、可动部分(灯和灯具)、卷升部分(转筒, 钢丝绳)等组成。升降装置有手动式和电动式二种。

图19-34所示为升降装置的构造。安装时应考虑灯具布置与工厂机械布置的相互关系。

19-9-2 中等高度厂房的照明

(1) 照明的基本条件 中等高度顶棚的工厂有中型金属板加工厂、中型组装工厂、油漆工厂等。

作业内容有一部分是简单的视觉作业, 大部分工作对象为中等大小的, 多数是标准视觉作业。

在光源选择上, 重要的是要选取适合相应工作环境的光源。例如对于金属板加工厂、机械组装工厂(中型)等, 光色、显色性并不太重要, 所以应从效率、照明经济方面来考虑选用有利的光源。而油漆厂等则必须重视光色、显色性等问题。

一般可使用高功率荧光灯, 也可使用荧光汞灯、金属卤化物灯, 但必须注意防止眩光。

关于灯具构造, 特别要考虑防止直接眩光和反射眩光的问题。同时要考虑工作场所内的亮度对比, 还希望采用反射罩上方可发出10~20%光线的灯具。

(2) 照明方式 有一般照明或一般照明和局部照明并用的方式。如图19-35那样流水



图19-29 炼铁厂热轧工场的照明
采用反射罩的一般照明汞灯700W, 安装高度(距地面)17m, 平均照度150 lx

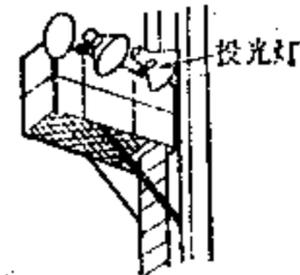


图19-30 侧柱投光灯
安装台架的安装情况



图19-31 炼钢厂的照明
采用投光灯作一般照明, 用400W高压钠灯, 安装高度(距地面)24m, 平均照度100 lx

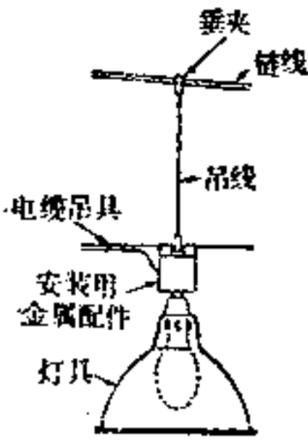


图19-32 用链悬线的照明
灯具安装构造图

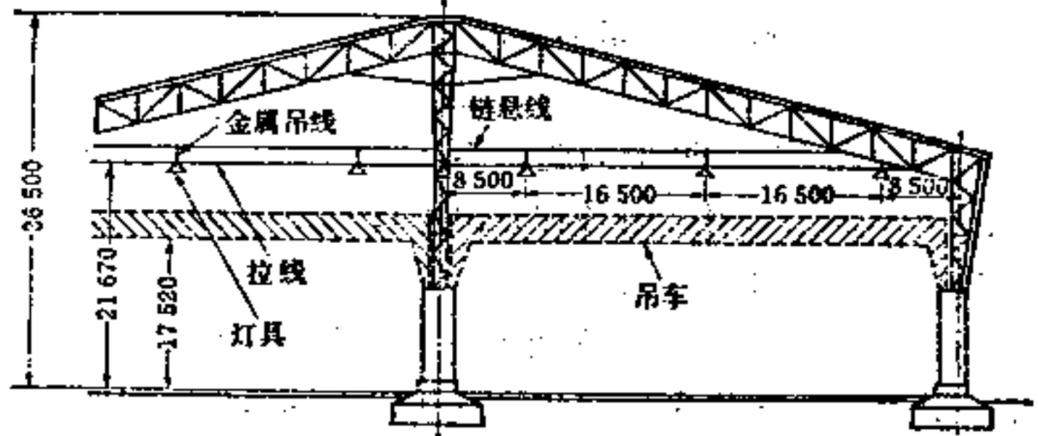


图19-33 照明灯具安装图
采用链悬式照明的一般照明

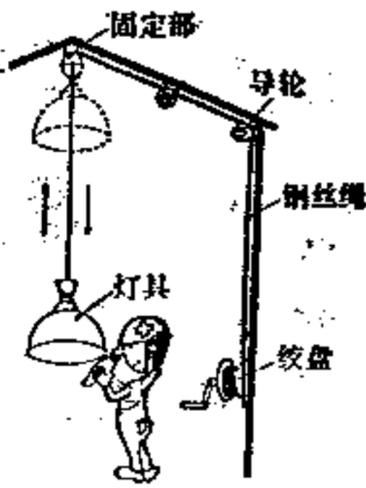


图19-34 升降装置安装图

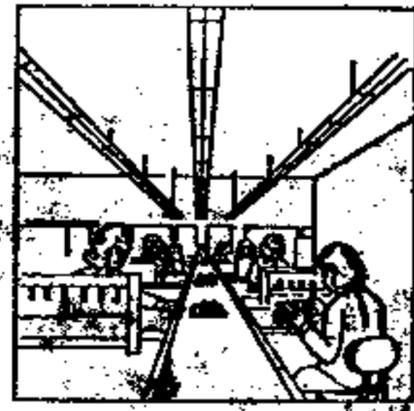


图19-35 连续照明方式
组装流水线作业，用40瓦2灯用荧光灯具作连续照明

作业的场所，采用连续照明是有效的。对于低照度的设施，要注意到越是采用高容量光源，所用灯数越少，照度的不均匀度也就越大。

另外，对于像油漆厂那样光色、显色性显得重要的场合，有必要根据它的要求来选择光源。

19-9-3 层高低的厂房照明

(1) 照明的基本条件 层高低的厂房有纺织、印刷、化学、食品以及各行业的组装、油漆、检验、控制室等，涉及范围很广。

视觉作业的内容大部分是工作对象小，多为精密的视觉作业。对光源的选择和照明方式，必须通过充分的思考来设计。

(2) 照明方式

(a) 要求高照度的场合 有精密机械和电子零件的组装、校正、产品或零件的检验工作等。在这种场合，除了对照度的要求外，还应注意照明方式。且因为它是疲劳程度大的作业，希望形成舒适的视环境，包括色彩还原等问题，应认真地加以考虑。

(b) 要求显色性的场合 食品厂、纺织厂、衣料制成品等，都是对颜色有要求的作业。这类工厂对照度固不用说，对光色和显色性的要求也很重要。要注意到，颜色相同的物体，由于照明不同，看到的颜色不一定就相同。

有关比色作业所使用的光源的显色性，在要求高的场合，平均显色指数(R_a)应在90以上，要求较低的场合也希望有70~85。

对颜色的观察评价说来,环境条件很重要,室内墙壁和顶棚的装修应为无彩色(即灰色或白色)。在有色材料上,如果有镜面反射就不能正确地观察颜色。为此,必须考虑灯具的安装条件(安装位置、照射角度等)。在进行严格的调色工作或检验制品的颜色时,会产生因照明条件不同而出现不同判断的问题。为此,希望在工厂内设置能客观评价制品的标准照明设备。

(c) 混光照明 用各种光源进行混光可改善显色性。在这种场合,必须把所用的各种光源集中在一个灯具之内。

图19-36是食品工业装瓶车间照明的实例。考虑到所生产制品的新鲜问题而要形成卫生良好的工作环境,采用金属卤化物灯和卤素灯混光的照明方式。

图19-37是食品工业海苔紫菜检验场的照明。为了检查产品表面的色调和质量,需要有高显色性的照明。使用高显色型高功率荧光灯与高显色型金属卤化物灯混合,效果大大地提高。



图19-36 食品工业装瓶车间的照明

为造成卫生良好的作业环境,采用400W金属卤化物灯与1000W卤素灯的混光照明方式。安装高度(距地面)6m,平均照度500 lx



图19-37 海苔紫菜检验场的照明

为了对几十种紫菜作选别,要求有充分的照度和良好的色彩辨别条件。采用400W高显色型金属卤化物灯与110W和40W高显色型荧光灯的混光照明方式。每组由2支400W高显色型金属卤化物灯,2支110W高显色型荧光灯和6支40W高显色型荧光灯组合而成。安装高度(检验桌上)2m,平均照度6000 lx

19-9-4 特殊场所的照明

(1) 危险场所 处理爆炸性气体、粉尘、危险物的化学工厂的照明,要将19-6-1节所述的主要事项充分和工厂管理人员与技术人员商议好。照明固然要谋求工作者的安全,也必须考虑到工厂的各种设备的安全。

图19-38为一个危险场所照明的实例,图19-39为另一个危险场所设备照明的实例。

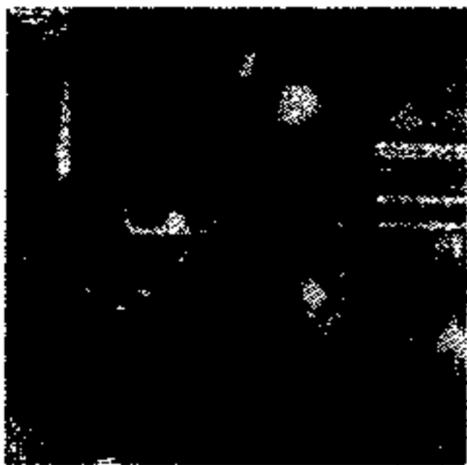


图19-38 化学工业危险场所的照明

耐压防爆壁灯汞灯400W安装高度(地面上)4m平均照度100lx



图19-39 化学工业危险场所的设备(配电盘)照明

耐压防爆壁灯汞灯250W,安装高度3m

(2) **特殊环境的场所** 振动频繁的场所,有腐蚀性气体的场所,潮湿、水滴多的场所等,是各种工厂中的特殊环境场所。要对各个场所的各种条件进行充分的调查研究,按19-7节所叙述的那样来处理照明问题。

图19-40是冷藏库所用灯具的实例。

(3) **监控室的照明** 作为室内的一般照明,对于要求比较均匀的高照度的场所,也可采用眩光小的格片顶棚方式。实际上要对19-7-6节所叙述的各种条件进行充分的分析研究。图19-41是监控室照明的一个例子。



图19-40 冷藏库用灯具
构造: 密闭型。使用光源: 荧光采灯
200~400W, 高压钠灯150~400W



图19-41 监控室的照明
灯具: 荧光灯40W 3灯用灯具, 荧光灯40W 1
灯用灯具; 水平面平均照度2000~650 lx(可
调光); 仪表面垂直照度700~230lx(可调光);
顶棚内表面亮度: 亮部600nt, 暗部150nt

19-9-5 其它

(1) **复合作业场所** 是在没有隔墙的宽阔厂房里,混在一起进行许多不同作业的场所;或在相同的作业场所上,有时为了各种各样的作业或各种不同目的而有分隔开来的情况。图19-42所示是第一种情况的例子。

在这一例子中,基本上是配合各个作业场所的环境和视觉作业的内容来进行照明设计的。这里有以下几点值得注意。



图19-42 机具工场平面图

(1) 确保每个作业面有必要的照度。

(2) 虽然各个作业场所照度不同,但是要对整个室内的亮度对比进行充分的考虑研究,创造出在心理上愉快舒适的环境气氛。

(3) 要考虑到制品的流程和人员的活动来研究照明灯具的布置,使之减少眩光。

采用对于各个作业的局部照明与一般照明并用的方式是合理的。另外,由于作业的多样化,采用照明光导管等也是有效的。

(2) **无窗厂房** 对于需要准确控制温度、湿度条件的工厂,或制药、食品等要求不能沾染尘埃的工场等有采用无窗的结构。这种工厂,为了使作业者不产生心理上的闭塞感而能愉快地工作,需要有良好的环境。因此照明的作用是重要的。在照明设计时,特别要注意以下几点:

(1) 确保视作业的必要照度。

(2) 造成一个在心理上有明亮印象的空间。

(3) 形成舒适的亮度分布。

(4) 减少眩光。

(5) 进行环境设计(色彩、内部装修、引进观赏植物等)。

(3) 原子能发电站 在原子能发电站内部, 可分有放射性影响和没有放射性影响的二种场所。特别是前者, 从保证安全方面来考虑是极为重要的。

原子炉(浓缩铀轻水型炉)内的燃料替换工作, 是操作者从燃料替换机上用眼睛看着水下十几米深处的东西来进行的。由于水面的反射和水中有晃动使之难以看见, 眼睛也就容易疲劳。

照明方式⁽¹⁹⁾可并用一般照明和局部照明用的水中照明器, 使对象物产生阴影以便容易辨认, 而整个炉内的亮度对比却是小的。

光源应采用就是万一破损时也有高的安全性能的白炽灯或卤素灯。

对于无放射性影响的场合, 可采用火力发电厂内所用的照明光源、灯具和照明方式。但是从确保安全上着想, 希望有较高的照度。

参 考 文 献

- (1) 各国の推奨照度は次によった、
日本: JIS Z 9110-1975
イギリス: IES Code for interior lighting (1973)
西ドイツ: DIN 5035 I, II (1972)
フランス: 仏 IES 編「室内照明に関する勧告」第9版 (1971)
アメリカ: IES Lighting Handbook (第5版) (1972) 9-83
CIE: Publication No. 29, Guide on Interior Lighting (1975)
- (2) C. Loef: Internat. Lighting Rev., 22-1 (1971) 9
- (3) 米國 Illuminating Engineering Research Institute 編: Annual Report for 1975, 3~12
- (4) E. Jacob: Internat. Lighting Rev., 15 (1966) 103
- (5) 照明学会: 最新やさしい明視論 (昭52-5) 93
- (6) 米國 IES, Lighting Handbook, 第5版 (1972) 14-3
- (7) CIE Publication No. 29, Guide on Interior Lighting (1975) 17
- (8) 大江謙一: 照学誌, 47 (昭38) 139
- (9) 建材試験センター: 住宅性能標準化のための調査研究報告書 (昭52-3) 17
- (10) 松浦邦男: 建築環境工学 I, 朝倉書店 (昭49-9) 64
- (11) Carl-Heinz Herbst: Beleuchtung und Produktivität, Lux, 57, Avril (1970) 225
- (12) 島袋盛弘ほか: 富士製鉄技報, 16-3, 4 (1967) 242
- (13) S. Lyons: Management Guide to Modern Industrial Lighting, Applied Science Publishers Ltd. London (1972) 133
- (14) American National Standard Practice for Industrial Lighting RP-7, 米國 I. E. S. (1973), 37
- (15) JIS C 0903-1975 「一般電気機器の防爆構造通則」
JIS C 0904-1973 「一般電気機器の防爆構造試験方法」
JIS C 8001-1975 「防爆照明器具通則」
労働省産業安全研究所技術指針
- (16) JIS C 0901-1975 「炭鉱用電気機器の防爆構造」
JIS C 0902-1965 「電気機器の炭坑用防爆構造の試験方法」
労働省産業安全研究所技術指針
- (17) JIS C 0920-1971 「電気機械器具および配線材料の防水試験通則」
- (18) Shock and Vibration Hand Book, Vol. 3
- (19) 照学誌, 59-5 (1975) 208

第 20 章

室外设施的照明

20-1 公园和广场

关于公园的定义还不明确,因此要从它的功能和设施掌握实际情况。表 20-1 将公园的功能和设备表示出来〔5〕。随着公园功能的多样化,公园的种类也就增多,综合性、区域性等各种公园组合起来,它们的功能各个不同。现在通常称呼的种类列举在表 20-2 中。

表20-1 公园的功能和设备

设		备
综合性功能	自然观赏	植 物 : 树木、森林、花圃、栽植、草坪、植物园 动 物 : 动物园、水族馆、放饲 水 面 : 海水、湖沼、河流、水池、溪流、瀑布、喷水 山 石 : 山丘、山岳、叠山、堆石、岩石园
	休养娱乐	眺望、休息: 草坪、野餐场地、绿荫、眺望台、休息坐椅、饮食设备 轻盘运动: 丘陵、草地、广场、园地 旅 行: 步行路、散步路、绿荫路、自行车路、乘马路、船艇 运 动: 山地、原野、运动场、各种运动设施 游 戏: 游戏场、运动场、游戏用品、游戏机械 娱 乐: 野外舞台、野外音乐堂、会堂 文化、教育: 野外展览场、美术馆、博物馆、图书馆 会 场: 节日广场、展览场
	地区中心性	历史象征: 史迹、城郭、雕像、广场塔、纪念碑 集 会: 会馆、会堂、体育馆 公用服务: 厕所、饮水处、饮水设备、存车场、避难场

日本的城市公园通过逐年整顿和增强,每人占有公园面积已达三十年前的两倍以上,但和国外的代表性城市相比还是很少〔5〕(表20-3)。

20-1-1 公园照明

公园的功能是多种多样,因此照明方式也必须与其对应而采用最有效率的设备。对于光源、照明器也要求完全不同的性能。

(1) 庭园、园路 在庭园、园路中要随处设置具有明视、气氛、显示等各种性质的照明,但大致分为以明视、防犯为主体的明视照明,显出与白天完全不同的新夜景的饰景照明或显示照明。

(a) 明视照明 这是以园路为中心进行活动或工作所需要的照明,因此必须保证照度值。应该按照 JIS 照度标准中确定的照度进行设计。从效率和维修方面考虑,一向多采用

表20-2 公园的种类

儿童公园	地区性公园 历史性公园 区域性公园
运动公园	
近郊公园	
名胜公园	
综合公园	

表20-3 各国公园的面积和变化

国 名	年 度	人 口 (万人)	公园面积 (公顷)	每人占有公园面积 (m ² /人)
日 本	1949	83200	13464	1.6
	1965	78241	16083	2.1
	1975	94600	31964	3.4
美国 洛杉矶	1973	284	5382	18.9
华盛顿	1973	76	3085	40.8
意大利 罗马	1973	280	3186	11.4
荷兰 阿姆斯特丹	1973	81	2377	29.5

5~12米杆头式汞灯照明器。

在表20-4中列举出东京有代表性的公园面积和杆灯与休息坐椅数的关系。似乎照明器数是远远不够的。杆头式照明器在不开灯时也要非常显目，设计的照明器最好与白天公园的风格相适应。

表20-4 公园广场园路面积和设施(东京)

公园名称	管理面积 (m ²)	广场园路面积 (m ²)	休息坐椅 (个)	杆 灯 (个)	每灯占广场园路 面积(m ²)
新宿中央(地区性)	89479	35755	459	98	365
目比谷(综合性)	150781	63667	586	135	485
代代木(综合性)	554761	87134	707	137	636
上野(名胜)	275625	114700	444	158	726
井之头(名胜)	345416	103838	758	131	793
小石川后乐园(历史性)	71070	11069	50	89	123

庭园中使用的光源和照明器的种类与特征整理在表20-5、表20-6中。

表20-5 庭园中使用的光源及其特征

光源种类	特 征
汞灯(包括反射型)	使树木、草坪的绿色鲜明夺目,是最适合的光源。由于寿命长,维修容易,有40W到2000W的,可以使用容量适合庭园大小的灯
金属卤化物灯	由于效率高,显色性好,也适于照射有人的地方。设有低瓦数的灯,使用范围有限
高压钠灯	效率高,但不能反映绿色,因此只可在重视节约能源的地方使用
荧光灯	由于效率高,寿命长,适于作庭园照明的光源,容量比灯的尺寸少,不适于范围广泛的照明。又在温度低的地方效率降低,因此必须注意
白炽灯(包括反射型、卤钨灯)	小型,便于使用,使红、黄色美丽显目,因此适作庭园照明,但寿命短,因此维修麻烦。投光器可以制成小型,适于投光照明

(b) 饰景照明 这是创造出夜间景色的照明,显示夜间气氛的照明。它是由亮度对比表现的光的协调,而不是照度值本身。树木由投光器照射,不要产生均匀平淡的感觉,最好利用明暗显示出来深远。在照射叠山等时,使棱线最亮,逐渐暗淡下来。这样的手法是有趣的。又照射草坪或花坛时,要利用光环形成有韵律的图形。

无论哪一种方法,由光源产生的眩光应该绝对避免。对于人们的眼睛位置,完全遮挡由光源而来的直射光,可使植物的翠绿或花色更加鲜明。

表20-6 庭园中使用的照明器及其特征

照明器的种类	特 征
投光器 (包括反射型灯座)	用于白炽灯、高强度放电灯, 从一个方向照射树木、草坪、纪念碑等。安装挡板或百页板以使光源绝对不致进入眼内。又在白天最好放在不得观瞻的茂密树荫内或用箱覆盖起来
杆头式照明器	布置在园路或庭园的一隅, 适于全面照射路面、树木、草坪。必须注意不要在树林上面突出照明器
低照明器	有固定式、直立移动式、柱式照明器。光源低于眼睛时, 完全遮挡上方光通量会有效果。由于设计照明器的关系, 露出光源时必须尽可能降低它的亮度

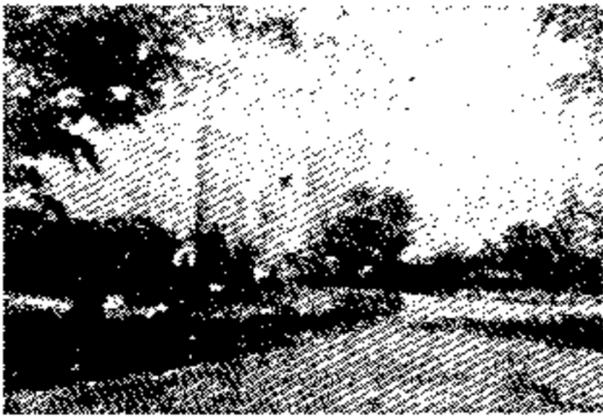


图20-1 新宿中央公园, 杆头式汞灯照明器, 园路防犯照明



图20-2 日比谷公园, 杆头式汞灯照明器, 广场防犯照明, 对于青年增进安静而浪漫的气氛



图20-3 上野公园, 白炽灯悬挂式照明器, 节日用临时照明, 对于游客增进热闹欢乐的气氛

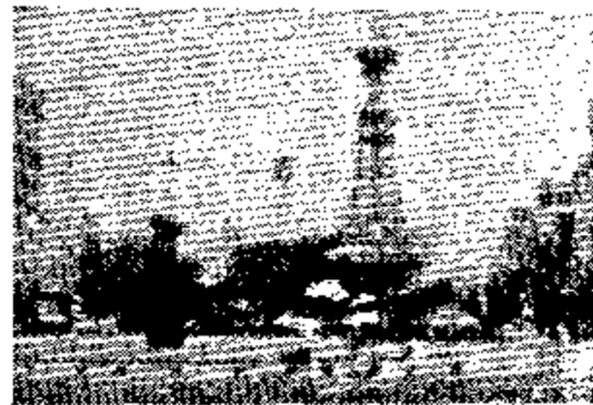


图20-4 札幌大通公园, 杆头式汞灯照明器 (HF100×8), 是作为大通公园象征的照明器

灯笼或庭园灯等光源的光无论如何也会进入眼睛时, 应该用乳白玻璃或棱镜尽可能降低亮度, 或将光源位置放在比眼睛更高的地方, 以避免眩光。

水池或流水由于照明能提高不可想像的效果。池中鲤鱼等在暗水中闪闪发光, 或浮在水面成为发光物体, 都可以娱目。

在庭园中有许多使用移动式照明器或临时用照明器的例子, 因此在眼睛不能直接看到的茂密处布置防水插座用作电源, 是便利的。关于开灯时间或开灯电路必须仔细地加以考察。

饰景照明是为了以它为娱乐的游客在一定的时间内开灯, 采用了杆头式照明器, 但是到

了深夜,只能保留防犯上所需要的,其余希望予以关灯,当然必须考虑到冬夏的时差和游客的出入差来编制时间表。

(2) 广场 参看 20-1-2 节。

(3) 建筑物、纪念碑 参看 20-2 节。

(4) 喷水 参看 20-4 节。

(5) 展览会会场 展览会也可说是具有世界规模的一种节日性建筑。在展览会中照明的比重非常大。照明可以使物件隐现,强调镇静,创造气氛,控制人流,显出明亮,富有生气,将白天环境变为完全崭新的夜间舞台。

照明技术人员和建筑师从初步设计阶段就应非常紧密地协同工作,这样才能在展览会中产生优良的照明效果。在展览会中独创性和新颖是最重要的因素。这是因为表现这些的思想和照明器通过双方的创造力巧妙地结合起来才能实现,除此以外别无他法的缘故。照明技术人员应该认为以前的国际展览会是普及新光源、新照明方法的机会,应踊跃参加新的试验。



图20-5 大阪国际展览会,杆头式白炽灯光束照明器,休息广场照明,光轮的韵律使人们的心情感到柔和



图20-6 大阪国际展览会,节日性广场的大屋顶从下面用 MF400×800 照射,构成一个巨大的发光构筑物。象征性照明

20-1-2 广场照明

广场包括广义的空地到会场,是多种多样的。这里对需要照明的广场也就是人、车、物集散的广场加以阐述。

(1) 人流广场 有如野外讲演会或节日等多人聚集的集会广场和亲人们欣赏自然的休息广场。后者由花坛和草坪点缀多彩,并由喷水和纪念碑创造出气氛来。

(a) 集会广场 由于多人聚集,为使广场有效利用,采用高杆灯的照明是有效的。最好避开广场中央的柱式灯,以免妨碍集会。要很好地看到人体的动作,因此要考虑保证标准上确定的照度和良好的照度分布。又为了很好地看到人的颜色,最好使用显色性良好的光源。当必要从高杆或建筑物侧面设置投光照明时,需用格栅或调整照射角度尽可能除掉眩光。

(b) 休息广场 应用白炽灯的温暖光色的照明最适于休息照明,但从维修和节约能量方面来考虑,却可推荐使用汞灯或荧光灯。庭园用的光源和照明器可以照旧使用(参看表20-5,表20-6)。处于建筑物中间的广场在其周围明亮之处需要一定程度的照度。希望这一空间不致成为黑暗的内凹地。

(2) 交通广场 这是人、车集散的广场。越在人多的地方越要使用显色性良好的光源,而在大部分是车辆的地方却要使用效率良好的光源。但是最低程度也要求从远处能识别自用车辆颜色的显色性。又如公共汽车站那样多人上下的地方必须确保足够的照度。

有代表性的广场可以列举如下:

- (1) 站前广场 参看 25-2 节。
- (2) 机场广场 参看 24-2 节。
- (3) 存车场 参看 23-4 节。

(3) 其它 中世纪的车辆中心、花卉市等都是商品集散的广场。这可作为室外店铺考虑按照店铺的照明方案进行设计。但是照度等级本身却特别低。

最近在港口出现了贮存场之类有宽阔空地的货物堆放场。在这里为了有效地利用广场希望高杆照明,但是对于出入港口的船只却要求尽量减少眩光。这是因为大型船只通过导航驶入港内时,由于高杆的眩光而没有看到行驶在黑暗的海上接近于无灯状态的小船,会造成困难的缘故。在这里也需要具有显色性的光源,以便能从远处识别印在贮存品上的符号颜色。

20-2 建筑物和纪念碑的照明

为了取得利用的便利,表示存在,提高广告的效果,要在建筑物或纪念碑及其周围进行照明。方法主要依靠投光照明。

20-2-1 投光照明的基本内容〔2〕

(1) 设计步骤

- (1) 确定希望的效果。
- (2) 确定希望的照度。这时预先了解受照面的材料、反射系数是便利的。
- (3) 确定使用的器材。
- (4) 确定照明器(以投光系统为主)的数量和使用光源的大小(瓦)。
- (5) 确定照明器的布置。
- (6) 校核照明的均匀性和光线是否能够到达。

(2) 设计时的考虑事项 设计的第一步就是要清楚预测照明的效果。从远距离观看时和行驶中的汽车内观看时上部的表示是重要的。从远距离观看时要能注意到接近于地面的部分,人行道,周围的庭园、栽植树木,建筑物及纪念碑的材料,构造细部的表面。

一般来说,要设置得使主要照明或重点照明产生出立体感的效果。这时,如果光线所指的方向与人们观看建筑物等的视线平行,受照体便显得平淡而失去魅力,因此必须注意。又即使投光器安装成为一列,只要光线所指的方向是相同的,就会得到立体感的效果,因此没有必要用 1 盏灯照射重点照明,或将若干个投光器聚集在一处来设置。

20-2-2 投光灯的布置

有以下 4 种方法:

- (1) 在建筑物本身上安装照明器(投光器系统)(参看图 20-7~图 20-9)。
- (2) 在附近的地表面上设置照明器。
- (3) 利用电杆等(参看图 20-10~图 20-15)。
- (4) 在附近的建筑物上设置照明器。

将这些各自组合起来,也是有效的方法。

投光器靠受照体过近,就会显出建筑物材料的缺点,还由于投光器的光束会出现扇状贝形的纹样,因此要加注意。又如果过远,受照体的亮度变得均匀,过度地形成平面,而失掉



图 20-7

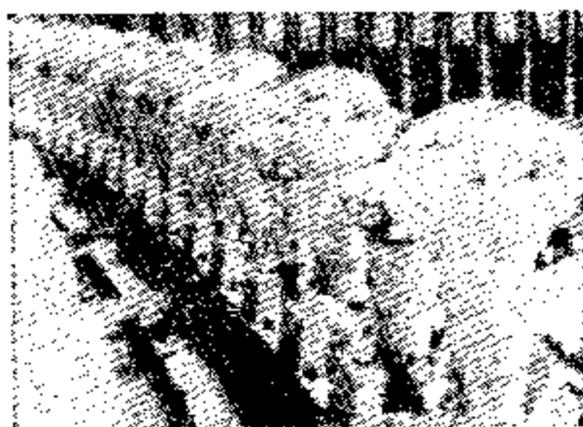


图 20-8

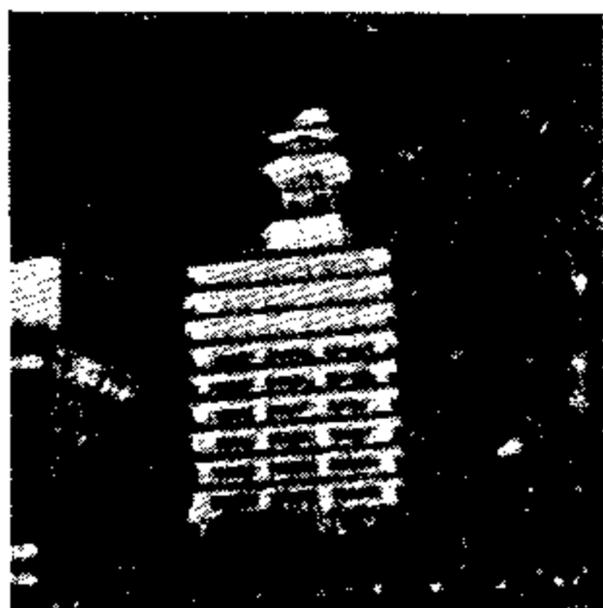


图 20-9



图 20-10



图 20-11

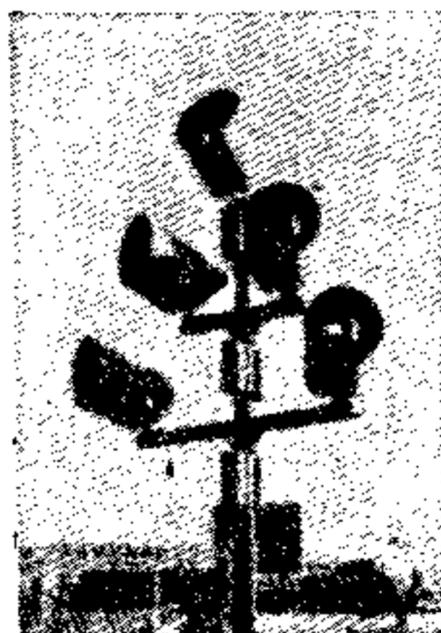


图 20-12



图 20-13



图 20-14

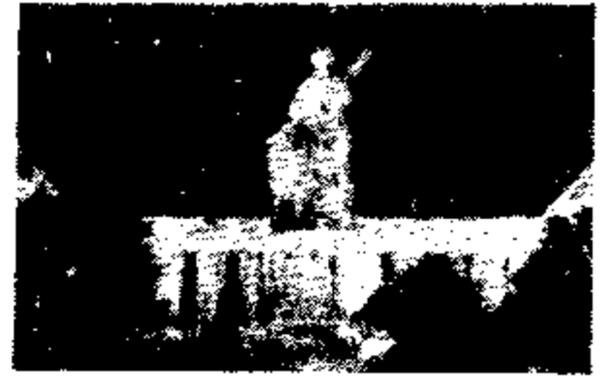


图 20-15

了魅力。

一般来说，如果将投光器设在女儿墙里面，就容易设置，而且对于隐蔽投光器也相当适宜。又如果利用庭园、栽植树木、墙荫、井状洼处，还会减少眩光，白天也看不到投光器，作为完整的设计是优良的。

由于考虑到从投光器而来的直接眩光和经过反射后产生的间接眩光会使视觉降低，干扰近邻，所以为使光源、反射镜不致向观看建筑物或纪念碑的人们发出眩光，最好安装灯罩或格栅〔2〕。

20-2-3 照度的选择和计算方法

推荐照度如表 20-7 所示。在这里投光照明目的是利用、广告和认识存在，因此这些数值可以根据建筑物的类型、地点的条件和照明的目的无妨改变〔2〕。

表20-7 推荐照度值

表面材料	反射系数	周围的情况	
		明	暗
		照度 (lx)	
明亮颜色的大理石 白色或乳色的粗陶材料 白色石膏抹灰墙	70~80	150	50
混凝土 淡色石灰砂浆、水泥砂浆 勾石缝 明灰色或暗黄色石灰石 暗黄色砖	45~70	200	100
稍浓灰色石灰石 浓褐色普通砖 砂石	20~45	300	150
普通红砖 赤褐色砂岩 带色木板瓦 浓灰色砖	10~20*	500	200

* 表面材料的反射系数在20%以下时，如果没有反射系数高的木质部分，投光照明是不经济的。

确定投光量数量的计算,对于受照面大的情况应用光通量法(参看 21-1 节),其中特别注意的部分或纪念碑的情况应用逐点法(参看 9-2 节)。

20-2-4 利用色光照明时的注意点

表 20-7 是没有考虑色光(使用光源的固有光谱)时的数值。当需要色光时就要一并使用滤色片。由于滤色片吸收了或反射了不希望的颜色而透射出来希望的色光,因此透射出来的光量会大幅度地减少。它的透射系数,如果是琥珀色的滤色片,在 40~60% 以下;如果是红色的滤色片,在 15~20% 以下;如果是绿色的滤色片,在 5~10% 以下;如果是蓝色的滤色片,在 3~5% 以下〔2〕。

当使用色光时,如果要得到与非色光时的照度相同的照度,那就必须使用相当于滤色片的损失的余裕能量。可以增大光源的大小,也可以增加光源的数量。在白炽灯的情况下,增大它的大小时所用的系数列在表 20-8 中。

表 20-8 考虑到滤色片的吸收应乘在透明白炽灯的大小(W)上的概略系数

对透明白炽灯的预期效果	滤色片的种类			
	琥珀色	红色	绿色	蓝色
	系 数			
要求得到相同的照度	2	6	15	25
要求得到相等的广告效果、装饰效果	15	2	4	6

实际上各个光源各自辐射出来特有的光谱(色)。包括卤钨灯在内的白炽灯显示出红色多、绿蓝色少的暖光色,白色荧光灯辐射出比白炽灯稍冷一些的蓝色光。荧光灯可以显示出色光。透明汞灯显示出类似白色荧光灯的光色,金属卤化物灯也是一样。高压钠灯在高效放电灯中稍有变化,放射出比白炽灯更有暖色的光,但是深红色和蓝色的量却少。

当建筑物或纪念碑的投光照明上应用这些色光时,根据受照面而要加以注意,又反之,也可用于突出重点的目的。将不同光色的光源组合起来,还可能实现希望的颜色。

20-2-5 从建筑内的照明方法

在近代建筑中窗洞多或像幕墙那样使用玻璃时,在夜间大多利用内部的亮度达到表示的目的。最简易的方法是将接近于窗洞的空间全部或部分的室内照明灯打开〔2〕,就能显出文字或圣诞树式样之类的几何纹样。像办公楼已经出租的情况而不能控制室内照明时,可以另设室内照明。

在这种情况下可以设置补充的墙面照明或顶棚照明,如凹槽照明或窗帘照明。光源隐藏在窗的侧端或窗的上框内。这些光源能在夜间照明窗的侧框、夜间关闭的百页窗或窗帘。

利用建筑物内部照明方法的主要优点是能够利用室内的照明器和维修简便。但在设计分支电路时却要注意到符合目的性。

20-2-6 光和声的并用

根据历史性建筑或建筑种类,除了光和色以外还可以并用声音,以增加神秘性或增益审美性,或添加乐趣〔3〕。这时要对光源调光来改变建筑物的亮度,按照电路开灯来改变气氛,并且调节声音使气氛有所变化。因此,电路数量越多,越能表现出不同的效果。

但要避免损伤白昼间的景观。又为了不致干扰参观或游览这幢建筑物的人群,要充分注意到把照明器、布线设备等尽可能地隐蔽或伪装。

20-3 喷水照明

20-3-1 喷水设计

从希腊时代起喷水就渗透到人们的生活之中。罗马时代的雕刻和喷水在现代欧洲还可以看到许多。随着时代的变迁，水不仅在实用方面而且作为欣赏对象肯定是有价值的。现代在公园、商业中心、地下街道等处，配合它们的周围的塑造物，充满着动态和力量感的喷水和色彩、音乐一起赋予我们的生活以生气。

喷水必须配合设置的地点和周围环境来设计。一般来说，在站前广场、展览会会场等宽阔的地方，喷水的设施要做得富于宏大的动态，与塑造物相陪衬，使塑造物生气活泼；在地下街道、商业中心等处要考虑到配合它的设施。

喷水设计在考虑上述事项的基础上按照表 20-9 的次序进行。

20-3-2 喷水的分类

(1) 见到喷水形状的：这是将喷嘴设在水中或水面喷出水来的形式，基本的水姿如图 20-16 所示。

(2) 像瀑布那样使水跌落的。

(3) 具有雕刻等塑造物的。

(4) 与音乐一起同步喷水的。

表20-9

喷水设计步骤

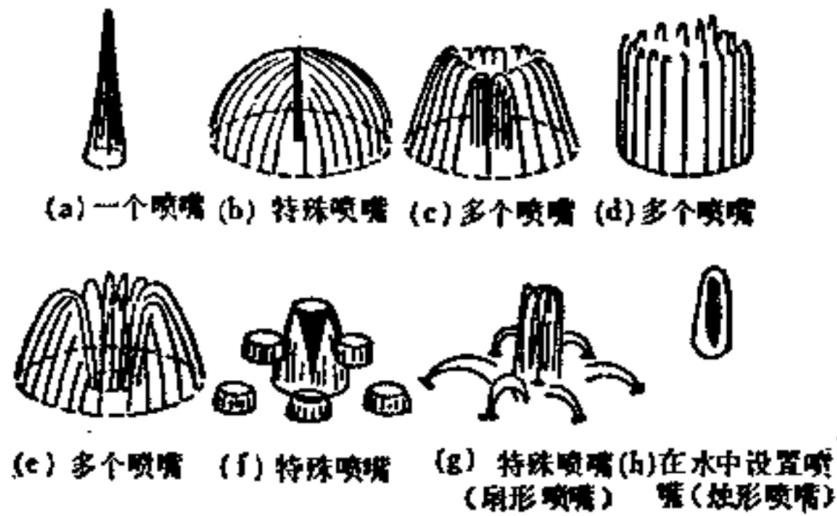
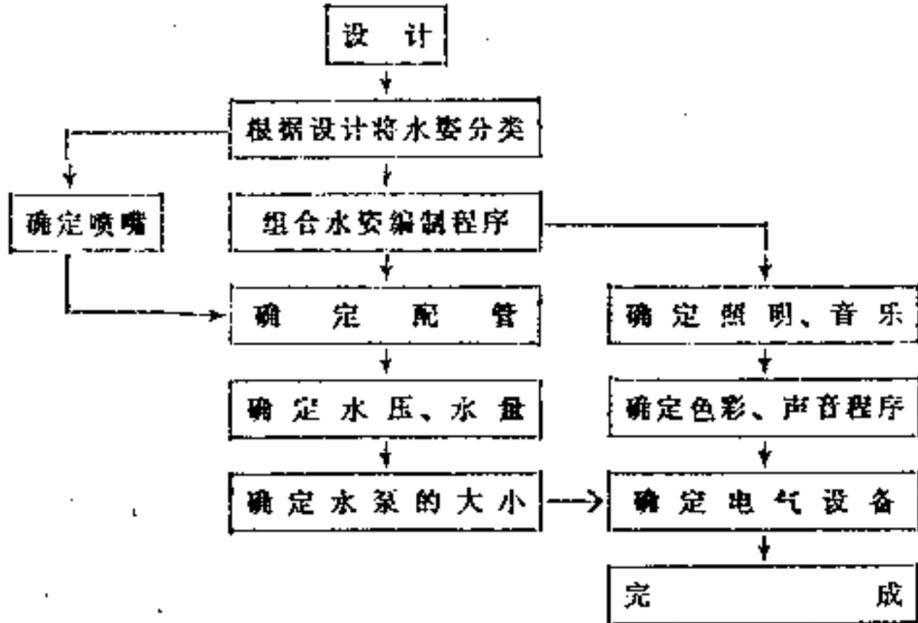


图20-16 喷水的基本姿态

20-3-3 喷水照明

(1) 照明器的位置 一般来说，指能够照明在喷水嘴的周围喷水端部水花散落瞬间的位置。喷水的形态和照射方向如图 20-17 所示。

在水面以下设置时，白天看去，照明器隐藏在水中是难于看到的，但是根据水深会出现减光，因此要注意到水深。然而在开灯时，照明器周围的水变亮，因此也是富有效果的。在水中以外之处设置照明器时，必须选取看到喷水的一面不致出现眩光的位置。

(2) 喷水的明亮度、高度和光源大小 因为喷水的明亮度是强调光辉的水花

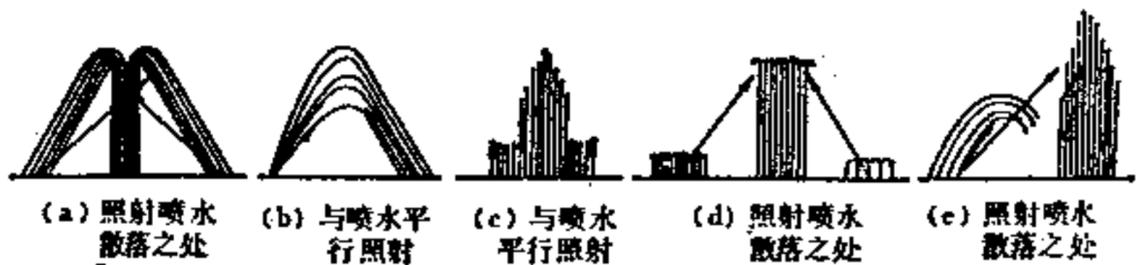


图20-17 喷水的形态和照射方向

的，所以根据和喷水周围部分的明亮度的亮度对比会呈现出来鲜明或朦胧状态。又因为对同一喷水在近处看和在远处看，明亮度是有变化的。喷水端部的照度如表 20-10 所示。又在 30 个地方调查了喷水高度和使用灯的大小，得到了表 20-11 的结果。

表20-10 喷水的设计照度

周围状况		喷水端部的照度 (lx)
亮	时	100~200
暗	时	50~100

表20-11 喷水高度和灯的大小

灯 水高度	反射型投光灯[W]					汞灯 (W)		金属卤化物 灯[W]
	100	150	200	300	500	300	400	400
1.5m	■							
2	■	■						
3	■	■	■					
4		■	■	■				
5			■	■	■			
6				■	■	■		
7					■	■	■	
8						■	■	
9							■	■
10								■
10以上								■

(3) 色彩照明 进行色彩照明时最多使用红、蓝、黄三原色，其次使用绿色。色彩由于它的滤色片的透射系数而使光束变化成为各种各样。

表 20-12 是为了发挥同等效果以黄色为标准表示的需要的电功率比。

表20-12 灯泡的光色和灯的电功率比

光 色	电 功 率 比
黄	1.0
红	2.0
绿	3.0
蓝	10.0

(4) 光源 光源有如表 20-13 所示的类型，但最多使用白炽灯泡。这是由于特别在开关灯和调光时只由电源的操作就容易进行的缘故。但是当喷水高而常常预先开关时，可以使用汞灯、金属卤化物灯等。

表20-13 喷水照明用光源

光 源 种 类		适用的照明器
喷水专用	反射型投光灯 (包括室外用颜色)	灯光露明
一般照 明 用	反射型投光灯 (包括颜色) 防护式柱形灯 卤灯 投光器用灯泡 汞灯 (包括反射型) 金属卤化物灯	密闭型

表 20-14 表示光源的特征。

(5) 照明器 从外观、构造来分类，可以分为灯在水中露明的简易型水下照明器 (图 20-18) 和密闭型水下照明器 (图 20-19)。至于使用，则必须遵守电气设备技术标准。

表20-14 光源的特征

灯的种类	大小(W)	特 征
白 炽 灯	100~300	易于变换颜色、开关、调光。
汞 灯	200~400	不适于色彩照明，不能开关、调光，光束大
金属卤化物灯	400	变换颜色稍微困难，不能开关、调光，光束大

(a) 简易型照明器 灯在水中露明，灯的颈部电线进口部分备有防水机构，使用的灯泡限定为反射型灯泡，而且设置地点也只限于人们不进入的场所。其特征是小型灯具，安装工程容易。

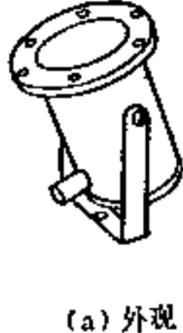
(b) 密闭型照明器 在这种照明器中有各种光源的类型，而每种照明器限定了所使用的灯。例如，有防护式柱形灯、反射型灯、汞灯、金属卤化物灯等光源的照明器。

如果使用指定的光源和瓦数以外的类型，就会发生前面玻璃破坏等事故，因而绝对不许使用。

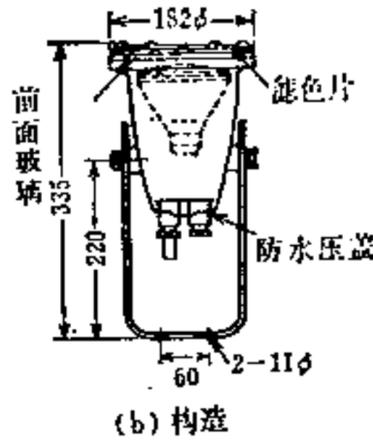
当进行色彩照明时，在滤色片的安装方法上有固定在前面玻璃处的和可变换的 (图 20-20) (滤色片旋转起来，由一盏灯而使光色自动地依次变化)。一般来说，可用固定滤色



图20-18 简易型照明器



(a) 外观



(b) 构造

图20-19 密封型照明器

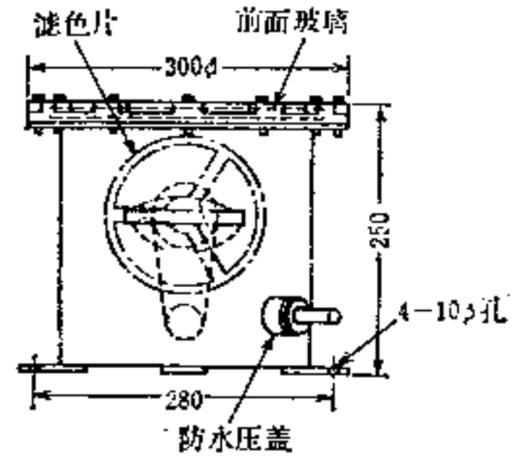


图20-20 调光型照明器

片的方式。

(6) 调光方式 在使喷水的形态、色彩、声音变化的方式上使用了种种方法，如果进行分类，就如表 20-15 所示。

表20-15

调光方式的分类

一定程序的方式	— 转筒方式
	— 凸轮方式
	— 针孔方式
	— 磁带方式
任意程序的方式	— 自动式…按照频率使音乐、声音等外部声变化进行控制的方式
	— 手动式…人们利用键盘等演奏喷水、色彩、声音的方式

(a) 转筒方式 将装在转筒内的段编成程序，由微动开关使喷水的形态、照明等变化的方式。

(b) 凸轮方式 在旋转轴上将凸轮编成程序使其变化的方式。

(c) 针孔方式 在水泵电路、照明电路和时间设定电路的交点上用穿孔板调节喷水时间或开灯时间，由波段开关或电子控制来运行的方式。

(d) 磁带方式 在磁带上预先记录下来一定的程序，由于放磁带而使喷水、色彩变化的方式。

(e) 自动式 在磁带上将外部的音乐、声音等一起录音下来，并将它们按一定的频率分类，由于声调的高低而使色彩、喷水变化的方式。

(f) 手动式 配合音乐敲打键盘，使喷水的形态和色彩等变化。

(7) 有关喷水照明的法规

① 规定有关电气设备技术标准的省令第 247 条 池用水下照明灯等设施。

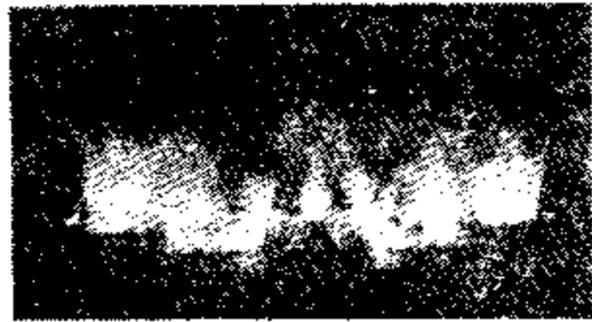


图20-21 音乐喷水

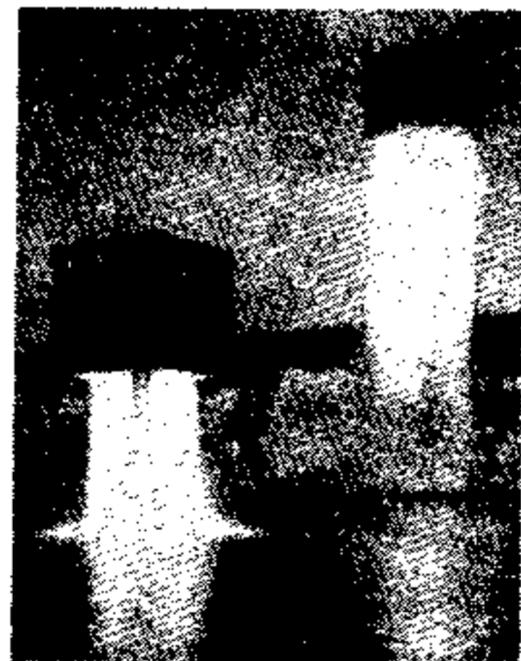


图20-22 大阪国际展览会的大喷水



图20-23 商业中心的喷水

② 规定有关电气设备技术标准细则的告示第41条 水下照明灯的容器标准

③ 根据设置地点在设施上的限制的比较设施上的限制在表20-16中说明。

(8) 设施举例 最近的设施在图20-21~图20-23中说明。

表20-16 根据设置地点在设施上的限制的比较

项 目	在 设 施 上 的 限 制	
	人们进入的场所 (例如水池)	人们不进入的场所 (例如喷水)
照明器	须符合告示第41条 (密闭型)	同左 (密闭型、简易型)
绝缘变压器	必需	
电压	一次方面在300V以下, 二次方面在150V以下	300V以下, 对地电压在150V以下
保护装置	二次电压超过30V而发生接地时设置自动遮断电路的装置	
配管·布线	二次方面的布线使用金属管2mm ² 以上多心氯丁橡胶头轮胎电缆	0.75mm ² 以上氯丁橡胶头轮胎电缆
接地工程	金属部分为特别第三种接地工程	照明器的金属部分为特别第三种接地工程

20-4 动植物的照明

20-4-1 植物的照明

(1) 照明方法 作为目标的植物由巨大的树木到花草、草皮, 范围很广。无论对哪一种目标, 用人工方法实现白昼的照明状态是不明智的。虽然应用一般照明从上面照射树木, 但是树叶里面也会黑暗, 不能得到希望的照明效果。树木的照明应用从下面照射的方法, 确定成为视场中心的树木, 使其具有周围照度数倍的照度, 就可以得到中心感。

在一般植物中需要50~100 lx左右的照度。由于室内的树木受到从地面而来的反射光, 因此也可以在其中心进行从上面的照明。对于花坛等以花的位置为中心进行照明, 要从低的位置看不到光源, 就可以得到希望的效果。

(2) 光源 透明汞灯、金属卤化物灯适用于绿色的树叶、草皮等。但是要看清楚树干、花瓣等的颜色可以使用白炽灯。栽培植物用灯可使植物的颜色具有特征, 显得美观, 如果直接出现光源, 就会产生色适应的偏差, 并不很好。

(3) 照明器 一般来说, 使用投光器, 但是确定配光和布置时要使光源的高亮度不致干扰观看的人们。对于花坛、草皮之类的低矮植物, 多半使用图20-24所示的只向下配光的照明器。在庭园中, 开花的树木各时不同, 因此往往采用可以移置的照明器。

20-4-2 动物的照明

(1) **照明方法** 作为目标的动物限于活动范围有限的鱼类或小鸟。观赏鱼的照明从水面上照射，从透明的侧面观看。这时整个水池成为观赏的目标，因而需要均匀的照度分布。为了防止在水池的上下产生大的照度差，所以使用较浅的水池。

(2) **光源** 在观赏用水池的照明中如果使用栽培植物用灯，就会促进水藻类的成长，鱼类显得美观。小鸟等在广泛范围内行动，要用荧光灯进行一般照明，并以栖息的树木或饲养场为中心用聚光灯照明。

(3) **照明器** 无论荧光灯、白炽灯，都要确定照明器的配光和布置，以使观者不致感到由光源而来的眩光。在图 20-25 中表示观赏茂叶植物的展示橱，在图 20-26 中表示观赏鱼类用水池的照明举例。

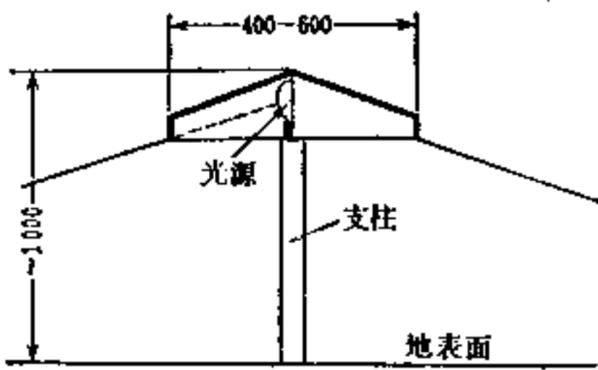


图20-24 草皮、花坛等的照明器举例



图20-25 由植物用荧光灯对观赏茂叶植物的照明举例

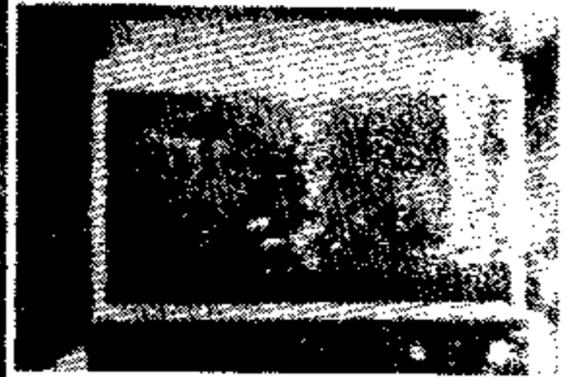


图20-26 观赏鱼类用水池的照明举例

20-5 探照灯

20-5-1 光源和照明器

在探照灯中有传统风格的碳弧灯型式和使用氙灯的新型式，但是现在几乎以后者为主，用作有夜间效果的宣传介质。

在6-4节中已经阐述了灯，而要利用它的特征之一的发光面积小而亮度高的优点。它和抛物线反射镜组合起来，使1/10的光束角度在 2° 以内，就会得到接近于平行光线的非常强烈的光束。

照明器大致分为向上照射的竖向型和横向照射的水平型。容量主要使用1千瓦、2千瓦、3.6千瓦、5千瓦。

20-5-2 光的射程

氙灯的探照灯照射夜空，是利用了它的光束。这样，空气中含有的一些尘埃要比澄清的夜空的效果大。设在市中心的探照灯要比郊外的效果大，就是这种缘故。

广告用探照灯利用空气中微粒的反射，它的到达距离受到周围的亮度等各种条件的影响。图 20-27 表示使用5千瓦

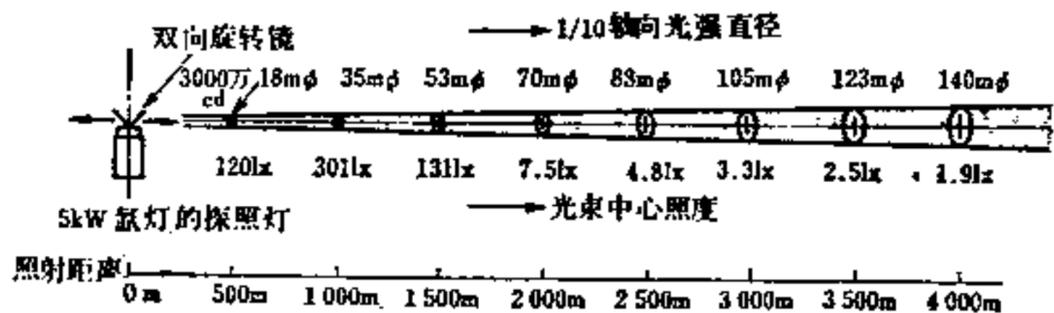


图20-27 5千瓦氙灯的双向型的射程（设备初始时）

氙灯的双向型探照灯的情况。

20-5-3 加以限制的法规

广告用探照灯不得随意设置。

在航空法（1952年7月15日法律第231号）第25条中载有“类似灯火的限制”。根据这项法律，在设置以前必须得到东京或大阪航空局长的批准。

20-5-4 设施举例

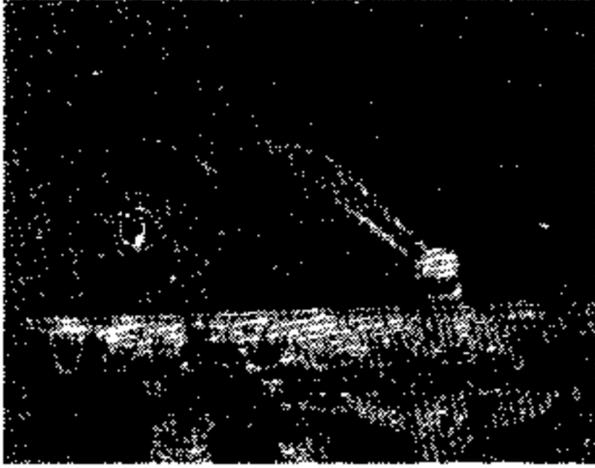


图20-28 大阪国际展览会的“太阳塔”3.6千瓦2部

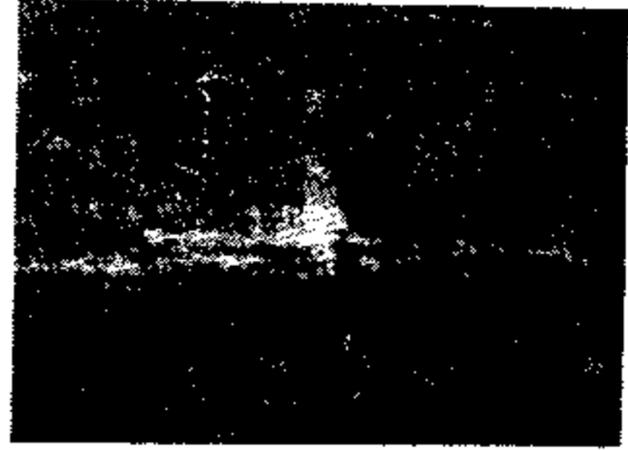


图20-29 冲绳海洋展览会（夜间全景）



图20-30 冲绳海洋展览会水都广场1千瓦2×4部

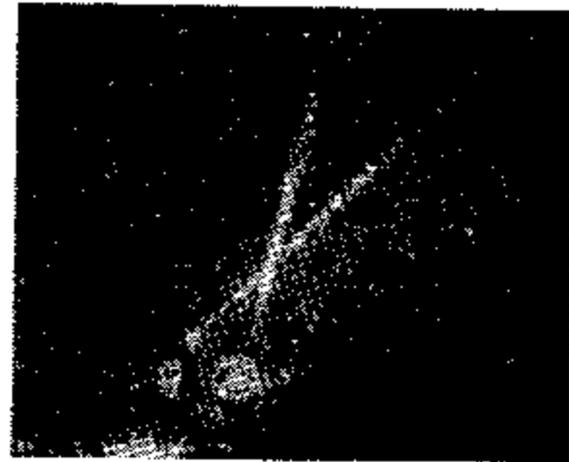


图20-31 玉川高岛屋百货公司2千瓦2部（水平型）

氙灯的探照灯在召开大会时可以说必须设置，用作这一会场的标志。

1970年以“人类的进步与和谐”为主题在大阪召开的日本国际展览会中曾设置在“太阳塔”上，是记忆犹新的（图20-28）。这是将两部3.6千瓦氙灯的探照灯设置在“太阳塔”表面的主题上，照射着象征性的塔。

1975年冲绳国际海洋展览会上，在水都广场的甲板四角各设两部1千瓦氙灯的探照灯，共计8部，南北门各设4部1千瓦氙灯的探照灯，共计16部，从而表演出来“光柱”（图20-29，图20-30）。此外，在东京世田谷的玉川高岛屋（百货公司）的屋顶上还可以看到作为商业上的宣传介体的例子。用两部2千瓦水平型氙灯的探照灯构成了从遥远处看去也是强烈的标

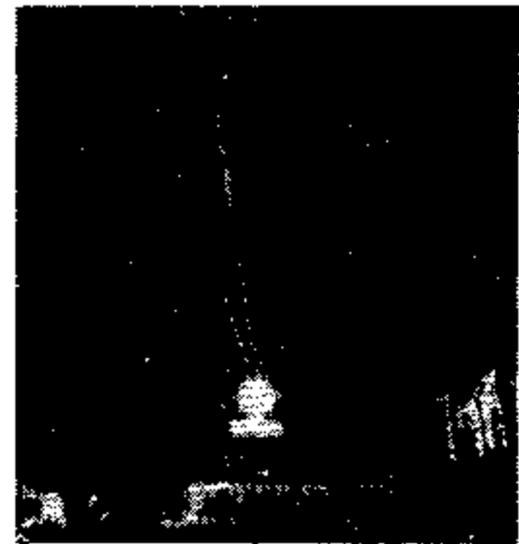


图20-32 上野百货公司2千瓦3部

志，有助于提高企业的形象。

在栃木县宇都宫市上野百货公司的屋顶上，用3部2千瓦整型氙灯的探照灯形成了鲜明的光线的印象（图20-32）。

20-6 水中照明

20-6-1 水中照明的对象

它分为以观赏景物为目的的和以视觉工作为目的的照明。在前者中有从空气中观看水中的情况的，如水中展望塔。在后者中包括直接在水中工作时的照明和为了电视摄像或摄影的视觉作业。

在空气中为了观看物体而实现必需的视觉条件的照明技术除了特别情况以外正在完成，将这些照明技术应用到水中照明的领域里去是最有效率的。在这种情况下空气中和水中的差别就是对光来说空气和水的特性有所不同。

20-6-2 光在水中的特性

它与空气中对于光的特性不同之处有以下几点：

(1) 水对于光的透射系数比空气的透射系数低，根据成为目标的水而有以百分之几到几十的变化。在水中照明的设计中必须考虑到光的衰减。

(2) 水对于光的波长表示出有选择的透射特性，一般来说，对于蓝色、绿色系统的光透射系数高，对于红色系统的光透射系数低。

(3) 当微生物生息或悬浊物存在于水中时，光发生散射，在视觉方面产生光晕现象。当气泡存在时也发生同样的散射现象。

图20-33表示各地的水每1米的透射系数的例子〔6〕。当光通过水中时，由于水而发生吸收或散射，每一方面都起着减弱光强的作用。这一关系由下式来表示：

$$I = I_0 e^{-\alpha t}$$

式中

- I —— 通过厚度为 t 的水后的光强；
- I_0 —— 通过水以前的光强；
- α —— 减弱系数 (m^{-1})；
- t —— 水的厚度 (m)。

减弱系数 α 在海水中为0.01~0.2，在沿岸水中为0.3~0.5，在水渠水中为0.1左右。在水中距照明器有一定距离的位置上的直射照度，比在空气中同一位置的照度，由于水的减弱作用而更加减少其衰减量。

20-6-3 水中的可见度

(1) 水中的视力〔7〕 蒲山根据观测实验结果提出了图20-34所示海水中的视力的倾向。在澄清的海水中沿铅直方向观看时有几米的识别界限，沿水平方向观看时则表示出更短的距离。

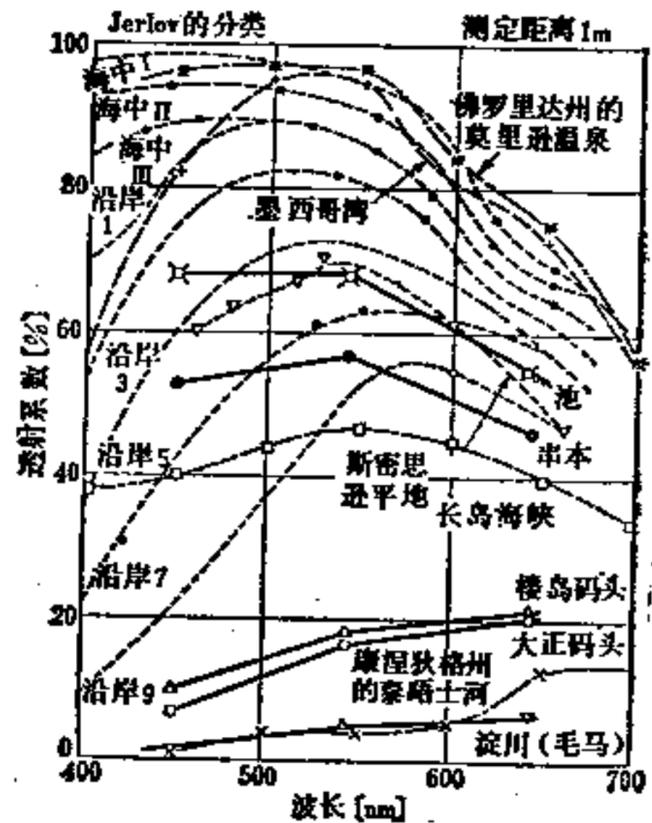


图20-33 各地的水的透射系数的例子

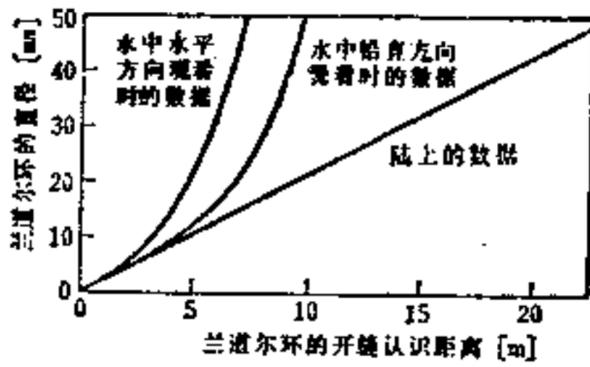


图20-34 在空气中和水中观看同一兰道尔环时识别距离和兰道尔环的大小的关系

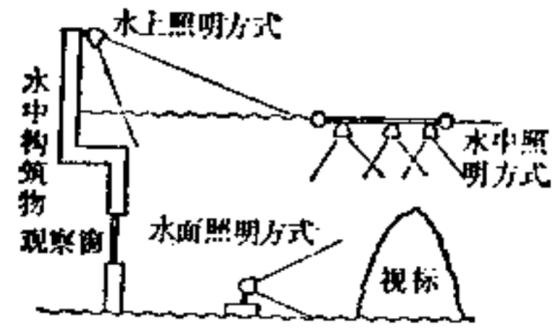


图20-35 各种水中照明方式

(2) 水中颜色的可见度和光源 根据养父等人的报告[8], 在空气中和水中观测用各种光源照明的比色图表中的颜色的可见度, 其结果如表20-17所示。水中照明用光源以金属卤化物灯、白炽灯为优越。又在水下的颜色中黄色、蓝色系统容易看出, 水下的视距也大。

20-6-4 水中照明方法

(1) 照明器的设置位置 按照照明器的设置划分水中照明的方法有图20-35中所示的三种方式。

表20-17 按照各种光源的比色图表的颜色的可见度 (水中和空气中)

颜色 \ 光源	自然光	透明汞灯	荧光汞灯	金属卤化物灯	高压钠灯	灯泡
白色系统	○ (△)	△ (○)	△ (△)	○ (○)	△ (△)	○ (○)
红色系统	× (○)	× (×)	× (×)	△ (△)	× (△)	△ (○)
橙色系统	△ (○)	△ (×)	△ (△)	○ (○)	△ (△)	○ (○)
黄色系统	○ (○)	○ (○)	△ (△)	○ (○)	○ (△)	○ (○)
绿色系统	○ (○)	△ (△)	△ (△)	○ (○)	△ (△)	○ (○)
蓝色系统	○ (○)	○ (△)	△ (△)	○ (○)	○ (○)	△ (○)
紫色系统	△ (○)	△ (○)	△ (○)	△ (△)	△ (△)	△ (○)

注: ()空气中颜色的可见度。
 ○60%以上的观测者回答良好。
 ×60%以上的观测者回答不好。
 △不可列入任何项内。

最多使用的是在水上的构筑物上安装照明器来照明的水上照明方式。这种方式可使水面具有比较均匀的照度分布, 但是根据所用照明器的配光特性会从周围看到光源, 或光源反映在水面上, 往往是对眼睛产生眩光的原因, 因此要加以注意。

水中照明方式是适于照明水中有限范围的方式, 最好在周围不出现光和不产生水面的反射。但是由于它设置在水中, 除了具有耐水性和抗蚀性以外, 还要具有抵抗波浪等外部机械冲击的强度。

水中设置方式的优点是设在水中需要的地方, 集中进行照明。特别是在观赏鱼等的饲养池的照明中要布置得使水中照明器的光照射到水中的岩石或水底, 从水面上看不到光源, 能够很好地看到观赏目标。

(2) 水中照明器应该具备的条件 图20-36所示为水中照明器的例子。无论水底固定式、照射方向可变式或一般水中照明器的哪一种，都要具有抗蚀性和耐水构造，又由于在水中设置时会受到波浪或风的机械冲击，因此必须具有抵抗它的强度。

至于电工布线，必须满足电气设备的有关技术规程或各种标准，同时在电路本身上具有机械强度。

在水中使用的照明器上有微生物附着或浮游物堆积等情况，所以也要能够易于清扫或检查表面。为此，最好使用电路的水中接续器（图20-37）。

(3) 水中照明方法〔9〕 在水中展望塔之类的以观赏水中景物为目的的照明中需要水色显得美观。为使水色显示出接近于记忆色的美丽颜色，采用金属卤化物灯或白炽灯作为光源。在海中亮度可以达到 $10\sim 20\text{cd}/\text{m}^2$ 左右。这时的垂直面照度相当于 $200\sim 400\text{lx}$ 。

在以观赏海中景物为目的的照明中，使海水具有适当的亮度，同时使相当于背景的岩石和水底等保持着超过海水亮度的明亮度，便可以得到希望的照明效果。

考虑到以视觉工作为目的的照明时，在水中需要的视觉条件是 and 空气中的视觉条件相同的。由于水下工作几乎都是潜水工等的工作，光源照明方式都重视容易携带和处理。要用以蓄电池为电源的低电压光源作为光源。

水中电视摄影机的摄影用照明〔10〕，采用符合于所用电视摄影机的光谱灵敏度的光源，是有效率的。因为彩色电视用摄影机和黑白电视用摄影机光谱灵敏度会不相同。一般使用金属卤化物灯、白炽灯、氙灯等。在电视摄影的情况下必须从空气中引导电路，因而可以使用容量较大的光源。

水中摄影用照明〔7〕和电视摄影用摄影机一样，根据所用胶卷的光谱灵敏度而变化需要的照明条件。在摄影时不能像电视摄影那样按照电路调整色调，因此通常使用接近于白色的光源。

光源主要采用氙灯、白炽灯等。电源也有从空气中由电路供电的情况，但在多数情况下以蓄电池为电源。照明器可以使用配光具有满足摄影机视角范围的。

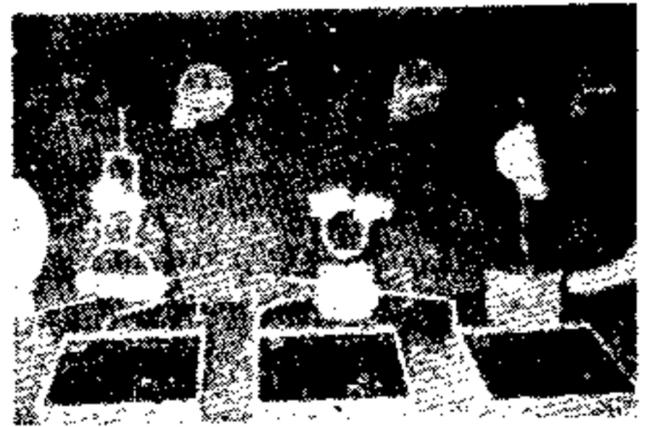


图20-36 水中照明器举例

左：水底固定式照明器
中：照射方向可变式照明器
右：水中照明器（水面、水中两用）



图20-37 电路的水中接续器示例

20-7 服务站照明

20-7-1 加油站的照明

加油站按照加油方式大致分为两类。一类称做岛式，另一类为不占空间式，乃是由顶棚加油的方式。当进行服务站的照明设计时，必要的事项如下：

(1) 要向司机了解有多少系列的加油站（一般要采用悬挂招牌的内照式或外照式标

志)。

(2) 从周围道路观看时, 为使设备显得突出, 要提高照度(参看表20-18)。

表20-18 推荐照度

名称	照度标准 (lx)		适用灯具	备注
	市区	市外		
服务间	300	300	荧光灯、白炽灯	
营业间	500	300	荧光灯	
用品库	50	50	白炽灯	
杂品库	50	50	白炽灯	增加安全防爆型
办公室	300	300	荧光灯	附带灯罩
加压室	70	70	白炽灯	
厕所	50	50	荧光灯、白炽灯	
开水间	70	70	荧光灯	防湿型
淋浴室	100	100	荧光灯、白炽灯	防湿型
地面 { 计量器周围 其它	300	250	汞灯	公路型
	200	150	金属卤化物灯, 高压钠灯	下射型、吸顶型(挑棚用) 300~400W

(3) 要充分考虑建筑物、广告等的装修材料和配色来选择有效果的光色(光源)。

(4) 为使顾客不致受到不舒适眩光, 要充分注意照明器的配光、设置场所和照射方向。

(5) 在不占空间式的情况下, 计量表大多悬挂在墙面的顶棚附近, 因此要从司机的位置能够很好地看到。

(6) 还要注意到适合于顶棚材料的照明器。

20-7-2 液化石油气站的照明

因为出租汽车等车辆差不多都在汽车里采用了液化石油气, 所以不需要唤起一般人注意的照明, 但是液化石油气和石油相比, 爆发性非常高, 因此必须设置特别考虑防爆的照明器。

照明器、布线部件、分电盘等当然要使用增加安全防爆型器具, 但也必须尽量避免设置在贮存液化石油气的场所。

20-7-3 照度和设施举例

在表20-18中已提出现在加油站中有代表性的照度的例子。又在图20-38中揭示出岛式加油站, 图20-39中不占空间式加油站、图20-40中液化石油气站等设施的代表性的例子。

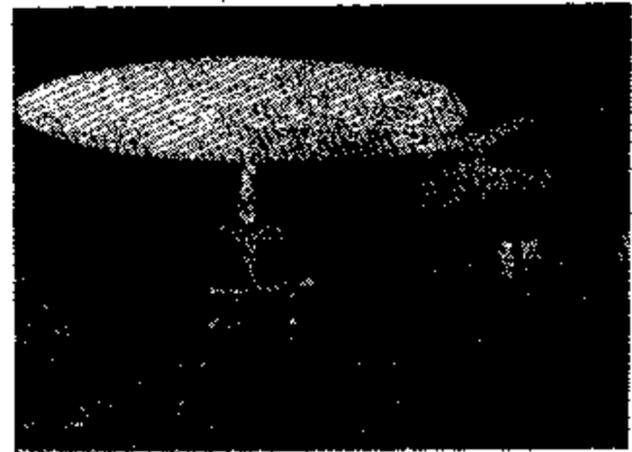


图20-38 岛式加油站



图20-39 不占空间式加油站



图20-40 液化石油气站

20-8 室外变电站照明

变电站为了防止外部人员进入、损伤变电设备，在周围设置了铁丝网或围墙。因为它是高压常时通电的场所，所以多数明确地标出“高压危险”、“禁止进入变电设备”，但是为使夜间明瞭它的存在，禁止外部人员进入，同时安全而正确地进行监视和操作，就需要适当的照明设备。

照明设备必须做得能够快速确实而且无危险地检查高压母线、绝缘子、机器等。注意之点如下：

- (1) 在站内进行一般照明。
- (2) 在维修、检查或换灯等方面要在高压而无危险处设置照明器。
- (3) 要注意照明机器的支架的高度。
- (4) 要选择耐久性良好的器具、杆类。

20-8-1 照度的选取

检查工作需要的照度由于机器、装置等而不相同，但是垂直面照度是非常重要的。这一照度容易受到周围遮挡物或反射物的影响，因此必须充分注意。表20-19是发、变电站的设计推荐照度。此外，通道照明需要的水平面照度为15~30lx。

表20-19 发变电站的设备推荐照度

类别	场所	照度(lx)
室外	变压器、母线、开关装置周围	15~30
	机器记录的局部照明	30~70
	站内	3~7
	贮煤场	7~15

20-8-2 照明方法

在站内用作一般照明和用在空间较低位置需要垂直面照度的地方，采用柱头型照明器是便利的。对于特殊地点的局部照明，反射型灯或反射型高压放电灯显得轻便，因而安装在钢结构等上应用。投光器最适用于变压器、母线、机器类的一般照明。

站内照明主要使用的柱头型照明器，下向光通量固然可以利用，上向光通量也可以利用，因此要掌握框架的构成和周围的状况用低杆（3~5米）适当地布置。

投光器的安装、设置地点希望尽可能在各项设备的外侧。在桅杆式照明柱上安装投光器群是可取的。最近由于大型变电站的建设而致母线的位置很高，多数情况是可在框架的钢材上安装投光器。

无论哪一种情况，选择设置地点都必须充分考虑建设、维修、管理上的供电。考虑到维修、管理业务，在低杆上要设置梯子，其它情况则要设置升降用舷梯，使用的机器和附属装备柱等都必须按照富于耐久性的来设计。

图20-41中所示的照明柱，其维修检查用的架子不用螺栓，而做成移动式的杆并能在地上工作的构造。

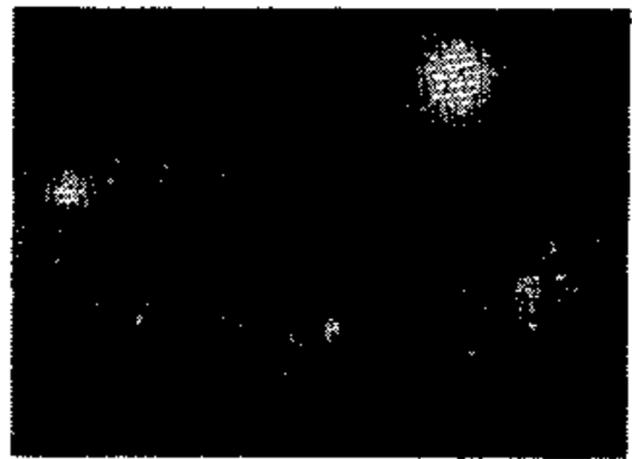


图20-41 室外变电站的照明

20-9 施工工地照明

施工工地的照明，随着技术革新和经济竞争的激化而缩短工期，由维修、检查、防止灾害的基本照明发展成为需要夜间工作的生产性照明。

生产性照明固然要防止工人的劳动事故，还要重视力求工作环境的明快，减少精神疲劳，在质量及数量方面提高工作效率。

注意之点如下：

- (1) 照明要充分达到工作的目的。
- (2) 照明要能够充分掌握住周围环境。
- (3) 视觉工作的环境必须舒适。
- (4) 照明对维修、检查要具有足够的明亮度。
- (5) 照明要具有经济性。
- (6) 在特别危险的地方要安装警戒标志灯。
- (7) 在寒冷地区进行设施时要在充分探讨周围环境的基础上选择照明器件。

20-9-1 照度的选取

工地的工人常在高空危险的地方。照明不可使他们在夜间进行工作时抱着不安全的感。另一方面，还必须对视觉工作供给足够的明亮度。换句话说，照明必须对于工人增加安全感，减少精神疲劳，促使动作灵活，力求环境明快，而且可见度良好。

在劳动安全卫生规程中规定了工人平常工作地点的工作面照度的标准（表20-20）。

此外，还要遵守明暗对比不要显著而且不产生眩光的方法。对于照明设备有义务在每六个月以内定期检查一次。

表20-21是施工工地的推荐照度。照度值是包括局部照明的照度。一般照明的照度最好在局部照明的照度的1/10以上。

20-9-2 堤坝工地照明

这类工地是异常大型的，它的周围环境和一般工地不同。

首先必须考虑安装道路照明（与第23章“道路照明”相同）。照顾到维修的照度，可以获得5 lx左右，但是要控制住车辆、行人等时，便需要10 lx左右的照度。其次要考虑主要工作地点所在的凹地的照明。

堤坝工程的工作面随着工程的进展会改变结构物的标高，因此必须一并采用一般照明和局部照明。

表20-20 劳动安全卫生规程

作业划分	照度 (lx)
精密作业	300
普通作业	150
粗糙作业	70

表20-21 施工工地照明的推荐照度

工程内容	推荐照度 (lx)	
(1)	暂设工程	50
	打桩工程	50
(2)	土方工程	50
	混凝土工程	150
	钢结构工程	300
	地面工程	150
	墙体工程	150
	内部装修工程	300
	外部装修工程	300
	杂项工程	50
(3)	装卸物堆放场	30
	材料堆放场	20
	通道	30

从侧面利用投光器的照明和从两岸间拉线而在其上悬挂投光器的照明一并使用后,就可以得到需要的照度。

把侧面的投光器设在容易维修管理的地方,根据工作的进展情况改变照射角度等,是经济的。

拉线悬挂的投光器的布置,考虑到它和受照面的距离和工作内容,最好能够灵活地缩小或加宽间距。

图20-42是在拉线上安装1千瓦汞灯投光器照明四地的例子。

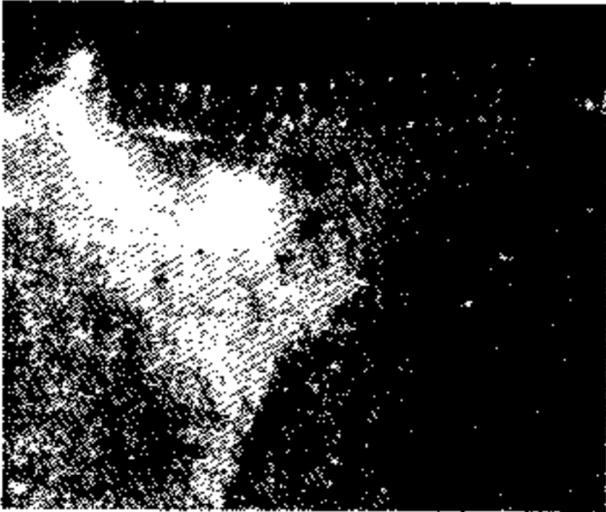


图20-42 堤坝施工工地的照明
(1000W汞灯投光器)

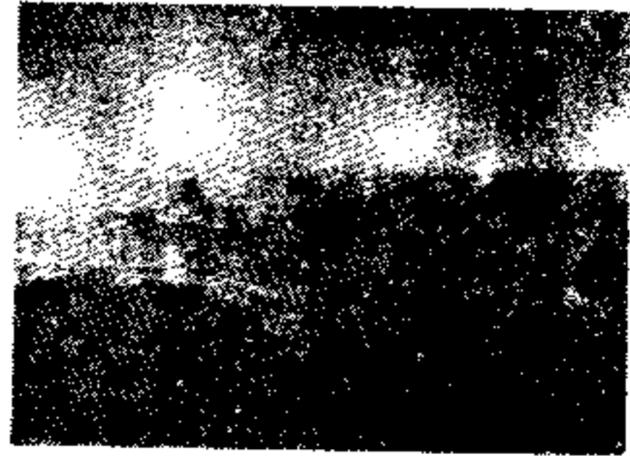


图20-43 建筑施工工地的照明

20-9-3 建筑工地照明

建筑工地的结构物建在地面上一定的高度上。工地上一部分有变化时,照明的基本目的在于调节视觉工作。建筑物本身的照明由安装在侧面高杆上的投光器进行。

真正的夜间工作照明也可以考虑在起重机上安装投光器。这项投光器必须安装得能从操作台上远望整个工地。还要注意不要使监工或施工人员受到眩光,同时要使受照物体出现阴影,以便能够容易识别。

要注意这些照明器漏光到工程范围以外的地方,而不使附近的行人或通行车辆受到眩光。还要明确表示照明器及其它电机等的布线所用的露明电线或电缆的存在,以防止发生触电事故。

随着工程的进展和计划变更,工地上常常会有移动、移设、变更的情况,因此容易使照明设备受到损伤。又由于认为它是暂设照明或暂时照明,就容易把危险状态放置下来。因此必须使电气设备永远保持安全状态,而要充分维修、检查,并保持维修、检查所需要的足够的照度。

又在内部需要暂时的局部照明之处大多使用以反射型灯泡或反射型放电灯为光源的反射型灯泡用器具(通常用灯座)。施工用反射型灯泡用器具由建筑业劳动灾害防止协会制定标准,因此要选择适用制品来使用。

参 考 文 献

- | | |
|---|--|
| (1) 照明学会: 照明データブック, オーム社(昭43年) | (6) 森田政明ほか: National. tech. Rep., 20, 3 (1974) |
| (2) J.E. Kauffman: IES Lighting Hand Book, 25-1, 26-1, 5th ed. (1972) | (7) 蒲山久夫: 照学誌, 58, 12 (昭49) |
| (3) Son et Lumière at the Red Fort Delhi: Internat. Lighting Rev., 17, 1 (1966) | (8) 養父康男, 他: 電設工業, 21, 12 (昭49) |
| (4) J.W. Harford: J. SMPTE, 78 (1969) | (9) 小堀富次雄: 照学誌, 58, 1 (昭49) |
| (5) 池原謙一郎: ランドスケープ, 18, 1 (1976) | (10) 片多令吉, 他: テレビ誌, 10, 9 (1956) |

第 21 章

体 育 照 明

21-1 体育照明的主要条件

体育照明所需要的第一个条件是要满足运动员的视觉要求。在有观众席设施的场所，必须考虑在进行比赛时观众便于出入和使运动员具有良好的视感。此外，考虑电视摄影也是很必要的。

21-1-1 照度要求

在比赛场上，为在瞬间能够正确看到运动员及其活动对象（如球等），要有充足的照度，并且在对象与对象的背景之间应有适当的反差。

关于比赛场，包括室外各种体育运动的推荐照度，是根据 JIS Z 9110（参照 10-4 节“照度标准”）规定的。这里不仅要注意运动场的空间照明，而且垂直照度也是重要的因素。

21-1-2 光色和显色性

在照明设施中，由于所用光源的光色不同，所得出的照明效果就不同。因此在进行设计时，必须从照度以外的照明质量方面，对光源的特性进行研究（参照第 6 章）。

另一方面，当显色评价指数的数值较小时，外观不良。然而，按照体育种类的需要，有效地利用光源特性是重要的。例如，高尔夫球场照明，在采用汞灯时，平均显色评价指数虽小，却使绿色的草坪显得生气勃勃。这样探讨照明设施中所希望的气氛条件以及其中的色彩条件，采用适当的光源是重要的。

21-1-3 眩光

尽量防止眩光对运动员和观众所造成的障碍，是要考虑的问题。眩光现象可分为以下两种情况，要分别采取减轻措施。

（1）光源眩光 如表 21-1 所示，产生眩光的基本因素有四项，如把这四项因素消除了，就有利于防止眩光。

（2）反射眩光 如有光泽的地板面和乒乓球台那些地方，因窗或光源的反射而出现光斑。这就成为反射眩光的原因，而难于看清对象。单靠照明解决是困难的，所以要考虑被照射的物体的饰面。例如，在窗上挂窗帘或设置百页窗，地板采用无光泽的材料也是一种办法。

21-1-4 频闪光

在体育中有比赛对象（棒球、网球等）以高速移动的项目。在这样的体育项目中由交流电（50 或 60Hz）点燃的放电灯照明会发生频闪光现象，由于对象物表面受到闪光的影响而造成比赛时的障碍。为了防止这种现象，可采用以下方法。

（1）白炽灯与放电灯混合照明。在这种情况下，要用两种光源的不同光对被照面进行混合照明。

表21-1

直射眩光的减轻

眩光的条件	减轻的办法
 <p>周围是暗的,眼睛习惯于暗处,越看越眩目</p>	把比赛场周围,例如观众席等适当增加亮度
 <p>以视线为中心的30度的范围内形成眩光区,视线越接近,就越眩目</p>	把照明器提高或安装在视线上部空间的位置上
 <p>光源亮度及照明器的光强越大,就越眩目</p>	安装位置不要使高亮度或光强进入视线以内,或加以提高
 <p>如光源相同,则表观越大越眩目</p>	照明器距离越远,眩光程度越轻

(2) 只用放电灯照明时,如果电源是单相交流电,两支灯应采取无闪烁回路方式点燃;如果是三相交流电,则应把三支灯分别在各相上点燃。

(3) 用闪烁少的放电灯或白炽灯照明。

21-1-5 室内及室外设施的采光^[1]

为了在照明中节省能源,在白天要利用有效的自然光。

(1) 室内设施的采光 当室内设施采用自然光时,侧窗的位置就成了问题,如侧窗位于东西向,由于晴天时早晚日光直射,会给运动员和观众带来眩光。如将侧窗设置在南北向,就会使人感到满意。

对于仅用侧窗采光不够充分的设施,可由天窗采取自然光,为使阳光不致直射,就要在天窗上进行研究。

(2) 室外设施的光照问题 对有屋顶或其它构筑物的观众席以及没有遮蔽的比赛场,当太阳高度角低时,会使运动员和观众受到太阳的眩光。为了改善这种情况,把比赛场主轴设在南北方向是比较理想的。

此外,在比赛场地的东西向和南北向植树的方法,也可以减少一些眩光。

21-2 室内设施

室内设施的体育照明,通常采取一般照明方式。在照明设计时,要重视照明器的配光、安装间距、安装高度(比赛用的照明器高度受到限制)、光源种类和尺寸、照度及它的均匀性等,其次,按比赛项目要求,照明设计要特别考虑以下事项^[2]。

(1) 运动员(有时是观众)的视线或视野并不一定,在运动中顶棚或照明器等屡屡进入视野内。

(2) 注视球等对象的位置并不固定,并且多半注视地板或顶棚的中间部分。

(3) 运动员必须准确地判断对象的速度和轨迹。

21-2-1 照明计划

(1) 比赛分类 在室内进行的各项运动,大致分为两种。一种是主要利用空间的运动;一种是以利用低位置为主的运动。因此,在作各种照明计划时应注意不同的特点。

比赛分类和照明计划的注意点如表 21-2 所示。

表21-2 在室内进行的比赛项目分类

分 类	比 赛 对 象	照 明 的 注 意 点
主要利用空间的运动	羽毛球、篮球、手球、网球、排球、乒乓球、高尔夫球	为了减轻进入比赛者视野内的眩光,对光源(照明器)的位置和遮光上应充分注意。照明器的光强分布应使比赛场地空间的一般照明重叠,就可以达到垂直面的照度
主要利用低位置的运动	击剑、曲棍球、滑冰、游泳、拳击、摔跤、台球、柔道	光源(照明器)的眩光,对许多运动项目,虽然没有利用主要空间的要求,但须注意反射眩光。拳击、摔跤、台球、柔道等项目,应不受光源辐射热的影响

室内设施的情况同室外设施相比,很少只用专用设备进行特定的比赛,多数情况要求能够进行多种比赛。如在学校体育馆、一般综合性体育馆中,主要利用空间的有羽毛球、排球、乒乓球,而主要利用低位置的不仅有摔跤、体操等,且可用作文娱活动和集会会场。

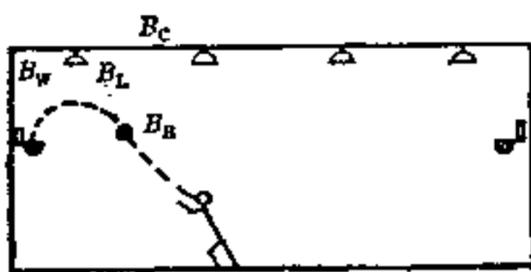
这种多功能性的体育馆,必须设置调光装置和点灭回路来变换照明方式和照度,以达到其使用目的。

(2) 照明的要点

(a) 室内装修 为使室内顶棚、墙面等与对象得到适当的对比,应考虑室内饰面材料的反射率和色彩。一般来说,为了防止反射眩光和提高照明效率,要采用无光泽的反射率高的饰面。

(b) 减轻眩光 要减轻光源(照明器)的直接眩光,或墙面、地面和设在室内的机器、用具等所产生的反射眩光。特别为了减轻光源的直射眩光,应在照明器上装设格栅,采用间接或半间接照明方式。

室内设施亮度比的推荐范围如图 21-1 所示。



对 象 的 亮 度	亮 度 比 的 范 围
$B_L : B_c$	20:1
$B_w : B_r$	3:1
全视野 $B_{max} : B_{min}$	30:1

图21-1 亮度比的范围(推荐)

(c) 照度标准^[3] 所需照度如 JIS Z 9110-1976 中所示。主要为水平面照度,但垂直面照度也很重要,应对两方面的照度进行研究,并且要求照度有均匀性。

建议水平面和垂直面的照度比在 $E_v : E_h = 1:2$ 以下,水平面照度的均匀性在 $E_{max} : E_{min} = 1.5:1$ 以下。

(d) 光源的种类和尺寸 在顶棚高的室内比赛场地上所用光源,宜采用高效率、长寿命、大光通量的荧光汞灯、金属卤化物灯或高压钠灯。

对于顶棚较低规模较小的比赛场地则宜采用荧光灯、白炽灯（包括卤钨灯）等。如将这些光源混光使用能够取得好的效果。

由于混光照明而取得的效果列举如下：

- (1) 所要求的显色性能得到控制；
- (2) 所要求的光色（色温）能得到控制；
- (3) 能控制光源的综合效率（lm/W）。
- (4) 同白炽灯混光时，在停电之际可作为安全照明。

