

目 录

第一章 电路基本知识	(1)
1-1 电场、电路及其基本概念	(1)
1-2 电气设备的额定值	(6)
1-3 电路的工作状态	(8)
1-4 电阻元件	(10)
1-5 电容元件	(14)
1-6 电感元件	(18)
1-7 电源元件	(20)
1-8 克希荷夫定律	(22)
1-9 电阻的串联、并联和混联	(28)
1-10 电容的充电和放电过程	(34)
第二章 正弦交流电路	(36)
2-1 正弦电压和正弦电流的三要素	(36)
2-2 相位差和有效值	(38)
2-3 电阻元件的电压与电流的关系	(40)
2-4 电容元件的电压与电流的关系	(42)
2-5 电感元件的电压与电流的关系	(46)
2-6 电阻与电容串联电路中电压与电流的关系	(48)
2-7 电阻与电感串联电路中电压与电流的关系	(52)
2-8 RLC 串联电路中电压与电流的关系	(54)
2-9 正弦交流电路的功率	(56)
2-10 谐振电路：串联谐振和并联谐振	(62)
2-11 功率因数的提高	(66)
第三章 三相交流电路	(68)

3-1	对称三相电压和电流	(68)
3-2	三相交流电路	(70)
3-3	负载为星形联接的三相电路	(72)
3-4	负载为三角形联接的三相电路	(76)
3-5	三相电路的功率	(78)
第四章	磁路和变压器	(80)
4-1	磁路	(80)
4-2	铁心线圈电路	(86)
4-3	电磁铁	(90)
4-4	铁心损耗	(94)
4-5	变压器的基本结构	(96)
4-6	变压器的工作原理	(100)
4-7	变压器的铭牌	(106)
4-8	自耦变压器	(108)
4-9	三相变压器	(110)
4-10	电焊变压器	(112)
第五章	异步电动机	(114)
5-1	三相异步电动机的用途和结构	(114)
5-2	三相异步电动机的工作原理	(118)
5-3	三相异步电动机的机械特性	(122)
5-4	三相异步电动机的起动	(126)
5-5	三相异步电动机的反转	(130)
5-6	三相异步电动机的铭牌和额定值	(132)
5-7	单相异步电动机	(136)
第六章	低压电器和控制系统	(140)
6-1	低压电器	(140)
6-2	三相鼠笼式异步电动机的点动和连续运行的控制 系统	(146)

6-3	三相鼠笼式异步电动机的正反转控制系统	(148)
6-4	两台三相鼠笼式异步电动机先后起动的控制系统	(150)
6-5	阅读三相异步电动机继电器——接触器控制系统原 理图的方法	(152)
第七章	直流电动机	(154)
7-1	直流电动机的基本结构	(154)
7-2	直流电动机的工作原理	(156)
7-3	他励直流电动机的机械特性	(160)
7-4	他励直流电动机的起动	(162)
7-5	他励直流电动机的反转	(164)
7-6	他励直流电动机的调速	(166)
第八章	电工测量	(170)
8-1	电工仪表的种类	(170)
8-2	磁电系 电磁系、电动系仪表	(172)
8-3	电流表和电压表	(178)
8-4	万用表	(180)
8-5	兆欧表	(184)
8-6	电度表	(186)
第九章	安全用电	(188)
9-1	触电与急救	(188)
9-2	保护接地	(190)
9-3	保护接零	(192)
9-4	安全用电常识	(194)
9-5	电气火灾及其预防	(195)
	复习题	(196)
	测验题	(203)

复习题答案..... (210)

测验题答案..... (216)

第一章 电路基本知识

1-1 电场、电路及其基本概念

1. 什么叫电量？什么叫电场？什么是静电屏蔽？物体之间由于摩擦或者其它种种原因，可产生电子转移。于是失去电子的物体带正电荷，得到电子的物体带负电荷。物体失去或获得电子越多，物体所带的正电荷或负电荷就越多。电量就是表示带电体所带电荷多少的一个物理量，通常用符号“ Q ”或“ q ”表示，单位为库仑，用C表示。实验测得：一库仑相当于 6.25×10^{18} 个电子的电量，而一个电子所具有的负电量约为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

存在于电荷周围空间且对电荷有作用力的特殊物质叫电场。静止电荷产生的电场称静电场。放在电场中的导体受电场影响，其电荷重新分布，这种现象即为静电感应现象。为了防止静电感应，就需要进行静电屏蔽。通常，采用把一个空腔导体接地的方法，就可以隔离内外静电场的影响。如实际生产中，晶体管罩一个金属外壳，工作服的布料中掺有金属丝，有的导线外皮还要包一层金属丝网（隔离线），电器外壳金属接地等均为静电屏蔽而设计的。

2. 电路是什么？电路有什么作用？电流流过的通路就叫做电路。实际电路都是由若干实际电气元件或器件用导线按一定方式连接而成的。

实际电路按其功能的不同可分为两大类。一类是用来完成能量的传递、分配和转换，即：使电能和其它形式的能相互转换并对电能实现传递和分配。如电动机电路、照明线路、输配电系统、电热电路等。另一类是用来完成电信号的传递和处理的，即：把输入信

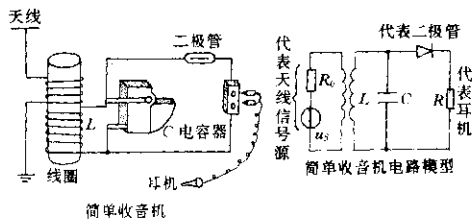
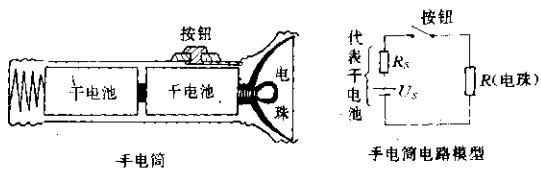
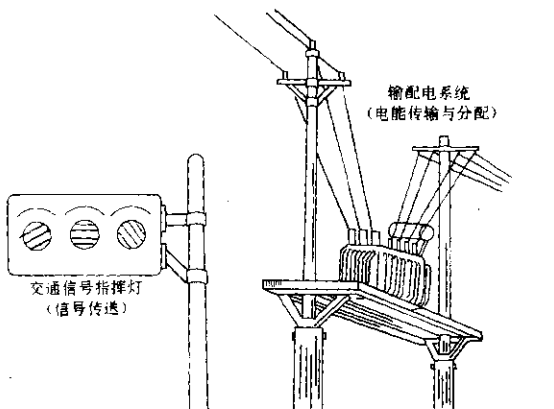
号进行“加工处理”，使之输出信号符合要求。如交通信号指挥灯、电话线路、收音机、电视机电路等。

3. 什么是电路元件和电路模型？ 实际元、器件中发生的电磁过程是相当复杂的，为了简化分析研究起见，人们常常把复杂现象理想化，用一个或几个理想化元件的组合来代替实际的元件或器件。理想化的元件统称为电路元件。电路元件可用国家统一规定的符号来代表。

在设计、安装、修理各种实际电路的时候，常常需要画出表示电路连接情况的图。这时，为了简便，通常不画出电路和实物连接图，而用几个电路元件组成的电路来代替。由理想化元件组成的电路叫做电路模型，简称电路图。我们在书本上、说明书上、生产图纸上看到的电路图就是各种实际电路的电路模型。

4. 电路由哪些部分组成？各有何功能？ 电路主要由三部分组成。①电源——提供电能，且能将其它形式的能量转换为电能的装置。例如直流发电机，它可将机械能转换为电能；干电池、蓄电池则是将化学能转换为电能等等。②负载——又称用电器，是各种用电设备的总称，其作用是把电能转换为其它形式的能量。例如直流电动机是把电能转换为机械能；电烙铁、电炉是将电能转换为热能；电灯则是将电能转换为光能等等。③中间环节——连接电源与负载，构成电流通路，并对整个电路实行控制（如开关）、保护（如熔断器）、测量（如电流表）。因此，中间环节包括连接导线、控制电器、保护电器、测量仪表等。

通常，对电源来讲，负载、连接导线、开关等称为外电路；而电源内部的一段电路称为内电路。换句话说，由电源一端出发，经过和它连接的全部负载和导线，再回到电源另一端的电流路径，叫作外电路；电流在电源内部通过的路径，称为内电路。



5. 电流的定义和单位是什么？ 电荷的定向移动形成电流（指物理现象）。电流的方向，习惯上是指正电荷运动的方向，在电路图中用箭头表示。电流的大小用电流强度来衡量。通过导体横截面的电量 q 与此电量通过的时间 t 的比值叫做电流强度，简称电流（指物理量） i ，即

$$i = \frac{q}{t}$$

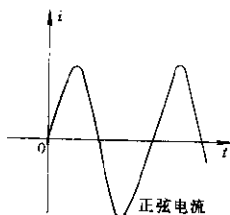
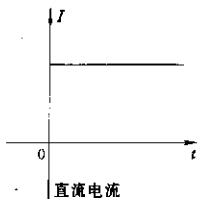
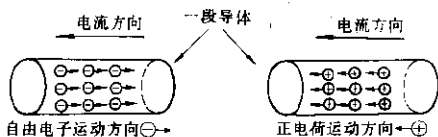
如电量的单位为库仑，时间的单位为秒，则电流的单位为安培，简称安，用符号 A 表示。较大的单位为千安（kA）；较小的单位为毫安（mA）；微安（ μA ）。（ $1\text{kA} = 10^3\text{A}$ ， $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$ ， $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ ）。

电流的种类很多，常见的有直流，它的大小和方向都不随时间变化，直流电流用 I 表示。另一种是正弦电流，它的大小和方向随时间按正弦规律变化，用 i 表示。谈到电流时，不仅要说明它的大小，而且还要指出其方向。

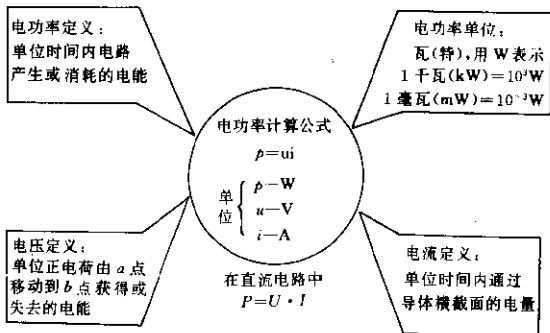
6. 电压的定义和单位又是什么？ 在水管中，水的流动要有水压（水位差）的作用。在电路中，电荷的移动要有电压（电位差）的作用。电路中 a 、 b 两点间的电压，就是 a 、 b 两点间电位（物理学中叫电势）之差。电位高的一端叫正极性端，用“+”号表示；电位低的一端叫负极性端，用“-”号表示。电压的方向是指电位下降的方向。电压 u 的定义是：正电荷由 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量 W 与该正电荷电量 q 之比，即

$$u = \frac{W}{q}$$

如能量的单位为焦耳（J），电量的单位为库仑（C），则电压的单位为伏特，简称伏，用 V 表示。较大的单位为千伏（kV）；较小的单位为毫伏（mV），微伏（ μV ）。（ $1\text{kV} = 10^3\text{V}$ ， $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$ ， $1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$ ）谈到电压时，既要说明它的大小，还要指出其极性。常见的电压有直流电压（用 U 表示）、正弦电压（用 u 表示）。



两种常见电流的波形
(电流、电压与时间的关系曲线叫波形)



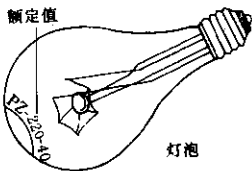
电能 = $u \cdot i \cdot t$ 单位: 瓦·秒(或焦耳) 1 度(电) = 1 千瓦·小时

1-2 电气设备的额定值

7. 电气设备的额定值是什么意思？普通白炽灯灯泡上标印的40W、220V，就是灯泡的额定功率和额定电压值。电气设备在正常工作条件下，设备通过的电流、承受的电压、温度的上升、产生的功率等等都有一定的限制，或者说都有一个规定的数值，只要按此规定值操作或运行，设备就可以安全而持续地工作。这些规定值统称电气设备的额定值。例如额定电压就是指允许加在设备上的最高电压值；额定电流是指允许通过设备的最大电流值；额定功率是指允许设备消耗或产生的最大功率值。不同的电气设备，规定的额定值种类不同。例如灯泡规定了额定电压和额定功率；滑动变阻器规定的是额定电流和额定电阻（又叫标称电阻值）。

8. 为什么要规定额定值？制造电气设备都要采用导体（包括导线）和绝缘材料。电流通过导体时，由于导体有电阻，导体就会发热，电气设备的温度就随之升高。电流过大，发热多，温度就会上升过高，导体将熔化烧坏，所以设计时，对电气设备的电流值就应有一个限制，即规定一个额定电流值。绝缘材料的性能与温度、电压有关。它所能承受的温度和电压，也有一个限度。温度过高，绝缘材料会烧焦，变成导体；电压过高，绝缘材料将被击穿，绝缘性能遭到破坏，这都是不允许的。因此，对电气设备要规定一个额定电压值。

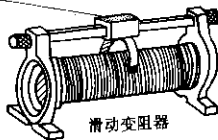
总之，使用一切电气设备，一定要在额定值条件下工作，以保证人身安全、设备安全和设备的使用寿命。



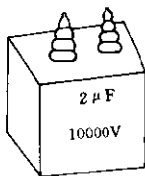
灯泡

电气设备上标出的
若干数值都是额定值

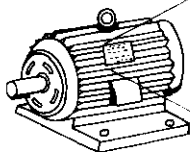
300Ω
0.97A



滑动变阻器



油质电容器



三相异步电动机

三相异步电动机

型号 Y132H-4 功率 7.5kW 频率 50Hz

电压 380V 电流 15.4A 接法△

转速 1440r/min 绝缘等级 B

年 月 日 编号 ××电机厂

铭牌

1-3 电路的工作状态

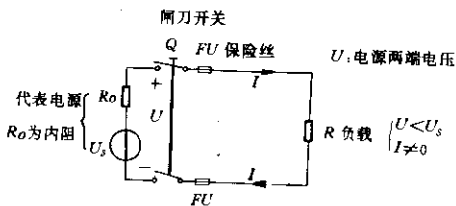
9. 电路有哪几种工作状态？ 有三种工作状态：

①有负载工作状态 将负载与电源接通（右图①）形成闭合电路，电路中有电流通过，这种工作状态，叫做有负载工作状态。电源电压一般变化不大，所以电路中电流的大小与负载的电阻大小有关。减小电阻，则电流大，电阻消耗的功率也增大。习惯上，把这种情况叫做负载增大。因此，负载一词有时是指用电器中的电流或功率。

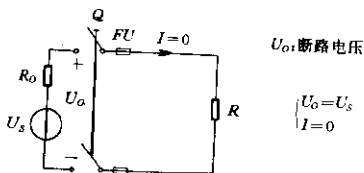
如果电气设备在额定电压、额定电流条件下工作，就称为电路的额定工作状态。在这种状态工作，既经济，又安全。

②断路状态 在右图②所示电路中，将闸刀开关断开，切断负载与电源的联系，电路不成闭合回路，电流为零，这种情况就叫做电路的断路状态，又称开路状态。这时电源未接负载。

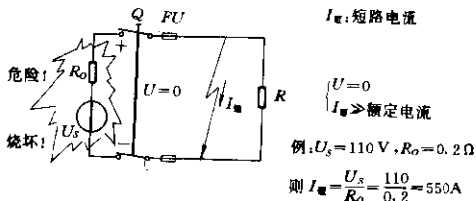
③短路状态 如果由于某种原因，突然使电源两端短接，如右图③所示，这种情况叫做电路的短路状态。电源被短接后，电源两端电压为零。一般电源内阻较小，因此，电源输出的短路电流很大，这个电流值远大于电气设备的额定电流值，将把设备烧毁，所以短路状态是不允许出现的。在工作中，一定要防止短路事故的发生！为安全起见，在电路中应安装短路保护装置（如第六章介绍的熔断器）。



① 有负载工作状态



② 断路状态



③ 短路状态

1-4 电阻元件

10. 电阻元件有什么特性？ 电阻元件是一种电路元件，简称电阻，它是实际电阻器理想化的模型。电流通过它会发热，消耗电能。电阻元件的特性可以用元件两端电压 u 和通过其中的电流 i 的关系来表示，即

$$R = \frac{u}{i} \quad \text{或} \quad u = Ri$$

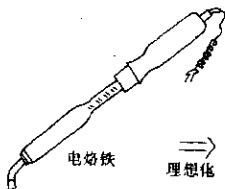
比值 R 称为电阻。因此，电阻一词有两种含义：一指元件，一指物理量。在相同电压下， R 值大，则电流小； R 值小，则电流大。电阻 R 是用来表示导体阻碍电流的作用大小的物理量。 R 值为常数的元件叫线性电阻。线性电阻两端电压与通过其中的电流成正比，服从欧姆定律，如康铜电阻、锰铜电阻、碳膜电阻等。 R 值不是常数的元件，则叫做非线性电阻，如白炽灯泡的钨丝电阻、半导体二极管的电阻等。

在上述公式中，电压的单位为伏 (V)，电流的单位为安 (A)，则电阻的单位为欧姆，简称欧，用符号 Ω 表示。较大的单位为千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$)。

$$1k\Omega = 10^3\Omega, \quad 1M\Omega = 10^6\Omega$$

电阻中消耗的功率用下式表示：

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R}$$

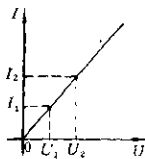


电烙铁

理想化



线性电阻
元件符号



线性电阻 $U \sim I$ 特性

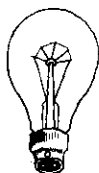
$$\frac{U_2}{I_1} = R_1$$

$$\frac{U_2}{I_2} = R_2$$

$$\because U_2 = 2U_1$$

$$I_2 = 2I_1$$

$$\therefore R_1 = R_2$$

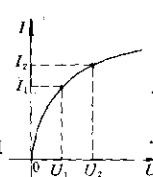


白炽灯泡
(钨丝电阻)