对混光照明需要特别注意的是，为使地板和室内空间部分都能得到充分的混光，应研究照明器的布置和配光。实际上把光源装在同一灯具内进行混光是恰当的。

在图 21-2 和图 21-3 中给出混光比和各种量的变化的一例。

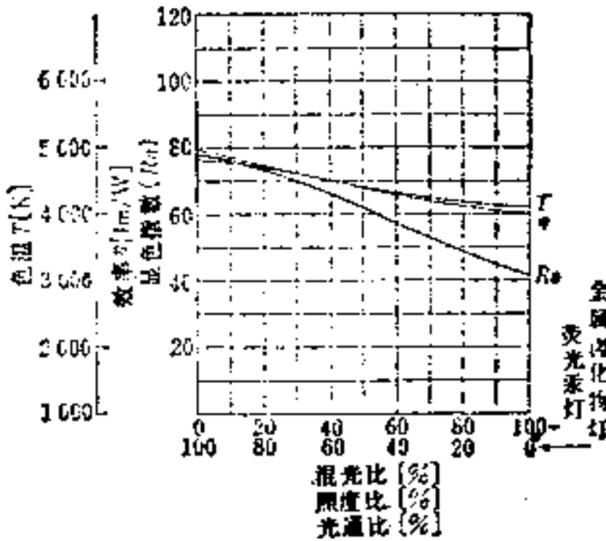


图21-2 通过荧光汞灯和金属卤化物灯的混光，各种量的变化

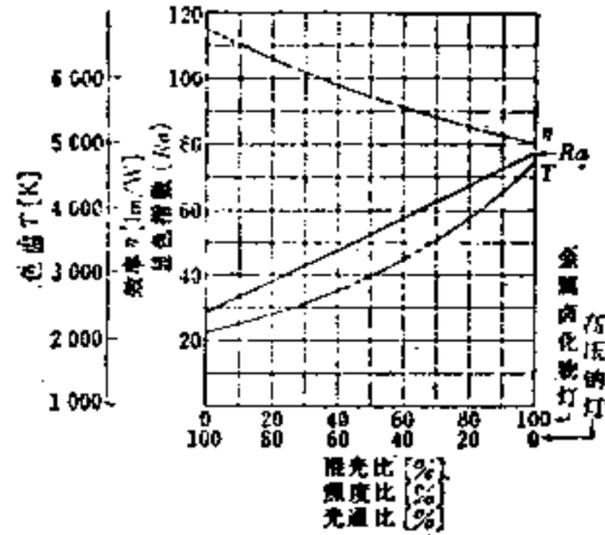


图21-3 通过高压钠灯和金属卤化物灯的混光，各种量的变化

此外，关于适合彩色电视摄像的显色性和色温等，在 21-4 节阐述。

(e) 照明器的配光和安装间距 如图 21-4 所示，对特别需要利用空间的运动项目，不仅往往难以看到对象，而且容易引起不愉快的明暗闪烁。因此，需要注意照明器的配光和安装间距。

(f) 阴影 使对象或运动员有适当的阴影和立体感效果，以便取得距离感，这对于可见度也是有益的。最有效效果的阴影，是水平面照度与垂直面照度之比，应在 $E_h : E_v = 1:2 \sim 4$ 的范围之内。通过采用反射罩可以大致得到上述比例范围。因此，在需要特别强调时，如图 21-5 所示，从两个侧面进行照明，是有效果的。

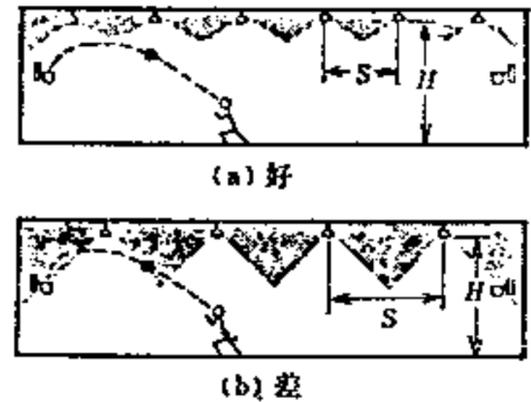


图21-4 照明器的配光和安装间距

(g) 照明计算 一般照明的照明计算可参照第 9 章。不仅通过光通法，还可根据逐点法研究照度分布或光通发散度分布。

21-2-2 照明设计〔2〕~〔5〕

(1) 羽毛球 因为羽毛球是利用空间具有代表性的运动，所以顶棚的最低高度需要 7.5~12.5 m。为了使穿梭的白色球与背景有良好的对比，室内的装修颜色是重要的。一般墙面和顶棚希望采用茶色或绿色，地板则用反射率低的黑色装修，较有效果。

使用的光源或灯具，可根据场地的规模、性能和比赛情况适当选择，而作为照明方法则

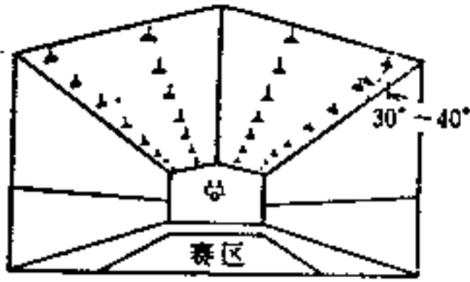


图21-5 提高立体感效果的灯具布置方案

- (1) 平行于进深方向排列灯具;
- (2) 使两侧灯具倾斜于内侧或有倾斜配光;
- (3) 带格栅灯具

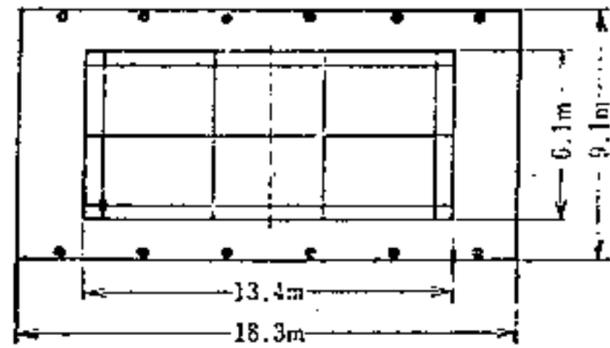


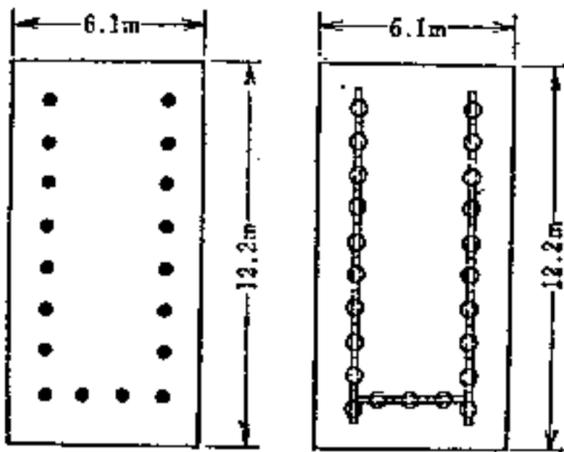
图21-6 羽毛球灯具配置图

如图 21-6 所示。

利用室内侧墙进行侧面照明或间接照明是一种好的方法。又根据设在顶棚上的灯具在一般照明下进行比赛时,可从球网两侧较高的位置增加辅助投光照明,而在任何情况下灯具应装有挡光格栅,以防止眩光。

(2) 橡皮球 顶棚和墙面的饰面应采用无光泽的反射率为75~80%的白色涂料。选用宽配光嵌入顶棚里的灯具是理想的。灯具的出光口应装设隔片,以防球的冲击。

图 21-7 是灯具布置实例,图 21-8 表示橡皮球场地设施。



(a) 白炽灯和汞灯 (b) 荧光灯

图21-7 橡皮球球场的灯具布置



图21-8 橡皮球球场的照明 (福州市)

(3) 篮球 篮球场的顶棚最低高度为6.7m,球场边界线距离墙壁应为3m以上,一般采用金属卤化物灯或荧光汞灯等直接照明。

由于运动员本身必须用视觉掌握住球和其它运动员的快速动作,因此要求有良好的空间照度和照度的均匀性。为了达到上述要求,就要尽量增多灯数并均匀排列。还希望在灯具上装设格栅,以防球的冲击。

在采取荧光灯照明的情况下,应附加格栅或棱式球型灯罩的半间接照明。

图 21-9 为灯具布置实例。

(4) 拳击、摔跤 为了保证观众从较远距离能清晰地观看运动员或与比赛有关人员的比赛动作,就需要足够的亮度。因此,在确定照度标准和灯具的布置时,要考虑到设施的性质和规模的大小,灯具的最低安装高度要在5m以上。

灯具的布置如图 21-10 所示。

另外,为满足比赛时彩色电视摄影的要求,要采用显色性好的光源。

(5) 游泳 室内游泳池照明,要考虑到水面、池底和四周等部分。水中照明所需要的

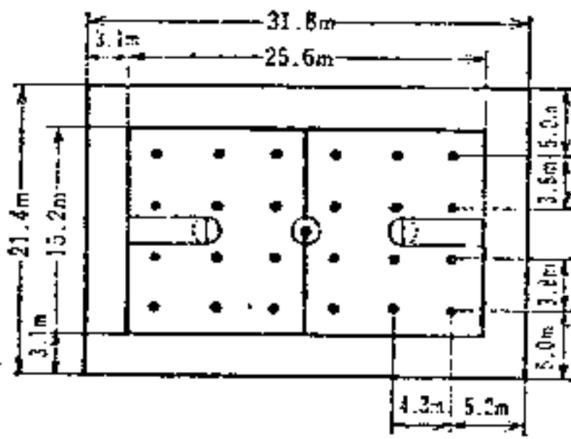


图21-9 篮球场的灯具布置示例

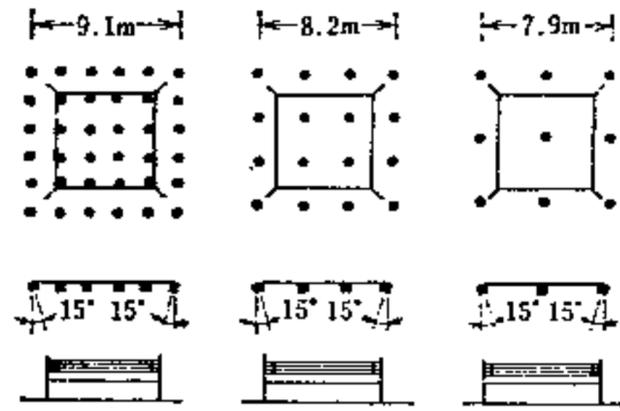


图21-10 拳击的灯具布置示例

光通量，在游泳池面积范围内应达到 $1000lm/m^2$ 以上。灯具装在池壁上，但不应设在容易触及的行道上。又如图 21-11 所示，在更换灯泡时，不需抽水就能工作。而且还要考虑到安装方法和配线长度问题。

在顶棚装有照明的情况下，应注意在水面上不应反映出光源。又在灯具上应装有隔片。这时灯的最低安装高度应在 6 m 以上。从有利于更换灯泡、便于维修管理来讲，希望把灯安装在水池的周边之上。如采用电动式装置而能移动灯具，将是一种有效的方法。图 21-12 所示为灯具布置情况。

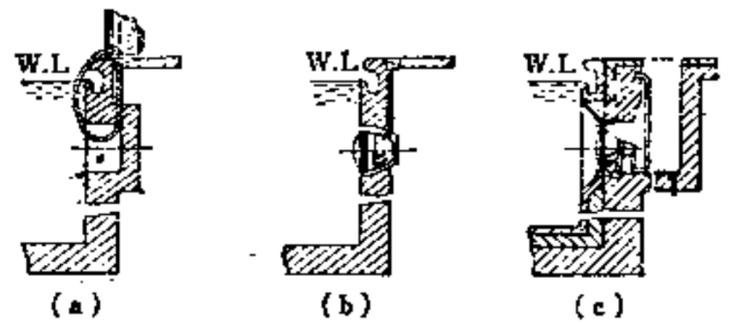


图21-11 水中照明灯具的安装方法

(6) 冰球 关于室内冰球场的照明，灯具的安装位置和灯具的选择是非常重要的。不仅要防止灯具的直接眩光，而且还要防止由于冰面的反射眩光而降低外观形象的要求。同时，还要注意避免由于球网和网架造成的阴影。

对规模大的溜冰场地，应将狭角配光型的投光灯设在距最后一排观众席更远的场地上。而在规模小的溜冰场地，则可采用荧光灯的半间接照明方式布置。

用荧光灯布置的灯具如图 21-13 所示。

(7) 网球 室内网球场的内部装修，应将顶棚和上部墙面做成反射率为80~85%的明快颜色且无光泽的表面；而地板则采用有光泽的反射率为15~30%的地板材料比较理想。

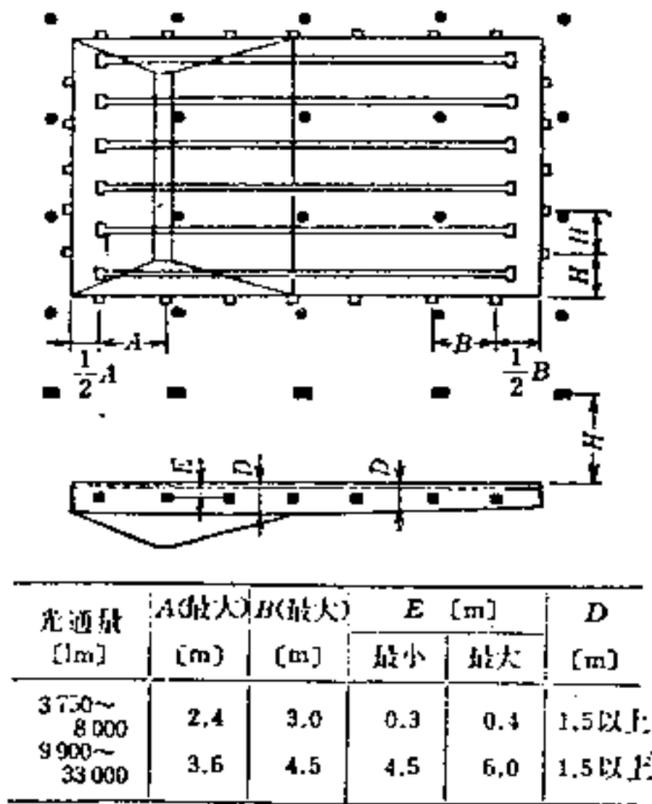


图21-12 室内游泳池灯具布置

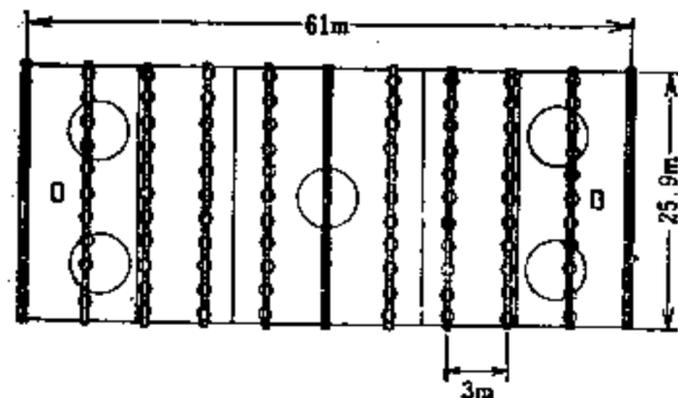


图21-13 冰球场的灯具布置

低于 2.5 m 高的墙面部分, 宜采用无光泽的灰色, 其最大反射率应小于 60%。

对照明要求应能看清的对象不仅有球, 而且还有对手、球网和场线等。在一般情况下, 室内体育场要比室外体育场要求的照明值要高。

灯具的最低安装高度应在 7 m 以上, 为使运动员不受眩光的干扰, 应在灯具上附加格栅或挡板, 以及考虑其它挡光方法。

挡光角度以 45° 为理想, 图 21-14 为灯具布置图, 图 21-15 为灯具设在球场两侧上方通过间接照明或效果良好的一般照明。

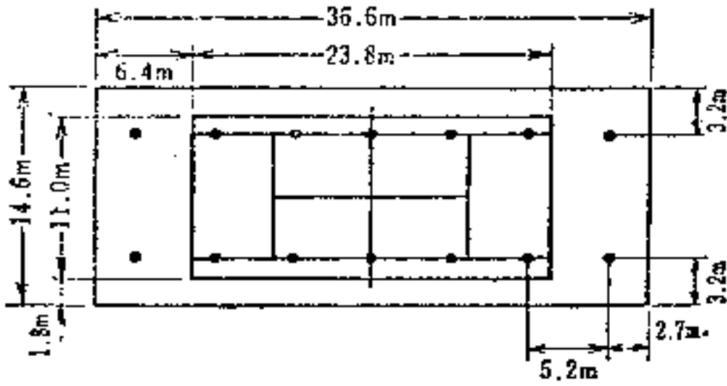


图21-14 网球场的灯具布置

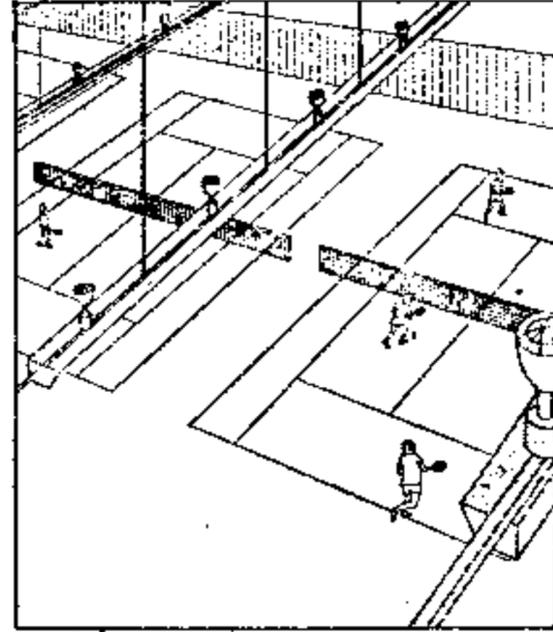


图21-15 网球场的间接照明

(8) 滚球 这是利用低空间位置进行比赛的典型代表。作为照明部分主要有引桥、通道和球型滚座三部分。

引桥应体现出现代化一般照明的气氛, 为了避免运动员有眩光感觉, 应考虑到利用顶棚结构把光源遮挡起来。在轨道上面的顶棚要做成反射率为 70~85% 明快的颜色, 且无光泽的表面。

为了能得到引桥通道方向上的垂直面照度, 可采用反射型白炽灯投光照明。灯具布置见图 21-16。

(9) 射箭、手枪、步枪射靶场 这类比赛的照明处理手法是相同的, 即在视标上最好采用投光照明, 以便获得足够的垂直面照度。

照明器的布置如图 21-17 所示。

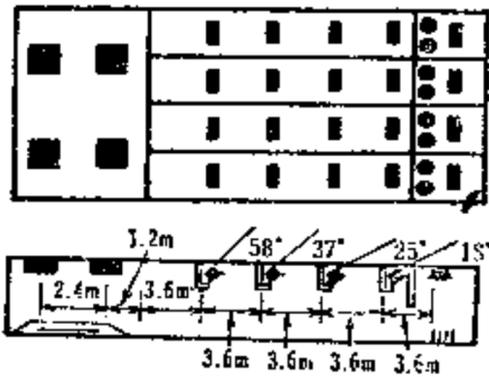


图21-16 滚球场的灯具布置

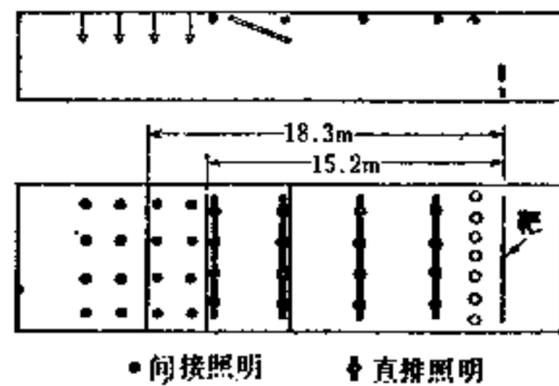


图21-17 射箭、手枪、步枪射靶场灯具布置示例

(10) 乒乓球 为了准确掌握住快速运动的球, 灯具的布置不仅要顾及到球台上的照明, 而且台的四周也要十分明亮。

图 21-18 为灯具布置的示例。

(11) 学校体育馆^[3] 在中、小学体育馆中, 通常采用荧光汞灯、金属卤化物灯等光

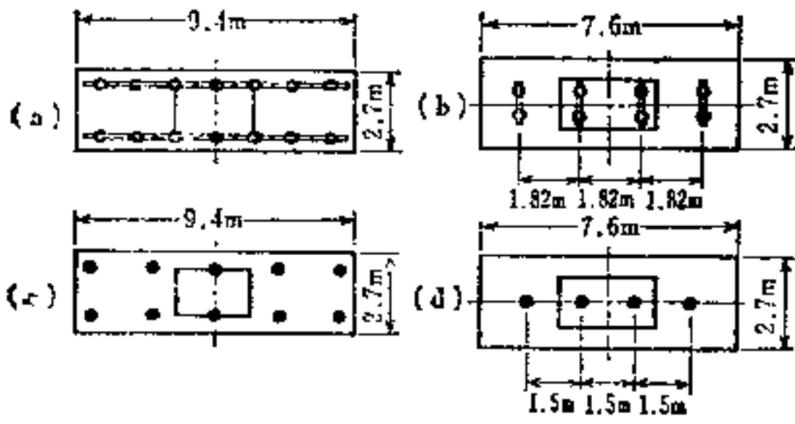


图21-18 乒乓球场地的灯具布置示例

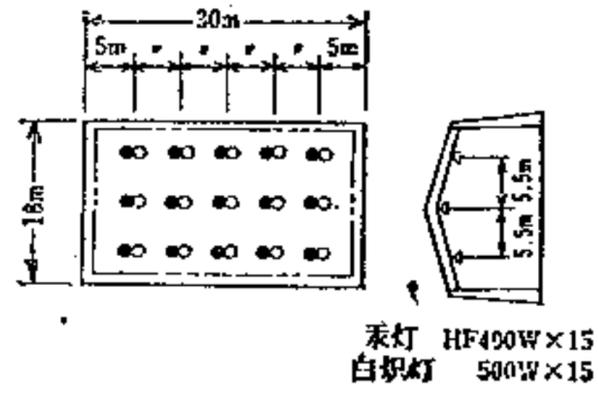
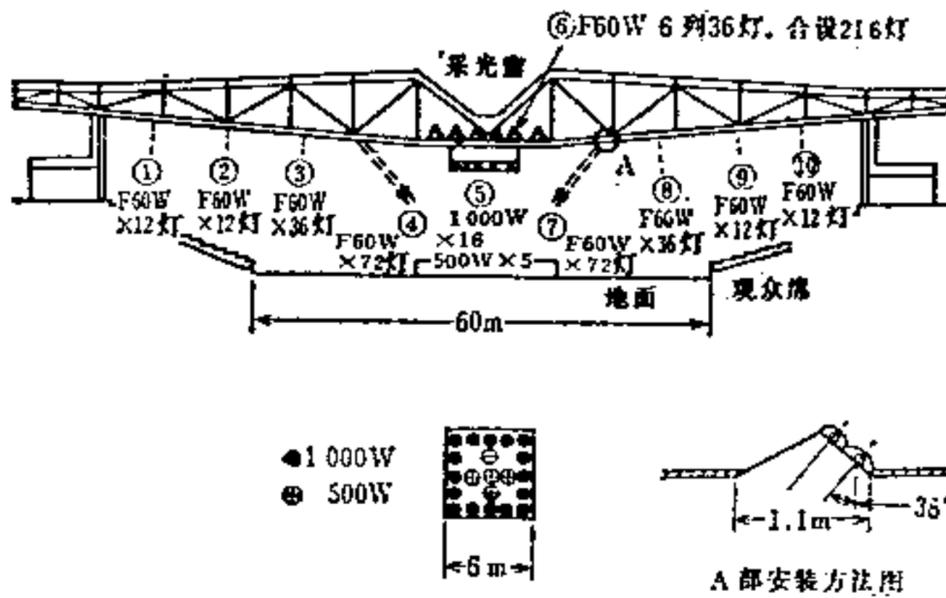


图21-19 学校体育馆的灯具布置示例



图21-20 升降式多灯用具



等级	项目	点灯电路	照度 (lx)
练习	一般比赛	⑥ + ③ + ⑧	300
	网球	⑥ + $\frac{④}{2}$ + $\frac{⑦}{2}$	300
比赛	网球	⑥ + ③ + ⑦	600
	一般比赛	⑥ + ④ + ⑦ + ③ + ⑧	850
	拳击	⑥ + ④ + ⑦ + ③ + ⑧ + ⑤	2000

(注) 观众席 (① + ② + ⑨ + ⑩) = 100lx

图21-21 综合体育馆灯具布置示例 (F为荧光灯)

源作为一般照明，并附加反射率高的格栅。但对高等学校、大学体育馆中的比赛内容来说，除了要求高照度以外，还要充分考虑光源的显色性和色温等。

灯具布置示例如图21-19。

(12) 综合体育馆 为了能适合多种项目的比赛以及其它目的，要考虑照度标准的变化和灯具的布置等问题。

对于光源，由于要求高照度，从经济观点来考虑，采用高容量的金属卤化物灯、荧光汞灯或高压钠灯是适宜的。

但是，光源如按单个布置，灯具的数量增多，就会给维修工作带来不便，所以希望能采取升降式多灯用具，在地面上进行维修管理如图21-20，并根据情况把管线安装在兼作维修管理用的操作平台上。

大型综合体育馆灯具布置如图21-21所示。

(13) 其它附属设施〔4〕 室内比赛场的附属设施有更衣室、浴室和谈话室等，其照明需要明快舒适。

21-3 室外体育场所

室外的体育运动从照明设计分，大致有两类：

(1) 利用空间的室外体育运动：棒球、网球、橄榄球、美国式足球和高尔夫球等。

(2) 低位置的室外体育运动：田径、游泳、射箭、滑雪、滑冰等。

前者，球的运行不仅在地面上，同时还在距地面10~30m的空间进行。如棒球、高尔夫球等为其典型代表。因此，这类体育运动设施的照明，在设计时，应注意比赛场地上部空间的光分布要非常均匀。

后者，比赛大部分在距地面约3m高度的范围内进行。田径和游泳比赛是这类的典型代表。这种体育运动设施的照明，主要是地表面的光量和光分布问题。

21-3-1 照明计算

室外体育运动设施的照明，多采用投光照明方式。投光照明的计算多半是光通法和逐点法并用。

光通法：以全部被照面上的平均照度来照明，求出所需投光器的台数。

逐点法：用光通法算出投光器的总台数，决定其照射方向，求出被照面的照度分布，以检验其照度是否均匀。

经验表明，在设计阶段采用光通法计算已经足够。但在很多情况下，还要用逐点法进行照度分布计算，以求出特定地点的照度或在施工时决定投光器的指向角度。

(1) 照度计算

(a) 光通法计算公式 根据光通法求所需灯数的计算公式如下：

$$N = \frac{EA}{F_l U_l M} \quad (21-1)$$

式中 N ——所需投光器台数；
 E ——设计照度 (lx)；
 A ——被照面积 (m²)；

F_f ——投光器辐射光通 (lm);

U_f ——辐射光通利用率;

M ——维护系数。

上式与室内体育照明光通法计算公式(参照第9章)的不同之点是 F_f 投光器光束的光通和 U_f 辐射光通利用率。

(b) 逐点法计算公式 虽然光通法能简单地计算出全部被照面上的平均照度,但不能得知照度分布的情况,而逐点算法可以给出包括被照面上各点的照度值,并能对照度分布的状况进行检验。

然而,由于逐点算法复杂,对于大型体育设施,设计人员采用手算是困难的。近来,多利用电子计算机进行计算。关于逐点法计算公式可参阅第9章。

(2) 照度及照度分布 在体育运动照明的情况下,由于视觉对象或运动员运动,或者二者同时运动,作为视觉工作条件决不能说是良好的。特别在利用空间的体育项目(球赛)中,必须使运动员能准确地看清高速球的运转情况。

因此,在比赛场地的上部空间存在着若干光量是重要的。然而以计算方法或测定方法求出空间各个方向的光量是复杂的,而且也不实用,所以在一般到达比赛场地表面的光量中,取对地面成直角方向的部分(水平面照度)计算或评价比赛场地的亮度的方法。对于这种背景,只有采用适当的照明方法,使地表面获得充分的水平照度和足够的空间光量,才能得到保证。

但是,在球的运行过程中,球从明亮的空间急剧进入暗空间是不易被看到的,反之从暗空间进入明亮的空间,突然看到球出现,都是不利于正常比赛要求的。为了能准确地发现球,光线均匀分布在比赛场的上部空间,乃是不可缺少的因素。这样的不均匀的亮度是造成极度疲劳的原因。

在这种情况下,比赛场上部空间需要产生同样状态的分布是必要的。尽管前述理由相同,比赛场地表面的水平照度(照度不均匀度)可以用来换算或评价空间光分布的不均匀状况,可是在必要时还应采用逐点法计算比赛场地上部空间各点的垂直面照度。由于这点考虑,并根据体育运动的种类和运动员的技巧,给出比赛场地必要的水平照度。一般参考照度标准(JIS Z 9110),虽然希望照度的分布是均匀的,但是由于平均照度值和投光器的布置等,不可能不存在不均匀性。对一般比赛场地内的水平照度均匀度可取低于表21-3所示的数值。

表21-3 比赛标准和照度均匀度

比 赛 标 准	照度均匀度 (最大照度:最小照度)
正式比赛	3:1
一般比赛	3:1~5:1
娱乐	5:1

(3) 轴向光通利用系数 由于投光器配光特性、安装高度、投光器的指向角度、被照面的大小和照明塔的布置等均不相同,其轴向光通利用系数概略值如表21-4所示。

(4) 维护系数 随着投光器反光面和前面透光玻璃的污染,以及光源本身的光衰等,经过一段使用一段时间后照明设施的照度会下降。因此,有必要在设计时把照度下降的部分预先估计在内乘以一个系数。由于照明设施的周围环境和清扫光源的时间间隔不同,所以将一般应用值列于表21-5中。

21-3-2 投光器的布置和安装高度

决定投光器的布置和安装高度时,应尽量减少对运动员产生眩光。光源的眩光除了妨碍

表21-4 轴向光通利用系数

照 明 的 条 件	投光器配光	轴向光通利用系数	例
照明范围宽、照度低的照明情况 (50~100lx)	宽角形	0.1~0.75	学校运动场等
照明范围窄、照度中等的照明情况 (200~500lx)	宽角形	0.5~0.7	网球场、排球场等
照明范围宽、照度中等的照明情况 (200~500lx)	宽角形 狭角形	0.75~0.8	足球、橄榄球、垒球等
照明范围宽、照度高的照明情况 (500~1000lx)	狭角形	0.8~0.95	硬式棒球、正式比赛场等

比赛以外，也是造成视觉疲劳和外伤的原因。在室外体育运动设施的照明，是以黑暗的夜空作为背景的。由于在任何方向观看光源都不可能没有眩光。因此，需要根据尽量减轻在比赛进行方向和运动员正常视线方向上的眩光，来考虑确定投光器的布置（照明柱的配置）和高度。

表21-5 维护系数

照明设施的环境	维护系数
严重污染的环境	0.5~0.6
一般环境	0.6~0.7
清洁场地或每季清扫	0.7~0.8

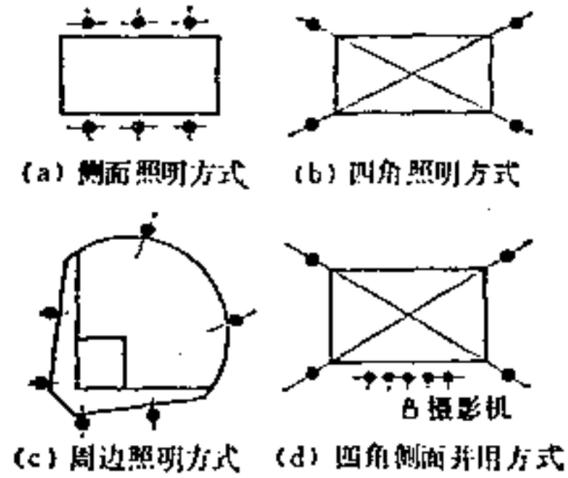


图21-22 照明柱布置方式

关于投光器的布置方法大致可分为四种，如表 21-6 及图 21-22 所示。

表21-6 照明柱的布置方式和用途

方 式	方 法	布置图	投光器安装高度	用 途
侧面方式	在比赛场地两侧布置照明的方法	(a)	$H \geq (D + \frac{W}{3}) \tan 30^\circ$	田径比赛、足球场、橄榄球场、网球场等
四角方式	在比赛场地四角处布置照明的方法	(b)	$H \geq L \tan 25^\circ$	足球场、橄榄球场等
周边方式	在比赛场周围布置照明的方法	(c)	根据目标，个别确定 (例：18m、25m、32m等)	棒球场、田径比赛场等
四角及侧面并用方式	布置在比赛场四角处和电视摄影机一侧的照明方法	(d)	上述二个公式并用	进行彩色电视摄像的足球场、橄榄球场等

无论哪一种情况，在选择光源高度时，不使光线射入运动员正常视线的 30° 角上下的方向内是必要的。确定安装投光器的最低高度的方法如表 21-6 及图 21-23 所示。

但是，为了避免由于特定方向上过强的光线而造成在比赛场地上产生运动员的强烈阴影，可采取由几个方向上大致相等的强光照明。

21-3-3 光源

用于室外体育照明的光源，除了汞灯、荧光汞灯、金属卤化物灯外，也可采取由这些光源和高压钠灯或白炽灯、卤钨灯混光使用。有关这些光源的混光照明，见 21-2 节。关于各种光源的特性参阅第 6 章。

21-3-4 投光器

(1) 配光 投光器的配光性能（光的宽度、光通角），应同使用的灯泡种类、反光面的

形状、前玻璃的选择、被照面的尺寸、投光器到被照面的距离以及必要的照度等联系在一起考虑，一般由表 21-7 选择投光器。

(2) 开启方式 可分为两种，即由投光器的前方（前面玻璃一侧）更换灯泡的前部开启式和以投光器的后方（光源口一侧）进行更换灯泡的后部开启式。所以，在安装投光器时，为了便于更换灯泡，应在足球场地等场所注意选择容易维修的办法。

(3) 前面玻璃 投光器的前玻璃有透明玻璃和扩散玻璃（磨砂玻璃、麻点玻璃）两种。它与反光面和灯泡组合成不同的配光性能，如表 21-8 所示

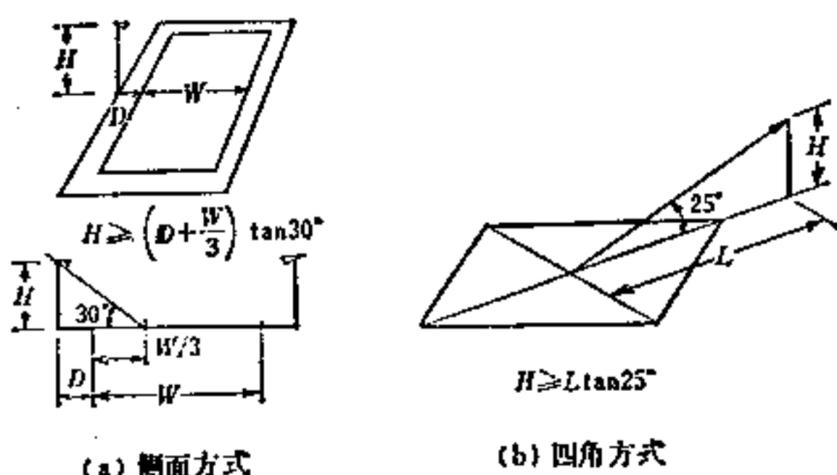


图21-23 安装高度的确定方法

21-3-5 安全照明

对于设有观众席的比赛场，特别是在停电时作为维护照明用，希望设置若干台具有瞬时点燃特性的白炽灯或卤钨灯作为光源的投光器。

表21-7 投光器的配光性能和用途

配光性能	使用场所的必要条件	用途
<p>宽角型</p> <p>最大光强的1/10 (光通角张开大、最大光强小)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○从设置投光器的位置到被照面距离近的情况 ○在照度比较低(50~100lx)的同样照明情况下 	<p>网球场、排球场等</p> <p>学校运动场等</p>
<p>狭角型</p> <p>最大光强的1/10 (光通角张开小、最大光强大)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○从设置投光器的位置到被照面距离远的情况 ○需要全部高照度的情况 	<p>棒球场、田径比赛场等</p>
前二者合用	远距离用狭角型，近距离用宽角型照明	高尔夫球场、滑雪运动场等

表21-8 前面玻璃和配光性能

前面玻璃	反光面	使用光源	配光性能
透明玻璃	<ul style="list-style-type: none"> 狭角型反光面 宽角型反光面 	<ul style="list-style-type: none"> 透明灯泡 扩散灯泡 	<ul style="list-style-type: none"> 狭角型 宽角型
扩散玻璃	狭角型反光面	<ul style="list-style-type: none"> 透明灯泡 扩散灯泡 	<ul style="list-style-type: none"> 宽角型 超宽角型

21-3-6 基本布置举例

在设计各种设施时的注意事项和投光器基本排列的例子如下所示。

(1) 棒球场 基本布置如图 21-24 及图 21-25 所示。在设计上应注意以下几点：

(1) 照明范围广，投光距离大，应以采用狭角配光型投光器为主。

(2) 不仅在运动场地上，而且在上部空间都应有充分的照度。在投球手和接球手之间

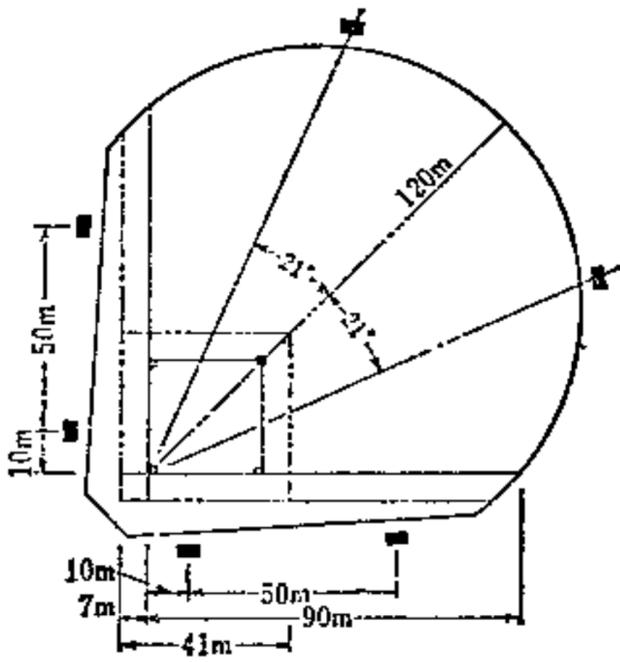


图21-24 棒球场

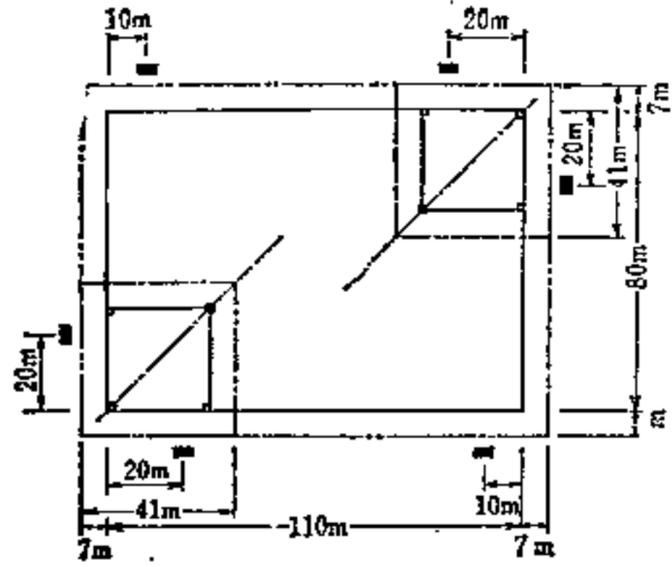


图21-25 棒球场

特别需要高照度。

(3) 为了减少眩光, 应将投光器安装得很高(内视场最下段为 20m 以上, 外视场最下段为 24m 以上)。根据情况, 也可不必特为飞球设置投光器。

(4) 距球场界线外侧还有 7m 的被照面。

(2) 垒球场 基本布置如图 21-26 所示。在设计时应注意以下几点:

(1) 因为比棒球场照明的范围狭窄, 所以应采用近距离宽配光型投光器为主。

(2) 和棒球场同样需要在球场的上部空间有足够的照度, 在投球手和接球手之间应有特别高的照度。

(3) 距球场界线外侧还有 6m 的被照面。

(3) 足球场、橄榄球场 基本布置如图 21-27 所示。在设计时应特别注意以下几点:

(1) 因照明范围大, 应采用远距离投光器(窄配光)为主。

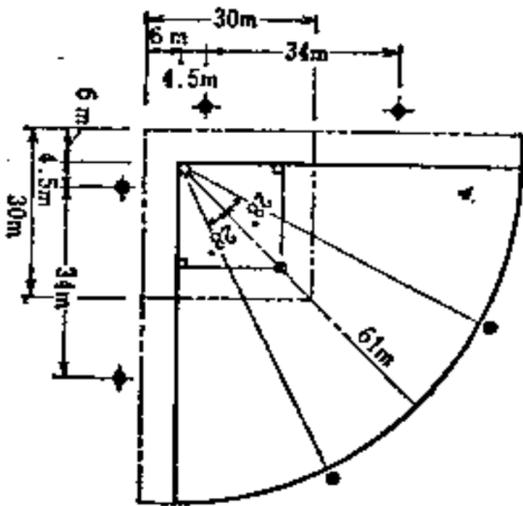


图21-26 垒球场

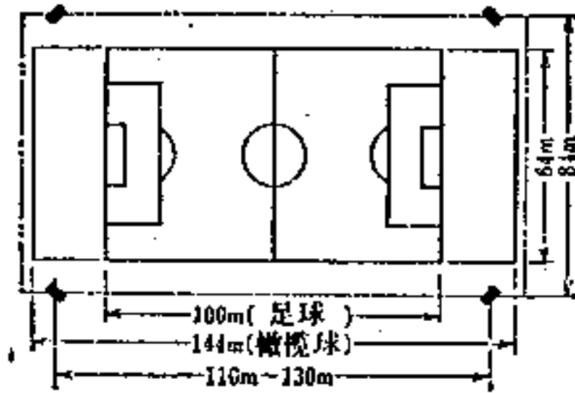


图21-27 足球场、橄榄球场

(2) 在减少对运动员的眩光的同时, 还要垂直面照度非常高。所以灯的安装高度要高, 并把照明塔布置在场地的转角处。

(3) 在球门附近的照度应比其它部分更高。

(4) 网球场 基本布置如图 21-28 所示。在设计时应注意以下几点:

(1) 由于照明范围狭窄, 投光距离短, 所以采用近距离投光器(宽配光)。

(2) 采取两侧对称排列, 可避免运动员和球产生强烈的阴影。并且要求在运动员的视

线方向上不出现强光。

(3) 规定投光器的安装高度最低为 10 m 以上, 视球场的数目 (视照明范围的大小) 而决定它的高度。在空间也应有充足的照度。

(4) 球网附近要特别提高照度。

(5) **学校操场** 基本布置如图 21-29 所示。在设计时应注意以下几点:

(1) 在照度较低情况下, 为了减少照度的不均匀性, 应采用近距离投光器 (宽配光)。

(2) 灯杆的高度应根据操场的大小米确定, 最低高度应为 10 m。

(3) 由于场地可进行多种项目综合利用, 所确定的照射角度应使其各处保持一定的照度均匀性。因此, 要注意了解有特殊使用目的的部分 (网球、篮球场等) 并根据比赛内容提出照明计划。

(4) 由于操场的大小和形状不同, 灯杆数一般为 6~8 根左右。

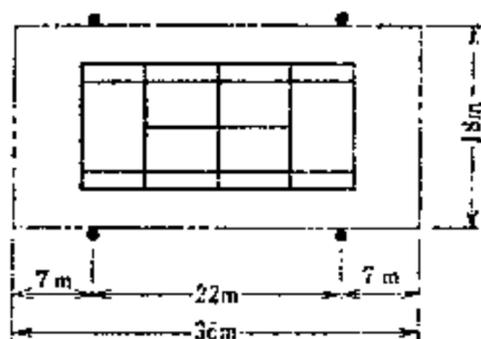
(6) **室外游泳池** 基本布置如图 21-30 所示。在设计时应注意以下几点:

(1) 采用近距离宽配光型投光器。

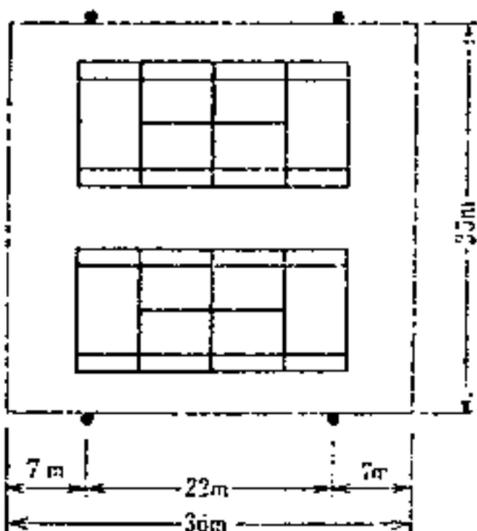
(2) 确定照射方向, 尽量减少光线进入游泳者视线的频率。

(3) 确定投光器的高度, 使水面反射光不致进入观众的眼睛。

(4) 为了安全管理上的需要, 水面及池边的照度最低应保持在 100lx。



(a) 一个场地



(b) 二个场地

图21-28 网球场

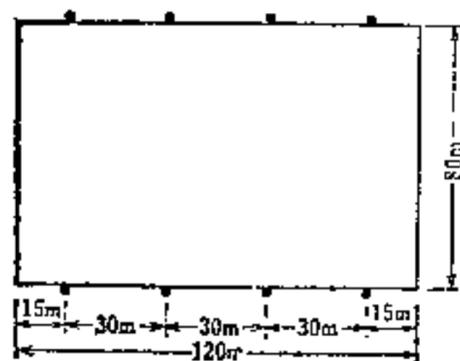
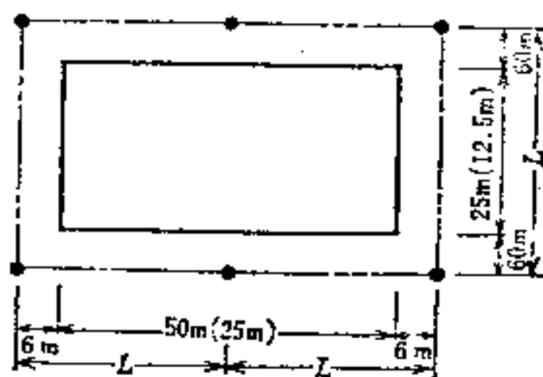


图21-29 学校操场



(投光器安装高度 $H: H > \frac{L}{4}$)

图21-30 室外游泳池

(7) **滑雪运动场** 基本布置如图 21-31 所示。设计时应注意以下几点:

(1) 主要采用近距离投光器 (宽配光)。必要时, 可用一部分远距离投光器, 二者混合使用。

(2) 为了不出现滑降者本身的影子, 希望把投光器安装在两侧, 对称排列。

(3) 投光器的高度按积雪量来确定。

(4) 升降机和缆绳的照明, 为了安全要考虑投光器的照射方向, 以使驾驶员充分取得

视线方向的垂直面照度。

(8) 室外滑冰场 基本布置如图 21-32 所示。设计时应注意以下几点:

(1) 采用近距离投光灯 (宽配光)。

(2) 为使滑行者不致出现强烈的影子, 应采取两侧对称排列。

(3) 应注意避免冰面反射光进入滑行者眼睛。

(4) 为了能看清冰的裂缝等危险之处, 应使整个冰场具有均匀照明。

(9) 高尔夫球练习场 基本布置如图 21-33 所示。设计时应注意以下几点:

(1) 投光器设置在打高尔夫球席位的后方, 追光照明应确保运动员方向的垂直面照度。

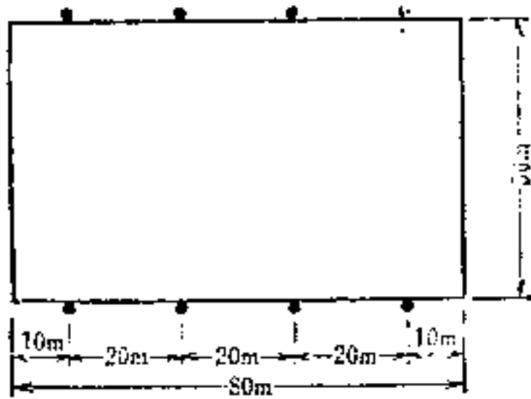


图21-32 室外滑冰场

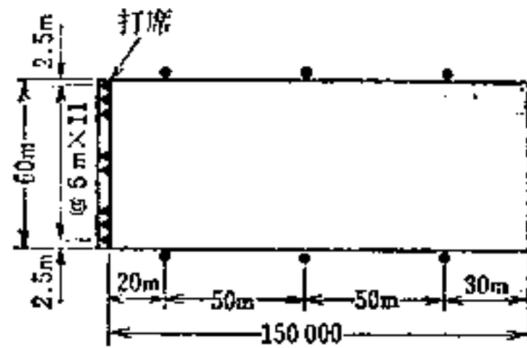


图21-33 高尔夫球练习场

(2) 被打出的球, 如到最后还看不见, 就会减少兴趣。所以, 在练习场的顶端要保证有足够的垂直面照度。

(3) 在高尔夫球发球处的照明, 其照明器的布置不应由于运动员本身的影子而妨碍比赛。

(10) 高尔夫球路线 基本布置见图 21-34 所示。设计时应注意以下几点:

(1) 高尔夫球发球处及草坪照明, 以近距离投光器 (宽配光) 为主, 在有利于打高尔夫球的地区的照明, 以远距离投光器 (窄配光) 为主。

(2) 在高尔夫球发球处, 草坪上面, 为避免有运动员的强烈影子, 应从两个以上的方向进行照明, 以保证有充分的水平照度。

(3) 在有利于打高尔夫球的地区的照明, 作为追踪照明 (包括上部空间) 要保证有足够的垂直照度。

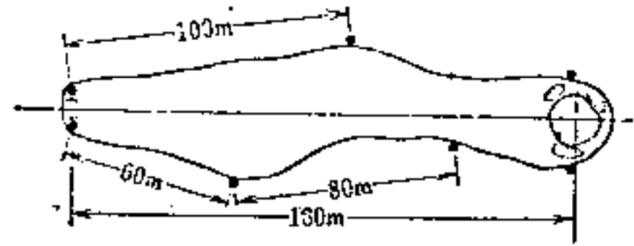


图21-34 高尔夫球路线

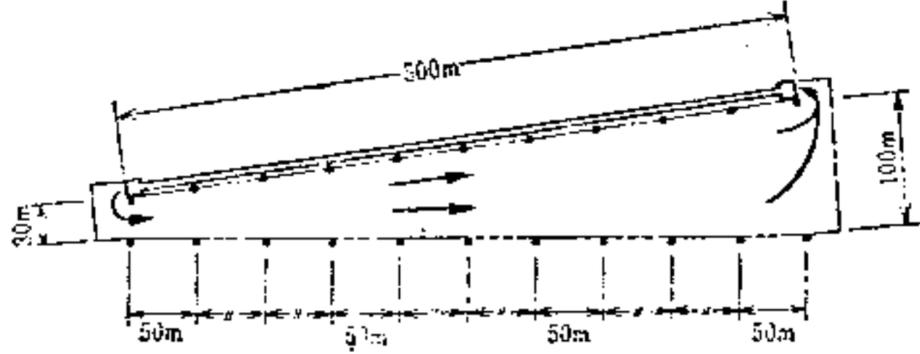


图21-31 滑雪场 (滑雪斜道照明)

注: 关于电梯本身的照明, 必须执行运输省陆运局“索道规则, 第45条, 第2项”的规定

21-4 彩色电视用照明⁽⁶⁾

电视摄像管和电影用摄影机, 由于受被照面的内容的影响, 所以希望要求彩色转播时的

21-4

照明和无需彩色转播（只考虑运动员和观众席的照明）时的照明协调一致，但往往也会发生不一致的情况。这时，设计人必须确定重点放在哪里才适当。

这里是以彩色转播为主而考虑的。

21-4-1 转播和摄影

(1) 彩色电影胶片 彩色电影胶片的摄影条件取决于灵敏度、曝光时间和透镜光圈。在使用转换滤光片时，照明色温的变化会降低灵敏度。为了正确曝光，要决定光圈，为了给出曝光时间，要决定摄影速度。

一般的摄影速度采用 25 帧/秒，曝光时间为 1/50 秒，拍摄缓慢的动作时用 1/100 秒。由于在选定光圈时需要考虑景深，所以，当采用 35mm 胶片摄影时，把光圈缩小 1~2 级比用大光圈要好。而在有照明的场合，大致的标准是：摄影感光灵敏度约为 160(ASA)，光圈 2.8，曝光时间在 1/100 秒以下。

(2) 彩色电视摄像机 转播体育运动用的彩色电视摄像机，为了得到 40~60dB 良好的 S/N，令人满意的图像需要 2~4mlm 光通。

体育照明的照度，必须按照视野的深度加以考虑。如棒球、网球、冰球等的速度是很快的，这就要有比较深的深度。因为这种原因，光圈小，照度就必须高。虽然彩色电视摄像机透镜的光圈较小（光圈数值大），但是在瞄准远距离时仍然需要高照度。彩色电视用可变焦距的最大光圈一般是 $f:2$ 。

因而照明设备要把摄像机的光圈考虑在 $f:2.8$ 、 $f:4$ 、 $f:5.6$ 的范围。

通常彩色电视摄像机是根据色温为 3200K 的光进行调整的。所以，对色温更高的光应当变换滤光器。在白天高照度时是没有问题的，但到日落黄昏、阴天或人工照明时，就不希望由于使用滤光器而造成灵敏度的降低。但在照度低、色温高的情况下，变换放大红和蓝的彩色系统，只要调整一下摄影机就可以了。

21-4-2 照明

(1) 照度 透镜光圈由 $f:2$ 到 $f:5.6$ 时所需照度如表 21-9 及表 21-10 所示。

表21-9 使用ASA160彩色电影胶片时所需的垂直面照度 (lx)

曝光时间 (s)	透 镜 光 圈			
	$f:2$	$f:2.8$	$f:4$	$f:5.6$
1/50	(300)	600	1200	2400
1/100	(600)	1200	2400	4800

表21-10 2mlm-S/N40dB的彩色电视摄像管垂直面上所需的照度 (lx)

透 镜 光 圈	$f:2$	$f:2.8$	$f:4$	$f:5.6$
照 度	(375)	750	1500	3000

照度在必须采用 $f:2.8$ 以上（对于数值大的方面）的数值时，括号内的数值，即使对画面的质量有某些损失，也无关系，允许采用表中规定以外的照度。

水平面照度、垂直面照度及摄影机拍摄全景时画面的亮度，必须保持变化的一致性。使用彩色胶片或彩色电视机时，被照面的最大亮度与最小亮度之比必须小于 40:1。这时要考虑各个对象的反射率和照度的均匀性。

(2) 显色性 对于彩色胶片, 彩色电视的显色性特别重要。经验表明, $R_s < 70$ 的照明是不够理想的。当光源光谱分布同黑体辐射情况下不一致时, 虽然对色温易于产生误解, 但是经验表明, 光源的色温保持在 3000~7000 K 是能使用的。

21-4-3 彩色电视转播用光源

由于前项已叙述了照度值、色温、显色性等问题, 因此在选用光源时, 自然会受到一定的限制。选择适当的光源可按表 21-11 所示。同样, 也可将这些光源和其它光源混合使用。例如, 卤钨灯和金属卤化物灯混光使用时, 其变化如下。

光通比 50:50 或 40:60

色温 3500~3700 K

显色性 $R_s \approx 79$

表 21-11 彩色电视转播用光源

光源种类	功率大小 (kW)	效率 (lm/W)	色温 (K)
投光用白炽灯	20	25	约 3000
卤钨灯	10	30	约 3200
荧光灯	0.215	50*	约 3000~6000
金属卤化物灯	9	90*	约 3000~6000

* 包括镇流器损耗

21-4-4 照明设计

(1) 照度 为了看清对象, 无论对于摄影机摄影还是摄像, 对象的亮度是重要的。但是, 通常由于不知道对象的反射率, 所以只有采用照度。在比赛场, 应把四周边线 (球场边线) 的垂直照度作为基本照度。

后面图 21-39 由 A 方向的垂直照度开始, 依次到 D 方向为止, 计算出垂直面照度, 这就便于确定各个方向上的摄影的交点, 如果把交点距离缩小, 就可以提高精确度。这些交点在测定时也能利用。求这些交点的方法, 通常是沿长向的球场边线 (图 21-39 B 方向和 D 方向) 分成 8 段, 沿短向的球场边线 (即 A 方向和 C 方向) 分成 6 段, 比较合适。因而计算点为 $9 \times 7 = 63$ 点。

其次求出 A、B、C、D 各方向的各自平均垂直面照度, 再求一个方向的平均垂直照度 \bar{E}_v 。如果将这一方向的值全部相加, 用交点数来计, 则其计算式如下:

$$\bar{E}_v = \frac{1}{n} \sum_{1}^n E_{v_i} \quad (21-2)$$

如电视摄像机只要求在特定方向上设置时, 仅仅考虑这一方向的 E_v 就已足够。但是, 即使在这种情况下, 对于其它方向的照度, 为了图像的质量, 运动员和观众的 E_v 也不应低于 50%。

这些照度值是维持值、初期值, 因此, 要把这些照度值提高 1.2 倍。当然, 从维护系数的意义上讲, 如果对入射光源和照明器的清扫次数较少 (长期不清扫), 就需要比 1.2 还要大的系数。

(2) 光源的方向性和眩光的防止 在图 21-35 中, 如果俯角 α 小, 垂直面的照度 E_v 就容易提高, 同时对运动员、观众的眩光就会增大。因此在设计时, 为减少对运动员干扰的

程度,选定俯角 α 是必要的。

对于体育馆, $\alpha = 55^\circ \sim 65^\circ$ 是合适的,如果在照明器上安装格栅或挡板就更好些。

室外照明器的数量根据照度来确定。并从使用灯具的配光、指示方向(投光器光轴的指向)与安装高度等三个方面来考虑防止眩光。照明器组的安装高度应布置在运动员、观众的正常视野之外的空间。因此,在比赛场地的中央所能看到照明器组的最低部分的仰角应在 30° 以上(参阅图21-36)。

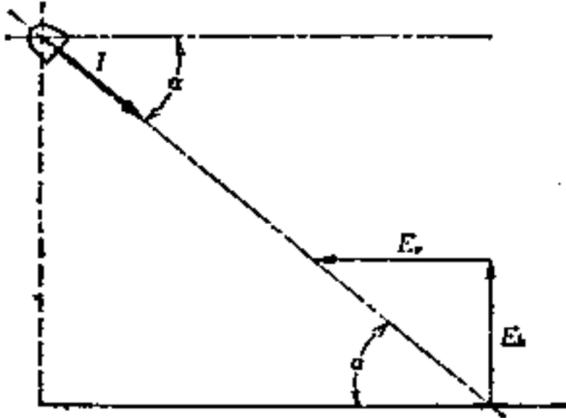


图21-35 照明器指向俯角 α 的 E_v 、 E_h

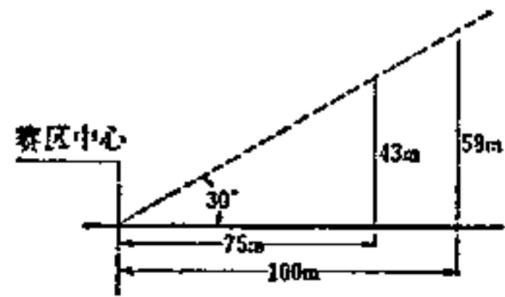


图21-36 与比赛场地中心的距离和灯具最低安装高度的关系

(3) 水平面照度、垂直面照度的均匀性 因为在实际的设计中,把照度都做成一样是困难的。所以,依据过去的经验对主要方向采用下面的值:

$$E_{v(\max)}:E_{v(\min)}\leq 3:1$$

而且,被照面的亮度比最大:最小 $\leq 40:1$ 以下,与21-4-2(1)所述相同,还必须考虑水平照度 E_h 按下列值采用:

$$E_{h(\max)}:E_{h(\min)}\leq 2:1$$

(4) 频闪效应的防止 在使用白炽灯和卤钨灯的情况下频闪是无需考虑的问题。而在使用放电灯时,则要注意由于电源频率所引起的弧光不连续性而产生的频闪效应。

频闪效应使图像迅速移动,当视线成直角时最大。为了预防这一现象可采用三相电源,把由各相点燃的光源($3n$, $n = 1, 2, 3, \dots, n$)的光,同时照射到比赛场地的任何一点上。

(5) 观众席的照度 对于需要进行彩色电视摄像的观众席,其照度应为比赛场地边缘水平照度的25%。可以利用比赛场地照明器的溢散光或附加设备照明。

21-5 照度测定和维护管理

21-5-1 照度测定

(1) 照度测定的目的 照度测定的目的有以下四点:

- ①确定照度等级,进行适宜标准的调查。
- ②按照设计的要求,对照度进行调查研究。
- ③对同类的照明设施进行调查比较。
- ④了解照度经常变化情况,找出维护管理和改善照明的大致目标。

在进行照度测定时,要在事前对上述目的内容和要求加以考虑,定出精度,选择与精度相适应的照度计,并确定测定方法。

(2) 照度测定时的注意事项

(a) 测定点的高度和测定方向 测定点的高度，在室内未加特别指定的情况下，一般距地面以上 85cm，走廊、楼梯都分别在地面位置测定水平照度。在室外情况下，距地面 15cm 以下。这要根据受光器、水准器等的高度考虑，如在此范围内，实际测定误差是可以忽略不计的。

CIE TC4.4 技术委员会提出的“彩色电视转播的体育运动照明”^[6]如图 21-37 所示。测定高度距地面为 1m，并建议对四个方向上的垂直面照度和水平面照度进行测定。

(b) 电压 由于照度随点灯的电压而变化，因此在测定照度时，必须测定电源电压，必要时要记录下来。而且，在一些情况下对调整了的规定电压也要进行测定。

对于荧光灯，由于其亮度随着周围环境温度而变化，所以对气温的测定是必要的。

(c) 操作者 在测定时，由于易受明亮颜色工作服反射光的影响，所以尽量不穿浅色服装为宜。同时，还应注意避免遮挡对受光器各方向的入射光。

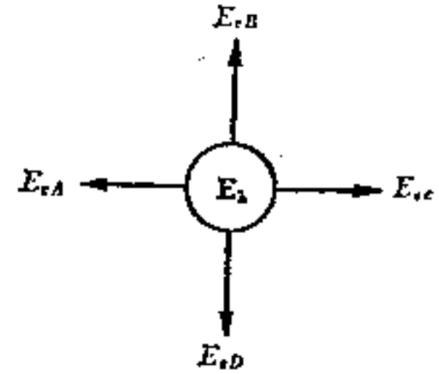


图21-37 照度测定方向

(3) 求平均照度的方法 JIS C 7612 “照度测定方法”作为一般平均照度的方法，如图 21-28 所示。规定为 5 点法和 4 点法。

实际照明设施中，选用 4 点法还是选用 5 点法主要以分割数达到哪种程度来确定。

平均照度的精度与分割程度有关，分割数越多越好。但是，使测点的数量增加则需要劳动力和时间，因此应有一定的限制。通常在室内一般照明的情况下，适当的分割间距大约在 2m 左右。

CIE TC4.4 技术委员会提出的“彩色电视转播的体育运动照明”，对分割数的规定如图 21-39 所示。在比赛场的长边分成 8 等分，短边分成 6 等分。

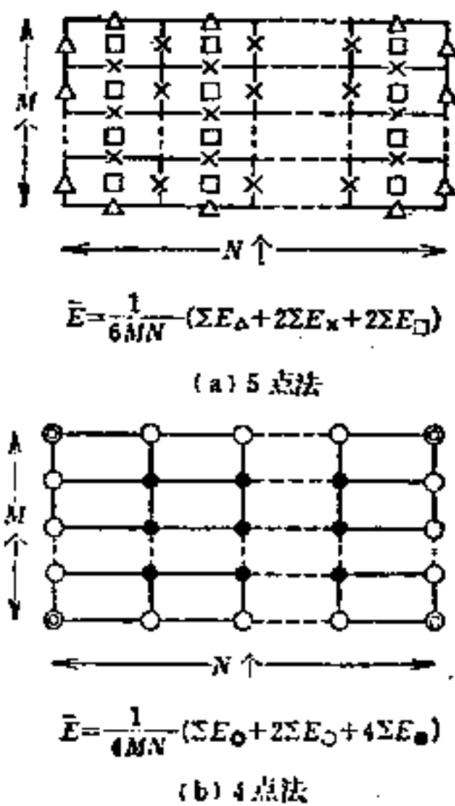


图21-38 求平均照度的方法

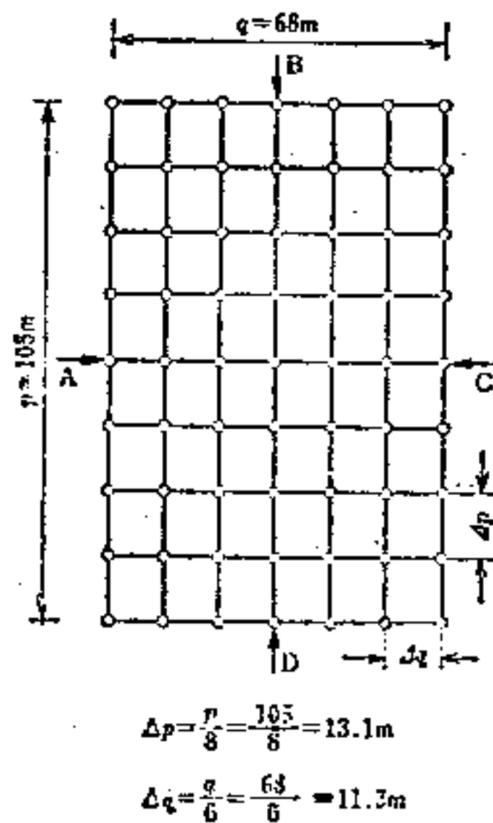


图21-39 足球比赛场的照度测定点

另外，在照度分布比较一致的情况下，用4点法为好，当照度分布不大均匀时，采用5点法是适当的。

21-5-2 维护管理

(1) 光源、照明器的性能下降和清扫效果 光源随着燃点的过程使光通逐渐衰减下来。图21-40表示典型光源的光通维持率曲线。而照明器的反光面由于前面玻璃受灰尘的污染，使初期使用性能降低。而且，室内设施如顶棚、墙面的污染也更加影响到初期照明效果的降低。

图21-41所示为日本的专业棒球场，在使用一年后有关投光器清扫效果的一例。

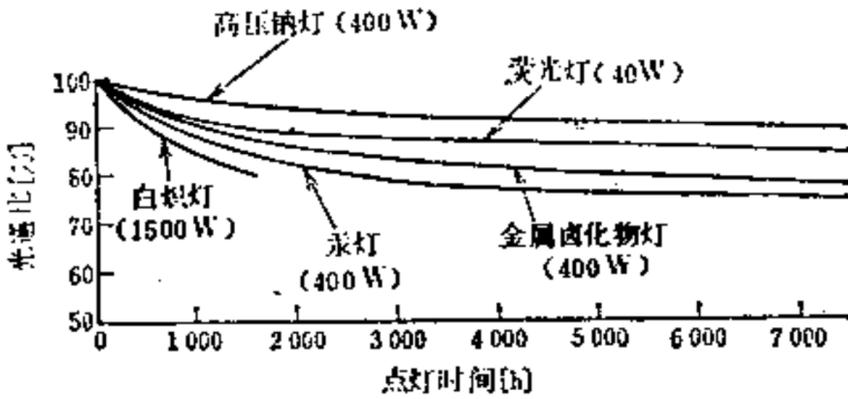


图21-40 光源的光通维持率曲线示例

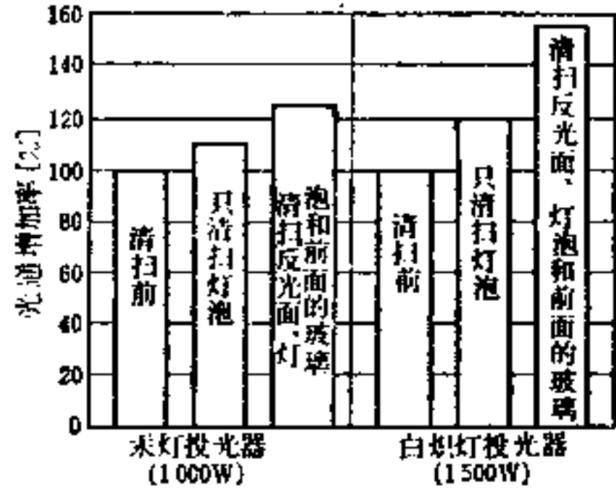


图21-41 由于投光器的清扫而使光通增加的实例

因而，对照明设施要注意定期的照度测定，以掌握光源和照明器的污染程度，对设置在室内的应在使用次数最少的时期，每年至少进行一次清扫工作。而对设置在室外的，特别是设置在污染很大的场所，希望在使用旺季中至少清扫2次。

(2) 灯泡的更换 对于光通量有显著衰减的灯泡，应进行适时的更换。更换的方法有个别更换、成批更换以及个别与成批相结合进行更换等三种。

个别更换：就是把点不亮的或光通量有显著衰减的灯泡随时更换下来。这种更换的方法，适用于设施规模小的情况。

成批更换：一般适用于大型设施使用灯数多的情况，为了减轻更换人员的工资负担，要按照规定时间统一进行成批更换。这种更换方法存在的问题是即使发现有不亮的灯泡也要等待一定时间，因此，照明效果不会令人满意。对每次都有提前不亮的灯泡需要更换，和另一部分灯泡需要点燃一定时间后才能进行成批更换的方法，乃是个别与成批相结合的更换方法。

另外，清扫和灯泡的更换，必须立足于安全，并且在安装时就要考虑到便于照明器的更换和清扫工作。

清扫及更换灯泡等维护工作，不仅从经济方面，而且从照明用电的有效利用观点考虑，也都具有研究的意义。因此，希望能制定出切实可行的实施计划。

参 考 文 献

- (1) Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LITG): Handbuch für Beleuchtung, Bundesrepublik Deutschland
- (2) IES(USA): IES Lighting Hand-book, 5th ed. (1972)
- (3) 照明学会: 新編照明のデータブック, オーム社 (昭43)
- (4) (財)日本体育施設協会: スポーツ施設の照明 (昭48)
- (5) (財)日本体育施設協会: 体育施設全書3, 体育館 (昭49)
- (6) International Commission on Illumination TC-4.4: The lighting of sports events for color TV broadcasting Bureau Central De La CIE (1975)

第 22 章

广告照明

22-1 光源和点灯装置

22-1-1 广告照明的特殊性

其它照明设备以效率良好而照亮受照体为目的，广告照明则要很好地显示它的本身，在这一点上具有特殊性。因此要使用氖灯广告、球形广告等不常使用的光源。

22-1-2 光源和点灯装置

在广告照明中使用白炽灯、卤灯、荧光灯、汞灯、钠灯等多种光源。在这里阐述广告照明特有的光源。

(1) **氖管灯** 氖管灯的构造如图 22-1 所示。管有透明管、荧光管、着色管、着色荧光管等四种。氖管灯的光源色如表 22-1 所示。

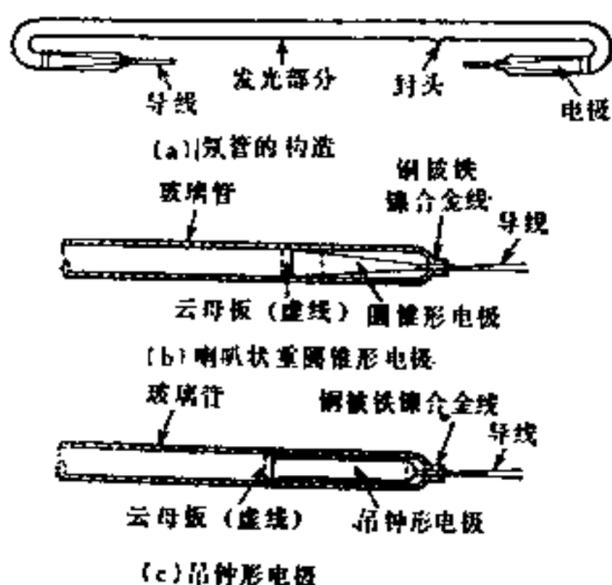


图22-1 电极的形状

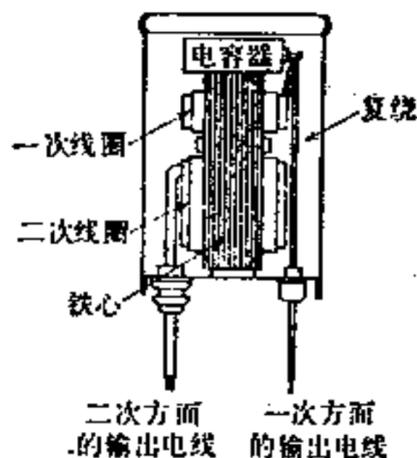


图22-2 氖变压器的构造

(2) **氖变压器** 氖放电管具有负的特性，因此使用磁漏式变压器(图22-2)。根据规程变压器的二次短路电流要在50毫安以下，而且由于氖管的性能等的关系，20毫安以下的制品占据市售品的大部分。

按照日本工业标准，确定为标准制品的氖变压器在表 22-2 说明。

(3) **高功率式和低功率式** 磁漏式变压器由于它的磁感应大，而成为低功率，这样，当大量使用时在一次方面并联大容量的电容，就必须改善功率。对此，将一次线圈升压为自耦变压器来连接电容，将它装在其中而成为高功率式氖变压器，这种变压器已经创制出来，现在成为主流。但用可变电阻器调光时，高功率式制品是不稳定的，因此不能使用。这时使用低功率式氖变压器，改善功率用的电容，和可控电阻和变压器的串联电路相比，必须并联到电源一侧。

表22-1

氖管色名表

色名	氖管的组成略号	
	标准色	同类色
红赤色	CRB ^①	CR ^① , CRR ^② , CRD ^③
红色	L ^④	
橙色(橘色)	FG ^⑤	CYB ^⑥ , CYR ^⑥
桃红色(粉红色)	FB ^⑦	COW ^⑧ , COO ^⑧
淡桃红色	FR ^⑨	FP ^⑩
黄色	CYY ^⑪	CYW ^⑫ , CYD ^⑬
乳色	FY ^⑭	
绿色(荧光绿)	FG ^⑮	CG ^⑯ , CGG ^⑰
淡绿色	F(DG) ^⑱	CC _A ^⑲
湖黄色	CYG ^⑳	
蓝白色	FB _w ^㉑	CTB _w ^㉒
蓝色(荧光蓝)	FB ^㉓	CBB ^㉓ , CB ^㉓
青色	L ^㉔	
紫色	CBV ^㉕	CBB ^㉕ , CBR ^㉕
淡紫色	FV ^㉖	
白色	FW ^㉗	FD _c ^㉗
昼光白色	FD ^㉘	

氖管色名表的说明

- 色名为日本名。括号内的称呼是惯用的，因此一并使用。
- 氖管的组成略号表示①原管的种类，②荧光涂料的种类，③封入气体的种类等三种要素。确定了这三种要素后，也就确定了氖管的发光色。
- 标准色表示用它的色名称呼最为适合而且是常用发光色管的组成。
- 同类色表示用它的色名称呼，但不像标准色那样是普遍的。
- 略号的意义如下：
 - ①一般来说，透明管用两个文字标记。荧光灯用三个文字标记。着色荧光灯用四个文字标记。
 - ②第一个字的L表示透明管
L = Clear Lead Glass Tubings
第一个字母的F表示荧光灯(透明管上涂以荧光)
F = Fluorescent Glass Tubings
第一个字的C表示着色管
C = Colour Glass Tubings
 - ③末尾的^㉑表示封入氖气。n = neon
末尾的^㉒表示封入氩气和汞。a = argon
 - ④荧光管的第二个字、着色荧光灯管的第三个字表示荧光涂料的种类。
W = 白色(4500K 卤磷酸钙)3Ca₃(PO₄)₂·4/5CaF₂·1/5CaCl₂·Sb·Mn
D = 昼光白色(6500K 卤磷酸钙)
D_c = 冷白色(昼光白色与蓝色混合)
P = 粉红色(硼酸镉Cd₂·B₂O₅·Mn)
R = 红色(磷酸铋6MgOAs₂O₅·Mn)
B_w = 蓝白色(卤磷酸钙系统3Ca₃(PO₄)₂·4/5CaF₂·1/5CaCl₂·Sb)
B = 蓝色(钨酸钙CaWD₄)
V = 紫红色(红色1/2 + 蓝色1/2的混合)
Y = 黄色(卤磷酸钙系统3Ca₃(PO₄)₂·4/5CaF₂·1/5CaCl₂·Sb·Mn + Zn₂Si₄·Mn)
G = 绿色(硅酸锌Zn₂SiO₄·n)
O = 橙色(C·As₃(PO₄)₂·Ca(F·Cl)₂/Mn·Sd)
 - ⑤经过混合的荧光涂料在括号内标记。
例：(DG)表示昼光白色和绿色的荧光涂料的混合。
 - ⑥接续C的后面的字表示着色管的色别。
CR = 红管
*CG = 绿管
CB = 蓝管
*CO = 橙管
CY = 黄管
*CC_A = 充气黄管
*CT = 青绿色管
*表示不是一般的。

表22-2 标准制品氖变压器的标准

频率 (Hz)	电压 (kV)	二次短路电流 (mA)	一次电压 (V)
50	15	20或30	100或200
50	12		
50	9		
50	6		
50	3		
60	15	20或30	100或200
60	12		
60	9		
60	6		
60	3		

(4) 荧光灯 广告照明用的荧光灯有着色制品、调光用制品、开关用制品。着色制品由于改变荧光涂料，可以显出各种颜色，在蓝、绿、红三基色中绿色最亮，其次为蓝、红的顺序。红色即使涂以红色荧光涂料，而内部气体放电的颜色显出蓝色，合成起来，只有粉红色。因此在管的内部或外部如不涂以红色涂料，就不会成为红色。

这样，为了更暗一些，将三基色编成一组合成起来而显出白色时，红色和其它颜色的管相比，需要用双倍的根数合成。

(5) 调光或开关用荧光灯 由于应用可变电阻，使一向感到困难的调光和开关能够容易进行。这时，荧光灯的灯丝平常必须通电加热。这种电流如不适当，就要显著缩短荧光灯的寿命，在严重的情况下一晚之间管端变黑，而致不能开灯。预热开灯式的荧光灯可在8伏左右，快速起动式则可在4.2伏左右。

快速起动式荧光灯的灯丝是坚固的，但在管内表面有导电膜的制品却不适于开关或调光。可在管的外部涂以导电涂料。无论哪一种都需要特殊的开灯装置。

(6) 荧光灯调光变压器 图22-3表示对荧光灯调光时的电路。

调光变压器不仅在平常时要将荧光灯的灯丝加热，即使使用20瓦的荧光灯时也在自耦变压器上提高电压，二次无负荷电压在20瓦的制品上为220伏，在40瓦的制品上为260伏，比通常制品有所提高。因此，功率不良，20瓦用的为30%，40瓦用的为40%。输入电流，20瓦用的为1.15安，40瓦用的为1.4安。

(7) 脉冲式荧光灯镇流器 通过可变电阻的电压以脉冲状升起。将这升起量微分，形成高电压脉冲，将它加到荧光灯上，作为镇流器，可以不提高无负荷电压。

图22-4为20瓦的制品的实例，图22-5为40瓦的制品的实例。20瓦的制品在通常预热开灯式扼流线圈上要缠绕卷数为其卷数1/10左右的线圈，40瓦的制品在二次线圈上要缠绕卷数为其卷数1/10左右的线圈。

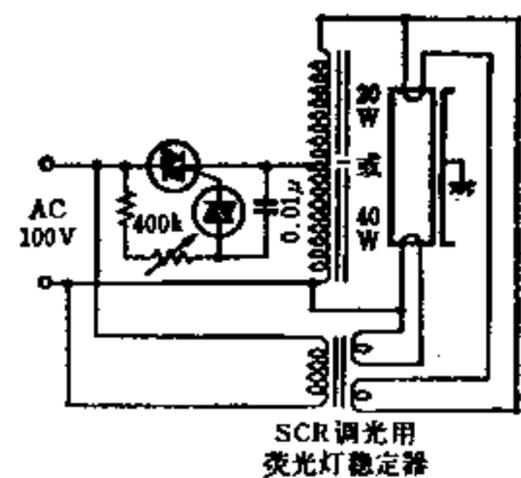


图22-3 荧光灯调光电路的基本图示

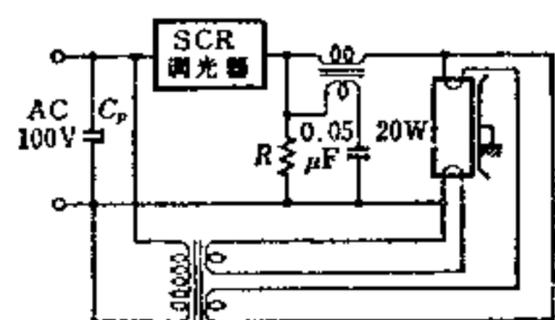


图22-4 20W荧光灯的例子

(8) 使用普通镇流器调光的方法 图 22-6 表示使用普通预热开灯式镇流器调光的情况。用加热变压器加热荧光灯的灯丝，并用 1:10 左右的脉冲式变压器发生脉冲，使贴在荧光灯管侧的密着导体具有脉冲。

(9) 使用具有辅助电极的荧光管的方法 在荧光灯的阳极一侧设置辅助电极，通 1 兆欧左右的高电阻，给予 400 伏左右的高电压，使其持续微弱放电，便可以瞬间开灯关灯。

(10) 电光表示装置用灯泡 电光表示装置用的灯泡即在阳光直射之下也可认识清楚开关，因而要求反应迅速。

对于前者，有在黑色挡板中封上透明玻璃而设置白炽灯的方法。这一方法光点小，与邻近的灯泡的联系不良，光通量的利用系数低。如果使用抛物反射镜灯，使玻璃表面做成磨砂玻璃，这样光通量的利用系数和邻近的灯泡的联系会变好，但是由于阳光而照得发白却降低了对比。因此，做成浓茶色，尽量降低外部光线的反射系数，就可使内部的光损失尽量减少而发射出来。

像电光新闻那样流动表示时要减少灯丝的热容量，封入气体，如果不加速特别停电时光的降低，那么在移动的文字上就会显出拉长尾部。

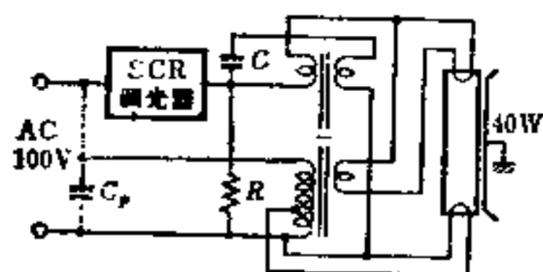
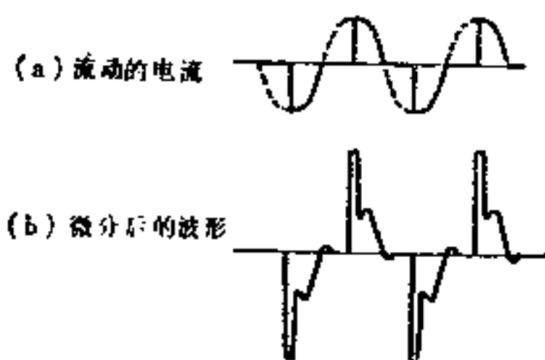


图22-5 40W 荧光灯的例子

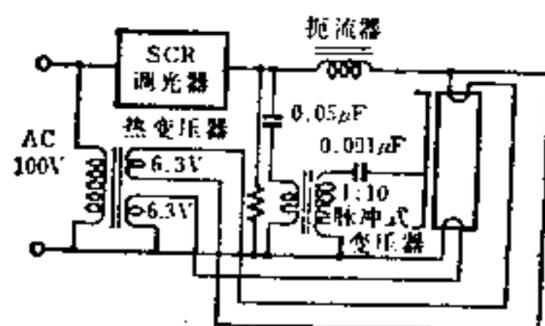


图22-6 预热开灯式荧光灯的调光

22-2 电光式

电光式是做得能够直接看到白炽灯的方式，布置多数白炽灯，利用开关可使文字、绘画变化。

在一面布置抛物反射镜灯时，用 20~30 瓦就可在白昼看得清楚，但是如果着色，红色良好，而蓝色在白昼就看不清楚。在夜间红、蓝、绿色都看得清楚，对这些混合色感到畅快也是可能的。

22-3 内照式广告牌

用乳白色丙烯树脂板建造箱状广告牌并在内部装入荧光灯，这种内照式广告牌，与露出骨架的氖灯广告不同，即使在白昼观看，也可具有美观的效果，但内部的荧光灯开灯后在白昼几乎不能判别。在内部装入三基色的荧光灯，由于闪光或调光，可以感到颜色的效果畅快。装入红、绿、蓝色荧光灯，使其徐徐变化，混合色就变为红→橙→黄→绿→深蓝→蓝→深红色→红，由于柔和的气氛而减少了华丽的程度。

在设计内照式广告牌的构造时，要作以下的考虑：

(1) 对温度变化的考虑 丙烯树脂板的实用耐热温度为 80℃，因此不要超过它。在可

燃性制品的情况下不要在内部安装需要高压的氙放电灯。丙烯酸树脂板对于框架或骨架的金属板具有数倍的热膨胀系数，因此在安装时要采用对伸缩不受影响的材料。

(2) **湿度的影响** 丙烯酸树脂在常温下的饱和吸水率大约为2%，这样在干燥时要产生大约0.4%的膨胀。对于温度和湿度要预先采取合计0.5%左右的不受影响的材料。

(3) **风雨的影响** 在室外使用的广告牌或广告塔受风破坏，为使行人不致受到损害，必须采取足够的安全系数来安装。又雨水浸入后，不仅成为电气系统故障的原因，而且随着附着于内表面的尘土流淌下来，会产生难看的污垢，内部的清扫是极困难的。软质氯化乙烯作为填料，由于它的塑性会在丙烯酸树脂板上发生裂纹，因此是不适用的，可用合成橡胶。

22-4 氙灯广告

22-4-1 颜色和亮度

氙灯广告的颜色由于封入了氙气，亮度也就显得明亮。白、蓝、绿等色由于封入了氙和汞的气体，并用玻璃内表面的荧光涂料显示出来颜色。白、绿明亮，但是蓝和紫按照原状却不能得到暗蓝色，因此多数使用着色管。这样，和其它颜色相比，要变暗一些。

因此，主要使用蓝色做成的氙光广告牌，稍微离远一些就看不到，会有成为印象平淡的广告牌的危险，因此必须注意。又红色和白色是几乎相同的亮度，这样，如果在氙光广告牌上红色背景出现白色文字，从远处看去，多半不能清晰地辨识出来。文字和背景不仅要变化颜色，而且还要预先变化亮度。

22-4-2 颜色的匹配

希望使红、黄、绿色变化时，不必安装三种氙管。只用红、绿色即可，安装这二者就显出黄色。如将三基色（红、绿、蓝）氙管依次排列，由于开关器或调光器的作用就可以得到黄、深蓝、深红和白色。用少量种类的氙管得到多量的颜色变化，是经济的。

22-5 闪光器和调光设备

22-5-1 闪光器

要使氙放电灯闪光，由一次方面的低压电路进行。在二次方面原则上不必装入闪光器。一般使用鼓式闪光器。

这是在本制滚轴上缠绕纤维等绝缘物，在表面上贴上铜片，电刷和它接触，用电动机使滚轴旋转，而致各个氙放电灯发生闪光。电流断开时，发生火花，对于收音机、电视会发生杂音，因而需要杂音防止器。

22-5-2 调光装置

应用可变电阻可对灯泡、荧光灯、氙管灯调光。特别使三基色的荧光灯、氙管能够混合颜色独立调光，颜色就会徐徐转变，可以显示出柔和的气氛。

(1) **随选滚轴** 如图22-7所示，将CaS光导体一排并列，透明的丙烯圆筒和它相接，在圆筒中预先安装荧光灯作为光源。在丙烯圆筒的表面上贴上黑色纸带，描绘出来程序。由于CaS的阻力变化，而能控制可变电阻调光装置，就可以出现中间色调，程序的变更远比鼓式闪光器容易。

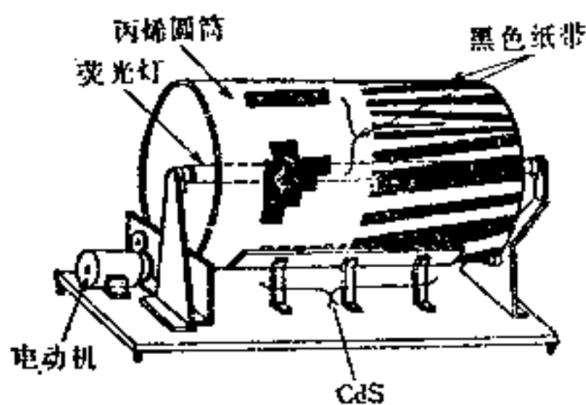


图22-7 随选滚轴

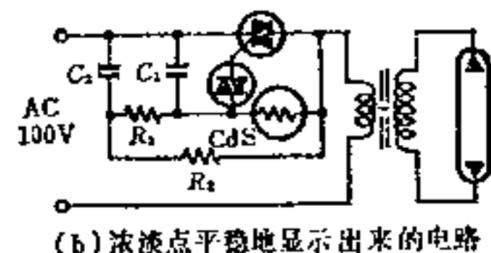
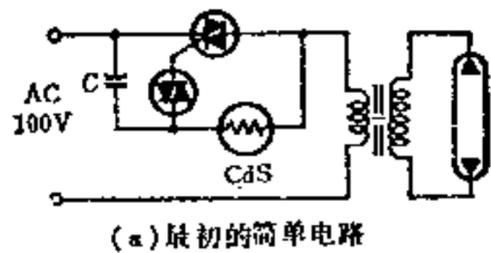


图22-8 调光电路

图 22-8 是由于 CdS 的阻力变化而对氖管灯调光的电路。

(2) 电子电路 由可变电阻进行调光、闪光时，程序可以根据电信号，因此完全可以使用电子计算机的技术。程序的存贮可以使用磁带、磁盘、二极管矩阵、集成电路存贮、微型电子计算机等。按照各个程序进行选择应用即可。

22-6 电光显示装置

电光显示装置是主要以白炽灯为表示元素来表示信息或画像的装置。它是大型的显示装置，具有向多数人传递信息的优点。

22-6-1 二极管矩阵方式

如棒球场的计分牌的数字表示部分所示，固定表示较少的变化时，应用二极管矩阵在表示面上预先做成表示图案。由于图 22-9 所示的 5×7 的灯泡排列，可以表示所有的数字、字母、片假名。如果进一步希望改进字形时，就要使用 6×9 的排列。

图 22-10 是 6×9 时的数字和二极管矩阵。在各个灯泡上并不开灯时，由于电阻而流出额定电流 $1/3$ 左右，以防止骤增电流。

二极管矩阵方式具有以下缺点：灯泡数和表面画面数增多，需要的二极管极多，而且只能表示预先设定的图案。但也有优点，如画面的选择简单，失误动作少，因此常常采用固定表示画面或变化少的画面。

22-6-2 移位寄存器

正如电光新闻所示，在依次送出相邻灯泡的闪光状态的表现时，应用集成电路的移位寄存器传送信息，由此可以驱动可变电阻或晶体管而将灯泡串联到可变电阻或晶体管上。还可用高速传送信息，预先固定画面。这时，也可表现出能够瞬时交替画面。信号线用一根即可；利用调制解调器使用电话线，还可对远地电光表示板进行遥控操作。

图 22-11 表示移位寄存器方式的原理。表示文字在半透明的方眼纸状的纸带 1 上用万能笔等来写，根据光源 2、光电元件 CdS_1, CdS_2, \dots 按照光学方法读出。纸带可由送纸装置移动，按照在纸带端部写出的黑白横条纹 F' ，由在这下面的光电元件 CdS 发生节拍脉冲。读出它们的信号由放大器 3-1, 3-2, \dots 进行放大和波型整形，由移位寄存器 4-1, 4-2, \dots 群的串联输入量输入，节拍脉冲便输入到各个移位寄存器的节拍脉冲端子上。各个移位

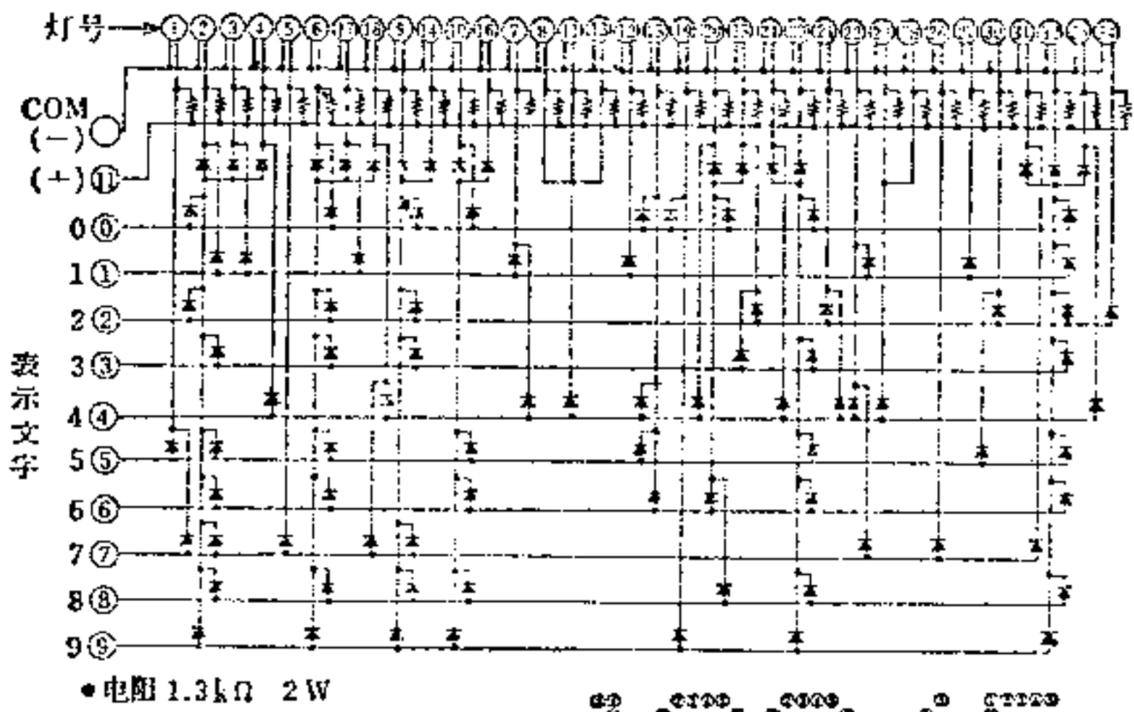
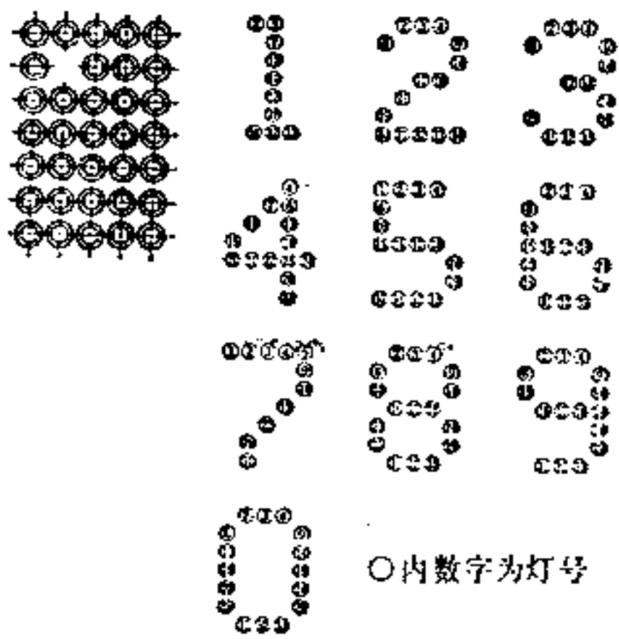