理想化



非线性电阻
元件符号



非线性电阻 $U \sim I$ 特性
(钨丝电阻)

$$\frac{U_2}{I_1} = R_1$$

$$\frac{U_2}{I_2} = R_2$$

$$\because U_2 = 2U_1$$

$$I_2 < 2I_1$$

$$\therefore R_1 \neq R_2$$

$$R_1 < R_2$$

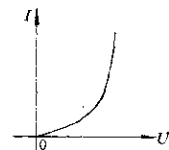


半导体二极管

理想化



半导体二
极管符号



半导体二极管 $U \sim I$ 特性
(属非线性电阻)

11. 导体电阻与哪些因素有关？ 导体电阻 (R) 的大小与导体长度 (l) 成正比，与其横截面积 (S) 成反比，用公式表示为

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

式中 ρ 叫做电阻率。材料不同， ρ 值不一样。这就是说，导体电阻大小与材料性质有关。公式中 l 单位为米 (m)， S 单位为毫米² (mm^2)， R 单位为欧 (Ω)，则 ρ 的单位为欧·毫米²/米 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。所以导体的电阻率就是长度为 1m，横截面为 1mm^2 的材料所具有的电阻值。

12. 导体电阻与温度关系如何？ 导体电阻与温度关系如下：

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (T_2 - T_1)]$$

式中 R_1 、 R_2 分别是温度为 T_1 及 T_2 时的电阻值； α 叫电阻温度系数，它的数值等于温度变化 1°C 时，每一欧姆值变化的大小，单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。严格说，任何导体的电阻温度系数 α 都不为零，它的阻值都会随温度变化，所以都是非线性电阻。但当 α 很小时，在一定电流范围内，导体温度变化不大，则阻值变化也就很小，可以近似地认为是线性电阻。

13. 实际电阻元件的额定值是什么？ 根据用途不同，规定不同的额定值。例如白炽灯泡的额定值为：额定功率和额定电压（如 40W 、 220V ）；电子电路中常用的碳膜电阻则规定额定电阻（又叫标称电阻）和额定功率（如 $10\text{k}\Omega$ 、 W ）；实验室用的滑动变阻器则采用额定电阻和额定电流（如 300Ω 、 0.97A ）。

常见导电材料的电阻率和电阻温度系数

材料名称	电阻率 ρ [20°C] ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	电阻温度系数 α [0-100°C] (1/°C)	用途
银	0.0165	0.0036	导线镀银
铜	0.0175	0.004	导线, 主要导电材料
铝	0.0283	0.004	导线
铂	0.106	0.00398	热电偶或电阻温度计
钨	0.055	0.005	白炽灯灯丝、电器触头
康铜	0.44	0.000005	标准电阻
锰铜	0.42	0.000006	标准电阻
镍铬铁合金	1.12	0.00013	电炉丝
铝铬铁合金	1.3~1.4	0.00005	电炉丝
碳	10	0.00005	电刷

注: 表中数值是近似值, 随材料的纯度和成分不同而有差异

1-5 电 容 元 件

14. 电容元件有什么特性？ 电容元件简称电容，也是一种电路元件，它是实际电容器理想化的模型。最简单的电容器是平板电容器，如右图①所示。电容元件具有储存电荷和电场能量的性能，在工作中，它是不消耗电能的。电容元件两端的电荷 q 与其两端电压 u 成正比，即

$$C = \frac{q}{u} \quad \text{或} \quad q = Cu$$

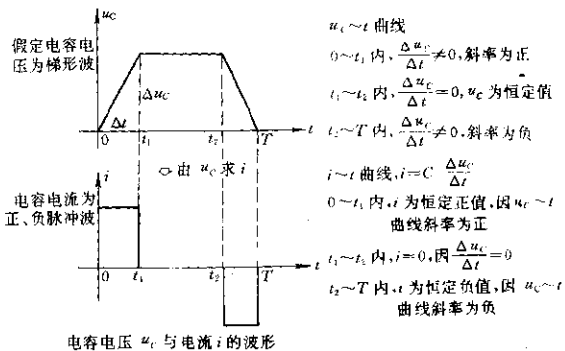
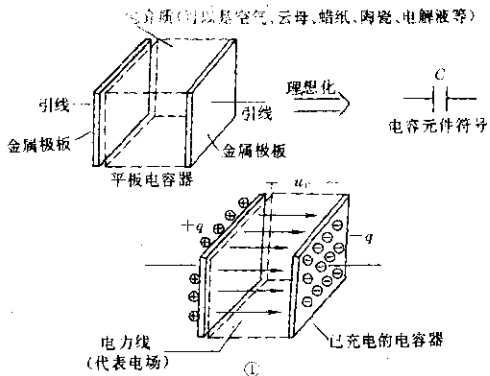
比值 C 是一个常数，叫做电容。因此，电容一词也有两种含义：一指元件，一指物理量。 q 的单位为库仑 (C)， u 的单位为伏 V，则 C 的单位为法拉，简称法，用符号 F 表示。较小的单位为微法 (μF) 及皮法 (pF)。

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}, \quad 1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$$

15. 电容中的电流 i 与电压 u 有什么关系？ 电荷的定向移动形成电流。由上式可知，当电容元件两端电压变化 Δu 时，电容两端电荷也随之变化 Δq ，因而在与元件相连接的导线中便有电荷移动，形成了通过电容的电流。假定电压是在 Δt 时间变化，则根据电流强度的定义公式，可知通过电容的电流为 $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ 。因为 $\Delta q = C \cdot \Delta u$ ，所以

$$i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

式中 Δu 与 Δt 之比 $\left(\frac{\Delta u}{\Delta t}\right)$ 叫做电压的变化率。上式说明电容元件特点之一，就是电容的电流与电容两端电压的变化率成正比。电压变化越快，电流越大。如果电压保持恒定不变，即 $\frac{\Delta u}{\Delta t} = 0$ ，则电流为零。因此，电容在直流电压作用下，是不会产生电流的。或者说，直流电流不能通过电容，这就是所谓电容的“隔断直流”作用。

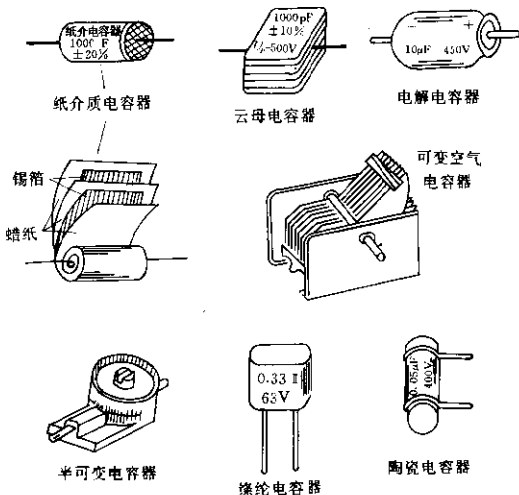


16. 常见的电容器有哪几种？电容器的额定值是什么？ 实际电容器的种类很多。根据结构不同分为固定电容器、可变电容器及半可变电容器。前一种电容器的电容值是不能改变的，后两种电容器的电容值是可以改变的。根据电容器中采用的电介质不同，又可分为空气电容器、云母电容器、纸介质电容器、陶瓷电容器、电解电容器等。

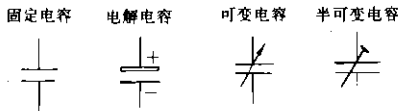
这里要特别指出，由于电解电容器是利用电解现象制成的，所以这种电容器有固定的极性。“+”极只能和电源的正极连接，“-”极只能与电源的负极连接。接错了极性，就会损坏电容器。因此，电解电容器只能用在直流电路中。

电容器外壳上均标有额定值，一是电容量，一是额定电压。电压过高会将电介质击穿，损坏电容器。在正弦交流电路中使用电容器时，加在电容器两端电压的最大值必须低于电容器的额定电压值。

实际电容器外形



电容元件符号



1-6 电 感 元 件

17. 电感元件有什么特性？ 电感元件简称电感，也是一种电路元件，它是实际电感器理想化的模型。实际电感器通常是用导线绕成的螺旋形线圈，叫做电感线圈（见右图）。电感元件中的电流产生磁通，它有储存磁场能量的性能。在工作中，也是不消耗能量的。

如果一匝线圈中电流 i 产生的磁通为 Φ ，当线圈有 N 匝时，则与线圈交链的全磁通为 $N\Phi$ 。对空心线圈来说，全磁通 $N\Phi$ 与产生它的电流 i 是成正比的，即

$$L = \frac{N\Phi}{i} \quad \text{或} \quad N\Phi = Li$$

比值 L 是常数，叫做电感或自感。如磁通单位为韦伯 (Wb)，电流单位为安 (A)，则电感单位为亨利，简称亨 (H)。较小的单位为毫亨 (mH) 和微亨 (μH)。

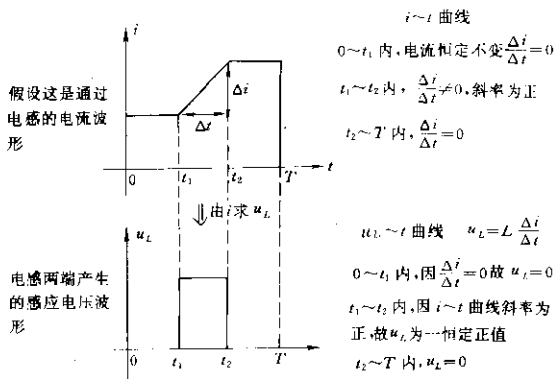
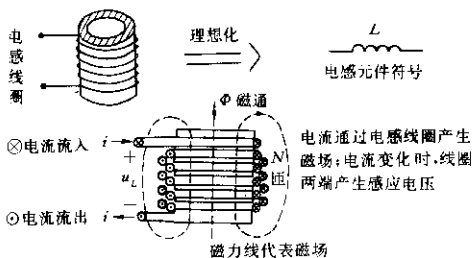
$$1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}, \quad 1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$$

18. 电感元件中电压与电流又有什么关系？ 根据电磁感应定律可知，通过线圈的电流发生变化 Δi 时，电流产生的磁通也将变化 $\Delta(N\Phi)$ ，在线圈两端将产生感应电压 u 。所以电感元件两端电压 u 与电流 i 的关系为

$$u = \frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t} = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad \because \Delta(N\Phi) = L \cdot \Delta i$$

上式说明电感元件两端电压与通过元件的电流变化率 $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ 成正比。只有当元件中电流变化时，元件两端才出现电压。如果电流保持恒定不变，即 $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0$ ，则电压为零。电流变化越快，电压也越大。

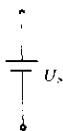
19. 电感器的额定值是什么？ 因为实际电感器都是用导线绕制的，电流不能过大。所以对电感器除了标明它的电感值外，还规定了额定电流值。



电感电流 i 与电压 u_L 的波形

1-7 电 源 元 件

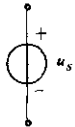
20. 电源元件有什么特点？ 干电池、蓄电池、发电机都是实际电源装置。由于它们内部都有电阻，所以在工作过程中，它们的端电压总是随着输出电流的增大而下降。实际电源理想化的模型就是电源元件，它也是一种电路元件。电源元件的特点就是它的端电压与输出电流无关。也就是说，不论输出电流多大，它的端电压能够始终保持一个恒定数值或者始终保持按一定规律变化。简单地说，可以近似认为它是一个没有内阻的电源。这种理想化的电源元件叫电压源。



直流电压源

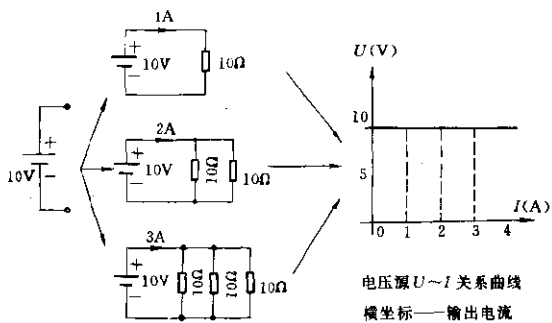
(长划是“+”极性端
短划是“-”极性端)

电压源符号



一般电压源

(它既可代表直流电压源,也可代表正弦交流电压源,或按其它规律变化的电压源)



10V 直流电压源接不同负载,输出
电流不一样,但端电压始终保持 10 V

电压源 $U \sim I$ 关系曲线
横坐标——输出电流
纵坐标——端电压

1-8 克希荷夫定律

21. 什么是克希荷夫电流定律？ 克希荷夫定律是电路最重要的基本定律，它包含两个方面的内容：一条叫电流定律，一条叫电压定律。关于电路结构方面的名词术语，请先参阅右图①。克希荷夫电流定律是这样说的：在任一时刻，从任一节点流出的支路电流的代数和恒等于零。它的数学表示式为

$$\sum_{k=1}^b i_k = 0 \quad (k=1, 2, 3 \dots)$$

符号 \sum (Sigma) 读“西格玛”，表示求代数和的意思。所谓代数是指对每个节点列写电流方程式时，规定自节点流出的电流前面取“+”号，流入的电流前面取“-”号。也可以采用相反的规定方法。

22. 应用电流定律怎样列写节点电流方程？ 右图②中，A点是右图①电路中一个节点，有三条支路与它连接。设已知 $I_1=3A$ ， $I_2=2A$ ，方向如图中所示。求 R_3 支路中的电流是多少？设通过 R_3 的电流为 I_3 ，它的实际方向不知道，不妨先假定一个方向，计算结果为正值，说明电流实际方向与假定方向一致；计算结果为负值，则电流的实际方向与假定方向相反。现在给 I_3 一个假定方向如右图③所示。根据电流定律列写方程式，则有

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

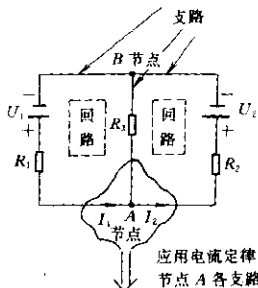
将已知值代入，得 $-3 + 2 - I_3 = 0$

所以 $I_3 = -1A$

计算结果为负值，说明 I_3 的实际方向与假定方向相反，即 I_3 从节点A流出。如果选择 I_3 的假定方向是从节点流出，如右图④所示，则计算结果为正值，即 $I_3=1A$ ，说明 I_3 的实际方向与假定方向相同。

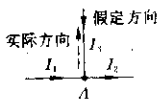
选择不同的假定方向，结果一正一负，但实际方向是一致的。

电路结构术语
 支路——没有分岔的一段电路
 节点——三条或三条以上支路相连接的点
 回路——电路中的任一闭合途径



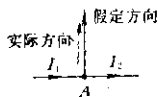
已知 $I_1 = 3A$
 $I_2 = 2A$
 方向如图
 求: 通过 R_3 的电流
 (包括大小和方向)

应用电流定律, 分析节点 A 各支路电流



计算结果 $I_3 = -1A$

③



计算结果 $I_3 = 1A$

④

(计算时, I_3 方向可以任意假定,
 但实际方向只有一个)

23. 什么是克希荷夫电压定律？ 克希荷夫电压定律是这样说的：任一时刻，沿任一回路绕行一周，回路中各段电路电压降的代数和恒等于零。数学表示式为

$$\sum_{k=1}^l u_k = 0 \quad (k=1, 2, 3, \dots)$$

在列写方程式时，首先应任意选择一个回路的绕行方向，沿着这个方向，凡是电位下降的，电压前取“+”号，反之取“-”号。

24. 应用电压定律怎样列写回路电压方程？ 右图①所示电路为某一复杂电路中的部分电路。列写回路电压方程时，首先任意选择一个回路的绕行方向，例如选顺时针方向为绕行方向。沿这个方向看1、3、5元件的电位都是下降的，所以 U_1 、 U_3 及 U_5 前应取“+”号；而2与4元件的电位是上升的，故 U_2 与 U_4 前取“-”号，即得

$$U_1 - U_2 + U_3 - U_4 + U_5 = 0$$

25. 应用电压定律如何计算电压？ 在右图②所示电路中，已知 $U_2=2\text{V}$ ， $U_3=U_4=10\text{V}$ ，求电压 U_1 （包括大小及极性）。

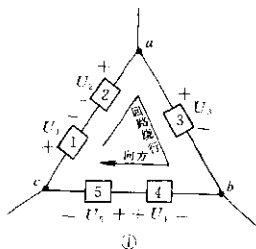
因为 U_1 的极性事先不知道，计算时，也可以先给定一个假定的极性，然后进行计算。如果计算结果为正值，则该电压的实际极性与假定的极性相同；否则相反。现在假定 U_1 的极性为上正下负（右图③）。根据电压定律，在左回路（由元件1、2、3组成）中，选顺时针方向为回路绕行方向，则有

$$-U_1 + U_2 + U_3 = 0$$

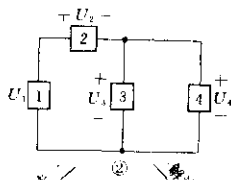
将已知值代入得 $-U_1 + 2 + 10 = 0$

所以 $U_1 = 12\text{V}$ ，（实际极性为上正下负）

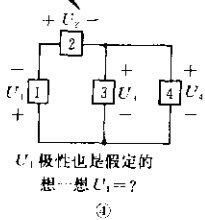
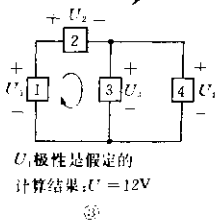
如果 U_1 的极性假定为上负下正，可以吗？试用电压定律自行计算 U_1 ，结果如何？



这是一个部分电路, 每个方块代表一个元件, 对元件性质, 未加限制. 各元件电压极性是给定的, 回路绕行方向是任意选定的, 也可以选逆时针方向为回路绕行方向



已知: $U_2 = 2V$
 $U_3 = U_4 = 10V$
 极性给定
 求 $U_1 = ?$
 (包括大小和极性)



26. 应用克希荷夫定律怎样进行电路分析计算? 任何一个电路中电流和电压的分配,都必须满足克希荷夫电流定律和电压定律,这就是进行电路分析的基本依据。支路电流法选择支路电流为未知量,根据电流定律和电压定律列写出与未知量个数相同的方程式进行求解。下面举例说明。

在右图①所示电路中,已知 $U_{s1}=12\text{V}$, $U_{s2}=6\text{V}$, $R_1=4\Omega$, $R_2=2\Omega$, $R_3=10\Omega$, 求各支路电流。

设所求电流分别为 I_1 、 I_2 及 I_3 。先给他们一个假定方向,如右图②所示。根据电流定律,在节点 a 处,则有

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (1)$$

将上述方程式各项改变符号后得到的方程就是节点 b 的电流方程。所以根据电流定律,对这个电路来说,只能列写出一个独立方程式。

再根据电压定律来列写回路电压方程。设三个电阻的电压分别为 U_1 、 U_2 及 U_3 , 假定的极性如右图③所示。在左、右两个回路中,均选顺时针方向为回路绕行方向,则

$$\text{左回路有 } -U_{s1} + U_1 - U_2 + U_{s2} = 0 \quad \text{即 } U_1 - U_2 = U_{s1} - U_{s2} \quad (2)$$

$$\text{右回路有 } -U_{s2} + U_2 + U_3 = 0 \quad \text{即 } U_2 + U_3 = U_{s2} \quad (3)$$

由式(2)与式(3)相加得到的方程恰好是最外面一个回路的电压方程。所以只能列出二个独立方程。但上述三个方程中有6个未知量 I_1 、 I_2 、 I_3 、 U_1 、 U_2 及 U_3 , 无法求解。如果再利用欧姆定律,三个电压可用相应的电流表示,即

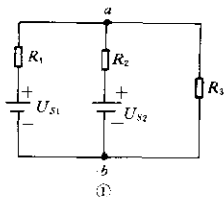
$$U_1 = R_1 I_1, \quad U_2 = R_2 I_2, \quad U_3 = R_3 I_3$$

将这三个方程分别代入式(2)及(3),并将已知值代入,则得

$$4I_1 - 2I_2 = 12 - 6 \quad (2)'$$

$$2I_2 + 10I_3 = 6 \quad (3)'$$

在式(1)、(2)'及(3)'三个方程中只有三个未知电流,联立求解可得 $I_1=1.24\text{A}$, $I_2=-0.53\text{A}$, $I_3=0.71\text{A}$ 其中 I_2 为负值,说明 I_2 的实际方向与假定方向相反。



此电路的结构：二个节点 a, b ；

三条支路，三个回路

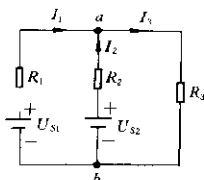
左回路：由 U_{S1}, R_1, R_2, U_{S2} 组成

右回路：由 U_{S2}, R_2, R_3 组成

外回路：由 U_{S1}, R_1, R_3 组成

此电路模型可代表：①两台直流发电机并联供电，或②一台发电机供电，两个负载中有一台电动机。

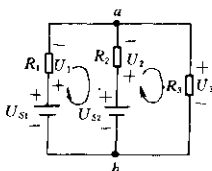
R_1, R_2 是电机内电阻



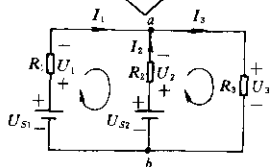
图中各电流方向是假定方向，按此图列写电流方程式

②

上面两图用下图表示



图中各电压极性是假定的极性，按此图列写电压方程式



按此图可直接写出支路电流法所需方程组

$$\begin{cases} -I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ -U_{S1} + R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{S2} = 0 \\ -U_{S1} + R_2 I_2 + R_3 I_3 = 0 \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} -I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ R_1 I_1 - R_2 I_2 = U_{S1} - U_{S2} \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 = U_{S2} \end{cases}$$

③

1-9 电阻的串联、并联和混联

27. 什么叫电阻的串联？它有什么特点？两个以上的电阻首尾依次连接起来，就叫电阻的串联（右图①）。它有如下特点：

① 串联电阻中，流过同一个电流。

② n 个电阻串联后的总电阻（或称等效电阻）等于各电阻的总和。由电压定律可知 $U=U_1+U_2+\dots+U_n$ ，其中 $U_1=R_1I$ 、 $U_2=R_2I$ 、 \dots 、 $U_n=R_nI$ 所以

$$U=R_1I+R_2I+\dots+R_nI=(R_1+R_2+\dots+R_n)I=R_{\Sigma}I$$

可见 $R_{\Sigma}=R_1+R_2+\dots+R_n$

③ 各电阻上的电压与总电压之比等于各电阻与总电阻之比。以 $n=3$ 为例

$$\therefore I = \frac{U}{R_{\Sigma}} = \frac{U}{R_1+R_2+R_3} \quad \therefore \begin{cases} U_1=R_1I = \frac{R_1}{R_1+R_2+R_3}U \\ U_2=R_2I = \frac{R_2}{R_1+R_2+R_3}U \\ U_3=R_3I = \frac{R_3}{R_1+R_2+R_3}U \end{cases}$$

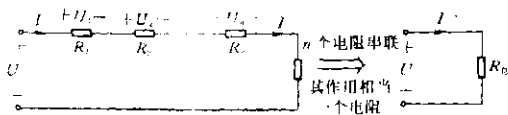
这就是电阻串联的分压原理公式。

28. 电阻串联有什么用途？在电子仪器中，常常利用电阻串联组成分压器，以便从电源中取用部分电压。由三个电阻组成的分压器如右图④所示。 R_2 为电位器，它有一个可移动的端钮 A 。如果 $U_i=12V$ ， $R_1=R_3=515\Omega$ ， $R_2=470\Omega$ ，问输出电压 U_o 的变化范围如何？

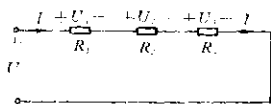
$$\text{当 } A \text{ 位于 } b \text{ 端时, } U_o = \frac{R_3}{R_1+R_2+R_3}U_i = 4.12V;$$

$$\text{当 } A \text{ 位于 } a \text{ 端时, } U_o = \frac{R_2+R_3}{R_1+R_2+R_3}U_i = 7.88V.$$

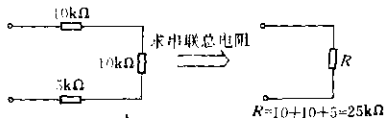
所以输出电压 U_o 的变化范围是 $4.12 \sim 7.88V$ 。



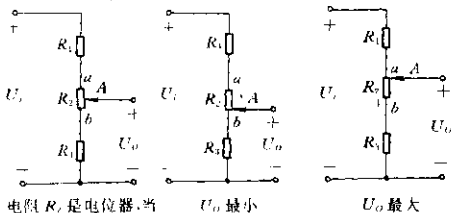
①



②



③



电阻 R_2 是电位器, 当
端点 A 上下移动时,
输出电压 U_o 变化

4 分压器电路

29. 什么是电阻的并联？它有什么特点？将 n 个电阻的一端连在一起，各电阻的另一端也连在一起，就叫做电阻的并联（右图①），它有如下特点：

① 并联电阻两端施加的是同一个电压。

② n 个电阻并联的总电阻，按下列公式计算，即

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

证明如下：由电流定律可知

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n, \quad \text{即} \quad \frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \cdots + \frac{U}{R_n}$$

故得
$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

当 $n=2$ 时，因 $\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ，故 $R_{\text{总}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 电阻并联后的总电阻比两个电阻中较小的电阻值还要小。电阻越并越小。

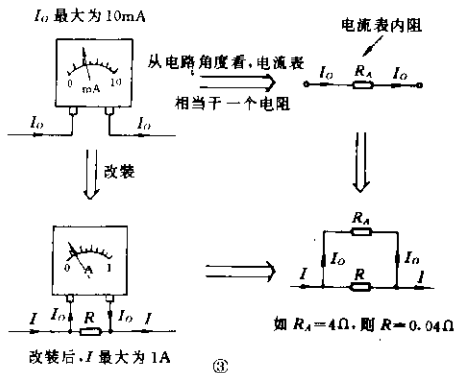
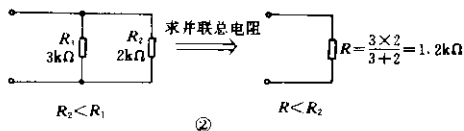
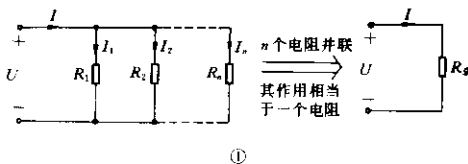
③ 各电阻中的电流与其电阻值成反比。以 $n=2$ 为例，因 $U = R_1 I_1 = R_2 I_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I$ ，所以 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ ，各电阻中的电流与总电流的关系如下：

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

这就是两个电阻并联的分流原理公式。

30. 电阻并联有什么用途？利用电阻并联的分流原理，可以扩大电流表的量程。例如有一个内阻为 4Ω 的 10mA 直流电流表（右图③），欲改装成量程为 1A 的电流表。只要在原电流表表头两端并联一个较小的电阻 R ，便可将其量程扩大。 R 的大小可计算如下。

原电流表表头内阻为 $R_A = 4\Omega$ ，能测最大电流为 $I_s = 10\text{mA} = 0.01\text{A}$ ，并联电阻后能测最大电流为 $I = 1\text{A}$ ，应用分流公式，因 $I_s = \frac{R}{R_A + R} I$ ，即 $0.01 = \frac{R}{4 + R} \times 1$ ，故 $R = 0.04\Omega$ 。



31. 什么是电阻的混联？混联电阻的总电阻如何计算？ 几个电阻连接在一起，既有电阻的串联，又有电阻的并联，这种连接方式就叫电阻的混联。电阻混联后也相当于一个电阻，它的总电阻没有统一的计算公式，具体情况，具体分析。例如有五个电阻按右图①方式连接。计算电阻混联后的总电阻时，首先要看清楚各个电阻之间的相互关系、连接方式，哪些电阻是串联，哪些电阻是并联。然后按照电阻串联和并联的计算方法，逐步计算，逐步简化，最后可求得一个总电阻。具体计算步骤用右图①至⑤进行说明。

32. 混联电路又怎样分析计算呢？ 由电阻混联组成的电路叫混联电路。因为这种电路是由电阻串联和并联组成，所以用欧姆定律以及前面介绍的分压、分流原理就可以进行分析计算，不必用支路电流法计算。举例如下：

在右图⑥所示电路中，已知 $R_1=R_3=5\Omega$ ， $R_2=R_4=R_5=10\Omega$ ， $U=6V$ ，求各支路电流（方向如图所示）。

解：右图⑥电路中，先求出电路的总电阻 R_{Σ} 。

R_4 与 R_5 并联，它的等效电阻 $R_{cd} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 5\Omega$

由右图②， R_3 与 R_{cd} 是串联， $R_{cd} = R_3 + R_{cd} = 5 + 5 = 10\Omega$ 。

由右图③， R_2 与 R_{cd} 并联之后，再与 R_1 串联，所以 $R_{\Sigma} = R_1 +$

$$\frac{R_2 R_{cd}}{R_2 + R_{cd}} = 5 + \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 10\Omega \quad \text{因此，} I_1 = U/R_{\Sigma} = 6/10 = 0.6A$$

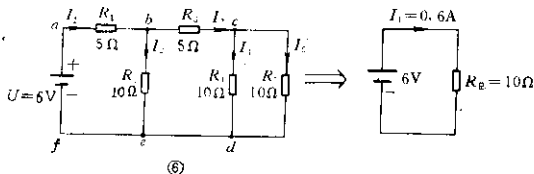
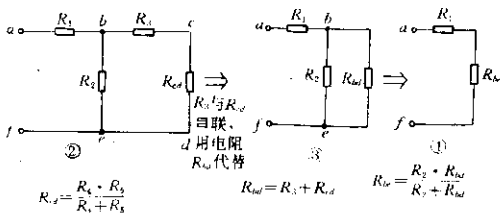
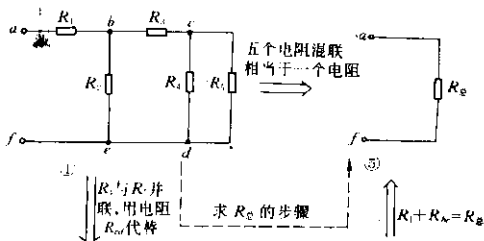
应用分流公式，由右图③可得

$$I_2 = \frac{R_{cd}}{R_2 + R_{cd}} I_1 = \frac{10}{10 + 10} \times 0.6 = 0.3A$$

$$I_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_{cd}} I_1 = \frac{10}{10 + 10} \times 0.6 = 0.3A$$

R_4 与 R_5 并联且相等，由分流公式得

$$I_4 = I_5 = \frac{1}{2} I_2 = \frac{1}{2} \times 0.3 = 0.15A$$



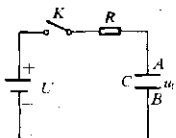
1-10 电容的充电和放电过程

33. 何谓电容的充电？充电过程中，电容的电压和电流是怎样变化的？ 将一个原来不带电的电容与直流电源接通，电容两端就立即出现电荷与电压，并由小逐渐增大。电容两端建立电荷和电压的过程，就叫做电容的充电过程。用右图①、②电路说明如下：

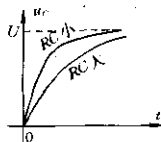
开关 K 未闭合前，电容不带电，即 $q=0$ ， $u_C=0$ 。当开关 K 闭合后，电源的正极将把正电荷送往电容的 A 端，（ B 端正电荷吸向负极）于是与 A 、 B 端连接的导线中有电荷作定向移动，形成了电流，叫充电电流。开关 K 闭合瞬间 $u_C=0$ ，根据电压定律 $U=u_R+u_C$ ，故电阻电压 $u_R=U$ ，而充电电流 $i=\frac{u_R}{R}=\frac{U}{R}$ 。当电容两端有了电荷，便产生电压 $u_C \neq 0$ ，因而 $u_R=U-u_C$ 开始减小，充电电流也随之减小。以后，电容两端电荷逐渐增多，电压 u_C 逐渐增大，于是电阻电压 u_R 与充电电流均逐渐减小，直到电容两端电压等于电源电压，即 $u_C=U$ 时， $u_R=0$ ， $i=0$ ，充电过程结束。数学分析证明在充电过程中，电容电压 u_C 的变化是按指数规律上升的，而充电电流则按指数规律衰减。 u_C 与 i 的变化快慢仅与电阻 R 和电容 C 大小有关， RC 乘积越大，充电过程越长； RC 乘积越小，充电过程结束越快。

34. 何谓电容的放电？放电过程中，电容电压和电流又是怎样变化的？ 如果将已被充电的电容（两端有电荷和电压）用一根导线把它两端连接起来，如右图③所示，则电容两端的正负电荷发生中和，电荷逐渐减少，电压逐渐降低，直至电荷消失，电压为零。电容失去电荷，电压降低的过程，叫电容的放电过程。当正负电荷中和时，在与电容相连接的导线中，由于电荷定向移动而形成的电流叫放电电流。同样可以证明，在放电过程中，电容电压及放电电流都是按指数规律衰减的，衰减的快慢也是由 RC 乘积大小决定的。

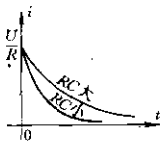
(包括导线电阻)



直流电源通过电阻向电容充电的电路模型
K未闭合前, C不带电 ($u_c=0$)

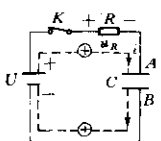


充电时, u_c 的变化



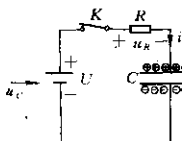
充电时, 电流的变化

①



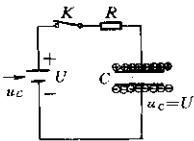
K闭合瞬间, 因 $u_c=0$
故 $u_R=U$, 开始充电

$$\text{电流 } i = \frac{U}{R}$$



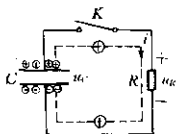
K闭合后, 在充电过程中,
电容两端逐渐聚集电荷

$$u_c \nearrow, u_R \searrow, i = \frac{u_R}{R} \searrow$$

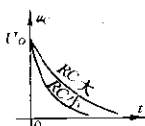


充电完毕, $u_c=U$,
因此, $u_R=0$, $i=0$

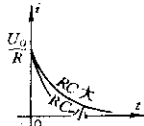
② 充电过程 $u_R + u_c = U$



已充电电容(K未闭合前
 $u_c=U_0$)通过电阻放电



放电时, u_c 的变化



放电时, i 的变化

③ 放电过程 $u_R = u_c$

第二章 正弦交流电路

2-1 正弦电压和正弦电流的三要素

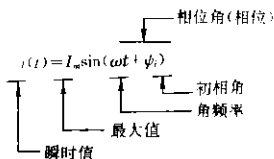
35. 什么是正弦电压和正弦电流？大小和方向都随时间按正弦规律变化的电压或电流叫做正弦电压或正弦电流（右图①）。数学表示式为 $u(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_u)$ $i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi_i)$ 。任一时刻的电压（电流）值叫瞬时值。用 u 、 i 表示。正弦电流电路又叫交流电路。

36. 正弦电压（电流）的三要素是什么？①最大值（又称振幅或幅值）。瞬时值中的最大数值叫最大值，如 U_m 、 I_m ，它表示正弦波变化范围。②相位角和初相角（相位和初相位）。 $(\omega t + \phi_u)$ 及 $(\omega t + \phi_i)$ 叫相位角或相位，单位为弧度或度。 $t=0$ 时的相位角（ ϕ_u 或 ϕ_i ）叫初相角（或初相位）。它表示正弦波变化的进程。③周期、频率、角频率。正弦电压（电流）的瞬时值重复出现所需的最短时间就叫周期，用 T 表示，单位为秒。单位时间内变化的循环数叫频率，用 f 表示（ $f = \frac{1}{T}$ ）。单位为赫兹，用符号 Hz 表示。正弦曲线每周期内相位角变化 2π 弧度。每秒变化的弧度数叫角频率，用 ω 表示，故 $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ ，单位为弧度/秒（rad/s）。 T 、 f 、 ω 都是表示正弦波变化快慢的。

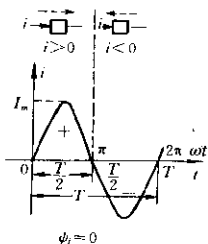
37. 正弦电流（电压）有什么特点？可以证明正弦曲线的变化率与时间的关系曲线也是正弦曲线，频率相同，但两者相位不同。电压为零时，电压的变化率为最大；而电压达到最大值时，它的变化率却为零。