图22-9

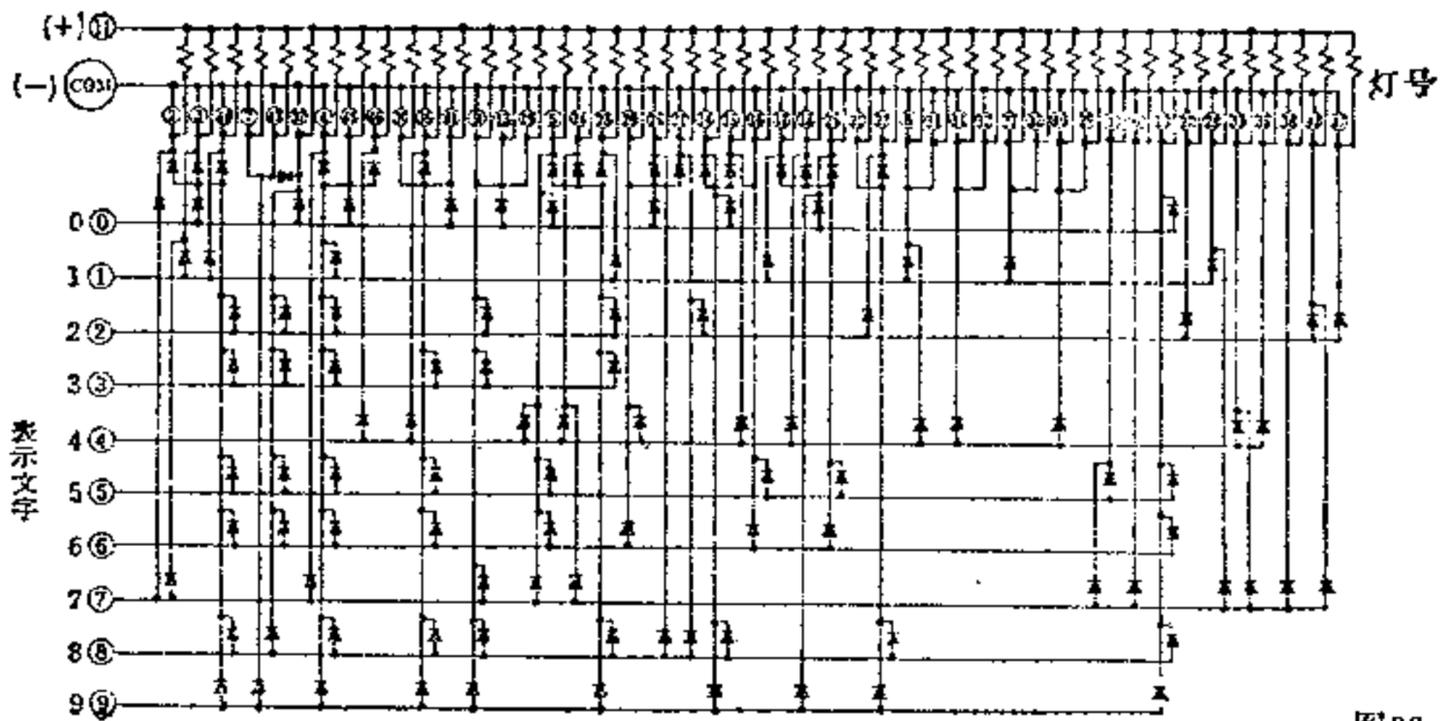
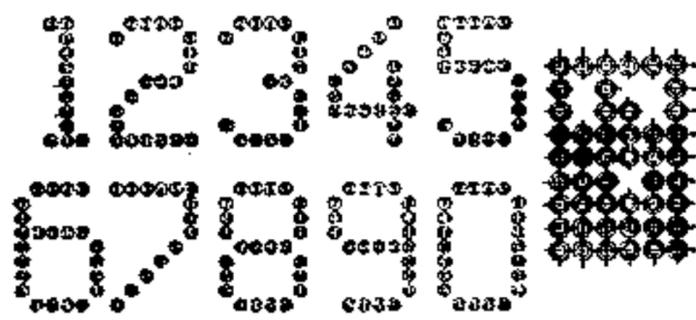


图22-10

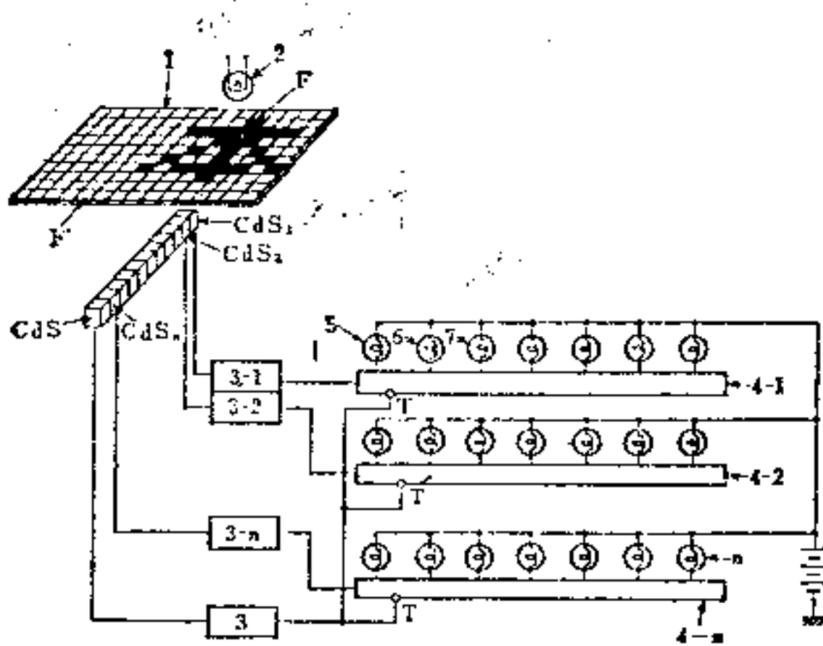


图22-11

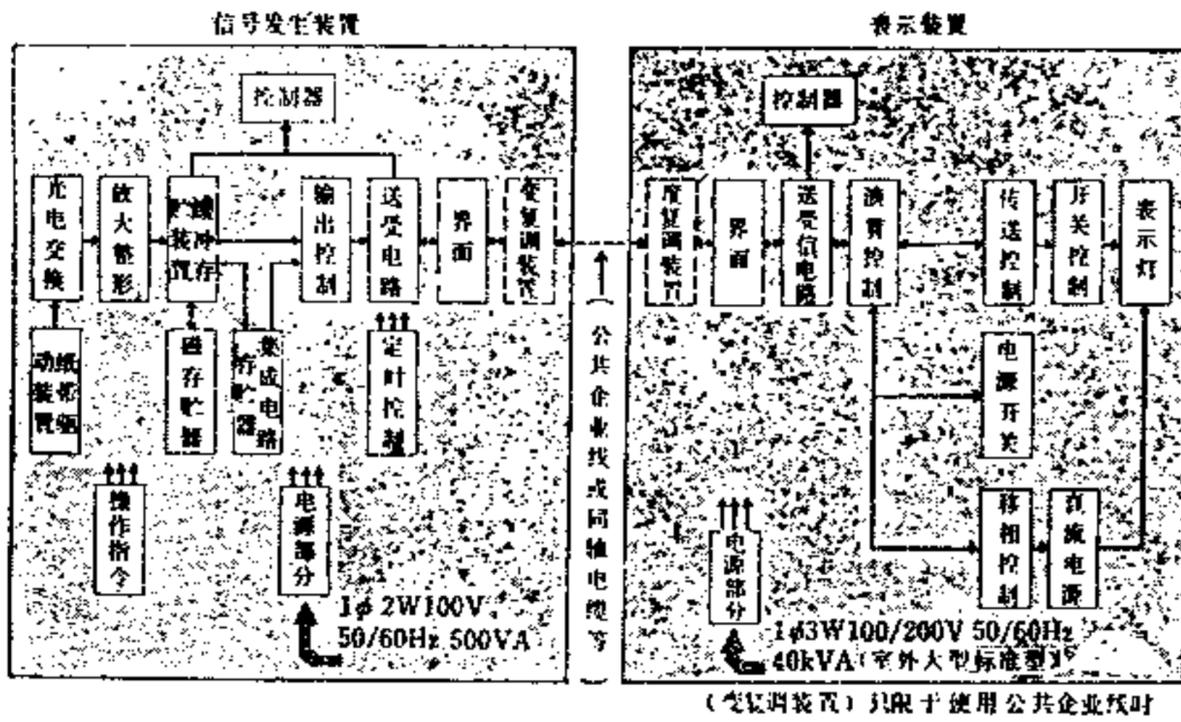


图22-12 电光新闻的方框图

寄存器的并联输入使根据需要将可变电阻、晶体管串联的白炽灯5, 6, 7闪光, 并按照电光新闻的形状移动起来, 进行流动表示。

实际上, 利用磁带装置将这样进行光电变换的信号编集起来, 存贮在自动反向磁带录音机或集成电路存贮器等存贮器中反复放映若干遍。

在远处时使用调制解调器由通讯电路传送。输入不用纸带, 而用汉字发生器将天气预报等需要快报的信息迅速地组成文章, 渐渐进入存贮器。

图 22-12 是方框图的一例。

22-7 大面积图案显示装置

22-7-1 映像广告牌

将灯泡并列在一面, 由于它的闪光而使影画或动画移动的广告牌, 1958年在日本大阪的道顿堀, 1959年在东京的涩谷建造出来, 称做电影广告牌。

将 16 毫米的影片放映在将光电管并列起来的幕上, 应用光电管的信号驱动着与白炽灯串联一起的闸流管。后来, 由于半导体的进步, 光电管成为 CdS, 闸流管成为 SCR(可控硅

整流器), 在银座数寄屋桥出现了。

图 22-13 称做映像广告牌, 使用红、绿、蓝色灯泡, 可以表现色彩, 使用黑白胶片, 将幕三等分, 并将红、绿、蓝的画面做成一个停顿。白炽灯的红色成分强, 蓝色成分少, 因此使蓝色灯泡的瓦数为30瓦, 绿色为 13 瓦, 红色为 10 瓦, 以取得平衡。必须选择各个灯泡的瓦数, 接近全部开灯, 以便从远处看去, 显得近乎白色。

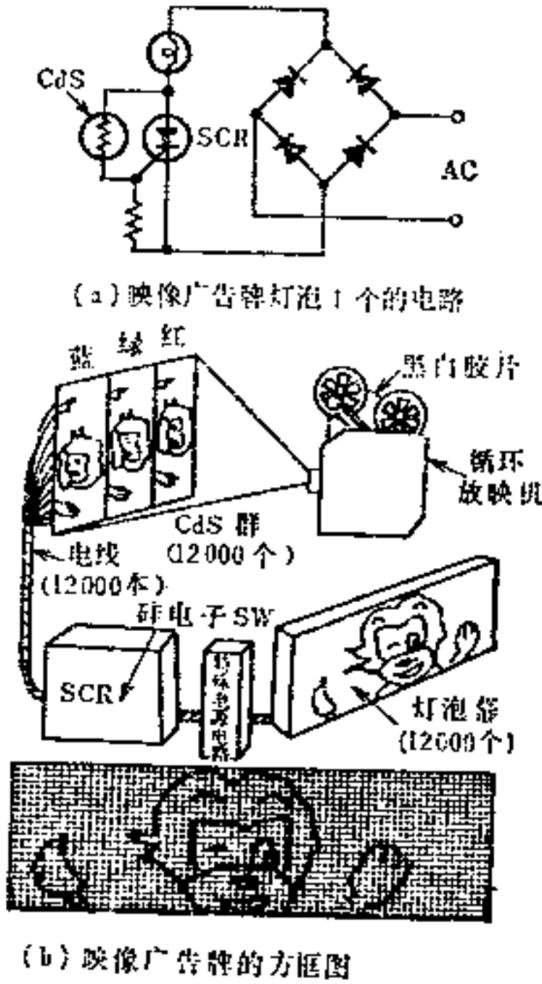


图22-13 映像广告牌灯泡一个的电路和方框图

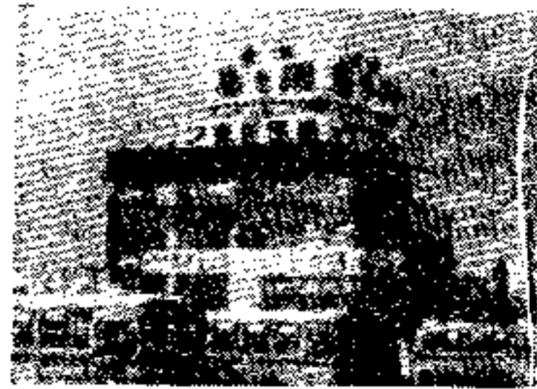


图22-14 电光新闻举例

22-7-2 后乐园的巨形电视

1970年最先在后乐园棒球场建立了电视扫描式的。它是将从电视摄像机和磁带录象机而来的信号反映到灯泡表面上, 其原理如图 22-16 所示。在各个灯泡上串联可控硅整流器, 在垂直扫描线和水平扫描线的交点上以电阻为介质连接可控硅整流器的栅。各个扫描用的开关是由电子开关断流的。各个灯泡的电源将交流 100 伏进行两波整流, 在交换画面时由半周的消弧电路截断电流而致消失, 其次进行扫描就可以保持画面。

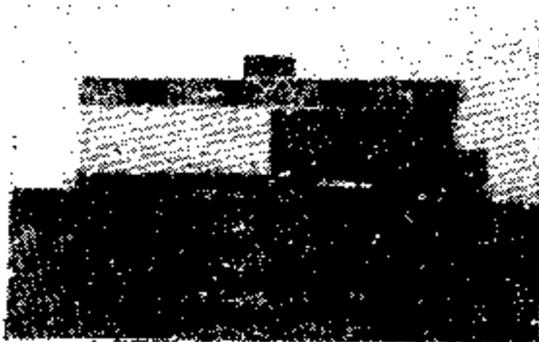


图22-15 电光显示装置举例

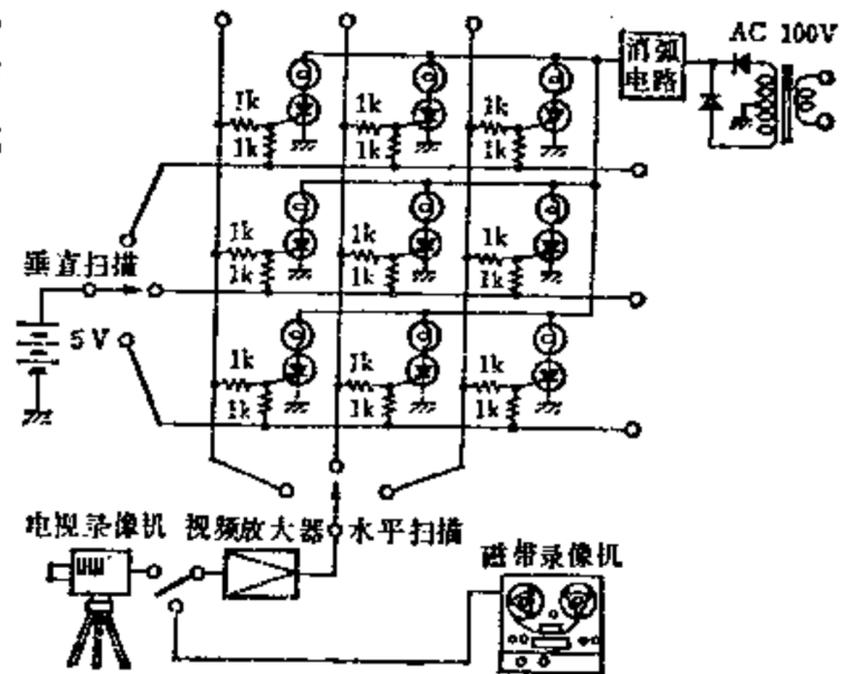


图22-16 巨形电视原理

电视的方式在电视摄象机的情况下垂直频率为电源同步的 50 赫，水平频率为 3200 赫，扫描线为 64 根。在磁带录象机的情况下使用家庭用的磁带录象机，因此垂直频带为 60 赫，扫描线为 64 根，水平频率为 3840 赫。实际上出现在画面上的扫描线为 55 根。画面交换数在摄影机的情况下每秒为 12.5 片，在磁带录象机的情况下每秒为 10 片。停止扫描，由于可控硅整流器的存贮作用可以表示静止画面。



图22-17 后乐园的电光显示装置

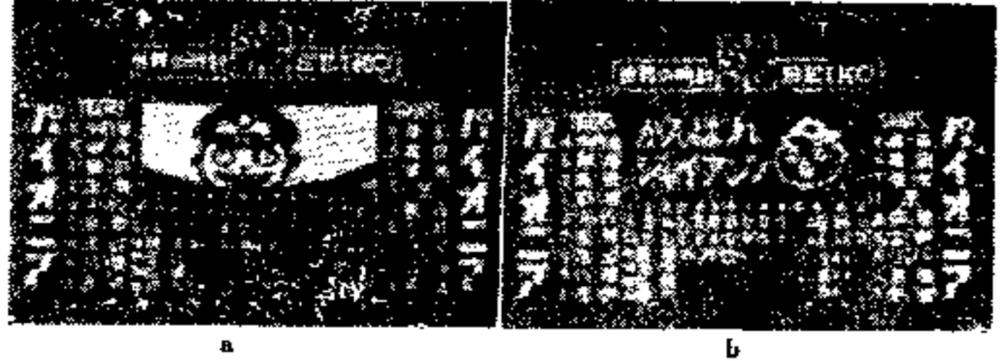


图22-18 后乐园的电光显示装置的显示举例
a—动画；b—字幕

第 23 章

道 路 照 明

泛指的道路照明定义范围涉及很广，而汽车对与其关系密切的公路照明的质和量要求极为严格，为此，本章以该照明为主进行叙述。

23-1 总 论

23-1-1 道路照明的目的和效果

道路照明的主要目的是：当机动车夜间行走在公路上时，能够将必要的视觉信息传递给司机，事先防止由于视觉信息不足而出现的交通事故，同时，可以增加和保证夜间道路交通的全面安全以及舒适感。

许多国家由于设置和改善了道路照明，从而减少了夜间交通事故。在日本及一些国家的调查结果如表 23-1 和表 23-2 所示〔1〕、〔2〕，从中可以看出交通事故能够减少 20~80%。

表23-1 一些国家由于设置了道路照明得到的改善效果

道 路 种 类	国 名	夜间事故减少率 (%)	交通事故的种类
高速公路	美国	40	重大事故
		52	死亡及重伤事故
		62	重大事故
地方干道	英国	76	重大事故
		38	重大事故
		53	重大事故
		61	死亡及重伤事故
		44	重大事故
		30	重大事故
城市道路	英国	45	行人事故
		23	人身事故以外的其他事故
	瑞士	30	重大事故
		36	重大事故
	澳大利亚	57	行人事故
		21	行人事故以外的其他事故
	英国	29	重大事故
30		重大事故	
33		重大事故	

从交通事故的类型来说，根据调查结果也说明由于设置了道路照明而显著减少了交通重大事故，此点在一些报告上已有介绍〔3〕。

表23-2 日本由于设置了道路照明得到的效果
(举例: 名古屋——神户高速公路的立体交叉丰中——吹田段)

气候·昼夜		时 间	设置道路照明以前,1971年(1年) (起)	设置道路照明以后,1972年(1年) (起)	夜间事故减少率 (%)
晴·多云 (干燥路面)	昼		64	78	62
	夜		60	28	
雨·雪 (湿润路面)	昼		45	57	46
	夜		35	24	
共 计		共 夜	109 95	135 52	56

23-1-2 必要的视觉条件

图 23-1 表示了一个驾驶汽车的司机在(高速)公路上行走时,正常情况下前方的习惯视野。为了能够安全和舒适地在公路上运行,必须使司机明确而准确地获得以下一系列的视觉信息及其变化〔4〕,如:



图23-1 汽车司机的前方视野举例

- (1) 道路上有无障碍物或行人? 它们位于何处?
- (2) 道路宽度、线型及构造。
- (3) 道路上是否存在特殊场合(路口、岔道等)及其所在的位置。
- (4) 路面的状况,有无缺陷损伤? 它们位于何处?
- (5) 是否有同时使用该道路的其他车辆(如其它汽车)? 它们的种类,运行速度?
- (6) 道路的外围设施状况(如道路的标志等)。
- (7) 如果前方道路上没有任何障碍物时,能够得到确切的“无障碍物”的信息,(负信息——negative information)。

23-1-3 道路照明的质量

道路照明的质量,一般由以下四个因素确定:(1)路面平均亮度;(2)路面亮度的均匀度;(3)眩光;(4)诱导性。

(1) 路面平均亮度 路面平均亮度是影响能否看见障碍物的最重要因素。由于道路照明就是以把路面照亮到足以看清障碍物的轮廓为原则的,为此要求有相当高的路面平均亮度。

图 23-2 说明在维持无眩光及路面均匀的照明设施条件下,人眼的最小亮度辨别比 L_r/L_0 与路面平均亮度 L_r 之间的关系曲线〔6〕。通常,实际道路照明的 L_r/L_0 值可以达到 1.5 左右,因此,路面平均亮度 L_r 就需要 $1 \sim 2 \text{ cd/m}^2$ 。

(2) 路面亮度的均匀度 路面亮度分布的均匀程度称为均匀度,通常以下式表示:

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{L_r} \tag{23-1}$$

式中的 L_{\min} 及 L_r 分别为前方路面上的最小亮度和平均亮度。

$$U_1 = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \tag{23-2}$$

此处的 L_{\min} 及 L_{\max} 分别为在汽车运行的车道中间的道路轴线上的最小亮度及最大亮度。

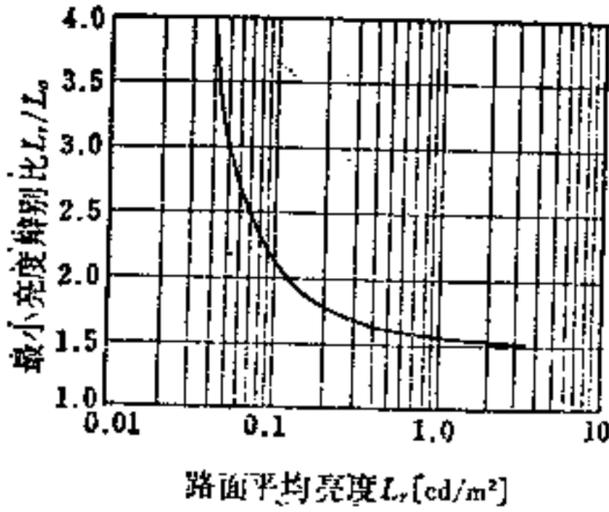


图23-2 路面平均亮度 L_r 与最小亮度辨别比 L_r/L_0 的关系 (L_0 为障碍物的亮度)

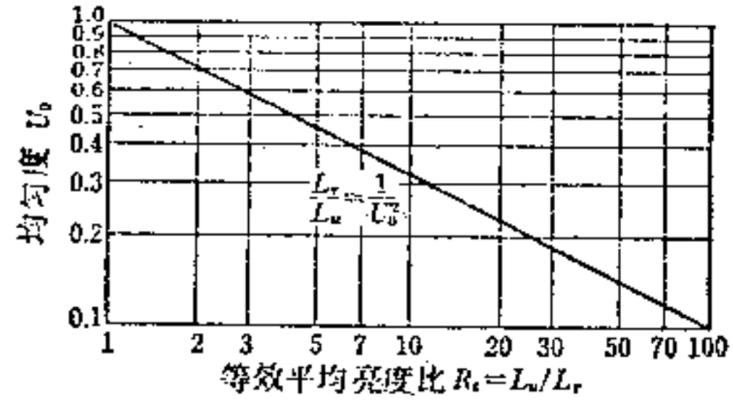


图23-3 觉察障碍物所需的路面等效平均亮度比($R_e = L_0/L_r$)与亮度均匀度 U_0 的关系 (L_0 为路面亮度分布均匀时, 觉察障碍物所需的路面平均亮度)

U_0 影响前方路面上的障碍物能否看见, U_1 则影响前方路面上主观感觉到的明暗不均程度。一般道路要求: $U_0 \geq 0.4$, $U_1 \geq 0.5 \sim 0.7$ [5]。

影响障碍物可见程度的 U_0 与路面平均亮度 L_r 关系密切。这主要是因为由于 U_0 降低而降低了的障碍物能见度, 可以通过提高路面平均亮度 L_r 来补偿 [7]。这一关系可由图 23-3 来说明。

这也就是说, 为了使在均匀度 U_0 有所变化时, 仍旧能保持障碍物的可见程度稳定不变, 就必须用增减相应于均匀度 U_0 的平均亮度 L_r 来满足下列关系:

$$L_r = \frac{L_0}{U_0^2} \tag{23-3}$$

式中 L_0 为当 $U_0 = 1$ 时 (路面上亮度分布均匀), 觉察障碍物所必需的路面平均亮度。

(3) 眩光 照明设施所产生的眩光, 不仅能够降低司机的视见能力, 而且损伤它的舒适度。如将引起降低能见度的眩光, 控制到不致发生不舒适的程度, 这在实际使用当中就不会出现问题 [8]。

因眩光而引起的不舒适程度, 可用下式求出的眩光控制指数 G 来评价 [9], [10]。

$$G = 13.84 - 3.31 \lg(I_{80}) + 1.3 \lg \left[\left(\frac{I_{80}}{I_{88}} \right) \right]^2 - 0.08 \lg \left(\frac{I_{80}}{I_{28}} \right) + 1.29 \lg(F) + 0.97 \lg(L_r) + 4.41 \lg(h') - 1.46 \lg(P) + \Delta C \tag{23-4}$$

式中, I_{80} 、 I_{88} 各为平行于道路轴与灯下垂直线为 80° 及 88° 方向时, 照明器的光强 (cd); F 为司机所见到的照明器发光面积 (m^2); L_r 是路面的平均亮度 (cd/m^2); h' 为自司机眼睛的高度到照明器的高度 (m); P 为每公里的照明器数量 (台); ΔC 为不同灯种的修正系数。

上式计算出来的眩光控制指数 G 与主观不舒适程度的关系如下, 一般道路要求 $G = 4 \sim 6$ 。

- $G = 1$: 无法忍受
- $G = 3$: 干扰
- $G = 5$: 允许的极限
- $G = 7$: 满意

$G = 9$ ：无影响

(4) 诱导性 沿着道路恰当地布置照明器，可以给司机提供有关前方道路的方向、线型、倾斜度等视觉信息，这称为照明设施的诱导性。

当确定照明器的配置时，除了要充分考虑路面上的亮度分布外，还要通过透视图来检查其诱导性是否正确。此点对于道路上的车流分合、转弯、立体交叉等部位尤为重要（参照图23-4）。

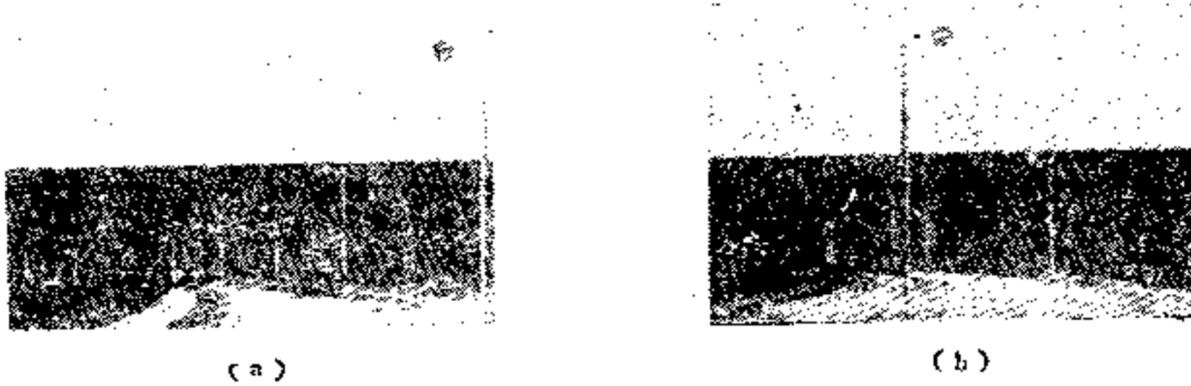


图23-4 道路线型与照明器配置的关系（诱导性）

(a) 单侧配置：由于是按照弯道的曲线相应地确定照明器间距及配置照明器，因此可以准确地预先了解前方道路的线型。(b) 交错配置：由于没有按照弯道线型恰当地确定照明器间距和配置照明器，因此就不能正确地预先判断前方道路的线型

(5) CIE的道路照明国际建议^[5] 以上所述有关道路照明的质量，已由CIE的TC-4.6道路照明技术委员会在1977年公布的“有关各种道路照明的质量标准的建议”中说明，如表23-3所示。相应的道路分类如表23-4所示。

表23-3 CIE对各种道路照明的推荐值（主要内容）

道路种类	道路周围明暗程度	路面亮度 $L_r(\text{cd}/\text{m}^2)$	亮度均匀度		眩光控制 指数 G
			U_0	U_1	
A	明、暗	2	0.4	0.7	6
B	明	2	0.4	0.7	5
	暗	2	0.4	0.7	6
C	明、暗	2	0.4	0.5	5
	暗	1	0.4	0.5	6
D	明、暗	2	0.4	0.5	4
E	明	1	0.4	0.5	4
	暗	0.5	0.4	0.5	5

表23-4 CIE的道路分类

道路种类	交通量	车速	交通类型	道路状况	举例
A	大	高	机动车用	有中央隔离带，无平面交叉，在规定地点出入	高速公路
B				机动车专用，与行人和低速交通工具隔开	干线
C	大	中	机动车专用 人车混用	重要的人、车混用道路	环道 放射线
D	较大	低	人车混用	市内特别是商业中心内的道路	主要街道
E	中	低	人车混用	住宅区道路以及与上述A~D型连接的道路	住宅区道路

23-2 道路照明光源和照明器的选择

23-2-1 道路照明光源

用于道路、隧道、广场照明的光源，应当根据光源的效率、光通量、寿命、光色、控制配光的难易程度及使用环境等因素来进行综合比较而选定。通常使用的光源及其应用地点可如表 23-5 所示。以下概要说明这些灯的特性。

表23-5 用于道路照明的光源

使用场合	光源类型
道路照明	高压钠灯、高压荧光汞灯、低压钠灯
隧道照明	低压钠灯、荧光灯、高压钠灯*、高压荧光汞灯*
广场照明	高压荧光汞灯、高压钠灯、金属卤化物灯、氙灯**

* 主要用于出入口；

** 用于特殊场合。

(1) **光效** 光源的光效(效率)，通常是以光源的总光通量(lm)/光源的功率(W)表示，但实际上应用镇流器的输入功率，亦即灯的功率与镇流器消耗的功率之和来计算综合光效，如下式：

$$\text{综合光效} = \frac{\text{光源的总光通}}{\text{镇流器的输入功率}} \quad (\text{lm/W}) \quad (23-5)$$

(2) **总光通量** 光源总光通量的大小，不仅影响直接配光型照明器的安装间距，而且还影响照明的设备费、路面亮度分布及眩光程度。因此，决定光源的光通量必须根据所需要的亮度(照度)水平、灯的安装间距及安装高度慎重考虑。

(3) **寿命及工作特性** 在厂商的样本中发表的额定平均寿命，是在一定试验条件下得出的寿命值。实际上，灯的寿命受着各种点灯条件、点灭次数的影响，不能认为所有的灯，在任何条件下，都能点到额定寿命。

另外，灯的总光通量随着点灯时间的增加而降低是个普遍现象，因此，实际上在道路照明设施中，按照灯的额定寿命使用未必就是上策，应当综合考虑灯的工作特性，照明器及灯泡因污染而使光通量有所损失，以及应当维持的路面亮度等因素，以决定最合适的灯泡更换周期。通常这一周期的时间，约为额定平均寿命的70~80%。

(4) **光色** 光色是灯的表观色。在道路照明中，利用光色的差别来表示特殊场合，区分不同的路线，这是作为一种标志或者诱导的目的来使用的。在利用光色差异来明确地表示一个特殊场合时，办法是用许多灯，而不是用一个灯，这是由于许多灯具可以有组织地表示出特定的形象效果。

(5) **显色性** 灯的显色性是由其光谱能量分布决定的。在一般亮度及照度水平较低的道路，主要是以察觉路上的障碍物为主，依靠障碍物与其背景的亮度差即可察觉，至于灯的显色性则无关紧要。

然而，人的眼睛即使在这样水平的条件下，仍旧能够觉察颜色的。因此对于行人较多和较重要的道路上，无论是对人的颜色还是对交通中的重要色彩来说，灯的显色性都是比较重

要的。

(6) **控制配光的难易程度** 在照明器内, 灯的形状及发光面积对照明器的配光影响极大。通常, 灯的发光面积愈小, 它的配光愈容易控制。例如, 在高压钠灯或高压汞灯中, 发光面积小的透明型要比漫射型的配光较易控制。但是, 通常也有另一种倾向, 如在照明器中装的是透明型灯泡, 在雨天时, 路面会出现强烈的反光, 而且光的分布也很不好。因此, 对这些问题在进行照明器的光学设计时应予以注意。

(7) **使用环境条件** 灯泡一般都是在照明器的保护之下使用, 严格说来, 外界环境的变化对灯泡的直接影响很小。然而对于环境温度却要根据现场实际情况加以充分探讨。在道路照明中, 通常出现的是低温问题, 也就是在寒冷地区使用时, 会使灯泡的总光通降低, 还会使一些启动电压高的灯启动困难, 这些都是放电灯特有的问题。

以上是选择光源时应考虑的一般问题, 在进行实际设计时, 还要对建设费用、维修费用等经济问题加以综合判断。

在道路照明中使用的有代表性的光源的各种特性如表 23-6 所示。

表23-6 用于道路照明的典型灯种的各种特性

灯 型	高压钠灯 (漫射型)	高压荧光汞灯	金属卤化物灯 (漫射型)	低压钠灯	荧光灯
功率 (W)	400	400	400	35	40
总光通量 (lm)*	40000	21000	30000	4600	3000
综合光效 (lm/W)**	87	47	65	78	55
平均寿命 (h)	12000	12000	9000	9000	10000
光色	橙白色	白色	白色	橙黄单光色	白色
色温 (K)**	2100	4100	4500	—	4200
显色指数(R _a)**	稍差(R _a ≈27)	一般(R _a ≈43)	好(R _a ≈68)	差	好(R _a ≈64)
调光减光性能	可以	可以	不能	不能	可以
低温使用温度(°C以上)	-20	-5	-5	-20	5
启动时间(min以下)	8	8	8	20	即刻
再启动时间(min以下)	3	10	15	即刻	即刻

* 表示用于道路照明计算的标准值。
** 略值。

23-2-2 道路照明用镇流器

道路、隧道、广场的照明光源几乎全都是放电灯, 镇流器的优劣直接影响着灯泡的光效和寿命, 因此, 必须选用与灯种、功率以及电源状况相匹配的镇流器。

用于道路照明的镇流器种类, 除了按其工作电压、频率周波数区别以外, 尚有按一般型、定功率型、调光型的区别。目前, 无论任何一种镇流器, 都内装有补偿功率因数的电容, 因此都是高功率因数型的。一般型镇流器适用于电源电压比较稳定的地方, 定功率型镇流器适用于电源电压波动较大的地方以及配电容量较小的地方。调光型则具有调整功率和减少总光通量的功能(通常调整功率约 60%, 总光通量约 50%), 实例有应用于高压钠灯、高压汞灯以及荧光灯的。

通常, 镇流器不宜装在湿度大和气温高的环境内。否则会使绝缘性能恶化, 本身温升过高, 镇流器的寿命明显缩短。

23-2-3 道路照明照明器

道路照明用的照明器的主要作用是控制配光及保护光源。在选择照明器时，应充分注意以下各点：

- (1) 照明器的配光特性是否符合照明的目的？能否适合于设置该照明器场所的几何条件？
- (2) 形状和尺寸是否小而坚固？安装、维护是否方便？
- (3) 材料的耐腐蚀性能是否良好？是否施以表面处理（此点对于应用在经常受到汽车排出的烟害以及盐害地区的照明器尤为重要）？

道路照明器的配光，是在对照明器设置场所的情况（道路周围的明暗）、路面亮度的均匀度以及眩光等进行分析之后决定的。通常使用的有截光型和半截光型。这主要是为了防止眩光。周围比较亮的街道适合使用半截光型，周围比较暗的街道则宜采用截光型照明器。

在日本工业标准 JIS C 8131 “道路照明器”中规定了配光型式^[11]如表 23-7 及表 23-8 所示，图 23-5 是一个现在通用的典型道路照明器。

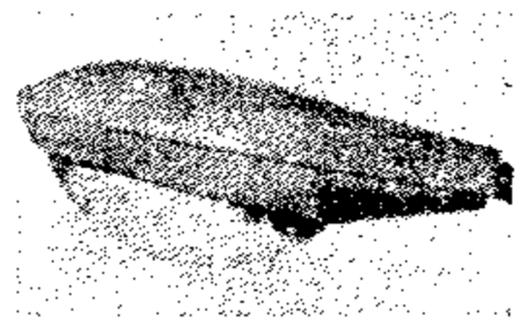


图23-5 典型的道路照明器（截光型）

表23-7 道路照明器的形式和配光的规定（眩光控制）

照明器型式	光强 (cd/1000lm)	
	与垂直线为90°	与垂直线为80°
截光型	10以下	30以下
半截光型	50以下	120以下

(注) 水平角90°时也适用本表。

表23-8 道路照明器的形式和配光的规定（最大光强控制）

照明器形式	光强 (cd/1000lm)	
	与垂直线为65°	与垂直线为60°
截光型	—	200(180)以上
半截光型	190(170)以上	—

注：水平角65°~90°范围内的任何角度都列于本表值内，括弧内数据系指低压钠灯及荧光灯。

23-3 道路照明的设计

23-3-1 照明方式

(1) **灯杆照明方式** 照明器安装在高度为 15m 以下的灯杆顶端，沿道路布置灯杆，这种方式现在应用最广泛。它的特点是：可以在需要照明的场所任意设置灯杆，而且可以依道路线型变化而配置照明器。由于每个照明器都能有效地照亮道路，所以不仅可以减少灯的光通量，比较经济，而且能在弯道上得到良好的诱导性。因此，可以应用于道路本身、立体交叉、停车场、桥梁等处。实例如图 23-6 所示。这种照明方式的缺点是：在大规模的立体交叉、枢纽点、收费处广场等需要照明的范围广、线型复杂、视野广阔的地方采用这种灯杆照明，就会出现灯杆林立的混乱状况，有损白天的美观，入夜则形成一片“光海”，而且灯杆过

51101/2

多，维修工作量也会很大。

采用灯杆照明来照亮道路，照明器、灯杆与道路剖面的相互位置关系如图 23-7 所示。

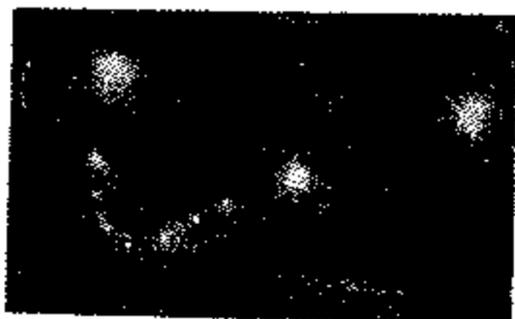


图23-6 整条道路应用灯杆照明的例子

光源：高压荧光汞灯HF400
 照明器：700W用半截光型道路照明器
 灯杆高度： $H = 12\text{ m}$
 间距： $S = 45\text{ m}$
 路面平均亮度： $L_p = \text{约} 1.0\text{ cd/m}^2$
 路面平均照度： $E = \text{约} 20\text{ lx}$

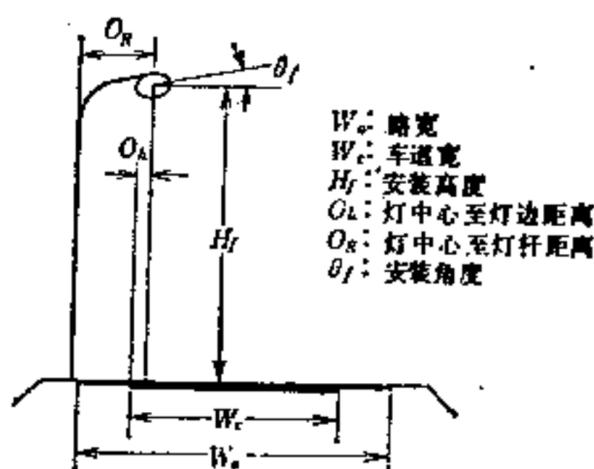


图23-7 照明器、灯杆与道路剖面的相互位置关系

(a) 照明器的安装高度 (H_f) 一般来说，加大照明器的安装高度可以减少眩光，增加整个照明设施的舒适感。同时，由照明器形成的亮度分布既大且宽，因此可以减少必要的照明器数量，仍然能够得到同样的亮度均匀度。

但从另一角度来看，由于提高了安装高度，则会提高灯杆的成本，同时，溢向路面以外的光也会增加，这就会形成总效率的降低。按照以往的经验，灯杆高度应以 $10\sim 15\text{ m}$ 为经济。

(b) 有效悬挑长度 (O_L) 在干燥路面的情况下，如加大有效悬挑长度，可以使路面平均亮度增高，但是，在雨天道路湿润的时候，路面两侧（路肩）的亮度将是十分低的，并行的人行道和道路两边的可见度会很低。对于有效悬挑长度大小不同而引起的雨天路面亮度分布的差异，如图 23-8 所示。

(c) 照明器的安装角 (θ_f) 虽然不增加平均亮度和亮度均匀度，即在平均照度一定的情况下，如加大照明器的安装角度，仍然会加大不舒适的眩光。一般安装角度控制在 5° 左右。

(d) 照明器的布置和排列 照明器的布置和排列基本上有四种，如图 23-9 所示。这可以根据道路宽度、结构情况的不同，独立的或成组的使用它们。

一般灯杆式道路照明的照明器安装高度、悬挑长度和安装角的关系，如表 23-9 所示。由



图23-8 由于有效悬挑长度大小不同而形成的路面亮度分布的比较



图23-9 照明器的基本排列方式

表23-9 照明器的安装高度、有效悬挑长度及安装角

光通量 $F(lm)$	安装高度 $H_f(m)$	有效悬挑长度 $O_h(m)$	安装角 $\theta_f(度)$
25000以下	10	$-1 \leq O_h \leq 1$ (发光部位长度 $l < 0.6m$)	5°
35000~50000	10	$-1.5 \leq O_h \leq 1.5$ (发光部位长度 $l > 0.6m$)	5°

表23-10 照明器的排列方式和安装高度

排列方式	照明器型式	截光型	半截光型
	单侧、中央 交错 对称	$H_f \geq W_c$ $H_f \geq 0.7W_c$ $H_f \geq 0.5W_c$	$H_f \geq 1.2W_c$ $H_f \geq 0.8W_c$ $H_f \geq 0.6W_c$

照明器类型和路面宽度来决定排列方式和安装高度的关系，如表 23-10 所示。至于照明器的安装间距，因其关系到路面亮度的均匀度，所以是由照明类型来决定的，如表 23-11 所示。

(2) 高杆照明方式 在15~40m的高杆上装有大功率光源的多个照明器，以少数高杆进行大面积照明的方法，就是所谓的“高杆照明”。这种照明方式适用于复杂的立体交叉、汇合点、停车场、收费处广场等大规模的广场照明。

表23-11 照明器的安装间距

照明器型式	安 装 间 距
截光型	$3 H_f$ 以下
半截光型	$2.5 H_f$ 以下

图 23-10 说明了一个在道路汇合点运用高杆照明的例子。这种照明方式具有以下优点：它由高处照亮路面，路面上的亮度均匀度极为良好。而且还可以在比较远的地方就使司机预感到将要接近道路汇合点或立体交叉了。此外，由于灯杆位于车道之外，所以在换灯泡和清扫照明器的时候，都无需另有专门的交通限制以保障安全，不会影响交通，可以随时进行维护作业。这种照明的缺点是：投到路外的光较多，因此较其它照明方式来说，效率较低，而且设备及维修费往往比较昂贵。

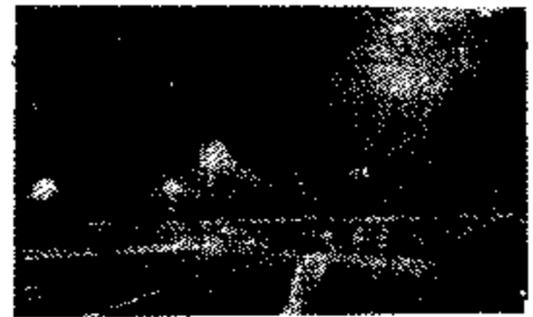


图23-10 用于汇合点的高杆照明

光源：高压钠灯NH400、NH250F
 照明器：圆形投光器，半截光型透射照明器
 杆高：40m
 亮度、照度：道路本体
 $L_r = 1.6cd/m^2$
 $E = 约20 lx (初始)$
 坡道 $E = 15 \sim 20 lx (初始)$

(3) 悬索照明方式 在道路中间的隔离带上树立高为15~20m的灯杆，在这些灯杆之间拉起钢丝索，把照明器悬挂在钢丝索上进行照明，这就是“悬索照明”。这种照明方式宜用于有隔离带的道路。一般灯杆间距为50~80m，照明器的安装间距约为其安装高度的1~2倍。

这种照明方式的优点是：照明器在道路的横剖面方向配光容易控制，可以得到极好的路面亮度均匀度。在设施建设完工以后，如需增减路面的亮度或均匀度，也无需相应地再花费较多的设施建设费用就能办到。此外，照明器排列整齐，有很好的诱导性。它的光轴与道路轴线垂直，这样，可以减少因路面干湿不同而引起的亮度变化，即使在路面完全湿润时，也能保持良好的路面亮度

均匀度。而且，在雾天里形成的光幕效应也较少〔12〕。

图 23-11 举了一个应用这种照明方式的例子，这种方式的缺点是不能用于无中间隔离带的道路和曲率半径较小的弯道。

(4) 栏杆照明方式 沿着道路轴线，在车道两侧地上约 1 m 高的位置设置照明器。这种方式仅适用于车道宽度较窄的场合，如用于坡度较大的路段和弯道，则要特别注意眩光的控制。

这种照明方式的优点是：不用灯杆，可使白天景色更好一些，如用于飞机场附近，可以很容易地避开航线上的障碍问题。但是，它的缺点在于：建设费用和维护费用都比较高，照明器易被污染，对侧路面上发生强烈的阴影效应，以及存在路面亮度分布问题等等，因此这种照明方式只能限定用于一定的特殊场合。



图23-11 在道路上应用悬索照明(荷兰)

光源：低压钠灯135W
照明器：悬挂式道路照明器

23-3-2 照明计算

(1) 路面亮度分布的计算 道路照明中重要的是司机所见的路面必须是明亮的(具有足够亮度)，而且是均匀的。因此，道路照明设计依据的标准，不是路面上的照度而是亮度。路面亮度及其分布，除了受到上述照明条件(照明器的配光及排列方式)的影响外，还要受到路面的(光学)反射特性影响。所以，在进行道路照明设计时，必须正确、全面了解在各种条件下的路面反射特性。路面的反射特性因光的入射方向和观察位置不同而异。为此，路面反射特性是根据亮度系数 $q_p(L_p/E_p)$ 计算的，其中 L_p/E_p 是在路面上各点接受了各种入射方向的光所形成的、从司机的视线方向所观测到的亮度 $L_p(\alpha = 1^\circ)$ 和该点的照度 E_p 之比(参照图23-12)。

用于亮度计算的路面反射特性可以根据表示路面颜色明度的平均亮度系数 q_0 和表示路面光泽程度的两个镜面系数 S_1 、 S_2 来分类〔13〕， S_1 、 S_2 可由下式求出(参照图23-13)：

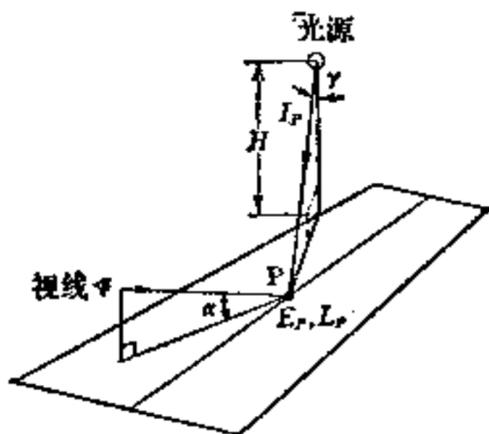


图23-12 路面反射特性测定的几何关系

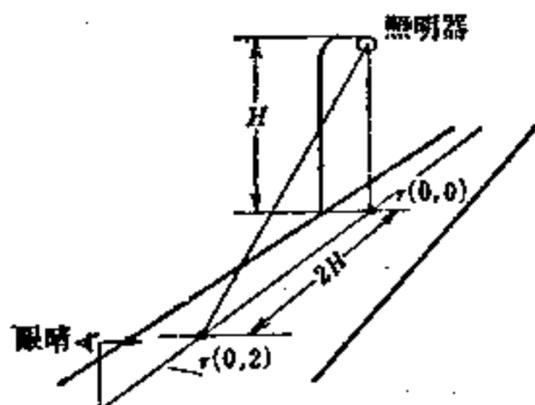


图23-13 路面亮度换算系数 $r(0,0)$ 及 $r(0,2)$ 的位置

$$S_1 = \frac{r(0, 2)}{r(0, 0)} \tag{23-6}$$

$$S_2 = \frac{q_0}{r(0, 0)} \tag{23-7}$$

此处的 $r(0, 0)$ 是在照明器正下方的亮度换算系数， $r(0, 2)$ 是在通过照明器正下方与道路轴线的平行直线上，从照明器在路面上的垂直投影点向观测者一侧，距离为 $2H$ 处

的亮度换算系数; q_0 为平均亮度系数 (有关 r 的解释参照下文)。

国际照明委员会 (CIE) 根据对于2000种以上的路面测定及计算结果, 将通常使用的路面分为四种, 用它来代表不同种类的路面作为标准路面。各种标准路面的 q_0 、 S_1 、 S_2 值如表 23-12 所示。其中标准路面 R_1 的等亮度换算系数曲线表示在图 23-14 中。

表23-12 CIE标准路面的反射特性系数

标准路面	q_0	S_1	S_2	适用路面材料
R_1	0.10	0.25	1.53	混凝土
R_2	0.07	0.58	1.80	粗骨料沥青
R_3	0.07	1.11	2.38	密实骨料沥青
R_4	0.08	1.55	3.03	细骨料沥青

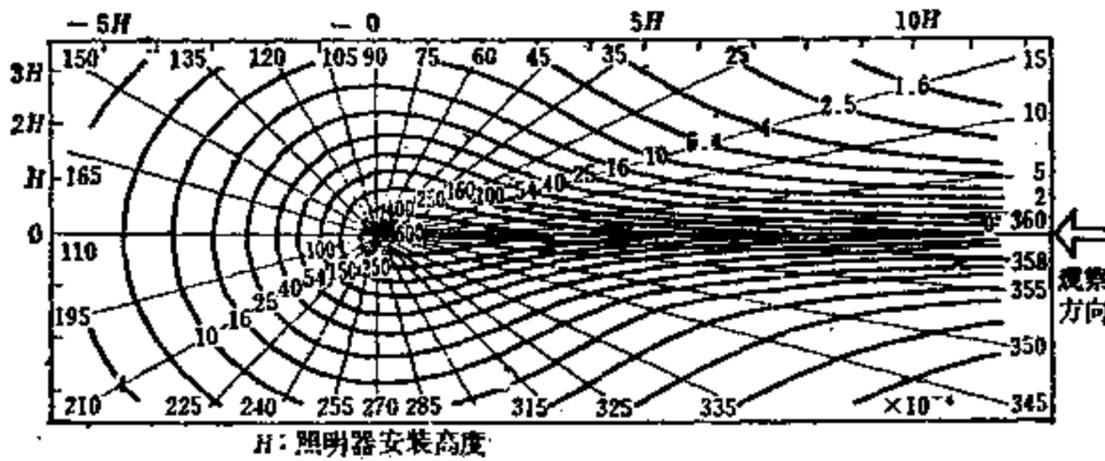


图23-14 R_3 标准路面的等亮度换算系数曲线
($q_0 = 0.07$, $S_1 = 1.11$, $S_2 = 2.38$)

为了进行路面亮度计算, 首先要测定路面的反射特性系数 (q_0 、 S_1 、 S_2) [14], 对照表 23-12 选择与该测定值具有相近反射特性系数的标准路面。其次, 利用该反射特性的分布 (r 分布) 按下式计算路面上任一点 P 的亮度 L_p (参照图 23-12):

$$L_p = q_p E_p = (q_p \cos^3 \gamma) \times \frac{I_p}{H^2} = r_p \times \frac{I_p}{H^2} \quad (23-8)$$

式中, L_p 为 P 点的路面亮度 (cd/m^2), q_p 为路面上 P 点的亮度系数即 L_p/E_p , E_p 为路面上 P 点的水平照度 (lx), γ 为对 P 点的光线入射角 (度), I_p 为照明器射向 P 点的光强 (cd), H 为照明器的安装高度 (m), r_p 为关于 P 点的亮度换算系数。

在实际的照明设计中, 还可以由式 (23-8) 中计算出一个照明器的路面亮度分布, 按照照明器的排列布置迭加起来, 亦可求出整个照明系统 (照明设施全体) 的路面亮度分布。

(2) 路面平均亮度计算 对于通常的道路照明设施来说, 路面的平均照度与平均亮度之间是比较单纯的比例关系, 因此, 在求路面的平均亮度时, 无须进行如前所述的复杂运算, 只用下式简易计算即可:

$$L_p = \frac{FNUM}{KWS} \quad (23-9)$$

式中, L_p 为路面平均亮度 (cd/m^2); F 为光源的光通量 (lm); N 为一系数, 在单侧排列及交错排列时 $N = 1$, 在对称排列时 $N = 2$; U 为利用系数; M 为维护系数; W 为路宽 (m); S 为安装间距 (m); K 为平均照度换算系数 [$\text{lx}/(\text{cd}/\text{m}^2)$]。

利用系数就是光源总光通量中投射在车道整个宽度的路面上的光通量比例, 这可以在确

定了照明器种类之后,根据其配光特性、路宽、安装高度、有效悬挑长度及安装角求出。

维护系数是由于照明器的污染及光源因点灯时间加长而引起的光通量衰减,以此与初始光通量的比例而定出。在道路照明中使用的维护系数如表23-13所示。

平均照度换算系数是在得到 1 cd/m^2 的路面亮度时,所必需的路面平均照度值。根据对目前的照明设施的实测结果,在采用灯杆照明的时候,可采用表23-14所给出的系数。

表23-13 道路照明的维护系数 (M)

交通量 (千辆/日)	城 市	郊 区
7 以下	0.70	0.75
7~15	0.65	0.70
15 以上	0.60	0.65

表23-14 平均照度换算系数 (K)

路面种类	平均照度换算系数 [$\text{lx}/(\text{cd}/\text{m}^2)$]
沥青	15
混凝土	10

23-4 广场和其它照明

23-4-1 广场照明

与机动车交通有关和必须进行照明的广场有:车站前广场、机场前广场、转盘、公共汽车-货车终点站、立体交叉、服务点、停车场、收费处广场、一般停车场等。

这些广场的形状与面积既无定形又式样繁多,因此,设置照明设施必须抓住广场的固有特色,充分发挥广场的机能。

一般情况下,设计此类照明应当考虑以下各点:

- ① 足够的明亮;
- ② 整个广场的明亮程度要均匀一致;
- ③ 眩光要少;
- ④ 结合环境,造型美观;
- ⑤ 设计灯杆,要考虑周围的情况,不要影响广场的使用功能。

(1) **照明方式** 广场的照明方式可以根据广场大小、形状、周围情况的不同,采用灯杆照明(见23-3节)、高杆照明或悬索照明中任何一种方式,或者几种方式结合使用。

(2) **光源和照明器的选择** 广场照明用的光源和照明器可以按23-2节所述各点进行选择。

公共性特别强的车站前广场,不仅要作为城市繁华街道的中心而受到各种评论,而且由于是作为城市标志而存在着,因此,所选用的照明器常常是经过特殊设计的、具有该地方象征的。即使用于这种场合的照明器同样要重视其光学、机械性能,尽可能使它光效高、照明效果好,而且要便于维护管理。图23-15是一个例子。

(3) 照明器的安装高度与配置

(a) 用高杆照明时 由于照明器的配光多少总有些差异,因此在垂直或近似垂直的情况下,如使用一般轴对



图23-15 车站前广场照明的一个实例

光源: 高压荧光汞灯 H3000 B、
HF700 X、HF400 X、
照明器: 柱头型、高杆照明
灯杆高度: $H = 17 \text{ m}$ 、 16 m 、 7 m
平均照度: $E = 20 \text{ lx}$ (初始)

称配光的照明器时, 要考虑到照度的均匀度。照明器的安装高度 H , 原则上由下式决定:

$$H \geq 0.5R \text{ (m)} \quad (23-10)$$

此处, R 为被照范围的半径 (m)。

(b) 用投光照明时

① 一般广场 如图23-16所示, 照明器的安装高度为 H 时, 则单侧排列时:

$$\left. \begin{aligned} H &\geq 0.4W + 0.6a \\ S &\leq 2H \\ S &\approx 2S_1 \end{aligned} \right\} \quad (23-11)$$

对称排列时:

$$\left. \begin{aligned} H &\geq 0.2W + 0.6a \\ S &\leq 2.7H \\ S &\approx 2S_1 \end{aligned} \right\} \quad (23-12)$$

应以上述条件作为设计标准。

② 收费处广场 设照明器安装高度为 H_1 、 H_2 (如图23-17所示) 则:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &\geq 0.5W \\ H_2 &\geq 0.5W \end{aligned} \right\} \quad (23-13)$$

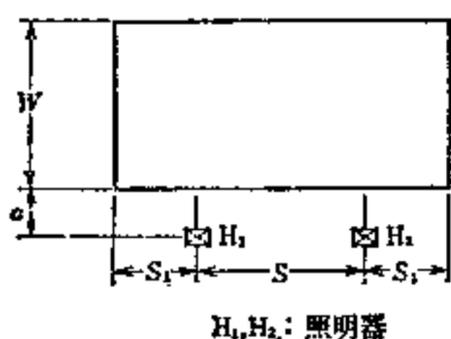


图23-16 一般广场的照明器配置

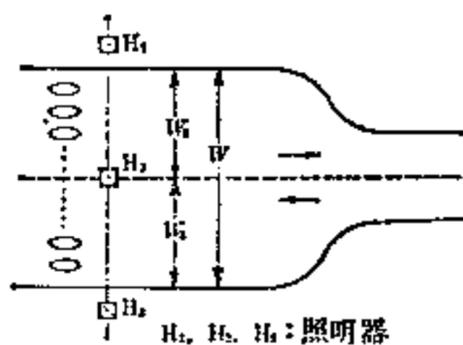


图23-17 收费处广场的照明器配置

另外, 用控制 W_1 的距离, 以达到辨别车种、车辆数量, 则:

$$H_1 \geq 0.6(W_1 + 0.3W_2) \quad (23-14)$$

这样, 照明塔的高度就必须超过30m, 若在中央建一个照明塔 H_3 , 那么各照明塔的高度, 可按照下式计算:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &\geq 0.5W_1 \\ H_2 &\geq 0.5W_2 \\ H_3 &\geq 0.5W_1 \\ H_3 &\geq 0.5W_2 \end{aligned} \right\} \quad (23-15)$$

另外, 为了得到辨认进入高速公路车辆的车种所必需的车前照度, 图23-17中的 H_1 或 H_2 照明塔应设置在距收费间10~20m的位置上。图18是一个收费处广场的照明设施实例。

23-4-2 其它照明

(1) 室内停车场 白天, 汽车从数万勒克斯的明亮室外进入只有一百勒克斯左右很暗的室内停车场, 车速自然要放慢, 因此, 出入口就要象隧道照明一样必须要设置过渡照明。



图23-18 收费处广场照明的一例

光源：高压荧光汞灯HF700X、HF400X
 照明器：投光灯、高杆照明、半截光型照明器
 杆高：铁塔25m、 $H = 12\text{m}$
 平均照度： $E = 40\text{lx}$ 、 $E = 20\text{lx}$



图23-19 室内停车场照明实例

光源：荧光灯FLR40×2
 照度：车路200lx（初始）停车位100lx（初始）

此外，驶向停车位置的路线是曲曲弯弯的，再加上墙、顶棚、柱子等妨碍着司机的视线，视觉条件很不好，所以设计照明时，要注意不要形成心理上的压迫感。

光源一般采用荧光灯，照明器要选用在材料和结构上都与设置照明场所相当的品种。图23-19是室内停车场照明的实例。

(2) 桥梁 桥，有跨线桥（天桥）、江桥、湖桥、海桥等。它的结构更是多种多样。桥梁的照明手法原则上与一般道路相同，只有一点，不能使照明设施对船舶航行等水上交通以及渔业活动造成不利影响。因此，在照明器的配光，安装上应予以充分注意。为了照亮水上交通的障碍物，应对桥的下部结构加以照明，这也可以使远方船舶能够明确地辨认出桥梁的位置。图23-20是桥梁照明的实例。

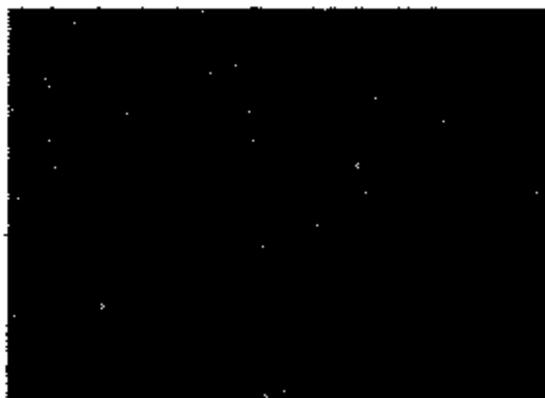


图23-20 桥梁照明的一例

光源：高压荧光汞灯HF400X
 照明器：较深的截光型
 灯杆高度： $H = 12\text{m}$
 间距： $S = 21\text{m}$
 平均照度： $E = 271\text{lx}$ （初始）

23-5 隧道照明

23-5-1 由隧道引起的视觉问题

汽车司机在白天从明亮的环境接近、进入和通过隧道过程中，与行走在一路上是很不一样的，它将发生种种特殊的视觉问题。

(1) 进入隧道前的视觉问题（白天） 白天，由于隧道内外的亮度差别极大，所以，从隧道外部去看照明很不充分的隧道入口会看到如图23-21所示的黑洞(black hole)（长隧道）及黑框(dark frame)（短隧道）。

为了消除黑洞现象，必须根据实验的结果，在隧道入口处使路面亮度达到必要的水准^[15]，如图23-22所给出的（该图说明了司机进入隧道的注视时间与察觉障碍物所需路面亮度的关系）。

(2) 进入隧道立即出现的视觉问题（白天） 汽车由明亮的外部进入即使是不太暗的隧道以后，也要经过一定时间才能看清隧道内部情况，这称为“适应的滞后现象”，这是因为

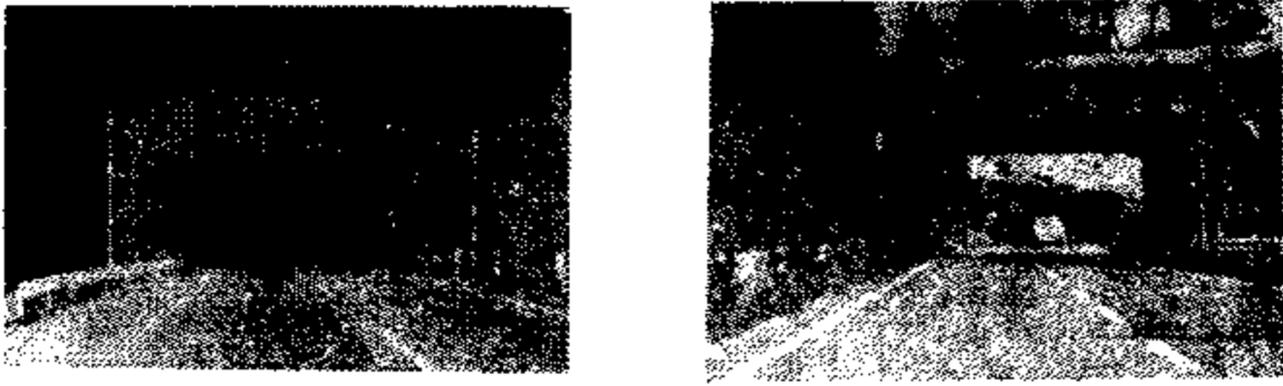


图23-21 隧道入口处引起的两种视觉现象

汽车进入隧道时形成的急剧的亮度变化，使司机的视觉不能迅速适应所致。

图 23-23 是一个在实验室中求出的暗适应曲线，表明人眼在亮度变化（相对值）时，可以适应的时间极限〔16〕。

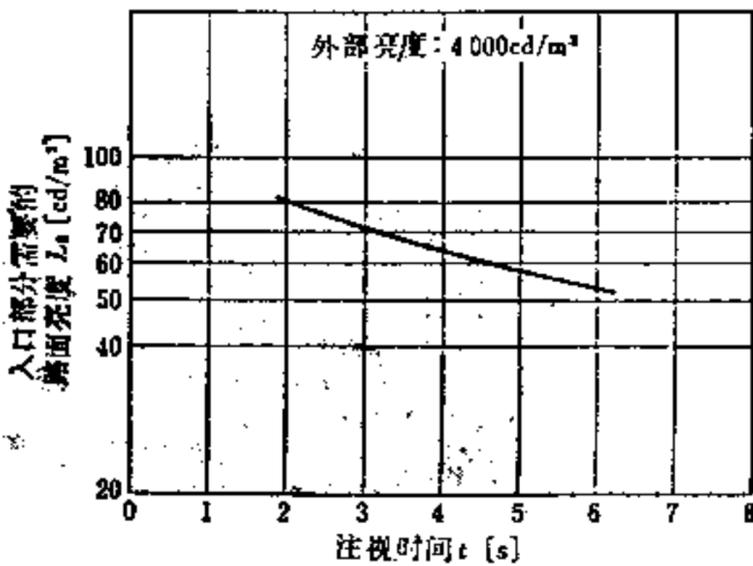


图23-22 进入隧道的注视时间 t 与入口部分的路面亮度 L_e 的关系

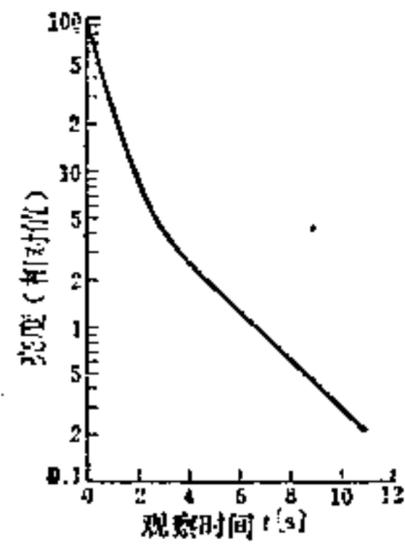


图23-23 暗适应曲线

(3) 隧道内部的视觉问题 (白天、夜晚) 隧道内部与一般道路不同，主要在于隧道内汽车排出的废气无法消散，形成烟雾，它可以将汽车的头灯和道路照明器发出的光吸收和散射。

图 23-24 说明了该状态，可以看到在隧道前方的白烟，就是因上述情况，由光的漫射形成的光幕。这种光幕降低了前面的障碍物与其背景（路面、墙面）之间的亮度对比度，所以就降低了障碍物的能见度〔17〕。

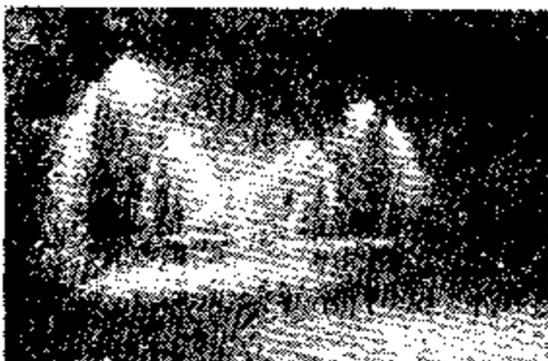


图23-24 隧道中有烟雾存在的前方视野



图23-25 向隧道出口看前面的汽车
前方有三辆汽车（车道上有两辆，超车道上有一辆），可是由于出口处的强烈眩光，只能看到两辆汽车。

(4) 隧道出口处的视觉问题 (白天、夜晚) 白天, 汽车穿过了较长的隧道, 接近出口时, 由于通过出口看到的外部亮度极高, 出口看上去是一个亮洞 (White hole)。司机在这种极强的眩光效应下, 会感到十分不舒服。另外, 如图23-25所示, 要是前方出现无论大小的两辆以上的汽车时, 由于出口处极强的眩光, 就不能辨别这些汽车以及它们之间的距离〔18〕。

夜间与白天正好相反, 隧道出口看到的不是亮洞而是黑洞, 这样就看不出外部的道路的线型及路上的障碍物。

23-5-2 隧道照明的设计

(1) 设计前应调查的内容 在进行隧道照明设计时, 事先应了解以下的内容:

- ① 隧道的剖面构造;
- ② 隧道坑口附近的方位与地形;
- ③ 隧道的延伸情况;
- ④ 设计车速;
- ⑤ 交通量及混入的柴油车比例。

(2) 光源与照明器的选择 隧道照明的光源, 除了应满足23-2节中的主要要求外, 特别应当选择那些在汽车排烟形成的烟雾中, 仍能保证有良好能见度的光源。因此, 一般情况下, 应选择在烟雾中有较好的透视性 (光的穿透性) 的低压钠灯, 如果是短隧道或混入柴油车比率较小的城市隧道, 烟雾会小些, 这样, 使用显色性较好的荧光灯即可。在隧道的出入口, 照明可用小型、大光通量的高压钠灯或高压荧光汞灯。

照明器除应当满足23-2节的主要要求外, 特别应考虑对于墙面的配光以及烟尘的污染问题。

(3) 照明的种类及标准 为了防止在隧道内出现的各种视觉问题 (参照23-5-1节), 照明设施大体上可以分为以下四种 (可参照图23-26, 该图未绘出非常情况下的应急照明): ①基本照明; ②入口照明; ③出口照明; ④应急照明。

(a) 基本照明 基本照明的标准, 可按照在实际隧道中所进行的运行试验得出的结果来确定, 所用各种设计车速可如表23-15所示〔19〕 (换算平均照度系数随道路照明的情况不同而异, 它是因照明器的配光、配置的差别而有所不同)。

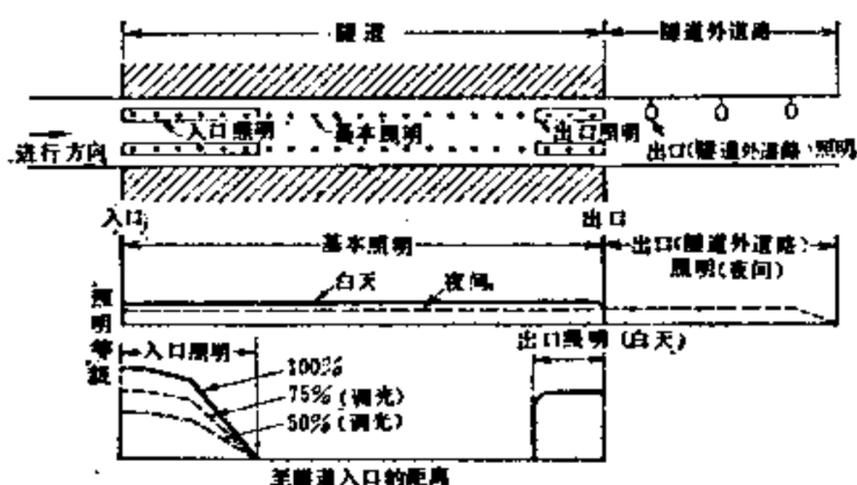


图23-26 隧道照明的构成

表23-15 基本照度标准

设计车速 (km/h)	路面平均亮度 (cd/m ²)	换算平均照度 (lx)	
		混凝土路面	沥青路面
100	9.0	120	200
80	4.5	60	100
60	2.3	30	50
40	1.5	20	35

注: 平均照度换算系数: 13(混凝土路面); 22(沥青路面)。

照明器的安装要考虑到隧道内部的建筑条件、路面亮度分布、照明器的眩光等问题。

隧道内的避车处应当使司机在远处就能清楚地看到，同时还应当在那里方便地进行汽车修理等作业，为此该处的照度应为表23-15所示的1.5~2倍。图23-27是一个避车处照明的实例。

(b) 入口照明 隧道入口部分的照度标准，主要是由驶近隧道的汽车司机眼睛的适应亮度来决定的。通常，这一适应亮度都以隧道入口为中心的隧道外部亮度平均值表示。

表23-16表示了当隧道外部亮度为 4000cd/m^2 时，隧道入口部分各区间的亮度标准。日本多数隧道的外部亮度实测结果表明，一般为 4000cd/m^2 ，坑口附近有森林覆盖的隧道约为 3000cd/m^2 ，若为露天部分较多的地下通道，在视野内高亮度天空比重较大，可考虑为 6000cd/m^2 ，这样，在表23-16中所示诸值可乘以 $3/4$ 或 1.5 倍使用。



图23-27 隧道内避车处的照明

光源：荧光灯FLR40
照明器：双管照明器
平均照度：304lx（初始）

表23-16 入口照明诸区的照明标准

设计车速 (km/h)	临界区			过渡区			缓和区			入口照明 区间总距离 (m)
	距离 (m)	亮度 (cd/m^2)	照度 (lx)	距离 (m)	亮度 (cd/m^2)	照度 (lx)	距离 (m)	亮度 (cd/m^2)	照度 (lx)	
100	55	95	1240	150	47	610	135	9.0	120	340
80	40	83	1080	100	46	600	155	4.5	60	295
60	25	58	760	65	35	460	135	2.3	30	225
40	15	29	380	30	20	260	85	1.5	20	130

如果是短隧道，在接近隧道时就可以看到隧道的出口，这样就出现了前面所说的黑框现象，为了防止这种现象的出现，应当有比表23-16所示各值更高的亮度标准。

(c) 出口照明 白天，出口照明标准及其所需距离如下：路面照度应为隧道出口外部亮度值的 $1/10$ (lx)，所需长度应为出口以内80m。

夜间坑口外的过渡照明标准及长度如表23-17所示。

表23-17 出口坑外道路过渡照明标准及长度

隧道内亮度	亮度 (cd/m^2)		设计车速 (km/h)	长度 (m)	
	第1区间	第2区间		第1区间	第2区间
4.0以上	2.0	1.5	100以上	180	180
2.0~4.0	1.0	0.5	80	130	130
2.0以下	0.5	—	60	95	95
—	—	—	40	60	—

(d) 应急照明 为了防止隧道内因停电可能出现的危险，应急照明应有另外的独立供电系统。

参 考 文 献

- (1) J. T. Duff: *Light. Res. Tech.*, 6-4 (1974) 183~196
- (2) 西森 采: 第11回全国道路会議論文集(昭48)
- (3) B. E. Sabey, et al.: TRRL Report LR 586 (1973)
- (4) 成定康平, 他: 照学誌, 56-2 (昭47) 8~17
- (5) CIE Pub. No. 12-2 (T.C.-4.6) (1977)
- (6) C. Dunbar: *Trans. Illum. Engng. Soc., London*, 3 (1938) 187~195
- (7) 成定康平: CIE Barcelona P-71.17 (1971)
- (8) J. B. de Boer: CIE Stockholm (1951)
- (9) J. B. de Boer, et al.: *Trans. Illum. Engng. Soc., London*, 32 (1967) 117~128
- (10) W. Adrian, et al.: CIE Barcelona S.325 (1971)
- (11) JIS C 8131 (道路照明器具) (昭44)
- (12) 井上 猛, W. J. M. Bommel: 照学誌, 60-4 (昭51) 152~157
- (13) CIE Pub. No. 30 (T.C.-4.6) (1976)
- (14) 宮下正義, 他: 昭51照学全国大会論文集 No.101
- (15) 中道文基, 他: 照学誌, 51-10 (昭42) 566~581
- (16) 蒲山久夫: 照学誌, 47-10 (昭38) 488
- (17) 吉川孝次郎, 他: 昭52照学全国大会論文集, No. 81
- (18) 成定康平, 他: 昭43電気関係学会関西支部連大論文集, No.14-1
- (19) 馬場輝郎, 他: CIE Washington, P-67.13 (1967)

第 24 章

航空照明

24-1 飞机照明

24-1-1 驾驶室照明

(1) **驾驶室的整体照明和局部照明** 在大型飞机驾驶室内，通常有二个驾驶员和一个航空机械师，分别完成各自的任务。为此，驾驶室采用穹形照明，机械师采用平面照明，基座和上方操纵盘也采用平面照明等。另外，作为局部照明，有各驾驶员用的地图灯，航线图支架照明等，有机械师用的工作台平面照明和地图灯等。

在这些穹形照明和平面照明设施中，在必要的情况下，都设有相应的调光电阻器。另外，多数情况下采用白炽灯作为光源。图 24-1 表示一般驾驶室的照明配置。

(2) **计量仪器的照明** 在驾驶室内，必须配置计量仪器、回路熔断器、警报灯等，其照明必须保证在夜间不会使乘务员疲劳，并能清楚地读出指示。

以最近的大型飞机为例，除仪表内部有白炽灯 (5 V) 照明外，各仪表盘都附有荧光灯 (115 V)，作为整个仪表盘的照明。而回路熔断器控制板，是采用在控制板内埋进灯泡以产生文字显示的发光板来完成照明任务。另外，指示开关类的操作位置的文字，也采用发光板照明。这些仪表类的照明回路，可以采用调光器进行光度调节，特别是在机外有雷电闪光时，驾驶员在雷雨区操作开关，使全部可调节回路都能发出最高亮度，以补充驾驶员的信号感之不足。

系统的工作状态采用指示灯指示，昼夜都用相同的文字显示，包括电源指示灯、警报灯等。光度调节通过明暗切换开关控制，在明位置可提供 28 V 电压，使灯发出最高亮度，在暗位置，变压器降压，可提供 12 V 电压，以调节灯的亮度。这种光度调节用变压器，按与指示灯的连接形式可分为二类。一类是指示灯常接于电源，由接地点控制点灯。另一类是指示灯接地，由施加电压端控制点灯。光度调节用变压器与指示灯组装在一起。指示灯的线路图如图 24-2 所示。

24-1-2 客舱照明

(1) **顶棚和窗口的照明** 以大型飞机为例，客舱的顶棚采用荧光灯产生间接照明，它的电源是将 110 V 的火线通过变压器升至 350 V。其他顶棚，采用局部照明，使用同样的变压器。另外，在客舱的每个窗口上面，装有荧光灯 (200 V)，用以照明窗口。当乘客睡眠

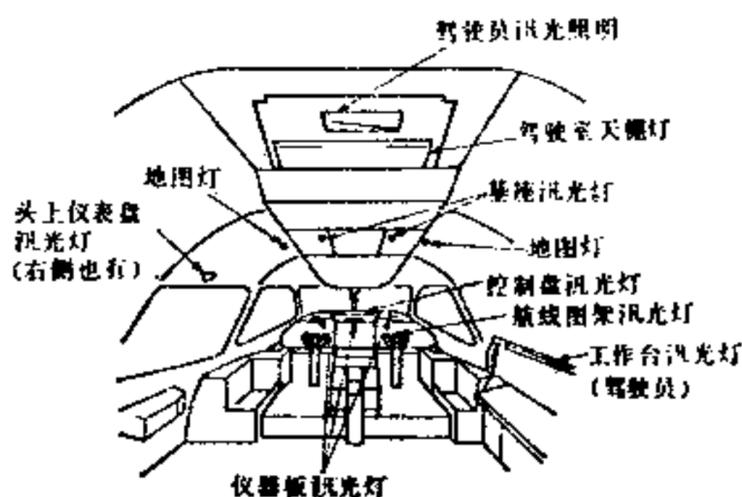


图 24-1 驾驶室一般照明

时, 点燃白炽灯 (28 V), 作为夜间常明灯, 安装在局部照明的荧光灯旁边。

(2) **看书灯** 在各客席的上面, 装有看书灯, 用以直接照明书桌。该灯具附有透镜, 以为聚光照明。灯开关与娱乐节目音量开关、呼唤服务员的开关并排, 安装在各座席的挂勾侧面, 乘客可自行控制。

(3) **紧急灯** 在大型飞机中, 在紧急情况下, 使乘客脱离飞机是非常重要的。为了将乘客送出机外, 必须使用紧急用照明灯和紧急出口照明灯。紧急灯设置在客舱的顶棚和紧急出口附近, 紧急出口指示灯设置在紧急出口附近和紧急出口处。

紧急灯的供电回路, 在机内是各处分开的, 由各处的独立电源供电。平时, 由飞机的发电机供给电力, 当发电机不工作时, 各紧急灯内装的镍镉电池 (6 V), 将自动切换电源。

24-1-3 飞机外部照明

(1) **防止碰撞灯** 在大型飞机的机身的上部和下部, 各安装一个防止碰撞灯。灯光通常采用航空红色, 也有采用航空白色作为标准色的。每一个灯在一分钟内点灭60次。防止碰撞灯系统的电源为 110 V, 通过变压器给灯提供 97 V 的电压。旋转灯的马达的电压为 115 V。

为了补充防止碰撞灯, 有的飞机在航空灯的附近安装六个识别指示灯。这种灯发出高亮度的白色光。这些灯与防止碰撞灯共用一套同步装置, 同步灯光分组如下:

下侧前方左右二只与后方二只为一组, 上侧前方左右二只为一组, 防止碰撞灯上下二只为一组, 以上三组灯光, 按一定的时间差分别点燃, 点灭的周期各组相同。图24-3即为防止碰撞灯和识别指示灯的线路图。

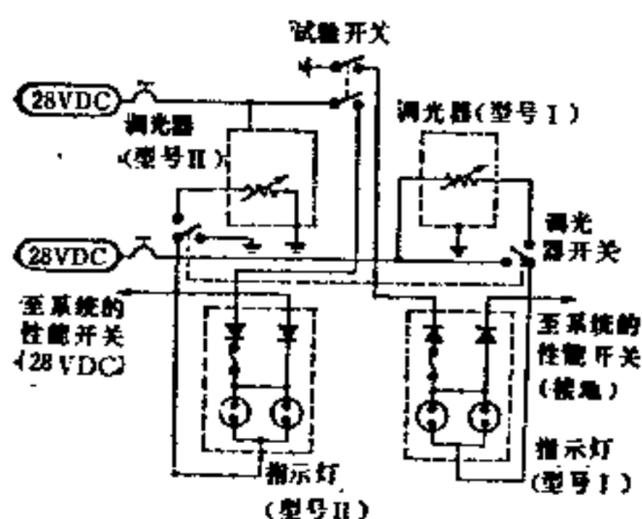


图24-2 调光器指示灯的线路图

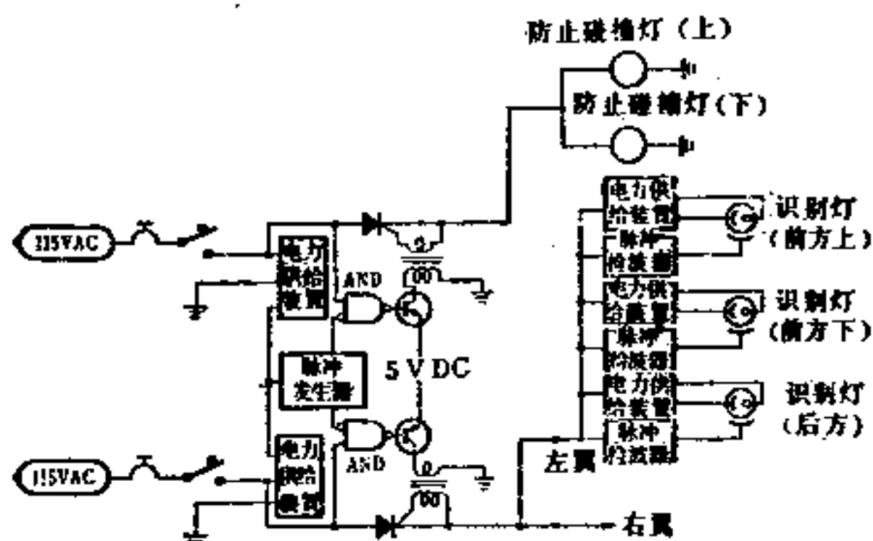


图24-3 防止碰撞灯和识别指示灯的系统图

(2) **航空灯** 航空灯用于指示飞机前进的方向。左方照明用航空红色, 右方照明用航空绿色, 后方照明用航空白色。照明范围, 左右各 110° , 后方为 140° 。航空灯采用额定电压为 28 V 的白炽灯。

(3) **滑行旋转灯** 滑行旋转灯用于照射飞机在滑行中想要旋转的方向, 在前起落架的左右各安装一灯。灯电源为 115 V, 通过变压器给灯施加 28 V 的电压。

(4) **着陆灯** 着陆灯是在飞机要着陆的姿态下, 用以照射滑行路面。在机身前方左右各安装一只着陆灯。这种灯, 通过旋转装置, 从灯具前面到机身之间可伸展 107° 的角度。另外, 在前起落架也有二只着陆滑行旋转灯。

(5) **机翼照明灯** 机翼照明灯是用作驾驶员从驾驶席观察主翼前缘的着冰状态和发动机舱的异常状态的。在机翼的稍前方, 左右各装配一只。在灯具内附带有变压器, 给灯施加

28V 电压。这种灯可以作为搜索灯光。

(6) **标记灯** 标记灯是在大型飞机的垂直尾翼的两面,用以照明空中线路的标记,在尾翼的水平安定板的左右各安装一只。电源电压为 115V,通过变压器降压。灯具上装有透镜,使会聚光束照射在标记的中心。

(7) **机翼脱离紧急灯** 机翼脱离紧急灯是用以照明在飞机发生事故时,乘客从主机翼上脱离飞机时所经过的路线。

有的飞机,在机身的左侧和右侧各安装五只这种灯,用以照明脱离降落伞的主要部分。

以上这一系列灯,共用一套电源装置,而不是象其他紧急用灯那样,各个灯单独内装一个蓄电池。

图24-4表示全部外部照明灯的位置和配光图。

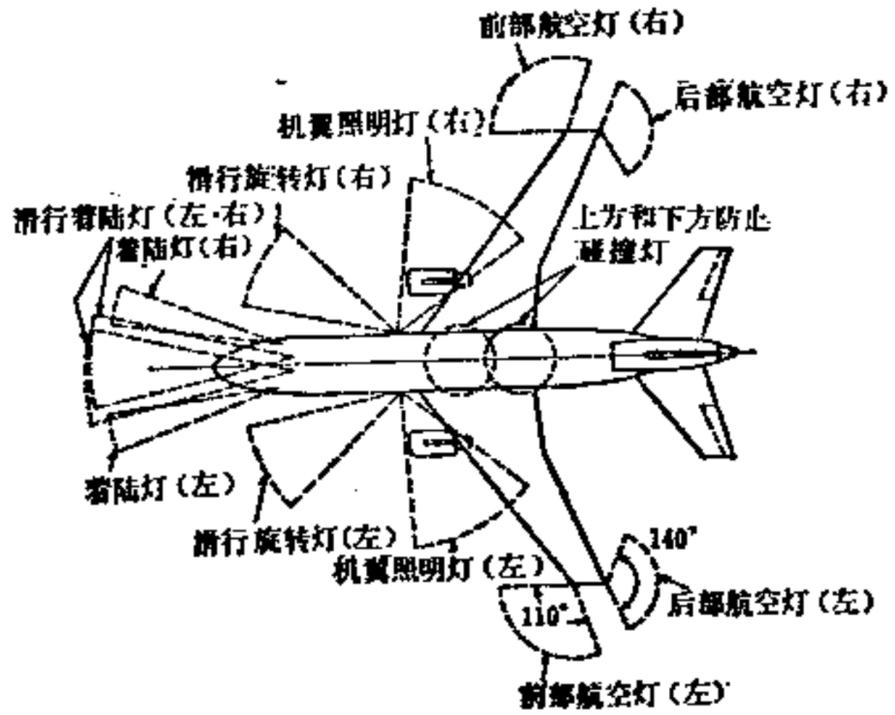


图24-4 外部照明灯的全部位置和配光图

24-2 机场照明〔1〕~〔14〕

24-2-1 机场照明的目的和特点

机场照明的目的,基本上是用灯光标示夜间进入道路和滑道或诱导路等,以帮助飞机着陆或起飞。近来,在白天天气恶劣的情况下,采用电子着陆辅助设施(ILS; instrument landing system),以保证飞机的安全降落。

机场照明与一般照明不同,具有本身的特点,在多数情况下是将灯光作为信号灯和标志灯,构成直接可见的目标,观察者作立体高速运动,由于特殊环境产生的心理和生理影响很大,看见灯光的距离很长,容易受到气象的影响等。

为了不论在多劣恶的气象条件下,也要保证给操纵者提供最好的导航,应根据昼夜的差别和大气的透过率等,相应调整灯光的亮度。

另外,为了保证航空安全和获得一定的效率。关于灯光的配置和特性等,有统一的国际标准。

24-2-2 机场照明的种类和配置

机场照明设施的种类,主要有进入灯、滑道灯、诱导路灯等起飞、着陆辅助设施和停机坪照明设施。

(1) 进入照明设施。包括进入灯、进入角指示灯、旋转灯、进入灯架、进入路指示灯等。

(2) 滑道照明设施。包括滑道灯、滑道末端灯、滑道末端辅助灯、滑道末端识别灯,滑道中心线灯、着地带灯、滑道距离灯、超越带灯等。

(3) 诱导路照明设施。包括诱导路灯、诱导路中心线灯、诱导导向灯等。

(4) 其它设施。包括停机坪照明灯、机场灯架、风向灯等。

(1) 起飞、着陆辅助设施 起飞、着陆辅助设施，是机场照明设施中最重要的部分，对它的种类、配置、性能、结构等，在航空法施行规则中都作了规定。表 24-1 列出了它的配置、灯色、使用灯具等，图 24-5 和图 24-6 表示它的配置和外形实例。

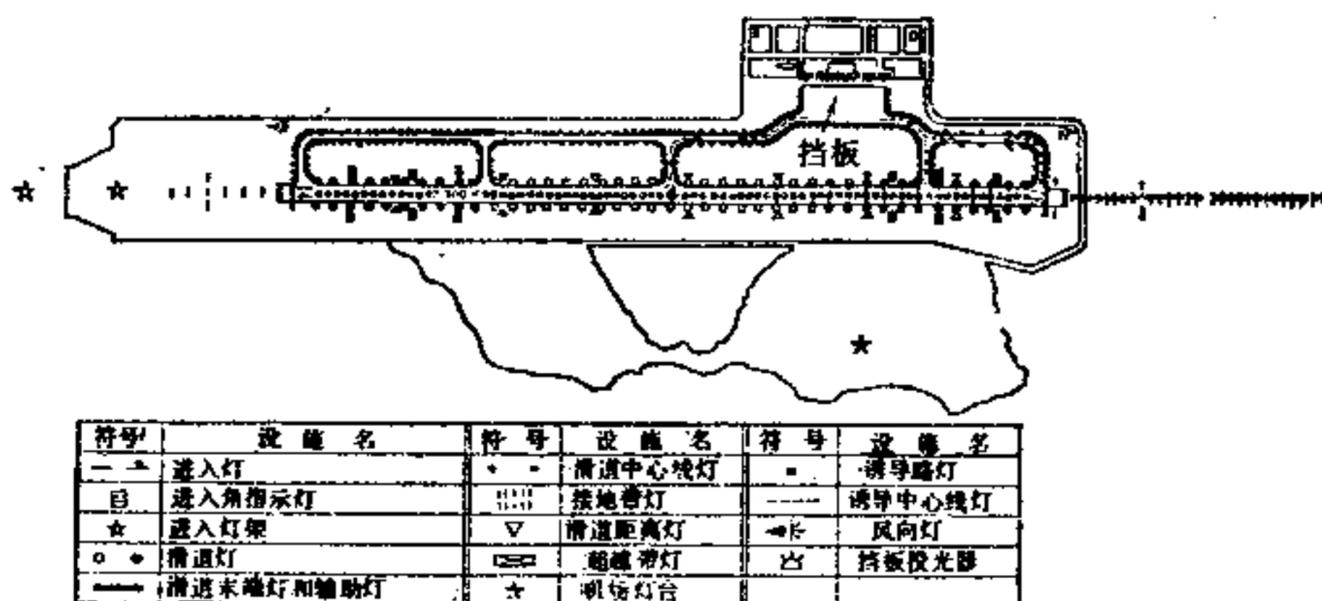


图24-5 机场照明设施配置实例

(a) 进入灯 飞机在进入一定高度（进入极限高度）后就由 ILS 进行诱导，往下必须依靠进入灯等视觉辅助设施进行最终着陆操作。在这段时间内，大型飞机的驾驶员几乎除了看仪表外，仅能断断续续地看见外界景象，所以要求灯光图案必须具有优良的识别性和直感性。

图 24-7 所示的进入灯，可以满足上面的要求，在日本、美国，主要采取横列灯方式，在英、法等国则采取距离表示方式。前者，为了容易识别，推荐设置连锁式闪光灯。另外，在类-II 精密进入滑道用灯中，在进入侧距滑道末端 300m 的范围内，追加红色的侧列横列灯（图24-8）。

(b) 进入角指示灯 通常称为 VASIS (visual approach slope indicator system)，作为指导飞机进入机场时进入角度是否良好的重要设施，在许多国家获得实际应用。大型飞机用三条 VASIS，中小型飞机用二条 VASIS，还有公用的 T-VASIS 等。

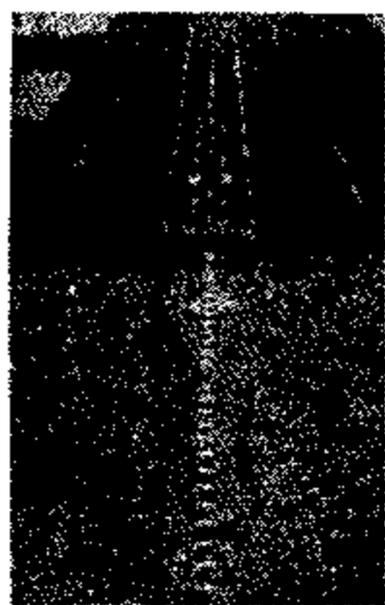


图24-6 起飞、着陆辅助设施的外形实例

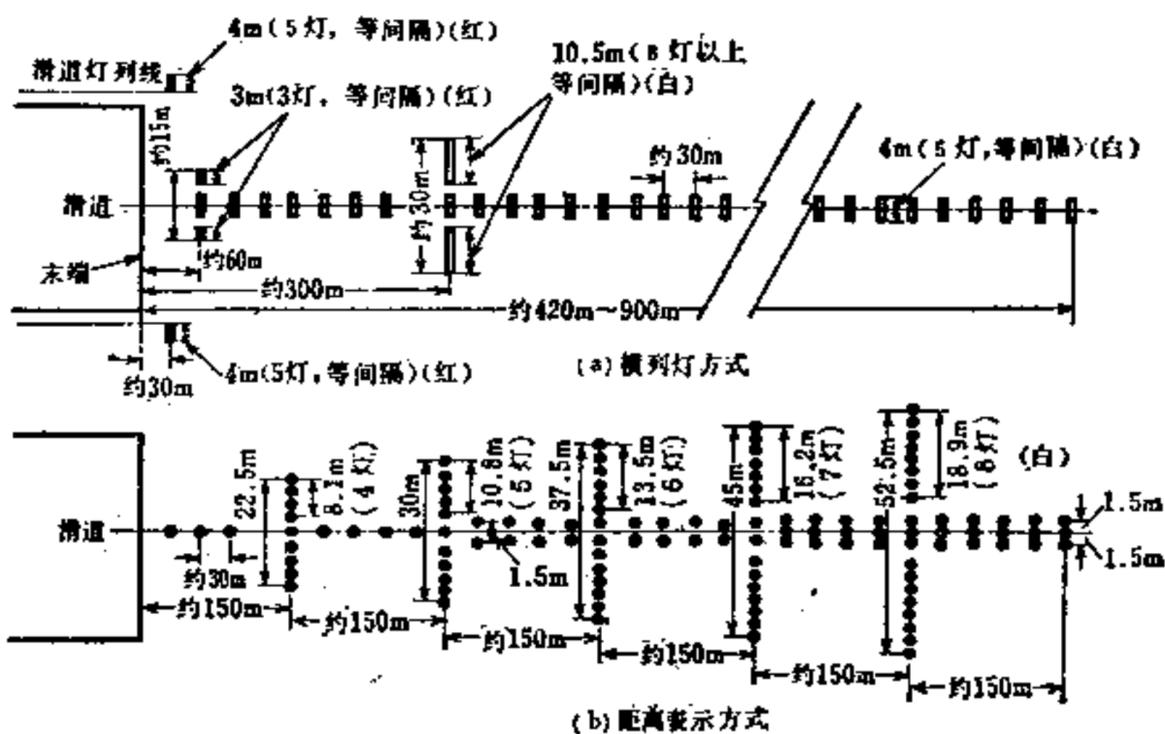


图24-7 标准式进入灯配置图

表24-1

起飞、着陆辅助设施的配置

名称	配置	灯色	使用灯具 (光源)	备注
类-I标准式进入灯	从滑道末端开始至长900m的距离内,在中心线上每隔30m排列一个灯组。在中心线的300m处,与中心线垂直的位置上,横排30m宽的灯组(参照图24-7)	白、红	SB-1 (SB6.6A 200W SB6.6A 300W) IH-2 (JFD6.6A 200W) FX-3(X-3)	表示距离的方式,是从末端开始的150m、450m、600m、750m处,设置横排灯组在横列灯方式的情况下,在中心线灯列中,追加连锁式闪光灯。闪光频率为120次/分
类-II标准式进入灯	在上述中心线灯列和横排灯处,从末端开始至270m的距离内,间隔30m侧列横列灯的组合(参照图24-8)	白、红	同上	在横列方式的情况下,在离末端300m以远的中心线灯列处,追加连锁式闪光灯,闪光频率为120次/分
简易式进入灯	从滑道末端开始,至长420m的距离内,在中心线上每隔60m排列一个灯组。在中心线的300m处,与中心线垂直的位置上,横排30m宽的灯组	白	SB-1 (SB6.6A 200W) IH-2 (JFD6.6A 200W)	中心线灯列,为单一光源或由长4m以下的横列(3或5灯)构成。通常,同时设置进入灯架
进入角指示灯 (VASIS)	在滑道着地带附近的两侧,分别配置3组(2对或3对)灯列(参照图24-10)	白/红	4A型 (AF6.6A 200WGV-B) 5型 (SB6.6A 200WV)	也有简易型的。各灯列的组数有所削减
旋转灯	在沿滑道侧边以约150m的间隔配置7个灯。在滑道末端延长线上以30m的间隔追加2个灯	白或黄	低压(NX135) 或高压(NH700) 钠灯	用以向盘旋进入中的飞机表示滑道和滑道末端的位置,在滑道灯对盘旋导航不足时,设置进入灯
进入灯架	在滑道中心线的延长线上,距末端600m和900m的位置上设置	白	E-5 (SB100V 500W×5)	特别是为了改善白天的导航,或用以延长简易式进入灯的导航。闪光频率为60次/分
进入路指示灯	沿进入路线,在300~1000m间隔处配置,或在约每2km的重要地点,以100m以下的等间隔设置数个灯具	白或黄	低压钠灯 (N×135W)	在由于山等障碍物限制进入路线和限制噪声从进入路线传出的地方设置
滑道灯	在滑道两侧,以60m以下的等间隔,而且与滑道中心线对称的位置上配置(灯列线与滑道边缘的间隔通常为1.5m)	白、黄	H-6-2 (AF6.6A 200W) IM-1 (JFD6.6A 200W) IH-2 (JFD6.6A 200W ×2)	距目的地的末端600m的范围内的灯具,采用黄色
滑道末端灯	在滑道末端外侧0.5m的线上,在滑道灯列线以内,以3m以下的等间隔配置	绿、红	H-6-2 (AF6.6A 200W) IH-2 (JFD6.6A 200W×2)	灯光颜色,从进入方向看,进入端的末端灯是绿色,目的地的末端灯是红色
滑道末端辅助灯	在滑道末端灯列的延长线上,以3m的间隔,各配置5只灯	绿	SB-1 (SB6.6A 300W) IH-2 (JFD6.6A 200W)	以便从进入方向看得见灯光

(续)

名称	配置	灯色	使用灯具 (光源)	备注
滑道末端识别灯	在滑道末端外侧0.5m的线上,在距滑道边缘外侧16.5m的位置上,各配置1灯	白	FX-3 (X-3)	从进入方向看,光轴向外张15°。闪光频率120次/分
滑道中心线灯	在滑道中心线上,以大致30m以下的等间隔配置。由于目的地为混凝土等地面,不能在中心线上设置时,可在横向21cm处参差设置	白、红	IM-2 (JFD6.6A 200W)	灯光颜色,从进入方向看,从目的地末端至300m的范围内为红色,300~900m的范围内为红、白交替,其它为白色
着地带灯	在滑道上,从滑道末端至900m的范围内,以30m或60m的间隔,与滑道中心线对称排列灯组(间隔1.5m每组3灯)(参照图24-B)	白	IM-1 (JFD6.6A 200W)	纵向间隔,类-I为60m,类-II作为精密进入滑道用,为30m
滑道距离灯	在滑道边缘外侧25m,与滑道中心线平行的线上,从滑道末端开始,以约300m的间隔配置	白	G-2 (彩色反射灯 110V7.5W)	用以表示起飞、着陆的飞机,在滑道上的剩余距离,每隔300m用阿拉伯数字1、2、3……顺序表示
超越带灯	在滑道灯列线的延长线上,以60m以下的等间隔配置,另外,在超越带末端外侧0.5m的线上,与滑道中心线的延长线对称,以1.5m的间隔配置3只灯	红	H-10 (AF6.6A200W)	仅能从滑道方向看见灯光
机场灯架	在机场内,光柱对起飞着陆的飞机和管制塔不能有妨碍,灯架应设置在重要方向不被障碍物等屏蔽的位置上	白/绿	A-4 (AF100V 2500W)	主要灯熄灭时,预备灯自动点燃,同时表示主灯熄灭。闪光频率28次/分
诱导路灯	沿诱导路的两侧和停机坪的边缘,直线部分以大致60m以下的等间隔配置,曲线部分根据它的曲率半径以10~30m的间隔配置(灯列线与诱导路或停机坪的边缘的间隔通常为1.5m)	蓝	M-1 (AF6.6A30W) T-2 (FL-20B) T-3 (AF6.6A60W)	在诱导路与滑道或停机坪连接的场所,作为出入口灯,在它的两侧各设置T-2型灯1只
诱导路中心线灯	在诱导路中心线与滑道或停机坪的出入路线上,直线部分以大致30m以下的等间隔配置,曲线部分根据它的曲率半径以7.5~30m的间隔配置	绿	IL-1 (JF6.6A45W) IL-2 (JF6.6A65W)	主要是在从机库到起飞场地的主要诱导路上设置,滑道内有滑道中心线灯时,在可见转弯处设置,平行诱导路或停机坪的侧边,原则上是在从直线部分推移到60m的地点设置
导向灯	在诱导路的分叉部分,停机坪或滑道与诱导路的连接部分设置	白或黄	T-1 (AF6.6A30W)	用以表示停止位置、分叉点目的地、诱导路编号等,在具有多条诱导路的大型机场设置
风向灯	指示着陆地带附近的风向风速,在从飞机上容易识别的位置上设置(围成直径15m、宽1.5m的白色圆形带)		1型 (Ld100V 200W×4)	在灯光下,夜间从300m以上的高空中看得见吹散的东西。由于地形等影响,两末端的风向不同的地方,在两末端附近,各设置1处

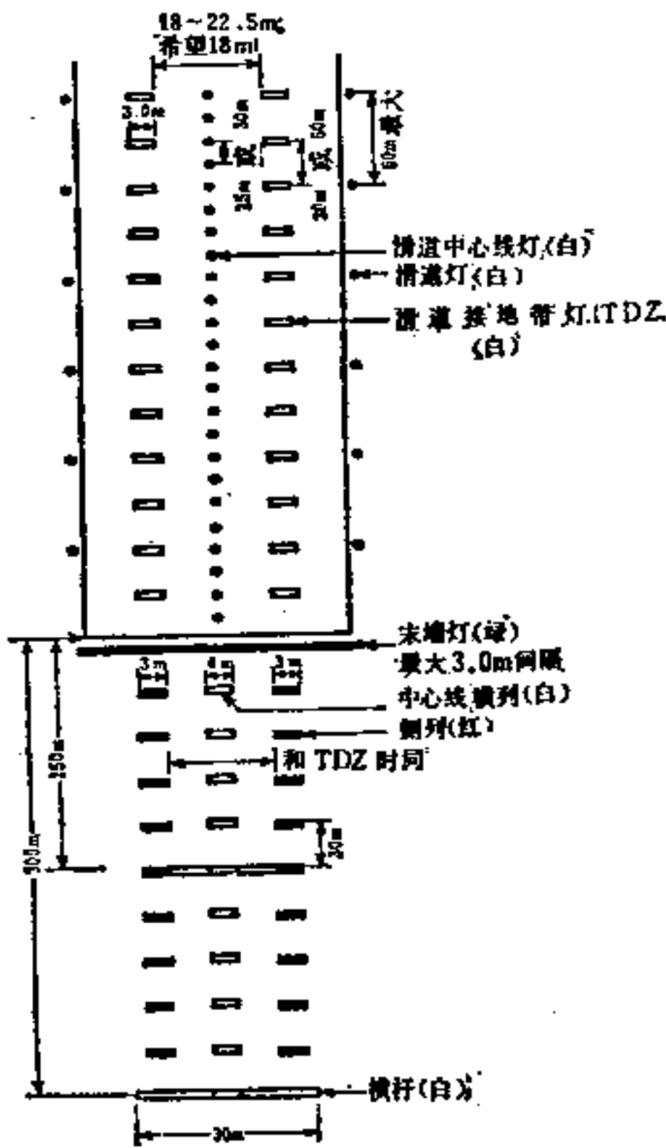


图24-8 类-I精密进入

滑道用内侧300m的进入照明和滑道照明配置图

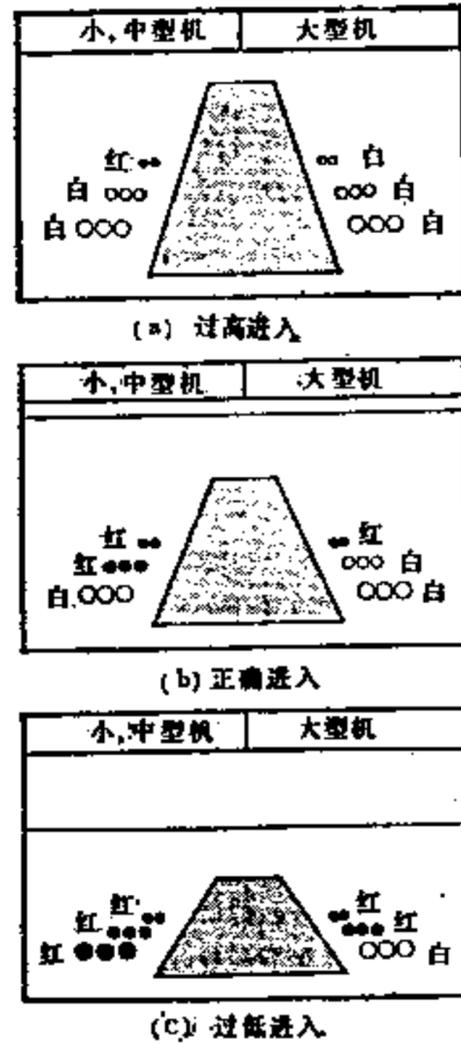


图24-9 进入角指示灯的形状

图 24-9 表示三条 VASIS 的形状, 图 24-10 为基本配置图。

(c) 灯具 灯具分为地上型和埋入型。地上型用于滑道、诱导路等路边时, 其结构应具有可折连接器, 以防万一飞机碰撞而不致损坏。对于埋入型, 因为飞机要从上面直接通过, 其结构要有足够的强度, 并不应构成障碍, 其突出地面的高度限制在 9.5~25mm。

灯具的配光必须保证飞机进入机场着陆, 在预定的范围内脱离正常飞行路线时, 在必要的视认范围内, 提供灯光指导, 并应根据最坏的气象条件进行设计。表 24-2 所列为国际通用标准。表中所列的光束范围要求均匀, 在这个范围内, 最大和最小光强比不应超过3:1。

各种灯具如图 24-11 所示。

(d) 航空色 视觉辅助设施的光色和表面颜色, 必须完全符合国际标准。在日本, 根据国际标准, 制定了 JIS W 8301-1955 (图 24-12、图 24-13)。

光色的色度范围, 根据确认的程度, 分为 A 级和 B 级, B 级比 A 级更适用于要求视觉可

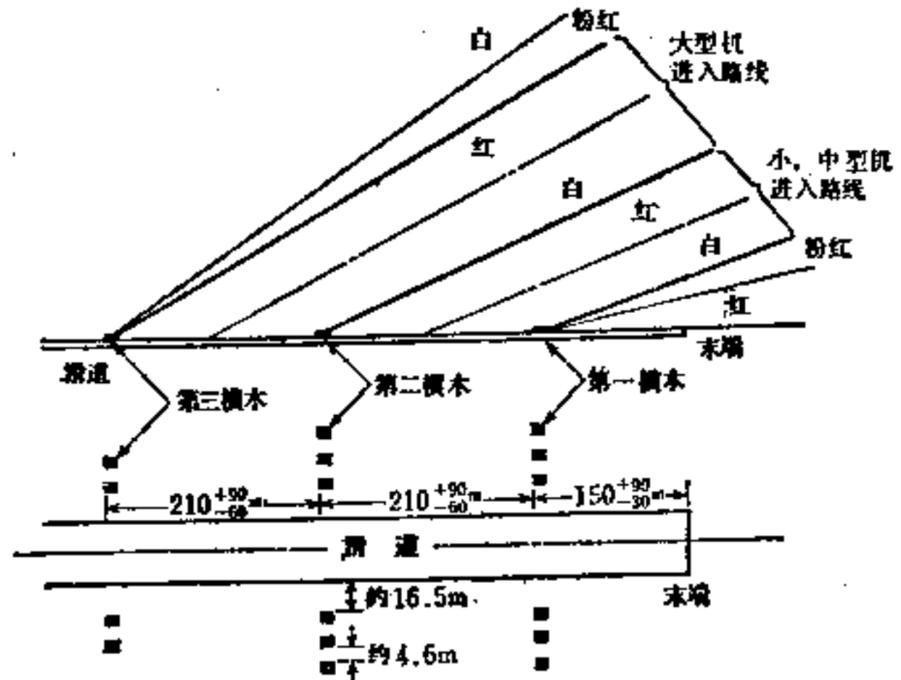


图24-10 进入角指示灯说明图

表24-2

精密进入滑道用灯光特性的国际标准

灯 光	颜 色	最 小 光 束 范 围 (度)		平均光束光强 $\times 10^3$ (cd)	平均光束光强比 (以滑道灯为1)
		水 平	垂 直		
进入灯	白	20	11	20	1.5~2.0
进入灯 (侧列横列灯)	红	14	10	5	0.5~1.0
末端灯	绿	11	9	10	1~1.5
末端辅助灯	绿	14	10	10	1~1.5
着地带灯	白	10	7	5	0.5~1.0
滑道中心线灯(30m间隔)	白/红	10	7	5(白)	0.5~1.0
滑道中心线灯(15m间隔)	白/红	10	9	2.5(白)	0.25~0.5
滑道中心线灯 (7.5m间隔)	白/红	10	9	1.25(白)	0.125~0.25
终端灯	红	12	4.5	2.5	0.25~0.50
滑道灯 (45m宽)	白	11	7	10	1
滑道灯 (60m宽)	白	13	7	10	1

注：精密进入滑道：在下面的DH（进入极限高度）和RVR（滑道可见范围）的范围内航行时，在滑道上使用的ILS和视觉辅助设施，分别为类-I、II和III（A、B、C）。

类-I DH 60m RVR 800m

类-II DH 30m RVR 400m

类-III A DH 0m RVR 200m（B、C为在着陆时不使用视觉辅助设施）

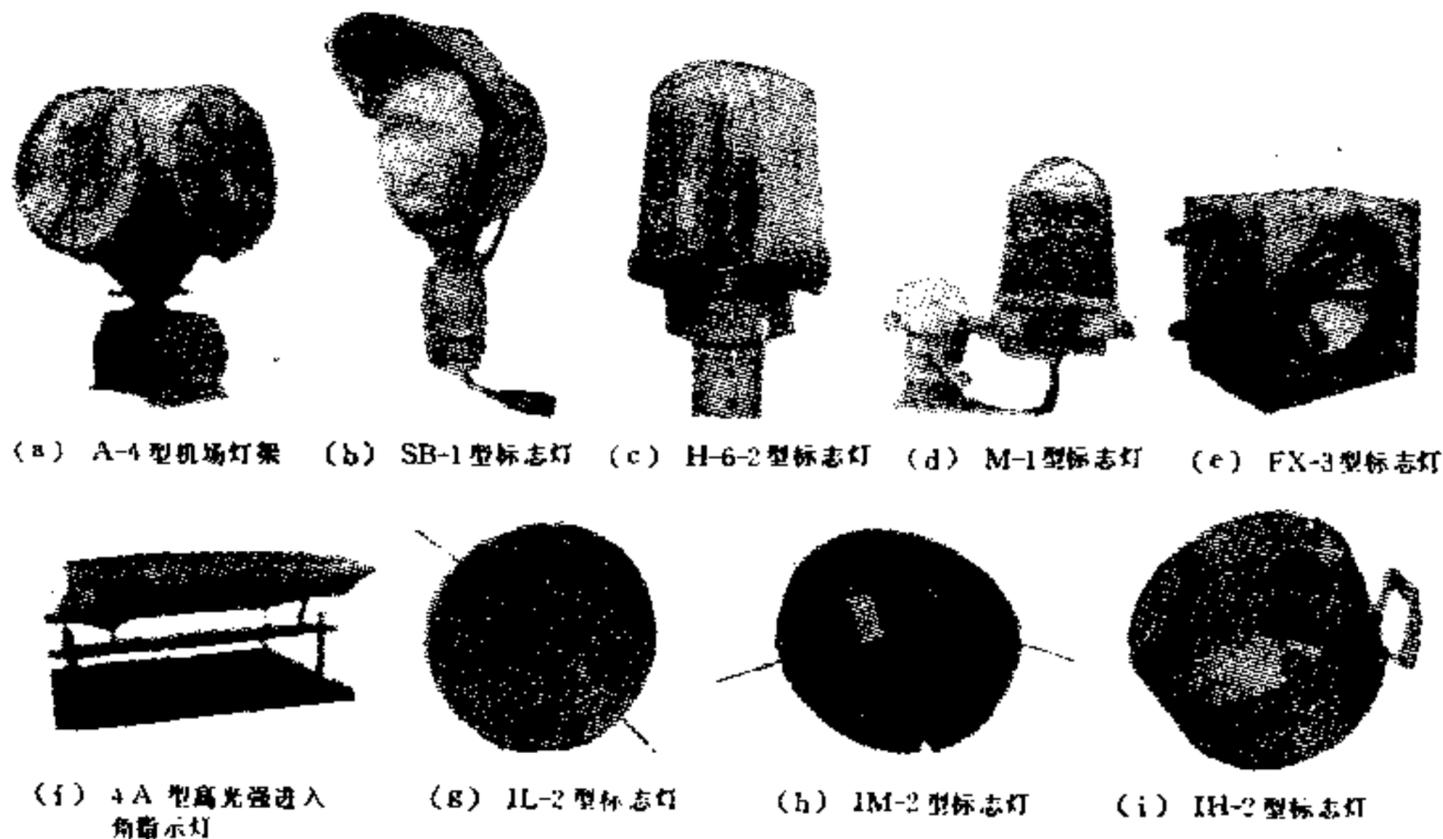


图24-11 各种灯具

靠的必要场合。

(2) 停机坪照明设施 飞机在停机坪停留, 进行检修、装卸货物、加油等, 要保证在夜间适宜进行这些作业。还有, 驾驶员将飞机开进停机场所, 都需要有充分的照明。

这种照明, 对起飞、着陆以及在地上滑行的飞机, 不应产生眩光, 另外, 不能妨碍管制塔的管制人员的视线, 这是非常重要的。经常分为停机点的总体照明和飞机侧面的局部照明, 按照能够各自点灭的要求配线。要求照度, 停机场所内的均匀度为 4:1, 平均水平面照度在 20lx 以上, 停机点之间、停机点与机场大楼之间等的平均水平面照度在 10lx 以上。这是国际标准。

灯具以 400W~1kW 的金属卤化物灯投光器为主, 同时使用 1~1.5kW 的卤钨灯投光器, 以备在停电后来电时, 能立即获得 1/3~1/4 的正常照度。在建筑物的屋顶、铁塔或电线杆上, 分数组设置 (图 24-14)。一个场地最少要从二个以上的方向照明, 必须保证不产生阴影。

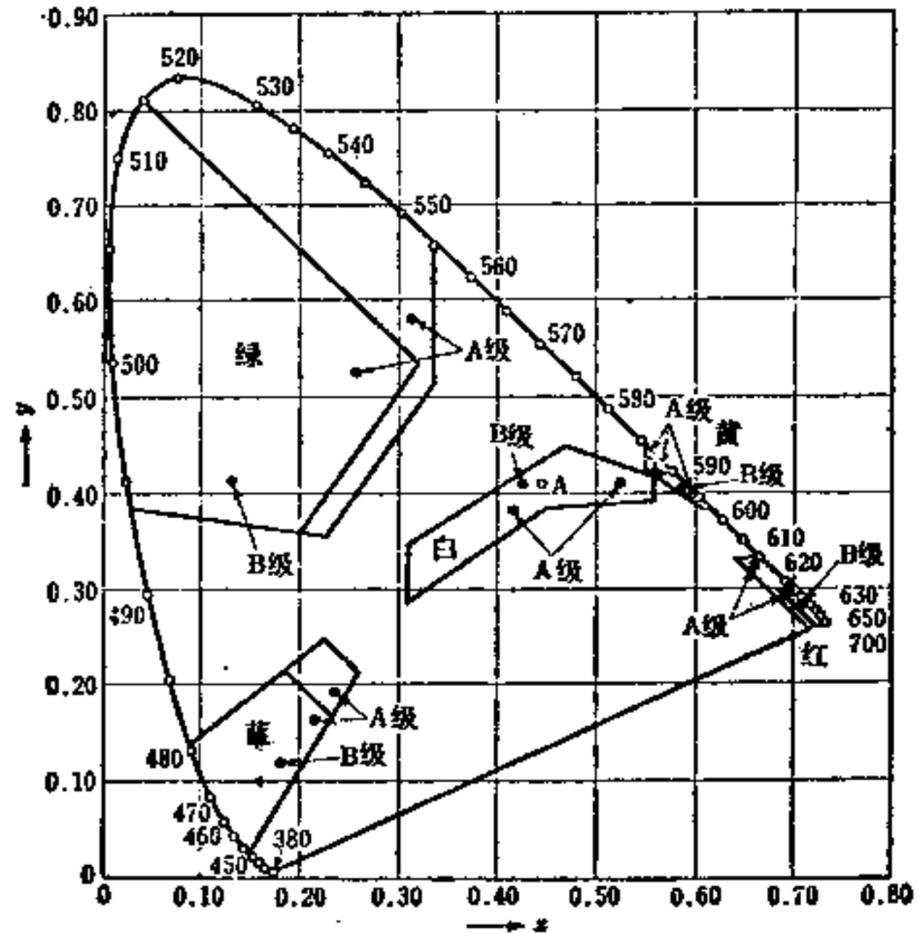


图24-12 航空灯光色的色度范围

24-2-3 机场照明设施的计划和方式

公用机场的照明设施, 根据机场的类型和规模, 地理条件, 使用的飞机的型号和航行方式, 预计的起飞着陆的数量等相应分为八类, 各类根据表 24-3 的设置标准作计划。

在作计划的时候, 为了提高可靠性, 要考虑到商用电源的停电, 仪器和电缆等的故障, 根据机场的重要程度, 采用双回路供电, 对于不能停电的设备, 发电机的电源, 其负荷回路必须分开供电或双回路供电, 对紧急用照明设施等也应作必要的考虑。作为总体统调设施, 计划应考虑到今后的增补和改进。

在机场照明设施中, 主要的是用管制塔进行远距离控制。控制仪

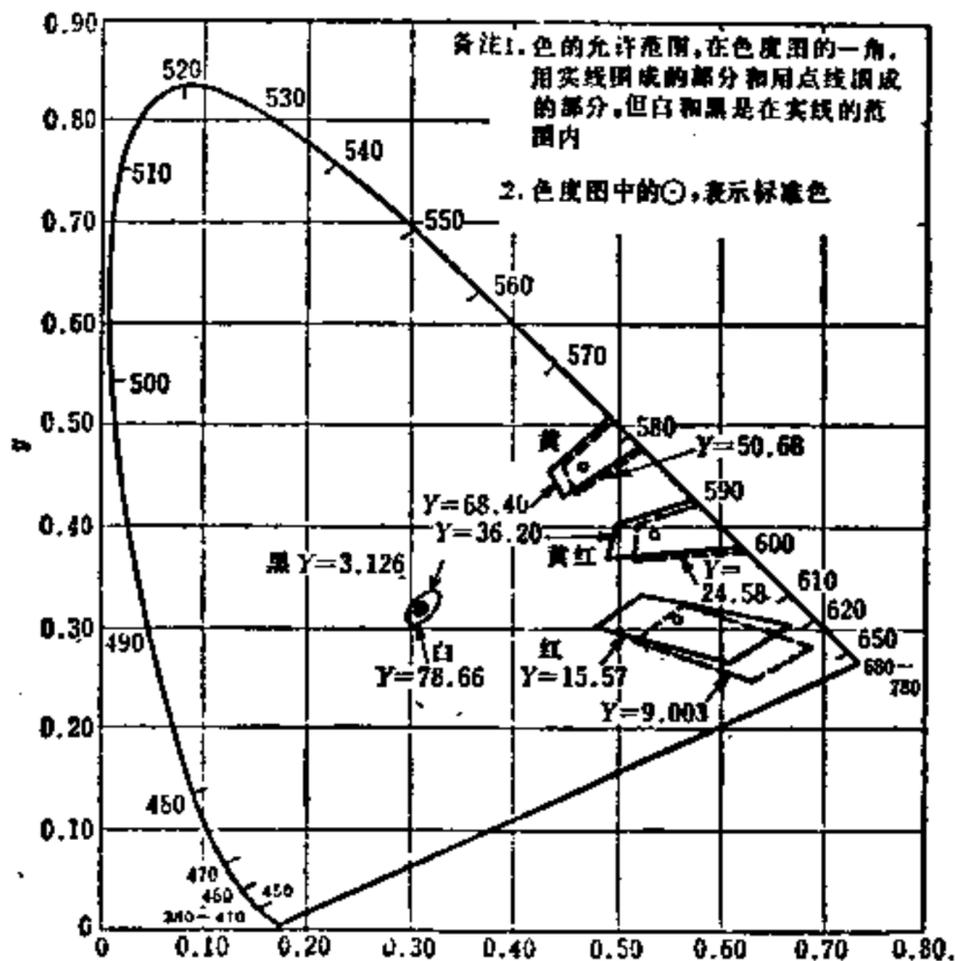


图24-13 航空视觉标志的表面颜色的色度范围

表24-3 机场照明设施设置标准

机场的类型、 航行方式 设施名称	陆 上 机 场 (1500 m 级以上)					同左 (800 m 级)		陆上直 升飞机
	喷气机起航		往复式喷气机起航			短距离起飞者 陆飞机起航		
	有 ILS	无 ILS	往复 4 次以上/日		其 它	往复 8 次 以上/日	其 它	
			降雪地带	其 它				
进入灯	○*							
进入角指示灯	○	○	○	○	○	○	○	
旋转灯	×	×	×	×		×		
进入灯架	○							
进入路指示灯	×	×	×	×		×		
滑道灯	○	○	○	○		○		
滑道末端灯	○	○	○	○		○		
滑道末端辅助灯	○							
滑道末端识别灯		○	○	○	○	○	○	
滑道中心线灯	○	○						
着地带灯	○							
滑道距离灯	○	○	○	○		×		
超越带灯	○	○	○	○		○		
机场灯架	○	○	○	○		○		×
诱导路灯	○	○	○	○		○		×
诱导路中心线灯	○	○	○					
导向灯	×	×	×	×				
风向灯	○	○	○	○		○		×
着陆区域照明灯								×
边界灯								×
边界诱导灯								×

注：本标准是除直升飞机外，以定期班机的机场为对象。

*：通常 ILS 设置侧为标准式，对面为简易式。

○：作为必要的设施设置。

×：在特定条件下，作为必要的设施设置。

器设置在专用变电所内，操作台设置在管制塔内，从变电所至各灯光的配线，采用地下电缆。

象进入灯、滑道灯等超越数千米的定负荷分布时，从性能上和经济上考虑，宜采用串联点灯方式，其回路如图 24-15 所示，通过定电流调节器，绝缘变压器给各灯具供电。由于定电流调节器供给负荷一定的电流（最大 6.6 A），改变这个电流，可分五个阶段（100、25、5、1、0.2%）调整灯的发光强度，定电流调节器有 LC 谐振式、过饱和电抗式可控硅整流器式（图 24-16）等。绝缘变压器涂覆氯丁乙烯，一般是装在各灯具的混凝土台基内，也可直接埋设在地下（图 24-17）。



图24-14 停机坪照明灯

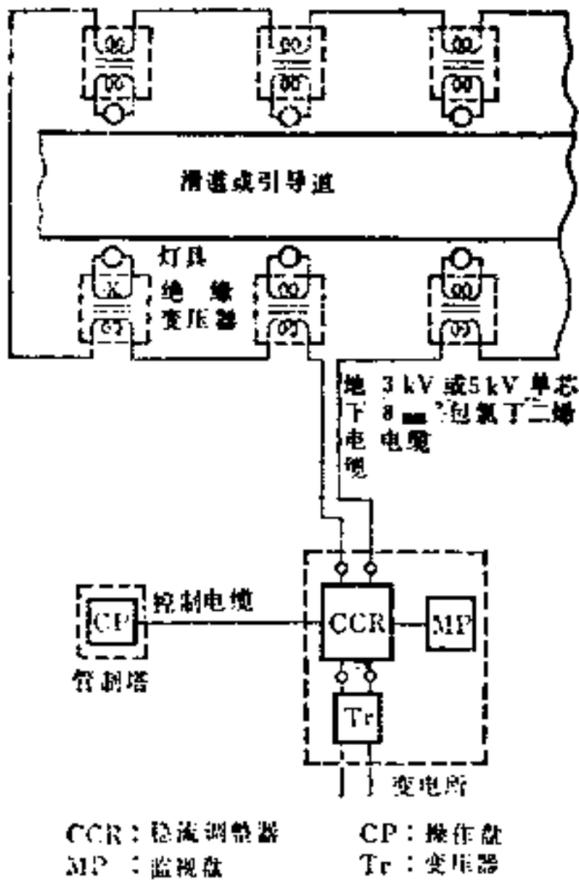


图24-15 串联点灯回路系统图

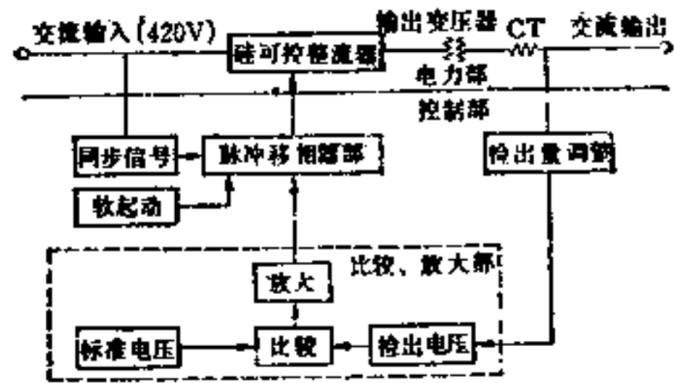


图24-16 可控硅整流器式定电流调节器系统图

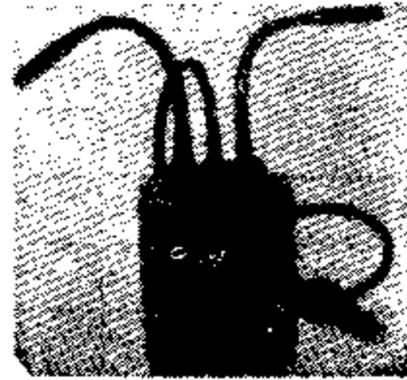


图24-17 绝缘变压器

在串联点灯回路中，使用涂覆氯丁乙烯的电缆，采用插头、插座组成的插入式连接方式。

24-3 航空障碍标志

24-3-1 种类和标准

为了表明对飞机航行有障碍的危险物（包括山和森林等）的存在，使用航空障碍灯和危险航空灯架，作为夜间和白天在恶劣视程时（仪器气象状态）的白天标志和白天障碍标志。在航空法和同类施行规则中，对必须设置这些障碍标志的物体、设置责任者、设置方法、性能和管理方法等，都作了规定（表 24-4、表 24-5）。

24-3-2 航空障碍指示灯

根据对航行产生障碍的程度和估计与飞机碰撞产生危害的程度，相应设置高光强和低光

表24-4 航线障碍标志设置标准 (根据航空法)

序号	必须设置的物体	标志种类	设置责任者	备注
1	高于地面或水面 60m 以上的物体 (有免于规定者)	航空障碍灯、白天障碍标志	物体的设置者	白天障碍标志设置的对象,是指在“必须设置的物体”栏中,在白天视认有困难的物体
2	机场周围的障碍物;显著接近进入表面、转移表面和水平表面的物体或其他物体	航空障碍灯	机场的设置者	
3	显著危害航行安全的危险物体	航空障碍灯、白天障碍标志	运输大臣	
	不适于设置航空障碍灯作标志的物体或对航行特别有危害的危险物体	危险航空灯架	按 1、2、3 项规定	

表24-5 航空障碍灯和危险航空灯架的性能要求 (根据航空法)

项目	低光强航空障碍灯	高光强航空障碍灯	危险航空灯架
光色	航空红色	航空红色	航空红色
灯光	不动光	闪光 (20~60次/分)	闪光 (20~60次/分)
光强	10cd以上	2000cd以上	7500cd以上
可见范围	包括光源中心在内由水平面以下 15° 以上的全方向	同左	同左
适用灯具	OM-3A型标志灯 (100V 100W) OM-3B型标志灯 (红氖管20mA) OM-7型标志灯 (100V 500W)	OM-6型标志灯 (100V 500W × 2) OM-7型标志灯用 2 灯代用	E-3型标志灯 (密闭光束100V 200W × 4) E-5型航空灯架 (密闭光束100V 500W × 5)

强两种障碍灯中的一种或两种都设置。航空障碍灯一般必须设置在能表示障碍物大概形状的顶部位置上。但是,象烟囱那样如设置在顶部就会影响它的机能的情况下,则设置在从顶部往下 1.5~3m 的地方。另外,表示大概形状的灯具与灯具的间隔,在水平、垂直距离上都定为 45m 以下。对于森林、山岳或输电线那样的障碍物,不可能在其上直接设置或不适于设置时,则应另立灯柱,在灯柱顶部设置。

机场内的车辆等移动物体,不易识别的静止物体或飞机,则在其上设置红色或黄色的闪光灯 (表 24-5、图 24-18)。

24-3-3 航空危险物灯塔

在必须设置高光强障碍灯的物体上,在必须特别早发警告的物体上,或是大范

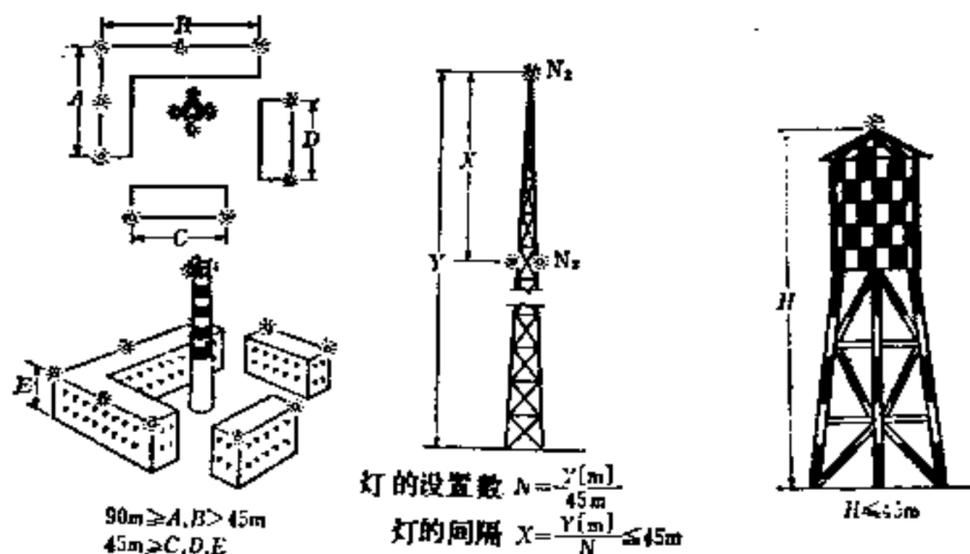


图24-18 航空障碍标志设置实例

围丘陵等, 由于航空障碍灯产生障碍标记而不适于设置航空障碍灯的地方, 应设置航空危险物灯塔 (参见图 24-19)。

24-3-4 白天障碍标志

在白天, 从飞机上视认有困难的烟囱、骨架结构物、气球、支线等物体, 以及对飞机航行安全显著有害的危险物, 必须设置白天障碍标志。

白天障碍标志的颜色, 应与物体表面色有较大的差别, 以提高白天的可视性。原则上是采用涂色的办法, 但对于不适于涂色的支线等可设置带色旗帜标志, 标志一般为白色 (孟塞尔色系的记号: N9.5) 和红色 (孟塞尔色系的记号: 5R4/13), 或为黄红 (孟塞尔色系的记号: 2.5YR6/13) 组成的条纹, 或涂成格子图案, 格子的边长, 规定在 1.5m 以上 10m 以下。

对于气球等物, 其涂色与背景的对比度, 要能明显地识别。

对于机场内的车辆等移动物体, 可在物体上涂色, 或者插上白旗和红旗, 或涂以黄红色格子图案的旗。



图24-19 危险航空灯架
(E-3型标志灯)

参 考 文 献

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> (1) 航空法 (2) 航空法施行規則 (3) 航空照明, 航空振興財団 (昭51) (4) Aerodromes Annex 14, To the Convention on International Civil Aviation, ICAO(1977) (5) Aerodrome Design Manual, Part 4 Visual Aids, ICAO (1976) (6) 空港輝度調査委員会: 空港周辺の輝度調査および各種灯型の輝度に関する研究報告書, 照明学会 (昭44) (7) 航空灯火の色光調査委員会: 各種気象下における航空灯火の見え方に関する試験研究報告書, 照明学会 (昭45) (8) 航空灯火適正光度研究委員会: 航空灯火の最適輝度に関する調査研究報告書, 照明学会 (昭45) | <ul style="list-style-type: none"> (9) 航空せん光灯火研究委員会: 各種気象下における航空灯火の見え方に関する試験研究報告書, 照明学会 (昭46) (10) 航空灯火の複合効果研究委員会: 空港照明機器の調査報告書, 航空振興財団・照明学会 (昭48) (11) 航空灯火の縦列効果研究委員会: 滑走路燈火の試験研究報告書, 照明学会 (昭50) (12) 航空灯火の横列効果研究委員会: 滑走路燈火の横列効果試験研究報告書, 航空振興財団・照明学会 (昭51) (13) 航空進入灯火の配列効果研究委員会: 報告書, 航空振興財団・照明学会, (昭52) (14) 進入・滑走路灯の試験研究委員会: 報告書, 航空振興財団・照明学会 (昭53) (15) 照明学会: 航空障害灯の見え方調査委員会報告 |
|--|--|

第 25 章

交 通 照 明

25-1 总 论

25-1-1 交通和照明

交通部门的照明主要分为以下三个方面：(1) 为乘客服务的照明；(2) 为业务的照明；(3) 为传送运行视觉情报的照明。

(1) 是车辆、飞机、船舶等的客舱照明，或是车站的月台、机场的候机室等处的设施的照明；(2) 是铁道调车场、围墙、车库等处的设施、运行调度室或管理事务室的照明。关于(1)、(2)的照明方式和照度，按一般的室内、室外照明看待，并根据交通设施的环境、视作业、电源等的特殊性，进行修改。(3) 是道路照明，用以帮助前照灯等传送视觉情报，信号、标志灯等用以给予直接情报。

本章叙述除道路照明、航空照明以外的所有交通照明，信号、标志更是交通照明特有的范围，在本节将论述其识别的基础理论。

25-1-2 在大气中光的衰减和视距

光通过大气时，由于混浊微粒的散射和吸收而被衰减。

在同一大气中的平行光束，根据朗伯定律，下式近似成立：

$$i = i_0 e^{-\sigma r} = i_0 T_r \quad (25-1)$$

式中， i_0 ：光束的初始强度； i ：光束通过距离 r 后的强度； σ ：大气的衰减系数； T_r ：大气的单位距离的透过率。

在通常的大气中，由于可见光的吸收比散射少，所以 σ 可作为散射系数考虑。在纯洁的大气中，在散射粒子几乎全为空气分子的情况下，根据雷利的散射公式，与波长的 4 次方成反比，波长短的蓝色光的散射比波长长的红色光的散射要强。在雨雾（水滴直径在 μm 级以上）的情况下，如果用 Mie 的散射理论，由于波长产生的散射几乎没有差异。在烟雾两者的中间，蓝色光有若干散射比红色光强〔1〕，〔2〕。

从背景中识别视对象，在对象和背景间必须有亮度或色度的差异，特别是要有亮度的差异或对比度。亮度的对比 C 的定义用下式表示：

$$C = \left| \frac{L - L_b}{L_b} \right| \quad (25-2)$$

式中， L ：对象的亮度； L_b ：背景的亮度。为要从背景中识别对象所必要的最小对比（对比的临界值），根据对象的大小、背景的亮度、观测时间、观测条件、对象的形状、颜色和轮廓的明显程度等而不同，在野外明亮的环境中，动态观测需要 0.02~0.05。

白天，在大气中从视对象直接射来的光，由于散射而被衰减，再加上散射昼光的影响

(图25-1), 视对象的外表亮度随着视距而变化, 视距为 r 时, 亮度 L 用下式表示:

$$L = L_0 e^{-\sigma r} + L_H (1 - e^{-\sigma r}) \quad (25-3)$$

式中 L_0 ——在近距离内看见对象时的亮度;

L_H ——对象方向的空中亮度。

式 (25-3) 右边第一项是从对象来的反射光, 第二项是由于散射光而产生的亮度, 随着距离 r 的增大, 后者的贡献也增大, L 就渐渐接近 L_H 。对于对象空中的亮度对比, 用下式表示:

$$C = \left| \frac{L - L_H}{L_H} \right| = \left| \frac{L_0 - L_H}{L_H} \right| e^{-\sigma r} = C_0 e^{-\sigma r}$$

式中, C_0 是在近距离看时的对比, 对比与光束的情况相同, 随距离而衰减。对比衰减到临界值的距离, 为可视距离。

因为在 $L_0 \ll L_H$ 的情况下 (暗对象), $C_0 \approx 1$, 所以

$$C = e^{-\sigma r} = T_v \quad (25-4)$$

将可视距离作为 V_m , $e^{-\sigma V_m} = \epsilon$, $\epsilon = 0.02$, 则

$$V_m = -\ln \frac{0.02}{\epsilon} = \frac{3.91}{\sigma} \quad (25-5)$$

这个关系是根据 Koschmieder 的理论而得到的。 V_m 是对应于大气的衰减系数 σ 亦即混浊程度的量, 即所谓的气象视程或标准视程, 与白天以天空作背景看大的暗对象 (森林、建筑物等) 时的可视距离大致相当。

图 25-2 表示 σ 和 V_m 、 T_v 之间的关系。为了求取 V_m , 可以用大气透过率或后方散射视程, 根据视程的观测, 进行概算。另外, 在大气中, 由于对象外表的色度也会由于散射而产生变化, 所以根据色度的测量也可知道 σ 和 T_v 与光的波长的关系^[3]。

25-1-3 视觉信号和视标的可视距离

处理信号灯光按下面三种情况进行研究:

- (1) 灯光作为大面积光源看 (视角明所视 $2'$ 以上, 暗所视 $10'$ 以上);
- (2) 中等面积;
- (3) 作为小点光源看 (明所视 $0.4'$ 以下, 暗所视 $20'$ 以下)。

(1) 的情况是把灯光和背景亮度的对比作为识别的因素, 根据亮度设计信号灯光。(2)、(3) 的情况是把从灯的总面积上发出的并在眼睛里产生的光的量作为识别的因素。灯的发光强度 I 变小, 或观测距离 r 变大, 在观测者的眼里产生的照度 $E = I e^{-\sigma r} / r^2$ 达到某一值以下, 就看不见了。能够识别灯光的最小照度是照度的临界值, 识别点灯的是无色临界值 E_u , 能够识别颜色的是有色临界值 $E_c (E_c \geq E_u)$ 。照度的临界值随背景的亮度、灯光的颜色、大小、形状而不同。

图 25-3 表示圆形灯光的无色临界值。发光强度为 I 的灯光, 在观测者的眼内产生的照度



图25-1 由于散射日光而产生的对象的外表亮度随距离的变化

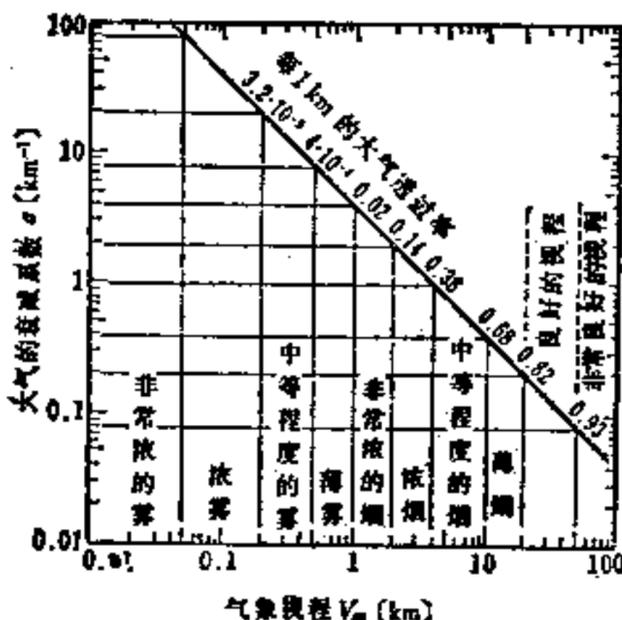


图25-2 大气的衰减系数与气象视程的关系

为 E_r (或 E_s)，可视距离为 V ，则

$$\frac{Ie^{-\sigma V}}{V^2} = IT_r' = \eta E_r \quad (25-6)$$

η 是在实际的动态观测条件下确实识别灯光的颜色的系数，白天为 10 以下，夜间为 10~100〔4〕。考虑这些的实际的临界照度亦如同图所示。

表面颜色标志的可视距离，可从亮度对比的衰减公式（参照前项）求取。可是，由于表面颜色标志是传达由颜色、图形、文字所产生的情报，其诱目性、注意性、可读距离都会产生问题。关于这些要给出一般的定量关系是有困难的，在标准罗马字的情况下，文字高度的 500 倍为可读距离〔5〕。

25-1-4 视觉信号和标志的颜色

信号、标志多数是以颜色作为情报的要素。可是，由于从远方在小视角内看时，能够识别的颜色的数量会减少，所以采用太多种类的颜色是不适当的。CIE 推荐的色度范围，关于信号灯，将红、黄、绿三色作为基本方式，同意使用白、蓝或蓝紫作为辅助色(图25-4)〔6〕。

表面颜色标志以红、黄、绿、蓝、黑、白作为基本色，以黄红、紫、灰色作为辅助色。

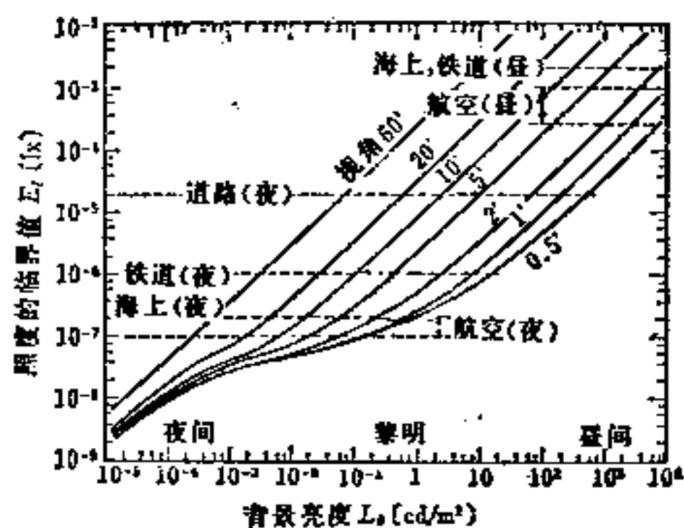


图25-3 各种大小灯光的照度的临界值与背景亮度的关系和对各种交通机构的信号、标志灯光的实际临界值 (DIN5037B12)

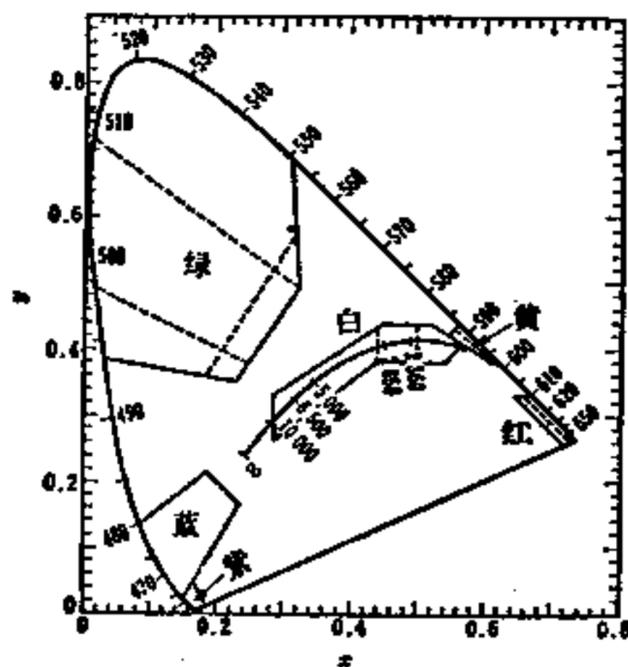


图25-4 CIE推荐的关于信号灯的颜色 (1975)

25-2 铁路设施照明

作为铁路设施，有旅客车站和与货物、车辆有关的固定设备等。

25-2-1 铁路设施的照明方法〔7〕

在设计铁路设施的照明时，作为一般的注意点，举出下面几项：

- ① 照明设施场所，根据作业内容等所要求的照度、照度分布和均匀度；
- ② 和邻近区域的照度梯度；
- ③ 在旅客或作业者的视野内，和晃眼对象物的亮度对比；
- ④ 根据设施的使用目的和环境，考虑光源的种类和光色；
- ⑤ 根据昼光的利用和室外的明亮程度，采取能够调整光源点灭的配线方式；
- ⑥ 易于灯的交换和灯具清扫等维护作业的设备；

⑦ 在室外，光的宽度、方向、阴影。

(1) 光源的选择

① 要高效率、长寿命的灯。

② 根据使用目的，选择具有适当光色的灯。在室外，要尽量避免使用与信号灯光色相类似的光源。

③ 在高空或维护作业不容易的场所，特别要使用长寿命、大光通的光源，尽量减少数量。

(2) 照明灯具的选择

(a) 室内照明灯具

① 在和建筑式样协调的基础上，尽量统一形式和种类。

② 采用便于维护的结构。

③ 要求材质坚固，具有不燃性。

④ 温升小。

(b) 室外用照明灯具

① 适合使用目的，要轻量坚固。

② 采用便于维护的结构。

③ 使用不怕卤素和其他腐蚀的材质。

25-2-2 旅客车站的照明

旅客车站是铁道输送设施，同时也是城市和街道的重要连接点。最近，由于地下铁道的发达，车站照明对于旅客和列车运行的安全，也是具有重要意义的。1975年制定的地下铁道的防火标准，适用于地下铁道之间的连接隧道。

(1) 照明方法

① 旅客经常流动，停留时间短，亮度分布不能在视野内产生不快感。

② 注意在旅客流动的邻接区域间的照度梯度。

③ 在使用车票和金钱的场所，要有适当的照度。

④ 上下车的地方的照明，不能影响列车运行。

⑤ 车站内和车站外广场，因为旅客流动量大，容易沾上灰尘和其他污染。要有容易维护的设备。

车站设施的主要场所的照明方法：

(a) 停车场和出入口 在上下车的地方，要有良好的照度，选择照明灯具和光源，要考虑到不点灯时的美观和与建筑物的协调。

(b) 中央广场 主要设施配置在车站中心的周围。因而所用照明灯具，要和建筑物的润饰和构思相协调。高顶棚时，最好用效率良好的灯具和高压汞灯相结合，照明率达25~90%。

(c) 候车室 候车室是迎送、等候列车等长时间停留的场所，要求所用灯具使环境具有安静、舒适的感觉。均匀度要达到40%的程度。

(d) 通道 因为通道的顶棚多数较低，配置的灯具要保证灯泡不被货物等碰坏。照明率要达到40~70%。

楼梯是为保证旅客上下安全，同时要有易于换灯、清扫等维护作业的设备。

(e) 站台 地面站台因为墙壁少, 照明率是 15~40%。在地下车站, 因为周围是墙壁, 照明率要达 50~60% 或更高。站台外照明, 按一般道路照明标准即可。在寒冷地带, 风能直接吹到光源的场所, 要考虑到由于温度而产生的影响。

(f) 售票口 因为使用金钱和车票, 采用局部照明。自动售票机的车票售出口, 按没有旅客自身的阴影那样的要求配置灯具。

(g) 洗脸室、厕所 因为这是容易污浊和容易引起犯罪的场所, 所以要有明亮的环境。在大便所和女厕所, 要按即使关闭门扉也不应黑暗那样的要求配置灯具。

(2) 照度 车站的照度, 根据车站所在地的环境、列车的数量、上下车旅客的数量等, 按等级划分, 经济地决定照度〔8〕。

表 25-1 表示车站内具有代表性的场所的顶棚、墙壁和地面的符合要求的反射率。另外, 荧光灯照明的场合下, 单位设备功率 (包括镇流器损耗)、照明率和初期水平面照度的关系, 用图 25-5 表示, 作为参考。

表 25-1 车站各部分使用的反射率举例

	顶棚(%)	墙壁(%)	地面(%)
中心广场	55~85	45~75	25~65
候车室	55~75	30~65	15~55
问询室	60~85	45~75	35~65
旅客通道、楼梯	55~75	30~65	25~45
站台	20~45	30~45	15~45
地下站台	55~70	35~65	15~45
洗脸室、厕所	60~85	65~85	45~65
售票室、会计室	65~85	45~75	35~55
车站服务室	65~85	45~65	30~60

25-2-3 铁路调车场

货车调车场大致区分为立体调车场和平面调车场, 还有集装箱调车场。所谓自动化调车场, 是指用电子计算机自动控制货车的方向和速度的调车场。

作为调车场的视作业, 有根据作业表而进行的货车的压缩空气管道等的释放或连接, 向运行中的货车的飞乘、制动操作, 停车中的货车的车票检查等, 都必须有照明。因为调车场的结构细长, 面积也大, 线路平行密集, 要达到均匀照度是有困难的。

(1) 照明方法 调车场的照明分为投光照明和泛光灯照明。

(a) 投光照明 因为是从 20~30m 高的铁塔上用投光器进行照明, 所以光源集中。根据线路布线将铁塔安置在适当的位置, 限定铁塔的有效照射面积。此时应考虑烟、雾等对光的衰减。这个值, 在不考虑衰减时, 应为 0.6~0.9 左右。

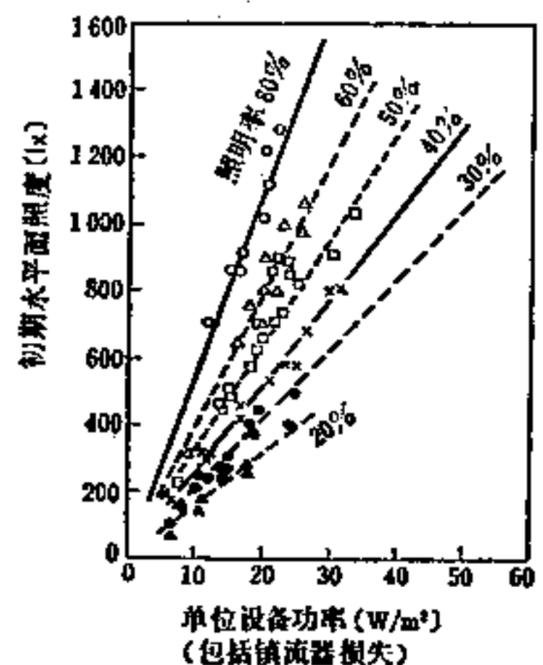


图 25-5 荧光灯照明的单位设备功率、照明率和初期水平面照度的关系

(b) 泛光灯照明 使用灯罩等。在用投光照明照度不充分时，场内狭窄时，有其它事情时使用泛光照明，照射范围狭窄。

此外，在跨越数条线路时，从高 15~20m 的门型铁塔上用投光照明，照明效果良好，但建设费用高。

(2) 光源 主要使用高压汞灯，停电或点灭时的启动时间内影响作业时，可结合使用卤钨灯等。

图 25-6 表示光源的高度、光源与货车位置的关系以及由于货车产生的阴影的长度的关系。表 25-2 表示货车调车场的单位设备功率（包括镇流器的损耗）和照明率以及平均水平面照度的关系，供参考。

表25-2 货车调车场和电车基地的室外照明的代表性实例

场所名称		平均水平面照度 (lx)	单位设备功率 (W/m ²)	照明率 (%)	场内面积长×宽 (m)
区分方向线	郡山	7.8(初)	0.35	44	550×150
	高崎	7.0	0.71	21	360×128
	浜松	4.0	0.32	35	—
	武藏野	4.4(初)	0.21	44	800×190
出发、停留、到达	郡山	3.4(初)	0.34	20	560×35
	梶谷(门形)	14.8	1.06	31	350×35
	大崎(门形)	15.5	0.91	14	185×63
	(电车基地)				

(3) 集装箱调车场 为了识别集装箱的车票、集装箱的锁扣装置和车辆编号等，在货车的侧面必须要有垂直面照度。为此而设置的铁塔，必须在不影响汽车行驶的位置上。

25-2-4 车辆基地

车辆基地中的车辆停车线，采用调车场的照明方法即可。广泛地使用泛光灯照明。

检查库内的照明，采用磁性灯具或悬挂式灯具，进行全面照明。通常因为顶棚高，有易于进行换灯等维护作业的设备。

在集电装置的检查中，当一般照明较暗时，采用荧光灯或反光灯进行局部照明。

在检查车辆底面的电动机、控制器、车轴时，从斜下方进行坑槽照明。前面的板由于容易被油等污染，要便于清扫，坚实牢固。发黑部分的初期亮度为 1 cd/m²。

25-2-5 隧道照明

在长 1 公里以上的隧道中，由于要巡回检

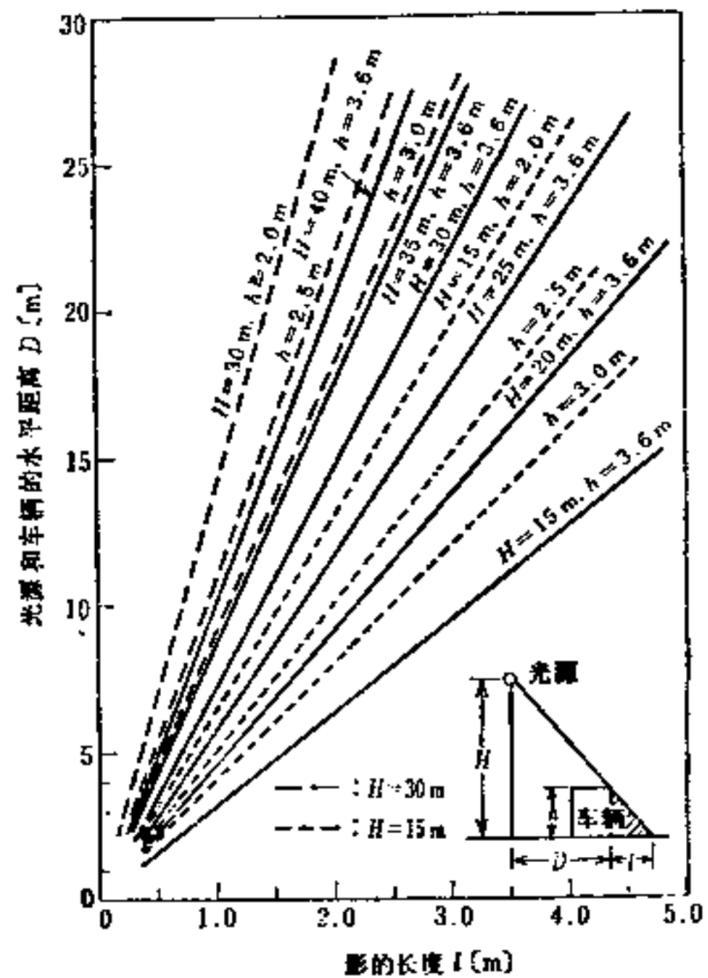


图25-6 投光器和车辆的位置关系及由此而产生的影长

查线路、电气设施,所以要有必要的照明设备。地下铁道的隧道,在列车发生事故时,能够确保乘客避难的通道具有 11x 以上的照度,应根据这个标准,设置照明设备。关于长5公里以上的隧道,也要设置同样的照明设施。

(1) **照明方法** 隧道内的照明设备,应设在建筑物的边缘,使之触摸不着。在复线的情况下,可间隔 $15\sim 20\text{m}$ 在两侧呈交错形配置。

隧道用灯具和信号灯在同侧设置时,注意其高度不要与信号灯竞争,以致都看不清楚。长大隧道和地下铁道的照明用配线,采用双线制,确保发生事故时的安全。

(2) **照明灯具和光源** 为了防止照明灯具被漏水或其它所腐蚀,壳体采用镀铅钢板或热硬化性强的塑料复合材料(FRP)等制造,以图获得灯具的长寿命。

光源使用高效率、长寿命的灯,通常使用荧光灯。

25-3 火车照明

铁道车辆包括电车、气动车、客车和货车。这里仅叙述旅客车辆的照明。

25-3-1 车厢内的照明^[9]

车厢分为特快型、快车型、近效型、通勤型和卧铺车、餐车,根据不同的车厢,采用不同的照明方式。

(1) **照明方法** 总的照明方法根据下面的原则确定:

- ① 在适当的照度下,提高均匀度。
- ② 不晃眼,亮度对比要小。
- ③ 顶棚、墙壁的反射率要在5%以上。
- ④ 在不致于产生座席阴影的位置上安装照明灯具。

(2) **照度** 车厢内的照度,部分符合国铁标准。

- ① 在看书面(离地面 $75\sim 80\text{cm}$)达 $100\text{l}\text{x}$ 以上。
- ② 出入口、通道的地面照度不能影响上下车及其它活动。
- ③ 在长途列车和卧车上,要有能减光的设备。

(3) **光源** 使用直管形或环形荧光灯。停电时的预备灯,可以使用白炽灯。餐车要使用光色好的光源。

(4) **照明灯具** 车厢内的照明灯具,要有以下特点:

- ① 与车厢内的设备协调。
- ② 能够承受车厢的连续振动。
- ③ 重量轻、效率高、坚固。
- ④ 容易维护。
- ⑤ 不点灯时,也无损美观。

(5) **各种车辆的照明方法**

(a) **特快、快车车辆** 因为乘车时间长,灯具的安装方向和视线的方向相同,所以带有灯罩的光源的亮度有所下降。

(b) **通勤车辆** 灯具的安装要考虑到在人多拥挤时,站立着的人的阴影不致于使座席的照度降低。

因为这种车辆的晃动比其它类别的车辆要大，所以要采用效率高而经济的灯具提高照度。

(c) 餐车 因为坐在那儿吃饭是一种享受，所以使用的光色和照明灯具，要使周围气氛具有舒适、协调感。也可使用间接照明。

(d) 卧车 因为卧车是坐卧兼用的，所以配置的灯具，在作座席时要确保必要的照度，在作卧车时不要影响安睡。此外，还要设置枕灯和脚灯。

25-3-2 前照灯

图 25-7 表示目前正在使用的车辆用前照灯的典型的配光曲线。密封光束型灯 (SB)，使用了交错用的向下配光的副灯丝。

由于前照灯能发现前方的障碍物，所以对于保证列车安全运行具有重要的作用。发现障碍物的可能距离，与障碍物的亮度有关。图 25-8 表示用白衣人和黑衣人进行实验时的确认距离，可见在距离 100m 以外，要确认黑色障碍物就有困难了。

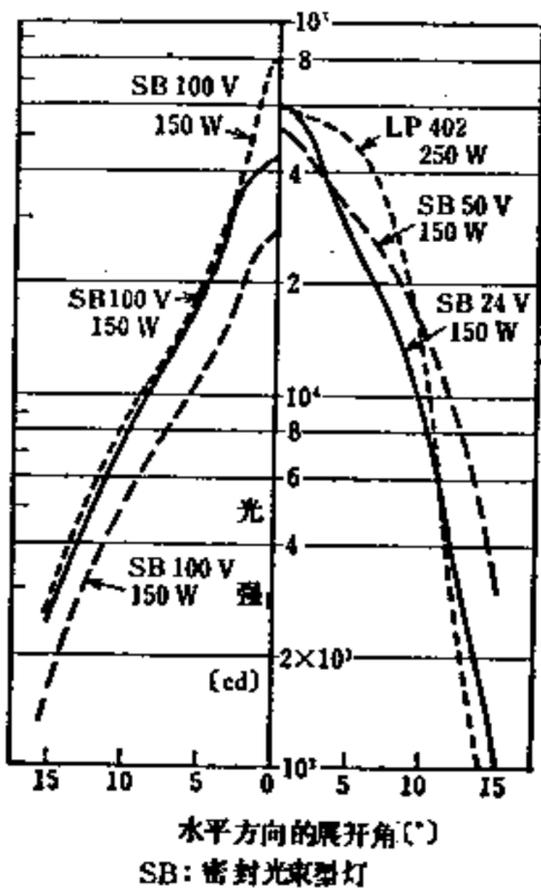


图25-7 现用前照灯的典型配光曲线

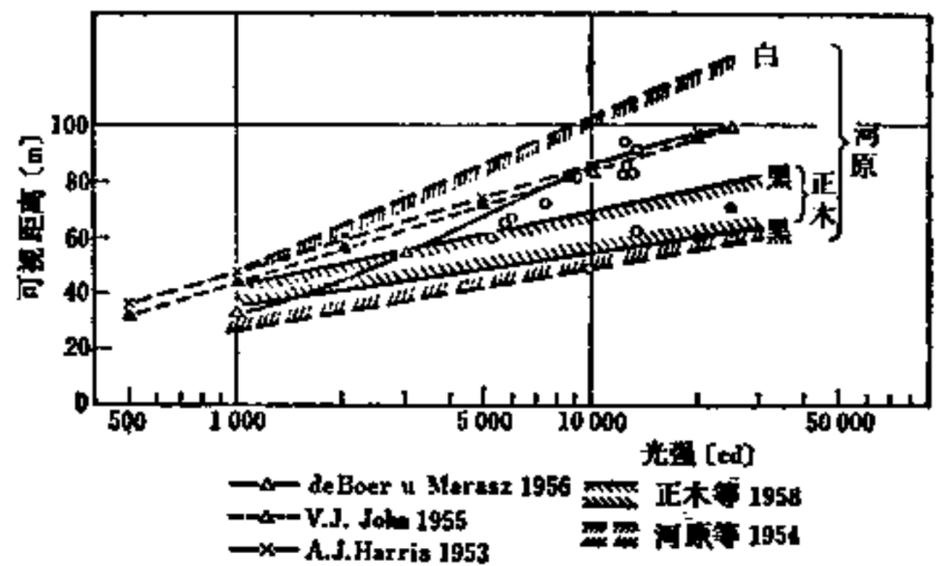


图25-8 前照灯的发光强度和确认距离

25-4 船 舶

25-4-1 照明方法

(1) 船内 多采用直接照明方式，使用白炽灯或荧光灯，使用手提灯作辅助照明。但在办公室内，由于要尽量采用与室内装饰相协调的照明方式，可用直接、半间接、间接照明等方式。

(2) 甲板上面 (暴露部分) 夜间，在甲板上要进行操纵船所必要的卷扬机、绞盘等的操作，另外，还要进行装卸上所必要的绞车、吊车、吊杆、装卸用阀门 (油轮上) 等的操作，操作者要求有适于完成危险任务的照度。

这种照明用直接照明方式，使用高输出的白炽灯、高压汞灯、钠灯等。装有吊杆柱、桅

杆、船桥甲板的，面积大时更要设置电灯柱。使用防水手提灯作辅助照明。

(3) **油轮** 装载着火点在 65°C 以下的油的船舶的危险场合的照明，在日本海运协会钢船规则中，有如下的规程（装载油泵室的场合）。

在同一室内的照明，使用许可的防爆型照明灯具。从同一室外的安全场合向同一室内照明时，采用通过隔壁或甲板上的玻璃窗的照明方法，或将防爆型隔壁灯的玻璃面气密地安装在同室的隔壁或甲板上（从安全侧换灯），进行照明。

另外，在载有油罐的暴露甲板上，在高 2.4m ，船舶前后方向延长 3m 的暴露区域，用许可的防爆型照明器进行照明。还有，携带灯使用JIS F 8425规定的自藏电池式防爆灯。

(4) **照度标准** 由于在JIS照明标准〔8〕附表13“船舶”项已有规定，基本上就照此执行。

25-4-2 照明灯具

(1) **船用照明灯具的设计方针** 因与陆上用照明灯具相比，环境条件不同，所以设计方针也不同。而船舶建造是根据船舶安全法、船舶设备规程和船级协会规则进行施工，必须接受许可检查。根据JIS F 8003“船用电气照明器具结构通则（白炽灯）”和日本船舶标准协会标准JMS8401“船用荧光灯设计指针”进行制作，并无困难。

照明器具的防水检查，现在是根据JIS E 8001“船用电气器具的防水检查通则”进行，符合规定的作为合格。在各种照明器具的标准中记载了各种检查条件，必须符合这些条件。

(2) **船内照明灯具** 由于办公室的特别照明灯具是非标准化的，所以配合室内装饰进行设计。其它一般照明使用的灯具，几乎作为JIS F都有标准化。如埋入式顶棚灯（非防水）、顶棚灯（非防水）、作业灯、防水型壁灯、防水型手提灯、睡眠灯、海图灯等。

(3) **暴露甲板照明灯具** 几乎全符合JIS F标准化。例如装卸用灯、甲板（照明用）灯、探照灯、特殊装卸用灯、反射型投光灯式平行光、高压汞灯式平行光等，都是防水型的。最后，因为要求高照度照明的关系，也正在使用卤素灯式平行光、高压钠灯式平行光。

(4) **防爆灯** 在装载着火点为 65°C 以下的油的油轮等危险场所，必须采用许可的防爆灯作照明。目前使用JIS F规定的标准化的耐压防爆顶棚灯、耐压防爆隔壁灯。另外，防爆灯控制开关也是标准化的，耐压防爆式携带灯（干电池式）也在JIS F 8425中标准化了。

(5) **灯** 船用灯全部在JIS F 8407中有标准化，承受船舶特有的振动试验，而且灯丝导入部分的玻璃能承受直流。

(6) **其它** 由于在船用照明灯具中使用的白炽灯用灯座、荧光灯镇流器、接线端子板、玻壳、前玻璃，各自都有JIS F标准化，所以发生故障、损坏时，皆可直接取换。

25-4-3 船灯

船灯除了桅杆灯、信号灯、船尾灯、停泊灯、红灯以外，还有根据海上碰撞预防法或海上交通安全法的指令规定的灯以及绿色闪光灯、拖船灯。

这里，从事国际航海的旅客船的电气式的航海灯（桅杆灯、信号灯、两色灯、船尾灯）的电源，可从非常和临时的非常电源供电，而航行于远洋区域或近海区域的船舶采用双重式供电，每个灯都用独立的航海灯控制板亦即航海灯指示器或同类产品供电。

在任何情况下灯熄灭时，必须要有自动显示，用蜂鸣器等发出警报。但总吨位在500吨以下的船舶，亦可不备自动报警器。

25-4-4 信号灯和探照灯

(1) **信号灯** 采用昼夜都能发送莫尔斯信号的昼间信号灯 (JIS F 8455) 和便携式昼间信号灯 (JIS F 8456)。前者是法定的船用品, 在船舶设备规程中简称为信号灯。此外, 还有夜间用的莫尔斯信号灯 (JIS F 8450)。

(2) **苏伊士运河信号灯** 船舶在夜间通过苏伊士运河时, 悬挂信号灯, 将船的状况通知对方, 根据苏伊士运河的通航规程, 用白灯、红灯、绿灯 1~4 灯组成组合信号。

关于这种信号灯, 在 JIS F 8457 中已有标准化, 采用固定式或悬挂式。根据船舶的装备状况, 可选其中一种方式装配之。

(3) **特殊航道用信号灯** 在特殊航道航行时, 必须装备各自规定的信号灯。如巴拿马运河信号灯, 汉堡号船尾灯, 同心圆形菱镜信号灯等。

(4) **苏伊士运河用探照灯** 夜间在苏伊士运河航行时, 所用探照灯应符合如下要求^[10]:

(1) 探照灯所照 1500m 前方运河水路中的圆锥形浮标上的反射带, 要有约 1lx 的照度, 照耀清楚 (大气透过率 = 0.74)。

(2) 前玻璃要用硬化玻璃。

(3) 反射镜要用玻璃或抛光过的铝 (反射率, 玻璃的要求达 95%)。

(4) 反射镜分二部分, 右左的光柱各有 5° 的光束宽度, 中央的暗带, 要能在 0°~10° 的范围内调节。

(5) 灯体为能承受 0.0245MPa (= 0.25kg/cm²) 压力的水密型 (对油船特别要求为气密型)。此外, 用软管将灯体内的热量排出, 并要装有安全阀。

(6) 探照灯内准备二个灯, 如果一个发生故障, 直接切换上另一个, 即可使用。

(7) 白炽灯的功率, 总吨位达到 30000 的船舶为 2000W, 总吨位超过 30000 吨的船舶为 3000W, 发光强度不能低于 3×10^5 cd。

(5) **船用探照灯** 最近多用氙灯代替 2~3kW 的白炽灯, 其性能如下例所示 (湘南工作所, 1976 年提供资料)。反光镜口径 60cm, 输出 2000W, 电源 AC440V, 采用强制冷却, 所需输入约 7 KVA, 光柱发光强度 36250000cd, 光柱角度 1°40', 色温 6000K, 寿命 600 小时以上 (发光强度下降到 80% 时)。

25-5 港口

日本是一个岛国, 有很多港湾, 利用船舶发展海上交通, 输送物资。在这些港湾中有各种码头, 随着经济的发展, 码头更是多样化, 同时使用量也在增加, 码头照明的意义就愈显重要。

根据用途分类, 大致有以下几种码头:

(1) 一般杂货码头;

(2) 集装箱码头;

(3) 车辆轮渡码头;

(4) 旅客码头;

(5) 娱乐 (recreation) 码头 (快艇港口等);

(6) 各种专用码头 (水产、矿石、木材、汽车、钢材、石油、建材、食品、肥料等)。

另一方面,按场所分类,有以下几种:

- (1) 垂直船岸标志线
- (2) 火车轮渡的接岸桥、造船厂、露天货场;
- (3) 乘降用设备、装卸机械;
- (4) 防雨棚、仓库、候客室
- (5) 道路、人行道、停车场、公园。

因为这样的码头设施的种类极为复杂,在进行照明设计时,必须首先很好地掌握对象内容,加以综合研究,然后确定方针。

为了保证夜间装卸作业、船舶离靠岸和旅客及其他的安全,必须有有效的照明,以提高码头运转的效率。

25-5-1 照度标准

表 25-3、表 25-4 分别表示室内和室外各设施的标准照度^[11]。这里所谓的标准照度,系指照明设备必须维持平均水平面照度的最低值。

表25-3 码头室外照明的照度标准

设	施	标准照度(lx)
火车轮渡的接岸桥	旅客和车辆的停留设施和游览船用系留设施	30
	货物系留设施	20
造船厂	集装箱制造厂、卸货场地	20
通道	旅客和车辆乘降用设施	30
	旅客和车辆的乘降口	50
	其他通道	20
道路	主要道路	15
	其他道路	7
停车场	轮渡车辆用停车场	20
	其他停车场	10
公园、草地	公园内的路	3

注:作为保险的照度,所有的设施都要有 $1\sim 5lx$ 。

表25-4 码头室内照明的照度标准

设	施	标准照度(lx)
旅客终点	候客室	300
	旅客乘降通道和乘降口	100
棚子、仓库	市场的卸货场地	200
	集装箱货站 汽车专用棚	100
	其他棚子和仓库	50

25-5-2 照明光源

选定光源时，当然要考虑其经济性，特别是室外照明使用的光源，要考虑码头的环境条件，注意以下几点：

- (1) **环境温度** 因为海岸风大，对灯性能的影响大。特别是在冬季寒冷的地区，选用的光源，在该温度条件下，对灯的光通稳定影响要小。
- (2) **寿命** 由于通常维护困难，所以应尽量选用实际寿命长的光源。
- (3) **光色和显色性** 选定光源时要考虑由于被照对象而产生的显色性。另外，靠近城市的码头中亦有市民游玩的公园和绿地，此处照明效果中很重要的任务是美化环境，所以光源的光色和显色性都要考虑。

25-5-3 照明灯具

对于室外照明用照明灯具，举出以下特别注意的几点：

- (1) 必须是防雨结构。
- (2) 关于灯体、照射面、照明罩子等材料，要富有强度不易劣化，特别是要考虑用不易被卤素腐蚀的材质。关于电杆、电源等附属设备也同样如此。
- (3) 要求灯座在强烈振动下，灯不会脱落，也不会接触不良。
- (4) 根据使用目的要有适当的配光，为了防止有害的眩光，必须安装必要的遮挡板、百页窗等。

25-5-4 照明方法

应很好地揣摩室内、室外的条件和照明目的，采取适当的照明方法。在照明设计中，除了参考前表所列标准照度外，必须同时考虑照度分布、阴影、眩光、显色效应等，灵活运用其他各类照明设施的设计技术。

在室外，一般的照明方法有：(1) 电杆照明，(2) 由照明塔产生的投光照明，(3) 从棚子的投光照明，(4) 悬索照明等；根据各个不同场合，进行比较研究，而后决定。

在大面积制造厂照明中，从维护作业容易、基数少但能有效使用等优点出发，较多使用照明塔投光照明。图 25-9 所示为集装箱制造厂的照明设施的铁塔结构[12]。

在码头的室外照明中必须特别注意防止眩光。在装卸作业时，为了减少对陆上或船上的作业员的眩光，必须考虑设置照明灯具的位置和照射方向。一般若从高处照明，由于远离视线，是行之有效的方法。

另外，对于靠岸中的船舶的船员的眩光，是一个重要的问题，所以必须注意限制向海上方向的配光。这时的容许限度，由于随周围各种灯光产生的环境亮度而不同，所以必须包含这些内容进行研究[13]。

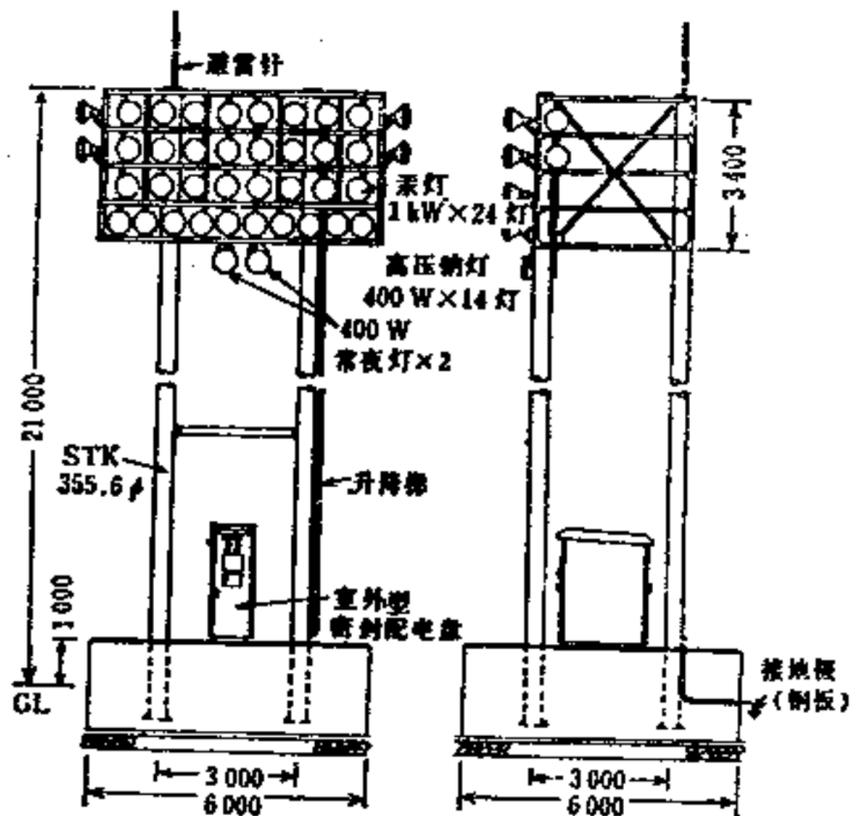


图25-9 集装箱制造厂照明用铁塔结构示例

25-6 汽车

25-6-1 前方照明

近年来，道路的照明环境有了显著改善，但因费用问题，期望所有的道路都能达到理想的道路照明，这在现实上是不可能的。因而，汽车照明中的前方照明的的重要性，将来也不会改变。

前方照明的配光功能有行驶中使用的前方视认性主体的行驶光束，在对面有车的情况下或在照明条件良好的道路上行驶时使用的眩光控制主体的交错光束，以及辅助它们的辅助光束。图 25-10 表示行驶光束和交错光束的标准配光。

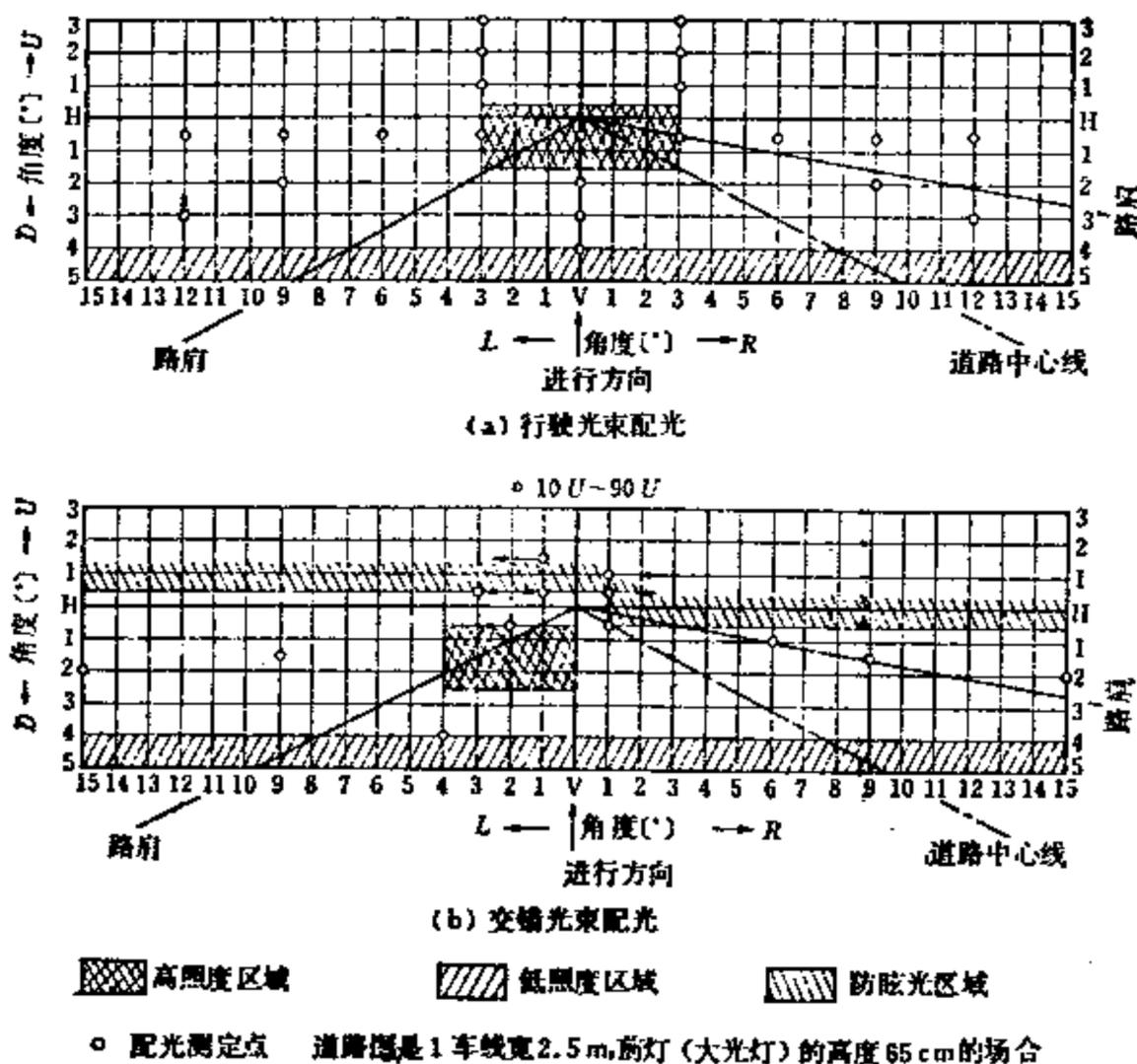


图25-10 汽车前灯的配光（左侧通行用）

前方照明的视认性，被目标物的亮度 L_o 和背景的亮度 L_b 的对比 C 所左右：

$$C = \frac{L_o - L_b}{L_b} \quad (25-7)$$

在一定的识别临界值以上的情况下，运行者能够识别目标物。通常，在前方照明的情况下， $C > 0$ 。在对面有车的场合，由于要加上由对面来车的前方照明的眩光产生的光幕亮度 L_s ，所以此时的对比值

$$C = \frac{L_o - L_b}{L_b + L_s} \quad (25-8)$$

要降低。可是由于识别临界值被由运行速度所决定的运行者的视野的变化、环境条件的变化

等所左右,所以至今尚不能对由前方照明所产生的视认性确定一个定量的计算公式。

关于前方照明,从安全的观点出发,制定有道路运行车辆的保险标准〔14〕,车辆用的照明用灯,在 JIS D 5500 (汽车用灯类)中亦有规定。另外,在美国,道路通行也按左右区分,采用和日本类似的前方照明配光〔15〕,在欧洲各国,则采用相当不同的配光〔16〕。

(1) **前照灯** 有四灯式、二灯式和一灯式,根据汽车的种类分别采用。图 25-10 表示标准的配光测试点。

在四灯式中有 1 型和 2 型之分。1 型是一根灯丝,作为行驶光束专用灯,2 型是二根灯丝组成的灯,一根用作行驶光束,另一根用作交错光束。二灯式和一灯式用灯,是由用作行驶光束和交错光束的二根灯丝组成的。

目前,关于汽车上使用的密封光束型前灯,在 JIS D 5504 (密封光束型汽车前灯)中都作了规定。另外,作为前灯用光源,也有的场合使用卤素灯。

(2) **辅助灯** 作为辅助光束用灯的代表性灯是雾灯(参照 JIS D 5500)。近年来,辅助光束发挥了积极的功能,被认为是前方照明的第三光束的动向,对于提高汽车夜间行驶时的安全性,成为今后的重要课题。

25-6-2 指示标志灯

这里所谓的标志灯,系指安装在汽车上的尾灯、方向指示灯、控制灯等。

(1) **标志灯的功能** 前照灯是将夜间前方照明作为主要目的,标志灯是将车的存在或司机的意志通知其他车的司机或步行者,以完成情报传达功能作为主要目的。标志灯传达的情报内容有:

- ① 确认汽车存在;
- ② 车距和接近状况;
- ③ 汽车行驶方向的改变;
- ④ 停车中的汽车;
- ⑤ 减速(制动)状况;
- ⑥ 后退中的汽车;
- ⑦ 汽车的种类(大型车、特殊车、紧急车等)。

这些情报都是通过视觉传达。因而,无论对于运行者或步行者,要提高视认性,都必须尽快地将汽车的存在和行驶的情报作正确的传达。

(2) **标志灯必备的要素** 标志灯的情报传达功能,最大的目的是防止事故。而且,不用说是夜间,即使在白天的直射阳光下,或雾、雨等恶劣天气下,都必须很好地完成这个功能。为此,关于光强、色度、配光曲线、尺寸(发光面积)、形状、安装位置、各灯光的配置以及同时点灯的灯光数量等,都必须很好地考虑。

从情报传达功能方面,正在作种种试验,以改善提高。其中并无现成装置,建议用告知汽车加速踏板和制动器的工作状态的指示灯,作为在路上停车的指示灯,建议用向后续车辆表示车速的尾部速度指示灯,作为减速指示灯等。另外,为了提高制动灯的视认性,在欧洲,转换昼夜间的发光强度的 two level system 正在标准化。

另一方面,标志灯在汽车外表是保险部件,同时也是汽车外型设计的一部分,它的大小、形状是多种多样。可是从安全方面,许多设计图纸上都对形状、大小、安装位置有所制约,而车的涂装色更必须符合规定的要求。

跟踪车的司机一时能判断的情报量有限，而判断情报要求反应的时间也要在1秒钟左右。为了正确、迅速地传达情报，单是从物理方面还不够，今后还必须从心理、生理等方面探究。

在标志灯以外，将利用三枚镜原理^[17]的来复反射器（RR）安装在汽车的后面、侧面和前面，夜间被其它车辆的前照灯照射时，将照射光向照射方向反射，从照射位置即可确认汽车的存在。

（3）标准 在日本，关于汽车用照明器具的标准，是根据道路运行车辆的保险标准决定的，详细规定见JIS D 5500。另外，关于颜色也是规定在色度范围内（参照4-3节）。图25-11表示汽车用照明器具使用的光色的色度范围。

在美国，在FMVSS^[15]中有规定，其详细标准是SAE。在欧洲，用ECE Regulation^[18]以各国批准的形式作为共用标准，至于各国内部的详细标准，按国内法规定。在澳大利亚，用ADR^[19]规定作为各州的共用标准，各州的详细标准，按州内法规定。可是，这样各个标准在细节上就会有若干不同点，所以关于出口车辆的照明器具，必须注意到这一点。另外，在美国和欧洲各国，都有汽车照明器具的承认制度，在欧洲，如使用没有表示认可番号的制品，就不会被批准。

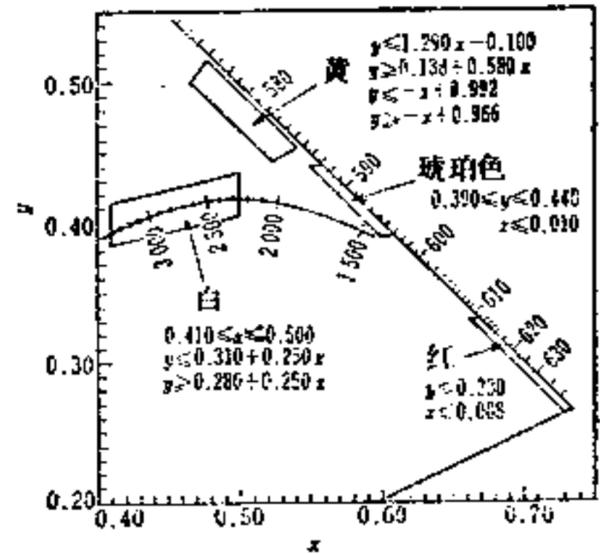


图25-11 在汽车用照明器具中使用的光色的色度范围

25-7 信号与标志

25-7-1 信号和标志

因为交通视觉信号和标志，都是为通过视觉传达交通机械运行的控制情报而设置的，所以对于驾驶室和管制室的指示灯和仪表，如果按广义的解释，都应属于信号、标志的范畴，但在这里仅限于对驾驶者和行驶者给予交通上的指示的野外设施而言。

本节叙述除航空灯光（第24章）、船灯（25-4节）、汽车标志灯（25-6节）以外的道路交通、铁路、海上交通等交通部门的全部信号、标志。

原则上，信号以采用点光源（或近处为小视角）灯光传送情报为好，标志是用文字、符号等表示，按光学分类如下：

（1）信号灯光 提供由点光源或近处为小视角的灯光的颜色、点灭、排列组合所产生的情报。

（2）电光标志 构成由灯光组合而产生的文字、符号等形象。有如下几种形式：用许多白炽灯组成文字、符号（狭义电光式）；在内部设置少量灯泡、反射镜，在显示板上配置装有聚光透镜的小孔（透光式）；在内部设置荧光灯，在显示板上用扩散透光板描绘形象（内部照明式或字幕式）等。

（3）表面色标志 这是非自己发光型，是描绘由涂料和着色带所产生的文字、符号、图形等形象的方式，许多交通标志皆属此类。

白天利用昼光照明，夜间利用外部照明，被前照灯照明时具有来复反射性的涂料，涂于

板或反射器上，兼用内部照明方式构成表面色标志。应用其它荧光性涂料、夜光性(放射性)物质，在电光标志中应用光学纤维，正在开发。另外，也有兼用二种以上的方式的。

25-7-2 道路交通信号和标志 将道路交通信号、标志按用途分类，如表 25-5 所列^[20]。

车辆用交通信号灯和步行者专用信号灯，采用道路交通信号机用灯 (JIS C 7528 TS100 或 TS100B) 所规定的半密封型灯具。图 25-12 表示其光源系统。

表25-5 道路交通信号、标志的种类

信号	车辆用交通信号灯	信号灯光(光源:白炽灯)
	步行者专用信号灯	带形象板的信号灯光(光源:白炽灯)
黄色点灭灯(中央分离带的顶端、路端警告等)		信号灯光(光源:白炽灯)
道路标志	道路标志	表面色(涂料、来复反射性材料等) 内部照明式或字幕式(光源:荧光灯) 电光式 其它
	区划线和道路标示	涂装、来复反射性材料
道路情报显示装置		电光式(光源:白炽灯) 字幕式(光源:荧光灯) 透光式(光源:白炽灯)

用前透镜凸出或图线切割，适当扩大光束。滤色镜的色度，对于标准光 A，把绿 $x = 0.180$ 、 $y = 0.385$ ，黄 $x = 0.565$ 、 $y = 0.435$ ，红 $x = 0.695$ 、 $y = 0.305$ 作为标准值。车辆用交通信号灯，要求中心光强 100cd 以上，确认距离 150m。由于从比较近的距离看道路交通信号灯，不是点光源，多数情况下看见的是一个大的光面，所以不仅光强，而且发光部分的亮度也成为识别的要素。

黄色点灭灯，是将道路交通信号机用灯或其它灯装在半密封型灯具中，或使用密封光束型灯。

道路标志，多数是用表面色涂装或来复反射涂料或显示板构成。可是，在干线道路、高速公路等要求判断敏捷、确实可靠的场合内，兼用内部照明式作为夜间外部照明。关于表面色的规定，如表 25-6 所列。夜间外部照明的场合，要求显示面的照度在 500lx 以上。来复反射板的性能，原则上按 JIS Z 9117 规定。