箭头方向为电流的假定方向
 $i > 0$ 时实际方向与假定方向一致
 $i < 0$ 时实际方向与假定方向相反

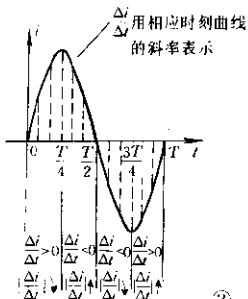
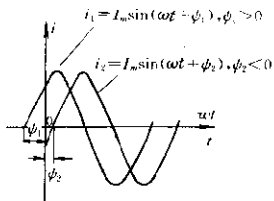


正弦电流瞬时值表达式

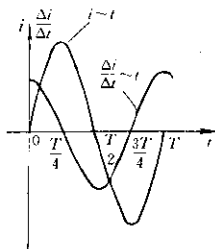


(虚线表示电流实际方向)

①



②



正弦电流及其变化率随时间变化关系

2-2 相位差和有效值

38. 什么叫相位差? 两个同频率的正弦电流(电压),或正弦电压与同频率正弦电流相位之差叫相位差。例如有

$$i_1(t) = I_{m1} \sin(\omega t + \phi_1), i_2(t) = I_{m2} \sin(\omega t + \phi_2)$$

两者相位差为 $\varphi = (\omega t + \phi_1) - (\omega t + \phi_2) = \phi_1 - \phi_2$, 可见, 相位差等于初相之差。

$\varphi = 0$ 叫同相, $\varphi = \pm \pi$ 叫反相, $\varphi > 0$ 叫 i_1 超前 i_2 , $\varphi < 0$ 叫 i_1 滞后 i_2 。

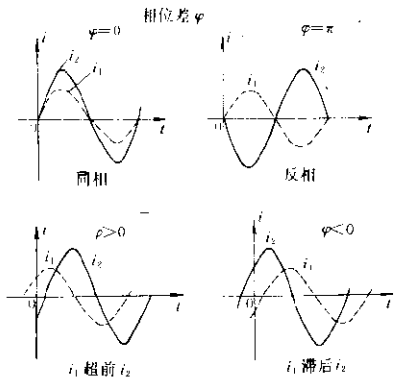
39. 正弦电流(电压)的有效值是什么? 与直流电热效应(发热量)相同的直流电流(电压)值叫做正弦电流(电压)的有效值。也就是说, 如果一个正弦电流 ($i = I_m \sin \omega t$) 通过电阻 R , 在时间 T 内产生的热量等于一个直流电流 (I), 通过同一个电阻 R , 在相同时间 T 内产生的热量, 则此直流电流值 I , 就叫做这个正弦电流的有效值。电压有效值的意义相同。

有效值规定用大写英文字母(不带注脚 m) 表示, 如电流有效值为 I , 电压有效值为 U 。用数学方法可以证明, 正弦量有效值与最大值之间有固定关系:

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m \quad \text{或} \quad I_m = \sqrt{2} I$$

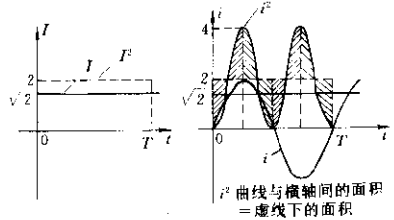
$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m = 0.707 U_m \quad \text{或} \quad U_m = \sqrt{2} U$$

通常说的交流电压 220V 和 380V, 都是指有效值。交流电表上的指示值也是用有效值表示的。各种交流电气设备的额定值(电压、电流)也是指有效值。



有效值意义

直流电流 I (设 $I = \sqrt{2} A$) 正弦电流 $i = I_m \sin \omega t$ (设 $I_m = 2 A$)
 $R I^2 \leftarrow$ 功率 $\rightarrow R i^2$
 功率 \times 时间 = 消耗的能量



两图中虚线下面积相等。即两个电流通过同一电阻 R ，在相同时间内发热量相同，效果一样，直流电流值 I 就叫正弦电流有效值

2-3 电阻元件的电压与电流的关系

40. 瞬时值之间有什么关系？ 电阻元件 (R) 的电压 (u_R) 与电流 (i) 瞬时值之间有下列关系

$$u_R = Ri$$

设 $i = I_m \sin(\omega t + \phi_i)$, 则

$$u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t + \phi_i) = U_{Rm} \sin(\omega t + \phi_u)$$

ϕ_i 、 ϕ_u 分别是电流和电压的初相。电压和电流是同频率的正弦波。

41. 有效值之间有什么关系？ 由上述讨论中可以看出

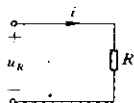
$$U_{Rm} = RI_m$$

因电压有效值 $U_R = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Rm}$, 电流有效值 $I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m$

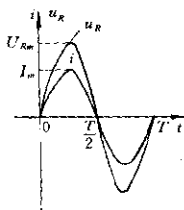
所以 $U_R = RI$

电阻元件的电压与电流有效值的关系和直流电路中的关系一样, 只不过在正弦交流电路中, 电压和电流都是有效值。

42. 相位差的关系又如何呢？ 由 40 问可知 $\phi_u = \phi_i$, 即电压的初相和电流的初相相同, 两者相位差为零 ($\varphi = 0$), 所以电阻元件的电压与电流是同相的。其特点是, 电压和电流同时达到最大值, 也同时为零, 两者变化步调一致, 这是正弦交流电路中, 电阻元件一个极为重要的特点。



$$u_R = Ri$$



$$i(t) = I_m \sin \omega t$$

$$u_R(t) = U_{Rm} \sin \omega t$$

$u_R(t)$ 与 $i(t)$ 同相

电流	直 流	正 弦 电 流
电路	<p>A circuit diagram for DC with a resistor R and a DC voltage source U_R. The current is labeled I.</p>	<p>A circuit diagram for AC with a resistor R and an AC voltage source u_R. The current is labeled i.</p>
电压 与电 流关系	$U_R = RI$	瞬时值 $u_R = Ri$
		有效值 $U_R = RI$

2-4 电容元件的电压与电流的关系

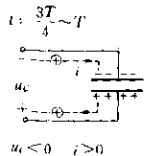
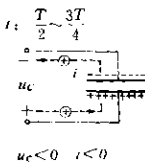
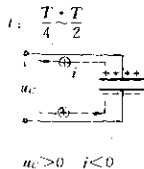
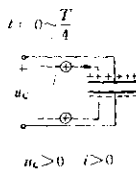
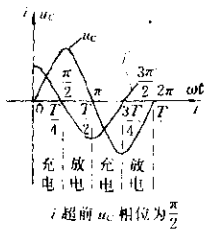
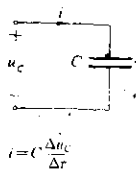
43. 瞬时值之间有什么关系？ 电容中电流与电压瞬时值之间有下列关系： $i=C \frac{\Delta u_C}{\Delta t}$ ，即通过电容的电流 i 与其两端电压 u_C 的变化率 ($\frac{\Delta u_C}{\Delta t}$) 成正比。在 2-1 节 37 问已指出，正弦波的变化率也是随时间按正弦规律变化的，且频率与原正弦波的频率相同。由此可知，当电容两端加正弦电压时，通过电容的电流也是正弦变化的，且频率与电压相同，但有相位差。

设电容电压为 $u_C=U_{Cm}\sin\omega t$ ，则通过电容的电流为

$$i=\omega CU_{Cm}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)=I_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$

44. 有效值之间有什么关系？ 在上式中， $I_m=\omega CU_{Cm}$ ，因为 $I=\frac{1}{\sqrt{2}}I_m$ ，所以 $I=\omega CU_C$ ，令 $X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}$ 代入上式，则有 $\frac{U_C}{I}=X_C$ 。该式说明电容电压有效值与电流有效值成正比，比值常数 X_C 叫做电容电抗。

45. 相位关系又如何呢？ 由 43 问中 u_C 与 i 的表示式可以看出，电压与电流的相位差为 $\varphi=\psi_u-\psi_i=0-\frac{\pi}{2}=-\frac{\pi}{2}<0$ ，电压滞后于电流的相位为 90° ；也可以说成在相位上，电流超前电压 90° ，这点与电阻元件不同。当电容电压达到最大值时，电流却为零；而电压为零时，电流却出现最大值。为什么电压为零而电流不为零呢？这是因为通过电容的电流是与电压变化率成正比；电压虽为零，但它的变化率最大，所以电流达最大值。



46. 直流电流不能通过电容，为什么交流电流能通过电容呢？

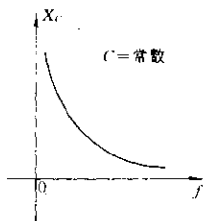
在1-5节15问中曾经指出，直流电流不能通过电容，交流电流能通过电容。这是因为电容电流量与其两端电压变化率成正比，而正弦电压是时刻发生变化的。当电容两端电压发生变化时，电容两端的电荷也不断作有规律的变化；电荷有规律的变化，意味着电荷作定向移动，从而在连接导线中形成了电流。其实电荷并非真正通过电容器的电介质空间，只不过是电容两端来回移动罢了，看起来好像通过电容一样，请看43页图的说明。

47. 电容电抗 X_C 有什么作用？它与哪些因素有关？ 电容电压有效值 U_C 与电流有效值 I 之比 X_C 叫做电容电抗，简称容抗，单位为欧 (Ω)。由式 $I = \frac{U_C}{X_C}$ 可知，在相同电压作用下，容抗 X_C 大则电流 I 小； X_C 小则 I 大。说明容抗有抵抗交流电流的作用，和电阻有阻止电流通的作用相似。

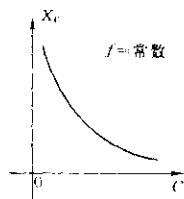
由 $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ 可知，容抗与电容大小 C 成反比，也和电流频率 f 成反比。对一定值的电容来说，频率越高，容抗越小；频率越低，容抗越大。容抗小，电流容易通过；容抗大，电流不易通过。直流电也可看成是 $f=0$ 的交流电，这时容抗是无穷大，故电流为零。所以说，直流电流不能通过电容。从另一个角度看，因为 $i = C \frac{\Delta u_C}{\Delta t}$ ，所以电压频率高，意味着电压变化快，电压变化率大，电流就大。

当频率一定时，电容越大（储存电荷越多），单位时间内移动的电荷越多，电流也就大，意味着这时容抗就小。

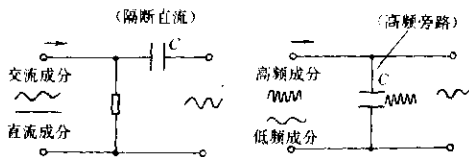
容抗 $X_C = \omega C = \frac{1}{2\pi fC}$



X_C 与 f 的关系



X_C 与 C 的关系



电容的作用

2-5 电感元件的电压与电流的关系

由 18 问可知,在正弦交流电中, $u_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$

参照电容电压与电流的关系可知,当电感中电流为正弦变化时,电感两端的电压也是按同频率正弦变化的,但相位不同。

设 $i = I_m \sin \omega t$, 由数学方法可证明电感电压为

$$u_L = \omega L I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

49. 有效值之间有什么关系? 在上式中,因为 $U_{Lm} = \omega L I_m$, 且

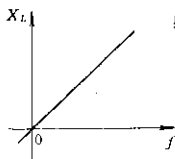
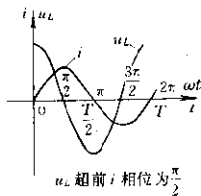
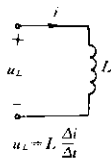
$$U_L = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Lm}, I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m, \text{ 所以 } U_L = \omega L I,$$

令 $X_L = \omega L = 2\pi f L$, 则上式也可写成 $U_L / I = X_L$, 即电感电压有效值 U_L 与电流有效值 I 成正比, 比值常数 X_L 叫做电感电抗。

50. 相位关系又如何呢? 电感元件的电压与电流的相位差为 $\varphi = \frac{\pi}{2} > 0$, 电感电压在相位上超前电流 90° 。这点与电容元件恰恰相反。因为这两种元件中电压与电流瞬时值关系恰恰相反 ($u_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$, $i = C \frac{\Delta u_C}{\Delta t}$)。

51. 电感电抗 X_L 有什么作用? 它与哪些因素有关? 电感电抗 X_L 简称感抗, 单位也是欧 (Ω)。因 $I = U_L / X_L$, 所以在相同电压作用下, X_L 大则 I 小; X_L 小则 I 大。说明感抗也有抵抗交流电流的作用。

感抗与电感 L 及频率 f 成正比。对一个电感线圈来说, 电感值一定, 频率越高, 感应电动势越大, 或者说感抗越大, 电流就小, 对直流电流来说, $f=0$, 没有感应电动势, 感抗为零, 所以直流电流及低频电流容易通过电感元件, 而高频电流则不易通过。



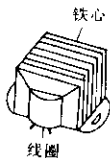
感抗 X_L 与频率 f 的关系

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

常见的实际电感线圈



空心电感线圈



铁心电感线圈

2-6 电阻与电容串联电路中电压与电流的关系

52. 电阻电压 u_R 、电容电压 u_C 与总电压 u 瞬时值之间有何关系?

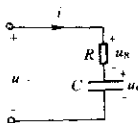
在右图电路中, 设电流为 $i = I_m \sin \omega t$, 由于 $u_R = RI_m \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t$, $u_C = \frac{1}{\omega C} I_m \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) = -U_{Cm} \cos \omega t$, 根据克希荷夫电压定律, 应有 $u = u_R + u_C$, 即 $u = U_{Rm} \sin \omega t - U_{Cm} \cos \omega t$

令 $U_{Rm} / \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Cm}^2} = \cos \theta$, $U_{Cm} / \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Cm}^2} = \sin \theta$, 则 $\tan \theta = U_{Cm} / U_{Rm}$, 故得 $U_C = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Cm}^2} \sin (\omega t - \theta) = U_m \sin (\omega t + \phi_u)$, 其中 $U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Cm}^2}$ 为总电压最大值, $\phi_u = -\theta$ 为初相。由上述分析可知, 当 RC 串联电路中通过正弦电流时, 电阻电压、电容电压及总电压都是同频率的正弦波, 但相位各不相同。

53. 三个电压有效值之间有什么关系? 设三个电压有效值分别为 U_R 、 U_C 及 U , 因为 $U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Cm}^2}$, 且 $U_R = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Rm}$, $U_C = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Cm}$, $U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m$, 所以三个电压有效值之间的关系为 $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$ 。

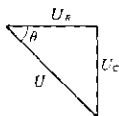
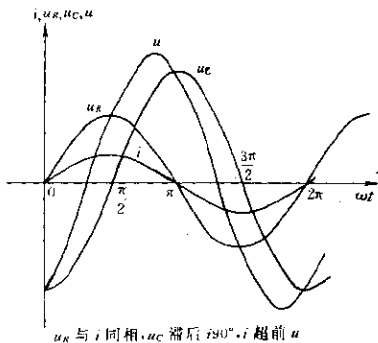
54. 总电压与电流有效值之间又有什么关系? 因为 $U_R = RI$, $U_C = \frac{1}{\omega C} I = X_C I$, 所以 $U = \sqrt{(RI)^2 + (X_C I)^2} = I \sqrt{R^2 + X_C^2}$, 令 $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$, 则有 $U = ZI$, 式中 Z 叫阻抗, 单位为欧 (Ω)。

55. RC 串联电路中阻抗由什么因素决定? 如何计算? 因为 $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + (\frac{1}{2\pi f C})^2}$, 所以阻抗大小完全由 R 、 C 及 f 决定。它的大小也可用电压、电流有效值计算, 即 $Z = U/I$ 。



根据电压定律

$$u = u_R + u_C$$



三个电压有效值 U_R, U_C, U 构成一个直角三角形, 叫电压三角形
 $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$ 注意: $U \neq U_R + U_C$

56. 总电压与电流的相位关系如何? 因为 $u = U_m \sin(\omega t - \theta)$, $i = I_m \sin \omega t$, 所以 R_C 串联电路中, 在相位上, 总电压滞后于电流一个角度 θ (又叫阻抗角), $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ 。它的大小可以按照下式计算。因 $U_C = \frac{1}{\omega C} I$, $U_R = RI$, 所以 $\theta = \text{tg}^{-1} U_C / U_R = \text{tg}^{-1} \frac{1}{\omega CR}$ 可见, 在 RC 串联电路中, 电压与电流的相位差仅仅由电路参数 R 、 C 及电源频率 f 决定。

57. 电容串联或并联时, 如何计算其等效电容?

串联时见右图: 设 $i = I_m \sin \omega t$ 则 $(u_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}))$,
 $u_{C_2} = \frac{1}{\omega C_2} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$
 所以 $u = u_{C_1} + u_{C_2} = (\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}) I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$

其中 $\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}$

因此, 两个电容 (C_1 与 C_2) 串联时, 其等效电容按下式计算,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{或} \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

它与两电阻并联时的总电阻的计算公式相似。

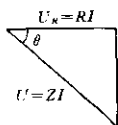
并联时 (见右图): 设 $u = U_m \sin \omega t$, 则 $i_1 = \omega C_1 U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$,
 $i_2 = \omega C_2 U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ 。
 由克希荷夫电流定律, 应有

$$i = i_1 + i_2 = (\omega C_1 + \omega C_2) U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \omega C U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

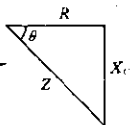
所以两电容并联后的等效电容为

$$C = C_1 + C_2$$

它与两电阻串联的总电阻计算公式相似。



电压三角形



阻抗三角形 $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

电容与电阻计算公式比较(并联与串联)

	电 阻	电 容
并 联	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	$C = C_1 + C_2$
串 联	$R = R_1 + R_2$	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

2-7 电阻与电感串联电路中电压与电流的关系

58. 电阻电压 u_R 、电感电压 u_L 与总电压 u 瞬时值有什么关系?