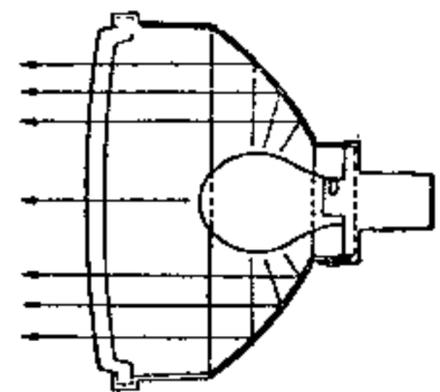


图25-12 道路交通信号灯的光学系统示例

表25-6 道路标志使用的表面色

	黑	蓝	绿	红	黄	白
标准色	N1.5	7.5PB2.5/7.5	5G4/8	7.5R4/13.5	2.5Y8/12.5	N9.3

关于道路情报板，规定在规格上要 and 道路标志有所区别^[22]。电光式的场合，使用灯 (JIS C 7710 T-20 额定 26V 6W) 的实际点灯电压，白天为 24V，夜间为 12V。字幕式的场合，由于内部照明所产生的白色部分的亮度，要求达 300cd/m² 以上。透光式的情报板，从

每 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的显示面到距离 1m 的位置上的照度, 要求达 11x 以上。

25-7-3 铁路信号和标志

作为铁路信号主体的是常设信号机, 有桁架式信号机、色灯式信号机和灯列式信号机等。桁架式信号机, 是表示由长方板形的桁架的位置、形状、着色等所产生的信号的信号的东西。

色灯式信号机, 有从各光学系统发出红、黄、绿等光色的多灯型的, 也有从同一灯具发出上述三色光的单灯型的。灯列式信号机, 是用二个以上的白色灯, 表示连接各灯的线的形象作水平、倾斜、垂直点灯的信号。

图 25-13 表示目前应用最多的多灯型色灯式的结构和光学系统, 图 25-14 表示其配光曲线, 所示配光曲线是用无色透镜代替有色透镜时的值, 亦即白色换算光强, 实际光强是用其乘有色透镜透过率的值。

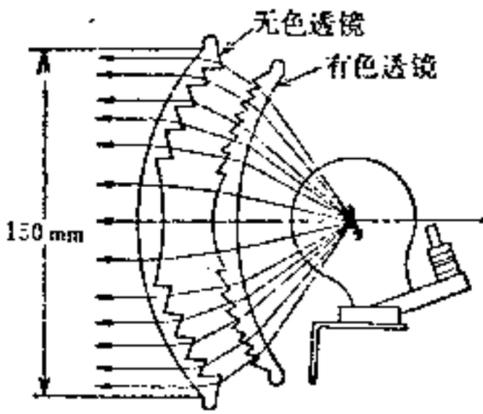


图25-13 铁道用多灯型色灯式信号机的光学系统

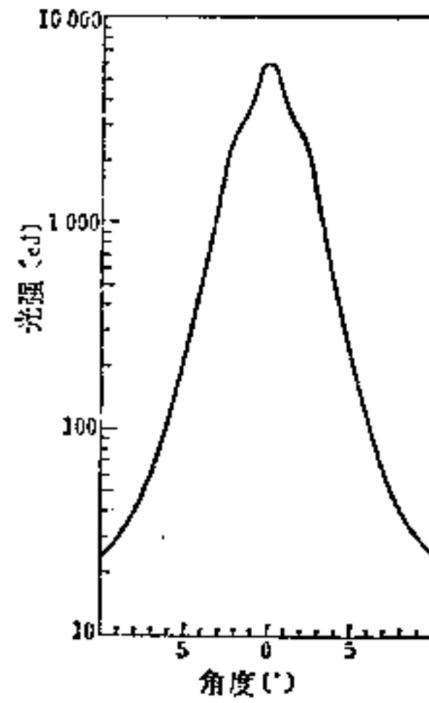


图25-14 多灯型色灯式信号机的配光曲线 (白色换算光强)

此时使用的灯是作为信号灯规定的耐震型的灯。滤色镜的色度相对于标准光 A, 红 $y \leq 0.293$ (道口警报机 $y \leq 0.307$)、 $z \leq 0.001$ 、视感透过率 6% 以上; 黄 $y \geq 0.411$ 、 $y = 0.429$ 、 $x \geq 1.240 - 1.610 y$ 、视感透过率 25% 以上; 绿 $z \geq 0.351$ 、 $y \geq 0.345$ 、 $x \leq 0.087 y + 0.162$ 、视感透过率 10% 以上。

色灯式信号机的确认距离通常达 600m 以上。晴天的白天, 背景亮度 $L_b = 10000\text{cd}/\text{m}^2$, 在观察者眼中的照度临界值 $E_v = 10^{-3}\text{lx}$ (图 25-3), 中心白色换算光强 $I_w = 6000\text{cd}$ (图 25-14), 有色透镜的透光率 $\tau = 0.06$, $I = \tau \cdot I_w = 360\text{cd}$, 大气的透过率作为 1.0, 适用公式 (25-6), 则可视距离正好为 600m 。

此外, 用转换标志 (紫和黄)、调车标志 (淡紫色) 等光色的, 尚有种种表面色标志。道口警报机是使用半密封型灯具的红色灯的点灭, 通知列车的接近。

25-7-4 海上交通信号和标志^[23]

在陆上或海上设置航海者能看见的航道标志, 在船舶上安装能被视认的船灯。航道标志是用灯塔、灯标、灯浮标等灯光作标志 (光波标志、夜标), 由立标、浮标等表面色产生的标志 (形象标志、昼标), 还有船舶信号、潮流信号等特殊标志。

光波标志, 多是将光源发出的光限制在有效范围内聚光。

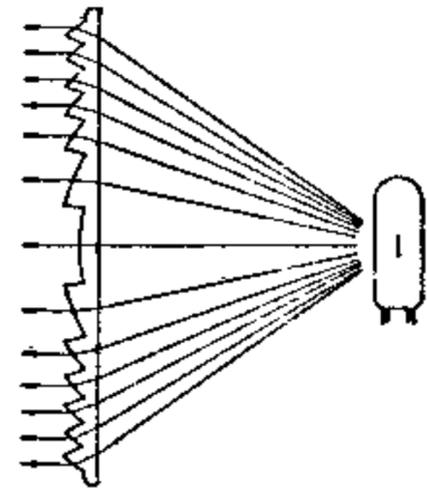


图25-15 光波标志 (灯塔) 的光学系统示例

将此作为旋转光束，如从一个方向看，就成为点灭信号。为此，往往使用非涅耳透镜，透镜根据内径和高度分为六个等级，图 25-15 表示其光学系统。使用特殊的灯作为光源。

关于航道标志使用的灯光的颜色，1968 年国际航道标志协会 (IALA) 原封不动地接受了 CIE 推荐的红、白、绿。在日本，海上保安厅据此做了狭义范围的规定。

中心光强高的可达 2000000cd，在观测者眼中的照度的临界值 (夜间) $E_v = 2 \times 10^{-7} \text{lx}$ (IALA 标准值)， $T_0 = 0.916/\text{km}$ ，根据公式 (25-6) 计算，考虑到海面的弯曲，视认距离可达约 83km。

参 考 文 献

- | | |
|---|---|
| (1) W.E.K. Middleton: Vision Through the Atmosphere, Toronto Univ. Press (1952) | (13) 阪口忠雄: 照学誌, 56 (昭 47) 663 |
| (2) 久保田, 浮田, 会田: 光学技術ハンドブック, 朝倉書店 (1968) 第 13-1 節 | (14) 運輸省令: 道路運送車輛の保安基準 |
| (3) 正木, 田中: 照学誌, 47 (昭 38) 234 | (15) U.S. Dept. of Transp.: Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) No. 108 および SAE Hdbk, Lighting J 579 |
| (4) DIN 5037 Bl 2 Signalscheinwerfer | (16) Economic Commission for Europe: E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505 Regulation Nos. 1, 2, 5, 8, 20, 31 |
| (5) IES Lighting Hdbk 5th Ed. (1972) 23-2 | (17) 久保田広: 光学, 岩波書店 (昭 38) 7 |
| (6) Publication C.I.E. No. 2.2, 1975, Colors of Lightsignals | (18) Economic Commission for Europe: E/ECE/324-E/ECE/TRANS/ 505 Regulation Nos. 3, 4, 6, 7 |
| (7) 国鉄電気局: 電力設備設計施工標準, 鉄道電化協会 (昭 49) | (19) Commonwealth of Australia: Australian Design Rule Nos. 1, 6 |
| (8) JIS Z 9110 「照度基準」 | (20) 全国道路標識・標示協会: 道路標識ハンドブック (1976) |
| (9) 車輛工業デザイン委員会: 車内設備品 IV, 車技技術 125 号 (1973) | (21) 正木, 古屋, 稲垣, 他: 照学誌, 56 (昭 47) 99 |
| (10) A.B.E. Suez Canal Authority Directorate of Transit: Suez Canal Searchlights Specifications No. 423096 (1975) | (22) 建設電気技術協会: 道路情報装置仕様書 (1972) |
| (11) 照明学会: 埠頭における照明設置基準調査報告書 (昭 50) | (23) 佐伯剛一: 航路標識, 海文堂 (1950) |
| (12) 興津コンテナヤードの照明, 東芝レビュー, 26-5 (昭 46) 1072 | |

第 26 章

剧场和摄影场所的照明

26-1 总 论

观众之所以到剧场里来,直截了当地说,就是为了看和听。为了使观众能很好地看清舞台上演出的戏剧或舞蹈等节目,舞台照明起到重要的桥梁作用。

舞台照明就是在“舞台上用灯光描绘出节目的情景”,为了达到这个目的,就需要发挥照明技术的作用,合理地操纵灯光,良好地描绘出节目情景。因此,为了提高舞台照明的效果,无论如何也需要利用照明技术和舞台布景艺术,这是不言而喻的。

没有舞台照明,戏剧就不能开幕。然而对这样重要的事情,目前还没有得到应有的重视,没有把照明溶合在戏剧和舞蹈之中,使场面令人注目。这种现状是不能令人满意的。

舞台照明与其他一般照明不同,它具有把舞台上演出的戏剧或舞蹈等表现出来的特别使命。舞台上所用照明设备和照明灯具的布置方式则是为了满足以下各种要求。

(1) **视觉** 要能很好地看得见舞台上演出的景物,用舞台的术语来说,就是在于正确地看出戏剧或舞蹈的创作或演出意图。

(2) **写实** 使舞台看起来好象是真实似的。对这一演出手法,就是所谓的照明写实效果。

(3) **美感** 要把舞台表现得很美,以致提高观众的审美的效果。

(4) **表现** 要渲染出戏剧和舞蹈等的思想情绪,这也是舞台灯光的一个重要作用。

在剧场建设的同时,就必须进行能很好地满足上述要求的照明设备的设计。

剧场除了舞台照明设备外,还有观众厅、前厅、办公室、演员化妆室等的一般照明。其中,观众厅和前厅要有气氛良好的照明,尤其是观众厅必须要能看得清节目单,对于多用途的会堂,因有各式各样的要求,也必须考虑把照度提高到较过去为高。为了预防事故的发生,太平门标志灯的设置也是不可缺少的。

电视摄影室和电影摄影室的照明和舞台稍有不同。这不仅因为舞台摄影处的机构不同,而且照明设备和照明器具的布置也不同,舞台有舞台的,摄影厅有摄影厅的,各有其特殊性,要有效地加以利用。其根本不同点,舞台是观众直接看的,电视是在摄影室内表演戏剧或舞蹈,光线照在摄影室内,通过电视摄影机和电波,一直映现到各个家庭的电视机的荧光屏上,然后进入观众的眼里。电影则是给予电影胶片照明,是以与舞台不同的间接条件来工作的,不是和观众直接发生关系。不论是舞台或是摄影室,都有相应的电子学时代的新设备。

必须把二十世纪的后四分之一世纪中每年出现的新技术,应用到舞台和摄影室中,充分运用新的光源,新的照明灯具,新的调光装置等照明新技术,以便提高与时代相适应的照明效果。这是今后舞台和摄影室照明工作者的重任。

26-2 舞台照明

26-2-1 舞台照明灯具的分类

在舞台照明灯具中,有两种分类。一种是按照剧场内安装的部位来分类,另一种是按照从照明灯具的构造所得的照明效果的性能来分类。

(1) 按照安装部位的分类 舞台用的照明灯具具有常设的固定灯具,和按表演节目的需要而设置的移动性灯具。一般而言,固定式灯具通常用它所在的部位的名称,移动式灯具则往往按照照明灯具的结构、性能来确定其名称。表 26-1 及图 26-1,表示固定式照明灯具的名称及其安装的部位,同时列出按照照明灯具的结构而命名的名称,以便对照。

(2) 按照照明灯具的构造和性质的分类 照明灯具的光线的性质大致可分为泛光灯、聚光灯及效果灯。按照照明灯具的构造和所使用的透镜种类可分为菲涅耳透镜聚光灯和平凸透镜聚光灯等。

表 26-1 按照安装部位的分类表

安装部位		记号	部位名称	灯具特性	灯具名称
舞台上部	舞台下部	a	排灯	泛光灯	场界灯
		b	吊灯	泛光灯	悬挂泛光灯
				聚光灯	柔光聚光灯
					平凸透镜聚光灯
c	天幕灯	泛光灯	上部天幕灯		
舞台内上部	舞台两侧	d	第一边幕灯	聚光灯	侧光聚光灯
				平凸透镜聚光灯	
		e	柱光	聚光灯	侧光聚光灯
				平凸透镜聚光灯	
f	天桥侧光灯	聚光灯	平凸透镜聚光灯		
		聚光灯	侧光聚光灯		
舞台台面	舞台地板	g	脚光灯	泛光灯	脚光灯
		h	下部天幕灯	泛光灯	下部天幕灯
		i	舞台照明灯具	泛光灯	带状灯
					盒式灯
				聚光灯	侧光聚光灯
		平凸透镜聚光灯			
		效果灯	集光聚光灯		
高架投影灯					
效果灯	效果投影灯				

(续)

安 装 部 位	记 号	部 位 名 称	灯 具 特 性	灯 具 名 称
前 面 周 围	二楼观众厅	j	楼厅聚光灯	聚光灯 棚光聚光灯 平凸透镜聚光灯
	观众厅顶棚	k	面光灯	聚光灯 棚光聚光灯 平凸透镜聚光灯 集光聚光灯
	观众厅两侧	l	侧面光灯(外耳灯)	聚光灯 棚光聚光灯 平凸透镜聚光灯 集光聚光灯
	观众厅后部	m	中央面光灯	聚光灯 平凸透镜聚光灯 集光聚光灯
	n	效果照明式投影机	效果灯	效果照明式投影机

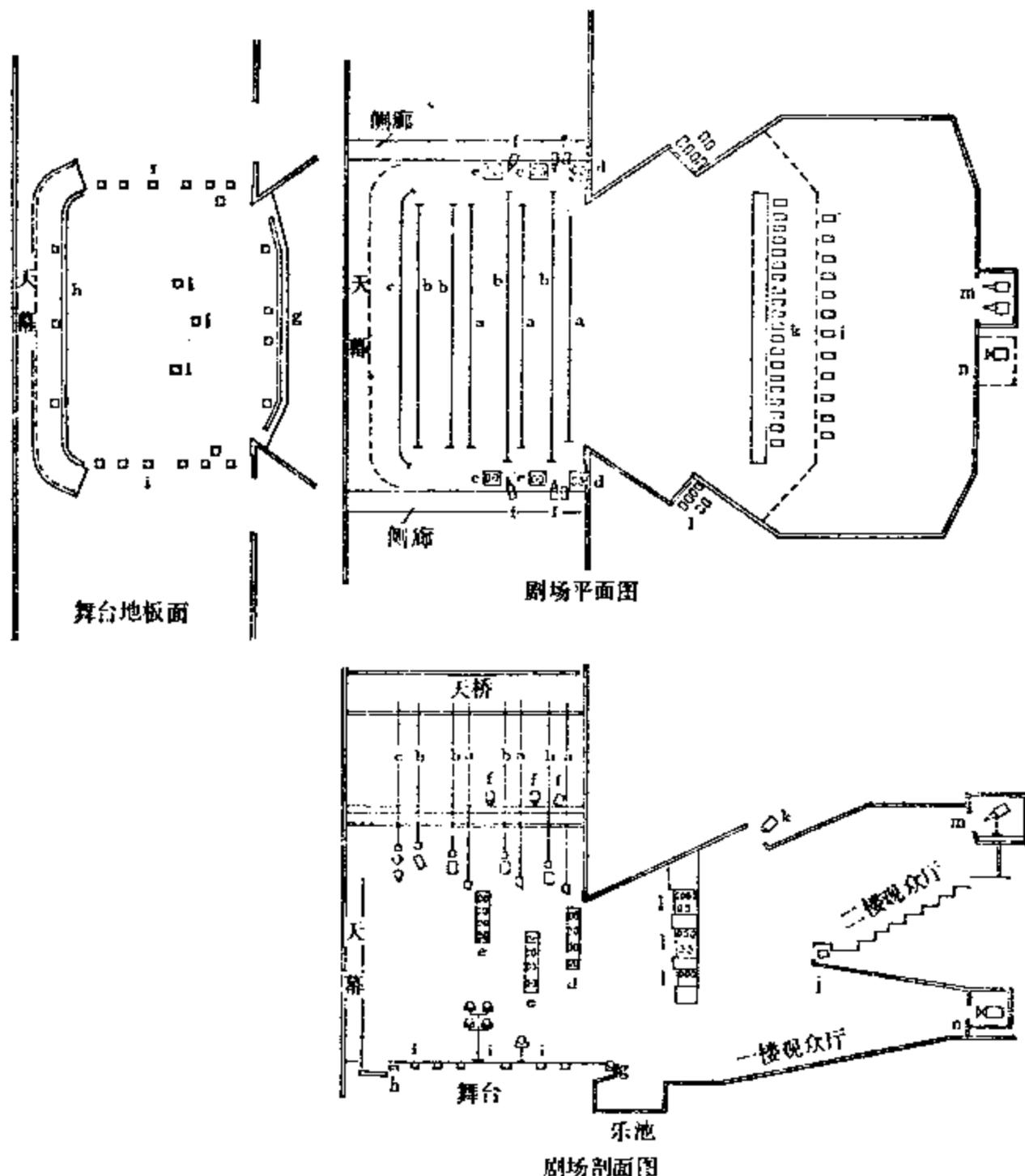


图26-1 舞台照明器具设备配置图

兹将舞台照明灯具的光学特性、结构种类和使用目的列于表 26-2。

表26-2 按照明器具的特性和结构的分类

分 类	器具名称	使用场所	照 明 目 的	照 明 器 类 别	固定程度
泛光灯： 照射范围广、光线柔和均匀，只依靠光源和反射的照明器具	排灯	舞台上部	作舞台的均匀一般照明用	100~300瓦连续灯具 3~4色配线	主要固定
	脚光灯	舞台地面	照明舞台台幕和向演员补光	60~100瓦连续灯具 3~4色配线	固定
	天幕灯	舞台后部上方	照明天幕，表现自然现象或幻想	300~1000瓦管内配线分 4~8种色	固定
	地排灯	舞台后部地面	照明天幕，表现水平线，地平面上的天空和幻想	100~500瓦，多数为连续灯具，用3~4色配线	固定或移动
	带状灯	舞台上排演出	照明舞台装置和背景的局部	60~100瓦连续灯具用1~2色配线	可移
	方灯	舞台上排演出	照明舞台装置和背景的局部	500~1000瓦，单灯	可移
	广角泛光灯	观众席后部、侧廊	远距离投光照舞台幕布	500~1000瓦，单灯	可移
聚光灯： 投光范围和光线强度可调，局部照明效果好，依靠光源、反射和透射的组合而得到的舞台照明的主要器具	平凸透镜聚光灯	吊灯 第一边幕塔灯 顶棚侧前灯 舞台聚光灯等	是舞台照明的主体，通过调节投光范围和角度可照明全舞台观众厅范围	300~2000瓦，单灯	固定或移动
	柔光聚光灯（菲涅尔透镜聚光灯）	吊灯 第一边幕塔灯 楼厅顶棚，侧前廊舞台聚光灯等	与平凸透镜聚光灯同样可通过调节投光范围和角度照明舞台和观众席全部范围，光线较平凸透镜聚光灯柔和，较泛光灯强烈	500~5000瓦，单灯	固定或移动
	束光聚光灯（光闸聚光灯）	吊灯 侧廊聚光灯 顶棚侧前灯等	此灯照射面轮廓清楚明了通过调节投光范围及角度均匀地照明被区分的范围	500~1500瓦 单灯	可移
	束光聚光灯（轮廓聚光灯）	中央聚光灯 顶棚侧前灯 侧廊聚光灯等	用于演员追光照明	卤钨灯1000瓦 氙灯500~2000瓦 金属卤化物灯1000瓦 直流弧光50~100安	固定
效果投影器： 通过将幻灯片插入光源和两个透镜之间，将自然现象和幻想效果投映到背景上的器具。	效果投影机	舞台地面，吊在舞台上的舞台装置里面	较近距离的局部投影效果，表现雨、雪、云、波浪，它的立体感强	卤钨灯1000~2000瓦 金属卤化物灯1000瓦	可移
	高架投影机	舞台地板面	较近距离投影，能从舞台两侧，大面积投映云、波浪、雪和火焰等	卤钨灯1000~2000瓦 氙灯1000~2000瓦 金属卤化物灯1000瓦	可移
	效果照明式投影灯	观众席后部	对整个舞台或局部范围进行投影，其映象不变形	氙灯2000瓦 直流弧光50~100安 金属卤化物灯1000瓦	

以上二种照明灯具分类中，排灯、脚光灯、天幕灯、地排灯等都是按照装置所在场所和照明目的而设计的。不过，按照装设场所的分类和按照器具的构造、性质的分类也都使用共同的名称。

26-2-2 泛光灯

(1) **性质和构造** 泛光灯的性质是光线的指向范围广、柔和而均匀。对舞台照明用的泛光灯有如下要求：

- (1) 在照明的范围内没有光斑。
- (2) 在照明的范围内没有显著的光斑边缘痕迹。
- (3) 为了得到有色光，需装设滤光片支架。

泛光灯的构造一般如图 26-2 所示，它利用从光源来的直射光和从曲面反射板来的反射光，而使其具有指向性的结构。但也有如图 26-3 那样作为远距离照明用的泛光灯，它将光源直射光由透镜聚光而射出光线，这就是投光泛光灯。此外，还有范围更广的为全部照明而设计的条灯，和为舞台的局部造成更有效果的柔和的光线，或为使曲面有均匀的照明而能调节其角度等需要而设计的单独灯具。

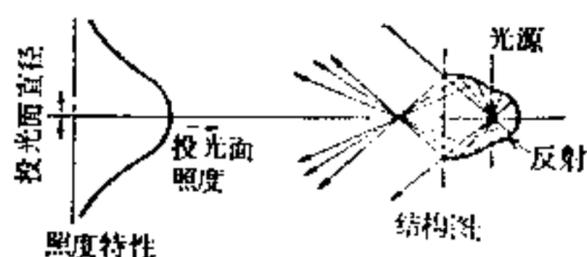


图26-2 泛光灯

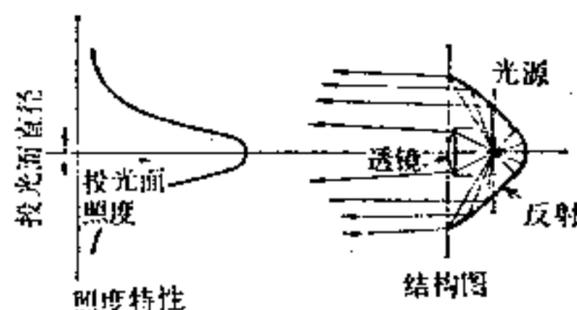


图26-3 投光泛光灯

(2) 舞台照明用泛光灯

(a) **顶排灯** 从舞台上部悬挂下来，最适合于为了使整个舞台有均匀的照明的情况，是表现戏剧场面所必需的设备。尤其是对于歌舞伎和日本舞蹈等，可以说是不可缺少的照明器。对于一般的剧场，它作为固定设备，在舞台的上部分成几排，是使舞台能有均匀照明的基本设备。但是在上演的节目中，尤其是在现代戏剧、音乐、芭蕾舞和现代舞蹈中，局部的照明效果比一般均匀照明要多，所以排灯也逐渐不成为固定的设备，而改为移动式的了。

顶排灯使用条灯，以 3~4 色分别配线，插入彩色滤光片，以电路的调光开关来配合情节的进行，把舞台的色调表现出来（参照图 26-4）。

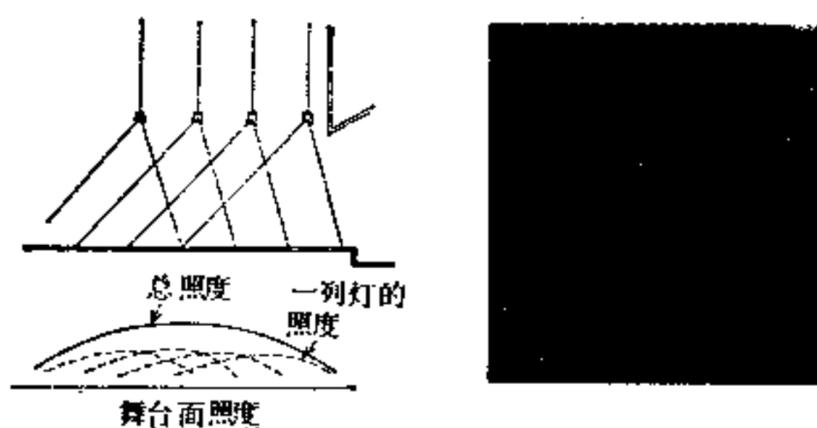


图26-4 排灯

(b) **脚光灯** 它设置在舞台地板面的前部，一般是如图 26-5 那样地嵌入设置的照明器具。舞台照明多从上部照射下来，脚光灯作为补充光线，可从下部进行照射，为的是有均匀照明。尤其是对歌舞和日本舞蹈等，它是重要的照明器具，是照亮表演者脸部或戏装的照明效果的必需设备。但对于音乐会或现代戏剧等反而常有不适合的情况，所以希望做成需要

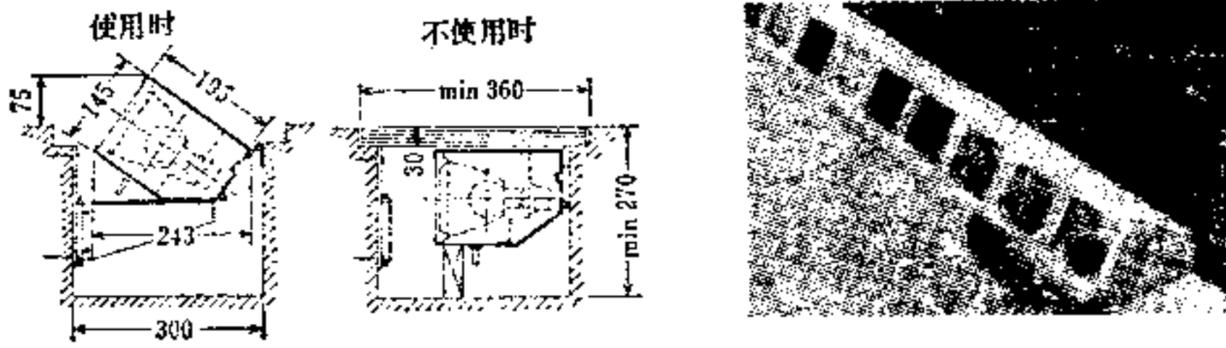


图26-5 脚光灯

时可以取出的隐蔽式设备。

脚光灯的构造，同从地板面照明的情况有不同的形式，它和顶排灯同样是条灯，以3~4色分别配线，以电路控制，配合演出的进行来取得照明效果。

(c) 天幕灯 它是对舞台背景均匀地照明的照明器，是表现戏剧深部场面的重要照明设备。一般的戏剧中，它在表现四季的变化，或早晨、白天、傍晚、夜间等一天的变化，或天气等的所有自然现象时，起着重要的作用。而且在现代戏剧和现代舞蹈演出中，为表现幻想效果常用天幕，它的照明效果和演出效果都是较好的。

圆天幕在观众的视界中占很大的面积，全部照明的手法一般如图26-6所示，通过顶排（上部）及地排（下部）两种天幕灯来照明。天幕顶排灯有宇宙空间无限性的表现，天幕地排灯则表现地平线及水平线上部的天空。

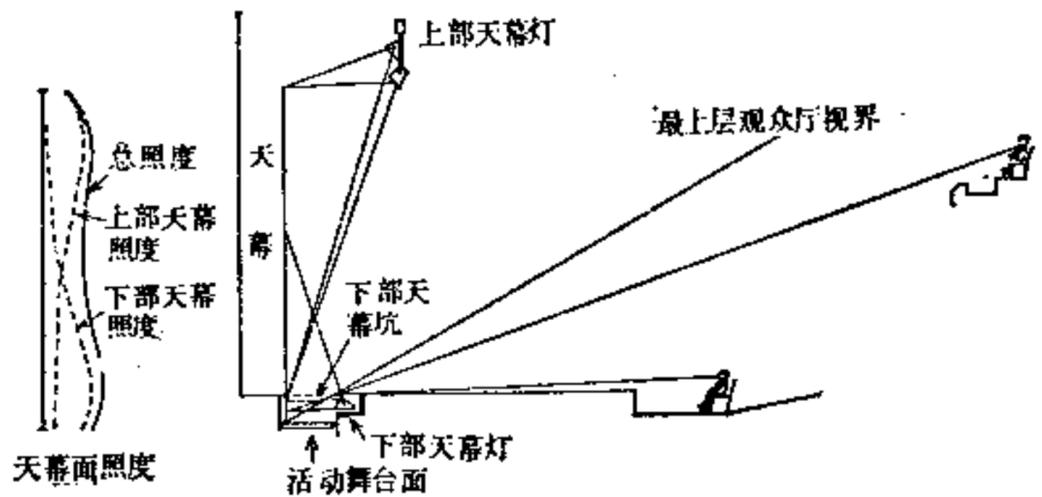


图26-6 天幕灯

天幕顶排灯的构造如图26-7所示，多使用单独器具，它的结构是从4~8色分色配置的配管（吊杆）连接电源，从舞台上部吊下来使用。依靠分色配线的电路控制，可造成形形色色的场面。

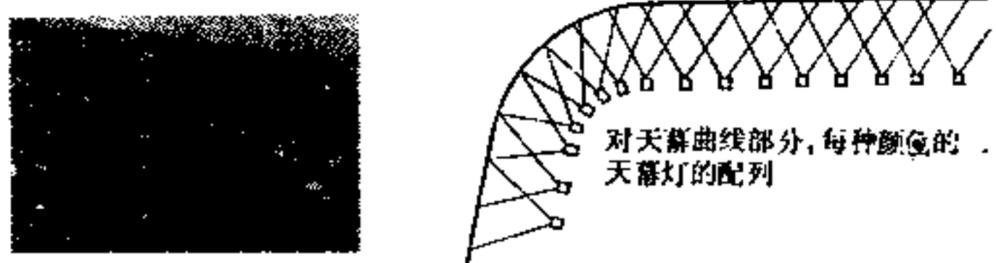


图26-7 上部天幕灯

天幕地排灯如图26-8所示，可设置在地沟内，使观众看不到照明器具，这是理想的，但因造价高，而舞台的利用面积也减少，所以也用如图26-9那样，附有遮光板的设置在舞台面上的型式。从必须小型化来考虑，器具一般做成条灯形、高度低而且搬运容易的结

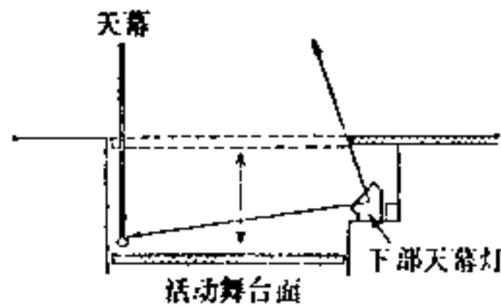


图26-8 天幕地排灯
(容纳在下部天幕坑内的方式)

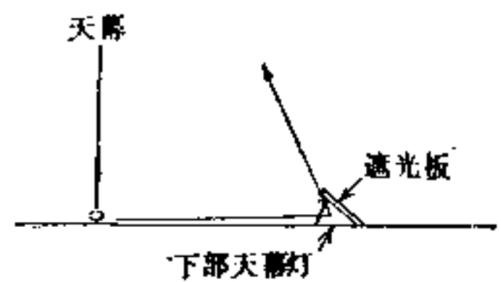


图26-9 天幕地排灯
(设置在地板面上的方式)

构。因为有这样的制约，色光的配线方式也限于3~4色，重点放在进行没有光斑的天幕照明上。

(d) 其它的泛光灯 除固定的泛光灯外，视表演节目而设置的照明器具，有带状灯、方灯、投光泛光灯等（参照图26-10）

26-2-3 聚光灯

(1) 性质和构造 聚光灯是投光范围较泛光灯窄，能调节投光范围和光线强度，从而得到局部投光效果的照明器具。用于舞台照明的聚光灯，需要有如下的特点：

- (1) 灯光的范围明显，光线近于平行光，而且较强，光圈的边缘显著。
- (2) 照明范围（光线的光通）和投光的角度能自由地调节。
- (3) 为了得到色光，设有滤光器支架。

聚光灯的构造是能把从光源发出来的光束利用反射镜集中到前面，通过透镜对舞台的局部范围自由地投出光线，并且如图26-11那样，能够调整光线的光通。调整方式有移动光源式和移动透镜式两种。由于调整而造成投光面的照度变化一般如图26-12所示。

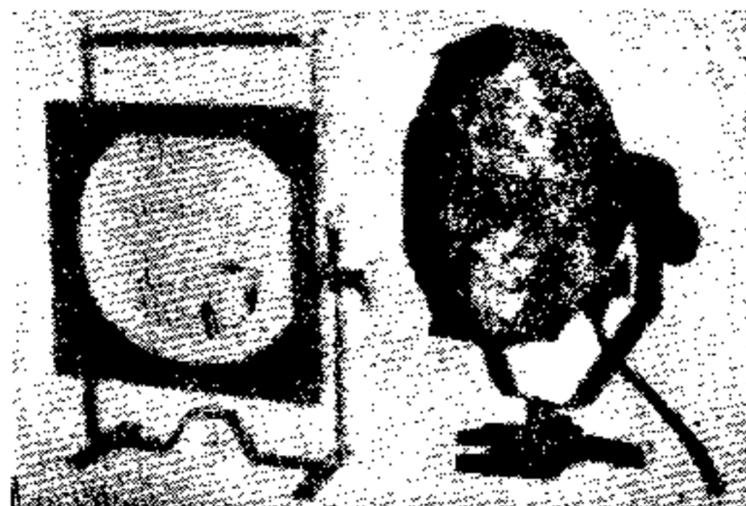


图26-10 各种泛光灯

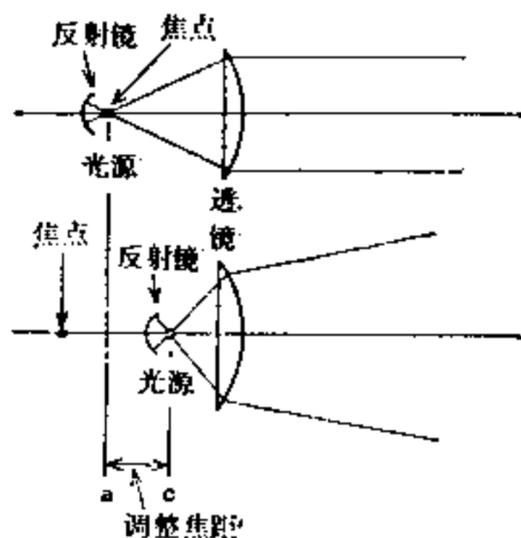


图26-11 聚光灯构造图

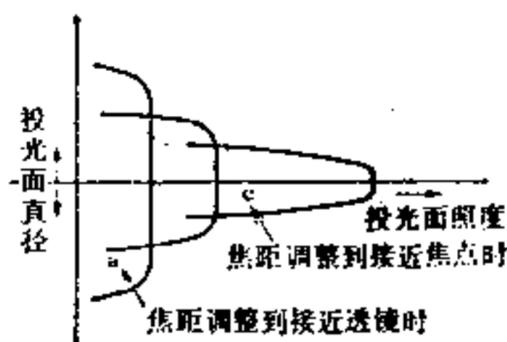


图26-12 聚光灯照度特性

(2) 舞台照明使用的聚光灯 根据投出光线形成的边缘形状，大致可分为柔光聚光灯、平凸透镜聚光灯和轮廓聚光灯三种。

(a) 柔光聚光灯 如图26-13所示，发出的光线的轮廓柔和的聚光灯，是聚光灯中光线柔和而显出轻松情绪的照明器具。由于通常使用菲涅耳透镜的结构，所以也可称为菲涅耳透镜聚光灯。

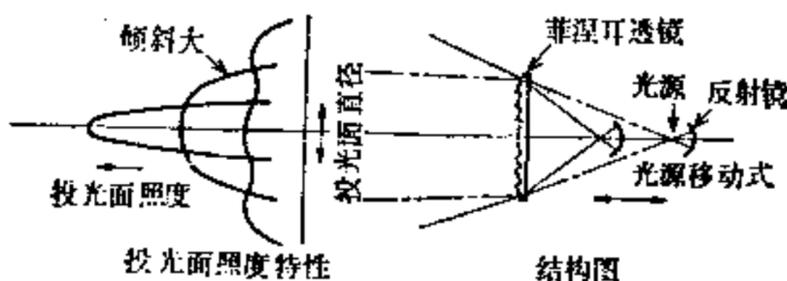
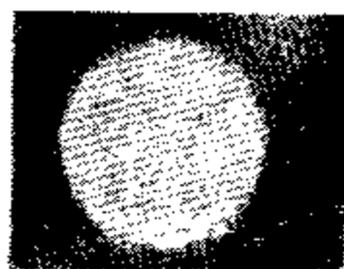


图26-13 柔光聚光灯（菲涅耳透镜聚光灯）和投光面的光线（左）

(b) 平凸透镜聚光灯 如图 26-14 所示, 光线的性质较柔光聚光灯为强, 轮廓虽然也显得清楚, 但不是像轮廓聚光灯那样是聚焦的光。因为从光线的质量上来表示它比较困难, 所以一般按它的构造通称为平凸透镜聚光灯。

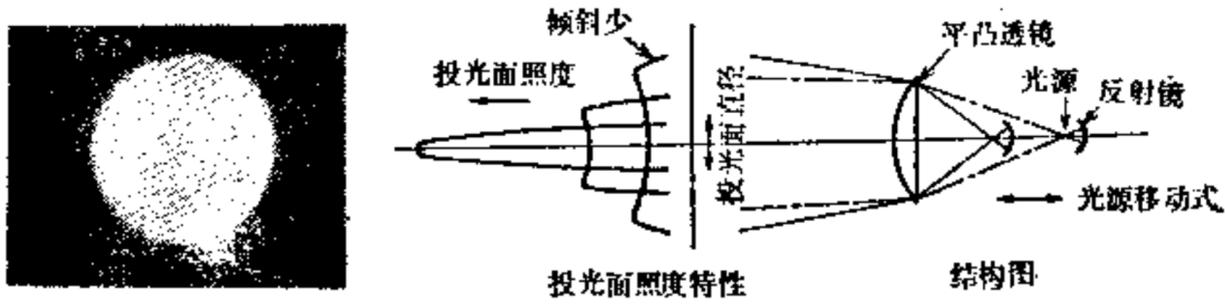


图26-14 平凸透镜聚光灯和投光面的光线 (左)

它现在已成为舞台照明的主要的照明器具, 在舞台上是必不可少的。

(c) 轮廓聚光灯 这种投光灯的结构, 可使投光面周围的光线强烈聚焦, 是用于追踪表演者时不可缺少的聚光灯。在欧洲称它为轮廓聚光灯, 在日本也有称它为高强聚光灯的, 光源需要有高照度, 所以也有使用氙灯或金属卤化物灯的。

最近在戏剧、音乐、芭蕾舞等的场面描写上, 也要求轮廓聚光灯, 可以认为今后它的利用率也是高的。

它与其他聚光灯不同, 有两个透镜, 还附有能改变投光面积大小的光阑和能使投光变化形状的截光板, 如图 26-15 所示。

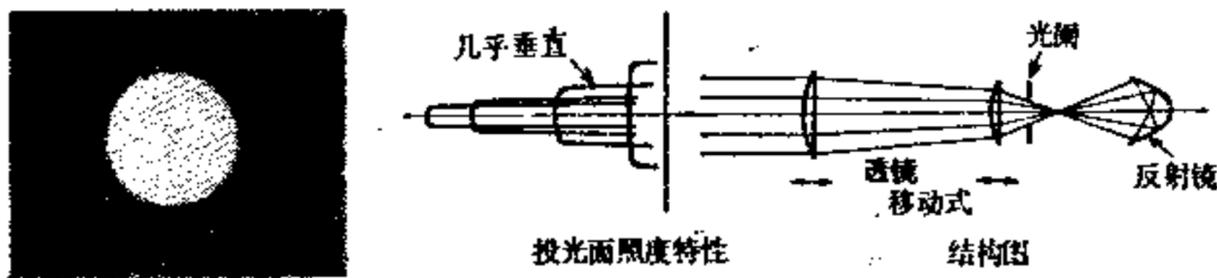


图26-15 轮廓聚光灯和投光面的光线 (左)

26-2-4 特技效果照明灯具

(1) 性质和构造 要在舞台上表现出戏剧中的各种不同气氛的场面, 就需要有特技效果照明。比如, 雨、雪、火焰、云, 波浪等都可以用特技效果照明表现出来。又如歌谣剧常用动的影子作背景, 舞剧又需用背景进行特技效果照明。这样, 特技效果照明在今天已成为特别重要的舞台照明要素。

特技效果照明多数是幻灯效果, 但其灯具的结构与一般的幻灯不同, 它大而亮, 而且需要动的投影, 所以舞台有专用的投影灯具。但其原理与一般的幻灯机相同, 如图 26-16 所示。

(2) 舞台灯光特技幻灯

(a) 特技效果幻灯机 一般是光源和聚光透镜组成的在聚光灯前面插进底片和效果机组合在一起, 在它的前端, 安装按投光距离和投影大小来选用的物镜, 调节投影状态, 即可使用 (图 26-17)。

也可以把聚光透镜放进平凸透镜聚光灯中, 以代替特技幻灯。

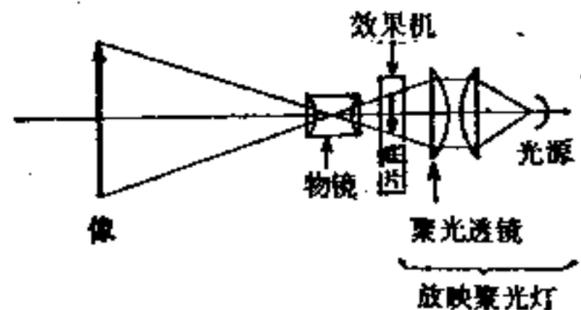


图26-16 效果照明器具的构造图

(b) 特技灯光幻灯机 这是投影的专用器具，它从观众厅后部向舞台投映，是常设的远距离用投映机(图 26-18)。

(c) 高架投映机 是可以移动的专用投映机，如图 26-19 所示。

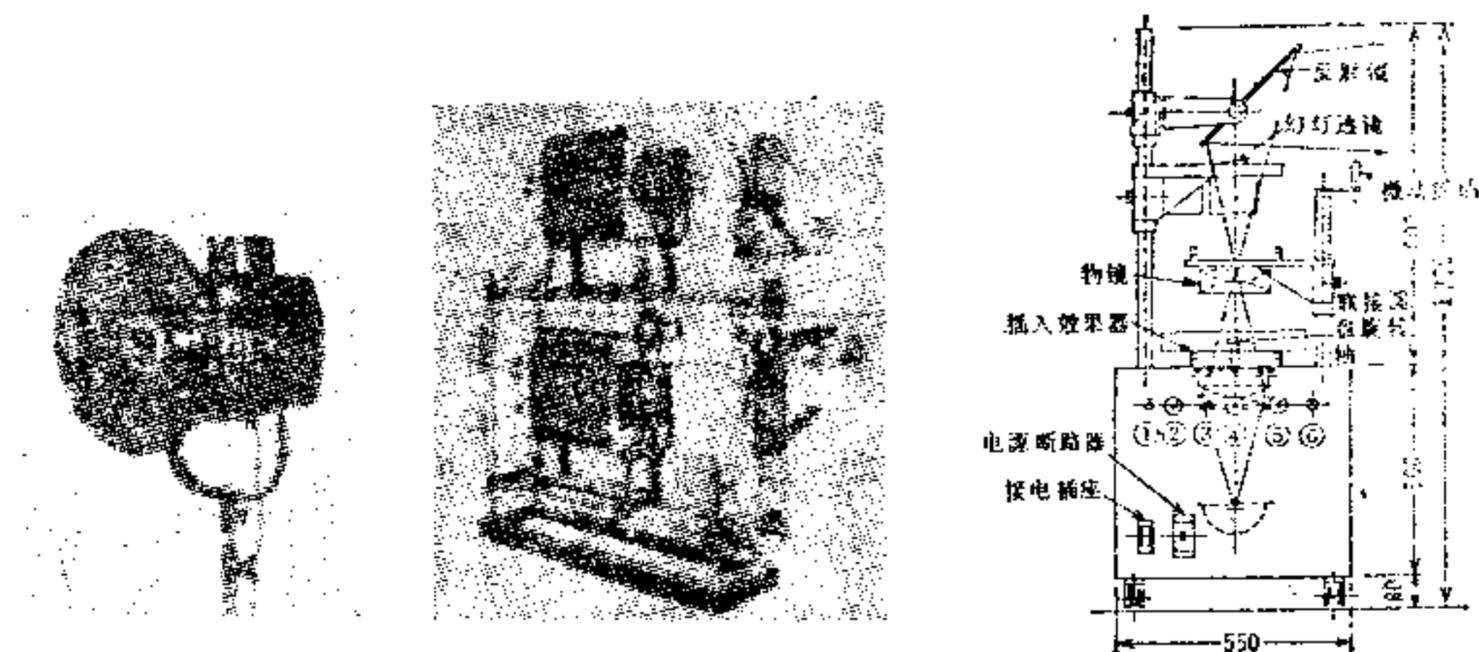


图26-17 特技效果幻灯机 图26-18 特技灯光幻灯机 图26-19 高架投映机

(d) 投映机的附件 如能插入雨、雪、云或波浪等底片，并能转动底片的效果投影器，和能插入月亮，太阳或风景底片的移动式幻灯机等。

26-2-5 其它的舞台照明附属设备

有遥控的聚光灯色彩变换装置，有能把一部分光线遮断的遮光投映机，有能把投光角度遥控的光源变压装置。

电源接插元件也与普通的不同，大型而牢固的 A 式接插元件也是重要的舞台照明的附件(图 26-20)。

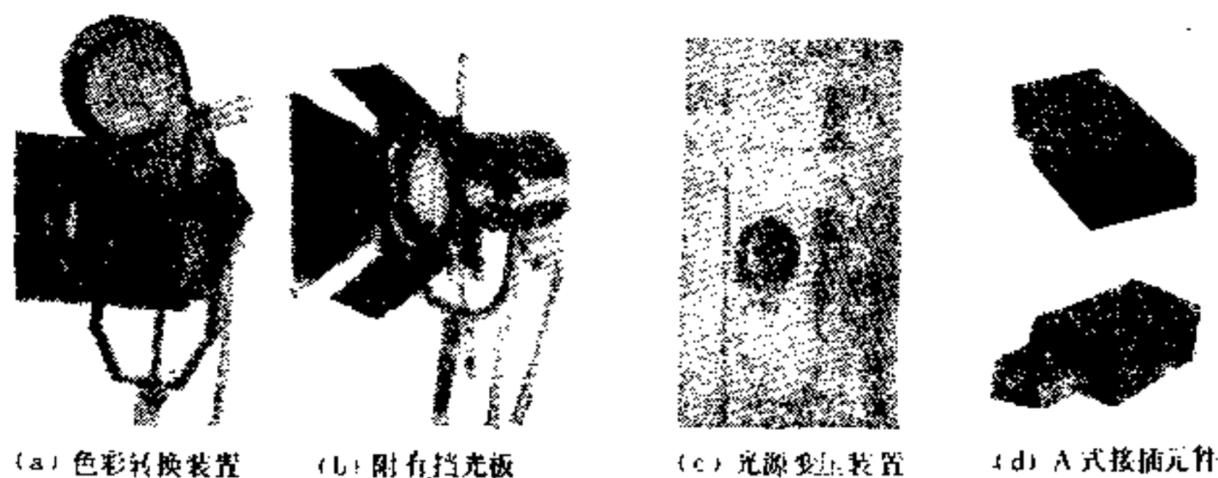


图26-20 舞台照明器具附件

26-2-6 光源

舞台照明用光源能调光的是以白炽灯(包括卤钨灯)为主体。要求高照度的轮廓聚光灯投映机则使用碳弧灯、氙灯或金属卤化物灯等。

也使用表现星星等的星球等特殊效果用的光源(参照表 26-3)。

表26-3

舞台照明使用的光源

灯泡种类	型 式	容量(W)	主要使用的照明器具	调 光
普通白炽灯 聚光灯泡	PS型 G型	60~200 500~3000	脚光灯、场界灯、带状灯 聚光灯、太阳泛光灯	可 调 光
卤钨灯泡	双端灯头 单端灯头 单端灯头	300~1000 75~100 1000~3000	天幕灯、盒式灯 带状灯、天幕地排灯 聚光灯、投映聚光灯	可 调 光
氙灯 金属卤化物灯	放电灯 放电灯	500~2000 1000	轮廓聚光灯、投映聚光灯 轮廓聚光灯、投映聚光灯	不能调光

26-3 观众席的照明

26-3-1 照度要求

在剧场和会堂中观众的入场路线，是从屋外空间经进口大门（照度750~300lx）、前厅（300~150lx）、走廊、楼梯引导到观众厅（休息时为300~150lx，上演时为5~21lx），不仅要考虑眼睛的适应所给予的照度级的变化，而且还需要根据社交场所的活动情况，既要有舒适良好的照明气氛，又要让观众能集中地观看电影或戏剧。

观众厅内所需要的照度的变化，按照1953年照明学会制订的室内照明标准，休息时为50lx，上演时为2~1lx，最近已修订成如图26-21所示的提高了的照度标准。

这是从休息时能猜着读说明书的时代，转到在像市民会馆那样多功能的会堂中，要求能边看教科书，边听讲，或在公开节目的电视转播时，也能对观众厅进行摄影，因此变为最好有200lx左右的照度。

此外，在上演时，因观众要注视舞台上的表演，这就要求把观众厅的照度降低，但从安全上考虑，要保留3lx左右的照明。

26-3-2 照明方法

照明的要点是：（1）光源的亮度要低，观众感到不眩目，尤其对二、三层楼厅的观众应特别注意。（2）在观看演出时，光源不能在视野内。（3）观众厅的照明要不致有碍于舞台照明和放映。（4）要易于从顶棚内部进行维修，平时要注意器具的清扫和掉换坏灯。

最近的观众厅照明方法是以嵌入型灯的下射式为最多，现在快速启动的荧光灯（40W或20W的粗管）已经调光，若把它连续排列在接近侧墙的弧形上转式顶棚上，与间接照明并用，这给予观众的气氛将更有魅力（图26-22，图26-23）。

上演时，依靠半导体调光使之渐暗下来，观众厅照明用的调光装置若系市民会馆级，至少要准备6kW×3台以上的调光装置，观众厅照明用灯可用小型卤钨灯、聚光灯、反射型

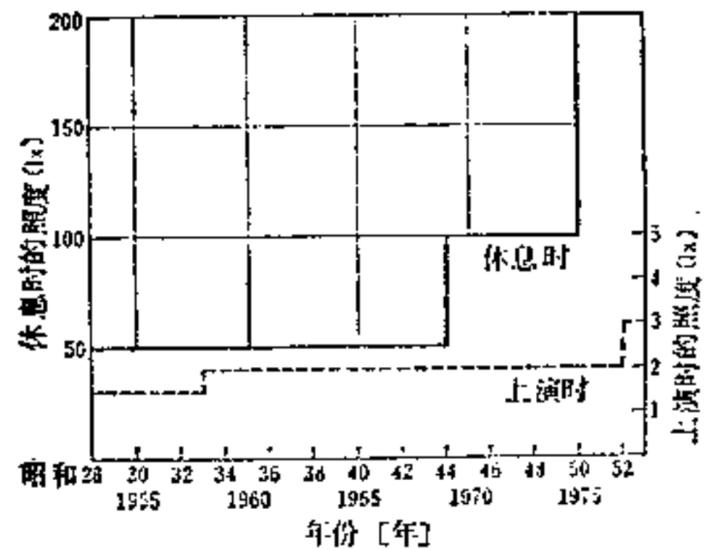


图26-21 剧场、电影院观众厅的需要照度的变化

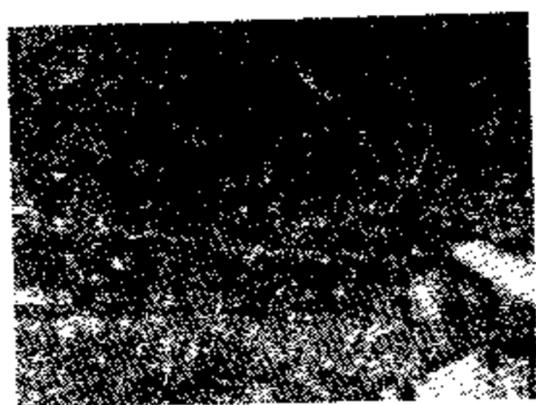


图26-22 立正佼成会普门
馆的观众厅照明
250W热线遮断型聚光灯×
600个(观众席5000)

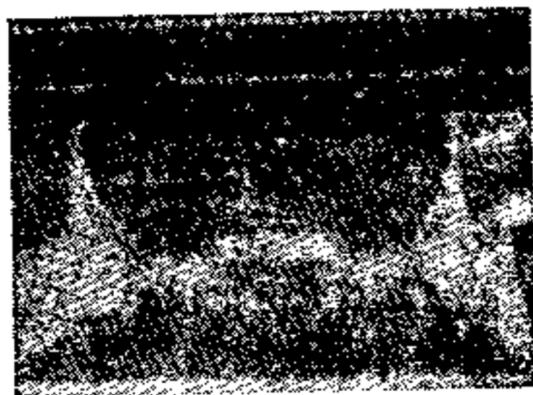


图26-23 姬路市民会馆
的观众厅照明
顶棚: 小型卤钨灯250W×83个墙
面: 小型卤钨灯150W×32个初期
平均照度260lx(观众席800)

投光灯等, 因为不是防振光源, 由于灯丝的振动, 容易断丝, 故希望选用寿命在 2000 小时以上的光源。而且若并用 20W 和 40W 荧光灯时, 则因调光特性相异, 不能平滑地渐亮渐暗, 所以最好尽可能统一用 40W 的。

根据消防法规, 要求由观众厅指引灯在通道中心线上形成 $0.21x$ 以上的照度, 在通过前厅或走廊到出口的上部墙壁上安装通道指示灯, 视剧场的规模, 需要装设中型 (20W 荧光灯, 暗装) 或小型 (10W 荧光灯, 暗装) 的太平门标志灯。因上演时观众厅常会感到刺眼, 所以研究出了减光式指示灯 (平时减光 20%, 发生火灾时开亮到 100%, 停电时减光 36%), 此外, 在舞台侧墙装设的夜光钟, 禁烟标志灯, 休息时间标志灯等, 视所上演的节目, 也可关灯。

根据建筑标准法规, 还需设置事故用照明器具 (另设电源), 在观众厅的边角处, 需要设置若干最低可得 $1lx$ 的 150~200W 反射型投光灯泡的嵌入下射式灯 (平常关灯, 事故时开亮到 100%)。

26-4 摄影场所的照明

26-4-1 电视演播室照明

舞台照明是以观众为对象, 而电影照明则以电影胶片为媒介物, 电视演播室是通过电视显象管, 光电转换的电气信号的传送, 显像机为媒介物, 使之再现的。为了有良好的照明, 必须对电视传送系统, 尤其是录像机的特性有充分的了解, 还要求照明能表现出节目内容的艺术感觉。必须根据这一原则来照明。兹将色彩摄影照明叙述于下 (图 26-24)。

(1) 照明设备

(a) 光源 作为电视演播室的照明光源, 原则上要具备如下的条件:

- ① 调光容易, 而且平稳;
- ② 开灯电路简单, 能瞬时开灯;
- ③ 无闪光;
- ④ 亮度高, 易于进行聚光灯及泛光灯照明器具的光学设计;
- ⑤ 显色性好;
- ⑥ 色温为 $3800 \pm 150K$ 。

适合以上条件的有白炽灯、卤钨灯〔1〕，还有新研究出来的硬质玻璃的卤钨灯〔2〕。

这是保留现在的卤钨灯的优点，改正其缺点的灯。这些灯是使用最多的。在放电灯中，荧光灯有时作为泛光灯来使用，氙灯及金属卤化物灯（HMI, CSD）则作为效果放映机用光源来使用。尤其是金属卤化物灯，因效率高，使用于屋外播送用照明。

(b) 照明器具 照明器具大体可分为聚光灯、泛光灯及效果灯，按其用途使用多种器具。因为使用的器具与舞台用的相类似，故这里从略。

所有照明器具的最近发展倾向，是使之小型、轻量、高效率化，另一方面，从省力的意义来说，采用遥控方式也逐渐增多，照明器具的分类示于表 26-4 图 26-25 中。

(c) 照明器具的悬挂装置 电视演播室内摄影机和传声器需要能在地面上自由移动，为此，一般采用照明器具从顶棚网格吊下的方式。

① 导轨方式 从演播室使用目的来说，适用于小型演播室，因为其顶棚高度低，故在网格上设置基本导轨（固定），再装上与它交叉的可移导轨，在此可移导轨上，悬挂照明器具(图 26-26)。

② 一点下吊方式 亦称 cranada 方式。这是在网格管子的位置上设置导轨，在导轨上配备许多可移动的手动或电动的卷扬机，在角钢或圆管的金属结构的前端，吊下照明器具，

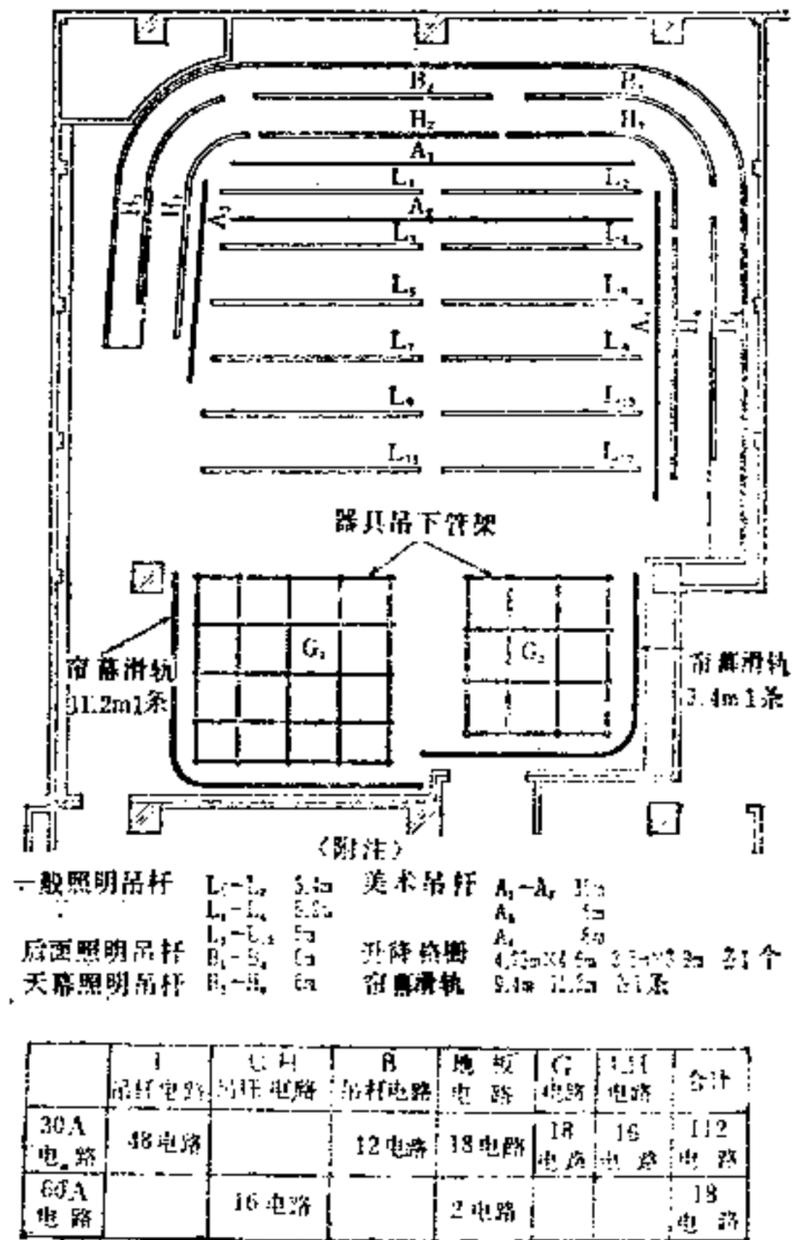


图26-24 电视演播室照明设备图
(照明器具布置图)

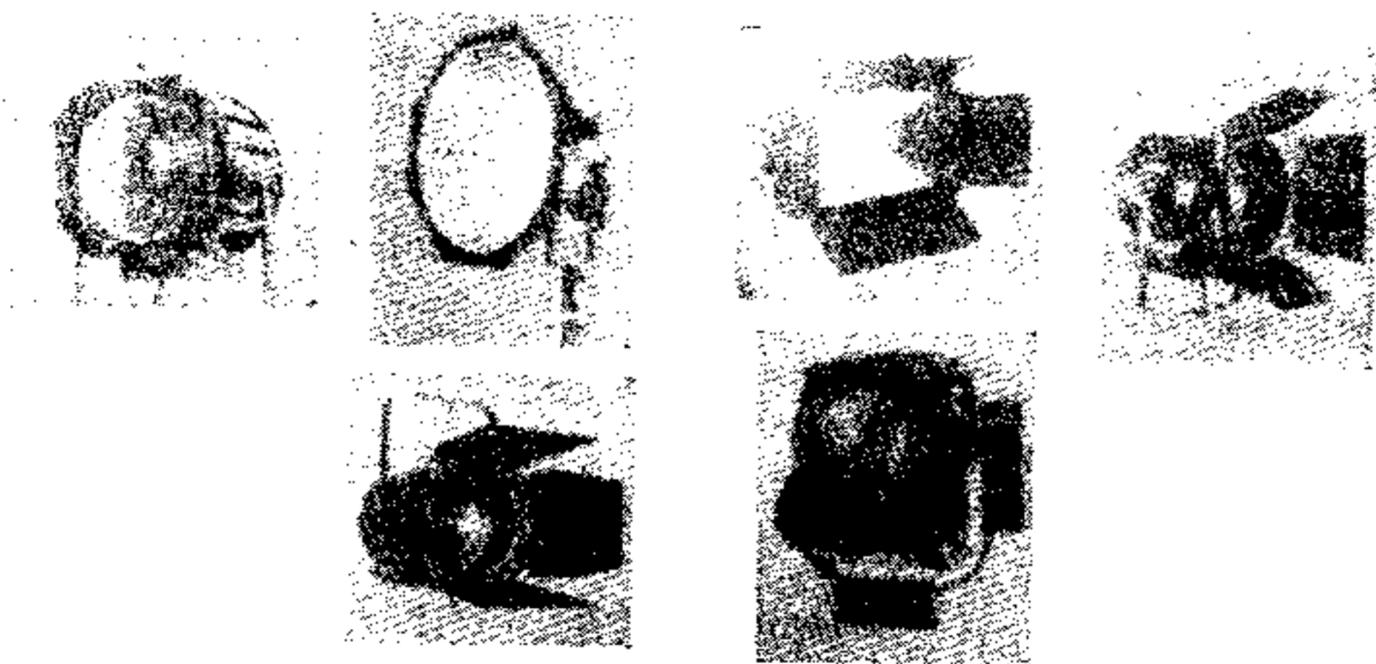


图26-25 电视演播室照明器具

表26-4

照明器具分类表

照明器具名称	容量	用途	器具效率
聚光灯	小型太阳聚光灯 石英聚光灯	500W、1kW、2kW、3kW、5kW 500W、1kW、2kW、3kW、5kW	通用聚光灯 主光衬景光、辅助光
	椭圆面聚光灯	500W、750W、1kW、2kW	
泛光灯	杓状灯 柔光灯 石英广角灯 上部天幕灯 下部天幕灯	500W、1kW、2kW、 2kW、4kW 1kW、1.5kW、2kW 750W、1kW 500W、750W、1kW	基本光布景光 (天幕照明) 0.40~0.61
特技效果灯	效果聚光灯 螺旋灯 电影放映机 圆盘机 闪光机 棱镜机 万花筒机 反射镜机 复式透镜 旭光机 追踪聚光灯	1kW 2kW 卤钨灯 1kW 金属卤化物灯 1kW、1.2kW (CSI, HMI)、 氙灯 500W、1kW、2kW	效果照明

有可伸缩的方式，亦可有固定式的。在欧洲多使用此方式(图 26-27)。

③ 照明吊杆方式 照明吊杆从网格上用几根钢丝绳吊下来，它的升降是靠电动卷扬机进行的方式。全部演播室均匀布置。特别是要考虑设置上下行程开关、安全开关等安全运转的设备。操作是靠按钮开关遥控操作(图 26-28)。



图26-26 导轨方式的演播室

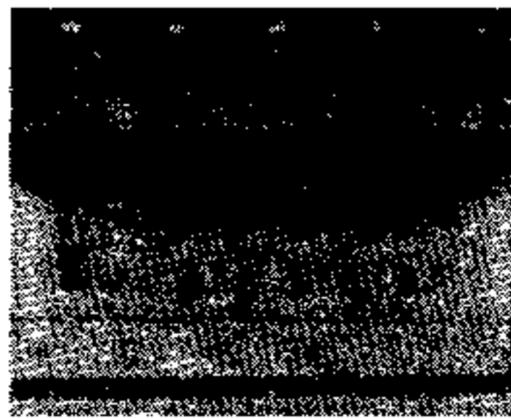


图26-27 一点下吊方式



图26-28 照明吊杆方式

(2) 电视照明的分类 有按光源的特性、光线的方向、器具安装的位置及用途的分类方法。视舞台、电视、电影、照相各领域不同，也有一部分是共同的名称，但多数是混用。电视演播室照明主要是按用途分类。

- ① 主光 对主要被摄影的物体或场面给予主体性和特征的照明。
- ② 基本(底)光 给被摄影的物体全部均匀照射的扩散照明。

- ③ 辅助光 为了使由主光所产生的阴影柔和和减少对比度的照明。
- ④ 衬景光 使主要被摄影的物体的轮廓显得清楚，由背景使物体凸出的照明。
- ⑤ 造型光 是加强人物特征的光线的总称。
- ⑥ 特效光 靠投影效果，对背景和天幕造成映像。
- ⑦ 装饰光 对天幕和布景道具附加强调的局部照明。
- ⑧ 剪影光 在聚光灯前，装上有剪切成样子的遮光板，以显示其阴影的照明。
- ⑨ 布景光 对布景部分地给予适当的光线的照明。
- ⑩ 天幕光 对全部天幕从上部及下部给予均匀的照明或色彩照明。
- ⑪ 眼神光 对主角的眼部，有时对齿部也给予亮光的照明。

(3) 电视演播室照明设备的设计

(a) 照度 适当的照度是与摄影机的灵敏度、光圈和摄影时的景深、不同色温滤光片的光学损失的补偿等有关。关于胶片感光度，电影和电视同样都是 ASA100, ASA125。电影胶片用 16 毫米，而电视录像管用光导录像管时，由于两者成像尺寸有差别，所以胶片摄影机的 $f:2.8$ 和电视摄影机的 $f:4.0$ 是在相同摄影景深下的实用的光圈大小。

彩色摄影的照度可应用下式计算：

$$E_v = \phi_s(S) K^2 \frac{4(1+V)^2}{F_{ph} \times R \times T}$$

式中， E_v ：垂直面照度(lx)； $\phi_s(S)$ ：要得到 S 的 SN 比所需要的透镜透过光通 (lm) (假定为 2 lm)； K ：光圈 (f 值，前述的 $f:4.0$)； F_{ph} ：光导电面的面积 (m^2)； R ：标准色的反射系数，约为 0.6； T ：透镜的透过系数，约为 0.7。

(b) 电力设备、照明器具容量 设备容量的决定因演播室的使用目的不同而有所不同。虽然是以 $0.7kW/m^2$ 为标准，但在天幕照明的色彩变化大或在场面转换时，照明电力的变动使电压、色温、给定的照度发生变化，色彩也受到影响，所以在电源容量及干线容量的设计时，希望采用到 $1.0kW/m^2$ 的容量，使其留有一些富裕。

照明负载电路末端的电压降要尽量少，需有均匀的配线设计。照明器具的容量，包括备用，希望为电源容量的 1.1 倍。

(c) 照明负载电路设备 一般演播室照明负载电路设备按表 26-5 所示的标准，设计照明吊杆的位置视副调整室及大道具进出口等的布置、天幕的位置及形状而不同，不可一概

表26-5 摄影厅照明设备设计标准

照明吊杆名称	吊杆长度 (m)	接 插 器 数		电 路 数	
		60 A	30 A	6 kW	3 kW
1.天幕照明吊杆	5~6		18~24	3~4	
2.背光照明吊杆	5~7	3	6~9	3~4	
3.照明吊杆	5~6	1	8~11	1	2~3
4.墙面凹槽		5~10	10~20	5~10	

注：1.1~3示每根吊杆的接插器及电路数，地板凹槽收容全部摄影厅的接插器及电路数

2.下部天幕凹槽把全部摄影厅的天幕照明吊杆的电路数和网数的60 A接插器分散布置在天幕地沟内

而论,基本上,衬景光吊杆离天幕为0.5~0.6m,天幕照明吊杆离1.5~1.8m的位置是适当的。两者都靠近天幕时,虽然对演播室的利用更为有效,但过近也出现配光分布不好的缺点。

天幕地沟的宽度和深度为1m×0.4~0.5m,天幕曲面部分的曲率半径,当天幕灯有三色时,为3m;四色时为3.5m以上,这样对配光有利。照明吊杆间隔以1.3~1.5m为标准。一般使用无彩色N8、反射系数为59%的天幕。

标准的演播室大小表示于表26-6中〔8〕。

表26-6 电视演播室尺寸表

演播室规模	地板面积 (m ²)	天幕	
		面积(m ²)	高度(m)
超大型演播室	1100	750	9
大型演播室	650	450	8
中型演播室	500	400	8
小型演播室	200	150	5
极小型演播室	110	55	3

(4) 电视大厅 因电视演播室同时要具有剧场的要素,需满足观众和中转播送两个方面的需要。所以可以说它是舞台照明和电视照明混合存在的方式。

在演出时,因观众席也是电视摄影对象,所以在观众席上部,也需有嵌入型或照明吊杆形式的照明设备。

26-4-2 电影摄影棚照明

随着光源的进步,电影照明领域正处在大的变化中。虽然看不出摄影棚设备有如此程度的变化,但照明器具的性能正在进一步提高,而且谋求达到小型和轻量化。

(1) 照明设备

(a) 光源 与电视演播室一样,几乎均使用白炽灯和卤钨灯,其色温为3200K(彩色胶片用)和3050K(黑白胶片用)。

碳弧灯作为强光源,过去使用很多,现在已被新光源所代替,已不太使用。碳弧灯所用的碳棒有二种,即白昼光型(发白色火焰,约为5500K)和白炽光型(发黄色火焰,约为3500K)。

最近的倾向是使用带分色滤光片的卤钨灯的屏蔽光束灯以代替碳弧灯。在欧美为了同样的目的,正在把金属卤化物灯推进到实用化。在用于电影照明时,需对闪光采取措施。

(b) 滤光片 为了进行色彩照明及变换色温照明,在照明器前面装上滤光片。条件是面积要广,有足够的耐热性、耐各种气候性和坚固性。现在使用最多的是塑料滤光片(乙酰纤维素),俗称醋酸纤维软片。

在电视演播室照明中,在天幕照明上,正开始普及适合于电视摄影机特性的耐热玻璃滤光片。

(c) 照度标准 对于伊斯特曼柯达及富士胶片的彩色和黑白底片的光圈和所需要的照度如表26-7所规定。因此,除因作品内容关系或有特殊目的而不用标准的曝光外,一般需按上述标准照明。又因彩色胶片是对3200K的光源彩色平衡的,所以,靠天然光源时,视情

表26-7

彩色及黑白胶片数据表

(1) 伊斯特曼彩色底片Ⅱ

5247(35mm)

7247(16mm)

富士底片A

8517(35mm)

8527(16mm)

白炽光3200K, 24瓣形像差/秒·快门1/50秒

光圈系数(光圈)	f/1.4	f/2.0	f/2.8	f/4.0	f/5.6	f/8.0	f/11	曝光指数
所需照度(lx)	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	白炽光100 天然光 64

(2) 伊斯特曼双X底片

5222(35mm)

7222(16mm)

富士特高感光度全色底片FG

71112(35mm)

富士全色底片RP

72161(16mm)

白炽光24瓣形像差/秒, 快门1/50秒

光圈系数(光圈)	f/1.4	f/2.0	f/2.8	f/4.0	f/5.6	f/8.0	曝光指数	
所需照度(lx)	伊斯特曼柯达	130	250	500	1000	2000	4000	白炽光200 天然光250
	富士	400	800	1600	3200	6400	12800	白炽光 64 天然光 80

况需在摄影机上装上补偿滤光片, 或在照明器上装上适当的色温变换滤光片。

在照明技术上的主要照明和补充照明加起来的光量和补充照明的光量之比, 希望在 2:1 或 3:1 以内。

(d) 照明器具 电影摄影棚的照明器具以大容量的比较多。因此, 各个部分的结构材料要求有高的耐热性。要有牢固的结构能经得起在拍摄外景时的极差的运输条件。

在光学的设计方面, 它和电视演播室照明用的大致相同, 大体分为聚光灯和泛光灯。在表 26-8 中列出其照明数据。

表26-8

(a) 电影摄影棚用的聚光灯照明数据(3200K 灯泡)

照明器具名称	容量(W)	透镜直径(in)	距离(m)	光特性	照度(lx)	光束角(度)
500W 太阳聚光灯	500	4 ¹ / ₂	3	聚光 泛光	1450 400	12 40
1kW 太阳聚光灯	1000	6	4	聚光 泛光	2900 1000	12 40
2kW 太阳聚光灯	2000	8	4	聚光 泛光	8000 1800	12 40
2kW 太阳聚光灯	2000	10	4	聚光 泛光	11000 2000	12 40
5kW 太阳聚光灯	5000	14	6	聚光 泛光	13000 2500	12 40
10kW 太阳聚光灯	10000	20	10	聚光 泛光	11500 1600	12 40
20kW 太阳聚光灯	20000	24	10	聚光 泛光	25800 4300	12 40

(续)

(b) 电影摄影棚用的泛光灯照明数据(3200K灯泡)

照明器具名称	容量(W)	距离(m)	照度(lx)	光束角(度)
500W 杓形灯	5	3	600	48
1kW 杓形灯	1000	3	1200	50
2kW 天幕灯	1000×2	3	800	90
3kW 天幕灯	1000×3	4	2000	90
5kW 天幕灯	5000	4	3200	64
10kW 天幕灯	5000×2	4	3000	80
4kW 天空灯	1000×4	4	2700	64

26-4-3 照相室照明

为使摄影工作能有效地进行,照相室不只是空间宽广就好,还必须考虑附带设备的配置,照明器具的操作,以及根据需要能自由地得到照明光线的设计。

作为附带的设备,希望有拍摄对象的更衣室、化妆室、收藏小道具和背景的道具室、摄影照明机械材料室、装换胶片的小暗室等设备。

(1) 照相室的空间和结构 照相室的宽度,在拍摄两个人或一个人横卧姿势时,天幕宽度最低限度需3米,照明器具布置空间两侧各取1米时,则全部宽度约需5米。对于进深,若系站立的姿势时,对象和照相机的距离约为3米,对象与背后的距离约为1.0~1.5米,照相机背后若稍留有富裕,则全部进深约需6米。

这是平面空间最低限度的大小。在设置背景和小道具时,在布置照明器具和复杂的照明时,则希望空间更富裕一些,标准的尺寸是宽6米,深8米。

照相室的高度对于拍摄也很重要,若拍摄的对象是站着把手举起的姿势,考虑约为2米,头顶上设置的天空光灯或柔光灯的间隔最低限度3.0~3.5米,天空光灯高度若为0.5米,则高度约需3.0~3.5米,进而考虑摄影机低角度位置时能拍摄到天幕背后的尽端,则适当的高度为4.0~4.5米。

在表26-9中表示出各种大小的照相室。

表26-9 照相室尺寸表

照相室规模	尺寸 (m)	面积 (m ²)	用途
大型照相室	15×20	300以上	人数多、大型商品摄影、商业摄影、汽车、成套家具
中型照相室	10×14	140	人数多、中型商品摄影、婚礼集会、大中型家用电气商品
小型照相室	6×8	48	人数少、小型商品摄影、肖像摄影、小型家用电气商品

照相室照明因全是由人工光源来进行,故必须完全遮住外面光线。在彩色照相时,因对外面光线很敏感,故尤其应予以注意。

考虑到照明光线的反射对摄影有极重大的影响,故即使是彩色照相,照相室内也应采用非彩色的修饰。

(2) 照明设备

(a) 光源 白炽光彩色胶片所使用光源为 3200 K 的白炽灯和卤钨灯，而天然光彩色胶片所使用的光源，则主要使用的是闪光放电管或闪光灯。若两种光源混用时，则因色彩再现不好，故应避免这样做。荧光灯作为彩色胶片用光源，只能具有泛光灯的功能，这是其缺点。作为黑白胶片用光源，则使用上述任何一种均可。这时只需考虑照度即可。

在照明范围较广的大型照相室内，靠闪光放电管或闪光灯的照明，在很多灯的照明下摄影时，要做到能均匀地向被拍摄的物体各个部分照射光线，并要求有同样的光照效果，这是困难的。所以最好由白炽灯和卤钨灯来照明。

(b) 照明器具 照相用灯泡、反射型照相灯泡多数是单体使用或与电视、电影演播室用的一起使用。

闪光放电管照明器具表示于图 26-29 中。

(c) 照明器具的布置及安装方法 照明器具布置设计的例子表示于图 26-30~图 26-32 中。照明器具的布置方案是决定摄影优劣的一环。但照明器不得有碍于摄影工作。为此将照明器具几乎均采用从顶棚吊下的方式，只在不得已时，才用立灯方式。



图26-29 闪光放电管照明器具一例



图26-30 大型照相室



图26-31 中型照相室



图26-32 小型照相室

(d) 调光装置 调光装置是由向照相室内各个负载供电的配电盘和调光器所组成。在长时间使用白炽灯泡使色温降低的补偿，背景的色彩照明，以及照明给定时的光量调节，都有赖于调光装置。最近，普及了可控硅调光装置。

26-5 调光装置

以上说明的是舞台照明和摄影场所的照明，关于控制其照明器具的亮度调光装置，将在本节叙述之。

舞台或电视演播室由非常多的照明器具把人物或背景照亮，显现出舞台或电视的场面。在各个场面，对人物投射以有强调作用的照明，或对背景投以均匀的照明，要有各种亮度，因此需要调光。当从一个场面转到另一个场面时，或者为了照明效果，也必须使亮度有变化。因此，不单是调光，还要有能控制各种照亮场面的功能。

这些控制功能，按照明控制的对象和舞台或电视演播室的使用目的不同，有各种不同方式。在这里，仅以照明对象和设备为中心加以说明。

26-5-1 调光装置的方式

在说明调光装置之前，就调光装置的调光的基本部分叙述于下。

调光装置如图 26-33 所示，它具有向拍摄对象发射出各种光线的功能。这种调光装置是在照明器具中采用光量调节器控制直流讯号电压，使交流电压在 0~100 伏间变化的方法，其原理示于图 26-34 中。

在图 26-34 中，靠光量调节器 0~100 刻度间的变动，使调光装置输出的交流电压能在 0~100 伏间变化。

过去使用的调光装置，是如图 26-35 所示的抽屉型的。在发生故障时，因为它是抽拉

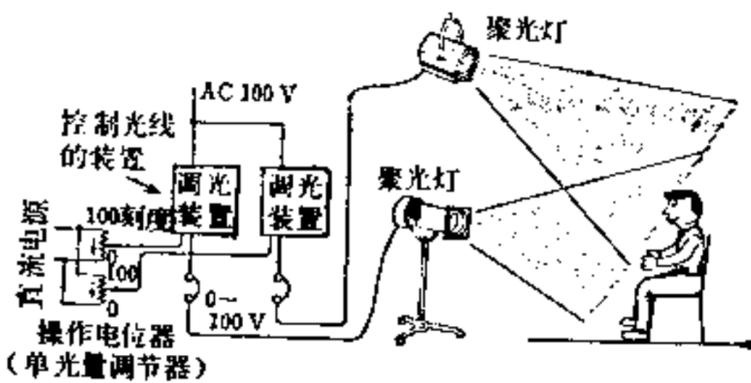


图26-33 调光装置的功能

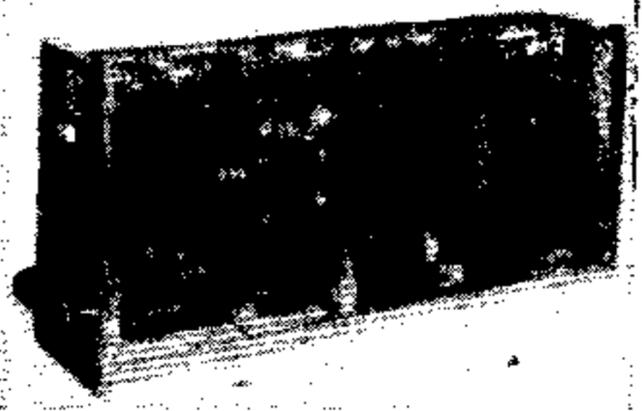


图26-35 抽屉型调光装置

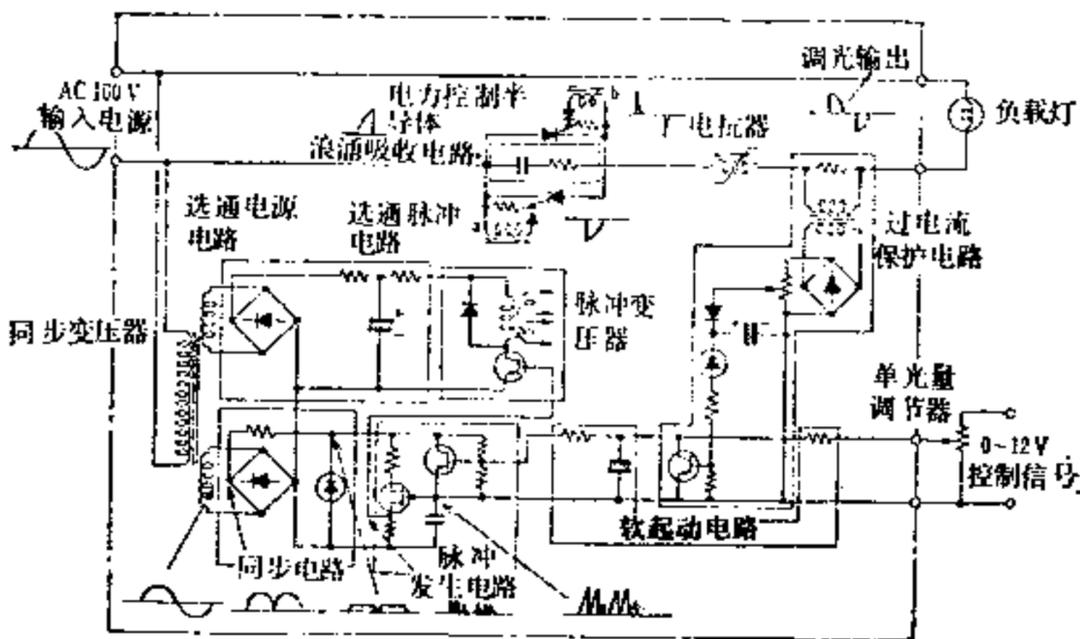


图26-34 调光装置的作用原理



图26-36 机架方式调光装置

式，故替换简便。但它使用容量大的连接器，价格高。由于调光开关元件的可控硅整流器的可靠性大，为使强电系统的故障非常少，所以最近采用了控制系统的印刷线路板作为抽屉方式的调光机架方式。将此方式示于图 26-36 中。

这种型式比过去的型式便宜。最近，由于半导体的进步，调光装置的控制方式也集成电路化，可靠性变的高了。将这种方式中的一种型式示于图 26-37 中。这种型式可把负载侧输出反馈。即使周围温度、电源电压、负载容量、频率等发生变动，输出仍可保持一定的高可靠性。

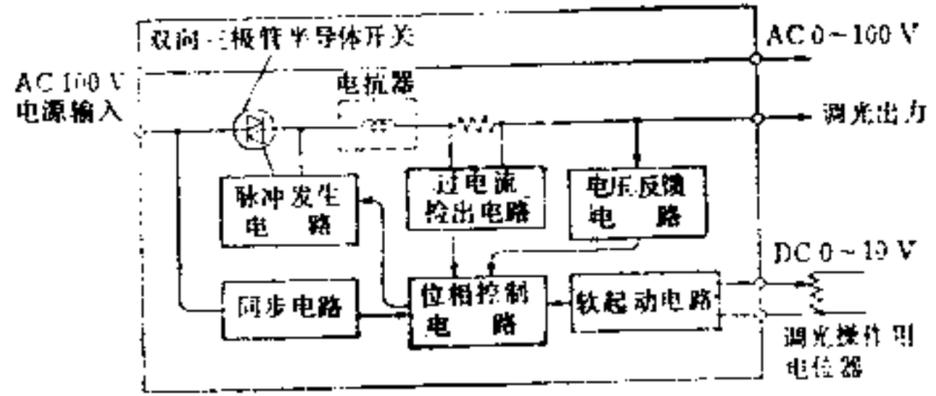


图 26-37 反馈式调光装置

26-5-2 舞台照明用调光装置

说到舞台，也有旅馆宴会厅和学校讲堂的舞台，以及市民会馆、县民会馆、营业性剧场等各种舞台。当然，它们的使用目的是不同的。兹将小型舞台和大、中型舞台分别叙述于下。

(1) 小型舞台的调光装置 旅馆的宴会厅、学校的讲堂、集合室、小酒馆、视听教室等等，虽然规模小，但有舞台，需要照明设备。这里使用的调光装置，代表性的有直接连接方式和强电插入方式。

(a) 直接连接方式 这是把照明器具和调光装置直接连接的方式，其电路系统示于图 26-38 中。

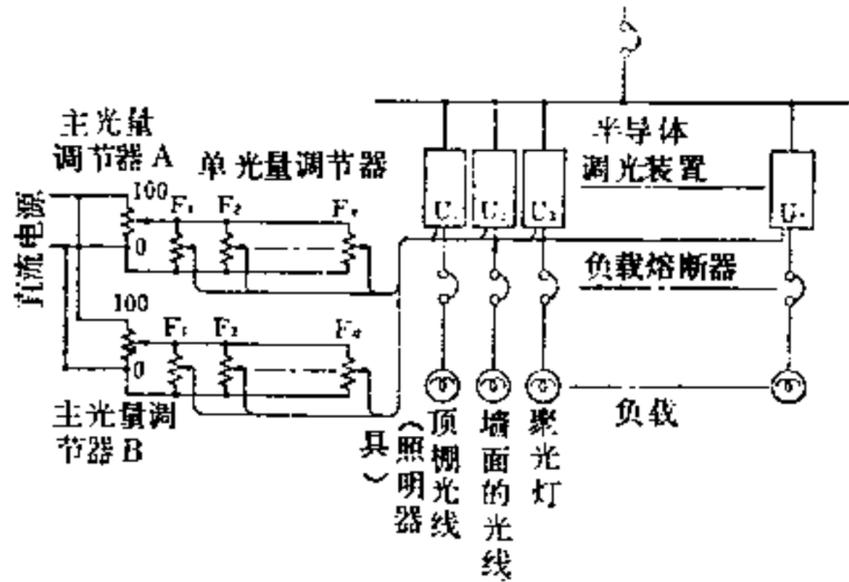


图 26-38 直接连接方式调光装置

如图所示，照明器具群与调光装置直接连接。因此，例如控制一个照明器具的光线时，操作调光装置 U_1 的光量调节器 F_1 即可。此方式采用于照明器具负载的操作系统少的场合。

操作功能非常单纯，若操作与各照明器具相应的光量调节器 $F_1 \sim F_n$ 时，则可形成各种光线的场面。光量调节器 $F_1 \sim F_n$ 的前头，还有主光量调节器，把两个组合起来，任意一个设定在 100 的刻度（另外一个在 0 刻度）时，则 100 刻度的系统的光量调节器群就亮起来。把二个主光量调节器作为一组，称为交叉光量调节器。每个光量调节器（以下称为单光量调节器）群是三组以上时，就需要有三组的系统选择，连接到交叉光量调节器的选择开关上。

满足此功能的有图 26-39、图 26-40、图 26-41 所示的柜型调光装置、可移式调光装置和台式调光装置。柜式负载容量大，适合于操作系统简单的情况，可移式及台式操作系统少，即使在很多场面变化时也能使用。

(b) 强电插入方式 即使是小规模舞台，在演出需要复杂的照明变化时，也需要很多的照明器具。若用直接连接式调光装置，其

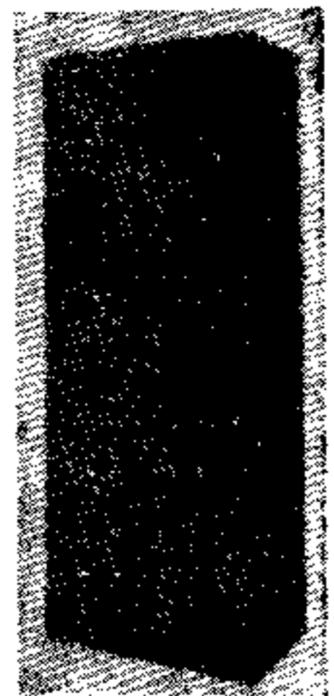


图 26-39 柜式调光装置

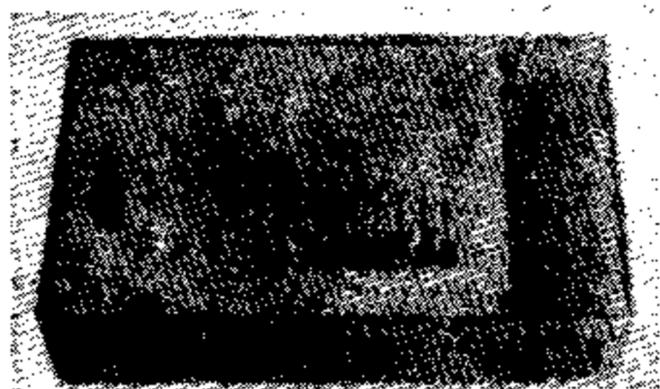


图26-40 可移式调光装置

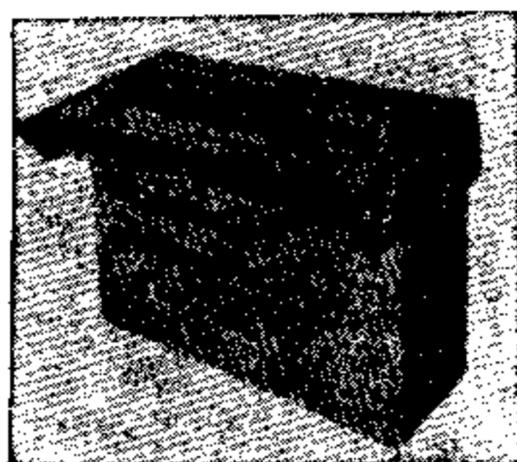


图26-41 台式调光装置

使用效率不佳，故需采用强电插入方式。

此方式是把照明器具集中在一起操作，将不使用的照明器具，从操纵系统断开。将强电插入方式示于图 26-42 中。如图所示，照明器具靠连接插线，与调光装置输出插座选择连接。用这种方式，即可把只在演出中需要的照明器具集中与调光装置连接。因调光装置与单光量调节器直接连接，所以操作对应于插入连接所决定的照明器具的调光装置的单光量调节器，即可控制照明器具。

操作功能与直接连接方式相同，若再补充，则有如下的功能：

当有三组以上的单光量调节器系统的场合时，则靠预置选择开关担负交叉光量调节器（输出是两个系统）之间的连接。在图 26-42 中，A 侧交叉光量调节器刻度为 100，若把 A 侧按钮的任意的组接通，则在接通系统的单光量调节器群便可控制照明器具。此时 B 侧交叉光量调节器为 0 刻度，所以把按钮接通到任意的组。这时，不引起光线变化。若把交叉光量调节器转换（A 侧 100→0 刻度，B 侧 0→100 刻度），则光线就从 A 侧接通的系统转换到 B 侧接通的系统。若有三组以上的系统时，顺次地这样做，就能设定无限多的场面。将此方式的装置示于图 26-43 中。

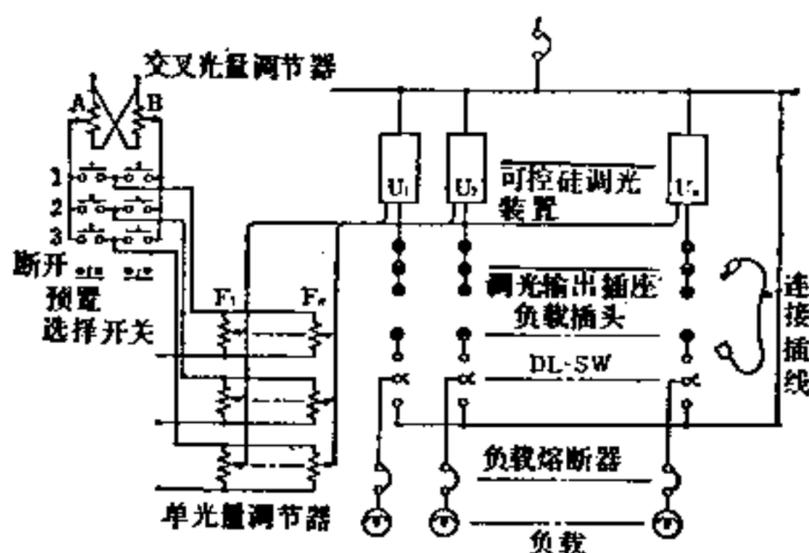


图26-42 强电插入式电路系统图

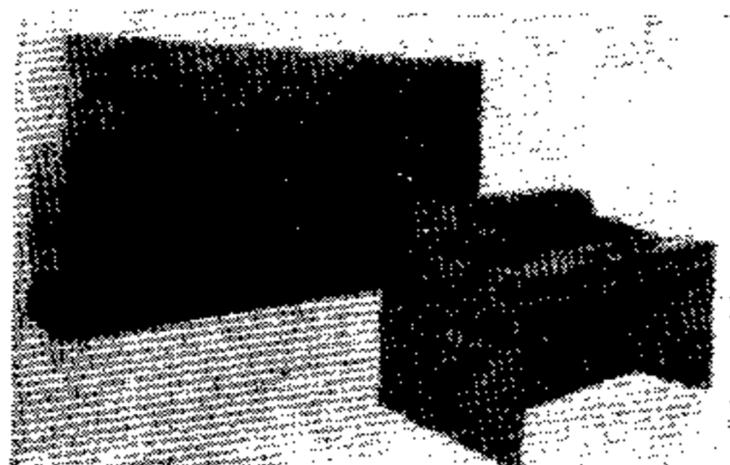


图26-43 弱电插入方式调光装置

(2) **大、中型舞台的调光装置** 县民会馆、市民会馆、营业性剧场的舞台属于大、中型。强电插入方式也是在这里使用最多。但是在最近，采用被称为电子交叉连接方式的在弱电侧选择连接的方式的例子增多，而且，在正式演出时，因在单光量调节器群中，每次编排麻烦，所以把排演时场面所要求的光线存储下来，这种场面存储方式也正在普及中。