在 RL 串联电路中, 设电流为 $i = I_m \sin \omega t$, 则 $u_R = RI_m \sin \omega t =$

$U_{Rm} \sin \omega t$, $u_L = \omega LI_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_{Lm} \cos \omega t$ 。根据克希荷夫电压定律, 应有 $u = u_R + u_L$, 即 $u = U_{Rm} \sin \omega t + U_{Lm} \cos \omega t$

令 $\frac{U_{Rm}}{\sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Lm}^2}} = \cos \varphi$, $\frac{U_{Lm}}{\sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Lm}^2}} = \sin \varphi$, 则 $\text{tg} \varphi = \frac{U_{Lm}}{U_{Rm}}$

所以 $u = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Lm}^2} \sin(\omega t + \varphi) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$

其中 $U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Lm}^2}$ 为总电压最大值, $\varphi = \varphi$ 为初相。由上述分析可知, 当 RL 串联电路中通过正弦电流时, 三个电压 (u_R 、 u_L 及 u) 也都是同频率的正弦波, 但相位各不相同。

59. 三个电压有效值之间有什么关系? 设三个电压有效值为

$U_R = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Rm}$, $U_L = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Lm}$, $U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m$, 则有 $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$

60. 总电压与电流有效值之间又有什么关系? 将 $U_R = RI$ 及

$U_L = \omega LI$ 代入上式可得 $U = \sqrt{(RI)^2 + (\omega LI)^2} = I \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$

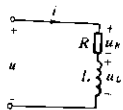
所以 $U/I = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = Z$, 式中 Z 也叫阻抗, 单位亦为欧 (Ω)。

61. RL 串联电路的阻抗由什么因素决定? 因 $Z =$

$\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, 所以 RL 串联电路的阻抗仅仅由电路参数 R 、 L 及电源频率决定。它的大小可按上式计算; 或用公式 $U/I = Z$ 计算。

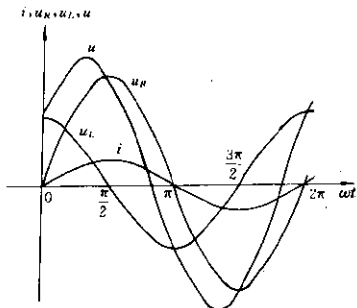
62. 总电压与电流的相位差如何? 它由什么因素决定? 从 u 及

i 的表示式可以看出, 在 RL 串联电路中, 在相位上, 总电压超前电流 φ (也叫阻抗角), $0 < \varphi < \pi/2$ 。这一特点与 RC 串联电路的情况恰恰相反, 应特别注意! φ 的大小由 R 、 L 及电源频率决定。

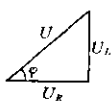


根据电压定律

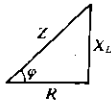
$$u = u_R + u_L$$



u_R 与 i 同相, u_L 超前 i 90° , u 超前 i



电压三角形



阻抗三角形

2-8 RLC 串联电路中电压与电流的关系

63. u_R 、 u_C 、 u_L 及 u 之间有什么关系？如 $i = I_m \sin \omega t$ ，则 $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$ ， $u_C = -U_{Cm} \cos \omega t$ ， $u_L = U_{Lm} \cos \omega t$ ， $u = u_R + u_C + u_L = u_{Rm} \sin \omega t + (U_{Lm} - U_{Cm}) \cos \omega t$

$$\text{令 } \frac{U_{Rm}}{\sqrt{(U_{Rm})^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}} = \cos \varphi, \quad \frac{U_{Lm} - U_{Cm}}{\sqrt{(U_{Rm})^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}} =$$

$\sin \varphi$ ，则 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ 。式中 $U_m = \sqrt{(U_{Rm})^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}$ ， $\varphi = \varphi - \text{tg}^{-1}(U_{Lm} - U_{Cm}) / U_{Rm}$ ，分别为总电压的最大值及初相。当电流为正弦波时，各电压均为同频率正弦波，但相位不同。

64. 各电压有效值之间有什么关系？因为 $U_R = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Rm}$ ， $U_C = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Cm}$ ， $U_L = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{Lm}$ ，且 $U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m$ 故得

$$U = \sqrt{(U_R)^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

65. 总电压有效值与电流有效值之间又有什么关系？ $U = I \cdot$

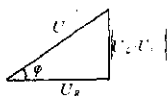
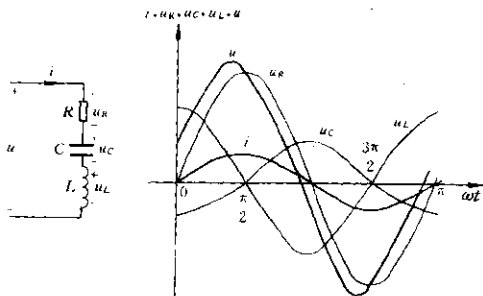
$$\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}, \text{ 即 } U/I = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = Z$$

Z 也叫阻抗，单位仍为欧 (Ω)。

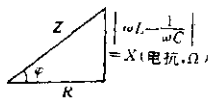
66. 总电压与电流的相位差如何？

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{U_{Lm} - U_{Cm}}{U_{Rm}} = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (\text{也叫阻抗角})$$

当 $\varphi > 0$ 时， u 超前 i ，相当于 RL 串联电路；当 $\varphi < 0$ 时， u 滞后 i ，相当于 RC 串联电路；当 $\varphi = 0$ 时， u 与 i 同相，相当于纯电阻电路。



电压三角形



阻抗三角形

X	$\omega L > \frac{1}{\omega C}$ (即 $X > 0$)	$\omega L < \frac{1}{\omega C}$ (即 $X < 0$)	$\omega L = \frac{1}{\omega C}$ (即 $X = 0$)
效果 相同的 电路			
φ	$\varphi > 0$	$\varphi < 0$	$\varphi = 0$

2-9 正弦交流电路的功率

67. 什么叫瞬时功率？在任一瞬间，电路两端电压的瞬时值 $u(t)$ 与通过电路的电流瞬时值 $i(t)$ 的乘积叫瞬时功率，用小写英文字母 p 表示，单位为瓦 (W)。瞬时功率

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

它是随时间变化的。各元件中的瞬时功率是不相同的。

68. 电阻元件的瞬时功率如何？设 $i(t) = I_m \sin \omega t$ ，则 $u_R(t) = RI_m \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t$ ，所以电阻元件的瞬时功率为

$$p_R(t) = u_R(t) \cdot i(t) = U_{Rm} I_m \sin^2 \omega t = U_{Rm} I_m \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) = U_R I (1 - \cos 2\omega t)$$

它随时间变化，所有时刻 p_R 均为正值。所以电阻元件总是消耗功率的。

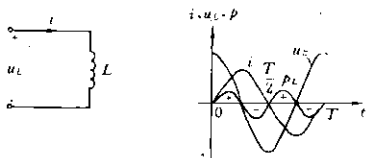
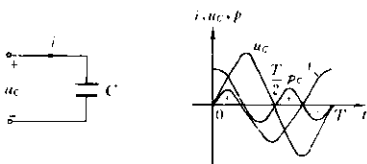
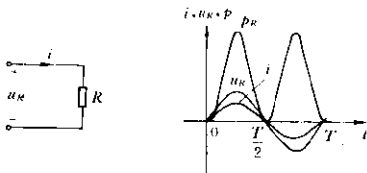
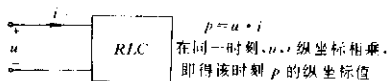
69. 电容元件的瞬时功率如何？设 $u_C(t) = U_{Cm} \sin \omega t$ ，则 $i(t) = \omega C U_{Cm} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_m \cos \omega t$ ，所以电容元件的瞬时功率为

$p_C(t) = u_C(t) \cdot i(t) = U_{Cm} I_m \sin \omega t \cdot \cos \omega t = 2U_C I \cdot \frac{1}{2} \sin 2\omega t = U_C I \sin 2\omega t$ 它按正弦规律变化，变化频率是电源频率的两倍。在半个周期内 p_C 为正值，表示电容从电源吸收功率；在另半个周期内 p_C 为负值，表示电容输出功率。实质上是一会儿吸收能量，一会儿又释放能量。

70. 电感元件的瞬时功率又如何？设 $i(t) = I_m \sin \omega t$ ，则 $u_L(t) = \omega L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_{Lm} \cos \omega t$ ，所以电感元件的瞬时功率为

$$p_L(t) = u_L(t) \cdot i(t) = U_{Lm} I_m \sin \omega t \cdot \cos \omega t = U_L I \sin 2\omega t$$

它也是按两倍电源频率作正弦变化的。 p_L 为正值，表示吸收功率（吸收能量）； p_L 为负值，表示输出功率（释放能量）。



71. 什么是平均功率？ 在正弦交流电路中，瞬时功率是随时间变化的，不便衡量功率的大小。通常都是取一个周期内功率的平均值来衡量它的大小，这个平均值就叫做平均功率，又叫有功功率，表明是有用的功率。平均功率用 P 表示，单位为瓦 (W)。

72. 电阻的平均功率如何计算？ 电阻的瞬时功率为 $p_R = U_R I (1 - \cos 2\omega t)$ ，功率曲线 (右图①) 由两部分曲线合成：一条是直线，代表 $U_R I$ ；另一条是正弦曲线，代表按正弦变化的分量 $U_R I \cos 2\omega t$ 。正弦曲线的纵坐标值在一个周期内的平均值等于零，所以电阻瞬时功率在一个周期内的平均值，即平均功率为

$$P_R = U_R I = RI^2 = \frac{U_R^2}{R}$$

计算公式跟直流电路相同。应当注意，在交流电路中，电压、电流必须用有效值计算。

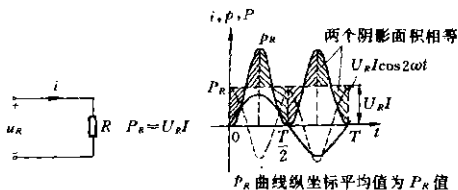
73. 电容的平均功率是多少？ 因为电容的瞬时功率 $p_C = U_C I \sin 2\omega t$ 是一条正弦曲线，在一个周期内，它的纵坐标平均值为零，所以电容的平均功率为零，即 $P_C = 0$ 。

其物理意义是：电容元件在电压的 $\frac{1}{4}$ 周期内从电源吸取能量，并转变为电场能量储存起来；在下一个 $\frac{1}{4}$ 周期内，将吸取的能量全部释放出来，还给电源；在另半个周期内，重复上述过程。因此，在一个周期内有两次吸收能量，两次释放能量。释放的能量等于吸收的能量，所以电容的平均功率为零，说明这种元件不消耗功率 (这里讨论的是理想化元件)。

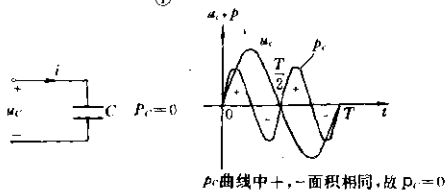
74. 电感的平均功率又如何？ 电感的瞬时功率也是一条正弦曲线，和电容一样，它的平均功率也等于零，即 $P_L = 0$ 。

其物理意义也和电容元件相似。在交流电路中，理想化的电感元件与电源之间也只有能量的交换过程，元件本身并不消耗功率。

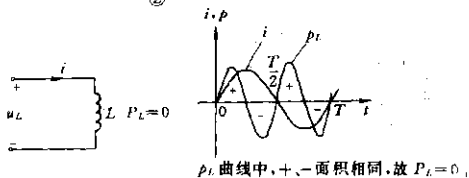
各元件中的平均功率 P (一个周期内 p 的平均值)



①



②



③

75. 一般交流电路的平均功率怎样计算？ 一般交流电路都由 R 、 L 、 C 等元件组成，总电压 u 与总电流 i 一般都存在相位差 φ 。设 $i = I_m \sin \omega t$ ， $u = U_m \sin (\omega t + \varphi)$ ，则瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= u \cdot i \\ &= U_m I_m \sin \omega t [\sin \omega t \cdot \cos \varphi + \cos \omega t \cdot \sin \varphi] \\ &= U_m I_m \cos \varphi \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) + \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t \cdot \sin \varphi \\ &= UI \cos \varphi - UI [\cos \varphi \cdot \cos 2\omega t - \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t] \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

它由两部分合成： $UI \cos \varphi$ 是常数项； $UI \cos (2\omega t + \varphi)$ 是正弦变化项，但频率为电源频率的两倍。因为在一个周期内正弦曲线纵坐标平均值为零，所以一般交流电路的平均功率计算公式为 $P = UI \cos \varphi$ 。

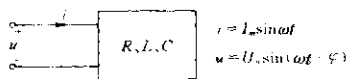
76. 什么是视在功率？ 电压有效值 U 与电流有效值 I 的乘积叫做视在功率，用 S 表示，即 $S = UI$ 单位为伏安 (VA) 或千伏安 (kVA)。通常用它来表示电气设备的容量。

77. 什么是无功功率？ 无功功率用 Q 表示，它的定义公式为 $Q = UI \sin \varphi$ ，其中 φ 为电压与电流的相位差。单位为无功伏安，或叫乏 (var)。这是一个为了表明电路中 C 、 L 元件与电源之间进行能量交换的情况而引入的功率概念。

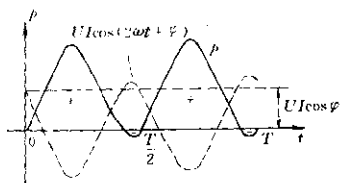
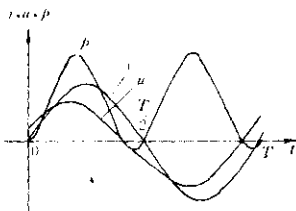
78. P 、 Q 及 S 之间有什么关系？ 因为 $P^2 + Q^2 = U^2 I^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = (UI)^2$

所以有 $S^2 = P^2 + Q^2$ 或 $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

79. 什么是功率因数？ 平均功率 $P = UI \cos \varphi$ 公式中的因子 $\cos \varphi$ 就叫功率因数。角 φ 是总电压与总电流的相位差，它由负载的性质及参数大小决定，并和电源频率有关。例如纯电阻电路 $\cos \varphi = 1$ ；纯电容或电感电路则 $\cos \varphi = 0$ 。



$$p = u \cdot i = U \cos \varphi \cdot U \cos(2\omega t + \varphi)$$



2-10 谐振电路：串联谐振和并联谐振

80. 什么叫谐振？ 在 R 、 C 、 L 元件中，只有电阻 R 的电压与通过其中的电流是同相的。因此，在一般交流电路中，总电压与总电流之间存在相位差。但在特殊情况下，当电路满足一定的条件时，电路中会出现总电压与总电流同相的现象，这种现象就叫做电路发生谐振，它和力学中的共振现象相似。

81. 什么叫串联谐振？发生串联谐振的条件是什么？ 在 RLC 串联电路中发生的谐振现象叫做串联谐振。由 2-8 节知 RLC 串联电路的阻抗和阻抗角分别为

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \text{及} \quad \varphi = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

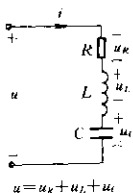
根据谐振定义可知，产生串联谐振的条件应是 $\varphi = 0$ 即 $\omega L = 1/\omega C$ ，谐振时的频率 f_0 叫谐振频率，由上式可得 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

当 L 、 C 一定时，改变电源频率 f ，使电路满足上述关系，可以达到谐振。当电源频率 f 固定不变时，改变 C 或 L 也能达到谐振。收音机中选择电台讯号就是通过改变 C 来实现的。

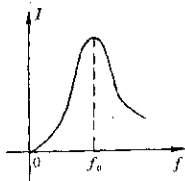
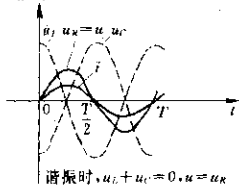
82. 串联谐振有什么特点？ 第一：谐振时 $Z=R$ ，数值最小，电流达到最大。第二：因 $U_L = \omega LI$ ， $U_C = \frac{1}{\omega C}I$ ，且 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ，故有 $U_L = U_C$ ；其次，因为 $\frac{U_L}{U} = \frac{\omega LI}{RI} = \frac{\omega L}{R}$ ，故有 $U_L = U_C = \frac{\omega L}{R}U$ 。当 $\omega L \gg R$ 时， $U_L = U_C \gg U$ ，即电感电压和电容电压有效值比总电压有效值大许多倍。因此，串联谐振又叫电压谐振。

83. 串联谐振有什么用途和害处？ 在无线电设备中，常常利用串联谐振得到比较高的电压讯号。在电力系统中，由于发生谐振时，部分设备可能由于电压过高，使绝缘或电容器被击穿。因此，在电力系统中应防止串联谐振的发生。

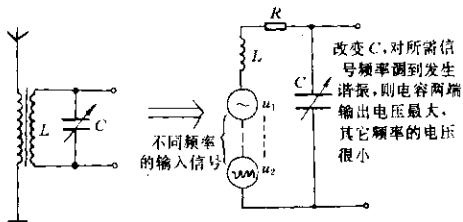
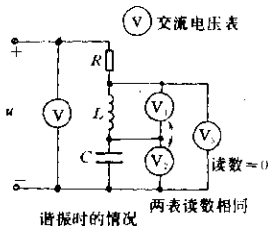
串联谐振



$$i = u_R = u_L = u_C = u$$



电流随频率变化



接收机的输入电路

84. 什么叫并联谐振? 在并联谐振电路中发生谐振叫并联谐振。

85. 产生并联谐振的条件是什么? 设并联电路如右图①所示。先来分析两支路中电流的相位。设 $u = \sqrt{2} U \sin \omega t$, 则 RL 支路中电流为 $I_L = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$, 电压与该电流的相位差为 $\varphi_1 = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R}$, 故

$$i_L = \sqrt{2} I_L \sin(\omega t - \varphi_1) = \sqrt{2} I_L [\sin \omega t \cos \varphi_1 - \cos \omega t \cdot \sin \varphi_1] = i_L' + i_L''$$

其中 $i_L' = \sqrt{2} I_L \cos \varphi_1 \cdot \sin \omega t$ 与电压同相叫有功分量,

$i_L'' = -\sqrt{2} I_L \sin \varphi_1 \cdot \cos \omega t = \sqrt{2} I_L \sin \varphi_1 \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$, 滞后电压 90° , 叫无功分量。

C 支路电流为 $i_C = \sqrt{2} I_C \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, 超前电压 90° , 比较电流 i_C 与分量 i_L'' , 两者相位恰恰相反。当这两个电流大小相等时, 作用互相抵消。这时电路中只剩下有功分量 i_L' , 它就是电路的总电流, 这时出现总电压与总电流同相, 电路发生谐振。因此, 上述并联电路发生谐振的条件是

$$I_L \sin \varphi_1 = I_C, \text{ 即 } \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} = \omega C$$