(a) 电子交叉连接方式 强电插入方式是靠连接插线把照明器具与调光装置在强电侧连接起来。这种方式在照明器具数量多时，因其选择连接是强电线路 (15~60安)，所以操作很麻烦。而且要确认照明器具与调光装置的连接是很麻烦的。

因此，如图 26-44 所示，照明器具与调光装置直接连接，而调光装置和单光量调节器是选择接点的弱电连接方式。照明器具的电路系统 (把多数的照明器具集中成为一个系统与调光装置连接) 多时 (普通的剧场为 1000~500 个回路)，可将其负载系统集中操纵，或视上演节目情况，有不需要集中的情况，因此靠弱电交叉连接方式进行任意的选择连接。

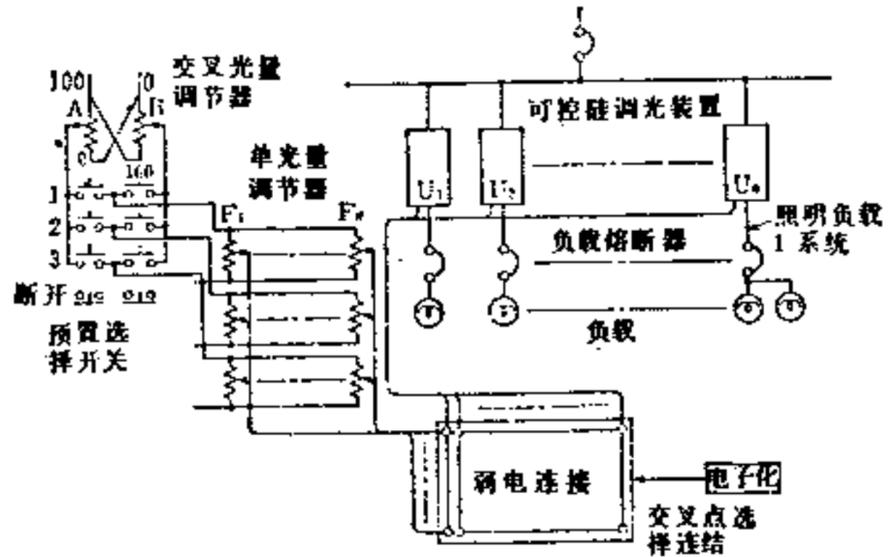


图26-44 弱电交叉连接式电路

单光量调节器的操作数 (称为通路) 在线路设计上,最大也是 200 个,所以需要这种方式。

这种方式的根本点,在于单光量调节器输出和调光装置信号的选择连结,如图 26-44 所示,即把哪一个交叉点连接的问题。由于交叉点的选择连接已电子化,使之存储的方式,就是电子交叉连接方式。图 26-45 表示其电路系统图。

在图中,把交叉点的选择连接存储到 ST 存储部 (MEM),单光量调节器输出靠其存储由调光装置取出。因有连接状态的监控和再调整等多种功能,所以比较复杂。但基本是交叉点的选择连接及其监控。

控制负载的操作功能完全按照预调整方式进行。各组编进照明场面,使之顺次再现。

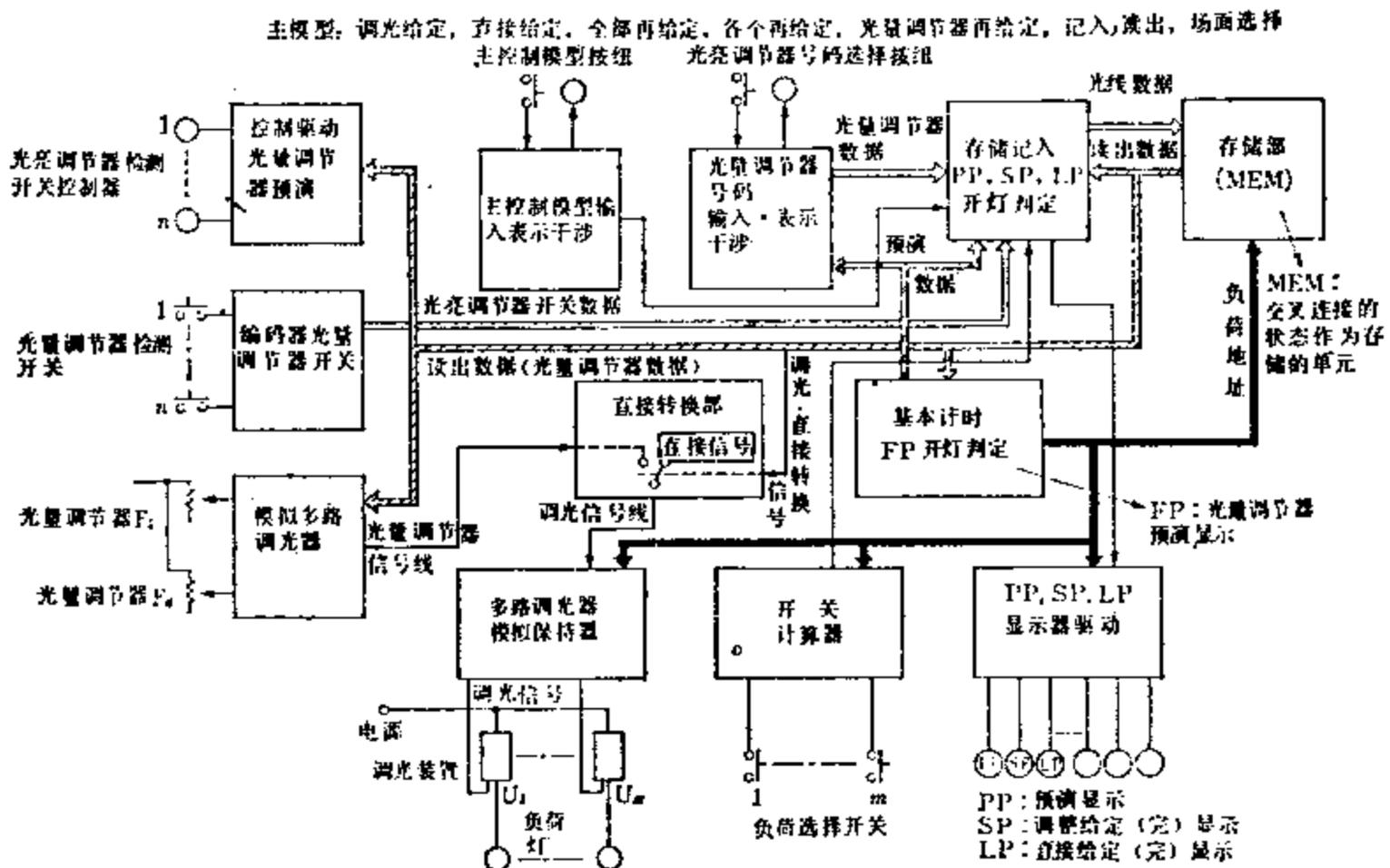


图26-45 电子交叉连接方式系统图

该方式和强电插入方式不同之处是在强电侧选择连接，还是在弱电侧选择连接的问题。强电侧连接是在调光装置的容量内选择连接，而弱电侧连接则是能把任意数的调光装置和单光量调节器连接。而且直接开灯和成组开灯也非常容易。

将电子交叉连接方式的装置示于图 24-46 中。

(b) 场面存储方式 强电插入方式和弱电交叉方式是照明器具与控制系统怎样选择连接的方法。其控制系统的照明操作是使照明的各个场面，每次以手动调整单光量调节器群，使之再现。需要很多场面时，就要有很多单光量调节器群组，把各个照明场面编进各个组，使之顺次再现，这是一向使用的多组预调整方式。

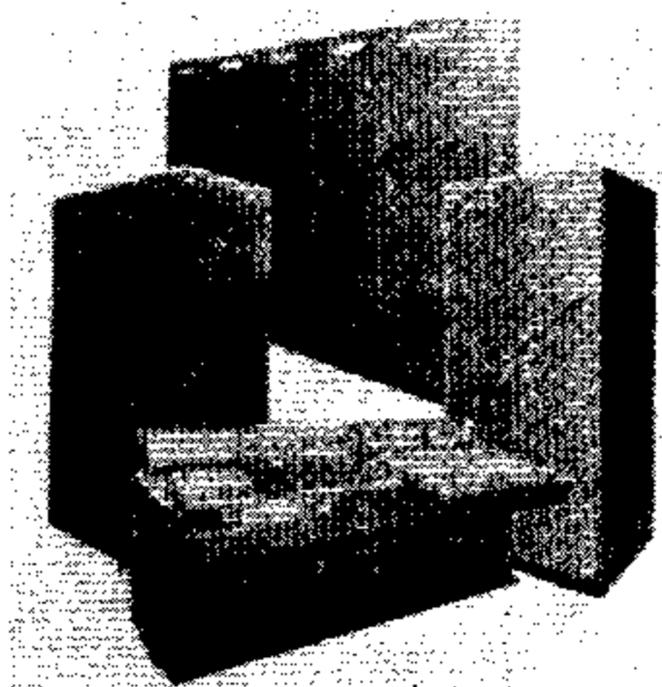


图26-46 电子交叉连接方式调光装置

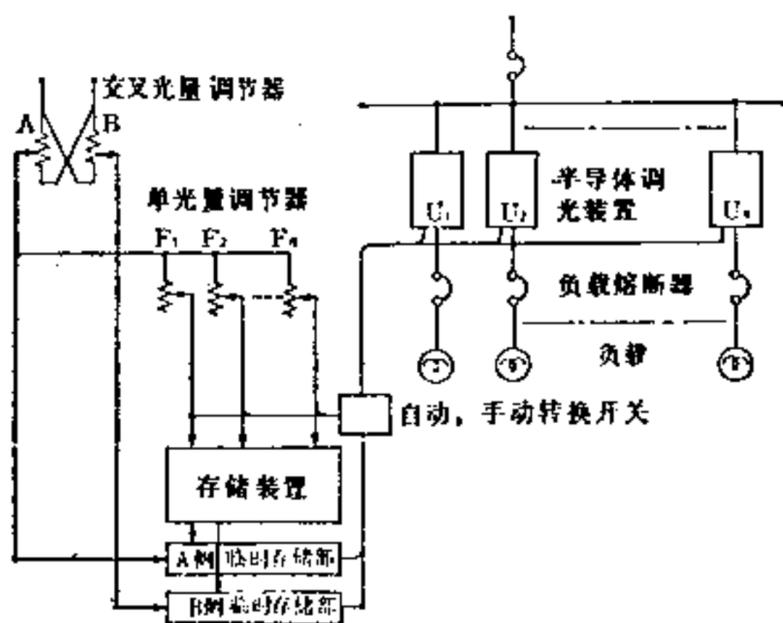


图26-47 场面存储电路系统图

场面存储方式是以存储装置使之再现的方式来代替多组的单光量调节器。如图 26-47 所示，它是依靠单光量调节器把排演时的照明场面决定下来后，即向存储装置（磁线存储器或磁鼓）内存贮，全部排演完后，照明场面便存储完毕。若把再现的顺序編集下来，随着表演的进行，就能顺次把照明场面再现。将这种方式的装置的照明操作台示于图 26-48 和图 26-49 中。



图26-48 电视显像监控的照明操作台

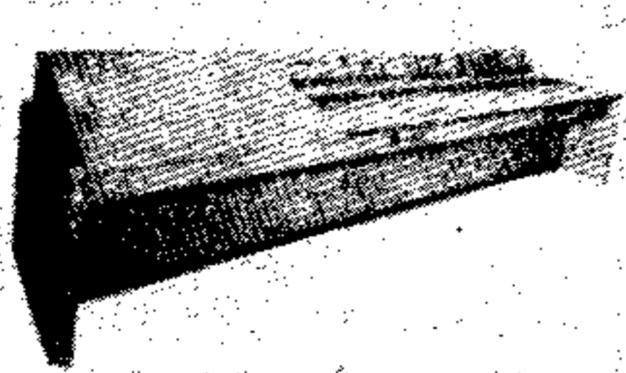


图26-49 小型仪表监控的调光装置

此种方式与多组预调整方式不同，固照明场面的调整状态不能直接看见，所以监控方式不同从而装置构成也不同。图 26-48 是使用电视显像监控，图 26-49 是使用较多的小型仪表监控。

26-5-3 电视演播室照明用调光装置

电视演播室使用的调光装置和舞台使用的在本质上没有什么不同，这里中心说明其不同点。

在电视演播室照明中，不是把许多的场面一个接一个地再现，而多数情况是将许多的场面同时在演播室内给定的。只有音乐歌舞的节目才需要一个接一个地变化照明。所以电视演播室是不需要场面存贮的。

(1) 报导节目、对谈时的电视演播室照明 报导新闻、对谈、烹调等节目的演播室照明，只要把照明一面调整好就完了，中间照明不变化。又因这种演播室也不大，故可采用强电插入方式或弱电插接方式。

弱电插接方式是以插接板把弱电交叉连接部分选择连接。现将以按钮代替弱电插接板的方式（照片左边的盘）示于图 26-50 中。

(2) 多功能演播室照明 戏剧、猜谜、音乐、歌舞等各种节目在同一个演播室内制作的情况居多。在这种场合几乎均采用电子交叉连接方式。

在电视演播室中使用此方式，虽然易于直接开灯（与单光量调节器无关，把各个照明器直接开亮到 100%），但多数是采用直接把灯成组开亮（把照明器集中开灯）或操作单光量调节器组的方式。这是因为在演播室内同时设定几个场面之故。



图26-50 简易弱电交叉连接方式调光装置

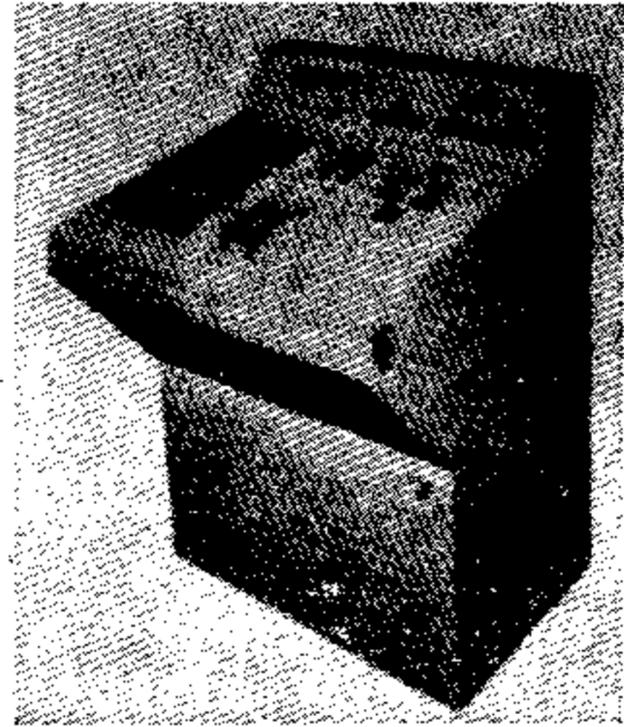


图26-51 小型通路场面存贮调光装置

(3) 特殊照明 尤其是音乐歌舞节目，与舞台的节目（音乐歌舞节目，短剧节目）相同，需要很多的照明场面，需要天幕的效果照明。因此，也有采用如图 26-51 所示的天幕照明用的通路存贮的场面存贮方式的。

参 考 文 献

- (1) 平沢勲夫訳：日本映画テレビ技術協会誌，189，55～60；190，40～49
- (2) R. M. Griffin, J. S. Gutta: Hard Glass Halogen Lamps a Breakthrough for Studio Lighting, Lighting 2000 World Colloquium of IES
- (3) A. Kaufman, D. Sauter: Problems of Lighting in Color Television Outdoor Broadcasts, Journal of the SMPTE (1974-1)
- (4) B. P. Wilkes: Television Outside Broadcasts Lighting Operations, Journal of the SMPTE (1975-6) 463～469
- (5) Dr. I. Kögler: Progress in Production of Artificial Daylight for Film and Television, The BKSTS Journal (1976-7) 194～197
- (6) 上原吉男訳：日本映画テレビ技術協会誌，265，58～66
- (7) 伊藤安雄：放送技術（昭43-1）15～24
- (8) 伊藤安雄：日本映画テレビ技術協会誌（昭52-2），46～59
- (9) 浅井，杉山：照学誌，58（昭49）11

第 27 章

辐射的应用

所谓“辐射”，是指包括紫外、可见、红外在内的广义的“光”；所谓“辐射的应用”，虽然指利用辐射能所产生的无论何种现象，但是，通常指除“照明”之外的生产上对光的利用。

本章主要说明辐射的各种用途。

27-1 辐射的效应和作用

27-1-1 辐射产生的效应

(1) 辐射产生的反应的特性^{[1]~[3]} 辐射碰到物体时，一部分被反射，剩余的进入物体内部；后者一部分透过物体，另外的就被物体所吸收。由这部分被吸收的辐射能引起的物体内部的变化，称为辐射产生的反应（光反应）。这种反应有两种类型，一是如视觉产生的明暗感觉和光电材料产生的光电流等那样，对入射的辐射通量（辐射功率）要求时间的持续性；另一是如照相、皮肤晒黑（红斑）等那样，有一定量的入射能量（功率和时间的乘积）反应就能完成而不需要更多的能量。因此，对前者来说，因为是持续的，就要求稳定的辐射，而后者如果满足时间的积分量，就不必特别要求时间的持续性。

图 27-1 的倾斜的 S 形曲线是辐射产生的反应的典型特性曲线。以 E_λ 作为入射的辐射功率，让我们考虑产生反应的特定波长的辐射（单色辐射），一旦 E_λ 或 E_λ 和时间的乘积 U_λ 达到某个阈限值 $E_{1\lambda}$ 、 $U_{1\lambda}$ 时，反应就开始，当入射水平达到 $E_{2\lambda}$ 、 $U_{2\lambda}$ 时，反应就达到饱和状态。入射量和反应的程度部分地成比例，一般来说是非直线性的。在部分成直线性的区域，其切线和横轴的夹角 θ 的正切 $\tan \theta$ 就是反应的效率的指标。图的纵轴和横轴往往取对数刻度。

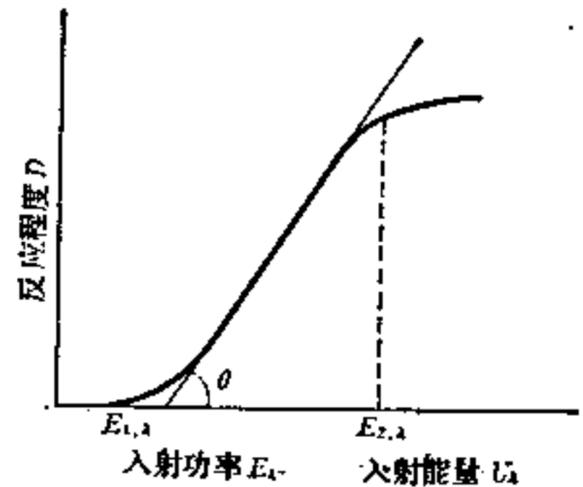


图 27-1 典型的反应特性

(2) 光谱效应（灵敏度）特性^[2] 图 27-1 所示的反应特性相对于入射波长的关系（以波长作为参数）如图 27-2 所示。由这个图求出反应程度 D 为某个基准值 D_0 时的入射量 E_{0,λ_1} 、 E_{0,λ_2} 、…… E_{0,λ_n} ，或者 U_{0,λ_1} 、 U_{0,λ_2} 、…… U_{0,λ_n} ，则其倒数 $E_{0,\lambda}^{-1}$ 、 $U_{0,\lambda}^{-1}$ 相对于波长的关系就如图 27-3 所示的曲线。这种曲线称为光谱效应（光谱灵敏度）特性 $W(\lambda)$ 。规定这种特性曲线达到最大值时的波长 λ_0 为最大灵敏度波长。根据所设对象的反应而规定作为反应量的 D 可以是电流、黑度、硬度、聚合度、吸光度等。

如果图 27-2 所示的每个波长的反应特性分别是直线，那么，无论怎样选择基准反应值 D_0 ，其对最大灵敏度归一化了的 $W(\lambda)$ ，即相对光谱效应特性也是相同的，反应的光谱特性不

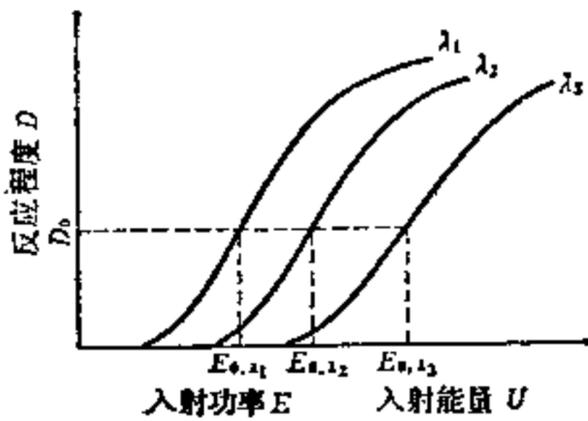


图27-2 以波长作为参数的反应特性

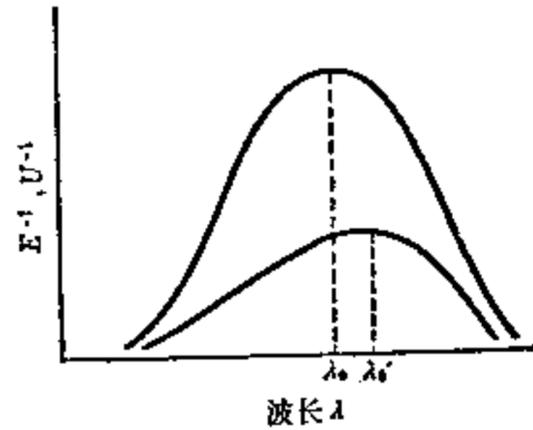


图27-3 光谱效应(光谱灵敏度)特性 $W(\lambda)$

受入射水平的影响。但是,一般来说,每个波长的反应特性各自都不是直线的情况比较多, D_0 的位置(即入射水平)一变化,相对光谱效应特性的形状也就变化。因此,在大多数情况下,必须认为光谱效应特性是波长 λ 和入射功率 E (或能量 U)的二元函数 $W(\lambda, E)$ 。要把它当成只是波长的函数 $W(\lambda)$,只有在反应曲线可以近似地看成是直线的区域才行。例如,只有在明视觉的区域才能使用相对视觉灵敏度特性 $V(\lambda)$ 。

(3) 互易律^[1] 反应程度 D 是入射能量 U_λ 的函数时(图27-1的横轴为 U_λ 时),当然可以认为

$$D = f(U_\lambda) = f(E_\lambda \cdot t) \tag{27-1}$$

反应只与 $U_\lambda = E_\lambda \cdot t$ 有关,而应该与 E_λ 、 t 的各个水平无关。

这样的情况成立时,就说反应的互易律成立。但是,实际上使式(27-1)成立的 E_λ 、 t 是有上限和下限的,因此,大多数情况下,互易律只在某个范围才成立。在照相时,虽然在相当广的范围内,光圈面积(相当于 E_λ)和曝光时间(t)的积可以不变,但是 E_λ 过大或过小时,互易律就不成立。

27-1-2 辐射的作用功率

用辐射照度的光谱密度的波长特性(光谱辐射照度)为 $E(\lambda)$ 的辐射源照射光谱效应特性为 $W(\lambda, E)$ 的物质时,对效应起作用的有效功率 P 是 $E(\lambda)$ 和 $W(\lambda, E)$ 关于波长的重积分,即

$$P = KA \int_0^\infty E(\lambda)W(\lambda, E)d\lambda \tag{27-2}$$

式中, A :照射面积; K :由条件决定的常数。

P 的单位是按波长计权的功率,即(W),也可以采用带有波长属性的单位如(lm)、(E-viton)(表皮红斑)等来表达。 $W(\lambda, E)$ 虽然在27-1-1节定义为光谱效应特性,但从辐射这方面(作用这方面)来看时,是有效功率对单色辐射的作用函数。

27-1-3 光谱效应特性(作用函数)的测定^{[2],[3]} 为了有效地利用辐射,有必要知道发生反应的对象的光谱效应特性 $W(\lambda, E)$ 。在评价由视觉产生的亮度时, $W(\lambda, E)$ 就可以用国际协约的 $K(\lambda) = K_m V(\lambda)$ 的数值,但是在一般的情况下, $W(\lambda, E)$ 大多数是未知的。因此,作为辐射应用的第一步,必须测定物体的 $W(\lambda, E)$ 。下面是测定 $W(\lambda, E)$ 时必须遵守的原则。

(1) 测定 $W(\lambda, E)$ 时的入射水平要接近实际应用时的入射水平。否则就要弄清楚反应的直线性在测定时的水平和使用时的水平之间是否保持, 或者互易律是否成立。

(2) 为了决定 $W(\lambda, E)$, 要确定反应程度的基准值 (图 27-2 的 D_0)。

(3) 在发生反应的对象 (试样) 的被照面上提供稳定的、照度均匀的辐射。

实际测定时, 按下面的程序进行:

(1) 求出作为对象的物体的效应 (灵敏度) 波长域。这可以根据文献资料、光谱吸收特性等进行判断。

(2) 用在产生效应的波长域具有相当大的辐射输出功率的辐射源照射该物体, 检查反应的直线性及互易律成立的范围。虽然这时的辐射作为单色辐射, 用许多波长来做测定是比较理想的, 但是, 如果不能那样做的话, 可以用有所设对象的反应的辐射源。要规定这时的辐射照度包含实际使用时的水平和测定时的水平。在这个过程中要决定反应程度的基准值 (图 27-2 的 D_0)。

(3) 在作为对象的物体的效应波长范围内, 以适当的波长间隔, 用几种波长的单色或准单色的辐射来照射, 求出在反应中达到由 (2) 决定的基准值 D_0 时的辐射功率 $E_{0,\lambda}$ 或辐射能 $U_{0,\lambda}$ 。这时, 必须事先知道单色辐射的功率, 或者和这个测定同时并进地用光谱灵敏度已知的检测器来测量照射面的功率。虽然测定的波长间隔要参考光谱吸收曲线的形状和其带域宽度来决定, 但一般是 $5\sim 20\text{nm}$ 。如果反应不是线性的, 而且每种波长都显著不同, 则 (2) 的程序必须对每种波长进行。

图 27-4 表示测定光谱效应特性的装置。为了在这个装置的被照面提供大体均匀的照度和较强的辐射功率, 光源和入射光学系的相对位置要能在 $X-X'$ 和 $Y-Y'$ 的方向平滑地进行微调。在 A 面放置光谱灵敏度已知的检测器 (热电堆等), 在每个波长测量单色辐射的强度, 这样就可以校正记录器的受光器。

27-1-4 辐射的作用功率的测定

在求式 (27-2) 的 P 时, 原则上和测光相同。因此, 如果受光器具有和作为对象的光谱效应特性相似的光谱灵敏度的话, 用求出受光器的输出功率的方法就能够进行测定。但是, 那样的情况是非常少有的, 通常用测定光谱辐射的方法求出 $E(\lambda)$, 然后用数值积分的方法求它和用别的方法求出的 $W(\lambda, E)$ 的重积分来算出作用功率。因为 $E(\lambda)$ 的测定大多数遍及紫外、红外区域, 在这些区域要特别注意除去散射光的误差。

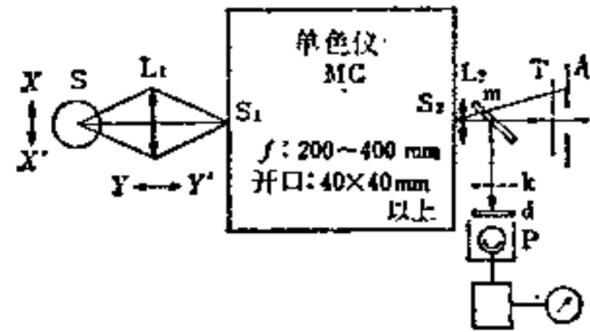


图 27-4 测定光谱效应特性的装置

- S: 辐射源 (钨灯, 500W, 1000W 等)
- L_1 : 聚光透镜 (石英, 石英- CaF_2)
- MC: 单色仪 (石英棱镜、反射光栅)
- L_2 : 视场透镜 (石英, 石英- CaF_2)
- P: 受光元件 (铂等)
- m: 石英板
- T: 带计器的快门
- A: 曝光用窗
- k: 减光滤光器
- d: 扩散板 (石英砂)

- (注): (1) S 可以空气冷却。
 (2) L_1 可以在 $X-X'$, $Y-Y'$ 的方向移动, S 的实像容易在狭缝 S_1 上成像。
 (3) L_2 把 MC 的棱镜或衍射光栅的像投射在 A 面上。
 (4) m 是透明石英板 (约 1mm), 把一部分光束分离到记录器去。
 (5) k 是使入射到 P 的光束保持适当值用的中性滤光器, 用开口光栏也可以。
 (6) T 是能够用计时器设定时限的快门。
 (7) A 是安装试件的框架 (窗), 其构造要能够在原封不动的状态用热电堆测定 A 面的辐射照度。

27-1-5 实用辐射测定仪〔3〕

所谓辐射测定仪就是上面所述的辐射作用功率的测定仪，相当于测光中的照度计，一般是按波长计权的辐射照度测定仪。这样的测定仪除了其入射角特性在所设对象的波长域满足余弦法则之外，其光谱灵敏度特性只有和所设对象的光谱效应特性一致时才有效，称这种测定仪为单目的测定仪 SP。表 27-1 为现在使用的测定仪的规格。

表27-1 实用的单目的效应（作用）测定仪SP的规格

效应名称	对象波长 (nm)	适用光源	现用测定仪的组成部分		测定仪用途分类	基本单位 实用单位	备注	
			光电变换 元件	滤光器				
产生臭氧	150~200	短波杀菌灯石英汞灯	PT PM	—	除臭，水处理	J/m ² G-W/m ² Z-W/m ² W/m ² 等等	规格 JEL205	
产生负离子	150~200	离子灯	PT PM	—	消洁空气			
杀菌作用	240~300	杀菌灯	PT PM	干涉滤光器 光学滤光器	空气杀菌、水杀菌、表面杀菌		JIS C 7605 JIS Z 8811	
对生物有害作用	200~340	杀菌灯、电弧焊、气焊、碳弧灯、保健用荧光灯	PT PM PC	光学滤光器	防止对眼睛和皮肤的伤害		JIS Z 8812	
红斑作用	250~330	医疗用紫外线灯、加农短弧灯、太阳光	PT PM PC	光学滤光器	诊断光线过敏症			
生成维生素D	260~300	保健用荧光灯、加农短弧灯	PT PM PC	光学滤光器 干涉滤光器	在食品、饲料中加维生素D，预防佝偻病			
色素沉着	330~400	黑光荧光灯、黑光汞灯	PT PM PC	光学滤光器	治疗寻常性白斑			
一般光化学作用	光分解	340~460	复印用荧光灯 复印用汞灯	PT PM PC	光学滤光器		重氮复印	
	光聚合	340~460	高压汞灯、加农短弧灯、超高压汞灯、金属卤化物灯	PT PM PC	—		印刷制版、涂料硬化、墨水的干燥	
	光蜕变	300~750	光化学用汞灯、碳弧灯、加农短弧灯、太阳光	PT PM PC	光学滤光器 干涉滤光器		耐光性试验、屋外曝晒试验	JIS W 7002 ISO DIS877
	光合成	340~700	紫外线荧光灯、高压汞灯	PT PM PC	光学滤光器	化学物质的合成		

注：PC：光电池；G-W：杀菌瓦（根据杀菌作用曲线计权的辐射功率）；Z-W：危险瓦（根据有害作用曲线计权的辐射功率）。

制造有近似光谱效应特性的受光器在技术上有许多困难，这些测定仪的指示大多数表示近似值。此外，不可以把 SP 用于该对象以外的目的（尽管那时也往往能读出指示），例如，不能用杀菌紫外线照度计来评价视觉产生的亮度，因为这样做不但完全无意义，而且随情况的不同而可能导致有害的结果。在类似于 SP 的测定仪中，有称为紫外线照度计的测定仪，它是在只对紫外域有灵敏度的受光器上附加适当的滤光器（不近似于特定的光谱效应曲线）而成

的，这样的测定仪在特定的条件下（例如，就某种光源来说），即使能够使用于记录器，但作为SP，除了其受光器的光谱灵敏度和所设对象的光谱效应偶然一致时之外，还是没有用的。

27-2 紫外和红外辐射

27-2-1 紫外和红外辐射的范围

从比可见区域短的波长起直到软X线区域内的辐射称为紫外辐射，从比可见区域长的波长起直到无线电波的区域内的辐射称为红外辐射。紫外、红外区域内可以再进一步细分，有好几种分类方法，CIE 的分类如表 27-2 所示。

表27-2 紫外、红外区域的划分 (CIE)

紫 外 辐 射 的 范 围		红 外 辐 射 的 范 围	
UV-A	400~315nm	IR-A	780~1400nm
UV-B	315~280nm	IR-B	1.4~3μm
UV-C	280~100nm	IR-C	3~1000μm

这种划分大体相当于通常所谓的近紫外（近红外）、中紫外（中红外）、极端紫外（远红外）区域。波长 200nm 以下的紫外辐射，因为在大气中会被氧气吸收，大多数在真空中使用，也称为真空紫外。红外辐射因为在很广的波长范围内为大气中的水蒸汽、二氧化碳、臭氧、甲烷等所吸收，在避开这些吸收带的被称为大气窗的波长区域内被利用的场合比较多〔4〕(图27-5)。

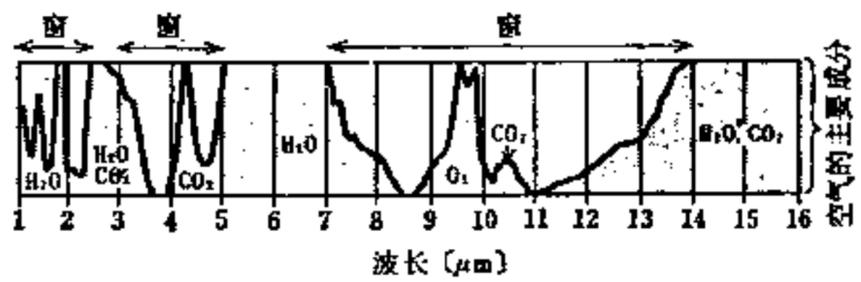


图27-5 主要的空气成分的红外吸收带
(对于海平面的平均状态)

27-2-2 紫外和红外辐射源 (参照第6章、第7章)

(1) 太阳和天空的辐射〔5〕,〔6〕 太阳发出近似于亮度温度约 5760 K 的黑体的辐射，在大气圈外的辐射包括从 X 线区域到无线电波区域，在地表观察到的最短波长是 290nm。太阳直射光的辐射照度，在太阳高度为 90°，晴天时约达 1kW/m²。天空的辐射，其大部分是通过太阳辐射的散射产生的，与直射光相比较，短波成分较多，在太阳高度为 90°，晴天时的辐射照度约 120W/m²。

这些值比通常的人工照明产生的值大得多。在晚上，整个天空成为温度约为 273 K 的红外辐射源。图 27-6 表示这些状态。

(2) 紫外辐射源〔7〕 通常用线光谱辐射源和连续光谱辐射源，前者的代表性例子是汞灯（低压、高压），后者的代表性例子是加农灯、重氢灯。作为线光谱和连续光谱混合的辐射源有各种荧光灯、金属卤化物灯。石英玻壳的电灯（卤素灯等）直到紫外区也是有效的，虽然已经生产了能在直到 250nm 区域给出数值的标准灯，但因为辐射的绝对量较少，不适合工业应用。

图 27-7 表示这些辐射源的光谱辐射特性。为了校正工业用的辐射源，还规定了实用的标准（表 27-3）。

(3) 红外辐射源 最普遍的就是温度辐射体。其代表性的例子，近红外区有白炽灯，

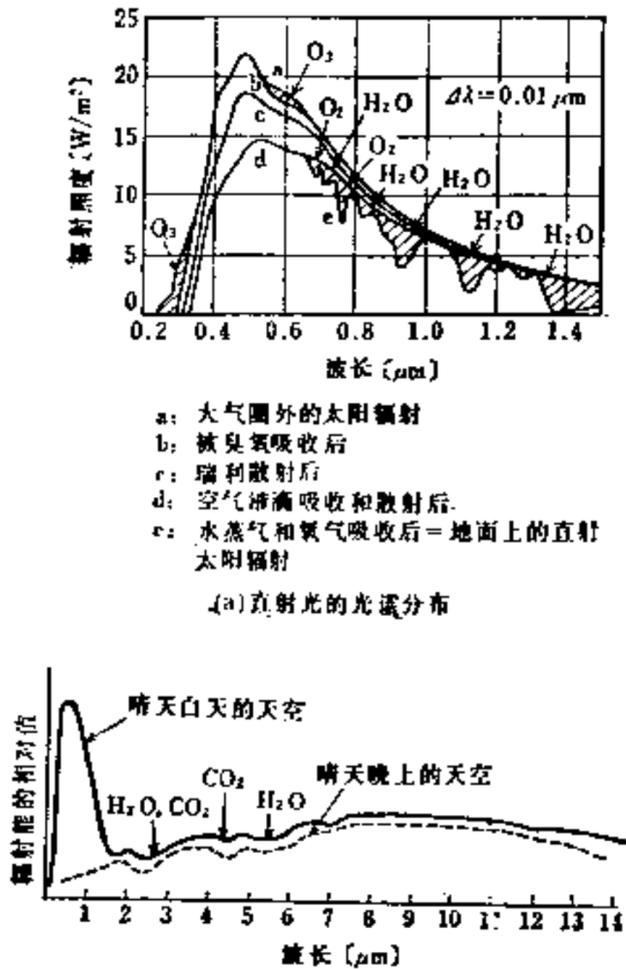


图27-6 太阳和天空的辐射

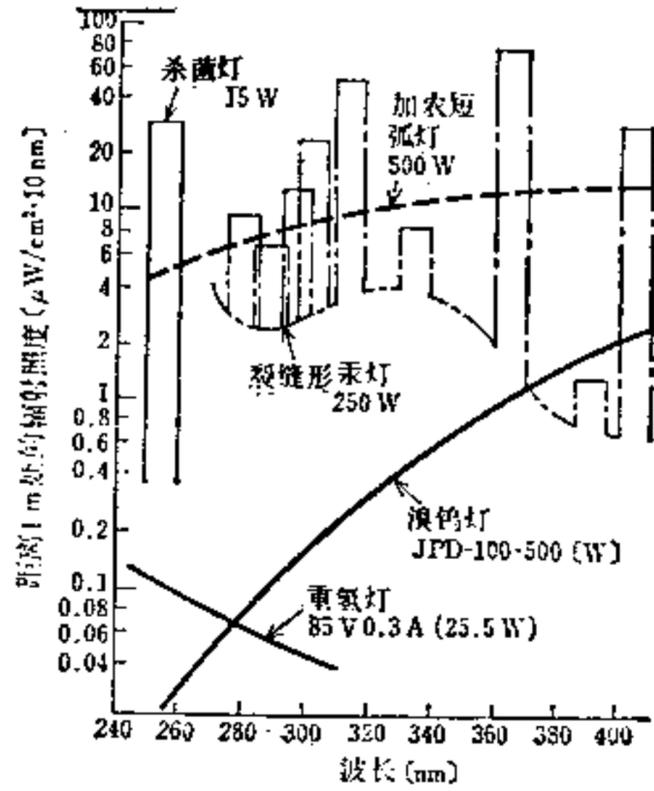


图27-7 各种辐射源在紫外区域的光谱辐射照度
(线光谱按10nm宽度换算)

表27-3 实用的紫外线标准辐射源的规格和性能

灯泡种类	杀菌灯	高压汞灯	加农短弧灯	裂缝形汞灯
用途	单线标准(254nm)	单线标准(365nm)	连续光谱标准	多线标准
额定值	10W, 15W两种	400W	500W	250W
规定输入功率	电流/0.23 A, 0.30 A (交流)	功率/400W(交流)	电流/23 A(直流)	电流/2 A(直流)
寿终条件				
点灯时间	500小时	500小时	30小时	100小时
开关次数	100次	100次	几次	50次
使用中大概的衰减(/100次)	~1%~	~1%~	~2%~	~2%~
判断标准*				
短时间的稳定性(R_x) _{max}	1.25%	1.25%	1.25%	1.25%
稳定性(R_x) _{max}	2.0%	2.0%	1.5%	1.5%
重现性 R_x	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%
灯电压变动(R_x) _{max}		3.0%	3.0%	3.0%
辐射强度	254nm; 0.30~0.36 (W·sr ⁻¹)(15W管)	365nm; 1.3~1.5 (W·sr ⁻¹)	280nm; 0.006~0.010 360nm; 0.010~0.016 (W·sr·nm)	365nm; 0.60~0.67 (W·sr ⁻¹)
灯罩	要	不要	要	要(可和灯一起购买)
备注	从商品灯选择标准, 也可以特制	用测光标准, 也可用商品灯	和JIS白色标准光源通用	紫外标准专用灯

(照明学会紫外线测定专门委员会)

* 判断标准的试验条件为(5次测定/1分钟)×(每5分钟3次/点一次灯)×(连续3次点灯)实际所得到的灯泡性能大多数在标准值(界限值)的1/2以下。

中远红外区有碳化硅 (SiC) 发热器和镍铬丝发热器。

白炽灯的辐射是灯丝辐射通过玻壳后发出来的, 从灯丝来的波长在 $3\mu\text{m}$ 以上的辐射被玻壳所阻挡。碳化硅在 $2\sim 20\mu\text{m}$ 的波长范围内显出近似于黑体的辐射。作为红外域的光谱辐射标准, 在直到 $2.5\mu\text{m}$ 的波长区域内可以用白炽灯, 在 $2.5\sim 18\mu\text{m}$ 的波长区域内可以用碳化硅空腔辐射体^[8]。

除了这些以外, 还可以利用各种放电灯作为红外辐射源。

27-3 辐射和印刷照相工业

现在可以以各种形式供给情报, 但从简单性和耐久性来说, 其中主要的是文字和图画的复制品。

以前, 对于这些复制品, 使用了印刷和照相的表现形式, 但随着各种技术的发展, 这些表现形式变得不合适了。

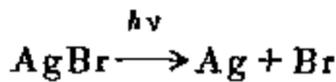
我们把组成这种新型的图形记录和其复制品的技术领域称为复制工业^[9], 它也包括上面的印刷和照相技术。

本节从辐射可以应用于复制工业的哪一部分, 或利用辐射的必要条件是什么这个方面, 主要通过“接受辐射这个侧面”来说明复制工业和辐射的相互关系。

辐射限于从紫外到红外的范围, 内容不是从原理上分类而是从应用上分类。

27-3-1 照相和辐射

通常, 银盐照相胶片在基底上涂有感光层^[10] (图27-8)。如果用卤化银作为胶片的感光剂, 它就发生下面的光分解反应:



通常, 卤化银的固有吸收, 用 AgCl 时在 440nm 以下, 用 AgBr (结晶) 时在 480nm 以下, 光谱灵敏度当然也在这些值以下。用这种胶片拍摄一般的物体是不合适的。因此, 添加各种色素以扩大光谱灵敏度的宽度^[10] (图27-9)。这种方法叫做增感。

银盐照相即使从被照物体来的辐射绝对量少也能够照相。主要的方法是提高胶片的灵敏度, 即有效地利用进入胶片内的辐射, 有必要用少量的辐射能来进行光化学反应, 为此, 在感光剂粒子的直径、添加物等方面就要想许多办法^[11] (表27-4, 表27-5)。

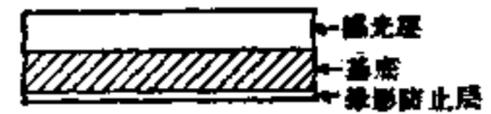


图27-8 照相胶片的构造 (断面)

表27-4 AgBr的量子吸收率

试料	量子吸收率
AgBr(结晶)	<0.01
AgBr(沉淀)	0.1
AgBr(凝胶)	~1

表27-5 卤化银的感光度 (430nm)

感光剂	绝对灵敏度 (J/m^2)	ASA
高灵敏度卤化银	2×10^5	$10^2 \sim 10^3$
卤化银	10^4	$10 \sim 10^2$

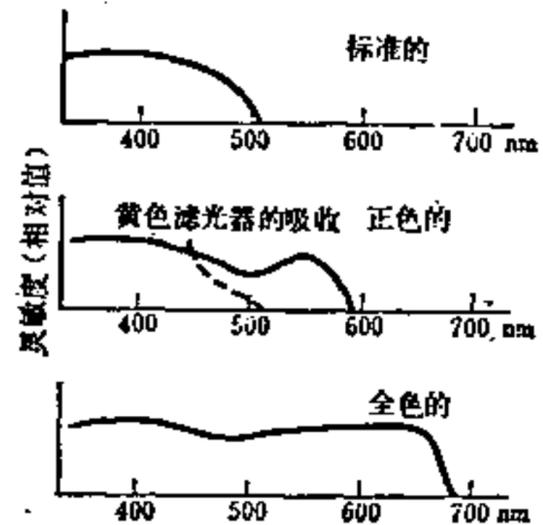


图27-9 照相胶片的光谱灵敏度

多层式的天然色照相就是通常所谓的彩色照相。这些彩色照相具有按减色法发生三原色的三层感光乳剂层^[12] (图27-10)。各层在所分担的波长域的感光度可以被调整到大体相等^[13] (图27-11)。

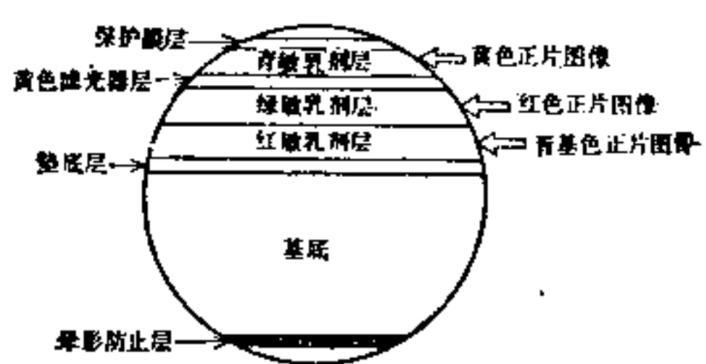


图27-10 彩色胶片的断面略图

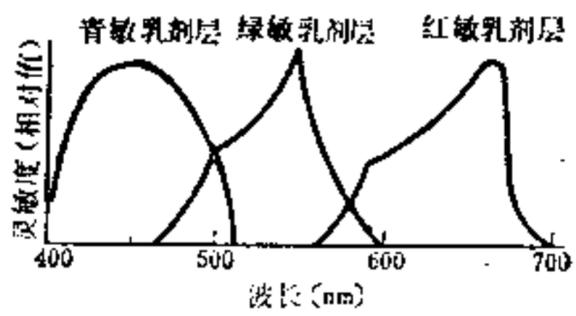


图27-11 彩色胶片各乳剂层的感光波长域 (绿敏、红敏乳剂都有感受青紫色光的性质, 因此用黄色滤光器层防止它)

工业、科学、鉴别、航空等所利用的红外线照相, 是利用从被摄物体发出的红外线的, 大多数是利用红外线的散射特性和被摄物的反射率。尽管通常的照相透镜考虑了色象差, 用在红外区增感的胶片^[10] (图27-12) 虽然可能进行摄影, 但是, 因为这种胶片在短波长这一侧也具有灵敏度的情况比较多, 因此, 摄影时盖上红色滤光器是有必要的。

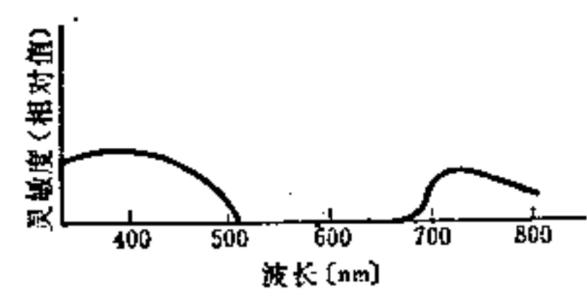
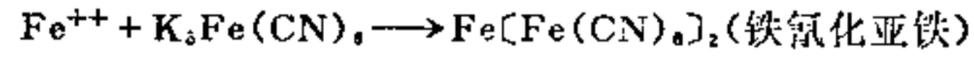
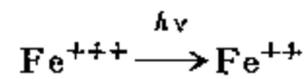


图27-12 红外线750胶片的光谱灵敏度

27-3-2 复印和辐射

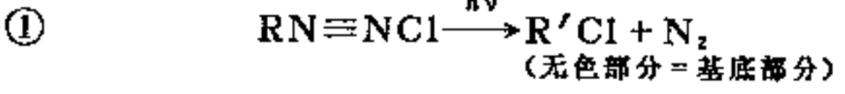
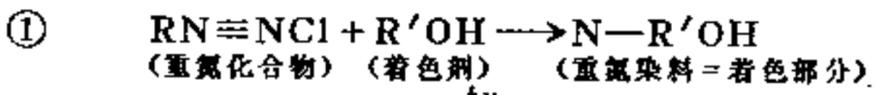
(1) 蓝图 蓝图直到现在还有一部分被利用作为工业用图。感光剂是亚铁盐。由于辐射的作用, 三价的铁还原为二价的铁, 这个离子和预先加进去的铁氰化钾发生反应, 产生铁氰化亚铁。



用这种感光剂的感光纸, 在可见光谱区的相当大部分还有光谱灵敏度 (图27-13)^[14]。

晒相用的光源主要使用高压汞灯、绿色荧光灯等从紫外域到短波长可见域发出辐射的光源。

(2) 重氮复印 重氮复印俗称复制, 其原理是利用重氮化合物的光化学反应, 在涂有重氮化合物的纸上叠加透光的原稿, 从原稿的一侧用光照射, 就可以复制出原稿中画线部分的上色的图形。



重氮化合物的光谱特性已经作过仔细研究, 特别是它的相对灵敏度比较高^[16] (图27-14)。其绝对灵敏度比银盐小得多^[11] (表27-6), 因此, 在复制工作时不需要暗室。

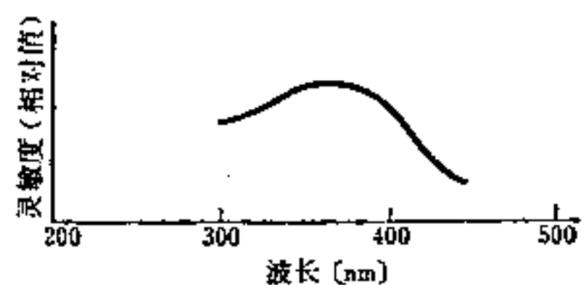


图27-13 蓝图感光纸的光谱灵敏度

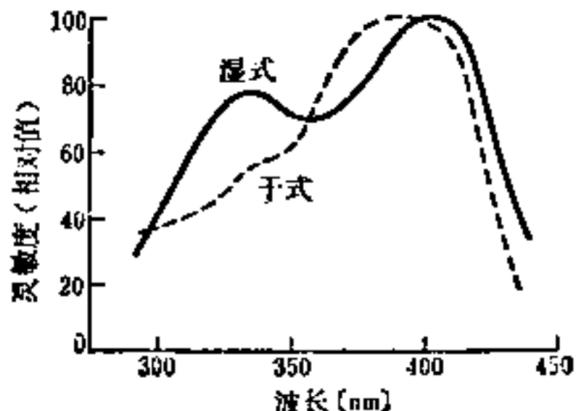


图27-14 重氮感光纸的光谱灵敏度

表27-6 感光剂的感光度 (350~450nm)

感 光 剂	绝对灵敏度(J/m ²)	ASA
重氮化合物	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁵
光聚合系的感光剂	10 ⁻³ ~10	10 ⁻⁶ ~10 ⁻²

实际使用的光源是复制用荧光灯，管形高压汞灯。后者主要用于大型的复印机。

(3) **静电复印** 是把光学的图像经过静电的图像(潜像)变成可见的图像的方法，有直接式和间接式两种。为了得到比较高的灵敏度，采取了利用反射光复制双面印刷物的方式，因此容易普及。

直接式是使涂有感光剂的纸的表面带电，然后把从光源来的光通过光学系统照射在它上面，感光剂表面的电位在基线部分大大下降(图27-15)，但图像部分只下降一些，形成静电潜像。如果把在这潜像上由于静电而吸附着的极性相反的粉状微粒的像呈现出来，就能复制出可见的图像。

所使用的感光剂多是氧化锌系的感光剂，吸收域在400nm以下，但增感容易，在可见光部分也有足够的灵敏度。光源不一定要紫外辐射源，宁可使用在①寿命，②感光面照度的均匀性，③提高原图面的照度等方面有利的光源，大多数使用与复印机的光学系统相适应的管形卤钨灯和静电复印机用的高功率荧光灯。

间接式是在金属板上涂非结晶形的硒作为感光面，再把在其上面形成的图像转印在普通纸上。这是经常使用的一种方式。

(4) **红外线照像** 是用红外线记录图像的方法之一，从原理上分有三种方法，其中之一是记录原图所吸收的红外线的方法，这个方法是一般的。实际上把原图和感光纸重叠起来，从其上方照射红外线。为了避免由于跑光(基层部分的起色)而使图像质量下降，用反射镜把近红外线集中，通过短时间的强曝光使图像部分和非图像部分的温度差增大。

作为成像的方法，有在热敏纸的着色层(看见图像的部分)上制造不透明层，然后用热把这部分熔化成透明的可以看得见的着色层的方法(物理的方法)和使热敏纸的表面由于热而发生不可逆的起色反应生成的化合物微粒分散的方法(化学的方法)，这两种方法各有优点和缺点。

27-3-3 印刷、制版和辐射

(1) **光敏膜** 是通过光而形成的耐药性薄膜[17]，通常其组成物是含有被称为感光树脂的感光基的化合物。光被这个感光基所吸收，经过分子的激发、分解、结合等产生交联或聚合反应，引起分子构造的变化从而增强耐药性。制版过程也大部分利用它。

(2) **与辐射的相互关系**
通常，印刷物的生产过程是复杂的，但和辐射有相互联系

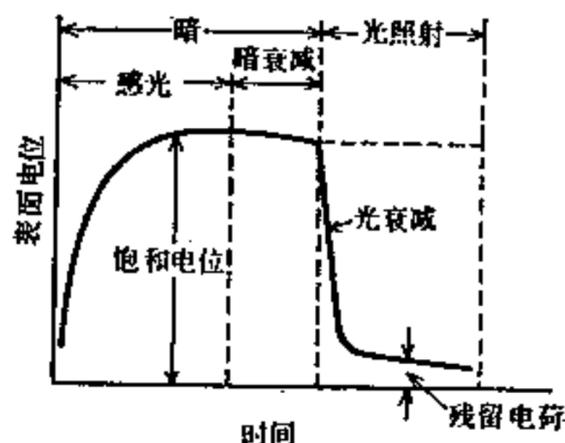


图27-15 静电复印感光面的表面电位衰减特性

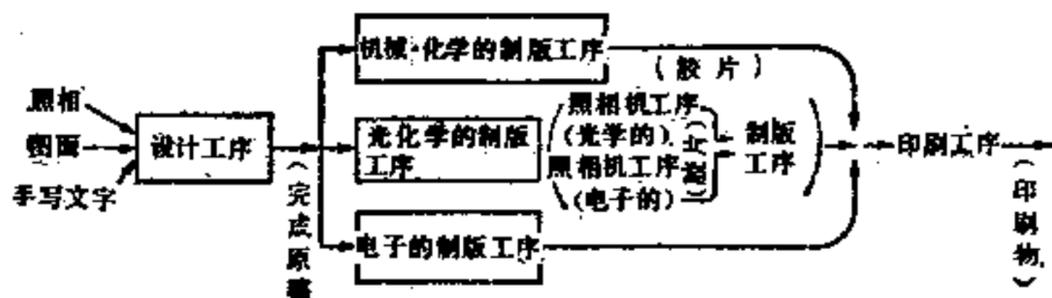


图27-16 印刷物的生产过程

的是光化学制版过程中的照相机工序（光学的）和制版工序（图27-16）。

（3）照相机工序（光学的）和辐射 这个工序和通常的照相的原理是一样的，但因为要复制被照体（平面图像）以及得到较高的扫描细度，需要用大型照相机（图27-17）。

照相机工序由下面两部分组成：

① 用 Riss 胶片进行黑白线图和网格的层次不连续的照相。

② 用彩色印刷的制版所用的三色分解胶片进行层次连续的照相。

在①中，从光源的光谱分布直到被摄物体（原稿）上的照度的均匀性都是需要考虑的问题，解决的办法是在通常的制版用照相机工序中，从两个方向把光源配置在与照相机的光轴成 45° 大致相等的角度上^[12]（图27-18），或者用特殊的照明器作为面光源（图27-19）。

在②时，因为是根据减色法通过三原色来实现色再现的，用全色胶片，通过与加色法相适应的三原色滤光器^[12]（图27-20）进行把复印物的彩色图像分割成三原色（青、红、黄）的制版的负片照相。用于这种色分解用的光源，从色再现方面来看，希望其光谱分布是近似于太阳光的白光。通常可以使用加农灯（图27-21）和天然色荧光灯，但也可以使用玻壳涂上青色从而使色温提高到 $5400\sim 5800\text{K}$ 的反射形白炽灯。



图27-17 照相制版用全自动照相机

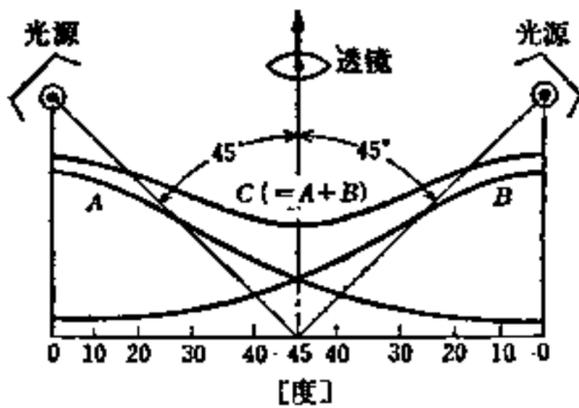


图27-18 两个灯的照度的合成



图27-19 光源装置（面光源、加农灯）

（4）制版工序和辐射 印刷版根据各种版的形式和制版法进行区分^[18]（表27-7），但与辐射有关的是前面所述的属于光化学的制版法。这些版是在金属版（孔版除外）上面涂刷以重铬酸盐作为感光剂（图27-22）的感光液，待其干燥，在其上重叠照相机工序中的胶片，用光源进行晒相、显相、整修，从而完成制版。在晒相时用真空式晒相机（图27-23）和植版机。感光剂在版的整修（蚀刻）阶段的耐药性是良好的，但是，版的好坏受环境条件所支配，或者由于暗反应，曝光前的原版不能长期保存，经费与废液的处理有关。

为了弥补这些缺点，对于凸版来说，有所谓感光性树脂版，它是在金属板或合成树脂的基板上涂刷感光性树脂（聚乙烯肉桂酸或酸性黑）作为感光层。

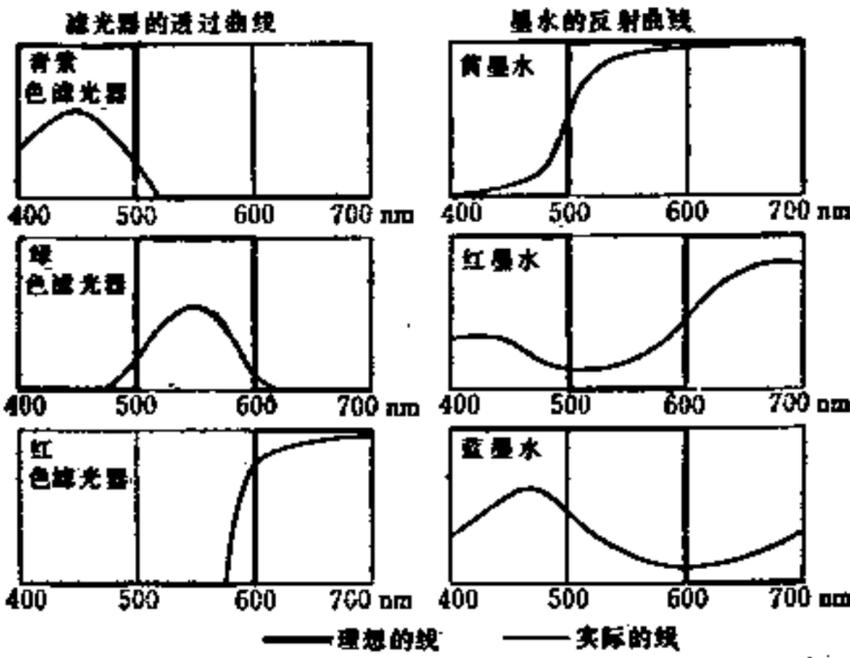


图27-20 色分解用滤光器的透过曲线和
三色墨水的反射曲线

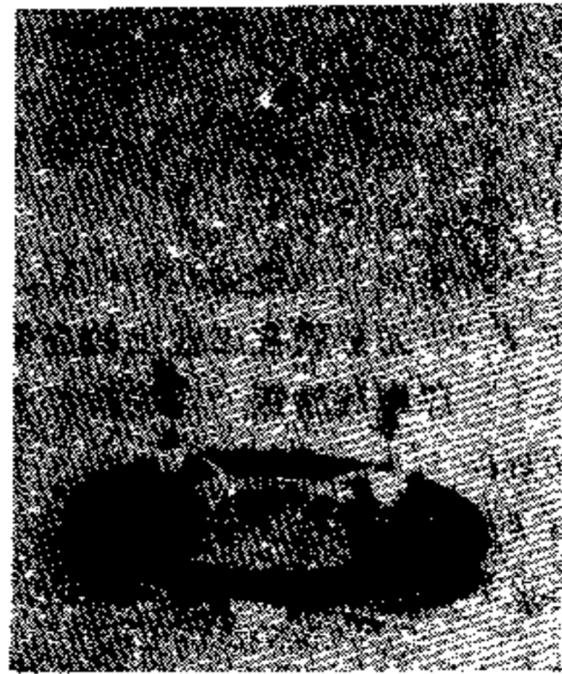


图27-21 加农闪光灯
(圆形, 6 kW)

表27-7 版的形式和制版法 (重铬酸盐)

版方式 \ 制版法	机械的、化学的	光 化 学 的	电 子 的
凸 版	活版、木版、铅版、电气版	原色版、线画凸版、网格版	雕刻凸版
平 版	石版、金属平版	照相平版、珂罗版	—
凹 版	雕刻凹版、蚀刻	照相凹版	雕刻照相凹版
孔 版	誊写版, 绢纱网	照相绢纱网	型版制版

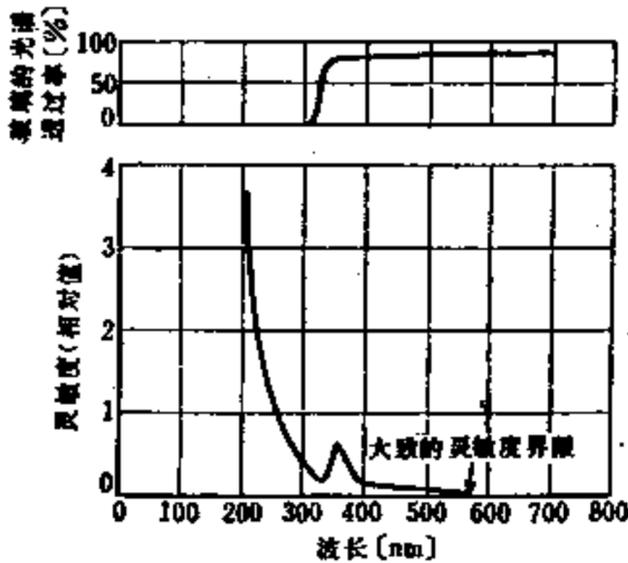


图27-22 重铬酸盐的光谱灵敏度

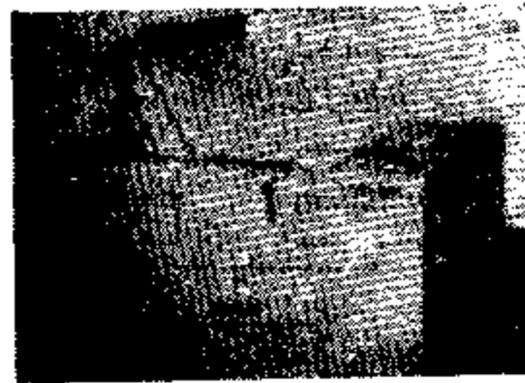


图27-23 双面式真空晒相机

对于平版来说, 有所谓透印用的 PS 版。它和感光性树脂板一样, 可以事先大量生产并保管起来。PS 版是把铝板等版材的表面进行表面处理后再涂刷感光剂并令其干燥而成的, 这种表面处理使重氮树脂 (底片的形式, 用甲醛使 4-重氮苯胺缩合而成的树脂) 的感光剂在曝光以前不会分解。

制版的晒相, 因为实际上的光谱灵敏度的最大值都在近紫外部分, 可以使用碳弧灯、水冷式超高压汞灯、金属卤化物灯等, 但需要比照相和复印更长的时间 (5~30分钟), 光源装置的容量也大, 为 1~10 千瓦 (但希望用小型的光源), 这是因为:

- ① 感光剂的灵敏度小〔11〕(表27-6);
- ② 版的面积大(例如:标准版639×939mm);
- ③ 感光层厚;
- ④ 在真空晒相机中,印相曝光用的前玻璃板处存在吸收。
- ⑤ 胶片的吸收大;
- ⑥ 为使辐射照度的均匀性好,版和光源的距离大。

27-3-4 光敏膜在工业上的应用

(1) 印刷线路板 印刷线路板种类也很多〔19〕(表27-8),按其制造方法大致可以分为下面两种:

- (1) 铜积层板法或蚀刻法。
- (2) 加成法或非电解电镀法。

表27-8 印刷线路板的种类

种类	内容	内层导体	有无穿孔的电镀接头
单面印刷线路板		没有	没有 〔没有 有 有〕
双面印刷线路板		没有	
多层印刷线路板		有	

通常,(1)的方法用于要求精度高、可靠性高的场合,(2)的方法用于大量生产的场合。(1)可以分为用光敏膜的方法和用过滤网印刷或胶版印刷的方法(图27-24),但利用光敏膜的方法可以得到较高的精密度。

印刷线路板用的光敏膜的感光性树脂使用酸性环化橡胶或聚乙烯肉桂酸。聚乙烯肉桂酸

由于增感剂其感光波长域伸展到大约450nm〔17〕(图27-25),因此可以使用那些在近紫外部分具有有效辐射的光源。但是,为了与配光控制很好配合,通常大多数使用超高压汞灯等小型光源。

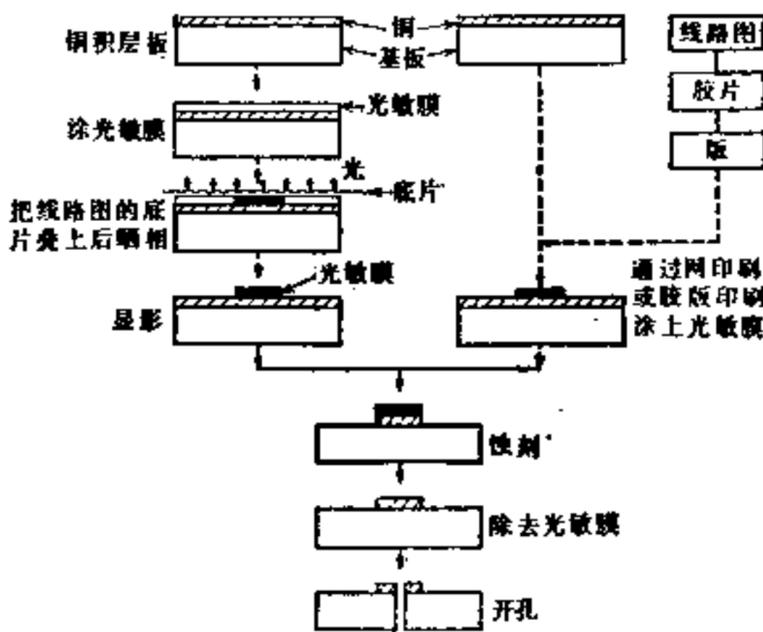


图27-24 用铜积层板制造印刷线路板的工序

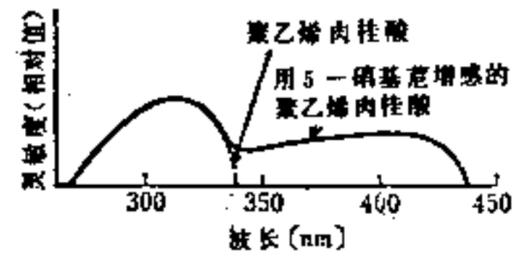


图27-25 聚乙烯肉桂酸的光谱灵敏度

(2) 集成电路 把半导体元件的制造和半导体元件等集合在同一基板上的方法之一就是利用光敏膜〔20〕(图27-26)。作为一个例子,我们叙述在垫片上集合npn半导体等的方法中有关光敏膜的部分。

首先,从原稿(电路图)通过高度缩小照相法和植版工序做成原版照相,再用它做成基板用的掩膜(屏蔽),在垫片上涂刷感光性树脂,把掩膜紧贴在感光性树脂上,用光源进行晒相、

显相、蚀刻处理，有选择地使杂质扩散，就可以在垫片上得到如图27-26 (e) 那样的岛状的元件。集成电路大多数是通过反复进行这样的操作并结合真空蒸镀制造出来的。

因为晒相时辐射照度的均匀性很重要，必须通过精巧的光学系统进行。从感光性树脂的光谱灵敏度方面来看，把近似于小型点光源的超高压汞灯和短弧加农灯作为光源也是合适的。由于需要大的析像能力，大多数使用精制的环化橡胶和酸性化合物的混合物作为感光性树脂。

集成电路的制造技术，由于增加了大型集成电路和密集程度，而且更加微型化，还存在着许多辐射的应用以外的技术问题。

(3) 金属等的精细加工 彩色电视用的电子束管的障板屏蔽^[12] (图27-27) 是用来控制从三个电子枪出来的电子流和荧光体的位置关系，通常是在钢板上开有许多微小的孔。这种孔是通过光敏膜的应用，即蚀刻来开成的。

这样的加工方法可以应用于电动剃须刀的前面的小孔、精密的刻度盘、刻度、名牌、装饰加工板、小型零件冲孔用金属模、钟表等小型零件的加工，以及薄膜电子电路、贵金属的装饰加工等广泛的范围，都需要有适合于基板金属和形状等各种条件的感光性树脂和蚀刻液。

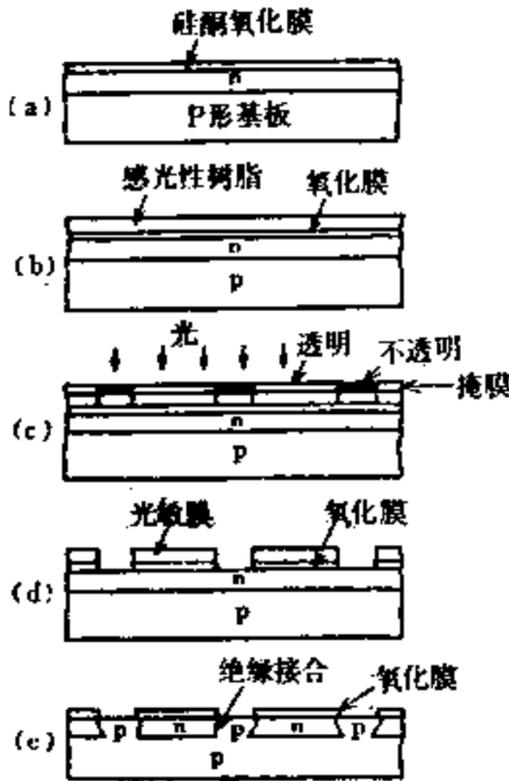


图27-26 半导体集成电路的制造工序 (说明图)

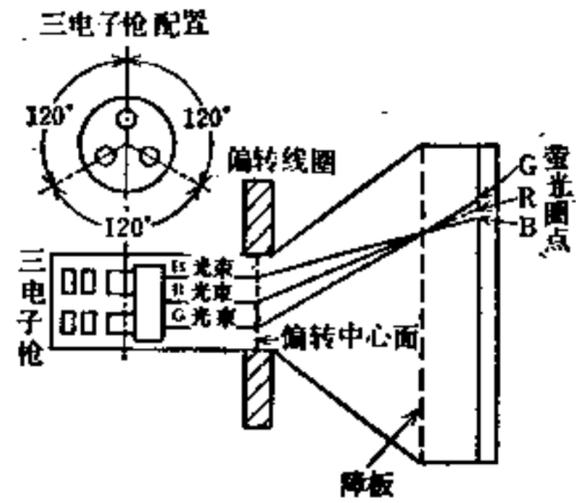


图27-27 有障板的彩色电视的电子射线管

27-4 生物、医疗和辐射

27-4-1 辐射对生物的作用^{[21]~[29]}

太阳是地球上的生命的源泉，如果没有太阳，任何生物都不能生存在地球上。太阳光和生物 (生命) 的不可分割的关系之一就是下一节所述的光合作用。

地球上的植物所进行的光合作用在保证地球上的生物生存所需要的能量这一方面来说，是至关重要的。

(太阳) 光是能源，另一方面也是控制环境的重要因素，大多数生物都直接或间接地与光

表27-9 辐射对生物的作用

效应名称	有关的波长域 (nm)	内 容	适用光源
由光电效应产生负离子	250以下	○由光电效应从金属表面放出光电子,该光电子与空气中的分子和微粒相结合,生成负离子。 ○负离子有消除疲劳、缓和神经兴奋的效果	短波紫外线灯 臭氧灯
杀菌	200~300	○用杀菌紫外线激发构成细菌和霉菌的分子,使核蛋白构造发生变异,引起新陈代谢障碍而杀死细菌和霉菌	杀菌灯
生成红斑	200~310	○由于紫外线,表皮中的氨基酸发生变化,使血管扩张,经过一定的时间之后就有色素沉着	保健用荧光灯 汞灯
生成维生素D	250~300	○通过紫外线使有机醇变成维生素D	保健用荧光灯
色素沉着	320~400	○由于紫外线在表皮中生成黑色素	黑光荧光灯 汞灯
加热、加温	700~4000	被生物所吸收,使生物体的温度上升,促进血液循环和汗的分泌	红外线灯 远红外线灯

发生关系。其中,如果把与生物的生物化学反应关系比较深的方面归纳起来,就如表27-9所示。

27-4-2 辐射的杀菌作用

太阳光有杀菌作用古时候就由经验知道了,但主要是紫外线的杀菌作用这一事实则是在1901年由Strebel证实的。Luckiesh进一步阐明了杀菌作用的波长特性^[30]。根据其结果,杀菌作用的波长特性与菌种无关,有着大体相同的形状,如图27-28所示,波长250~260nm附近的紫外线杀菌作用最强。

用紫外线照射细菌时,细菌的生存数对辐射照度和照射时间来说,大体成指数函数的关系减少。因此,杀菌效果与紫外线的照射量(辐射照度×照射时间)有关,对于同一菌种,如果照射量相等的话,就可以得到大体相同的杀菌效果。

为了使细菌(也包含霉菌)的生存率保持在一定值所需要的紫外线照射量,除了前面所述的紫外线的波长之外,还随菌种、菌株、菌的环境条件(温度、湿度)的不同而不同。就波长250~260nm的紫外线来说,为了使生存率保持在0.1%,对各种细菌和霉菌所求得的照射量如表27-10所示。这个表是在常温常湿的条件下的结果,如果湿度增大,细菌的抵抗力就增加,故在相对湿度接近100%时,必须有表中的值的二倍那么多的照射量^[31],^[32]。

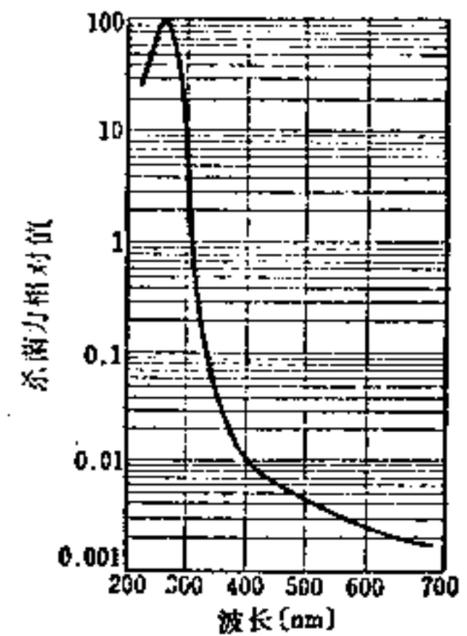


图27-28 杀菌效应的波长特性

表27-10 对各种细菌的杀菌效果

菌 的 种 类	极 弱 的 菌			弱 的 菌			强 的 菌			极 强 的 菌		
	大 肠 菌	红 痢 菌	伤 寒 菌	葡 萄 球 菌	结 核 菌	枯 草 菌	日 本 酒 酵 母	神 酒 酵 母	Wil-liam 类 酵 母	橄 榄 霉 菌	水 果 黑 霉 菌	谷 物 霉 菌
杀菌99.9%所需要的杀菌紫外线量(μW·min/cm)	90	71	74	151	250	260	326	314	630	1470	3700	2000
15W杀菌灯在距离50cm时的照射时间	约 1分	约 50秒	约 50秒	约 1.5分	约 2.5分	约 2.5分	约 3.2分	约 3.1分	约 6.3分	约 15分	约 40分	约 20分

可以用低压汞放电灯作为杀菌用的人工光源。因为这种灯的汞共振线（波长 253.7nm 的紫外线）与杀菌效果最大的波长域一致。因此，这条共振线也叫做杀菌线，被设计成能够有效地辐射杀菌线的低压汞灯叫做杀菌灯。表 27-11 是现在出售的有代表性的杀菌灯的特性〔33〕。

表27-11 杀菌灯的规格

型号	功率 (W)	管长 (mm)	管径 (mm)	灯头	额定电压 (V)	灯电流 (mA)	杀菌线功率 (W)	距离 1 m 处杀菌线的辐射照度 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	平均寿命 (h)
GL6	6	210.5	15.5	G5	100	147	0.8	8.5	3000
GL10	10	330	25	G13	100	230	1.8	19	4000
GL15	15	436	25	G13	100	300	3.0	32	4000
GL30	30	893	25	G13	200	355	7.5	80	4000
GL60S·H	60	1198	32	G13	200	800	14.5	150	5000

27-4-3 人体和辐射

(太阳) 光照射在人体上时产生的效果的典型例子就是“晒黑”。

这种现象在医学上分为两类。一类是皮肤变红，是刺痛现象。另一类是肤色变黑的现象。前者称为红斑作用，后者称为色素沉着〔34〕。红斑是由于毛细血管的扩张产生的，由于光的照射，表皮中的碱性氨基酸游离成组胺，这种东西作用在毛细血管上而使之扩张〔35〕~〔37〕。因为这种组胺也可能被热所游离，所以，红外线和可见光以及机械刺激等也可以产生红斑，但这些原因产生的红斑，其消失也快。然而，在紫外线的情形，由于化学反应，游离组胺的进展缓慢，要持续一定的时间。因此，提到“红斑”时，只考虑由紫外线引起的，对它已经进行了广泛的研究。

由紫外线引起的红斑效应的波长特性，虽然广泛使用 1930 年 Hausser, Luckiesh 用高压汞灯求得的如图 27-29 所示的曲线〔39〕，但最近通过以短弧加农灯作为光源的单色仪，求得如图 27-30 那种形式的曲线〔39〕，〔40〕。现在，多数人认为后者的形式是正确的。

随着紫外线红斑的红色的减退，生成色素沉着，但根据照射用的紫外线波长的不同，不先经过红斑而生成色素沉着的情况也有。构成这种色素沉着原因的色素是黑素。表皮中的羟基苯丙氨酸在存在酶的情况下接受紫外线照射就会生成黑素。

图 27-31 表示不经过红斑的色素沉着效应的波长特性。与前面有红斑作用的情况相比，其最大效应的波长域偏于长波长一侧。适当的色素沉着对真皮和角质层等有保护作用〔41〕。

虽然从经验上早已知道紫外线有防病作用〔42〕，但直到 1926 年 Windaus 发现用紫外线

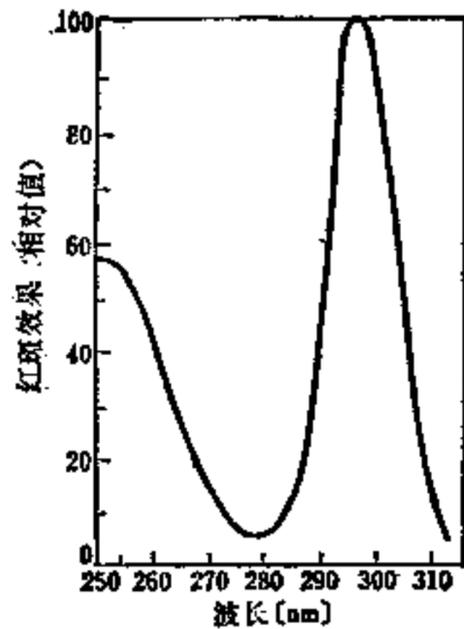


图27-29 红斑效应的波长特性 (根据 M. Luckiesh)

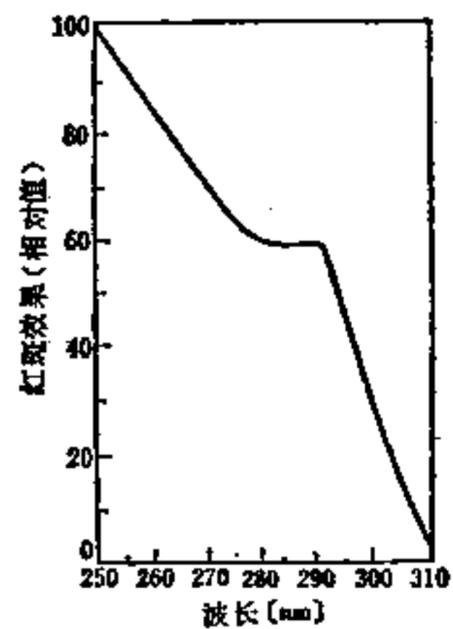


图27-30 红斑效应的波长特性 (根据 M. A. Everett)

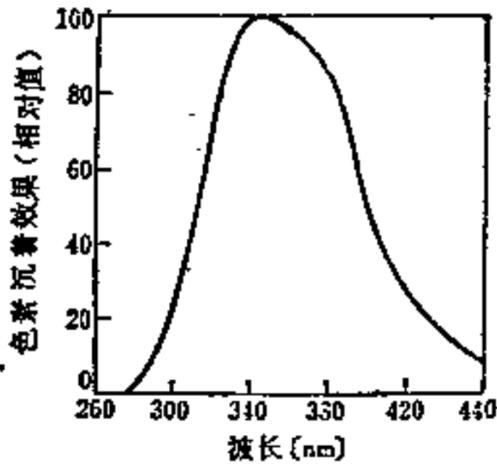


图27-31 色素沉着效果的波长特性

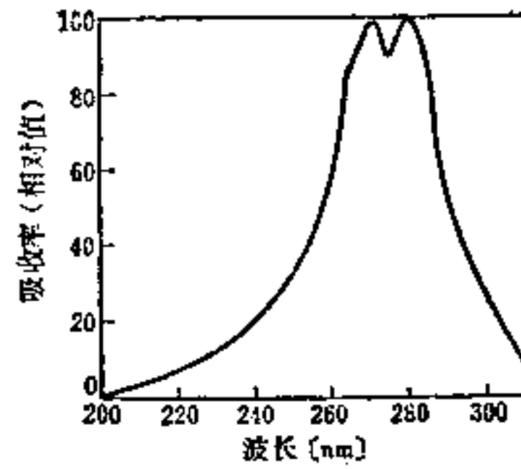


图27-32 有机醇的吸收率的波长特性

照射有机醇会生成维生素D时才弄清楚紫外线和防病作用的关系。图27-32表示有机醇的吸收率的波长特性。

红外线，正如后面所述，由于能量小，即使被物质所吸收，对化学反应的贡献也很小，而转变成热能。红外线照射人体时也一样，不会产生过分的反应，而转变成热能，促进血液的循环和汗的分泌等。特别是波长 $0.8\sim 4\mu\text{m}$ 的红外线（近红外线），由于能透入最深的皮肤和皮下的组织，并在那里被吸收而转变为热能，因此对毛细血管的温热刺激效果较大，比其它波长域的辐射对人体的作用效果要大。如后面所述，这个效果可以应用于医疗〔43〕。

27-4-4 辐射在医疗上的应用

光（辐射）在作为控制环境的重要因素的同时，还给予生物各种各样的作用。因此，光

表27-12 辐射在医疗上的应用

分类	适应症	内 容	合适的辐射源
诊 断	光线过敏症	根据MED(最小有效量)的测定和光贴付试验，研究光线过敏症的原因，判断治疗的程度	光线过敏症诊断用荧光灯、黑光荧光灯、加衣灯
	一般皮肤炎、黄疸等	正确地观察出疹的情况，皮肤、舌头的颜色等，对病名及其原因等进行诊断	高显色性荧光灯
治 疗	寻常性白斑	给药(太阳膏)后，用近紫外线(320~400nm)照射	黑光荧光灯
	色素性干癣症	涂2~5%的凡士林油，用近紫外线(350~400nm)照射	黑光荧光灯
	新生儿黄疸	对于黄疸病的新生儿，出生后2~3日，用青色光(400~500nm)照射，使血中的胆红素降低	青色荧光灯、青白色荧光灯、日光色荧光灯
	网膜疾病	使网膜患部的毛细血管凝固，既防止出血又促进血液循环(光凝固)	红宝石激光、氩气激光
	汗疱	用杀菌线杀死病菌，减轻症状	杀菌灯
预 防	肩酸痛、血液循环障碍、神经痛等	用红外线的温热效应，促进血液循环和汗的分泌，减轻症状	红外线灯
	保持卫生	用杀菌线进行病房、手术室等的空气杀菌和用具、衣服等的表面杀菌	杀菌灯
	增进健康	通过生成适量的黑素增强皮肤，生成维生素D增进健康	(太阳光-日光浴) 保健用荧光灯含有紫外线的荧光灯

对人类的健康起很重要的作用。很久以前，人们从保健的立场出发，开始了日光浴等光（辐射）在医学上的应用。

近年来已经进一步明了光对生物的作用效果，正在积极地把辐射应用于治疗和诊断等。表 27-12 归纳了这些应用〔44〕~〔54〕。

27-4-5 辐射对于人体的安全性

光（辐射）对于人体的良好作用前面已经说过，但照射过度又会产生有害的作用。特别是紫外线、激光对眼睛和皮肤等的伤害是人所共知的〔55〕，〔56〕。

由紫外线引起的眼睛毛病称为紫外线性眼炎，这是由于紫外线过度照射引起的眼睛表层的疾病。从接受紫外线照射开始 4~5 小时后眼睛开始充血，经过大约 10~12 小时后眼睛剧痛，不能睁开眼睛看东西。但这是暂时的症状，在大多数情况下，早则一日，晚则二日即可治愈。紫外线性眼炎的光谱作用曲线如图 27-33 所示〔57〕，〔58〕。

紫外线对皮肤的伤害是引起表皮细胞的变质。用紫外线照射皮肤，大约 6~8 小时后组胺开始游离，毛细血管的扩张（红斑）开始，与这个反应同时，表皮细胞开始变质，经过 24 小时后，变质反应基本上结束。显著变质的细胞数目随紫外线照射量的增加而增加，症状是皮肤变得干燥，感到痛，厉害时还伴有浮肿。这个反应本身由于新的表皮细胞的产生，经过 4~5 日后就会自行修复，但如果长时间地重复这个过程的话，就会变成慢性，皮肤的弹性和润泽减少，皮肤老化。

这主要是由于真皮组织中的胶原质成分减少，引起弹性纤维和胶原纤维等变质的结果〔59〕，〔60〕。如果长时间受到紫外线的照射，或者受到短时间但高辐射照度的照射的话，有一种学说认为就会促进皮肤癌的发生〔61〕，〔62〕。据统计，皮肤癌在低纬度太阳照射量多的地区较多发生，但皮肤癌的发生和辐射的关系不是十分清楚。

在用光照射人体时，不论什么情况都必须充分保证安全性。关于安全性的标准，最近在各方面都逐渐有人研究起来了〔63〕，〔64〕。图 27-34 就是其中一个例子，这是美国劳动卫生专家会议（ACGIH）制定的对于皮肤或眼睛的紫外线阈限值。

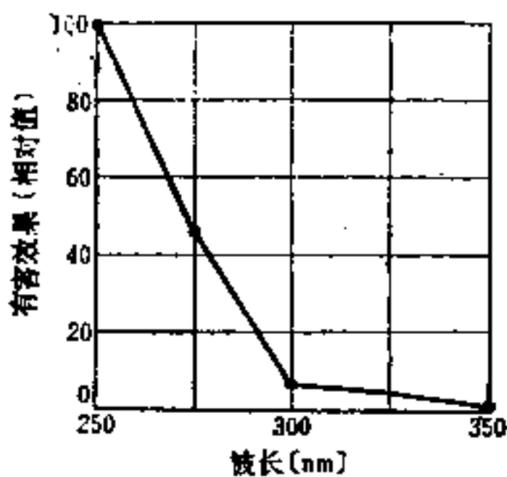


图27-33 紫外线的有害作用的波长特性

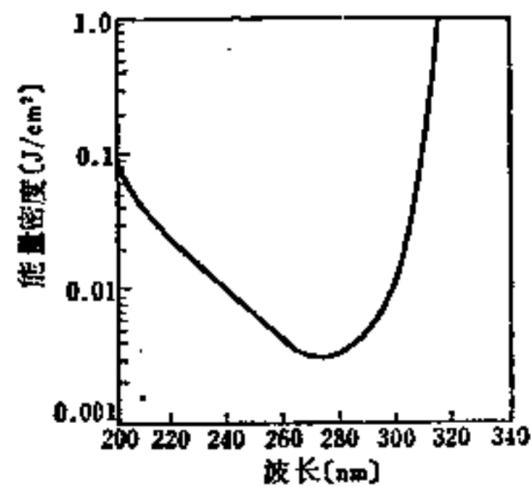


图27-34 建议的紫外线阈限值

所谓阈限值是人可以接受的重复照射也不引起坏影响的值，而不是安全水平和危险水平的明确的界限。在劳动场所必须使用作为照射量管理指南的指示书〔65〕。这种阈限值不适用于紫外线激光。关于激光，ANSI 正在制定另外的安全标准。

总而言之，在可能接受光（辐射——特别是紫外线和红外线）照射的工作场所和由于保健、医疗等需要而接受辐射照射的场所，必须熟读照射装置的说明书，经常请教医师，千万

注意安全。特别是对于眼睛和脸部，无论什么场合，都必须注意戴上保护用具（遮光眼镜和保护面罩等）〔66〕，〔67〕。

27-5 生物工业和辐射

27-5-1 生物和辐射〔68〕~〔73〕

在地球上生存的几乎所有生物都和太阳辐射有密切的关系。生物和辐射的关系可以考虑分成与辐射的质（波长）以及日照时间等有关的刺激性的反应和与辐射的量有关的反应。这种关系的典型的例子如表 27-13 所示。

表27-13 辐射对生物的作用

作用	作用的名称	主波长(nm)	合适的人工光源
对植物的作用	叶绿素的吸收 叶绿素的合成 光合作用	430 650 650	植物用荧光灯 日光色荧光灯 金属卤化物灯、高压钠灯
	光形态的形成 光形态形成的逆反应 向光性	660 730 440	白炽灯、高压钠灯 白炽灯、高压钠灯 荧光灯
昆虫的控制	昆虫的视力(诱捕) 昆虫的视力(驱逐)	360	捕虫用荧光灯 驱虫荧光灯、纯黄色荧光灯
鱼类的控制	鱼类的视力(向光性)	450~550	白炽灯、汞灯
紫外线的作	杀菌作用	250	杀菌灯
	生成红斑和生成 维生素D的作用	250~300	保健用灯
	保温、加热、干燥		红外线灯

27-5-2 植物和光〔74〕

体内保持有叶绿素的绿色植物接受光能（380~710nm）后，从二氧化碳和水生成作为

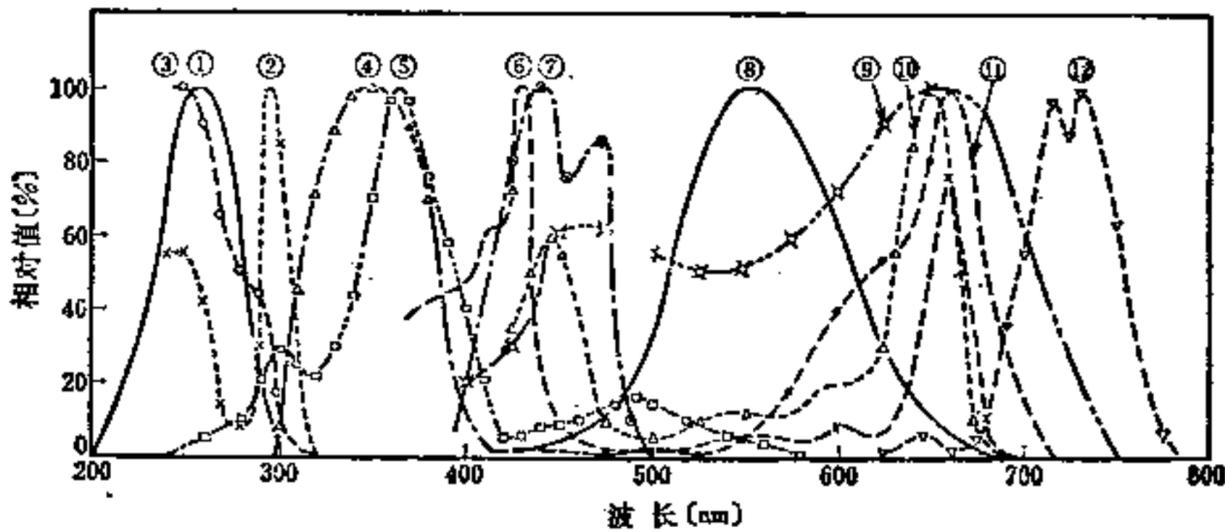


图27-35 生物的各种效应的波长特性

- ① 杀菌作用；② 红斑作用(Luckiesh)；③ 红斑作用(Everett)；④ 色素沉着；⑤ 昆虫的视力；
⑥ 叶绿素a的吸收特性；⑦ 植物的向光性；⑧ 标准视见函数；⑨ 光合作用(黄瓜)；⑩ 叶绿素
合成；⑪ 光形态形成；⑫ 光形态形成的逆反应

化学能的淀粉。这个化学能，一部分用来维持植物的生命，剩余部分用于生长和积累。这种把光能转变成化学能的反应称为光合作用。

(1) 光合作用的波长特性和光能^{[75], [76]} 光合作用和波长的关系分为(1)叶绿素的吸收特性,(2)叶绿素的合成特性,(3)植物体的光合作用等三种。图 27-35 表示这种关系。

光合作用的结果是吸收二氧化碳而放出氧气,因此可以选择二氧化碳的收支情况作为指标。图 27-36 表示光能的强度和二氧化碳的量之间的关系。光合作用的效率随植物体的温度和二氧化碳的浓度而变。图 27-37 表示其中一例。通过乙烯树脂温室,二氧化碳的施肥方法已经成为农业的栽培方法之一^[77]。