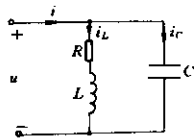
化简上式, 可求得谐振时频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}$, 当 $\omega L \gg R$ 时,

$$\text{有 } f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

86. 并联谐振有什么特点? 可以证明, 并联谐振有下列特点:

第一: 总电流有效值较小。

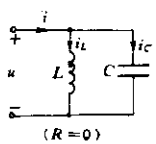
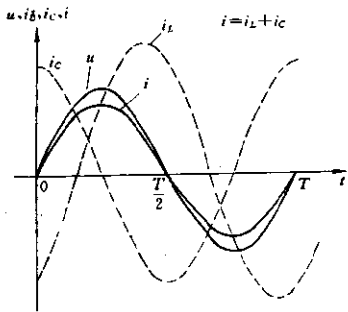
第二: 分支电路中电流有效值可能比总电流有效值大许多倍。所以并联谐振又叫电流谐振。



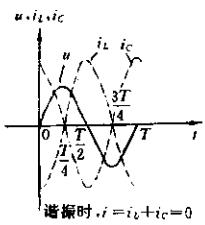
并联谐振
 u, i 同相
 谐振条件：

$$\frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} = \omega C$$

①



谐振条件： $\omega L = \frac{1}{\omega C}$



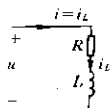
2-11 功率因数的提高

87. 功率因数小,对电气设备有何影响? 发电机、变压器都有规定的额定电压 $U_{\text{额}}$ 和额定电流 $I_{\text{额}}$ 。这些设备的容量,用额定视在功率 $S_{\text{额}}$ 表示,即 $S_{\text{额}}=U_{\text{额}} \cdot I_{\text{额}}$ 。在额定工作状态运行时,设备实际输出的平均功率为 $P=U_{\text{额}} I_{\text{额}} \cos\varphi$,它与功率因数 $\cos\varphi$ 大小有关。功率因数的大小由负载决定, $0 < \cos\varphi < 1$ 。

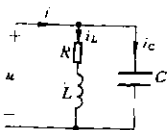
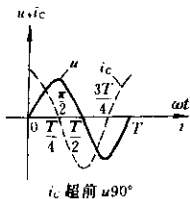
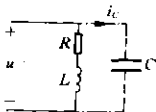
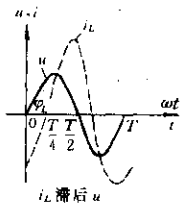
例:已知一台变压器 $U_{\text{额}}=220\text{V}$, $I_{\text{额}}=1\text{kA}$,则它的容量为 $S_{\text{额}}=220 \times 10^3=220\text{kVA}$,当 $\cos\varphi=1$ 时, $P=220 \times 10^3=220\text{kW}$ 效率最高;当 $\cos\varphi=0.5$ 时, $P=220 \times 10^3 \times 0.5=110\text{kW}$,设备没有充分利用,效率低,造成浪费,所以要求提高功率因数的数值。

88. 功率因数大小对电力系统有何影响? 由 $P=UI\cos\varphi$ 可知,对电力系统来说, U 是一定的,当系统输送一定的功率时,如 $\cos\varphi$ 大,则输出电流 I 小;反之, $\cos\varphi$ 小,则 I 大。电流大,输电线中的损耗也增大,这是不经济的。同时,线路电压降加大,对用户端电压会有影响,也是不利的。

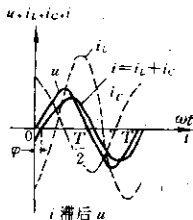
89. 用什么方法可以提高功率因数? 欲提高 $\cos\varphi$ 之值,就必须设法减小电路端电压与总电流的相位差 φ 。一般来说,负载大都是电感性的 ($\cos\varphi < 1$),如电动机、日光灯等。根据对并联谐振电路的分析可知,在感性负载两端并联适当的电容器,就可以提高电路的功率因数。以前述并联谐振电路为例, RL 支路未并联电容时,电源必须供给该支路的无功功率;并联电容后,当达到谐振时, RL 支路所需的无功功率将全部由电容供给,电源就只需供给电路的有功功率,这时 $\cos\varphi=1$ 。在实际工作中,并不要求 $\cos\varphi=1$,达到 $\cos\varphi=0.9$ 左右就可以了。



感性负载 u, i 相位差为 φ_L
因 φ_L 大, 故 $\cos \varphi_L$ 小



u, i 相位差为 $\varphi < \varphi_L$
因 φ 减小, 故 $\cos \varphi$ 增大
总电流 i 也随之减小



第三章 三相交流电路

3-1 对称三相电压和电流

90. 什么是对称三相电压和电流？ 交流发电机有三个完全相同的绕组，每个绕组就叫做一相。三个绕组产生三个正弦电压，它们的最大值（或有效值）和频率都相同，而相位上彼此相差 120° ，这三个电压就叫做对称三相电压。满足上述条件的三相电流就叫做对称三相电流。如三相分别用 A 、 B 、 C 表示，则对称三相电压和电流可用下式表示：

$$A \text{ 相: } u_A(t) = \sqrt{2} U \sin \omega t, \quad i_A(t) = \sqrt{2} I \sin \omega t.$$

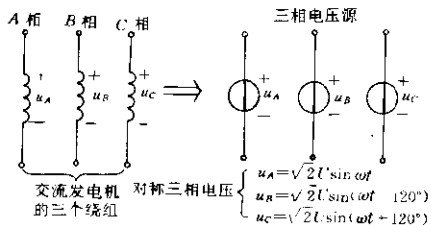
$$B \text{ 相: } u_B(t) = \sqrt{2} U \sin (\omega t - 120^\circ), \quad i_B(t) = \sqrt{2} I \sin (\omega t - 120^\circ).$$

$$C \text{ 相: } u_C(t) = \sqrt{2} U \sin (\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2} U \sin (\omega t + 120^\circ), \\ i_C(t) = \sqrt{2} I \sin (\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2} I \sin (\omega t + 120^\circ).$$

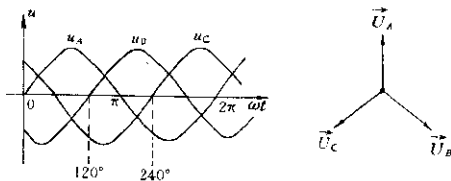
91. 对称三相电压和电流有什么特点？ 同一时刻它们的瞬时值总和恒等于零。例如 $u_A(t) + u_B(t) + u_C(t) = \sqrt{2} U \sin \omega t + \sqrt{2} U \sin (\omega t - 120^\circ) + \sqrt{2} U \sin (\omega t + 120^\circ) = 0$ ，对称三相电流也是一样。

92. 相序是什么意思？ 对称三相电压的最大值出现的先后顺序就叫相序。如 $u_A = \sqrt{2} U \sin \omega t$ 、 $u_B = \sqrt{2} U \sin (\omega t - 120^\circ)$ 、 $u_C = \sqrt{2} U \sin (\omega t + 120^\circ)$ ，则此三个电压最大值出现的顺序是 $A-B-C$ ，即它们的相序是 ABC 。

有些电气设备，如三相异步电动机的旋转方向与加在电动机上的电压的相序有关，接电源线时就应注意！

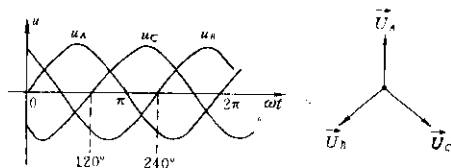


对称三相电压波形(相序 ABC)



任一时刻三条曲线的纵坐标之和为零

相序(ACB)



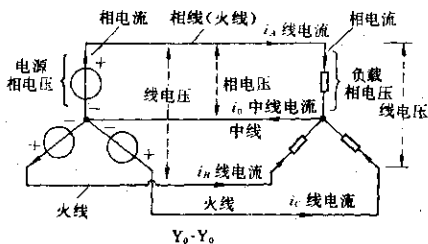
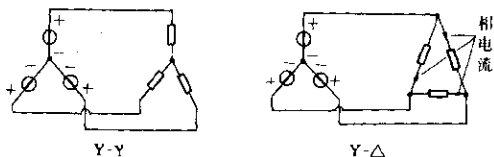
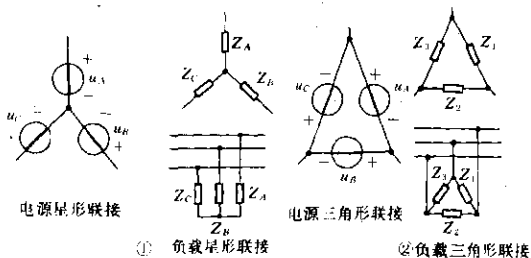
3-2 三相交流电路

93. 什么叫三相交流电路？ 由对称三相电压源供电的电路就叫做三相交流电路，简称三相电路（第二章介绍的电路则叫单相电路）。这种电路的负载由三组负载组成，叫三相负载。如果三组负载完全相同，就叫对称三相负载，交流电动机就属这种负载。接有对称三相负载的三相电路，叫对称三相电路。

94. 三相电源和三相负载有几种联接方式？ 各有两种联接方式：①星形联接：将三个电源或负载的各一端共同接在一起，形似星形，又称Y形（右图①）。②三角形联接：将三个电源或负载首尾依次联接，构成一个三角形形状，又称△形（右图②）。三个电源联接时应注意其极性。

95. 三相供电系统常有哪几种联接形式？ 常见的三相供电系统有三种联接形式：①电源和负载都接成Y形；②电源接成Y形，负载接成△形；③电源和负载都接成Y形，且两公共端用输电线联接，这条联接线叫中线。这种联接方式与①的接法不同之处是多了一条中线，叫三相四线制。①、②两种形式叫三相三线制。

96. 什么叫端线？什么叫相电压、线电压、相电流、线电流及中线电流？ 由电源三个端部引出的输电线叫端线，又称相线，俗称火线。任意两根相线之间的电压叫线电压。各相电源和负载两端的电压则叫相电压；在三相四线制中，相线与中线间的电压也叫相电压。相线中的电流叫线电流。每相电源或负载中的电流则叫相电流。中线中的电流叫中线电流。



常见三相供电系统的形式

3-3 负载为星形联接的三相电路

97. 三相四线制三相电路如何计算？在右图①所示电路中，假设中线阻抗为零，在这种情况下，各相负载两端的电压，分别等于相应各相电源的端电压。因此，各相电流就可按第二章介绍的分析方法进行计算。

设电源相电压为 $u_A = \sqrt{2} U \sin \omega t$, $u_B = \sqrt{2} U \sin (\omega t - 120^\circ)$, $u_C = \sqrt{2} U \sin (\omega t + 120^\circ)$, 各相负载电阻和电抗分别为 $R_A, X_A, R_B, X_B, R_C, X_C$, 则各相电流用下式计算:

$$I_A = \frac{U}{\sqrt{R_A^2 + X_A^2}}, I_B = \frac{U}{\sqrt{R_B^2 + X_B^2}}, I_C = \frac{U}{\sqrt{R_C^2 + X_C^2}},$$
 各相电压与电

流的相位差为 $\varphi_A = \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_A}{R_A}$, $\varphi_B = \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_B}{R_B}$, $\varphi_C = \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_C}{R_C}$,

故得 $i_A = \sqrt{2} I_A \sin (\omega t - \varphi_A)$, $i_B = \sqrt{2} I_B \sin (\omega t - 120^\circ - \varphi_B)$,

$$i_C = \sqrt{2} I_C \sin (\omega t + 120^\circ - \varphi_C)$$

中线电流 $i_o = i_A + i_B + i_C$

从该图可以看出，当负载为星形联接时，线电流等于相电流。

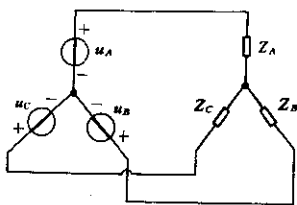
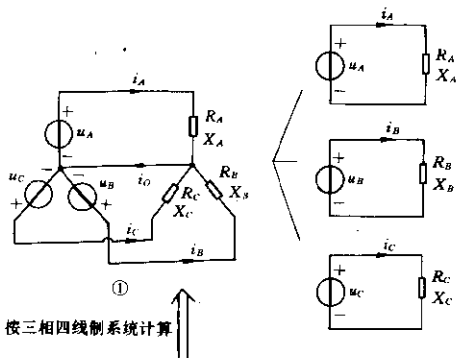
如果是对称三相负载，即 $R_A = R_B = R_C$, $X_A = X_B = X_C$ (性质相同), 则 $I_A = I_B = I_C = I$, 而 $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$ 故得

$$i_A = \sqrt{2} I \sin (\omega t - \varphi), i_B = \sqrt{2} I \sin (\omega t - 120^\circ - \varphi),$$

$$i_C = \sqrt{2} I \sin (\omega t + 120^\circ - \varphi) \quad \text{及} \quad i_o = 0$$

三个相电流 (即线电流) 是对称的, 中线电流为零。因此, 在三相四线制对称三相电路中, 取消中线对电路没有影响。

98. 电源和负载都是星形联接, 无中线的对称三相电路又如何计算? 计算时, 可以假定有中线存在, 把它看成是三相四线制, 按 97 问所述方法计算。但如果不是对称三相电路, 则不能这样计算!



对称三相电路

99. 电源和负载都是星形联接的对称三相电路中，线电压和相电压关系有何特点？在对称三相电路中，电压和电流都是对称的。当电源和负载都是星形联接时，线电压和相电压之间的关系有如下特点：

设电源相电压如 97 问所述，根据克希荷夫电压定律，各线电压为 $u_{AB}=u_A-u_B$ ， $u_{BC}=u_B-u_C$ ， $u_{CA}=u_C-u_A$ ，

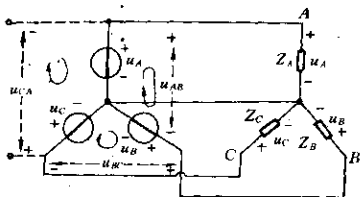
以 u_{AB} 为例

$$\begin{aligned}u_{AB} &= u_A - u_B, \\ &= \sqrt{2}U\sin\omega t - \sqrt{2}U\sin(\omega t - 120^\circ) \\ &= \sqrt{2}U \cdot \sqrt{3}\sin(\omega t + 30^\circ)\end{aligned}$$

同理 $u_{BC}=\sqrt{2}U \cdot \sqrt{3}\sin(\omega t - 120^\circ + 30^\circ)$ ， $u_{CA}=\sqrt{2}U \cdot \sqrt{3}\sin(\omega t + 120^\circ + 30^\circ)$ 。比较线电压与相电压的表示式，可以看出线电压有效值（用 U_l 表示）与相电压有效值（用 U_p 表示）关系为 $U_l = \sqrt{3}U_p$ 。

在电力系统中，常见的 380V 与 220V 电压就是线电压与相电压的 $\sqrt{3}$ 关系的反映。

100. 中线的作用是什么？在三相四线制供电系统中，由于负载公共端与电源公共端有中线联接，从而可以保证负载的相电压等于电源的相电压。因电源的相电压总是对称的，所以中线的作用就是保持负载相电压也是对称的。如果没有中线，除非三相负载对称，否则，负载各相电压就不可能保持对称。有的相电压可能过高；有的可能过低，将严重影响电气设备正常运行，甚至损坏设备。因此，在三相四线制的中线上不允许安装保险丝，以防止保险丝熔断时造成中线断开的危险！



$Z_A \neq Z_B \neq Z_C$
 中线的作用：
 可以保持三相
 负载相电压对称

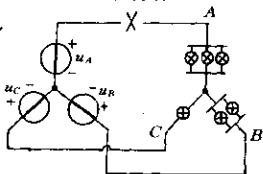
根据电压定律：

$$U_{AB} + U_{BC} - U_A = 0 \quad \therefore U_{AB} = U_A - U_B$$

$$U_{BC} + U_C - U_B = 0 \quad \therefore U_{BC} = U_B - U_C$$

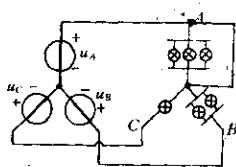
$$U_{CA} + U_A - U_C = 0 \quad \therefore U_{CA} = U_C - U_A$$

断线故障

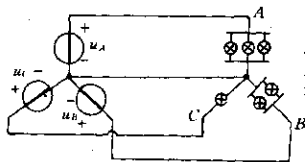


B, C 两相负载电压
 下降, 且不相等

A 相短路故障



B, C 两相负载电压都升高



⊗: 灯泡
 有了中线, 当
 A 相出现故障,
 对 B, C 两相没
 有影响

电源和负载都是星形接法, 且负载不对称时, 必须有中线

3-4 负载为三角形联接的三相电路

101. 负载为三角形联接的三相电路如何计算? 设 $u_{AB} = \sqrt{2} U \sin \omega t$ (U 为线电压有效值), $u_{BC} = \sqrt{2} U \sin (\omega t - 120^\circ)$, $u_{CA} = \sqrt{2} U \sin (\omega t + 120^\circ)$, 各相负载电阻与电抗分别为 R_{AB} 、 X_{AB} , R_{BC} 、 X_{BC} 及 R_{CA} 、 X_{CA} , 则各相电流有效值为

$$I_{AB} = U / \sqrt{R_{AB}^2 + X_{AB}^2}, I_{BC} = U / \sqrt{R_{BC}^2 + X_{BC}^2}, I_{CA} = U / \sqrt{R_{CA}^2 + X_{CA}^2}$$

电压与电流的相位差为 $\varphi_{AB} = \text{tg}^{-1} X_{AB} / R_{AB}$, $\varphi_{BC} = \text{tg}^{-1} X_{BC} / R_{BC}$, $\varphi_{CA} = \text{tg}^{-1} X_{CA} / R_{CA}$, 故得 $i_{AB} = \sqrt{2} I_{AB} \sin (\omega t - \varphi_{AB})$, $i_{BC} = \sqrt{2} I_{BC} \sin (\omega t - 120^\circ - \varphi_{BC})$, $i_{CA} = \sqrt{2} I_{CA} \sin (\omega t + 120^\circ - \varphi_{CA})$ 。如果负载对称, 即 $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA}$ 及 $X_{AB} = X_{BC} = X_{CA}$ (性质相同), 则 $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I$, $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi$ 。所以 $i_{AB} = \sqrt{2} I \sin (\omega t - \varphi)$, $i_{BC} = \sqrt{2} I \sin (\omega t - 120^\circ - \varphi)$, $i_{CA} = \sqrt{2} I \sin (\omega t + 120^\circ - \varphi)$ 。

102. 负载对称时, 线电流有效值与相电流有效值间的关系有何特点? 设三个相电流为 $i_{AB} = \sqrt{2} I \sin \omega t$, $i_{BC} = \sqrt{2} I \sin (\omega t - 120^\circ)$, $i_{CA} = \sqrt{2} I \sin (\omega t + 120^\circ)$ 。三个线电流为 i_A 、 i_B 及 i_C 。根据克希荷夫电流定律, 从右图②可得 $i_A = i_{AB} - i_{CA}$, $i_B = i_{BC} - i_{AB}$, $i_C = i_{CA} - i_{BC}$ 。采用 3-3 节 99 问所用分析方法, 可以得到三个线电流为

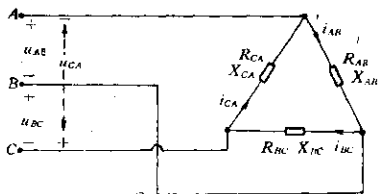
$$i_A = \sqrt{2} I \cdot \sqrt{3} \sin (\omega t - 30^\circ)$$

$$i_B = \sqrt{2} I \cdot \sqrt{3} \sin (\omega t - 120^\circ - 30^\circ)$$

$$i_C = \sqrt{2} I \cdot \sqrt{3} \sin (\omega t + 120^\circ - 30^\circ)$$

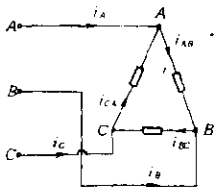
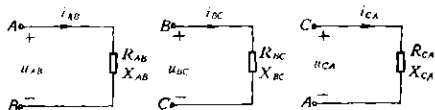
它们是对称的。比较线电流与相电流的表示式可知, 线电流有效值 (I_l) 与相电流有效值 (I_φ) 之间有下列关系

$$I_l = \sqrt{3} I_\varphi$$



①

先计算各相电流



②

根据电流定律

(以流出节点电流为正)

$$\therefore -i_A + i_{AB} - i_{CA} = 0 \quad \therefore i_A = i_{AB} - i_{CA}$$

$$-i_B + i_{BC} - i_{AB} = 0 \quad i_B = i_{BC} - i_{AB}$$

$$-i_C + i_{CA} - i_{BC} = 0 \quad i_C = i_{CA} - i_{BC}$$

3-5 三相电路的功率

103. 一般三相电路的平均功率怎样计算? 不论负载如何联接, 三相电路总的平均功率为

总的平均功率 $P=$ 三相负载平均功率之和

104. 对称三相电路的平均功率计算有何特点? 因为对称三相电路中, 各相负载的平均功率相等, 所以电路总的平均功率等于每相负载平均功率的三倍, 即

$$P=3U_{\varphi}I_{\varphi}\cos\phi$$

其中 U_{φ} 、 I_{φ} 分别是负载的相电压、相电流有效值, ϕ 是相电压与相电流的相位差。上述总功率通常用线电压 U_l 、线电流 I_l 表示。

负载 Y 接法时, 因 $U_l=\sqrt{3}U_{\varphi}$, $I_l=I_{\varphi}$

$$\text{所以 } P=3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}U_l \cdot I_l \cos\phi = \sqrt{3}U_l I_l \cos\phi$$

负载 Δ 接法时, 因 $U_l=U_{\varphi}$, $I_l=\sqrt{3}I_{\varphi}$

$$\text{所以 } P=3U_l \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}I_l \cos\phi = \sqrt{3}U_l I_l \cos\phi$$

由此可见, 在对称三相电路中, 负载接法虽然不同, 但计算总平均功率的公式相同, 即

$$P=\sqrt{3}U_l I_l \cos\phi$$

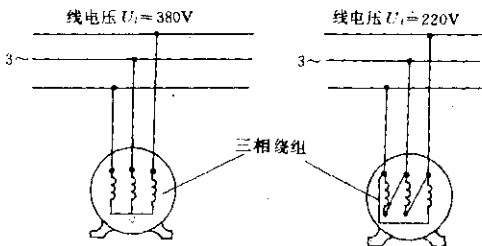
应当注意: 公式中是线电压和线电流有效值, 而功率因数角 ϕ 却是相电压与相电流的相位差, 不是线电压与线电流的相位差!

三相异步电动机定子上有三个完全相同的绕组

每个绕组: $R=29\Omega$, $X_L=21.8\Omega$

电源线电压为 $U_l=380V$ 时,三个绕组接成星形

电源线电压为 $U_l=220V$ 时,三个绕组接成三角形



计算电源输入的平均功率

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{29}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 0.8$$

$$Y\text{接: } \because U_p = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V \quad \Delta\text{接: } \because U_p = U_l = 220V$$

$$\therefore I_l = I_p = \frac{220}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 6.1A \quad \therefore I_p = \frac{220}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 6.1A$$

$$P = \sqrt{3} \times 380 \times 6.1 \times 0.8 = 3.2\text{kW} \quad I_l = \sqrt{3} I_p = \sqrt{3} \times 6.1 = 10.6A$$

$$\therefore P = \sqrt{3} \times 220 \times 10.6 \times 0.8 = 3.2\text{kW}$$

在两种线电压下,绕组接法不同,但每相绕组相电压相同,吸收的平均功率也一样

第四章 磁路和变压器

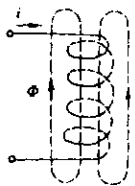
4-1 磁 路

105. 为什么要讨论磁路问题? 为什么电气设备的线圈中大都**有铁心**? 电气设备都是利用磁场作为媒介来实现能量的传输(如变压器)或机电能量的转换(如电动机)。为了能了解电气设备的工作原理和性能,有必要掌握有关磁路的基本知识。

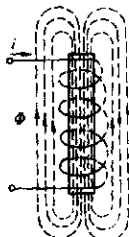
通有电流的线圈的周围会产生磁场。如果打开电机或者变压器的外壳,就会看到里面的线圈都是绕在铁心上,就是在体积很小的继电器或仪表中,线圈也大都绕在一定形状的铁心上。这样做的目的是为了用较小的电流获得较强的磁场[见右图②],以便得到较大的感应电动势或电磁力。此外,还可以根据设备的需要,做成不同形状的铁心,使磁通局限于一定的空间范围内,如右图③所示。这是因为铁心都是由导磁性能良好的铁磁材料(例如硅钢片)做成的,其导磁能力比空气强得多。

106. 什么是磁路? 磁场的强弱可以用磁感应强度 B (又称为磁通密度)来表示,其单位为特斯拉(T)。而磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的截面积 S 的乘积叫做通过该面积的磁通 Φ ,即 $\Phi = BS$,其单位为韦伯(Wb)。

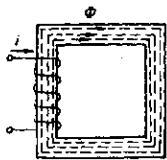
放置了铁心的通电线圈产生的磁通的绝大部分经过铁心而形成**一个闭合通路**,这个通路就称为磁路。显然,磁路由铁心和空气隙(有的磁路没有空气隙)组成。右图④是几种常见电气设备的磁路。在磁路中,用来产生磁通的电流叫做励磁(或磁化)电流,励磁电流通过的线圈叫做励磁绕组。



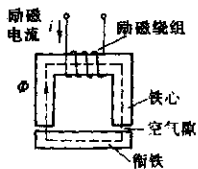
① 空心载流线圈周围的磁场



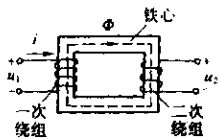
② 加入铁心, 磁场大大增强



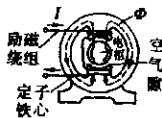
③ 加入铁心, 磁通局限于一定空间范围内



电磁铁磁路



变压器磁路



直流电机磁路



④

磁电式仪表磁路

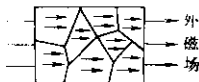
107. 铁磁材料具有哪些主要性质？ 铁磁材料具有高导磁性、磁饱和性和磁滞性三个特性。这些特性是由铁磁材料内部结构的特殊性所决定的。常用的铁磁材料有硅钢、铸铁、坡莫合金（一种铁和镍的合金）等。而象空气、木材、铜、铝这一类材料，它们的导磁能力很差，叫做非铁磁材料。

108. 什么叫高导磁性？ 铁磁材料的高导磁性表现在它具有很强的导磁能力。物质的导磁能力的大小通常用磁导率 μ 表示，单位为亨/米（H/m）。铁磁材料的磁导率 μ 在一般情况下为非铁磁材料磁导率 μ_0 的数百、数千乃至数万倍。这是由于在铁磁材料的内部，存在着许多自然磁化区，称为磁畴。每个磁畴犹如一个小磁铁。在无外磁场作用时，这些磁畴的排列杂乱无章，它们的磁场互相抵消，对外不显磁性，如右图①所示。把铁磁材料放到外磁场（例如铁心线圈中励磁电流产生的磁场）中，随着外磁场的增强，磁畴就逐渐转到与外磁场相同的方向上[右图②]，这样便产生了一个与外磁场相加的附加磁场，而使铁磁材料内的磁场显著增强。这个现象叫磁化。非铁磁材料没有磁畴的结构，所以不具有磁化的特性。不同的铁磁材料的导磁性能也不一样，例如硅钢片的导磁性能比铸铁好。

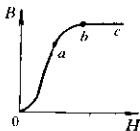
109. 什么是磁饱和性？ 右图③是铁磁材料中磁感应强度（ B ）随磁场强度（ H ）变化的曲线，称为磁化曲线，它可由实验得出。从曲线可见，当磁场强度（与励磁电流成正比）增加到一定值后（如图中的 b 点），即使再增大磁场强度，磁感应强度几乎不再增加，这就是铁磁材料的磁饱和性。其原因是：这时铁磁材料内部的磁畴几乎全部和外磁场方向一致了，如右图④所示。在设计变压器或电机时，往往要使铁磁材料处于接近饱和状态，如右图③中的 a 点附近， a 点称为膝点，这样才能使铁心得到最合理、最充分的利用。



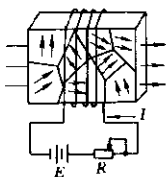
① 在没有外磁场作用时,铁磁材料的磁畴排列杂乱无章



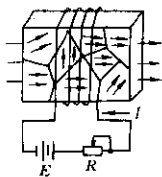
② 在外磁场的作下,磁畴按照外磁场的方向整齐地排列



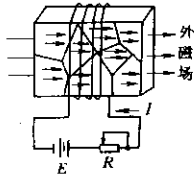
③ 铁磁材料中 B 随 H 变化的曲线
—— 磁化曲线



H (铁心线圈中的励磁电流 I) 由零开始增加, B 增加较慢



H 继续增加, B 也继续增加



H 继续增加到一定值后, B 几乎不再增加——磁饱和

④

110. 什么是磁滞性？ 磁滞性表现在铁磁材料放入磁场中反复磁化时， B 的变化滞后于 H （励磁电流）的变化，其变化曲线见右图①，该曲线称为磁滞回线。从图可见，当 H 为零时， B 并不为零（图中 b 点），而保留了一定数值，称为剩磁。这是因为磁畴在一定的外磁场作用下，基本排列整齐后，若外磁场变化至零时，大部分磁畴要恢复到原来的杂乱状态，但有一部分磁畴由于本身的惯性和它的热运动，阻止了它恢复到原来的转向，致使铁心还有一些磁性。如果要消除剩磁，还必须加反方向的外磁场。永久磁铁的磁性是由剩磁产生的。适合做永久磁铁的铁磁材料，其磁滞回线宽而短，剩磁大 [见右图②]，这类材料称硬磁材料；还有一类铁磁材料称为软磁材料，其磁滞回线窄而长 [右图③]，它们一般适合于做电机、变压器等设备的铁心。

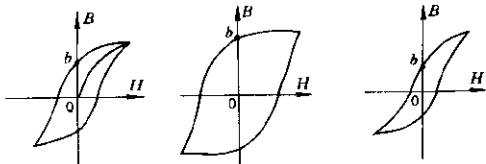
111. 什么是磁路的欧姆定律？ 对于一个通电线圈，励磁电流 (I) 愈大，所产生的磁通 (Φ) 愈多；线圈匝数 (N) 愈多，所产生的磁通 (Φ) 也愈多。可以把励磁电流和线圈匝数的乘积 (NI) 看成是磁路中产生磁通 (Φ) 的根源，称之为磁动势 F ，则 $F=NI$ 。当保持磁动势 (F) 一定时，铁心材料的磁导率 (μ) 愈高，磁路中的磁通就愈多；若铁心材料不变，铁心的截面积 (S) 愈大，则磁通愈多；铁心的平均长度 (L)（即磁路中心线的长度）愈长，则磁通愈少。

从上可见， Φ 与 F 及 μ 成正比，与 S 成正比，而与 L 成反比。这样的关系用式子表示为

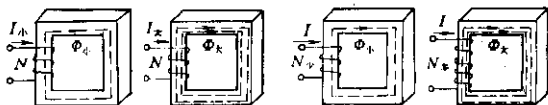
$$\Phi = F\mu S/L = NI / (L/\mu S)$$

令 $R_m = L/\mu S$ 则 $\Phi = F/R_m = NI/R_m$

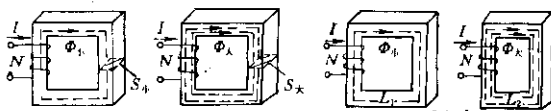
上式叫做磁路欧姆定律。由于磁导率 (μ) 不是常数，它随外磁场（即 H ）而变，所以磁阻也不是常数。磁路欧姆定律主要用于定性分析中。



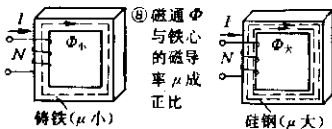
- ① 磁滞回线—表征了 B 的变化滞后于 H 的变化,图中 Ob 为剩磁
- ② 硬磁材料的磁滞回线
- ③ 软磁材料的磁滞回线



- ④ 磁通 Φ 与励磁电流 I 成正比
- ⑤ 磁通 Φ 与励磁绕组匝数 N 成正比



- ⑥ 磁通 Φ 与铁心截面积 S 成正比
- ⑦ 磁通 Φ 与磁路的平均长度 L 成反比



- ⑧ 磁通 Φ 与铁心的磁导率 μ 成正比

磁路欧姆定律

$$\Phi = \frac{NI}{L/\mu S}$$

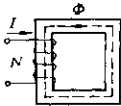
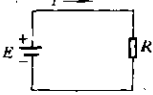
4-2 铁心线圈电路

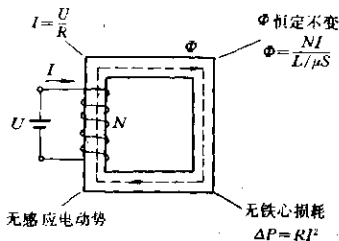
112. 什么是铁心线圈电路？当线圈绕在铁心上时，称该线圈为铁心线圈，其电路称为铁心线圈电路。如前述，当线圈绕在铁心上后，则可以较小的励磁电流获得较强的磁场，从而获得较大的感应电动势或电磁力。所以，电气设备几乎都是由铁心线圈构成。

铁心线圈分为两种。若励磁绕组中通入直流电流，则为直流铁心线圈，如直流电机、直流电磁铁及各种直流电磁器件的线圈，它的电路称为直流铁心线圈电路，它的磁路称为直流磁路。若励磁绕组中通入交流电流，则为交流铁心线圈，如变压器、交流电机及各种交流电磁器件的线圈，它的电路和磁路分别称为交流铁心线圈电路和交流磁路。

113. 直流铁心线圈有哪些特点？右图是直流铁心线圈，它的特点是：励磁电流仅由外加电压 (U) 及励磁绕组的电阻 (R) 决定，而与铁心的材料种类及尺寸无关；磁路中的磁通 (Φ) 恒定不变，其大小由磁路欧姆定律 [$\Phi = \frac{NI}{R_m} = NI / (\frac{L}{\mu S})$] 可知，与铁心的材料种类及尺寸有关；磁通在线圈和铁心中不产生感应电动势；铁心中无功率损耗，功率损耗仅由励磁电流 (I) 在励磁绕组电阻 (R) 中产生 ($\Delta P = RI^2$)。

磁路与电路欧姆定律的比较

磁 路	电 路
	
磁动势 F	电动势 E
磁通 Φ	电流 I
磁感应强度 b	电流密度 J
磁阻 $R_m = \frac{L}{\mu S}$	电阻 $R = \frac{L}{rS}$
磁路欧姆定律 $\Phi = \frac{NI}{R_m}$	电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$



① 直流铁心线圈的特点

114. 交流铁心线圈中的感应电动势是怎样产生的？在右图①所示的交流铁心线圈中的磁通是随时间交变的，在 Δt 的时间内穿过线圈的磁通变化量为 $\Delta\Phi$ ，线圈的匝数为 N ，按图中所示的假定方向，则线圈中产生的感应电动势 e 可表示为： $e = -N\Delta\Phi/\Delta t$ ，它说明，线圈的匝数越多，单位时间内切割的磁通量越大，线圈中产生的感应电动势就越大。变压器就是利用这个原理在两个绕组中产生感应电动势来改变电压的。

115. 交流铁心线圈端电压与铁心中的磁通关系是什么？由于外加电压为正弦波，磁通也就近似按正弦规律变化，其周期为 T ，如右图②所示。由图可见，磁通由零变化到最大值 (Φ_m) 所需时间为 $T/4$ ，即在 $\Delta t = T/4$ 这段时间内，磁通的变化量是 $\Delta\Phi = \Phi_m$ 。因此，在 N 匝线圈中，每秒钟所产生的感应电动势的平均值为：

$$E_{\text{平均}} = \left| N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = N \frac{\Phi_m}{T/4} = 4fN\Phi_m, \text{ 式中 } f \text{ 为外加电压的}$$