植物为了正常生长,必须有饱和照度的 1/3 以上的照度,因此,除了特殊情况之外,用人工光源栽培植物在经济上是相当困难的。图 27-38 表示室内栽培植物的补偿点、饱和点的照度^[69]。

(2) 用人工辐射源栽培植物 已经实用化了的人工栽培作物限于需要光能较少的植物或育苗期的作物。表 27-14 是已经实用化了的栽培实例。

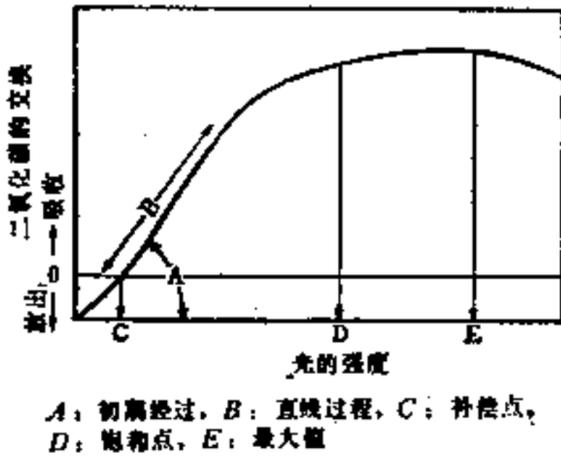


图27-36 光合作用的一般过程

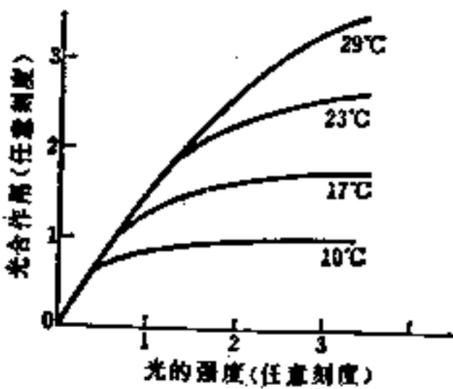


图27-37 光合作用随光的强度和温度而变化

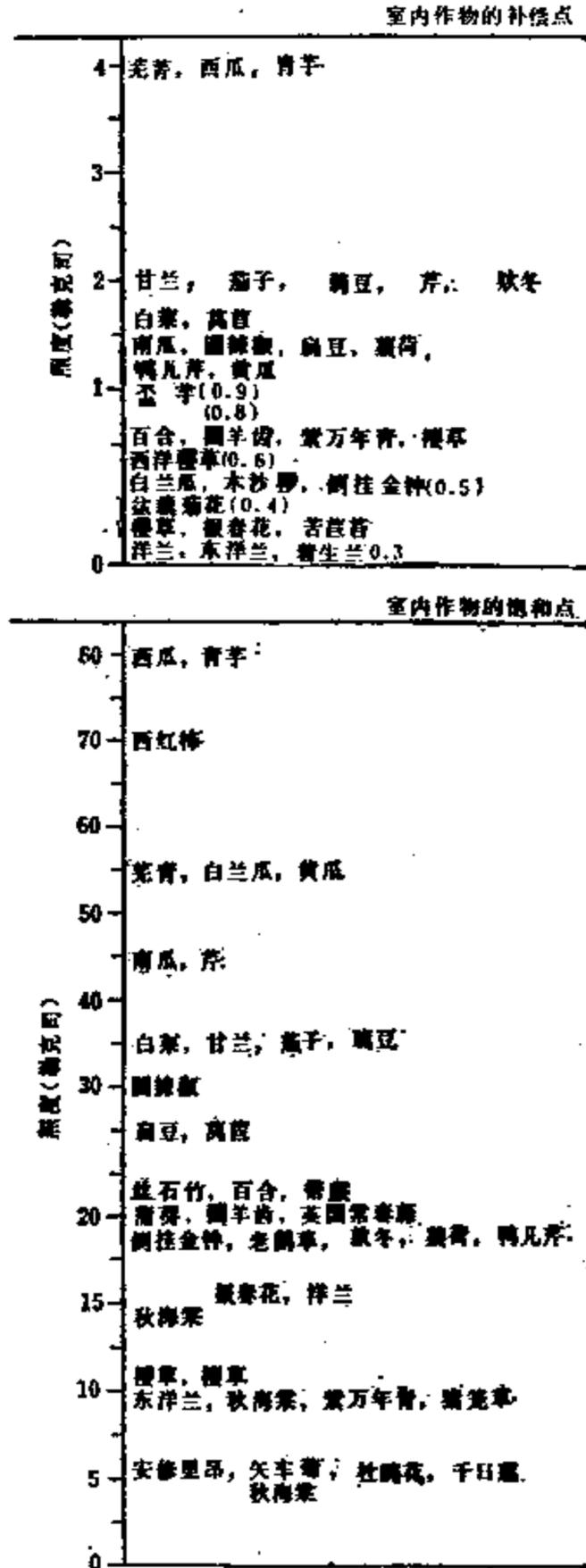


图27-38 室内栽培植物的补偿点和饱和点的照度

表27-14

辐射在植物上的应用

对象	辐射源		内容	
	灯泡	设施		
育苗	西红柿	FL-PG	40W × 3/3.3 m ² 500~1000 lx	用500 lx 约10天促进成长 用1200 lx 约32天促进成长
	南瓜	FL-PG	40W/8m ²	每日利用16小时, 初期产量约2倍
	黄瓜	HF	460W/9m ²	每日利用16小时
	茄子	FL-PG	50~60W/m ²	每日补充照射3小时
	稻子	FL-PG	40W/m ²	照射12小时, 可得健康的苗
栽培	牧草(鸭茅、紫苜蓿等)	Ld	500W/1600m ²	用1 lx以上有效, 用20 lx增加3~4倍, 用50 lx达到饱和
	观赏植物的室内栽培	NH	400W/4000m ²	冬季通宵照射
		FL-PG	300~5000 lx	
	蔬菜的栽培	FL-D		
	花卉	FL-PG	3500~4200 lx	可得子叶萝卜、四叶萝卜等 君影草、矢车菊、郁金香等的栽培
	兰草	Ld、IR		
玉翠菌的成长	FL-PG	165~220W/m ²	每日照射10小时	
光形态形成	菊的开花期的调节	FL-PG	100W/10m ²	5~10 lx有效果, 50 lx是安全界限
	促进石竹花开花	FL-W	40W/10m ²	日落后3~4小时或半夜5~10分钟
	防止石竹花茎弯曲	FL-PG	40W/m ²	50 lx 效果最大, 增加收成最大可达90%。每日照射16小时
	控制土豆的发芽	Ld	100W/3.3m ²	必须10 lx 以上, 每日照射10小时
	草莓苗的冬日低温处理	FL-WW	40W/6m ²	每日照射12小时, 但室温为2~4°C
	促进忽布花开花	Ld	100W/3.3m ²	
		FL-W		
	促进蔷薇开花	Ld		在地上2 lx有效果, 产量2~3倍
	插花的种植	FL-PG	300W/m ²	开花增加18~23%
	香菜的维生素D的增强	FL-D	50~75W/m ²	
	FL-E		用30E-vilion·min/cm ² 照射, 有效果	

注: FL-PG: 植物生长用荧光灯

FL-D: 日光色荧光灯

FL-W: 白色荧光灯

FL-WW: 温白色荧光灯

HF: 汞灯

NH: 高压钠灯

Ld: 白炽灯

IR: 红外线灯

(3) 植物的光形态形成和光 所谓植物的光形态形成就是通过光能的刺激而形成植物体, 包括开花、开花期间的长周期、种子的发芽、茎的伸长等许多内容。光形态形成所需要的光能比光合作用所需要的光能少很多。表27-15是一些典型的值〔78〕。

利用光周期调节菊花的开花期的技术已被广泛采用。另一方面, 光周期产生不利的影响的例子是水稻延迟抽穗, 可以认为5~10 lx 是有影响的照度限。

(4) 植物的趋光性 这是植物向着光的照射方向生长的现象, 是生长激素的作用。可以从上方用光照射的方法来促进石竹花等的花瓣的发育生长。

27-5-3 植物和紫外线〔79〕,〔80〕

虽然没有包含在可见光中的紫外线对植物的生长发育有害, 但通常可以看到, 它对植物叶片厚度的增加、疯长的抑制、果实和种子的蛋白质含有率的提高等都是有益处的。

表27-15

光形态形成中所需要的辐射能

发育现象·植物名称	各种波长所需要的能量比较值(nm)										
	410	480	506	520	540	560	580	620	660	680	700
由于暗期中断,妨碍花芽形成											
1.大豆	125	173	92	40	8	5.4	2.6	1	1.5	3.1	7
2.牵牛花“紫覆轮”				67	47	33	17	1	1.7	13	
3.苍耳	18	27	17	6	3.7	2	1.3	1	1.3	1.6	3.5
由于暗期中断促进花芽形成											
4.菲沃斯(茄科)					4	1.8	1.3	1	1.5	4	7
5.大麦	218	185	85	35	4	1.8	1.3	1	1.5	4	7
抑制开花											
6.月星草	20	24	32	25	36	100	100	100		40	
7.牵牛花“紫”	16	30	38	40	7	5	4	2	2	2	2
促进种子发芽											
8.烟草						18	10	3	1	1.2	50
9.苜蓿											
促进叶的生长 10.豌豆	100	190	200	95	24	10	6.5	1	1	1	1.3
妨碍茎的生长 11.大麦	250		200	40	20	5	2	1.3	1	2	6
色素形成 12.西红柿果皮	30	30	30	30	20	10	3	1	1	1.2	7

注:表中的数值表示同等效果所需要的能量的比较值。而且所需要的能量值(kerg/cm²)在各行分别乘以30, 40, 300, 35, 2, 160, 10, 200即可得到。

积极利用紫外线的例子是用UV-B照射以增加香草的维生素D的含有率。为了使1克香草含有400IU(国际单位)的维生素D,可以进行30E-viton·min/cm²(表皮红斑·分/厘米²)的照射。

27-5-4 动物和辐射

(1) 鱼类和光^{[81]~[83]} 鱼类的视觉机能很发达,已经证实除了存在光觉外还存在色觉。对光有积极反应的鱼类很多。因为沙丁鱼、青花鱼显示出向光性,可利用集鱼灯来捕捉它们。另一方面,虽然知道鳗鲡、鲑鱼等鱼类忌光,但幼鱼和成鱼之间显示出不同的反应的情况也有,比较复杂。

图27-39表示各种光的颜色对幼鱼的集鱼率。由图中可见,一般来说,绿色或青绿色光集鱼率高,红色光集鱼率低。

集鱼灯主要用白炽灯,但也可以用汞灯。集鱼效果在某个照度范围最好,比它高或比它低的照度集鱼效果都不好(在低照度时,0.1~10 lx的范围被认为效果是好的)。

香鱼、大马哈鱼、鲑鱼可以通过日照促其成熟。特别是香鱼,已经弄清楚日照时间和成熟程度的关系,实际上可以使用人工光源来调节其成熟程度。用荧光灯使水面照度保持50 lx,每日照射16小时效果最好。对大马哈鱼、鲑鱼等虽然进行了各种试验,但还没有明确的结果。

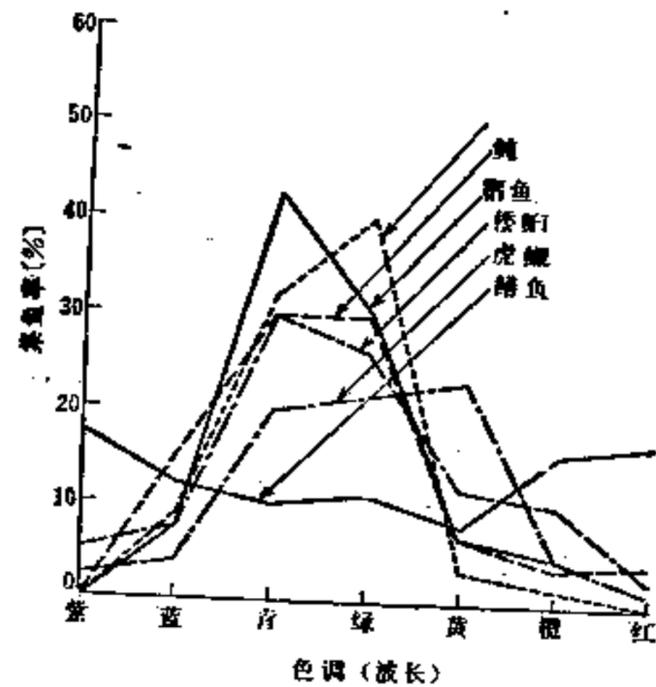


图27-39 各种光色光源对海产幼鱼的集鱼率(水面照度50 lx)

(2) 昆虫和辐射^{[84], [85]} 昆虫的视力如图 27-35 ⑤所示, 在紫外域具有最大的灵敏度。使用波长特性近似这种特性的辐射源就能够引诱昆虫。可以利用诱蛾灯作为捕虫器。主要在夜间活动的昆虫中, 吸食果汁的桃褐斑夜蛾在 2 lx 以上的照度时, 其视觉器官进入明适应从而抑制其吸汁活动。

利用昆虫的忌光性, 用黄色荧光灯能得到最好的效果。把诱虫性好的光源和诱虫性不好的光源组合起来, 就可以控制昆虫的活动。表 27-16 表示各种光源诱虫的程度。

表 27-16 各种光源的诱虫性的比例 (同样光通时)

光源	以白炽灯作为标准的诱虫性比例
低压钠灯(NX)	0.04
黄色荧光灯(FL-YF)	0.08
高压钠灯(NH)	0.35
防虫用荧光灯	0.49
防止紫外线荧光灯(FL-NU)	0.89
白炽灯	1.00
白色荧光灯(FL-W)	1.13
高显色性荧光灯(FL-EDL)	1.19
金属卤化物灯(MF)	1.35
荧光汞灯(HF-X)	1.87

(3) 家畜和辐射^[86]

(a) 家畜和紫外线 关于家畜的饲养, 用杀菌线照射以保持环境卫生, 用健康线照射以增进健康, 对于鸡、猪、牛的饲养来说, 效果很好。

(b) 家畜和光 已经知道对于鸡、山羊等可以通过延长白天的时间以刺激其性成熟。对于鸡, 采取人工光刺激的方法, 为了缩短产卵鸡的初产龄, 用照明的方法把白天的时间延长到 14 小时。对于成熟的鸡, 通过照明的方法延长其摄食时间以缩短停卵期。为了容易控制这些饲养环境, 用无窗鸡舍进行饲养的方法已经实用化。

对于鸡、猪、牛等的幼畜时期, 为了维护体温必须有暖房, 由于红外线灯操纵方便, 对火灾来说又具有安全性等原因而得到广泛采用。

27-5-5 食品工业和辐射利用^{[88], [89]}

作为辐射的直接应用, 在牡蛎、海螺等供直接食用的水产品的净化中, 使用经杀菌线处理过的水来洗净这些水产品的的方法已经实用化。除此之外, 在食品加工处理工序, 可以使用杀菌线来使环境清洁。

27-5-6 辐射在水产业中的应用

在水产养殖业中, 作为饲料的植物性浮游生物的养殖和鲍鱼种苗的栽培、海带种苗的栽培、紫菜的养殖等方面, 已经利用辐射来使光环境清洁。

在作为水产品的加工品(沙丁鱼幼鱼干)的人工干燥过程中, 由于用消费电力为 500 瓦·小时/平方米强度的青色光照射可以得到高质量的制品, 这个方法已经实用化。表 27-17 表示辐射在动物、水产物上的应用。

表27-17 辐射在动物、水产物上的应用

对象	辐射源		内容	
	灯泡	设施		
家禽	照明	Ld	40W/15m ²	必须4lx以上, 5~10lx最合适
		FL-WW	20W/20m ²	延长摄饵时间, 促进性的成熟, 每日14~16小时
	杀菌	GL	15W/20~30m ²	防病, 提高孵卵率, 减少臭气
	保健	FL-E	20W/25m ²	增进健康, 降低得病率
	保温	IR	250W/3.3m ²	饲养的数量直到100只, 由于保温、干燥, 疾病减少
猪	杀菌	GL	15W/20m ²	降低得病率(20%→6%), 减少臭气
	保温	IR	200W×2/1个小屋	防止压死仔猪, 促进生长
牛	杀菌	GL	15W/4头	防病、减少臭气
	保健	FL-E	20W/4~6头	维持采奶量, 每日照射6小时
昆虫	诱虫	FL-BLB	20W/5公顷	引诱向光性昆虫捕杀之
	驱虫	FL-YF	20W/200m ²	在2lx以上时, 可抑制吸汁夜虫的活动
鱼类	集鱼	Ld	1~200kVA/艘	聚集向光性鱼类, 用鱼网, 可增加捕获量
		HF		
	养鱼	FL-D		通过夜间照射引诱微生物, 增加摄饵量
	调节成熟期	Ld FL-D Ld		控制香鱼的成熟期(100lx) 控制大马哈鱼、鲑鱼的产卵
水产物	杀菌	GL	40W×2/0.4m ²	牡蛎等贝类、生息水的净化
	鲍鱼硅藻的栽培	FL		2000lx有效果
	海带种苗的栽培	FL	40W×2/5m ²	2000lx有效果
		FL-PG		
	紫菜的养殖	Ld		3000lx以上固着在宿主上
沙丁鱼幼鱼的加工	M		用0.05W·h/cm ² 的照射量, 加工质量提高	

注: FL-WW: 温白色荧光灯
 FL-E: 健康线荧光灯
 GL: 杀菌灯
 FL-BLB: 黑光蓝荧光灯
 FL-BA: 捕虫用荧光灯
 FL-PG: 植物生长用荧光灯
 FL-YF: 纯黄色荧光灯
 FL-D: 日光色荧光灯
 FL: 荧光灯
 HF: 汞灯
 M: 金属卤化物灯
 Ld: 白炽灯 IR: 红外线灯

27-6 工业和辐射

27-6-1 辐射在工业上的应用〔91〕,〔92〕

辐射在工业(复印工业除外)上的应用形式大致上可以分为把辐射作为能源的应用和把辐射作为信号和情报(或传递情报的手段)的应用两个方面。就前者来说,有把辐射用作化学反应的能源(光化学),或者把辐射变换成热能,再用这种热能使水分和溶剂蒸发或进行热化学反应或熔解;就后者来说,有所谓光通讯、火灾预报、利用红外线的工业计量等(见表27-18)。

辐射的能量随波长而异,如表27-19所示,波长越短能量越大,越是短波长的辐射对化学反应的贡献就越大。因此,在进行光化学反应的场合,大多数利用紫外线。

表27-18

辐射在工业、家庭上的应用 (复印工业除外)

分 类	内 容 (应用举例)	合 适 的 辐 射 源		
能 量 利 用	光合成 光附加	己内脂羊油内脂的光合成 六氯化苯的光附加合成	汞灯 金属卤化物灯	
	光硬化	涂料的硬化(紫外·红外) 电子零件(PC板)的加工	汞灯 黑光荧光灯	
	光分解	涂料的褪色试验 光劣化试验	碳弧灯 汞灯, 加农灯	
	热硬化	塑料的热硬化	红外线灯, 远红外线灯	
	加 热	涂料的干燥, 木材、纸等的干燥, 塑料的热软化	红外线灯, 远红外线灯	
	加 工	软纤料的熔化 激光加工	卤钨灯 激光	
	家 庭	暖 房 加 热 保 温	电被炉、电暖炉 电炉 干燥机、吹风机	红外线灯 石英管加热器 镍铬丝加热器
		烹 调	烤面包炉	石英管加热器, 镍铬丝加热器
	计 量 情 报 处 理	情报处理	光通讯, 传真, 光情报处理(光记录), 红外线照相机	红外线灯, 特殊荧光灯, 白炽灯
		探 测	火灾预报, 防盗	白炽灯
测定·分析		温度测定(辐射温度计) 红外光谱分析	白炽灯, 特殊加热器 镍铬丝加热器	

表27-19

辐 射 的 能 量

波 长(nm)	光 谱 区 域	爱因斯坦能量(kcal)	能 量(eV)
100000	长波红外线	0.286	0.01
10000	红外线	2.86	0.12
1000	近红外线	28.6	1.24
800	可见光谱的界限	35.7	1.55
700	红	40.9	1.77
600	黄	47.6	2.07
500	青	56.9	2.48
400	可见光谱的界限	71.5	3.10
300	紫外线	95.3	4.14
200	紫外线	143.0	6.20
100	紫外线	286.0	12.40
1	X线	2.86×10^4	1240
0.1	X线	2.86×10^5	12400
0.01	Y线	2.86×10^6	124000
0.001	Y线	2.86×10^7	1.24×10^5

另一方面,在先转变为热能再加以利用的场合,由于被照射物体的吸收特性和其他理由,主要利用红外线。

27-6-2 光化学〔93〕~〔95〕

光化学是通过辐射得到必要的能量的化学反应,植物的光合作用等也包括在这一类中,但在本节主要叙述在工业上已经实用化的一类。光化学反应可以根据反应的程序进一步分为光合成、光附加、光分解、光聚合(光硬化)等类。

光合成的代表性例子有己内脂羊油内脂的合成。这是在环己烷中一边通入氯化亚硝酰和氯化氢的混合气体,一边用光照射而合成己内脂羊油内脂的,所需要的波长是330~600nm。合成的己内脂羊油内脂被利用作为尼龙-6的原料〔96〕~〔98〕。

光硬化反应由于光硬化性的合成树脂涂料的研究而迅速普及和实用化。这是1968年德国人研究出来的,已经广泛应用于家俱、乐器、木屑板的填料和纸、薄板等的木纹印刷、漆器等的外装。如用光照射涂料,则其主要成分一不饱和合成树脂一就变成反应性比较大的根,它们发生相互聚合而变硬。

这个反应时间大约30秒~1分钟,与以前的溶剂蒸发型涂料比较,硬化时间显著缩短。而且,在硬化过程中由于溶剂(大多数是有机溶剂)的蒸发等而污染环境的问题也就不存在。因此,自动搬运式的涂装、硬化作业成为可能,涂装作业的合理化程度也大大提高。

合成树脂的吸收波长域在330~400nm的近紫外区到短波可见区,光源可以使用高压汞灯和黑光荧光灯等〔99〕~〔103〕。

除了上面所说的以外,光化学也被应用于光劣化试验中,这是通过了解有机物的光分解强度来研究其耐候性的〔104〕~〔106〕。

关于光化学反应的工业化所存在的问题是其经济性。其一是因为在反应系统中的辐射吸收而使能量损失很大,因此反应部分必须是二维的平面,这样与热化学反应装置相比,一定产量所需要的面积变大,初期设备费就高;其二是直到目前为止,合适的人工辐射源的效率(辐射能量与输入电能之比)不一定好,运行费用也就比较高。因此,现在的实用化设备为了提高其经济性,采用了液浸型以提高光的利用率和加大光源的功率以及研制新光源等办法〔107〕~〔110〕。

27-6-3 辐射加热

能量较大的波长域的辐射如前所述有助于化学反应的进行,但即使对化学反应没有贡献,辐射也会被物质所吸收,最后变成热能而使该物质的温度上升,从而进行热化学反应,或者使其发生物理的变化(例如溶解或气化),这个过程在工业上得到了应用。特别是红外线能量低,大多数物质的红外线吸收率都比较大,而且红外线比别的波长域更能进入物质的内部,所以广泛地用于物质的加热。因而也有人把红外线称为热线〔4〕,〔111〕,〔112〕。

对于加热来说,除了有辐射(红外线)加热之外,还有利用传导加热和利用对流加热的,把这些方法归纳起来进行比较就如表27-20所示。

辐射加热,正如前节所述,由于存在效率和被照射物体必须有二维的平面等问题,这种加热方法有时就不如别的加热方法优越。因此,在实施时必须经常比较、研究各方法的优缺点,选择最合适的方法〔113〕。

应用辐射加热的典型例子有溶剂蒸发型的涂料干燥〔114〕~〔116〕和木材、纸的干燥〔117〕,被炉和电炉等的暖房。其中电气被炉是日本应用红外线灯的代表性的例子,已经

表27-20 加热的种类和特点

	内 容	特 点	注 意 事 项
传导	热在媒质中接连不断地传播而使之加热的方式	直到物体(媒质)的内部都有可能加热	热的传播迟缓。没有接触(联系)就不能加热
对流	由于被加热的有可能移动的媒质的移动而加热的方式	容易控制热的移动	必须是气体、液体等媒质。给物体传热靠传导
辐射	由于电磁波形式的能量被物体所吸收而变成热能使物体加热的方式	能量的供给开始早, 容易控制能量的供给量	受被加热物体的吸收特性的影响。给物体内部的传热靠传导

普及[118]。

27-6-4 辐射在情报处理方面的应用

复印机曝光用的光源对近代社会的情报的圆满传递和迅速处理来说是极大的帮助, 因而得到广泛的利用, 此外, 在复印电传装置和光学符号阅读器等情报处理机器中也已经用各种光源作为曝光用光源。其中, 像在复印电传装置中用特殊荧光灯和在光学符号阅读器中用小型高亮度卤钨灯那样, 由于新光源的研制, 机器的性能也得到提高。

27-7 辐射在工业计量检测方面的应用

辐射在计测方面的应用范围很广, 不可能全部罗列出来, 只举几个有代表性的例子。

(1) **温度测定** (光学高温计) 通过测量从可以当作热辐射体的高温物体来的辐射, 进而求出该物体的温度的方法以前就使用过。例如, 从测量波长 $0.65\mu\text{m}$ 的单色辐射求出物体的亮度温度再推断其真温度的方法已被广泛采用。近年来也已经能够从测量红外辐射来测定接近常温的物体的温度了[119]。而且还经常使用从两个波长的辐射温度之比求分布温度(色温度)再推断出真温度的方法。

(2) **大气污染的测定**[120], [121] 让大功率的激光在大气中辐射, 再从其雷达反射波测定大气中的分子散射的程度, 进而测定大气污染的程度的方法最近被经常采用。而且还试验过用这种方法来监视海洋的污染[121]。

(3) **在探测、监视方面的应用**[122] 古时候就使用过利用红外线辐射来对付入侵者的警报装置。最近, 已经利用红外线来探测早期火灾引起的烟而进行预报。以前就使用过红外线照相来探测夜间或烟雾中的远方物体, 最近, 通过把这个方法和由辐射测定温度的方法结合在一起的遥感器来识别物体。

(4) **在武器上的应用** 根据从目标发出的红外线或用红外线照射目标后的反射来进行瞄准的兵器在第二次世界大战中已经出现, 最近, 由于检出器的进步和激光的研制, 使得根据导弹等发出的红外线来进行自动导引的方法得到了广泛的应用, 命中率极高。

(5) **分析仪器**[123] 光谱分析对于了解物质的构造来说是有效的方法, 因此, 能够测量从紫外到红外波长域内物质的光谱吸收的分析仪器已经得到广泛使用。

(6) **其他** 用紫外线照射其表面附着有荧光粉的物体使之发光, 从而研究其表面的损伤情况的荧光探伤方法在工业上得到了广泛的应用, 还可以根据紫外线照射产生荧光的原理来进行公安侦破工作。

参 考 文 献

- (1) たとえば菊地真一: 写真化学, 共立出版 (1961)
- (2) 中川靖夫: 照学誌, 61-1 (1977) 40
- (3) 紫外線測定器専門委員会報告: 照学誌, 58-11 (1974) 627
- (4) たとえば H. L. Hackforth, 和田他訳: 赤外線工学, 近代科学社 (1963)
- (5) 渡会吉昭: 太陽光及び人工光源の紫外部と赤外部の放射特性, 照学会放射の応用・関連計測委員会資料 AR-77-2 (1977)
- (6) 鈴木 守: 照学誌, 57-4 (1973) 249
- (7) 紫外線測定器専門委員会報告: 照学誌, 57-4 (1973) 196
- (8) 鈴木 守, 他: シリコニット空洞放射体を用いた赤外線標準放射源, 照学会放射の応用研究会資料 AR-76-5 (1976)
- (9) 井上英一: 電子写真学会特別講演予稿集 (1969) 1
- (10) 菊地真一, 他: 電気と光の化学 (6版), 大日本図書 (1960)
- (11) 山岡重夫: 色材協会誌, 48, 5 (1975) 315
- (12) 奥山 滋, 他: 印刷技術一般 (改訂19版), 産業図書 (1976)
- (13) 宮川俊夫: カラー写真の原理と実際, 写真工業出版 (1969)
- (14) 照明学会編: 照明デザインガイド (3版), 照明学会照明普及会 (1959)
- (15) 河本康太郎: 照学誌, 57-4 (1973) 53
- (16) 中川靖夫: 日写誌, 28-8 (1962) 231
- (17) 角田隆弘: 照学会放射の応用・関連計測研究委員会資料 AR-76-1 (1976) 1
- (18) 奥田卓巳, 他: 印刷一般 (改訂第1版), 印刷学会出版部 (1971)
- (19) 田村秋雄: 電学誌, 93, 12 (1973) 1125
- (20) 片岡啓介: 初等 IC 教科書, オーム社 (1972)
- (21) 押田勇雄: エネルギーの話, 講談社 (1964)
- (22) 小堀辰治, 他: 光と皮膚, 金原出版 (1973)
- (23) G. E. Fogg, 紫田和夫訳: 光合成, 共立出版 (1970)
- (24) J. Jaggar, 武部 啓訳, 紫外線光生物学, 共立出版 (1969)
- (25) 東 堯, 白石啓文, 河本康太郎: 東芝レビュー, 26-6, 7, 8, (1971)
- (26) 瀬谷正男, 波岡 武: 光と生体, 共立出版 (1972)
- (27) E. D. Bickford, S. Dunn: Lighting for Plant Growth, the Kent State University Press (1972)
- (28) 東 堯, 河本康太郎, 他: 生物産業への放射の応用, 照明教室 No. 34, 照明普及会 (1913)
- (29) 宮本悦郎, 東 堯, 河本康太郎, 他: 田園社会工学, 東明社 (1974)
- (30) M. Luckiesh: Application of Germicidal, Erythemat and Infrared Energy (1946)
- (31) 東 堯, 白石啓文: 東芝レビュー, 11-9 (1956) 1019
- (32) 河本康太郎: 紫外線による空気殺菌法とその効果, 食品工業 (1970) 33
- (33) 河本康太郎: New Food Industry, 18-7 (1976) 17
- (34) M. Luckiesh, A. H. Taylor: GE Review, 42-6 (1939) 274
- (35) R. S. Sheetz: Sunlight from Electricity, Westinghouse Engineer (1949) 170
- (36) 森岡貞雄: 日本美容医学研究会誌 (1966) 29
- (37) 水野信行: からだの科学, 16 (1967) 20
- (38) M. Luckiesh, L. L. Holladay, A. H. Taylor: J. Opt. Soc. Amer., 20-8 (1930) 423
- (39) M. A. Everett, R. L. Olsen, R. M. Sayer: Arch. Dermat., 92-12 (1965) 713
- (40) 大川原徳介: 日本皮膚科学会誌, 84-9 (1974) 443
- (41) 清寺 真: からだの科学, 16 (1967) 65
- (42) K. A. Hasselbalsch: Chemische und Biologische Wirkung der Lichtstrahlen (1913)
- (43) 杉 晴三郎: 光と熱の健康読本, 大興出版 (1976)
- (44) 水野信行, 鈴木和幸, 中山靖久, 河本康太郎: 光線過敏症を診断するための照射装置の特性, 第4回照明学会全国大会 (1971)
- (45) 水野信行, 生駒元彦, 森川藤風, 河本康太郎: 日本皮膚科学会誌, 82-9 (1972) 779
- (46) 水野信行, 河本康太郎ほか: 皮膚, 18-1 (1976)
- (47) 東 忠利, 小原草男, 河本康太郎: 照学誌, 60-1 (1976) 12
- (48) T. B. Fitzpatrick, et al.: Sunlight and Man, University of Tokyo Press (1974)
- (49) 小机弘之: 照学誌, 61-1 (1977) 37
- (50) 水野信行, 他: 掌腫膿疱症の β -Methoxypsolaren の光療法, 86-10 (1976) 688
- (51) 馬場一雄: 日本新生児学会雑誌, 6-4 (1970) 254
- (52) 小川次郎: 周産期医学, 3-7 (1973) 627
- (53) W. L. Wanmaker, et al.: Lighting Research Technology, 7-1 (1975) 19
- (54) G. Meyer-Schwickerath: Lichtkoagulation, Bücherei des Augenarztes, 33, Heft, Ferdinand Enke Verlag (1959)
- (55) 関 亮: 紫外線, 赤外線の眼に対する作用効果と安全性, 放射の応用・関連計測研究委員会資料, AR-77-5 (1977)
- (56) 中山靖久: 紫外線, 赤外線の皮膚に対する作用効果と安全性, 放射の応用・関連計測研究委員会資料, AR-77-6 (1977)
- (57) JIS Z 8812-1970: 有害紫外線の測定方法 (1970)
- (58) 山地良一: 照学誌, 57-4 (1973) 218
- (59) R. G. Freeman, D. W. Owens, J. M. Knox, H. T. Hudson: Relative Energy Requirements for an Erythemat Response of Skin to Monochromatic Wave Lengths of Ultraviolet Present in the Solar Spectrum, J. Invest. Derm., 47-3 (1966) 586
- (60) 小倉良平: 日本皮膚科学会誌, 73-9 (1963) 725
- (61) J. D. ラトクレフ: セイフティ・ダイジェスト, 19-5 (1973) 185
- (62) 小倉良平: 臨床皮膚 (1968) 735
- (63) 志賀四郎: 日本および諸外国の放射に対する安全基準, 放射の応用・関連計測研究委員会資料, AR-77-1 (1977)
- (64) 黒岩 矣, 老門泰三: レーザーの安全基準について, 放射の応用・関連計測研究委員会資料, AR-77-3 (1977)
- (65) 比企新二郎, 志賀四郎訳: セイフティ・ダイジェスト, 19-1 (1973) 445

- (66) 東 亮: 労働衛生, 10-3 (1974) 29
 (67) JIS T 8141: L_e光保護具 (1970)
 (68) 照明学会: 照明のデータブック, オーム社 (1968)
 (69) 照明学会: 生物産業への放射の応用, 照明教室, 34 (1973)
 (70) J. E. Kaufman: IES Lighting Hand Book, 5th ed.
 (71) 文献 (27).
 (72) 養原善和: 照学誌, 53-3 (1969) 76
 (73) 森田政明: 光学, 4, 2 (1975) 14
 (74) 相見重三: 照学誌, 53-3 (1969) 81
 (75) 岩波洋造: 光合成の世界, 講談社 (1970)
 (76) 卜蔵建治: 照学誌, 53-3 (1969) 90
 (77) 矢吹万寿: 野菜に対する炭酸ガス施肥について, 農業電化普及技術研究会 (1976)
 (78) 生物環境調節学会: 生物環境調節ハンドブック, 東京大学出版会 (1973)
 (79) 養原善和: 農業における放射の応用とその実際, 照明学会放射の応用・関連計測研究委員会資料, AR-76-4 (1976)
 (80) 有木邦太郎, 他: 照学誌, 53-3 (1969) 124
 (81) 三次信輔: 集魚灯ガイド, 東海区水産研究所, さかな, 第7号別刷 (1971)
 (82) 川本信乃: 魚類生理生態学, 恒星社厚生閣 (1972)
 (83) 野村 稔: 照学誌, 53-3 (1969) 102
 (84) 小山長雄: 照学誌, 53-3 (1969) 94
 (85) 野村健一, 他: 照学誌, 53-3 (1969) 114
 (86) 森田政明: 第22回光学四学会連合講演会資料 (1976)
 (87) 矢野弘明, 他: 照学誌, 53-3 (1969) 98
 (88) 河本康太郎: 昭51電気四学会連大, 98 (1976) 2-173
 (89) 河端俊治: 照学誌, 53-3 (1969) 128
 (90) 大房 剛: 照学誌, 53-3 (1969) 143
 (91) 河本康太郎: 第5回産業計測標準委員会照明部会講演会予稿 (1972) 16
 (92) 太田垣芳男: 照学誌, 61-1 (1977) 10
 (93) 小泉正夫: 志田正二: 光化学, 岩波書店 (1956)
 (94) J. G. Calvert, J. N. Pitts: Photochemistry, Wiley (1966)
 (95) 齋地真一, 浜野裕司: 光化学, ココナ社 (1970)
 (96) 伊藤昌寿: 化学と工業, 18-8 (1965) 1066
 (97) 西海英雄: ケミカルエンジニアリング, 9 (1972) 97
 (98) 小林良生: 石油化学誌, 17-12 (1974) 1063
 (99) 小谷勝彦: 塗装技術, 10-8 (1971) 262
 (100) 岩尾 実: 塗装技術, 10-8 (1971) 253
 (101) 中村 進: 塗装技術, 11-11 (1972) 48
 (102) 玉井新三: 塗装技術, 11-11 (1972) 56
 (103) 長門 隆: 塗装技術, 11-11 (1972) 60
 (104) 加藤政雄: ビニルケトン共重合成分として含有するポリマの光劣化性, 技振協講演会 (1975)
 (105) 峰松陽一: 照学誌, 61-1 (1977) 28
 (106) 斎藤治一: 照学誌, 61-1 (1977) 33
 (107) 森田政明: 照学誌, 61-1 (1977) 4
 (108) 染谷 彰, 花田徳三, 光行陽一郎: 東芝レビュー, 26-9 (1971) 1103
 (109) 空閑圭介: 照学誌, 61-1 (1977) 14~20
 (110) 三上龍夫, 川名 昇: 照学誌, 61-1 (1977) 53
 (111) 斎藤長弥: 電設工業, 7 (1970) 97
 (112) E. K. Plyler, D. J. C. Yates, H. A. Gebbie: J. Opt. Soc. Amer., 52-8 (1962) 859
 (113) 東京芝浦電気(株)編: 電動力・電熱・電解設備の設計と運転, 最新自家用電気技術講座第4巻, 電気書院 (1975)
 (114) 大江健男, 下川貞二, 河本康太郎ほか: 東芝レビュー, 29-8 (1974) 738
 (115) 河本康太郎, 渡辺行雄, 大江健男: 塗装と塗料, 新年特別号 (1974) 107
 (116) 細川修克: 塗装技術, 10-10 (1971) 79
 (117) 渡久崇啓: 木材の乾燥, 森北出版 (1961)
 (118) 東芝技術資料: 赤外線電球およびその応用 (1971)
 (119) 白石啓文: 照学誌, 55-8 (1971) 496
 (120) たとえば宇田新太郎: レーザと光通信, 丸善 (1973) 207
 (121) 角井ほか: 油濁監視レーザーレーダのエコースペクトルの高速検出と処理システム, 昭52年照明学会全国大会, 75
 (122) 鳥田, 入口: 照学誌, 58-4 (1974) 179
 (123) 堀口 博: 赤外吸光図説総覧, 三共出版 (1973)

第 28 章

数学公式和数表

28-1 数 学 公 式

28-1-1 行列和行列式

(1) 行列的定义、性质和演算

◎ m 行 n 列的行列 A

$$A = (a_{mn}) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

a_{ij} 称 i 行 j 列的行列式元素。

◎ 相等条件, 当 $a_{ij} = b_{ij}$ 时, $A = B$ 。

◎ 加法, 当 $c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$ 时, $C = A + B$ 。

◎ 乘法, 当 $c_{ij} = \sum_k a_{ik} b_{kj}$ 时, $C = AB \neq BA$ 。

○ 积的分解

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{13} & z_{14} & z_{15} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{23} & z_{24} & z_{25} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{31} & z_{32} & \cdots & z_{33} & z_{34} & z_{35} \\ z_{41} & z_{42} & \cdots & z_{43} & z_{44} & z_{45} \\ z_{51} & z_{52} & \cdots & z_{53} & z_{54} & z_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix}$$

这一行列式可按需要用上例虚线分区的方法可分解为以下两部分:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} z_{13} & z_{14} & z_{15} \\ z_{23} & z_{24} & z_{25} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{31} & z_{32} \\ z_{41} & z_{42} \\ z_{51} & z_{52} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} z_{33} & z_{34} & z_{35} \\ z_{43} & z_{44} & z_{45} \\ z_{53} & z_{54} & z_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix}$$

(2) 行列式的展开

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} = \sum_{j=1}^n a_{ij} D_{ij} = \sum_{i=1}^n a_{ij} D_{ij}$$

$D_{ij}(-1)^{i+j}$ × (按原式除以 i 行 j 列的小行列式) D_{ij} 称 a_{ij} 的余因子。

◎由行列式 $\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{r1} & \cdots & a_{rn} \end{pmatrix}$ 建立 $\rho = \binom{n}{r}$ 个小行列式, 若以 M_1, M_2, \cdots, M_ρ 表示, 则 $D =$

$$\sum_{i=1}^{\rho} M_i M_i^* \text{。其中 } M_i^* \text{ 是 } M_i \text{ 的余因子。}$$

28-1-2 矢量

(1) 标量积 (内积)

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \equiv \mathbf{AB} \equiv (\mathbf{A}, \mathbf{B}) = AB \cos \widehat{\mathbf{AB}} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$$

若 $\mathbf{A} \perp \mathbf{B}$ 则 $(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = 0$

(2) 矢量积 (外积)

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} \equiv [\mathbf{A}, \mathbf{B}] = -\mathbf{B} \times \mathbf{A} = -[\mathbf{B}, \mathbf{A}]$$

$$= (A_y B_z - A_z B_y) \mathbf{i} + (A_z B_x - A_x B_z) \mathbf{j} + (A_x B_y - A_y B_x) \mathbf{k}$$

$$= \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

$$|\mathbf{A} \times \mathbf{B}| = AB \sin \widehat{\mathbf{AB}}$$

若 $\mathbf{A} \parallel \mathbf{B}$ 则 $[\mathbf{A}, \mathbf{B}] = 0$

(3) 三重积

$$\textcircled{\bullet} [\mathbf{ABC}] \equiv \mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) \equiv \mathbf{B} \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{A}) \equiv \mathbf{C} \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B})$$

$$= \begin{vmatrix} A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \\ C_x & C_y & C_z \end{vmatrix}$$

= 以 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 为三个棱边的平行六面体的体积。这个量也称为标量三重积。

◎ $\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C}$ 则称为矢量三重积。另外还有以下关系。

$$\textcircled{\bullet} (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{D}) = \mathbf{A} \cdot \{\mathbf{B} \times (\mathbf{C} \times \mathbf{D})\} = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})(\mathbf{B} \cdot \mathbf{D}) - (\mathbf{B} \cdot \mathbf{C})(\mathbf{A} \cdot \mathbf{D})$$

$$\textcircled{\bullet} (\mathbf{A} \times \mathbf{B})^2 = A^2 B^2 - (\mathbf{AB})^2$$

$$\textcircled{\bullet} \mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) + \mathbf{B} \times (\mathbf{C} \times \mathbf{A}) + \mathbf{C} \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\textcircled{\bullet} [\mathbf{ABC}] \cdot \mathbf{D} = [\mathbf{BCD}]\mathbf{A} + [\mathbf{ACD}]\mathbf{B} + [\mathbf{ABD}]\mathbf{C}$$

$$\textcircled{\bullet} [\mathbf{ABC}][\mathbf{EFG}] = \begin{vmatrix} \mathbf{A} \cdot \mathbf{E} & \mathbf{A} \cdot \mathbf{F} & \mathbf{A} \cdot \mathbf{G} \\ \mathbf{B} \cdot \mathbf{E} & \mathbf{B} \cdot \mathbf{F} & \mathbf{B} \cdot \mathbf{G} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{E} & \mathbf{C} \cdot \mathbf{F} & \mathbf{C} \cdot \mathbf{G} \end{vmatrix}$$

(4) 梯度

$$\text{grad } \varphi = \nabla \varphi$$

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

(5) 散度

$$\text{div } \mathbf{A} = \nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$\text{div } \mathbf{A} = 0$ 作为起始条件。

(6) 旋度

$$\text{rot}A = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$$

$\text{rot}A = 0$ 作为无涡条件。

(7) 其他的公式

◎ $\text{rot}\nabla\varphi = 0$ ◎ $\text{div rot}A = 0$

◎ $\text{rot rot}A = \nabla\text{div}A - \nabla^2 A$

◎ $\text{div grad}\varphi = \nabla^2\varphi \equiv \Delta\varphi$

28-1-3 常微分方程式 (表28-1, 表28-2)

表28-1 一阶微分方程和一般解 ($P = dy/dx$, C : 积分常数) [1], [5]

形式	方程	一般解
变数分离型	$P = \frac{f(x)}{g(y)}$	$\int g(y)dy = \int f(x)dx + C$
齐次型	$P = f\left(\frac{y}{x}\right)$	$x = C \exp\left\{\int \frac{dv}{f(v) - v}\right\}$ 据 $y = vx$ 消去 v
	$\frac{y}{x} = f(P)$	$x = C \exp\left\{\int \frac{f'(P)}{f(P) - P} dP\right\}$ 据 $y = f(P)x$ 消去 P
线性型	$P + P(x)y = Q(x)$	$y = e^{-\int P(x)dx} \left\{ Q(x) e^{\int P(x)dx} dx + C \right\}$
伯努利型	$P + P(x)y = Q(x)y^{1-n}$	$y^n = ne^{-n\int P(x)dx} \left\{ Q(x) e^{n\int P(x)dx} dx + C \right\}$
没有 x, y 型	$F(P) = 0$	用 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ 根, 就 P 求解得 $y = \alpha_1 x + C_1, y = \alpha_2 x + C_2, \dots$ 等
没有 x 型	$P = f(y)$	$x = \int \frac{dy}{f(y)} + C$
	$y = f(P)$	$x = \int \frac{f'(P)}{P} dP$, 据 $y = f(P)$ 消去 P
	$y = f(u), P = g(u)$	$x = \int \frac{f(u)}{g(u)} du + C$, 据 $y = f(u)$ 消去 u
没有 y 型	$P = f(x)$	$y = \int f(x)dx + C$
	$x = f(P)$	$y = \int P f'(P) dP + C$, 据 $x = f(P)$ 消去 P
就 x 可解型	$x = f(y, P)$	$1 = \frac{\partial f}{\partial y} \cdot P + \frac{\partial f}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial y}$ 的解 据 $\phi(y, P, C) = 0$ 和 $x = f(y, P)$ 消去 P
就 y 可解型	$y = f(x, P)$	$P = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial x}$ 解 据 $\phi(x, P, C) = 0$ 和 $y = f(x, P)$ 消去 P

表28-2

二阶常微分方程和一般解^{(1), (5)}

方 程 式	一 般 解
$\frac{d^2 y}{dx^2} = f(x)$	$y = \int dx \int f(x) dx + C_1 x + C_2$
$\frac{d^2 y}{dx^2} = f(y)$	$x = \pm \int \frac{dy}{\sqrt{C_1 + 2 \int f(y) dy}} + C_2$
$\frac{d^2 y}{dx^2} = f(p)$	$x = \int \frac{dp}{f(p)} + C_1, y = \int \frac{p dp}{f(p)} + C_2$ y式要消去p
$\frac{d^2 y}{dx^2} + k^2 y = 0$	当 $y = A \cos kx + B \sin kx$ 时, $y = Ce^{ikx} + De^{-ikx}$
$\frac{d^2 y}{dx^2} + k^2 y = a$	$y = A \cos kx + B \sin kx + \frac{a}{k^2}$
$\frac{d^2 y}{dx^2} + k^2 y = a \cos nx + b \sin nx$	$y = A \cos kx + B \sin kx + \frac{1}{k^2 - n^2} (a \cos nx + b \sin nx), (k \neq n)$ $y = A \cos kx + B \sin kx + \frac{x}{2k} (a \sin kx - b \cos kx), (k = n)$
$\frac{d^2 y}{dx^2} - k^2 y = 0$	当 $y = A \cosh kx + B \sinh kx$ 时, $y = Ce^{kx} + De^{-kx}$

28-1-4 积分方程式

(1) Fredholm 第1积分方程

$$\int_a^b K(x, y) \varphi(y) dy = f(x)$$

(2) Volterra 第1积分方程

$$\int_a^x K(x, y) \varphi(y) dy = f(x)$$

(3) Fredholm 第2积分方程

$$\varphi(x) - \lambda \int_a^b K(x, y) \varphi(y) dy = f(x)$$

(4) Volterra 第2积分方程

$$\varphi(x) - \lambda \int_a^x K(x, y) \varphi(y) dy = f(x)$$

(5) Fredholm 第3积分方程

$$A(x) \varphi(x) - \lambda \int_a^b K(x, y) \varphi(y) dy = f(x)$$

(6) Volterra 第3积分方程

$$A(x) \varphi(x) - \lambda \int_a^x K(x, y) \varphi(y) dy = f(x)$$

(7) 同次积分方程式

$$\varphi(x) - \lambda \int_a^b K(x, y)\varphi(y)dy = 0$$

28-1-5 特殊函数

(1) 第1圆柱函数 (贝塞尔函数)

$$J_n(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m (z/2)^{n+2m}}{m! \Gamma(n+m+1)}$$

特例 n 为正整数时,

$$J_{-n}(z) = (-1)^n J_n(z)$$

(2) 第2圆柱函数 (诺埃曼函数)

$$N_n(z) = \frac{1}{\sin n\pi} \{ \cos n\pi J_n(z) - J_{-n}(z) \}$$

(3) 第3圆柱函数 (汉克尔函数)

$$H_n^{(1)}(z) = J_n(z) + iN_n(z)$$

$$H_n^{(2)}(z) = J_n(z) - iN_n(z)$$

(4) 贝塞尔函数的若干特性

$$J_n'(z) = J_{n-1}(z) - (n/z)J_n(z) = (n/z)J_n(z) - J_{n+1}(z)$$

$$J_n(-z) = e^{in\pi} J_n(z)$$

$$J_n(z) = \frac{2(z/2)^n}{\sqrt{\pi} \Gamma(n+1/2)} \times \int_0^{\pi/2} \cos(z \sin \varphi) \cos^{2n} \varphi d\varphi$$

(5) 第1球函数 (第1罗让德函数)

$$P_n(z) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dz^n} (z^2 - 1)^n$$

$$= \frac{(2n)!}{2^n (n!)^2} \left\{ z^n - \frac{n(n-1)}{2(2n-1)} z^{n-2} + \frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{2 \cdot 4 \cdot (2n-1)(2n-3)} z^{n-4} + \dots \right\}$$

$$= \sum_{s=0}^{\leq n^2} (-1)^s \frac{(2n-2s)!}{2^s s! (n-s)! (n-2s)!} \times z^{n-2s}$$

$$P_0(z) = 1, P_1(z) = z, P_2(z) = (3z^2 - 1)/2,$$

$$P_3(z) = (5z^3 - 3z)/2, \dots$$

(6) 第2球函数 (第2罗让德函数)

$$Q_n(z) = \frac{n!}{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n+1)} \left\{ \frac{1}{z^{n+1}} + \frac{(n+1)(n+2)}{2(2n+3)} \cdot \frac{1}{z^{n+3}} \right. \\ \left. + \frac{(n+1)(n+2)(n+3)(n+4)}{2 \cdot 4(2n+3)(2n+5)} \times \frac{1}{z^{n+5}} + \dots \right\}$$

$$(|z| > 1)$$

(7) 第1椭圆积分式

$$F(\phi, K) \equiv \int_0^{\phi} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \phi}} \quad (K^2 < 1)$$

(8) 第2椭圆积分式

$$E(\phi, K) \equiv \int_0^{\phi} \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \phi} d\phi \quad (K^2 < 1)$$

(9) 第3椭圆积分式

$$\Pi(\phi, n, k) \equiv \int_0^\phi \frac{d\phi}{(1+n\sin^2\phi)\sqrt{1-k^2\sin^2\phi}} \quad n \text{ 为负变数}$$

(10) 全椭圆积分式

在第1和第2椭圆积分式中, 把 $\phi = \frac{\pi}{2}$ 的情况作为全椭圆积分时,

(第1种)

$$K = F\left(\frac{\pi}{2}, k\right) = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 k^6 + \dots \right\}$$

(第2种)

$$E = E\left(\frac{\pi}{2}, k\right) = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \frac{k^4}{3} - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \frac{k^6}{5} - \dots \right\}$$

28-1-6 积分变换

(1) 傅立叶变换(表28-3)

表28-3 $F(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$

$f(t)$	$F(i\omega)$
$C_1 f_1(t) + C_2 f_2(t)$	$C_1 F_1(i\omega) + C_2 F_2(i\omega)$
$2\pi \cdot f_1(t)f_2(t)$	$\int_{-\infty}^{\infty} F_1(\omega - i\omega)F_2(i\omega) d\omega$
$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(t - \tau)f_2(\tau) d\tau$	$F_1(i\omega) \cdot F_2(i\omega)$
$(-it)f(t)$	$\frac{d}{d\omega} F(i\omega)$
$f'(t)$	$i\omega F(i\omega)$
$\int f(t) dt$	$\frac{1}{i\omega} F(i\omega)$
$-\frac{1}{it} f(t)$	$\int F(i\omega) d\omega$
$f(t - t_0)$	$e^{-i\omega t_0} F(i\omega)$
$e^{i\omega_0 t} f(t)$	$F(i\omega - i\omega_0)$
$f(at)$	$\frac{1}{a} F\left(i \frac{\omega}{a}\right)$

(2) 拉普拉斯变换(表28-4)

表28-4 $F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt$

$f(t)$	$F(p)$
$\frac{d}{dt} f(t)$	$pF(p) - F(0)$
$\frac{d^n}{dt^n} f(t)$	$p^n F(p) - p^{n-1} F(0) - p^{n-2} F'(0) \dots$ $- pF^{(n-2)}(0) - F^{(n-1)}(0)$

(续)

$f(t)$	$F(p)$
$t^n f(t)$	$(-1) \frac{d^n}{dp^n} F(p)$
$\int_0^t f(t) dt$	$\frac{1}{p} F(p)$
$\frac{1}{t} f(t)$	$\int_p^\infty F(p) dp$
$f(t - t_0)$	$e^{-pt_0} F(p)$
$e^{at} f(t)$	$\int_p^\infty F(p) dp$
$f(at)$	$\frac{1}{a} F\left(\frac{p}{a}\right)$

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} p F(p)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p F(p)$$

$$\int_0^\infty f(t) dt = \lim_{p \rightarrow 0} F(p)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{f(t)}{t} = \int_0^\infty F(p) dp$$

28-1-7 其他重要公式

(1) 二项式定理^[4]

$$(a+b)^n = {}_n C_0 a^n + {}_n C_1 a^{n-1} b + \dots + {}_n C_r a^{n-r} b^r + \dots + {}_n C_n b^n$$

式中

$${}_n C_r = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-r+1)}{r!}$$

(2) 关于复变三角函数的 Euler 公式^[3]

$$\sin z = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}, \quad \cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}$$

$$\tan z = \frac{1}{i} \cdot \frac{e^{2iz} - 1}{e^{2iz} + 1}$$

(3) Stirling 公式^[2] ($n \gg 1$ 时)

$$\Gamma(n+1) = n! \sim n^{(n+1)/2} e^{-n} \sqrt{2\pi}$$

$$\lg n! \sim n(\lg n - 1)$$

(4) Taylor 展开式^[1]若在 $[a, a+h]$ 区间, $f(x), f'(x), \dots, f^{(n)}(x)$ 存在时,

$$f(a+h) = f(a) + \frac{h}{1!} f'(a) + \frac{h^2}{2!} f''(a) + \dots + \frac{h^{n-1}}{(n-1)!} f^{(n-1)}(a) + R_n$$

这里, 把 R_n 看作剩余项。按 Lagrange 法则得,

$$R_n = \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(a+\theta h), \quad 0 < \theta < 1$$

(5) Euler-MacLaurin 公式^[1]

若 $f(x)$ 能在 $[a, a+h]$ 区间无限次微分时,

$$\sum_{r=0}^n f(a+rh) = \frac{1}{h} \int_a^{a+nh} f(x) dx + \frac{1}{2} \{f(a) + f(a+nh)\} + \dots$$

$$+ \sum_{r=1}^{m-1} (-1)^{r-1} \frac{B_r}{(2r)!} h^{2r-1} \{f^{(2r-1)}(a+nh) - f^{(2r-1)}(a)\} + R_m$$

$$R_m = (-1)^{m+1} \frac{B_m}{(2m)!} h^{2m} \sum_{r=0}^{n-1} f^{(2m)}\{a+h(r+\theta)\},$$

$$0 < \theta < 1$$

28-1-8 三角函数公式

$$\textcircled{1} \sin^2 A + \cos^2 A = 1, \quad 1 + \tan^2 A = \sec^2 A,$$

$$1 + \cot^2 A = \operatorname{cosec}^2 A$$

$$\textcircled{2} a \cos A + b \sin A = \sqrt{a^2 + b^2} \sin(A + \alpha) = \sqrt{a^2 + b^2} \cos(A - \beta)$$

式中

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a}{b} \right), \quad (\sin \alpha \text{ 不要选用和 } a \text{ 一样的符号})$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right), \quad (\sin \beta \text{ 不要选用和 } b \text{ 一样的符号})$$

$$\textcircled{3} \sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$$

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B$$

$$\sin(A + B + C) = \cos A \cos B \cos C (\tan A + \tan B + \tan C - \tan A \tan B \tan C)$$

$$\cos(A + B + C) = \cos A \cos B \cos C (1 - \tan B \tan C - \tan C \tan A - \tan A \tan B)$$

$$\tan(A \pm B) = \frac{\tan A \pm \tan B}{1 \mp \tan A \tan B}$$

$$\cot(A \pm B) = \frac{\cot A \cot B \mp 1}{\cot B \pm \cot A}$$

$$\textcircled{4} \sin A \pm \sin B = 2 \sin \frac{A \pm B}{2} \cos \frac{A \mp B}{2}$$

$$\cos A + \cos B = 2 \cos \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

$$\cos A - \cos B = -2 \sin \frac{A+B}{2} \sin \frac{A-B}{2}$$

$$\tan A \pm \tan B = \frac{\sin(A \pm B)}{\cos A \cos B}$$

$$\tan A \pm \cot B = \pm \frac{\cos(A \pm B)}{\cos A \sin B}$$

$$\cot A \pm \cot B = \pm \frac{\sin(A \pm B)}{\sin A \sin B}$$

$$\textcircled{5} \sin A \sin B = -\frac{1}{2} \{\cos(A+B) - \cos(A-B)\}$$

$$\cos A \sin B = \frac{1}{2} \{ \sin(A+B) - \sin(A-B) \}$$

$$\sin A \cos B = \frac{1}{2} \{ \sin(A+B) + \sin(A-B) \}$$

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \{ \cos(A+B) + \cos(A-B) \}$$

$$\textcircled{C} \quad \sin(A+B) \sin(A-B) = \sin^2 A - \sin^2 B = \cos^2 B - \cos^2 A$$

$$\sin(A+B) \cos(A-B) = \sin A \cos A + \sin B \cos B$$

$$\cos(A+B) \sin(A-B) = \sin A \cos A - \sin B \cos B$$

$$\cos(A+B) \cos(A-B) = \cos^2 A - \sin^2 B = \cos^2 B - \sin^2 A$$

$$\textcircled{C} \quad \sin \frac{A}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 - \cos A}{2}}$$

$$\cos \frac{A}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos A}{2}}$$

$$\tan \frac{A}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 - \cos A}{1 + \cos A}}$$

$$\cot \frac{A}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos A}{1 - \cos A}}$$

◎ 若 $x \ll 1$,

$$\sin x \doteq x - \frac{x^3}{6}, \quad \cos x \doteq 1 - \frac{x^2}{2}$$

$$\tan x \doteq x + \frac{x^3}{3}, \quad \sec x \doteq 1 + \frac{x^2}{2}$$

28-2 概率和统计^{[6]~[15]}

28-2-1 概率分布^[16] (表28-5)

表28-5

分布名称	定义式, 参量, 变数范围	平均和离散
超几何分布	$H(x, N, M, n) = \frac{\binom{M}{x} \binom{N-M}{n-x}}{\binom{N}{n}}$ $x = \max(0, n - N + M), \dots, \min(n, M),$ $0 \leq M \leq N, 0 \leq n \leq N$	$E(x) = n \frac{M}{N} = np$ $p = \frac{M}{N}$ $V(x) = \frac{N-n}{N-1} npq$
二项式分布	$B(x, n, p) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}$ $x = 0, 1, 2, \dots, n$ $0 \leq p \leq 1, p + q = 1$	$E(x) = np$ $V(x) = npq$
泊松分布	$P_0(x, \lambda) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}$ $x = 0, 1, 2, \dots$ $0 < \lambda < \infty$	$E(x) = \lambda$ $V(x) = \lambda$

(续)

分布名称	定义式, 参量, 变数范围	平均和离散
正态分布	$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2}$ $-\infty < x < \infty$ $-\infty < \mu < \infty, 0 < \sigma^2 < \infty$	$E(x) = \mu$ $V(x) = \sigma^2$
χ^2 分布	$f_c(X^2; v) = \frac{1}{2\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} \left(\frac{X^2}{2}\right)^{\frac{v}{2}-1} e^{-\frac{X^2}{2}}$ $0 \leq X^2 < \infty$ $v = 1, 2, 3, \dots$	$E(X^2) = v$ $V(X^2) = 2v$
t分布	$f_t(t; v) = \frac{1}{\sqrt{v} B\left(\frac{1}{2}, \frac{v}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{-\frac{1}{2}(v+1)}$ $-\infty < t < \infty$ $v = 1, 2, 3, \dots$	$E(t) = 0$ $V(t) = \frac{1}{v-2}, (v \geq 3)$
F分布	$f_F(F; v_1, v_2) = \frac{1}{B\left(\frac{v_1}{2}, \frac{v_2}{2}\right)} \times \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\frac{v_1}{2}} F^{\frac{v_1}{2}-1} \left(1 + \frac{v_1}{v_2} F\right)^{-\frac{v_1+v_2}{2}}$ $0 \leq F < \infty$ $v_1, v_2 = 1, 2, 3, \dots$	$E(F) = \frac{v_2}{v_2-2}$ $(v_2 \geq 3)$ $V(F) = \frac{2v_2^2(v_1+v_2-2)}{v_1(v_2-2)^2(v_2-4)}$ $(v_2 \geq 5)$
指数分布	$f_e(x; \lambda) = \lambda e^{-\lambda x}$ $0 \leq x < \infty$ $0 < \lambda < \infty$	$E(x) = \frac{1}{\lambda}$ $V(x) = \frac{1}{\lambda^2}$
Γ 分布	$f_G(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}$ $0 \leq x < \infty$ $0 < \alpha < \infty, 0 < \beta < \infty$	$E(x) = \frac{\alpha}{\beta}$ $V(x) = \frac{\alpha}{\beta^2}$
威布尔分布	$f_W(x; \alpha, m) = \frac{m}{\alpha} x^{m-1} e^{-\frac{x^m}{\alpha}}$ $0 \leq x < \infty$ $0 < \alpha < \infty, 0 < m < \infty$	$E(x) = \alpha^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right)$ $V(x) = \alpha^{\frac{2}{m}} \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m} + 1\right) \right\}$

28-2-2 排列和组合 [16]

(1) 排列

$${}_n P_r = \frac{n!}{(n-r)!}$$

(2) 组合

$${}_n C_r = \frac{n!}{r!(n-r)!} = \frac{{}_n P_r}{r!}$$

(3) 二项系数

$$\binom{n}{r} = \frac{n(n-1)\cdots(n-r+1)}{r!}$$

$$(x+y)^n = \sum_{r=0}^n \binom{n}{r} x^r y^{n-r}$$

n 为正整数时, $\binom{n}{r} = {}_n C_r$

(4) 二项系数的性质

$$\binom{n}{r} = \binom{n}{n-r}$$

$$\sum_{i=0}^r \binom{m}{i} \binom{n}{r-i} = \binom{m+n}{r}$$

$$\binom{n}{r} = \binom{n-1}{r} + \binom{n-1}{r-1}$$

28-2-3 总体参量和基本统计量 (表28-6)

表28-6

总 体	子 样
总体平均 $E(x) = \mu$	子样平均 $\bar{x} = (x_1 + x_2 + \cdots + x_n)/n$
总体离散 $V(x) = E\{x - E(x)\}^2$	子样离散 $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} s_{xx}$ (下同离散)
总体标准偏差 $D(x) = \sqrt{V(x)}$	子样标准偏差 $s = \sqrt{s^2}$
	范围 $R = \max x_i - \min x_i = x(n) - x(1)$
	平均偏差 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} $
总体周围的矩 $E(x^k) = \mu k'$	子样的矩 $s k' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k$
平均值周围的矩 $E(x - \mu)^k = \mu k$	平均值周围子样的矩 $s k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k$
偏度 $\sqrt{\beta_1} = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}$	子样偏度 $\sqrt{b_1} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3}$
峰度 $\beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2}$	子样峰度 $b_2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s^4}$
协方差	子样协方差
$Cov(x, y) = E\{x - E(x)\}\{y - E(y)\}$	$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n-1} S_{xy}$

总 体	子 样
<p>总体相关系数</p> $\rho_{xy} = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sqrt{V(x)V(y)}} = \frac{\text{Cov}(x, y)}{D(x)D(y)}$	<p>子样相关系数</p> $r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}$
<p>离散总离散行列</p> $V(x) = \Sigma = E\{x - E(x)\}\{x - E(x)\}'$	<p>子样离散总离散行列</p> $\frac{S}{n-1} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})'$
<p>总体相关行列</p> $R = (\text{diag} \Sigma)^{-\frac{1}{2}} \Sigma (\text{diag} \Sigma)^{-\frac{1}{2}}$	<p>子样相关行列</p> $R_x = (\text{diag} S)^{-\frac{1}{2}} S (\text{diag} S)^{-\frac{1}{2}}$

28-2-4 假设的检验 [18], [19], [20]

(1) 平均值的检验 (已知离散)

单侧检验: $\bar{x} > \mu_0 + \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} u_{\alpha}$ 或

$$\bar{x} < \mu_0 - \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} u_{\alpha}$$

双侧检验: $|\bar{x} - \mu_0| > \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} u_{\frac{\alpha}{2}}$ 时

若 $\mu = \mu_0$ 则

置信度 $(1 - \alpha)$ 的置信区如下:

$$\bar{x} - \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} u_{\frac{\alpha}{2}} < \mu < \bar{x} + \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} u_{\frac{\alpha}{2}}$$

(2) 平均值的检验 (离散未知)

单侧检验: $\bar{x} > \mu_0 + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\alpha}(n-1)$ 或

$$\bar{x} < \mu_0 - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\alpha}(n-1)$$

双侧检验: $|\bar{x} - \mu_0| > \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)$ 时

若假设 $\mu = \mu_0$ 则

置信度 $(1 - \alpha)$ 的置信区是

$$\bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) < \mu < \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)$$

(3) 二个总体的平均值的差的检验

$$\text{单侧检验: } \bar{x} - \bar{y} > \frac{s \cdot t_{\alpha}(m+n-2)}{\sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n}}} \text{ 或}$$

$$\bar{x} - \bar{y} < \frac{s \cdot t_{\frac{\alpha}{2}}(m+n-2)}{\sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n}}}$$

$$\text{双侧检验: } |\bar{x} - \bar{y}| > \frac{s \cdot t_{\frac{\alpha}{2}}(m+n-2)}{\sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n}}} \text{ 时}$$

若假设 $\mu_1 = \mu_2$ 则

置信度 $(1 - \alpha)$ 的置信区为

$$\bar{x} - \bar{y} - t_{\frac{\alpha}{2}}(m+n-2) \sqrt{\frac{m+n}{mn}} s < \mu_1$$

$$-\mu_2 < \bar{x} - \bar{y} + t_{\frac{\alpha}{2}}(m+n-2) \sqrt{\frac{m+n}{mn}} s$$

(4) 二个总体平均差的检验 (离散不同时)

$$\text{双侧检验: } |\bar{x} - \bar{y}| > t_{\frac{\alpha}{2}}(v) \sqrt{\frac{s_x^2}{m} + \frac{s_y^2}{n}} \text{ 时}$$

若假设 $\mu_1 = \mu_2$ 则

$$\frac{\left(\frac{s_x^2}{m} + \frac{s_y^2}{n}\right)}{v} = \frac{\frac{s_x^4}{m^2}}{m-1} = \frac{\frac{s_y^4}{n^2}}{n-1}$$

由此决定 v 。

置信度 $(1 - \alpha)$ 的置信区为

$$\bar{x} - \bar{y} - t_{\frac{\alpha}{2}}(v) \sqrt{\frac{s_x^2}{m} + \frac{s_y^2}{n}} < \mu_1 - \mu_2$$

$$< \bar{x} - \bar{y} + t_{\frac{\alpha}{2}}(v) \sqrt{\frac{s_x^2}{m} + \frac{s_y^2}{n}}$$

(5) 离散的检验

$$\text{单侧检验: } \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sigma_0^2} > \chi_{\alpha}^2(n-1)$$

$$\text{或 } \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sigma_0^2} < \chi_{1-\alpha}^2(n-1)$$

$$\text{双侧检验 } \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sigma_0^2} > \chi_{\alpha/2}^2(n-1)$$

$$\text{或 } \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sigma_0^2} < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1) \text{ 时}$$

若假设 $\sigma^2 = \sigma_0^2$ 则

置信度 $(1 - \alpha)$ 的 σ_0^2 的置信区为

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} < \sigma_0^2 < \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)}$$

(6) 离散比的检验

$$\text{双侧检验: } \frac{(n-1) \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} > F_{\frac{\alpha}{2}}(m-1, n-1)$$

$$\text{或 } \frac{(n-1) \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} < \frac{1}{F_{\frac{\alpha}{2}}(n-1, m-1)} \text{ 时}$$

若假设 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ 则

置信度 $(1 - \alpha)$ 的 $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$ 的置信区为

$$\frac{1}{F_{\frac{\alpha}{2}}(m-1, n-1)} \frac{(n-1) \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$< \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} < F_{\frac{\alpha}{2}}(n-1, m-1) \frac{(n-1) \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

(7) 适合度的检验

$$\sum_{i=1}^k \frac{(x_i - np_i)^2}{np_i} \cong \chi^2(k-1)$$

式中 $\sum_{i=1}^k x_i = n$, x_i 属于 i 群的观测值, p_i 是观测值加入 i 群的概率。

28-2-5 多变量解析 [21]~[26]

(1) 回归分析 [27]~[29]

公式: $y = X\beta + e, \quad e \cong N(0, \sigma^2 I)$

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y, \quad V(\hat{\beta}) = (X'X)^{-1}\sigma^2$$

$$\hat{\sigma}^2 = (y - X\hat{\beta})'(y - X\hat{\beta}) / (n - k - 1)$$

$$R^2 = y'X\hat{\beta} / y'y$$

特别是当

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i \text{ 时}$$

$$\hat{\beta}_1 = S_{xy} / S_{xx}$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}$$

(2) 偏相关系数

$$\Sigma = V \begin{pmatrix} y \\ z \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{yy} & \sigma_{yz} & \tau_y \\ \sigma_{zy} & \sigma_{zz} & \tau_z \\ \tau_y' & \tau_z' & \Sigma_{xx} \end{pmatrix}$$

$$\rho_{y.z.x} = \frac{\sigma_{yz} - \tau_y' \Sigma_{xx}^{-1} \tau_z}{\sqrt{(\sigma_{yy} - \tau_y' \Sigma_{xx}^{-1} \tau_y)(\sigma_{zz} - \tau_z' \Sigma_{xx}^{-1} \tau_z)}}$$

(3) 正准相关分析

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_{xx} & \Sigma_{xy} \\ \Sigma_{yx} & \Sigma_{yy} \end{pmatrix}$$

正准相关系数 $\lambda = \frac{\text{Cov}(u'x, v'y)}{\sqrt{V(u'x)V(v'y)}}$

但是, u, v 是下式的解

$$\begin{cases} \Sigma_{xx}v - \lambda \Sigma_{xy}u = 0 \\ -\lambda \Sigma_{yx}v + \Sigma_{yy}u = 0 \end{cases}$$

另外, $\begin{pmatrix} U' & 0 \\ 0 & V' \end{pmatrix} \Sigma \begin{pmatrix} U & 0 \\ 0 & V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & \Lambda \\ \Lambda & I \end{pmatrix}$

(4) 离散性分析 [30]~[34]

二元配置公式: $x_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk}$

$$CT = \left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijk} \right)^2 / abn$$

$$S_r = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijk}^2 - CT$$

$$S_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a x_{i..}^2 - CT$$

$$S_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b x_{.j.}^2 - CT$$

$$S_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b x_{ij.}^2 - CT$$

$$S_{A..} = S_{AB} - S_A - S_B$$

$$S_{.j.} = S_{.j.} - S_{AB}$$

(5) 判别的分析

线性判别分析函数

$$U(x) = x' \Sigma^{-1}(\mu_1 - \mu_2) - \frac{1}{2}(\mu_1 - \mu_2)' \Sigma^{-1}(\mu_1 - \mu_2)$$

马哈拉诺比斯讯距离

$$D_i^2(x) = (x - \mu_i)' \Sigma^{-1}(x - \mu_i)$$

(6) 主成分分析

$$V(x) = \Sigma$$

$$\Sigma l_i = \lambda_i l_i, \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$$

$y_i = l_i'x$ 看作是第 i 主成分, 而

$$V(y_i) = \lambda_i$$

$$\text{Cov}(y_i, y_j) = 0 \quad (i \neq j)$$

28-3 物理常数表和换算表

表28-7

物理基本常数

名称	符号	主值(误差)	SI 单位	CGS 单位
光速	c	2.9979250(10)	$\times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\times 10^{10} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$
电子静止质量	m_e	9.109558(54)	$\times 10^{-31} \text{ kg}$	$\times 10^{-28} \text{ g}$
电子电荷	e 或 q	1.6021917(70)	$\times 10^{-19} \text{ C}$	
(电气系数)		4.803250(21)		$\times 10^{-10} \text{ esu}$
普朗克常数	h	6.626196(50)	$\times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	$\times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{s}$
	$h/2\pi$	1.0545919(80)	$\times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	$\times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{s}$
斯忒藩-波耳兹曼常数	σ	5.66961(96)	$\times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	$\times 10^{-5} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-4}$
波耳兹曼常数	k	1.380622(59)	$\times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$	$\times 10^{-16} \text{ erg}\cdot\text{K}^{-1}$
阿伏加德罗常数	N_A	6.022169(40)	$\times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$\times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
分子气体常数	R	8.31434(35)	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\times 10^7 \text{ erg}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
万有引力常数	G	6.6732(31)	$\times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$	
质子质量	m_p	1.673614(11)	$\times 10^{-27} \text{ kg}$	$\times 10^{-24} \text{ g}$
中子质量	m_n	1.674920(11)	$\times 10^{-27} \text{ kg}$	$\times 10^{-24} \text{ g}$
氢原子质量	m_H	1.672614(11)	$\times 10^{-27} \text{ kg}$	$\times 10^{-24} \text{ g}$
牛顿虎克常数	R_m	1.09737312(11)	$\times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$	$\times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$
热功当量	J_{15}	4.1855(4)	$\text{J}\cdot(15^\circ \text{ cal})^{-1}$	$\times 10^7 \text{ erg}\cdot(15^\circ \text{ cal})^{-1}$
真空导电率	ϵ_0	0.88541851	$\times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$	
真空导磁率	μ_0	1.25663706	$\times 10^{-6} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$	

表23-8

各种物质的比导电率
(ϵ_{ss} 低频比导电率, ϵ_{oo} 光学区比导电率)

物质	ϵ_s	ϵ_{oo}	物质	ϵ_s	ϵ_{oo}	物质	ϵ_s	ϵ_{oo}
LiH	13.0	3.61	NaBr	5.99	2.62	KI	4.94	2.69
LiCl	11.95	2.747	NaI	6.60	2.91	RbF	6.48	1.926
LiBr	13.25	3.161	KF	5.46	1.548	RbCl	5	2.19
NaF	6.0	1.74	KCl	4.68	2.13	RbBr	5	2.33
NaCl	5.62	2.25	KBr	4.78	2.33	RbI	5	2.63
CsF		2.158	ZnS	8.3	5.07	InP	12.61	9.61
CsCl	7.20	2.60	ZnSe	8.1	5.75	InAs	15.15	12.25
CsBr	6.51	2.78	ZnTe	10.1	8.26	InSb	17.88	15.68
CsI	5.65	3.07	CdS $\begin{cases} //c \\ \perp c \end{cases}$	10.33	5.38	SiC $\begin{cases} //c \\ \perp c \end{cases}$	10.07	6.7
AgCl	12.3	4.04		9.35	5.29		10.00	6.7
AgBr	13.1	4.62	CdSe'	10.65	7.02	PbS		17.9
TlCl	31.9	5.10	CdTe	11	2.68	HgS		5.86
TlBr	29.8	5.41	AlAs	12.04	10.24	HgSe		14.0
CaF ₂	6.7	2.045	AlSb	11.24	9.80	C		5.5
SrF ₂	6.6, 7.7	2.07	GaP	10.18	8.46	Si		11.8
BaF ₂	7.2	2.16	CaAs	12.9	10.9	Ge		16.0
ZnO	8.15	2.0	GaSb	15.79	14.44			

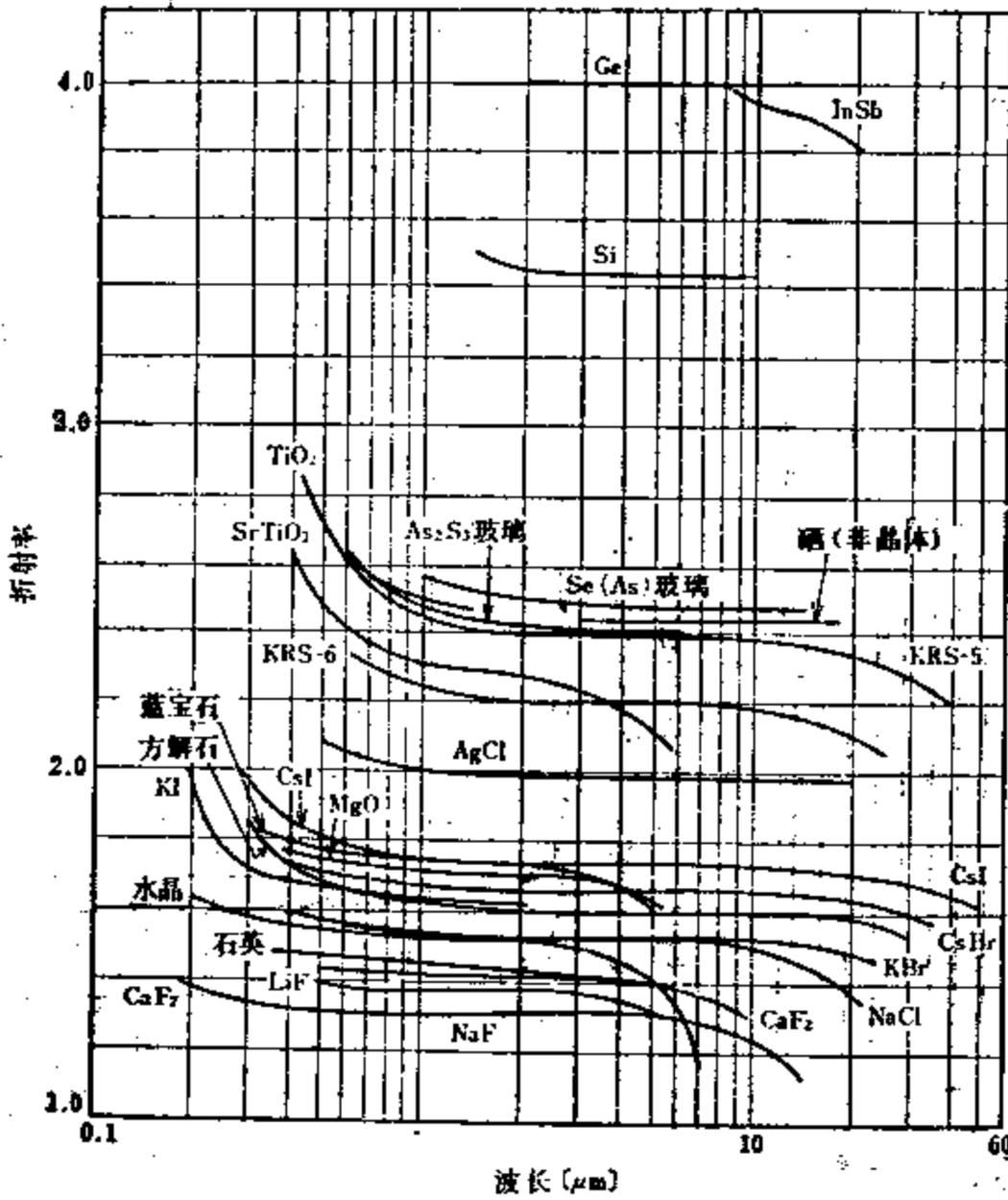
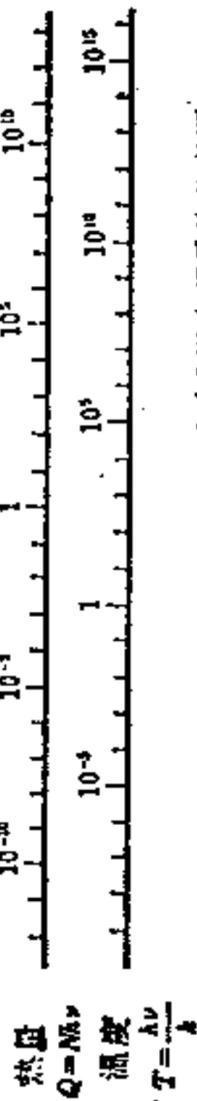
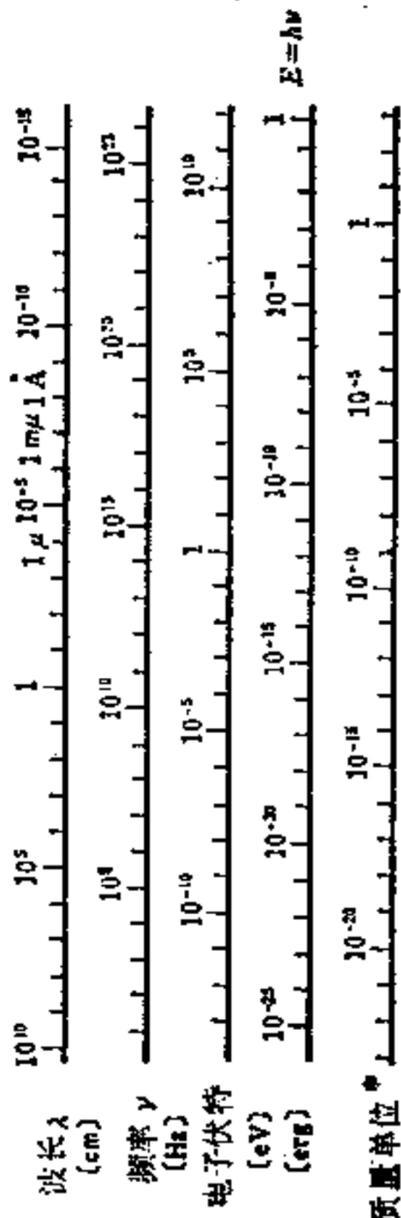


图 28-1 固体的折射率

图中符号: KRS-5, 溴化铯加碘化铯 KRS-6, 溴化铯加氯化铯

表28-9 换算表 I

能量的换算



* hc/e^2 用电子量单位表示

	(erg)	(eV)	(Hz)	(cm ⁻¹)	(K)
1 K	1.38054×10^{-16}	0.86171×10^{-14}	2.0836×10^{10}	0.69503	1
1 eV	1.60210×10^{-12}	1	2.4180×10^{11}	0.80657×10^4	1.16049×10^4
1 kcal/mol	0.69497×10^{-12}	4.3379×10^{-2}	1.04892×10^{13}	3.4988×10^3	5.0361×10^3
1 J/mol	1.66043×10^{-17}	1.03641×10^{-5}	2.5061×10^8	0.83594×10^{-1}	1.20274×10^{-3}
1 Hz	0.66256×10^{-26}	4.1356×10^{-15}	1	3.3356×10^{-11}	4.7993×10^{-11}
1 cm ⁻¹	1.98631×10^{-16}	1.23981×10^{-4}	2.9979×10^{10}	1	1.43879

温度换算式

绝对温度 $K = C + 273$

摄氏温度 $C = \frac{5}{9}(F - 32)$

华氏温度 $F = \frac{9}{5}C + 32$

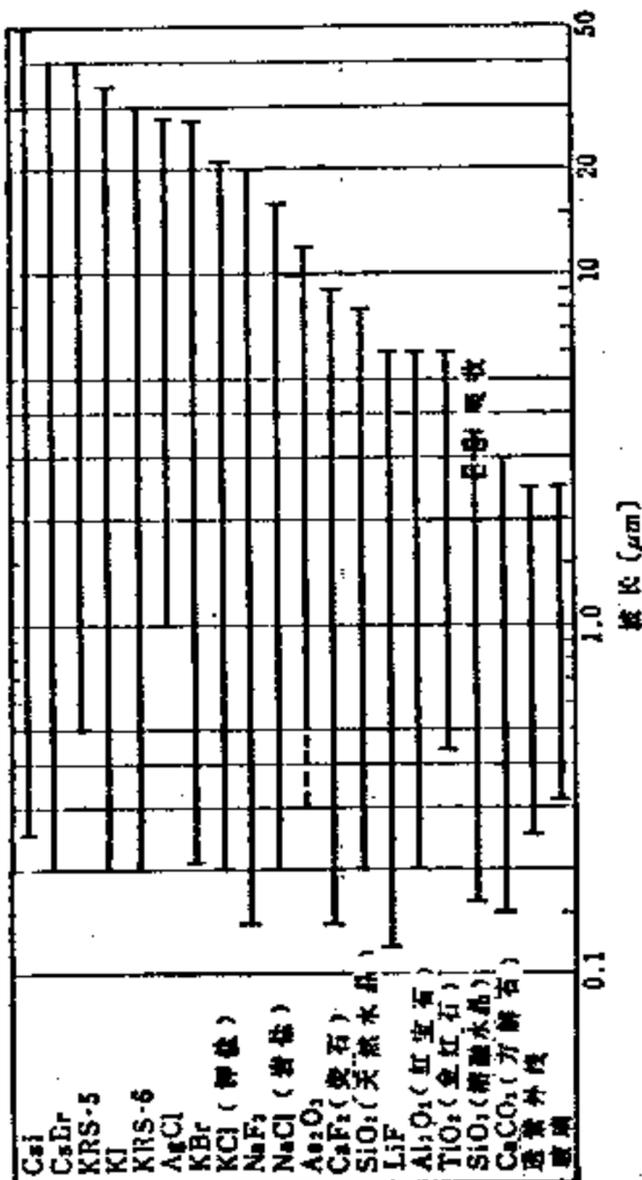


图28-2 光学材料的透光区

KRS-5为溴化钾加磷化钾, KRS-6为溴化钾加氯化钾

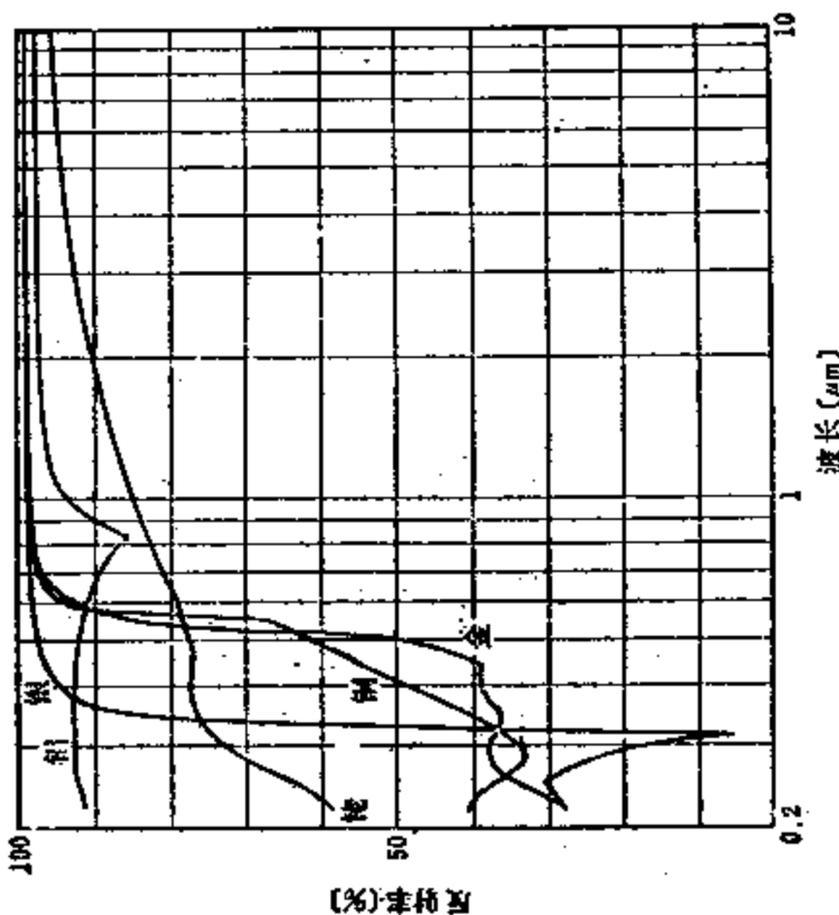


图28-3 金属面的分光反射率

表28-10

換算表 I

(a) 光度単位換算表

光度単位	nt	sb	asb	L	ft-L	ft-cd
尼特(nt)cd/m ²	1	10 ⁻⁴	3.142	3.142 × 10 ⁻⁴	0.2919	0.09290
熙提(sb)cd/cm ²	10 ⁴	1	3.142 × 10 ⁴	3.142	0.2919 × 10 ⁴	0.09290 × 10 ⁴
阿斯提(asb) $\frac{1}{\pi}$ cd/m ²	0.3183	0.3183 × 10 ⁻⁴	1	10 ⁻⁴	0.09290	0.02957
朗伯(L) $\frac{1}{\pi}$ cd/m ²	0.3183 × 10 ⁴	0.3183	10 ⁴	1	0.09290 × 10 ⁴	0.02957 × 10 ⁴
英尺朗伯(ft-L) $\frac{1}{\pi}$ cd/ft ²	3.426	3.426 × 10 ⁻⁴	10.764	10.764 × 10 ⁻⁴	1	0.3183
英尺新烛光(ft-cd)cd/ft ²	10.764	10.764 × 10 ⁻⁴	33.82	33.82 × 10 ⁻⁴	3.142	1

(b) 照度単位換算表

光照度単位	lx	ph	fc
勒克斯(lx)lm/m ²	1	10 ⁻⁴	0.09290
福透(ph)lm/cm ²	10 ⁴	1	0.09290 × 10 ⁴
英尺烛光(fc)lm/ft ²	10.764	10.764 × 10 ⁻⁴	1

参 考 文 献

- (1) 理工学のための数学ハンドブック, 丸善 (1960)
- (2) 南雲仁一編: 理工学活用ハンドブック, オーム社 (昭49)
- (3) 森口・宇田川・一松: 数学公式 I, II, III (岩波全書) (1965)
- (4) H. B. Dwight Tables of Integrals and Other Mathematical Data, The Macmillan Company, New York (1957)
- (5) 矢野健太郎: 大学演習「微分方程式」, 裳華房 (昭32)
- (6) D. A. S. Fraser: Statistics an Introduction, John Wiley (1958)
- (7) A. H. Bowker, G. J. Lieberman: Engineering Statistics, Princeton-Hall (1959)
- (8) I. Guttman, S. S. Wilks: Introductory Engineering Statistics, John Wiley (1965)
- (9) ガットマン・ウィルクス著, 石井恵一, 堀素夫訳: 工科系のための統計概論 (1968)
- (10) 佐藤良一郎: 数理統計学序説, 培風館 (1967)
- (11) 鷺尾泰俊, 森本治樹: 数理統計学, 白日社 (1972)
- (12) 竹内啓: 数理統計学, 東洋経済 (1963)
- (13) S. S. Wilks: Mathematical Statistics, John Wiley (1962)
- (14) W. Feller: An Introduction to Probability Theory and Its Applications, John Wiley (1957)
- (15) フェラー著, 河田龍夫監訳: 確率論とその応用, 紀伊國屋書店 (1960)
- (16) 統計数値表編集委員会: 統計数値表 JSA-1972, 日本規格協会 (1972)
- (17) M. G. Kendall, A. Stuart: The Advanced Theory of Statistics, Vol. I, Charles Gliffin (1958)
- (18) E. L. Lehman: Testing Hypothesis, John Wiley (1959)
- (19) レーマン著, 渋谷政昭, 竹内啓訳: 統計的検定論, 岩波書店 (1969)
- (20) 統計数値表編集委員会: 簡約統計数値表, 日本規格協会 (1977)
- (21) T. W. Anderson: An Introduction to Multivariate Statistical Analysis, John Wiley (1958)
- (22) M. G. Kendall: A Course in Multivariate Analysis, Charles Griffin (1957)
- (23) ケンドール著, 浦昭二, 竹並輝之訳: 多変量解析の基礎, サイエンス社 (1972)
- (24) 伊藤孝一: 多変量解析の理論, 培風館 (1969)
- (25) 奥野忠一ほか: 多変量解析法, 日科技連 (1971)
- (26) 竹内啓, 柳井晴夫: 多変量解析の基礎, 東洋経済 (1972)
- (27) 三浦新ほか: 新版官能検査ハンドブック, 日科技連 (1973)
- (28) N. R. Draper, H. Smith: Applied Regression Analysis, John Wiley (1966)
- (29) ドレイパー, スミス著, 中村慶一訳: 応用回帰分析, 森北出版 (1968)
- (30) H. Scheffé: Analysis of Variance, John Wiley (1959)
- (31) F. A. Graybill: An Introduction to Linear Statistical Models, Vol. I, McGraw-Hill (1961)
- (32) 北川敏男: 実験計画法講義 I, II, 培風館 (1955, 1956)
- (33) 鷺尾泰俊: 実験計画法入門, 日本規格協会 (1974)
- (34) 島田正三: やさしい直交配列の話, 日本規格協会 (1968)
- (35) 和田正徳編: 電子材料ハンドブック, 朝倉書店
- (36) 飯田ほか: 物理定数表, 朝倉書店
- (37) 岩間, 野口訳: 工業物性学要論, アダネ社
- (38) 東京天文台編: 理科年表, 丸善

第 29 章

照明工程词汇

在这里收集的词汇计 375 个,如增加文中的有关词汇便超过 400 个。意图是认真考虑到不要漏掉一切领域中必不可少的词。词的收录是以国际照明委员会(CIE)发行的国际照明工程辞典为基础,参照美国照明学会照明手册第一章、电工术语集(照明)以及日本工业标准(JIS)的照明用词、色彩用词等,力求不致谬误。主要依据电工术语词典,按照功能差别,将词汇分为以下 6 类:

(1) 辐射和光; (2) 眼和视觉; (3) 辐射、光和色的测量; (4) 光源及其有关装置; (5) 灯具和附属设备; (6) 照明的一般概念。

使用说明

1. 本文的组成方法及其纲目

词汇按照下列形式顺序排列:

(1) 本词(黑体); (2) 对应英语; (3) 词源; (4) 释义或涵义; (5) 参阅词条。

(1) 在本词中一并注出并列处理的词,附以()的意义可参阅下项中的(1)。(2)对应的英语在原则上引用国际照明工程辞典,在语尾如有(美)、(英)的区别也照录下来。从[IES]中引用的词附以(IES)。

2. 使用符号的意义

(1) () 中的词表示别称、稍含双义或略称。例:光谱光度计(分光光度计)。

(2) (()) 中的词表示可以适当地替换掉其前面的词。例:开灯((灯))。

(3) [] 中表示可以省略的词。例:光[量]子。

(4) 【 】 中表示说明或注释。

(5) 《 》 中表示预定将来成为废词。

3. 表示词源的略号

[学]: 教育部汇编学术词汇 电工编修订版(预定1978年发行)

[专]: 电工学会 电工术语集13号, 1977年

[CIE]: CIE Publication No. 17, International Electrotechnical Vocabulary Group 45; Lighting, Third Edition, 1970

[IES]: IES LIGHTING HANDBOOK, Fifth Edition, 1972

SECTION 1, DICTIONARY OF LIGHTING TERMS

[JIS] JIS Z 8105-1964 色彩术语, JIS Z 8113-1976 照明术语

29-1 辐射和光

光 light [学][专][CIE][IES][JIS]

(1) 通过视觉器官能够引起视觉的辐射。这一辐射的波长范围在实用上可以考虑为380至760毫微米。

(2) 由视觉器官可以感觉到的辐射的视觉现象。

单色光 monochromatic light; homogeneous light [学][专] 单一频率的光,或作为单一

频率处理的窄频率范围的光。后者往往称做准单色光 (quasimonochromatic light), 加以区别。

单色光是仅取出光谱的一个波长, 或对发射出线光谱的光源用滤光器得出, 用于分光光度等方面。

光[量]子 photon [学][专][CIE] 辐射能量的基本量(量子), 等于普朗克常数 h 和电磁辐射的频率 ν 之积。

自激发射 spontaneous emission [学][专] 处于激发状态 E_2 的原子或分子在没有从外界受到任何刺激而跃迁到较低的能量状态时, 称做发射出辐射的现象。这时发射的光的频率 ν 由玻尔频率条件

$$h\nu = E_2 - E_1$$

给定, 跃迁概率(爱因斯坦系数 A) 由下式表示。

$$A_{21} = \frac{64\pi^4\nu^3}{(4\pi\epsilon_0)3hc^3} |\mu_{21}|^2$$

式中 h 表示普朗克常数, μ_{21} 表示跃迁的电双极矩矩阵的元素。也称做自然发射。参阅第3章。

受激发射 stimulated emission [学][专] 处于激发状态 E_2 的原子或分子从外部接受到频率 ν 、能量密度 ρ 的电磁波时, 按照与其能量密度 ρ 成比例的概率跃迁到较低的能量状态 E_1 , 这时称做向外界发射出频率 ν 的电磁波的现象。这时的跃迁概率用 $B_{21}\rho$ 表示, B_{21} 称做爱因斯坦系数 B 。

$$B_{21} = \frac{8\pi^3}{(4\pi\epsilon_0)3h^2} |\mu_{21}|^2$$

而 $h\nu = E_2 - E_1$

受激发射也称做诱导发射。参阅第3章。

辐射[线] radiation [学][专][CIE][JIS]

(1) 由电磁波或粒子发射或传递能量的现象。

(2) 这些电磁波或粒子。

单色辐射 monochromatic radiation; homogeneous radiation [学][专][CIE] 由单一频率表征的辐射。按照广义来解释, 乃指能由单一频率或单一波长描述的微小频率范围或微小波长范围的辐射。

热辐射《温度辐射》 thermal radiation; temperature radiation [学][专][CIE][JIS] 根据物质的粒子(原子、分子、离子等)的热振动发射出来辐射能的现象。参阅第3章。

完全辐射体《黑体》 full radiation; black-

body [学][专][CIE][JIS] 完全按普朗克辐射定律发射的热辐射体, 或与波长、入射方向或偏光无关, 入射的辐射被完全吸收的热辐射体。参阅第3章。

普朗克辐射定律 Planck's law of radiation [学][专][CIE][JIS] 以绝对温度为 T 的完全辐射体发射出来的光谱辐射的发射本领用波长和温度的函数来表示的定律:

$$M_{e,\lambda}(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} (\exp c_2/\lambda T - 1)^{-1}$$

式中, $M_{e,\lambda}(\lambda, T)$ 是绝对温度为 T 、波长为 λ 的完全辐射体的光谱辐射发射本领; $c_1 = 2\pi^5 c^2 h^{-15}$, $c_2 = hc/h$, h 为普朗克常数; c 为真空中的光速; h 为玻耳兹曼常数。

辐射发射本领的光谱密度称做分光辐射发射度。

斯忒藩-玻耳兹曼定律 Stefan-Boltzmann law [学][专][CIE][JIS] 表示完全辐射体的辐射发射本领与其绝对温度的关系的定律:

$$M_e = \sigma T^4$$

式中, M_e 为绝对温度为 T 的完全辐射体的辐射发射本领; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数。参阅第3章。

维恩位移定律 Wien's displacement law [学][专][IES] 由绝对温度为 T 的完全辐射体的最大光谱辐射本领的最大的波长 λ_m 与 T 成反比, 即 λ_m 随 T 的上升向短波侧位移, 并可由下式表示:

$$\lambda_m T = b$$

式中 b —— 维恩常数 ($= 2.876 \times 10^6$ 毫微米·度)。

辐射能量 radiant energy [学][专][CIE][IES] 在辐射状态下发射、移动或接受的能量。

符号: Q_e, Q

单位: 焦耳, J

光束 light beam [学][专] 在用极坐标表示光强的配光曲线上动径特别突出部分的可见光线。在投光照明或交通照明中使用较多。

可见辐射、可见光 [线] visible radiation, visible rays [学][专][CIE] 能直接引起视觉的辐射。可见辐射的光谱范围因人而异, 不能明确定义。一般下限在380和400毫微米之间, 上限在760和780毫微米之间 (1毫微米 = 10^{-6} 米)。

紫外辐射、紫外线 ultraviolet radiation; ultraviolet rays [学][专][CIE][IES][JIS] 波长约在1到380毫微米的范围内的辐射。紫外辐

射的光谱范围没有明确规定, 根据使用者的变化而有所不同。JIS Z 8113中规定为10到380毫微米, 而CIE中却规定为1到380毫微米。

红外辐射、红外线 infrared radiation; infrared rays [学][专][CIE][IES][JIS] 波长约在780毫微米到1毫米的范围内的辐射。红外辐射的光谱范围没有明确规定, 根据使用者的变化而有所不同。CIE规定为780毫微米到大约1毫米。

光谱 spectrum [学][专][CIE][JIS] 将辐射分解成单色光成分而产生的图象。

连续光谱 continuous spectrum [学][专] 无论如何增大分光器的色散能力并不中断而连续展开的光谱。固体或液体发射出来的热辐射的光谱属于此种。在气体的原子或分子中参与辐射的能级是连续的时也会出现连续光谱。

线光谱 line spectrum [学][专] 由若干近于纯粹的单色光群组成的光谱。这种单色光个别地称做“光谱线”。线光谱通常指由原子产生的光谱。由分子产生的带光谱也由若干的谱线组成, 但不称做线光谱。它分为吸收光谱和发光光谱, 但后者称做亮线光谱。由于检查多数的谱线的波长组合便可以确定原子能级的位置。

波长 wavelength [学][专][CIE][IES] 周期性的波在进行方向连接相位相同(时刻相同)而在波形上相连的两点之间的距离。

符号: λ

单位: 米, m

在介质中的波长是真空中波长除以介质的折射率的值。空气中的波长大致等于真空中的波长。

发光 luminescence [学][专][CIE][IES][JIS] 在一定温度下产生的除物体热辐射以外的特定波长, 或在限定的波长范围内发射电磁波的现象。这种辐射是物质的固有特性。从物理特性定义是物质吸收了光、电、辐射等能量使之成为激发状态, 而后又以光的形式发射出能量的现象。

光致发光 photoluminescence [学][专][CIE] 因光子激发而引起发光的现象, 普通指由能量较小的紫外、可见或红外辐射的激发而产生的发光。通常简写成PL。

电致发光 electroluminescence [学][专][CIE][IES][JIS] 由于电磁的激发而产生的固体(主要是荧光体)的发光。通常简写成EL。

激发 excitation [学][专][CIE] 在量子力学体系(例如原子或分子)中给定了能量, 促使从能量低的稳定状态跃迁到能量较高的稳定状态。

荧光 fluorescence [学][专][CIE][IES][JIS] 激发以后极短时间内或在激发中持续的光致发光。时间一般规定在 10^{-8} 秒以内。

荧光物质 fluorescent material [学][专][CIE][JIS] 促使引起光致发光或电致发光的物质。参阅荧光体。

荧光体 phosphor; fluorescent material [学][专][CIE][JIS] 荧光物质的同义语。参阅荧光物质。

阳光柱 positive column [学][专][JIS] 在放电时电势梯度为正, 以原子或分子的激发活潑地进行特征的等离子状态的发光领域。往往由于气体的种类而呈现条状。

弧光[放电] arc[discharge] [专][CIE][IES][JIS] 以阴极压降比辉光放电小为特征的放电。阴极电子发射是由于种种原因(热电子发射、电场电子发射等)的同时作用或个别作用所引起的, 但二次发射不起主要作用。弧光的同义语。

反射 reflection [学][专][CIE][IES][JIS] 入射到介质的境界面上的辐射并不改变它的单色辐射成分的频率而折回到入射方面的过程。

透射 transmission [学][专][CIE][IES][JIS] 辐射并不改变它的单色辐射成分的频率而穿过介质的过程。

漫射、散射 diffusion [学][专][CIE][JIS] 辐射在表面上反射或穿过介质时, 并不改变辐射的光谱组成的频率而在进行方向发生离散, 致使辐射束的空间分布扩展开来的过程。

规则反射、镜面反射 regular reflection; specular reflection [学][专][CIE][IES][JIS] 遵守镜面光学反射定律而且不发生扩散的反射。

漫反射、扩散反射 diffuse reflection [学][专][CIE][IES][JIS] 从宏观的角度判断无规则反射, 而向各方向扩散的反射。

理想漫反射 perfect diffuse reflection [专] 经过反射的辐射的空间分布对于所有反射方向产生相等的辐射亮度而且反射系数为1的理想均匀漫反射。

表29-1 辐射量与光度量比较一览表

辐 射 量				光 度 量			
量的名称	量的符号	定 义 式	单位名称 单位符号	量的名称	量的符号	定 义 式	单位名称 单位符号
辐(射)能量	Q, Q_e		焦耳 J	光量	Q, Q_v		流明秒 $\text{lm}\cdot\text{s}$
辐(射)通量	Φ, Φ_e	$\Phi = dQ/dt$	瓦 W	光通量	Φ, Φ_v	$\Phi = K_m \int \Phi_e \omega V(\lambda) d\lambda$ K_m —最大光谱光视效能 λ —波长 $V(\lambda)$ —标准光谱光视效率	流明 lm
辐(射)强度	I, I_e	$I = d\Phi/d\omega$	瓦每球面度 W/sr	(光)强度	I, I_v	$I = d\Phi_v/d\omega$	坎德拉 cd
辐(射)亮度	L, L_e	$L = dI/(dA \cos\theta)$ $= d^2\Phi/d\omega(dA \cos\theta)$	瓦每球面度每平方米 $\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$	(光)亮度	L, L_v	$L = dI_v/(dA \cos\theta)$ $= d^2\Phi_v/d\omega(dA \cos\theta)$ 当均匀漫射时 $L = M/\pi$	坎德拉每平方米 cd/m^2
辐(射)照度	E, E_e	$E = d\Phi/dA$	瓦每平方米 W/m^2	(光)照度	E, E_v	$E = d\Phi_v/dA$	勒克斯 lx
辐(射)出射度	M, M_e	$M = d\Phi/dA$	瓦每平方米 W/m^2	光出射度	M, M_v	$M = d\Phi_v/dA$ 当均匀漫射时 $M = \pi L$	流明每平方米 (辐射勒克斯) lm/m^2 (rlx)

均匀漫反射、完全漫反射 uniform diffuse reflection [学][专] 遵守朗伯余弦定律的反射,与辐射的入射方向无关,反射辐射的空间分布产生对一切反射方向相等的辐射亮度或亮度的漫反射。

朗伯余弦定律 Lambert's cosine law [学][专][IES] 表示由均匀散面向任意方向的光强 I_θ 与这面的法线方向的光强 I_n 所成的角度 θ 的余弦成比例而变化的定律(图29-1)。



$$I_\theta = I_n \cos \theta$$

图 29-1

因此,在均匀散射面上与光的入射方向无关,所有方向的亮度相等。

相互反射 interreflection; inter-reflection [学][专][CIE][IES] 在多数表面之间辐射或光的相互反射现象。

规则透射、定向透射 regular transmission; direct transmission [学][专][CIE][IES][JIS] 没有散射(或漫射)的透射。

漫透射 diffuse transmission [学][专]

[CIE][IES][JIS] 从宏观的角度判断,与折射定律无关,而产生散射的透射。

光泽 gloss [学][专][CIE][JIS] 由于反射光的空间分布而产生物体表面的视觉的属性。光泽的大小取决于镜面反射光成分的大小。

散射 scattering [专] 辐射遇到与其波长相近并不太大的障碍物时,产生以它为中心向周围扩散的现象。在介质中粒子的大小比波长小得多时的散射现象称做“瑞利散射”。

折射 refraction [学][专][CIE][JES] 在光学上的非均匀介质中或在不同介质之间的境界面上,由于辐射的传播速度的改变而使传播方向变化的现象。

色散 dispersion [学][专][CIE]

(1) 作为频率考虑的辐射的传播速度变化的现象,它使复合辐射分解为单色成分。

(2) 产生这种现象的光学装置或介质的特性。

(3) 表征这种特性的量。

衍射、绕射 diffraction [专][CIE] 辐射

通过障碍物的边缘时产生的传播方向变化的现象。由于辐射的波动性质所引起的。

吸收 absorption [学][专][CIE][IES][JIS] 辐射能由于与物质的相互作用转换为其他形式的能量的现象。

偏振光 (1) polarization; (2) polarized light [专][CIE][JIS]

(1) 光的波动的电界波的横振动面偏向于特定方向的现象。

(2) 光波(电矢量)的振动方向是规则的光。有直线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光。

干涉 interference [学][专][CIE] 相干的波列重叠而致辐射振幅衰减或增强的现象。

液晶 liquid crystal [专] 某种物质在某一温度范围内兼有流动体和晶体的性质的状态称做液晶。液晶一般规定有层列相、向列相和汇集相。

激光 LASER; laser [专][IES] 激光是由 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的字头编造的词,直译为“辐射由于激发发射而引起的光的增强”。一般涵义为利用由原子或分子引起的激发发射进行光的增强、发振的装置。

闪光 flash [学][专] 持续时间短的强光。

光电效应 photoelectric effect [学][专][CIE] 物质和光的相互作用,物质吸收光子,结果电子释放而产生自由电子的效应。

29-2 眼睛和视觉

视觉器官 organ of vision; visual organ [专][CIE] 将光刺激变为神经兴奋的复合的组成群。由眼球及由眼球到大脑皮质的视觉领域的神经系统所组成。

视觉系统 visual system [专] 与视觉有关的机构作为系统来处理时,称做视觉系统。它还大致分为由眼球光学系统到大脑中枢的视感觉系统及眼球运动和瞳孔运动、调节等的视觉运动系统。

椎状细胞 cone [专][CIE][IES][JIS] 眼睛在明适应状态时主要与光、色刺激的知觉有关的视细胞。密集分布在网膜的中心部分。

杆状细胞 rod [专][CIE][IES][JIS] 眼睛在暗适应状态时,只对弱光感觉到的视细胞。主要分布在网膜的周边部分,几乎或完全不能识别颜色或形状的细部。

视觉 vision [学][专][CIE][IES][JIS] 由于进入眼内的辐射的刺激作用而产生的包括感觉印象或知觉过程在内的意识上的体验。或因此引起的外界的差异的认识。

色觉 color vision [学][专][CIE] 由于进入眼内的辐射的刺激作用而产生的视感觉的体验中,识别在色的量和质的维数上发生变化的感觉的侧面或其维数上的差别的感功能。引起色觉的刺激作用或导致色觉的差异的刺激的物理条件一般就是辐射的光谱组成或其差异。对于所谓白光,刺激的时间和空间分布在特殊情况下也往往会发生不同

的色觉(例如主观色)。

错觉 optical illusion [专][JIS] 视感觉或视知觉的印象的任何侧面与其所对应的刺激的物理事实相矛盾的状态。

视野 visual field [学][专][CIE][IES] 头部和单眼或双眼静止时可以觉察的空间的角度范围。

视角 visual angle [学][专][IES] 从瞳孔的中心对于识别对象所张开的角度。

视力 visual acuity [专][CIE][IES][JIS] 广义地说是细微识别二维扩展的物体形状的能力。在实用上指识别非常接近的两点的能力。根据国际眼科学会的规定,应用按照兰道尔环的视力表来测量,规定在5米的视距上能够判别1'的开口时为视力1.0。一般采用勉强识别的兰道尔环上开口的视角(分)的倒数。

可见度 visibility [专][IES][JIS] 容易看到对象的存在、或形状的程度或状态。受到对象的大小、亮度、背景的影响。视距是气象用语,表示能够看到限定的对象的距离的最大值。

识别视距 visual range [专][CIE] 满足能够正确地识别特别的光或对象的条件,由观测者到识别对象的距离的最大值。

光点亮度 point brilliance [专][IES] 在可看做是点光源的距离上直接观测光源时,有关给予观测人员的视角效应的光度量。光点亮度是在

观测人员的眼睛位置上由垂直于光源方向的平面上的这一光源所产生的照度测量。

符号: E_v

单位: 勒克斯, lx

也称做瞳孔照度、角膜照度。

刺激 stimulus [学][专][CIE] 进入感觉器官而使这一器官产生感觉的物理能或化学能。产生光的感觉时称做光刺激, 产生色的感觉时称做色刺激。

阈限 threshold [专][IES][JIS] 刺激量在任何量纲上进行增加或减少等变化时, 察觉或未察觉与其对应的感觉上的质或量的任何变化的刺激变化量的临界值。刺激变化超过此值时从感觉上可以察觉它的变化。在多数心理实验中采取察觉50% (人数或次数) 时的值。也称做阈值。又根据领域而使用阈(值)、域值。

韦伯-费希纳定律 Weber-Fechner law; Weber's law [学][专] 阐述“表示感觉强度的心理尺标值对于刺激强度成为对数关系”的定律。对于不太强的刺激成立。

$$R = K \lg \left(\frac{S}{S_0} \right)$$

式中 R ——感觉强度; K ——常数; S ——刺激强度; S_0 ——刺激阈限。

闪烁 flicker [学][专][CIE][JIS] 由于光刺激的周期性变化而产生的亮度或色度的闪动印象。

闪烁值、临界融合频率(CFF) flicker value, critical fusion frequency, flicker fusion frequency (美) [专][CIE][IES][JIS] 按照周期变化的光刺激的变化频率达到某一定值后并不感觉闪烁, 而感到稳定的刺激。称做相当于这一界限的变化频率。也称做临界闪烁融合频率。

明亮度、主观亮度 luminosity; brightness (美) [学][专][CIE][IES][JIS] 与作为光刺激的亮度变化一次相对应, 按照“暗-亮”的量纲变化的视感觉的属性。

与亮度相对应的心理概念 (CIE, JES)。

明视觉 photopic vision [专][CIE][IES][JIS] 在视野内普通程度的亮度(数坎德拉·米⁻²以上)下主要是椎状细胞起作用的视觉状态。

暗视觉 scotopic vision [专][CIE][IES]

[JIS] 在视野内亮度低(大约 10⁻²坎德拉·米⁻²以下), 主要是杆状细胞起作用的视觉状态。

介视觉 mesopic vision [专][CIE][IES][JIS] 视野内的亮度介于明视觉和暗视觉之间(大约 10⁻²坎德拉·米⁻²~数坎德拉·米⁻²), 椎状细胞和杆状细胞二者都起作用的视觉状态。

普尔金耶现象 Purkinje phenomenon [学][专][CIE][IES][JIS] 视场内的亮度的光谱特性保持一定, 各个波长都按相同的比率减少, 由明视觉移至暗视觉的状态时, 红光的明亮度比蓝光减少的现象。

这时的相对视觉灵敏度发生变化, 最大视觉灵敏度的波长向短波长方向移动。

适应 adaptation [学][专][CIE][IES][JIS]

(1) 与光刺激或色刺激相对应的视觉器官的特性变化的过程。

(2) 上述过程的最后状态。由于它的刺激的亮度至少是数坎德拉·米⁻²或数百分之一坎德拉·米⁻²以下而采用明适应或暗适应的术语。

明适应 light adaptation [学][专][IES][JIS] 视场内的亮度由低的状态向普通的状态(数坎德拉·米⁻²以上)变化, 对此由主要是杆状细胞起作用的状态移向椎状细胞起作用的状态, 视觉器官的感受性降低过程或降低状态。

暗适应 dark adaptation [学][专][IES][JIS] 由视场内的亮度高的状态向低的状态(大约 10⁻²坎德拉·米⁻²以下)变化, 对此由主要是椎状细胞起作用的状态移向杆状细胞起作用的状态, 视觉器官的感受性提高过程或提高状态。

色适应 chromatic adaptation [专][CIE][IES][JIS] 视觉器官对成为视场内主体的色光的适应过程或适应状态。

感到成为主体的色光没有彩色, 或由这色光照射的物体的颜色被知觉为在标准光的照射下的颜色, 色觉特性向这样的方向发生变化的状态。

对比 contrast [学][专][CIE] 在时间上空间上相接或接近布置的两种刺激, 在任何的相同量纲上互相不同时, 它的差别在感觉上更加强调以致感到的现象或主观评价。因此有明亮度对比(主观亮度对比)、亮度对比、明度对比、色对比、同时对比、连续对比等。

按照定量来定义则如下式:

(1) 亮度对比

$$(a) \quad \frac{L_2 - L_1}{L_2}$$

$$(b) \quad \frac{L_2 - L_1}{\frac{1}{2}(L_2 + L_1)}$$

(2) 亮度比

$$(c) \quad \frac{L_2}{L_1}$$

式中, $L_2 > L_1$ 。

两种刺激中任何客观定量的差别本身由数学的差或比来表示, 往往称做对比。这时对于这一差别的主观感觉的强调效果称做对比效果。

亮度对比 luminance contrast [JIS] 参看对比。

亮度比 luminance ratio 参看对比。

色对比 chromatic contrast [专] [JIS]

两种色刺激在主波长或纯度的色的量纲上互相不同时, 这两种刺激在时间上空间上相接或接近而被提示出来, 这时在色相、彩度等感觉的量纲上它的差别更加强调的对比效果。

眩光 glare [学] [专] [CIE] [IES] [JIS]

由于在时间上空间上不适当的亮度分布, 亮度范围或极端对比等, 以致视觉不舒适或存在着降低知觉重要对象的能力的视觉条件。

不舒适眩光 discomfort glare [专] [CIE] [IES] 对于视觉对象来说, 视觉不一定降低, 但发生不舒适感觉的眩光。

失能眩光 disability glare [专] [CIE] [IES] 对于视觉对象来说, 使视觉降低的眩光。而且往往带来不舒适, 也称减视眩光。

失明眩光 blinding glare [专] [IES] 在一定时间内完全看不到视觉对象的强烈的眩光。

通常考虑为降低视觉达到最为严重程度的失能眩光的情况, 往往包括到失明眩光之中。

颜色、色彩 color [学] [专] [CIE] [IES] [JIS]

(1) 与光的光谱组成的变化一次对应而变化的视觉的一个侧面。

(2) 对于引起与(1)的色觉相同的感受体验的辐射而言以及它的性质(红光、蓝光等)。

(3) 对于引起与(1)的色觉相同的感受或知觉的刺激物体而言以及它的性质(红纸、蓝色玻璃等)。

29-3 辐射、光和色的测量

辐射测量 radiometry [学] [专] [CIE] [IES] 辐射量的测量。辐射量是辐射通量及由其推导出来的各种量, 其中有辐(射)强度、辐(射)亮度、辐(射)出(射)度、辐(射)照度、辐(射)能等。

光度量 photometry [学] [专] [CIE] [IES] 光度量是光通量及由其推导出来的各种量, 其中有光强、亮度、〔面〕发光度、照度、光量等。

光度量又是视觉光度量或物理光度量。

标准光度观测者 standard photometric observer [专] [CIE] 具有标准光谱灵敏度的假想的观测者。具体来说, 具有符合曲线 $V(\lambda)$ 或曲线 $V'(\lambda)$ 的相对光谱灵敏度曲线的物理受光器。

在国际术语中前面附以 CIE, 如“CIE 标准...”。参看第 6 章。

物理测光 physical photometry [学] [专] [CIE] [JIS] 在测量时应用物理受光器的测光。

参看第 6 章。

视觉测光 visual photometry [学] [专] [CIE] [JIS] 比较来说, 应用眼睛的测光。参看第 6 章。

同色光度量 homochromatic photometry [学] [专] [JIS] 对相对光谱分布相等(或大致相等)的光进行比较的光度量。它的涵义就是对在视感光度量方面相等的色光进行比较的光度量。

但对现在一般采用的物理光度量来说, 色的相等并没有特殊意义, 因此在物理光度量方面的同色光度量就相当于相对光谱分布互等的光进行比较的光度量。

异色光度量 heterochromatic photometry [学] [专] [JIS] 对相对光谱分布不同的光进行比较的光度量。过去的涵义是对异色的光进行比较的光度量, 而根据它和同色光度量的关系就相当于相对光谱分布不相同时的光度量。

标准光源 standard light source [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 成为光度量、辐射量和色度量的标准的光源。由CIE定义推荐的人工光源称做CIE标准光源(CIE standard sources)。CIE标准光源有A、B、C和D₆₅。

标准光(源) standard illuminant(s), standard source(s) (美) [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 由CIE规定的相对光谱分布的A、B、C、D₆₅四种测色用光源。

标准光A: 表示 $T_{65} = 2855.6\text{K}$ 的完全辐射体(T_{65} 为根据1968年国际实用温度刻度的温度)。

标准光B: 具有 $T_{65} = 4874\text{K}$ 的相关色温,代表直射阳光。

标准光C: 具有 $T_{65} = 6774\text{K}$ 的相关色温,代表天然光。

标准光D₆₅: 具有 $T_{65} = 6504\text{K}$ 的相关色温,代表天然光。

(1) 由CIE推荐下列的标准光源作为实现标准光A、B、C的人工光源。

标准光源A: 在相关色温 $T_{65} = 2885.6\text{K}$ 开灯的充气钨丝灯泡。

标准光源B: 由于标准光源A和特殊液体滤光器的组合发出相关色温 $T_{65} = 4874\text{K}$ 的辐射。

标准光源C: 由于标准光源A和特殊液体滤光器的组合发出相关色温 $T_{65} = 6774\text{K}$ 的辐射。

(2) 标准光源D₆₅是根据天然光的实测值确定光谱分布的,因此很难由人工光源来实现,正在进行研究中。

光度标准灯泡 photometric standard lamp [专] [JIS] 对于任何光度量定出标度,用来维持或传递其值的光度用灯泡。参看第6章。

物理受光器 physical receptor((detector)) (of radiation) [学] [专] [CIE] 当辐射入射时,产生由此而能测量的物理效应的元件或用具。参看第6章。

[辐射用]热电偶 [radiation] thermocouple [学] [专] [CIE] 被吸收的辐射由于加热两种不同导体(金属或半导体)的接合部分而产生称做塞贝克效应的热电效应的热态受光器。参看第6章。

电热堆 thermopile [学] (只有热电堆) [专] [CIE] [IES] [JIS] 将若干热电偶串联起来得到大量输出的热态受光器。参看第6章。

光电管 phototube [学] [专] [CIE] [JIS] 具有由于外部光电效应而放出电子的阴极和收集这电子的阳极的真空或充气二极管电子管的形式物理受光器。参看第6章。

光电倍增管 photomultiplier [学] [专] [CIE] [JIS] 在光电管的阴极和阳极之间放置1个以上的中间电极,由阴极放出的电子流由于中间电极放出二次电子而被放大的物理受光器。参看第6章。

光电池 photovoltaic cell [学] [专] [CIE] [JIS] 利用金属和半导体的接触部分或半导体的P层和n层的接合部分的光电电动势效应,以在外部电路中得电流为目的的光电变换元件。参看第6章。

光电晶体管 phototransistor [学] [专] [CIE] [JIS] 放大由于光电电动势而产生的电流而取出的晶体形式的光电变换元件。

光导电池 photoconductive cell [学] [专] [CIE] [JIS] 由于内部光电效应,利用因辐射的吸收而增加导电率的半导体的光电变换元件。参看第6章。

光度计 photometer [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 测定光度量用的仪器。按照广义,关于光和辐射的量的测量装置的总称。

(物理光度计的)色修正系数 color correction factor (for a physical photometer) [专] [CIE] [JIS] 对于具有不同于标定辐射的相对光谱分布的辐射使用某一物理光度计,为了得到按照标准光谱灵敏度校准的值,这一物理光度计的读数必须乘上的系数。参看第6章。

积分光度计 integrating photometer [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 通过一次比较就能测定全部光通量的仪器。一般使用的积分光度计是与受光器组合一起的积分球。

积分球、乌布利希球 integrating sphere, Ulbricht sphere [专] [CIE] [JIS] 比较测定一般在空间分布不同的两种光通量的装置,球内涂上对波长尽可能呈非选择性而接近于均匀扩散性的白色涂料,对球的内壁相互之间的相互反射进行积分,使球内表面的任何地方都得到相等的照度,通过小窗将此值导出外部进行光度量。又小窗受到遮挡,使光源的直射光不致进入,再通过小窗取出到

外部, 进行光度量。

光谱光度计 (分光光度计) Spectrophotometer [学] [专] [IES] [JIS]

测量波长函数: 光谱分布、光谱透过率和光谱反射率的光度计。

闪烁光度计 flicker photometer [学] [专] [CIE] [JIS] 目视由进行比较的两种光源交替照射而未加划分的表面的视感光度计。交替变化的频率一般在感觉不到色的融合频率与感觉不到亮度的融合频率之间选取。

照度计 illumination (illuminance) meter, illumination photometer [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 测量照度的仪器。

亮度计 luminance meter [学] [专] [CIE] [JIS] 测量亮度的仪器。参看第 6 章。

单色仪 monochromator [学] [专] [JIS] 按照分散光学系使复合辐射 (由多数单色辐射构成的辐射) 分散, 用来提取它的单色成分的仪器。参看第 6 章。

光密度计 densitometer [学] [专] [CIE] [IES] 测定有关反射光和透射光的光学密度的光度计。物质的光学密度是表示这一物质吸收光的程度的一种量。

测向光度计 goniophotometer [专] [CIE] [IES] 根据光源、照明器、介质、表面的配光特性测定有方向性的光度计。

滤光器 filter [学] [专] [CIE] [IES] 由于通过辐射改变辐射通量或光通量的大小或其光谱分布等的光学元件。由于透射改变所通过的辐射的辐射通量或光通量、或其光谱分布、或同时改变二者的光学元件。选择性滤光器和非选择性滤光器 (中性、中性灰色) 由于改变或不改变辐射的相对光谱分布而有所区别。相当改变辐射的色相的选择性滤光器称做滤色器。参看第 6 章。

干涉滤光器 interference filter [学] [专] [JIS] 利用厚度为光的波长程度的透明或半透明薄膜上光的干涉, 只将特定的窄波长带的光选择性反射或透射的滤光器。

中性滤光器、灰色滤光器 neutral filter; gray filter (美), grey filter (英) [学] [专] [JIS] 对于波长的选择性小, 不很改变入射光的相对光谱分布, 任何波长的光都以大致相等的比率

透射的滤光器。参看第 6 章。

标准色度观测者 standard colorimetric observer [学] [专] [CIE] [JIS] 与国际照明委员会在 1931 年会议上规定的光谱三色刺激值一致的物理受光器。

色的表征 color specification [学] [专] [JIS] 色以数值表示。由心理特性表示色时, 例如应用色相、明度、彩度; 由心理物理特性表示色时, 例如应用三色刺激值。

[CIE] 标准色度体系 CIE standard colorimetric system [学] [专] [CIE] [JIS] 按照国际照明委员会规定的光谱三色刺激值的三色色度体系, 其中国际照明委员会 1931 年标准色度体系和 1964 年辅助标准色度体系。前者根据视场在 4° 以下时光谱三色刺激值 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 而定, 后者根据视场超过 4° 时光谱三色刺激值 $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ 而定。

三色体系 trichromatic system [学] [专] [CIE] [JIS] 由于三个适当选定的原色刺激的加色混合可使一种色刺激等色。按照这种理论创制的表征颜色的体系。

色度 chromaticity [学] [专] [CIE] 由色度坐标, 或由主波长 (或补色主波长) 和纯度表示的色刺激的相对性质。

色度坐标 chromaticity coordinates (of a light) [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 三色刺激值的各自对于其总和的比。例如在国际照明委员会 1931 年标准色度体系中色度坐标 x , y , z 由三色刺激值 X , Y , Z 定义如下:

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$z = Z / (X + Y + Z)$$

色度图 chromaticity diagram [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 表示色刺激混合结果的平面图。在国际照明委员会标准色度体系中一般广泛采用按照色度坐标的直角坐标。

完全辐射体轨迹《黑体轨迹》 full radiator locus, Planckian locus, blackbody locus [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 完全辐射体的辐射色度坐标以温度为参数描绘在色度图上的曲线。

光谱轨迹 spectrum locus [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 单色光的色度坐标以其波长为参数

描绘在色度图上的曲线。

纯紫轨迹 purple boundary [学][专][CIE][IES][JIS] 在色度图上联结光谱轨迹两端的直线。

色刺激 color stimulus [学][专][CIE][JIS] 进入眼睛产生色的感觉的由物理定义的辐射。

三色刺激值 tristimulus values [of a color stimulus] (CIE), [of a light, X, Y, Z] (IES) [学][专][CIE][IES][JIS] 在给定的三色体系中为与作试样的色刺激等色而需要的三个原色刺激的数量。

光谱三色刺激值 spectral tristimulus values [学][专][CIE][IES][JIS] 在给定的三色体系中等能量光谱在各波长上的单色成分三色刺激值。

互补色 complementary color [学][专][CIE][JIS] 由于加色混合而可做成无色刺激的两色刺激称做成为互补色的关系。对于其中的一方称做另一方的互补色。

配色(色匹配) color matching [学][专][CIE][IES][JIS] 为使与给定的色刺激或物体色相等, 调节配出再一种色刺激或物体色。等色主要用于色度等情况。配色主要用于彩色印刷、染色等情况。

条件配色 metamerism [学][专][JIS]

(1) 光谱分布不同的两种色刺激在特定的观测条件看出相等。

(2) 光谱反射系数不同的两种物体的色在特定的照明条件下知觉为相等的色。

(1) 的情况下的辐射或光称做同分异构体。

色相、色调 hue [学][专][CIE][IES][JIS] 与红、黄、绿、紫等基本色名有关被识别的视知觉的属性。在IES中规定与上述同样的物体色为“看到的物体色的色调”, 此外还规定光源色为“光源色的色调”。

明度 lightness (of a perceived object color) (IES) [学][专][CIE][IES][JIS] 用心理尺标表示识别物体色的明亮的视知觉的属性。

彩度、饱和度 saturation [学][专][CIE][IES][JIS] 根据与同样明度的无色相隔离的程度用心理尺标表示识别物体色的鲜明的视知觉的属性。在IES中规定与上述同样的物体色为“看到的物体色的饱和度”, 此外还规定光源色为“看到的光

源色的饱和度”。

无色 achromatic color [学][专][CIE][JIS] 没有色相(色调)的知觉的色。

(1) 对于色刺激来说, 等能量光谱 ($x = y = z = 1/3$) 的色可以用作无色。

(2) 对于物体来说, 光谱反射系数一定的表面的色是无色, 这时的色刺激的色度等于用作标准光的光源的色度。

有色 chromatic color [学][专][CIE] 有色相(色调)的色。

孔阑色 aperture color [专][CIE][JIS] 像通过孔阑观看色一样, 在对于发光物体的距离或大小不产生认识的观测条件下观测的色。

光源色 self-luminous color; light-source color (IES) [学][专][CIE][IES][JIS] 由光源发出的光的色刺激。

显色 color rendering [学][专][CIE][IES][JIS] 照明光对于物体色的可见度的影响的一般表现。

显色性 color rendering properties [专][CIE][JIS] 在规定的条件下与来自标准光源的物体色的可见度相比较, 来自某一光源的物体色和可见度的效果或这一光源的属性。

[光源]显色指数 color rendering index [of a light source (IES)] [专][CIE][IES][JIS] 在规定的条件下, 由光源照明的物体色与由标准光源照明时相比较, 表示物体色在视觉上的变化程度的参数。

表面色 surface color [学][专] 由不透明的物体反射出来的色。

物体色 object color [学][专][CIE][IES][JIS] 由以标准光源的光例如 CIE 的标准光照明的物体反射出来或透射出来的光而知觉的色。

色度计 colorimeter [学][专][CIE][JIS] 测定表示色的数值的仪器。参看第 6 章。

辐[射]通量、辐[射]功率 radiant flux, radiant power [学][专][CIE][IES][JIS] 以辐射(电磁波或粒子)的形式从以任意闭曲线为边界的曲面发射、或通过这曲面、或被这曲面接受的能量的单位时间的比率。

符号: Φ_r , Φ , P

$$\Phi_e = dQ_e/dt$$

单位: 瓦, W

参看第6章。

【辐射通量的】光谱光视效能 spectral luminous efficacy [of radiant flux (IES)] [学] [专] [IES] [JIS] 对于波长 λ 的单色辐射, 将其辐射通量 $\Phi_{e,\lambda}$ 作为光通量 Φ_v,λ 来评价时的效率。

符号: $K(\lambda)$

$$K(\lambda) = \Phi_{v,\lambda} / \Phi_{e,\lambda}$$

单位: 流明/瓦, $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$

一般对明视觉而言。对暗视觉采取光度量时由符号 $K'(\lambda)$ 来区别。参看第六章。

标准【观测者】光谱光视效率 spectral luminous efficiency [of a standard observer] [学] [专] [JIS] 采取对多数观测者的平均值作为国际上规定的光谱光视效率。

符号: $V(\lambda)$ (明视觉)

$V'(\lambda)$ (暗视觉)

(1) $V(\lambda)$ 值与对 2° 视场 (由 1° 至 4° 的视场) 的光谱三色刺激值的 $\bar{y}(\lambda)$ 值一致, 但对 10° 视场 (超过 4° 的视场) 的光谱三色刺激值的 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 值并不用于光度方面的目的。

(2) 用作对明视觉的标准光谱光视效率 $V(\lambda)$ 值在1971年由国际照明委员会采用, 在1972年由国际度量衡委员会推荐。

(3) 对暗视觉的标准光谱光视效率 $V'(\lambda)$ 值在1951年由国际照明委员会暂定为适用于年轻观测者的值。参看第6章。

【波长 λ 的单色辐射的】光谱光视效率 spectral luminous efficiency [of a monochromatic radiation of wavelength λ (CIE)] [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 在特定的观测条件下, 对于波长 λ_m 的辐射亮度来说, 明亮度 (主观亮度) 的感觉与其相等的波长 λ 的辐射亮度之比的倒数, 选取波长 λ_m 使此值的最大值为1。特定的观测条件指观测者的适应状态和视场的大小。即使指定了观测条件, 光谱光视效率也会有个人差别。参看第6章。

最大光谱光视效能 maximum luminous efficacy [专] [JIS] 光谱光视效能 $K(\lambda)$ 对于波长 λ 采取的最大值。

符号: K_m

单位: 流明/瓦, $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$

(1) 光谱光视效能 $K(\lambda)$ 采取最大值的波长 λ_m 为555毫微米, K_m 的概值为

$$K_m = K(\lambda_m) \approx 680 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$$

(2) 对明视觉采取光度量时, 由符号 K'_m 来区别。光谱光视效能 $K'(\lambda)$ 在波长 λ 为507毫微米时取最大值, 它的计算值为

$$K'_m = 1725 \text{ "夜间"} \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$$

(3) 最大光谱光视效能为光的最小功当量的倒数。参看第6章。

折射率 refractive index [学] [专] [CIE] [JIS] 在真空中的光速 c 和介质中频率为 ν 的单色辐射的相位速度 $v_p(\nu)$ 之比。

符号: $n(\nu)$, n

$$n(\nu) = c / v_p(\nu)$$

这一指数等于光线通过真空和介质的界面时入射角 θ_1 和折射角 θ_2 的正弦之比。参看第3章。

透射系数 transmittance, transmission factor [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 透射辐射通量或光通量对入射辐射通量或光通量之比。

符号: τ_r , τ_d , τ

$$\tau = \tau_r + \tau_d$$

式中 τ_r ——规则(定向)透射系数; τ_d ——漫透射系数。

规则(定向)透射系数 regular transmittance [专] [IES] [JIS] 规则透射的辐射通量或光通量之比。

符号: τ_r

漫透射系数 diffuse transmittance [学] [专] [IES] [JIS] 向一切方向漫透射的辐射通量或光通量对入射辐射量或光通量之比。

符号: τ_d

反射系数 reflectance, reflection factor [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 反射辐射通量或光通量对入射辐射通量或光通量之比。

符号: ρ_r , ρ_d , ρ

$$\rho = \rho_r + \rho_d$$

式中 ρ_r ——规则(定向)反射系数; ρ_d ——漫反射系数。

规则(定向、镜面)反射系数 regular reflectance, specular reflectance [学] [专] [IES] [JIS] 规则反射的辐射通量或光通量对入射的辐射通量或光通量之比。

符号: ρ_r

漫反射系数 diffuse reflectance [学] [专] [IIS] [JIS] 向一切方向漫反射的辐射通量或光通量对入射辐射通量或光通量之比。

符号: ρ_d

吸收系数 absorptance, absorption factor [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 吸收辐射通量或光通量对入射辐射通量或光通量之比。

符号: $\alpha_s, \alpha_o, \alpha$

【介质的】光谱透射系数 spectral transmittance [of a medium (IES)] [专] [CIE] [IES] [JIS] 对于单色辐射的透射系数。

符号: $\tau(\lambda)$

【表面或介质的】光谱反射系数 spectral reflectance [of a surface or medium (IES)] [专] [CIE] [IES] [JIS] 关于单色辐射的反射系数。

符号: $\rho(\lambda)$

【热辐射体的】发射率 emissivity [of a thermal radiator (CIE)] [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 热辐射体的发散本领及与此辐射体同温度的完全辐射体的发散本领之比。

符号: ε

$\varepsilon = M_{e, \lambda} / M_o$ ($\varepsilon = 1$) 参看第3章。

光谱发射率 spectral emissivity [专] [IES] 热辐射体的某单一波长的发射本领及与此同温度之下完全辐射体的同一波长的发射本领之比。

符号: $\varepsilon(\lambda)$

光通量 luminous flux [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 对于具有与标准光谱光视效率成比例的光谱光视效率的物理受光器辐射发生作用, 根据它评价辐射通量而得到的量。

符号: Φ_v, Φ

单位: 流明, lm

除了特别指明以外, 光通量是就明视觉的情况而言, 由下式表示:

$$\Phi_v = K_m \int_0^{\infty} \Phi_{e, \lambda} V(\lambda) d\lambda$$

式中, K_m ——最大光谱光视效能; $\Phi_{e, \lambda}$ ——在波长 λ 下辐射通量的光谱密度; $V(\lambda)$ ——标准光谱光视效率。

光通密度 luminous flux [surface] density [at a point of a surface (CIE)], [at a surface,

$d\Phi/dA$ (IES)] [学] [专] [CIE] [IES] 包括注视点在内通过与辐射方向垂直的微元面积的光通量对单位面积的比率。符号: D

单位: 流明每平方米, lm/m^2 。

发光强度 luminous intensity [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 由点光源发射出来进入包含观测方向的微小立体角内的光通量对单位立体角的比率。

符号: $I_o, I; I_o = d\Phi_v/d\Omega$

单位: 坎德拉, cd

当非点光源时, 在观测点上, 到达包含这点的微小面积元素内的光通量除以光源内的任意点对这微小面积元素的立体角的值, 采取微小面积元素距光源无限大时的极限。参看第6章。

【光】照度 illuminance [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 入射到包含注视点的微小面积元素上的光通量对单位面积的比率。

符号: E_o, E

$$E_o = d\Phi_v/dS$$

单位: 勒克斯, lx

参看第6章。

【光】亮度 luminance [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 光从发射面上任意一点向观测方向的光强对包含这一点的微小面积元素向观测方向的正投影面上的单位面积的比率。

符号: L_o, L

$$L_o = \frac{dI_o}{dA \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA \cos\theta}$$

单位: 坎德拉/平方米, cd/m^2 ; 尼特, nt

由观测点看光的发射面时的亮度是在观测点上垂直于观测方向的面上的照度除以以观测点为顶点以光的发射面为底的立体角的值, 采取这一立体角收敛为零的极限。参看第6章。

光出射度 luminous exitance [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 从包含注视点的微小面积元素发出的光通量对单位面积的比率。

符号: M_o, M

$$M_o = d\Phi_v/dA$$

单位: 流明/平方米, lm/m^2

光的发射面为均匀漫射面时, 亮度 L 在一切方向是均匀的。因此, 立体角用球面度测量, 亮度用坎德拉每平方米表示时, $M = \pi L$ 。又亮度用阿坡照

提表示时 $M = L$ ，亮度和发光度在数值上相等。参看第 6 章。

辐射效率 radiant efficiency [of a source of radiation (CIE)] [专] [CIE] [JIS] 由辐射源发生的全部辐射通量与使其发生而耗用的电力之比。

符号: η_r, η

光视效能、辐射的光视效能 luminous efficacy [of radiation (CIE)] [学] (只有发光效率) [专] [CIE] [IES] [JIS] 发生的全部光通量 Φ_v 除以辐射出来的全部辐射通量 Φ_e 的商。

符号: 1. 对于复合辐射 K

$$K = \Phi_v / \Phi_e$$

2. 对于波长 λ 的单色辐射 $K(\lambda)$

$$\begin{aligned} K(\lambda) &= \Phi_{v,\lambda} / \Phi_{e,\lambda} \\ &= (d\Phi_v/d\lambda) / (d\Phi_e/d\lambda) \\ &= K_m V(\lambda) \end{aligned}$$

单位: 流明/瓦, $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$

$K(\lambda)$ 为光谱灵敏度, 其最大值即最大光谱灵敏度用 K_m 表示。

【光源的】发光效率 luminous efficacy [of a source] [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 光源的全部光通量除以向这光源输入的电力之商。

符号: η_s, η

单位: 流明/瓦, $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$

辐【射】出【射】度 radiant exitance [at a point of a surface (CIE)] [专] [CIE] [IES] [JIS] 由包含注视点的微小面积元素发生的辐射通量对单位面积的比率。

符号: M_e, M

$$M_e = d\Phi_e / dA = \int L_e \cos\theta d\Omega$$

单位: 瓦/平方米, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

当发射辐射的面为均匀漫射面时, L_e 在一切方向是均匀的。因此, 立体角用球面度测量, 辐射亮度用瓦每球面度·每平方米来表示时, 辐【射】出【射】度在数值上 $M_e = \pi L_e$ 。参看第 6 章。

辐【射】强度 radiant intensity [of a source in a given direction] [专] [CIE] [IES] [JIS] 向观测方向进入以点辐射源为顶点的微小立体角内的辐射通量对单位立体角的比率。

符号: I_e, I

$$I_e = d\Phi_e / d\Omega$$

单位: 瓦/球面度, $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$

当辐射源不是点时, 在观测点到达包含这点的微小面积元上的辐射通量除以辐射源内任意点对这微小面积元的立体角的值, 采取微小面积元距辐射源为无限小时的极限。参看第 6 章。

辐【射】照度 irradiance [at a point of a surface] [专] [CIE] [IES] [JIS] 入射到包含注视点的微小面积元上的辐射通量对单位面积的比率。

符号: E_e, E

$$E_e = d\Phi_e / dS$$

单位: 瓦/平方米, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

参看第 6 章。

辐【射】亮度 radiance [in a given direction] [专] [CIE] [IES] [JIS] 从辐射发射面上任意一点向观测方向的辐射强度对包含这一点的微小面积元向观测方向的正投影面的单位面积的比率。

符号: L_e, L

$$\begin{aligned} L_e &= dI_e / (dA \cos\theta) \\ &= d^2\Phi_e / (d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta) \end{aligned}$$

单位: 瓦/球面度·平方米, $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

由观测点看辐射的发射面时的辐射亮度, 是在观测点上垂直于观测方向的面上的辐【射】照度除以观测点为顶点以辐射的发射面为底的立体角的值, 取使立体角收敛为零的极限。参看第 6 章。

亮温度 luminance temperature [专] [CIE] [JIS] 在特定的波长下的光谱亮度等于注视的辐射体的光谱亮度的完全辐射体的温度。

单位: 开, K

应用光学高温计进行温度的光谱灵敏度测定时, 标准波长一般为 655 毫微米。

色温【度】 color temperature [of a light source (IES)] [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 发出与注视的辐射的色度相等的辐射的完全辐射体的温度。某一光线的色度相等或色度至少近似相等的完全辐射体的绝对温度称做这光线的色温度。表示这一光线的颜色的术语。

单位: 开, K

条件等色一致时, 对应的相对光谱分布并不一定相似。

光谱分布温度、分布温度 distribution temperature [专] [CIE] [IES] [JIS] 在可见光区域内发出与注视的辐射的相对光谱分布相等或最近的光谱分布的辐射的完全辐射体的温度。

单位: 开, K

两方面的辐射必然具有相等的或几乎相等的色度。

光谱分布 spectral distribution ((1) of a radiometric quantity; (2) of a photometric quantity) [学] [专] [CIE] [JIS]

(1) 作为波长的函数的辐射量的光谱密度。

(2) 作为波长的函数的光度量的光谱密度。

通常使用相对光谱分布。这是用任意尺度表示的辐射量或光度量的光谱密度。

光谱密度包含在以注视的波长为中心的微小波长幅度内的辐射量或光度量对单位波长幅度的比率。

$$x_{e,\lambda} = dx_e/d\lambda$$

$$x_{v,\lambda} = dx_v/d\lambda$$

光量 quantity of light ((= luminous energy (IES))) [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 光通量的时间积分量。

符号: Q_v, Q

$$Q_v = \int \Phi_v dt$$

单位: 流明-秒, $lm \cdot s$

参看第六章。

流明 lumen [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 国际单位体系中的单位。以对一切方向相等的具有 1 坎德拉的光强的点光源在单位立体角(1 球面度)内辐射出来的光通量(第 9 届度量衡大会, 1948)。

单位符号: lm

参看第 6 章。

坎【德拉】 candela [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 国际单位体系中光强的单位。在 101325 帕的气压下垂直于铂凝固温度下完全辐射体(黑体)的 $1/600000$ 平方米的面积的方向的光强(第 13 届国际度量衡大会, 1967)。

单位符号: cd, $1cd = 1lm \cdot sr^{-1}$

参看第 6 章。

勒【克斯】 lux [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 国际单位体系中照度的单位。在 1 平方米的面积上均匀分布着 1 流明的光通量从而产生的照度。

单位符号: lx, $1lx = 1lm \cdot m^{-2}$

参看第 6 章。

坎【德拉】每平方米 candela per square meter [学] [专] [CIE] [JIS] 国际单位体系中亮度的单位。

单位符号: $cd \cdot m^{-2}$

亮度的其它单位:

(1) 公制

1 熙提: $1sb = 10^4 cd \cdot m^{-2}$

1 阿熙提: $1asb = \frac{1}{\pi} cd \cdot m^{-2}$

1 朗伯: $1L = \frac{10^4}{\pi} cd \cdot m^{-2}$

(2) 非公制

1 英尺朗伯: $1fl = 3126 cd \cdot m^{-2}$

参看第 6 章。

尼特 nit [专] [IES] [JIS] 亮度的单位。坎德拉每平方米的别名。主要在美国常用。

单位符号: nt

阿熙提 apostilb [专] [IES] [JIS] 从均匀漫射面的发光度中推导出来的亮度的单位。

单位符号: asb, $1asb = \frac{1}{\pi} cd \cdot m^{-2}$

朗伯 lambert [专] [IES] 从均匀漫射面的发光度中推导出来的亮度的单位。

单位符号: L, $1L = \frac{10^4}{\pi} cd \cdot m^{-2}$

$$= \frac{1}{\pi} cd \cdot cm^{-2}$$

辐射勒【克斯】 radlux [专] [JIS] 发光度的单位。流明每平方米的别名。

单位符号: rlx

参看第 6 章。

辐透 phot [专] [IES] [JIS]

$1phot = 1lm \cdot cm^{-2}$

$= 10^4 lx$

29-4 光源及其有关设备

光源 light source; lamp(CIE, IES) [学] [专] [CIE] [IES] 用于照明、光信息和光控制等的发光体,是“由于能量的转变而发出光来的表面或物体”,一般多指人工光源。

这种光源也称做一次光源。

白炽灯 incandescent(electric)lamp(CIE), incandescent filament lamp(IES) [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 从通过电流加热至白炽状态的物体中发光的光源。由于发光要素是碳或金属而称做碳丝灯或金属丝灯。后者有直丝灯、单卷丝灯或叠卷丝灯。

真空灯泡 vacuum lamp [专] [CIE] [JIS] 在玻壳内保持真空,特别是不封入气体的灯泡。现有的钨丝灯中有小型的或特殊型的。钨丝灯以前的灯泡就是这种。又钨丝灯是指灯丝用钨制的灯泡。

充气灯泡 gasfilled lamp [专] [CIE] [JIS] 发光要素在封入惰性气体的玻壳内工作的白炽灯。还定义为封入惰性气体的白炽灯。氩中混入少量的氮用来作为惰性气体,氩、氮的性能良好,但由于经济的原因除了极特殊的情况外并不使用。

卤钨灯 tungsten-halogen lamp [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 以一定的比率封入碘、溴等卤族元素或其化合物的充气灯泡。在开灯时由于卤素循环会有防止蒸发的钨附着于玻壳壁上以致产生黑化的作用。因此如果效率相同,它比充入普通气体的灯泡寿命要长,又如果寿命相同,它还可以提高效率。为了实现卤素循环,必须提高玻壳的温度,因此采用小型耐热的灯泡。

摄影闪光灯 photoflash lamp (CIE, IES) [学] [专] [CIE] [IES] 由于玻壳内的燃烧而照明被拍摄物体,限制在短时间内发出大的输出的灯泡。此外还有使用氙气体在极短的时间内发光而且发出高光强的输出的摄影用放电灯。

参看氙闪光灯。

红外线灯 infrared lamp [学] [专] [CIE] 红外线的辐射特别强,并不以发生可见辐射为直接目的的灯泡。

辉光放电灯 glow lamp(IES); negative-glow lamp(CIE) [学] [专] [CIE] [IES] 直接

或间接利用阴极辉光的辐射光的放电灯。

碳弧灯 carbon arc lamp (CIE); carbon-arc lamp(IES) [专] [CIE] [IES] [JIS] 利用碳极之间的弧光放电的放电灯。除了低电流密度的类型以外,还有为了改善发光效率、光谱分布的高电流密度的类型,应用包含发出辐射的物质的碳极的类型。

气体放电灯 discharge lamp [学] [专] [CIE] [JIS] 由于气体、金属蒸气或几种气体与蒸气的混合物内的放电而发光的灯。

热阴极放电灯 hot cathode lamp(CIE); hot-cathode lamp(IES) [学] [专] [CIE] [IES] 由弧光放电的阳光柱发光的放电灯。维持放电主要依靠从阴极放出热电子,阴极损耗比较小。

冷阴极放电灯 cold cathode lamp(CIE); cold cathode lamp(IES) [学] [专] [CIE] [IES] 由辉光放电的阳光柱发光的放电灯。维持放电主要依靠从阴极放出二次电子,阴极损耗比较大(70伏以上),在阴极的电流密度比较小(10安/米²左右)。

荧光灯 fluorescent lamp [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 发光的主要部分为由放电而产生的紫外线辐射所激发的荧光物质的光致发光的放电灯。

汞灯·水银灯 mercury(vapour)lamp [学] [专] [IES] 主要由汞原子的激发而发光的放电灯。在开灯时根据蒸气的分压力低的、高的、特别高的而分别称做低压汞灯、高压汞灯、超高压汞灯。

高压汞灯 high pressure mercury(vapour) lamp [学] [专] [CIE] [JIS] 在开灯时蒸气的分压力在10⁵牛顿/米²以上的汞灯。有涂荧光物质的类型和不涂的类型。

荧光(高压)汞灯 fluorescent high pressure mercury(vapour) lamp; fluorescent-mercury lamp(IES) [专] [IES] [JIS] 在外管(玻壳)上涂荧光物质的高压汞灯。

自镇流型汞灯 self-ballasted mercury lamp(美)(CIE); blended lamp(英)(CIE)(IES);

self-ballasted lamp (IES) [专] [CIE] [IES] [JIS] 汞灯的发光管和白炽灯丝串联一起装在同一玻壳内的放电灯。

低压钠灯 low pressure sodium (vapour) lamp [学] [专] [CIE] [JIS] 在开灯时蒸气分压力在几个牛顿·米²以下的钠蒸气放电灯。

高压钠灯 high pressure sodium (vapour) lamp [学] [专] [CIE] [JIS] 在开灯时蒸气分压力在10⁴牛顿·米²左右的钠蒸气放电灯。

氙灯 xenon lamp [学] [专] [JIS] 主要由于氙气体的激发而发光的放电灯。

金属卤化物灯 (metal)halide lamp [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 封入金属卤化物(例如碘化铊、碘化钠等)的放电灯,在开灯时金属卤化物蒸发分解,可以得到金属特有的发光。大部分是在高压汞灯中添加金属卤化物的类型,此外还有在超高压汞灯中添加的类型、在不含汞的稀玻璃放电灯中添加的类型。

高强放电灯 high-intensity discharge lamps [IES] 由汞灯、金属卤化物灯、高压钠灯组成的灯类的总称。在日本简称为“HID灯”。这一类的灯和其它放电灯相比,灯的表面的单位面积的发光度高,管壁负荷超过3瓦·厘米⁻²。

黑光灯 black light lamp [学] [专] [CIE] 主要发出波长360毫微米左右的紫外辐射,几乎不发出可见辐射的灯。有黑光荧光灯、黑光高压汞灯。

杀菌灯 bactericidal lamp; germicidal lamp [学] [专] [CIE] 主要发生杀菌性紫外辐射(波长253.7毫微米)的低压汞灯。

霓虹灯 neon tubing [专] [JIS] 主要由于氖气体的辉光放电的阳光柱而发光的管形放电灯。包括同样形式的汞、氩、氦等的辉光放电灯。

氙闪光灯 xenon electronic-flash lamp (英); xenon flash tube(美) [专] [JIS] 由于灯的特殊构造和附属电子开灯装置在极短时间内发光的氙灯。

电致发光灯、EL灯(JIS) electroluminescent source; electroluminescent lamp; electroluminescent panel [专] [CIE] [JIS] 由于电致发光现象而发光的光源。这是在两片透明的电极之间夹入装在有机或陶质诱导体内的荧光层的构造,荧光层

由于交流电压而发光。它的亮度随着电压和频率而增加。

反射式灯泡 reflector lamp [专] [CIE] [JIS] 一般在适当形状的部分玻壳上附以反射性物质的镀膜,使配光具有方向性的白炽灯或放电灯。在这种灯中有以下类型:

加压成型式玻壳——由于互相融附的两种成型玻璃部分,即由金属蒸发附着的反射部分和前面部分构成光学系统的灯泡。

屏蔽光束式玻壳——加压成型式玻壳的一种,设计成发生经过严密控制的光束的灯泡。

指示灯 pilot lamp [学] [专] 表示系统或电路的工况的光源。

辉光起动器 glow switch starter [学] [专] [JIS] 由内装放电灯起动的双金属片的辉光放电管而组成的灯的起动装置。

灯头 base(美); cap(英) [学] [专] [CIE] [JIS] 在灯座上保持光源而与电源连接的灯的构造部分。

(1) base这一术语在英美两国也用于指没有灯头的灯的端部。

(2) 灯头及与其对应的灯座一般由一个或多数文字及与其连续的数字来区别。这一数字用毫米表示这灯头的主要尺寸(一般为直径)的概数值。

灯座 lamp-holder(英); socket(美) [专] [CIE] 为使灯泡、放电灯保持固定位置并能与电源连接通电,将灯泡、放电灯的灯头插入的相应配件。

时效 aging; ageing; seasoning [学] [专] [JIS] 一般将材料、零件等在使用以前放置一定时间使其特性稳定的操作。即对灯泡、放电灯等情况在制做以后按照特定条件早期开灯,使灯丝、电极等的状态稳定,从而使电压、电流、光通量等大致达到一定。电泡的时效多用超电压进行。也指老化、陈化。

镇流器 ballast [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 为使放电稳定而与放电灯一起使用的装置。镇流器可以是电阻性、电感性或电容性回路中的任何一种或这些的组合。又镇流器本身或与起动器组合用于放电灯的起动。此外,有时起动器还组装在镇流器中。

稳流电阻 ballast(resistance); steady res-

istance [学][专] 为使放电稳定, 串联在放电灯上的电阻。

起动机、启辉器 starter [专][CIE][IES][JIS] 在放电灯的电极上进行必要的预热, 同时由于它们及与其串联的镇流器的组合促使发生浪涌电压的放电灯(特别是荧光灯)的启动装置。

快速启动 rapid start [专] 加热电极, 同时在电极之间增加电压, 在短时间内使放电灯(特别是荧光灯)启动的方式。这种方式的热阴极荧光灯称做“快速启动型荧光灯”(JIS)。

预热启动 preheat start; hot start [专] 预热电极后, 在电极之间增加电压, 使放电灯(特别是荧光灯)启动的方式。这种方式的热阴极荧光灯称做“预热荧光灯”(IES, JIS)。

【光源的】初始特性 initial characteristics [学][专][JIS] 在时效后的寿命特性初期按照特定的条件开灯时的光源特性(电压、灯泡、光通量等)。寿命特性初期指时效完结后或更持续的一段时间(例如100小时)内开灯的时间。

【光源的】寿命 life[of a lamp] [学][专][CIE][JIS] 光源光通量下降到它的初始特性值的一定比例(例如80%)以前的累计开灯时间。

【光源的】额定寿命 rated life[of a lamp] [专][CIE] 成为设计和使用标准的寿命。对按照额定电压、电流等开灯时同一形式的全部制品所期

待的寿命值。但CIE却规定为并非期待的公布寿命。

【光源的】寿命试验 life test [of lamps]; life test of lamps (IES) [学][专][CIE][IES] 在规定的条件下规定的时间或寿命完结为止利用光源(多数)点灯, 而且在这期间中以规定的时间间隔进行光度测定的试验。

寿命特性 life performance [学][专][IES] 光源上的光通量、光强、效率、电压、电流等值在寿命试验中的时间变化。表示这一变化的曲线称做寿命特性曲线(IES)。

点灯、燃灯 burning, operating [学][专] 将能量供给光源使其发光。将额定值的电压等供给光源而处于稳定状态, 这一现象多解释为燃灯。

【光源的】启动电压 starting voltage[of a lamp]; ignition voltage [学][专][CIE][JIS] 在放电灯中持续放电开始时需要的电极之间的最低电压。

灯电压、管电压 lamp voltage; tube voltage [学][专][CIE][JIS] 稳定工作中的放电灯的电极之间的电压(在交流情况下为有效值)。

光中心距离 light center length [专] 光源的发光中心(灯丝中心、电极间中心等)和光源的设置基准面(灯头的特定位置等)之间的长度。

29-5 灯具和附属设备

投光器 projector [学][专][CIE][IES][JIS] 利用反射镜或透镜向某一范围的方向得到高光强的照明灯具。由于反射镜或透镜口径的大小, 光学性能大别为以下3类:

(1) 探照灯: 通常口径在0.2米以上发出大致平行的光束的投光器。

(2) 聚光灯: 通常口径在0.2米以下发出开角在20°以下的光束的投光器。

(3) 泛光灯: 为投光照明而设计的投光器, 通常能指向任意方向, 有露明式构造和密闭式构造。

反射器 reflector [学][专][CIE][IES][JIS] 主要利用反射现象改变光源的光通量的空间分布的装置。

漫射器 diffuser [学][专][CIE][IES][JIS] 主要利用漫射现象改变光源的光通量的空间分布的装置。

折射器 refractor [学][专][CIE][IES][JIS] 主要利用折射现象改变光源的光通量的空间分布的装置。

灯具、照明器 luminaire; lighting fitting (英)[学][专][CIE][IES][JIS] 为了改变光源光通量的空间分布或光谱分布, 具有赋予时间变化的功能, 固定和保持它们的光源, 并为与电源连接而需要的由各种材料组成的照明用部件。又部件要素除了包括点灯所需的附属装置例如镇流器以外, 还包括适当的光源。此外, 译词中的特例如下:

(1) (portable) lamp 译为移动式灯

具。

(2) lantern (灯具) 一般用于英国的道路照明、运动场、剧场照明标准中。

防爆灯具 luminaire for explosive gas atmosphere [专] [JIS] 在有气体爆炸危险的地方能安全点灯的照明器。

耐压防爆灯具 explosion proof luminaire; flame proof (lighting) fitting (英) [专] 构造完全密闭, 在照明器的容器内部爆炸性气体发生爆炸时, 这一容器能够抵抗它的压力, 而且不致由于外部的爆炸性气体引火的灯具。

(1) 制品必须符合劳动安全卫生法令的规定, 经过检验合格。

(2) 相对应的外国语是针对符合各国规定的制品的术语, 对其细部来说, 性能、构造未必一致。

增强式安全防爆灯具 increased safety type luminaire [专] 在通常使用时不得发生电弧或高温的部分, 对于构造和温度升高特别要增加安全性, 以便防止发生这些。它就是具有这种构造的密闭式灯具。

(1) 和耐压防爆灯具的(1)相同。

(2) 由于国家不同而没有与此相应的规定。

防水灯具 water-proof luminaire [专] 构造上对浸水能保护功能的照明器。在JIS中根据它的保护程度(表示出CIE中各种类型的译词)而有防滴、防雨、防溅、防喷射、耐水、防浸、水下、防湿的区别。

在日本对浸水能保护的照明器统称防水灯具, 在国外则没有概括的正式术语, 而使用独立的术语, 如防滴灯具、防雨灯具等。在IES中没有正式术语, 以防湿灯具一词概括应用。

嵌装式灯具 recessed luminaire(IES); recessed lighting fitting (CIE/IES) [专] [CIE] [JIS] 在建筑物中将其全部或一部暗装的灯具。在美国分为凹装式灯具(recessed luminaire)(灯具的开口部分凹进建筑物表面的内侧的暗装式灯具)、平装式灯具(recessed luminaire, flush mounted luminaire)(灯具的开口部分与建筑物的表面在同一水平上的灯具)、长装式灯具(troffer)(延长的暗装式灯具)。

吸顶式灯具 surface mounted luminaire

[专] [CIE] [IES] [JIS] 直接安装在建筑物的表面上的灯具。在荧光灯出现前后本来是“直接安装在顶棚表面上的灯具”, 但是由于同一灯具可以安装在顶棚或墙壁上, 就改变了意义。“吸顶式灯具(surface mounted luminaire)(美)”、“顶棚照明器(ceiling fitting)(英)”都有直接安装在顶棚上的灯具的意义。

吊装式灯具 suspended ((pendent)) luminaire [专] [CIE] [IES] [JIS] 从建筑物上用软线、链、管等吊装的灯具。

空调式灯具 air-handling luminaire 为与空气调节系统组合使用而特别设计的灯具。

枝形吊灯、花灯 同时布置多数光源和多数主要成为折射器的小型透明体, 利用直射光、间接光等创造出华丽的气氛的吊装式灯具或照明设备。

它始于欧洲中世纪的宫殿照明。当时在枝形灯具上插上蜡烛来点灯, 现在使用多数灯泡和小型玻璃部件所组成的“蜡烛”, 创造出豪华的感觉, 而增多艺术照明设备的意义。

事故照明灯具 luminaire for emergency general lighting [专] 由于发出火灾等灾害而停电时, 为了抑制由于黑暗而引起的心理动摇, 照亮避难经路, 从常用电源的点灯状态自动转换为备用电源持续点灯的一般照明用灯具。这种灯具由建筑基准法加以规定, 要求在停电时利用事故电源即时点灯, 而且在30分钟内保持1勒克斯(荧光灯则为2勒克斯)以上, 适于直接照明, 具有一定程度的耐热性, 在停电及停电恢复正常时能够自动切换。

太平门用灯具 luminaire for emergency exit signs [专] 由于发生火灾等灾害而致停电事故时, 从常用电源的点灯状态自动转换为备用电源持续点灯, 以便表示太平门或至太平门的通道的灯具。这一术语由消防法规定, 大致分为太平门灯、通道灯、观众席灯。它们的构造、性能、试验等详细载于根据消防法令规定的太平门用灯具技术标准JIL 5502-1977中。

发光顶棚 luminous ceiling [专] [CIE] [IES] [JIS] 在大部分顶棚上安装漫射透射板(照明用板)并在它的上面布置光源的照明系统。可以认为具有直接照明的配光。

顶棚灯 ceiling luminaire; ceiling (light-

ing) fitting [专] [JIS] 在顶棚上安装的灯具。主要用于一般照明。

壁灯、墙灯 wall luminaire; wall (lighting) fitting; wall bracket [专] [CIE] [JIS] 在墙壁、柱上安装的灯具。

下射灯 downlight [专] [CIE] [IES] [JIS] 通常在顶棚上暗装的小型直射灯具。在美国有顶棚暗装式和悬挂式。配光多呈狭照型。

手提灯 hand lamp (英); trouble lamp (美) [专] [CIE] [JIS] 用移动电线连接到电源而且有柄(手柄、把手)的移动式灯具。

前大灯 head-lamp; head lamp [专] [CIE] [IES] 安装在车辆等的前部对照亮它的前方起主要作用的灯具。投光器的一种。

闪光灯、点灭灯 flashing light [专] [CIE] [IES] 明暗的周期一定, 明的全部持续时间显然短于暗的全部持续时间, 明的闪光时间完全相等的光信号(机)。“为使交通暂时停止(红色光), 或为使缓行或表示存在危险(黄色光), 以一定周期点灭的有色光信号(机)”。在这种情况下称做“点灭灯”

台灯、桌灯 table lamp [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 放在家具、用具上面应用的有低支柱的移动式灯具。

落地灯、立灯 floor lamp [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 立在地面上应用的有高支柱的移动式灯具。

反射罩 reflector [学] [专] [JIS] 用反射性材料制做遮挡光源一部并改变它的配光的反射器。

灯罩、灯伞 shade [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 为了防止直接看到光源遮挡它的一部分而设计的并为改变配光或光色而用不透明或漫透材料等制做的遮光性用具。

格栅、格片 louver [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 为了在给定的角度以外不能直接看到光源, 按照几何学布置的由半透明或不透明构件制成的遮光性用具。

球型罩 globe [学] [专] [CIE] [IES] [JIS] 为了保护光源、漫射光线或改变光色、遮挡光源的大部分而设计的用透明或漫透射性材料制做的漫射

器。

灯座 (lamp) socket; lamp holder [学] [专] [CIE] [JIS] 插入光源的灯头、保持在固定位置、对光源供给电力的装置。

透光罩、照明罩 translucent cover; (lighting) cover [专] [JIS] 为了兼有保护光源的作用并遮挡它而用透明或漫透射材料制做的照明用具。

碗形罩 bowl [专] [CIE] [IES] [JIS] 放在光源下面应用的碗形漫射器、折射器或反射器。特别是只有反射性能的称做反射罩。

费涅尔透镜 Fresnel lens [专] [JIS] 为了减少厚度分为若干带状部分而设计制做的聚光透镜的一种。

乳白玻璃 opal glass [专] [CIE] [JIS] 光大致进行均匀的漫透射的乳白色玻璃。

夹层玻璃 flashed glass [专] [CIE] [JIS] 由两种以上不同的层制成的玻璃, 一般由一层不透明玻璃与另一层乳白玻璃、半乳白玻璃或彩色玻璃中的任何一种制成。由透明和乳白色两层制成的玻璃特称做乳白夹层玻璃 (JIS)。

光电自动控光器 (光电自控开关) photoelectric control [专] 使用光电池按照昼夜的区别自动控制光源的开灯关灯的器件。

调光器 dimmer [专] [CIE] 为了调节照度等级可以改变照明器或照明设备的光源光通量的装置。

(1) 容量1千瓦以下的类型称做调光器, 大容量而作为系统调光的类型称做调光机或调光装置。

(2) 调光方式有电压调节式和利用半导体的电流相位控制式。

截光角 cut-off angle (of a luminaire) 对于看不到安装在灯具上的裸光源时的界限视线和垂直轴之间的角由最下点向上测量的角。“90°-遮挡角”称做保护角。

灯具效率 luminaire efficiency (美); light output ratio (of a lighting fitting) (英) [学] [专] [CIE] [JIS] 在规定的条件之下测得的灯具所发射的光通量, 与灯具内的所有光源发出来的光通量的测定值之和的比。

29-6 照明的一般概念

照明 lighting; illumination [学][专]
[CIE] 以光对人们的生活、活动起作用为目的。

(1) 用光照射物体及其周围,以便能够看出。

(2) 用光对人们的感情、气氛发生作用。

(3) 为了由信号、标志、招牌、电示标牌而传递信息,使看到光源本身。

除了上述以外,以辐射对人们的生活、活动起作用为目的,(4) 不仅应用可见辐射,而且也应用紫外辐射、红外辐射。

(1)至(3)与人们的视觉有关,(4)则不直接有关,以资区别。在CIE方面 lighting的定义只有(1)的涵义,illumination的定义为“光对于目标的照射”,稍微含混。

照明技术 lighting technology [专][CIE]
结合照明及其有关的各种科学原理而成的工艺和技法。光源(照明器)、光度等技术是否包括在其中还不够清楚,根据广义的解释可以认为包括在内。在德语中三个术语分开,显得明确(详见CIE 45-50-010)。

照明工程学 illuminating engineering [学][专]处理辐射(光、紫外辐射、红外辐射)与电的相互转换及以照明为目的的辐射的应用的科学技术领域的体系。照明工程学以利用昼光(阳光和天空光)、人工光为目的而发展起来。它的基础不仅与电工学,而且与建筑学、生理学、心理学、人类工程学等有密切的关系,现在与这些领域进一步地结合,正向广泛的体系化发展。

照明环境 luminous environment [专][CIE]
由于光(照度等级和分布、照明的形式和颜色)、色(色相、彩度、室内配色、显色性)及房屋形状等在室内创造出来的生理的、心理的环境。

人工照明 artificial lighting [学][专]
除了昼光以外由于人工光源照射物体及其周围而能看出来。

天然采光 daylighting [学][专][JIS]
白天利用由太阳发射的光照射物体及其周围而能看出来。

一般照明 general lighting [学][专][CIE]
[IES][JIS] 设计时不考虑特殊的、局部的重要

物件而使作业场或室内等处某一整个区域具有大致均匀的照度等级的照明方式。

局部照明 local lighting (美); localized lighting (英)[学][专][CIE][IES][JIS] 不特别对周围照明,只对工作需要的地方等面积较小或区域限定的局部进行照明的方式。

(1) 在工厂、住宅等的工作场所(实际上)并用一般照明。

(2) 在JIS Z 8113中规定“只对工作需要的地方进行局部照明的方式。”

直接照明 direct lighting [学][专][CIE]
[IES][JIS] 照明器的配光是90~100%的发射光通量直接到达假定大小为无限的工作面上的照明。这时光的方向基本上是向下的。

半直接照明 semi-direct lighting [学][专]
[CIE][IES][JIS] 照明器的配光是60~90%的发射光通量向下并直接到达假定大小为无限的工作面上的照明。上述剩余的光通量是向上的。

一般漫射照明 general-diffused lighting;
general diffuse lighting (美)[学][专][CIE]
[IES][JIS] 照明器的配光是40~60%的发射光通量向下并直接到达假定大小为无限的工作面上的照明。

半间接照明 semi-indirect lighting [学][专][CIE][IES][JIS] 照明器的配光是10~40%的发射光通量直接到达假定大小为无限的工作面上的照明。因此剩余的发射光通量(90~60%)是向上的,只间接地有助于工作面。

间接照明 indirect lighting [学][专][CIE]
[IES][JIS] 照明器的配光是10%以下的发射光通量直接到达假定大小为无限的工作面上的照明。剩余的发射光通量(90~100%)是向上的,只间接地有助于工作面。

漫射照明 diffused lighting [专][CIE]
[IES] 光从任何特定的方向并不显著入射到工作面或目标上的照明。

定向照明 directional lighting [专][CIE]
[IES] 光从显然清楚的方向显著入射到工作面或目标上的照明。学术词汇中的通讯方面曾有与定向

和指向相对应的术语, 例示于下:

directional antenna 定向天线
directional reception 定向接收
directional transmission 定向传输

重点照明 accent lighting [专] [IES] 为了强调特定的目标或对视野的一部分引起注意的定向照明。

泛光照明 floodlighting [专] [CIE] [IES] 为使某一情景或目标的亮度大于它的周围而设计的照明系统或由此实现的照明状态。这种系统以效用、广告或装饰为目的。

棒球的夜间比赛是情景的一个好例子。可以提出以建筑物、纪念碑等为目标许多例子。这方面使用的照明器不必加以限定, 因此规定改正以前将投光照明(指使用投光器等的照明)作为泛光照明的情况。如果可能, 希望恢复“泛光照明”。

适应照明、过渡照明 adaptational lighting [专] [JIS] 超过人们眼睛的明暗适应时间的明暗的迅速变化可以引起过渡性的视觉降低, 随之引起不舒适的感觉, 为了缓和这些而增设灯数的照明。公路的隧道入口所引起的照明常常作为代表性的例子。对于白天从室外照度数万至数千勒克斯变化到内部50勒克斯, 根据汽车的标准行驶速度和眼睛的适应曲线求出合适的变化曲线, 由此在数百米之间作出缓和的照度变化, 因此也译为入口照明或过渡照明。

造型照明、立体感照明 model(l)ing [专] 对于立体的目标赋予适度的明暗(光润的明暗变化与清楚的阴影)适当地表现立体形状的光的能力或表现出来的光的状态。这是Moon与Spencer的研究(1951)公布以来发展而成的概念, 由Cuttle等人(1957)及Fischer(1970)将立体感照明的效果试用“照度矢量(表示光的方向)与“矢量标量(照度矢量的绝对值与标量照度)比”定量来表示, 正在迅速开展起来。但在美国似乎还没有很好使用, 只看到立体感灯光(为了得到立体感而用费涅尔透镜的聚光)的术语。在电工学中 model(l)ing 定义为“应用数学或物理学使系统理想化(即模型), 由此进行的系统分析和设计的技法。”这是与照明的情况完全不同的概念。

室内照明 interior lighting [专], 为使室内主观亮度、亮度分布、光色等形成良好的视觉环境、尽量减少灯具的眩光而设计并制成设备的照

明。

室外照明 exterior lighting [专] 为使室外的主观亮度、亮度分布、光色良好, 尽量减少光源的眩光而设计并制成设备的照明。

室内常设辅助人工照明 permanent supplementary artificial lighting in interiors, PSA-LI [专] [CIE] [JIS] 仅仅由于昼光照明还不够充分或不舒适时, 为了补充室内的昼光照明而常时开灯的人工照明。

水下照明 underwater lighting [专] 为了在水中进行运动竞赛、表演或观赏植物、生物、鱼类的栖息等状况以及摄影或集鱼等目的, 在水中或其附近设置照明器而进行的照明。

舞台照明 stage lighting [专] 在对演技、演剧进行观赏或摄影的舞台中应用光的明暗和色彩自由而微妙地表现场面的情景或气氛、登场人物的心理和感情等的照明。在“电视转播”时, 除了上述而外还要考虑作为媒介的电视镜头及其播送系统特性、视听条件等以及映象重新表现方面的各种条件。

道路(交通)照明 road(traffic)lighting, roadway lighting (美), street lighting (英) [专] [JIS] 为使夜间利用道路者识别路面上有否障碍物, 预知道路的进行方向和转弯, 减少心理上的不安等, 以提高道路交通的安全性和舒适性, 对于道路及附属设施设置的照明。

窗帘照明 valance lighting [专] [CIE] 在窗洞上面用平行于墙壁的板和由它遮蔽的光源构成, 照射到墙面和靠近墙壁的顶棚面上的照明。

内檐照明 cornice lighting [专] [CIE] 用平行于墙面并接近于顶棚面的板遮蔽的光源安装在靠近墙壁的顶棚上面照射墙面的照明。

凹槽照明 cove lighting [专] [CIE] 安装在墙壁上部的凹槽内或暗装在墙壁上, 用遮蔽的光源构成, 照射到墙壁上部和顶棚上的照明。

本底照明 base lighting 如电视播音室等作为一般照明的底面的照明。多数情况采用三相开灯时无闪烁荧光灯。

事故照明 emergency lighting 由于发生灾害而致停电的非常时刻为了进行安全避难和引导的照明。在这种照明中要设置具有非常时刻安全避难所需要的亮度的事故照明器及为了避难、引导而表

示观众席、通道和避难口的引导照明器。前者根据建筑基准法,后者根据消防法承担义务。

天然光、自然光、昼光 [学][专] 白天由太阳发射的光。这一术语指以太阳为能源的光的总称。包括直射阳光和天空光等。

采光系数、昼光系数 daylight factor 某一点的昼光照度与这时的全天空光照度之比。

立体角投射率 configuration factor [专][JIS] 首先,在给定的面上的一点P上绘出以P为中心具有单位半径的球面。其次,绘出以P为顶点并以从P看图形S的轮廓线为底面的锥体,然后由它切取球面的一部分。将这一部分垂直投射到给定的平面上,这一面积的 $1/\pi$ 就是点P对于图形S的立体角投射率。参看天空系数。

天空系数 sky factor [专][CIE][IES][JIS] 由于从亮度均匀的天空通过没有玻璃的孔洞直接接受的光,在给定的平面上的一点产生的昼光照度,与这时由于同样的天空产生的全天空照度之比。两方面的照度都不包括直射阳光。天空系数本来是纯粹的几何学的比率,当立体角投射率适用于上述状况时便称做天空系数。从这一点来考虑,这一定义是稍感难解的。

点光源 point source of light [学][专][CIE][JIS] 只是位置固定而无大小的光源。光源具有大小时也就是在光源和受光面之间距离的反平方定律成立时,这一光源可以看做点光源。在CIE中有不附“of light”的术语,则不仅在光源中而且在辐射源中也通用。

光中心 light center(of a lamp) [学][专][JIS] 具有大小的光源看做点光源时,代表它的位置的点。多数情况为几何重心。

【50%或10%】光束扩角 [50% or 10%] beam spread [专][CIE][IES][JIS]

(1) 光强具有按照极坐标的配光曲线的最大光强的50%或10%的动径之间扩张的角度(CIE、IES)。

(2) 在配光曲线中等光强的两点对于光中心扩张的角度(JIS)。这时应用看到光强为最大光强的10%或50%的角度。

配光 luminous intensity distribution [学][专] 光强的各方向的分布。

配光曲线 luminous intensity distribution

curve [学][专][CIE][JIS] 在包括光源的某一面内的光强作为方向的函数表示的曲线。通常用以光源为原点的极坐标表示。

(1) 光源为对称配光时一般用垂直面配光表示。

(2) 表示垂直方向的配光时的角度由垂直向下的方向测量。

法向照度 normal illuminance [学][专][JIS] 垂直于光的进行方向的面上的照度。也就是包括所求照度的点在内,垂直于连结光中心和这点的线的面上所接受的照度。

水平面照度 horizontal illuminance [学][专][JIS] 包括所求照度的点在内的水平面上所接受的照度。假设连结光中心和所求照度的点的线与这水平面的法线所成的角度为 θ ,水平面照度就等于法向照度和 $\cos\theta$ 之积。

垂直面照度 vertical illuminance [学][专][JIS] 包括所求照度的点在内的垂直面上所接受的照度。一般情况下这垂直面是与包括连结光中心和所求照度的点的线在内的垂直面成直角的情况,其值如下。假设连结光中心和所求照度的点的线与这垂直面所成的角度为 θ ,垂直面照度就等于法向照度和 $\sin\theta$ 之积。

等照度曲线 isolux curve, isolux line [学][专][CIE][JIS] 连结面上等照度的点的曲线。描绘出等照度(曲线)群的图称做等照度图(isolux diagram)。其概念与地图上的等高线相同。

等光强图 isocandela diagram [学][专][CIE] 等光强曲线群。这里的等光强曲线就是在以光中心为中心的假想球面上按照光强相等的方向的轨迹得出的曲线,或将这曲线在平面上作出等积映象。

【照明】均匀度 uniformity ratio (of illuminance) [专][CIE][JIS] 面上最小照度对平均照度之比。也采用以下两种涵义:

(1) 最小照度对最大照度之比。

(2) 这二者之比的各自的倒数。

流明法 lumen (flux) method [专][IES] 确定给出工作面上要求的平均照度的光源或照明器的数量和类型的照明设计方法之一。光源或照明器的直射分量 and 墙面、顶棚及地面的反射分量都列入计算之内。

逐点法 point-by-point method [专][IES] 以光度数据为基础计算求出面上各点照度的照度计算方法之一。

照明利用系数 utilization factor; coefficient of utilization (IES) [学][专][CIE][IES][JIS] 到达工作面上的光通量和从光源发射的光通量之比。

固有照明利用系数 utilance [专][CIE][IES][JIS] 到达工作面上的光通量和从照明器发射的光通量之比。

室形指数 room index [学][专][CIE][IES][JIS] 表示房间形状的数字,用于照明利用系数或固有照明利用系数中。如果没有特别指定,室形指数可由下式得出。

$$\text{室形指数} = I \cdot b / h(I + b)$$

式中 I 为房间进深, b 为面宽, h 为由工作面到照明器的高度。

维护系数 maintenance factor [学][专][CIE][IES][JIS] 照明设备经过一定期间使用后工作面上的平均照度和同一条件下的初期值之比。也称为维持系数。可以认为它是以前使用的减光补偿系数的倒数。

工作面 working plane; work-plane (IES) [学][专][CIE][IES][JIS] 通常进行工作所指定的平面。在室内照明中没有特别指定时指由墙壁包围的室内地面上0.85米的水平面。同样,在日本式房间中指坐席上0.4米的水平面。在道路照明中指路面上0.15米的水平面。这些都是假想的平面。

高亮光 high light [专] 从受照物体或被摄影对象反射的高亮度部分或其亮度等级。

背面光 back light 在电视、电影、照相等摄影中从被摄影对象的背后向大致平行于包括镜头光轴在内的垂直面上发出的方向性照明。也称做逆光。对于主要被摄影对象如人物的头部或肩部边缘发出高亮光,使其轮廓清晰,可将被摄影对象表现得好似从背影浮起,具有增加立体感的效果(根据电视技术词汇委员会的审议资料)。

调光 lighting control [专] 在电视、电影的转播室及剧场中,按照节目和演出内容调整、控制照明光的亮度、光色、方向等。最近,除了照度的调节、照明光源的启闭、照明的光色等外,还对照明器的高度、方向、滤色的选择等进行遥控。此

外,还有预调所要操作项目而与电子计算机联动,随着节目的进展同时自动控制的方式。

调光设备 lighting control equipment [专] 主要为了调节剧场、电视转播室的照明而需要的调光器或调光装置,由操作部分及其它组成的调节机械或将这些连结起来而处于可能动作状态的控制系

统。近年来,创制出在调光器或调光部件上利用半导体的电子控制方式,因此不仅可由灯泡也可由荧光灯调光,而且当负荷为大功率时也可用微小功率甚至遥控进行,又换复杂的场面时也可用简单的操作迅速进行,这样舞台、观众席、电视转播室的调光几乎完全成为这种方式。

在一向使用的词汇中有调光机和舞台用调光机两词,两词都是与舞台有关的词汇,其意义大致相同。自从利用半导体以来,调光器从数百瓦小容量的简便类型到数千瓦(16安×6回路)的大容量类型,可有各种,共用途从家庭用开始涉及多方面。为了连续改变光源的光强,在电源和光源之间的回路中插入的器具为调光器或调光部件,包括与其组合一起的操作部分、负荷选择部分、预调部分等调光系统,称做调光设备,以明确两者的区别。

灯光标志 electric sign [专] 为了内装或表面露出照明光源来传递信息、引人注目而以文字、符号、绘画等表示的电气照明设备或方式。

【照明用】灯杆 pole (roadway lighting) (美); column (street lighting) (英) [专][IES][JIS] 用于道路、广场等照明中的照明器直接或通过托架等安装起来的电杆。在美国似乎还使用灯杆(lamp post)。在日本如上所述多使用〔照明用〕电杆。

航标 lighthouse (海); (light) beacon (空) [专][CIE][JIS] 由发光器及支承它的结构物构成的航行援助设施。根据灯的性质指示它的地理位置或传递特别信息。这里所说的灯的性质为“光色、明天时间、光的辐射状态的特性”等。

光信号 luminous signal; light signal [专][CIE] 利用室外的光的信号或利用它的指示。light signal 还有光信号机的意义(CIE)。

闪光信号 flashing signal [专][CIE] 按照周期性表示明灭的光信号,按以下情况分类:

(1) 规定停止交通用红色光表示,又使交通

缓行或表示危险存在用黄色光表示,作出周期性明灭表示的光信号。

(2) 安装在车辆侧面或嵌装在前面或后面的方向指示灯,作出周期性明灭表示的光信号。

在现在的学术词汇中定为明灭信号,可以认为这是由于电灯明灭的作用而定义的。最近使反射镜回转表示明灭的例子迅速增加,为了包括不由于明灭的情况,定为闪光信号,此外还有明灭光(occulting light, blinking light),因此避免定为明灭信号。类似词汇有闪光信号〔铁路〕(flashing light signal),指在人行横道中用互相照亮的两群红色表示火车或电车接近的信号,这时附以〔铁路〕来限定,以示区别。

视觉信号 visual signal [专] 由于表示板、手旗、单光、灯列、面光源、色光、闪光等的组合,通过视觉传递由形状、形式等表示的信息内容时的信号或由视觉判断的信号。

交通信号 traffic signal [专] [CIE] 由限制交通流量所用的色光信号群交互指示停止(红色)、注意(黄色)、进行(绿色)的信号。

交通信号机是一种交通管理设备。这种设备是对于交错的交通流量,交换分配通行权,按照交通的需要以时间比率组织有秩序的交通流量,应用手动、电动或机动进行操作,以指示交通信号。

闪光标志 flashing sign [专] 为提高人眼的向光性和灯光的诱导作用,用点燃和熄灭组成灯光标志中的光源的一部分或全部的方式而设计的标志。

标志 sign; marker; marking [专] 为用文字、纹样、色彩传递信息而表示的符号或设施。在道路交通中主要使用sign,在铁路中使用marker,在航空中使用marking,不一定统一起来,因此要加注意。在航空中有无线标志的marker和地上标志物的markers,在道路交通中有路线序号标志route marker。又在道路的道路标志中有carriageway marking(英); marking(美),可以认为其内容相同。

逆向反射器 retro-reflector; (reflex reflector) [专] [CIE] [IES] 无论入射角为若干度,反射光的反射方向大致成为入射方向。由这样的逆向反射光学部件1个以上的多个组成的装置。要求它在常时就具有功能。建议retro-reflection称做逆向反射,retro-reflector称做逆向反射器。

〔辐射的〕杀菌效果 bactericidal(germicidal) effect [专] 紫外辐射的照射能量杀掉细菌、酵母、病毒等。这种紫外辐射的波长大约为200~330毫微米。

黑光 black light [专] [IES] 接近于可见光线的近紫外线(波长320~400毫微米)的一般名称。

E-维通 E-viton (erythema) [专] 红斑辐射通量的单位。红斑辐射通量的能力等于波长为296.7毫微米、辐射通量为10微瓦所产生的红斑效果的能力,就是1E-维通。这里所说的红斑辐射通量就是辐射光谱的各波长光谱功率乘以它的相对红斑效果,加以积分,而求得的值。

附录 日本和其它国家杂志名称及简称表

日本杂志名称	简称
Acta Chromatica	Acta chromatica
O H M	オ一ム
応用物理	応物
京大工研彙報	京大工研彙報
計測と制御	計測と制御
工業化学雑誌	工化誌
Science of Light	Sci. of Light
色彩研究	色研報誌
色材協会雑誌	色材誌
照明学会雑誌	照学誌
昭和()支部連合大会講演論文集	昭()支部連大
昭和()年照明学会()支部大会講演論文集	昭照学()支部大会
昭和()年電気学会東京支部大会講演論文集	昭電学東京支部大会
昭和()年連合大会講演論文集	昭連大
Japanese Journal of Applied Physics	Japan. J. appl. Phys.
Japanese Psychological Research	Japan. psychol. Res.
Journal of the Physical Society of Japan	J. Phys. Soc. Japan
心理学研究	心研
生産研究	生産研
鉄道技術研究所彙報	鉄研彙
テレビジョン	テレビジョン
電気学会雑誌	電学誌
電子技術総合研究所彙報(研究報告, 調査報告)	電総研彙(研, 調)
電子通信学会雑誌	信学誌
電設工業	電設工業
電力	電力
東京都立工業技術センター研究報告	都工技研報
東芝レビュー	東芝レビュー
National Technical Report	National tech. Rep.
日本眼科学会雑誌	日眼誌
日本色彩学会誌	色学誌
日本写真学会誌	日写誌
日本照明委員会ニュース	日照委ニュース
日本電球工業会会報	日電球工業会報
日立評論	日立評論
分光研究	分光研究
三菱電機技報	三菱電機技報
理化学研究所報告	理研報
臨床眼科	臨床眼科
其它国家杂志名称	简称
Applied Spectroscopy	Appl. Spectrosc.
American Journal of Ophthalmology	Amer. J. Ophthalm.
American Journal of Psychology	Amer. J. Psychol.

其它国家杂志名称	简称
Applied Optics	Appl. Optics
Bulletin de la Société Française des Electriciens	Bull. Soc. Franc. Elect.
Compte Rendu, C. I. E.	CR, C. I. E.
Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences	CR Acad. Sci.
Electrical Construction and Maintenance	Elect. Const. Maint.
Electronics	Electronics
Electrotechnische Zeitschrift	E. T. Z.
Elektrowärme	Elektrowärme
Electrical Engineering	Elect. Engng
Ergonomic	Ergonomics
Feingerätetechnik	Feingerätetechnik
Die Farbe	Farbe
General Electric Review	Gen. Elect. Rev.
GEC Journal	GEC J.
Glasstechnische Berichte	Glasstech. Ber.
Infrared Physics	Infrared Phys.
International Lighting Review	Internat. Lighting Rev.
Journal of Applied Physics	J. appl. Phys.
Journal of Electrochemical Society	J. Electrochem. Soc.
Journal of Experimental Psychology	J. exper. Psychol.
Journal of Photographic Science	J. photogr. Sci.
Journal of Physics, Series D: Applied Physics	J. Phys. D: Appl. Phys.
Journal of Physics, Series E: Scientific Instruments	J. Phys. E: Sci. Instrum.
Journal of the Illuminating Engineering Society	J. Illum. Engng Soc.
Journal of the Optical Society of America	J. Opt. Soc. Amer.
Journal of Research of the National Bureau of Standards	J. Res. Nat. Bur. Stand.
Lichttechnik	Lichttechnik
Light and Lighting	Light and Lighting.
Lighting	Lighting
Lighting Design and Application	Light. Des. Appl.
Lighting Research and Technology	Light. Res. Tech.
Lux	Lux
Messtechnik	Messtechnik
Mesures et Controle Industriel	Mesures et Controle industr.
Metrologia	Metrologia
Nature	Nature
Nouvelle Revue d'Optique	Nouv. Rev. Optique
Optica Acta	Optica Acta
Optics and Spectroscopy	Optics and Spectrosc.
Optik	Optik
Physica	Physica
Photographic Science and Engineering	Photogr. Sci. and Engng.
Philips Research Reports	Philips Res. Rep.
Philips Technical Review	Philips tech. Rev.
Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers	Proc. IEEE
Proceedings of the Physical Society	Proc. Phys. Soc.
Physical Review	Phys. Rev.
Proceedings of the Royal Society	Proc. Roy. Soc.
Public Lighting	Pub. Lighting
RCA Review	RCA Rev.
Review of Scientific Instruments	Rev. sci. Instrum.
Светотехника	Svetotekhnika
Soviet Journal of Optical Technology	Soviet J. Opt. Tech.
Zeitschrift für angewandte Physik	Z. angew. Phys.
Zeitschrift für Physik	Z. Phys.