频率。

根据理论计算正弦波的最大值与平均值（正弦波半个周期的平均值）的关系式，可得出感应电动势的最大值为

$$E_m = 1.57 E_{\text{平均}} = 6.28 f N \Phi_m.$$

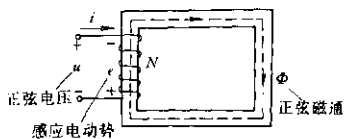
感应电动势的有效值为

$$E = 0.707 E_m = 4.44 f N \Phi_m.$$

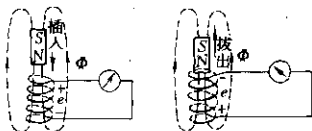
根据克希荷夫电压定律，列出右图①的交流铁心线圈（电阻为 R ）电路的电压方程为 $u = -e + Ri$ 。因 Ri 很小，故上式可近似为 $u \approx -e$ 。因而可知外加电压的有效值为

$$U \approx E = 4.44 f N \Phi_m$$

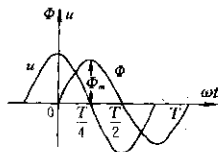
上式说明，交流铁心线圈中的磁通最大值 Φ_m ，近似决定于励磁绕组外加电压的有效值 U ，而与铁心的材料种类及尺寸无关，这是交流磁路的一个重要特点。该式是分析变压器、交流电机等电磁器件的基本公式。



- ① 在交流铁心线圈中，穿过绕组的磁通发生变化——产生感应电动势



- ② 磁铁插入或拔出线圈时，穿过线圈的磁通发生变化——产生感应电动势



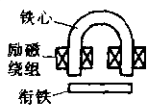
- ③ 励磁绕组外加电压为正弦波，绕组中磁通也近似为正弦波

4-3 电 磁 铁

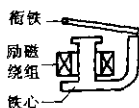
116. 电磁铁主要应用在哪些场合？ 电磁铁是利用通电的铁心线圈产生磁场，由磁场产生电磁吸力，来实现某一机械动作的器件，用途极为广泛。在工业上经常利用电磁铁完成起重（起重电磁铁）、制动（制动电磁铁）、吸持（电磁吸盘）及开闭（电磁阀门）等机械动作。在自动控制系统中，经常利用电磁铁附上触头及相应部件作成各种继电器、接触器等保护电器或控制电器。

117. 电磁铁有哪几种类型？它们由哪几个主要部分构成？ 电磁铁的结构形式很多，通常有马蹄式（一般用于起重电磁铁）、拍合式（常用于继电器）及螺管式（用于液压电磁阀）等。它们的基本结构相同，都是由励磁绕组（吸引线圈）、铁心（静铁心）和衔铁（动铁心）三个主要部分组成 [右图①]。

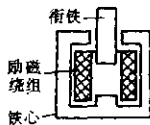
118. 电磁吸力是如何产生的？ 当电磁铁的励磁绕组通入电流以后，电流所产生的磁通经过铁心和衔铁形成闭合回路，使铁心和衔铁磁化。磁力线是从北极（N极）出来，从南极（S极）进去的，故铁心和衔铁被磁化后的极性如右图②所示，根据异性磁极相吸引的道理，可动衔铁就受到电磁吸力的作用而被吸向铁心。有的电磁铁没有衔铁，那么靠近它的其他铁磁物质（如被搬运的钢铁件）就相当于衔铁，磁通通过被吸物体构成闭合回路。



马蹄式

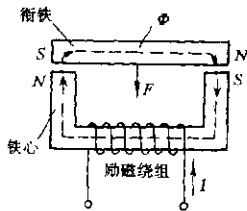


拍合式



螺管式

① 不同类型的电磁铁
具有相同的基本结构



② 被磁化的铁心和衔铁
的磁极极性不同——异性
磁极相吸引，产生电磁力

119. 如何计算直流电磁铁的吸力? 励磁绕组通入直流电流的电磁铁为直流电磁铁 [右图①]。电磁铁衔铁所受到的吸力大小和两个磁极 (S 、 N 极) 的磁性强弱有关, 而每一个磁极的磁性强弱和磁极之间的磁感应强度成正比, 因此, 衔铁所受到的吸力 (F) 的大小和两极间的磁感应强度 (B) 的平方成正比。此外, 在 B 为定值的情况下, 若磁极的面积 (S) 愈大, 则吸力也愈大。所以 $F \propto B^2 S$ 。由理论分析知, 计算直流电磁铁吸力的公式为

$$F = \frac{10^7}{8\pi} B^2 S$$

式中 F 的单位为牛顿 (N), B 为气隙中的磁感应强度, 单位为特斯拉 (T), S 为电磁铁气隙总面积, 单位为米² (m^2)。

由于直流电磁铁线圈的励磁电流 (I) 仅取决于线圈的电阻 R 和外加电压 U , 故其磁动势 (NI) 与衔铁的运动过程无关。在衔铁吸合前, 衔铁与铁心之间的空气隙最大, 此时磁路中磁阻最大, 故磁通最小, 磁感应强度亦小, 吸力最小。当衔铁吸合后, 磁路中的磁阻最小, 磁感应强度最大, 此时吸力也最大。

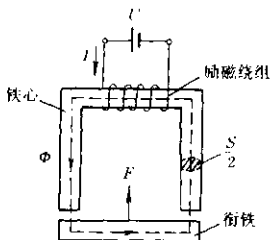
120. 如何计算交流电磁铁的吸力? 励磁绕组通入交流电流的电磁铁为交流电磁铁。交流电磁铁中的磁场是交变的, 如 $B(t) = B_m \sin \omega t$ [右图②], 则瞬时吸力为

$$F_t = \frac{10^7}{8\pi} S B_m^2 \sin^2 \omega t$$

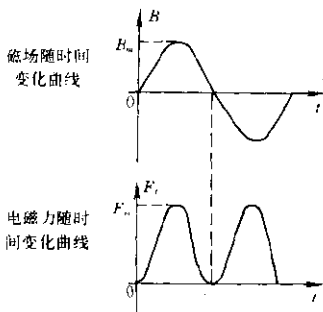
可见瞬时吸力是脉动的 [右图②]。但实际上衔铁的动作是由吸力在一个周期内的平均值决定的, 可推导出吸力的平均值为

$$F_{\text{平均}} = \frac{10^7}{16\pi} B_m^2 S$$

由于交流磁路中的磁通 (Φ) 决定于绕组外加电压, 故在衔铁吸合前后磁通 (Φ) 没有变化, 因而电磁吸力也没有变化。



- ① 在计算电磁吸力时,公式中的 S 是气隙总面积,而不是铁心截面积



- ② 在交流电磁铁中磁场是交变的,电磁吸力是脉动的

4-4 铁心损耗

121. 什么是铁心损耗？它们产生的原因是什么？前面已经指出，在直流铁心线圈中，仅在励磁绕组电阻 (R) 上有功率损耗。但是，在交流铁心线圈中，除励磁绕组电阻 (R) 上有功率损耗 (I^2R) (称为铜损 ΔP_{Cu}) 外，还有铁心在交变磁通作用下产生的涡流损耗和磁滞损耗，两者合称铁心损耗，简称铁损 ΔP_{Fe} 。

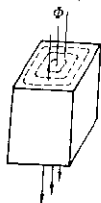
根据电磁感应定律，交流铁心线圈中的磁通将在铁心中产生感应电动势及感应电流，这个电流路径象漩涡一样，在铁心中垂直于磁通方向的平面内流动 [右图①]，故称为涡流。由于铁心具有一定的电阻，因此涡流必然引起铁心内部的功率损耗，即涡流损耗。

在交流铁心线圈中，铁心在反复磁化，由于磁畴来回翻转而要克服阻力，类似摩擦生热而造成能量损耗，这种损耗称为磁滞损耗。

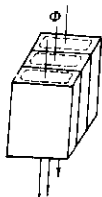
122. 如何减小铁心损耗？涡流损耗和磁滞损耗将使铁心发热，影响设备绝缘材料的寿命，所以要设法减小这两种损耗。

为了减小涡流损耗，铁心由彼此绝缘且顺着磁场方向的薄硅钢片叠成 [右图②]。铁心分片将涡流限制在较小的截面内流通，而铁心含硅使其电阻率增大，这些均使涡流及其损耗大为减小。一般电机和变压器的铁心采用厚度为 0.5mm 或 0.35mm 的硅钢片叠成。

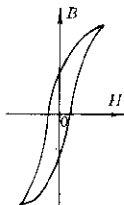
可以证明，铁心的磁滞损耗与该铁心的磁滞回线的面积成正比。为了减小磁滞损耗，通常选用磁滞回线比较狭窄的材料作铁心，硅钢片的磁滞回线就比较狭窄。



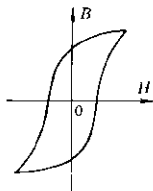
① 交变磁通在铁心中产生感应电流——涡流。涡流在铁心中流动，使铁心发热，引起能量损耗——涡流损耗



② 为了减小涡流损耗，铁心由彼此绝缘且顺着磁场方向的薄硅钢片叠成



③ 它的磁滞损耗小



④ 它的磁滞损耗大

4-5 变压器的基本结构

123. 变压器的主要用途有哪些? 变压器是根据电磁感应原理制成的一种静止电器,它具有变换电压、变换电流和变换阻抗的功能。在电力系统中,变压器主要用来变换电压。为了减少输电线路上的功率损耗和节省大量的金属材料,必须利用变压器将发电机发出的电压升高到输电电压(如220kV、330kV、500kV等),然后再利用降压变压器将电压降到用户所需要的电压(如380V、220V等),如右图①所示。在电子技术中,变压器除用来改变电压外,还被用于耦合电路、传递信号和进行阻抗变换等。此外,还有多种专门用途的变压器,如电焊用的电焊变压器,加热用的电炉变压器,实验室用的电压可调的自耦变压器以及测量用的仪表用互感器等。

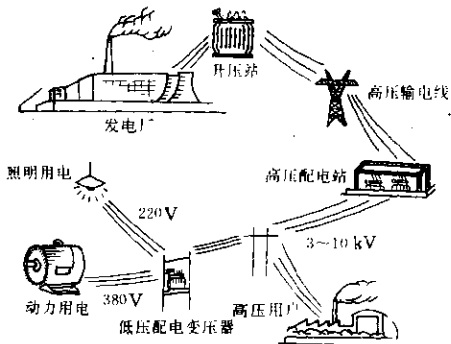
124. 变压器的基本结构是什么?各个部件的作用是什么? 变压器通常是由一个公共铁心和两个或两个以上的线圈(又称绕组)所构成。

铁心是变压器的磁路部分。为了减少铁心损耗,铁心常用表面涂有绝缘漆膜、厚度为0.35mm或0.5mm的硅钢片叠成。

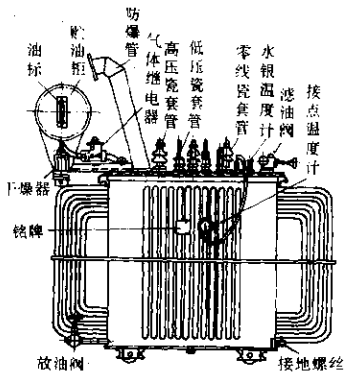
绕组是变压器的电路部分,它是用绝缘铜线或铝导线绕制而成。匝数多的电压高,称为高压绕组,导线截面积小;匝数少的电压低,称为低压绕组,导线截面积大。各个绕组间互相绝缘,套装在同一铁心柱上,以增强耦合。在电力变压器中,绕组多制成圆筒形,低压绕组靠近铁心,高压绕组同心地套装在低压绕组的外面。

除铁心、绕组等主要部件外,在大容量变压器中还有用于散热的油箱及装在油箱壁上的散热管,此外,还有引出高低压绕组的高、低压绝缘套管等。

变压器有单相和三相之分,它们的基本结构是相同的,右图②是三相油浸式电力变压器外形图。

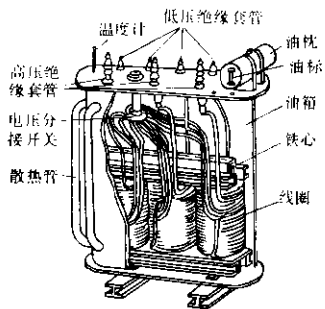


① 电力系统中有许多变压器在工作

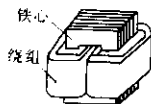


② 三相油浸式电力变压器外形图

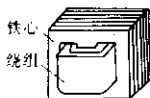
125. 心式变压器和壳式变压器有什么不同？ 按照铁心结构不同，变压器可分为心式和壳式两种。心式变压器的铁心柱被绕组包围，结构较为简单，绕组装配比较容易，用铁量比较少，故电力变压器常常采用这种结构。壳式变压器的铁心包围绕组的顶部、底部和侧面，可以不要专门的变压器外壳，但它的制造工艺较复杂，因此，这种结构仅用于小容量变压器之中。



① 去掉部分油箱后,可见到的三相变压器结构



② 单相变压器的心式结构
铁心被绕组包围



③ 单相变压器的壳式结构
绕组被铁心包围

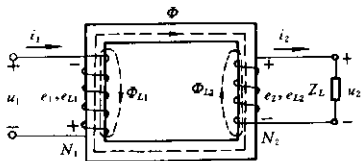
4-6 变压器的工作原理

126. 变压器是怎样工作的？ 右图所示的是单相变压器的原理图。为了便于分析，将高压绕组和低压绕组分别画在左右两个心柱上。与电源相联的绕组称为一次绕组（有时还称初级绕组、原绕组）与负载相联的称为二次绕组（还称次级绕组、副绕组），它们的匝数分别为 N_1 和 N_2 ，各物理量的假定方向如右图所示。

当一次绕组接上交流电压 u_1 时，一次绕组中便有电流 i_1 通过。电流在一次绕组中产生磁动势 ($N_1 i_1$)，由它产生的磁通绝大部分通过铁心而闭合，根据电磁感应原理，在变压器的二次绕组中产生感应电动势。如果二次绕组接有负载，那么二次绕组中便有电流 (i_2) 通过，这个电流在二次绕组中产生磁动势 ($N_2 i_2$)，由它产生的磁通绝大部分也通过铁心而闭合。因此，这时候铁心中的磁通是由一、二次绕组的磁动势共同产生的，称为主磁通 (Φ)。主磁通穿过一、二次绕组而产生的感应电动势 (e_1 和 e_2) 分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad e_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

由右图可见，一次绕组与二次绕组之间在电路上没有直接联系，但由于它们之间的磁耦合和电磁感应作用，使得二次绕组产生了感应电动势。这就是变压器的工作过程。



单相变压器原理图

变压器工作时的电磁关系:

$$\begin{array}{l}
 u_1 \rightarrow i_1 (i_1 N_1) \rightarrow \Phi \rightarrow e_1 = -N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \\
 \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \Phi_{L1} \rightarrow e_{L1} \qquad \qquad \qquad e_2 = -N_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad i_2 (i_2 N_2) \rightarrow \Phi_{L2} \rightarrow e_{L2}
 \end{array}$$

127. 变压器是怎样实现电压变换的？ 一、二次绕组的磁动势除产生主磁通 (Φ) 外, 还产生仅与本绕组交链的磁通 (Φ_{L1} 和 Φ_{L2}), 称为漏磁通, 它们分别在各自绕组中产生漏磁电动势 (e_{L1} 和 e_{L2}), 其数值很小。由 4-2 节可知, e_1 和 e_2 的有效值分别为

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m; \quad E_2 = 4.44fN_2\Phi_m$$

由于变压器一、二次绕组的电阻压降和漏磁电动势一般很小, 可以忽略不计, 所以粗略计算时可认为 $u_1 \approx -e_1$, $u_2 \approx e_2$

所以, 一次绕组和二次绕组电压有效值之比为

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

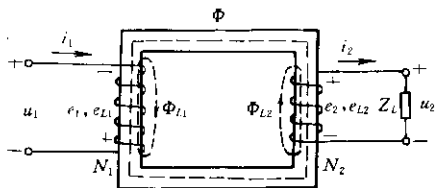
式中比值 k 等于一、二次绕组匝数之比, 称为变压器的变比。由该式可知, 当电源电压 U_1 一定时, 只要改变变压器一次绕组和二次绕组的匝数比, 就可得到不同的输出电压, 这便是变压器变换电压的原理。当 $N_1 > N_2$, 即 $k > 1$ 时, 变压器起降压作用; 当 $N_1 < N_2$, 即 $k < 1$ 时, 变压器起升压作用。

128. 变压器是怎样实现电流变换的？ 由于变压器的铜损和铁损只占变压器容量的百分之几, 所以, 可以近似认为变压器一次绕组的输入功率等于二次绕组的输出功率, 则有

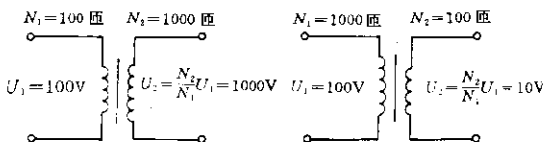
$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2 \quad \text{即} \quad \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

上式说明, 变压器一次绕组和二次绕组电流有效值之比, 与其匝数成反比。因此, 改变一、二次绕组匝数, 不仅可以改变电压, 也可以改变一、二次绕组的电流。由此可见, 变压器具有变换电流的作用。

由上式还可以看出, 在变压器匝数比一定的情况下, 当负载电流 i_2 增加时, 输入电流 i_1 必须成比例的增加, 这从能量守恒的角度也是容易理解的。

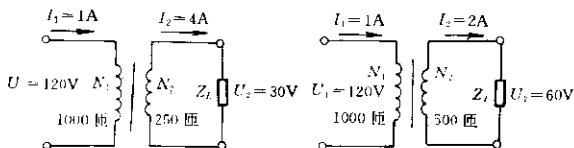


① 变压器的工作原理图



② $N_2 > N_1$ —— 升压变压器

③ $N_2 < N_1$ —— 降压变压器



④

⑤

变压器一次绕组和二次绕组电流有效值之比与其匝数成反比,即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \text{—— 变压器的变流作用}$$

129. 变压器是怎样实现阻抗变换的？ 变压器输出端所接负载阻抗 Z_L ，对变压器输入端的影响，相当于输入端接入一个阻抗 Z'_L （右图③④）。 Z'_L 与 Z_L 有什么关系呢？

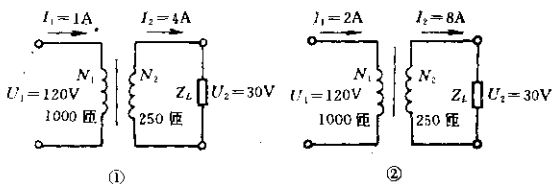
对右图③所示变压器电路而言，根据前面的分析可知

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \qquad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

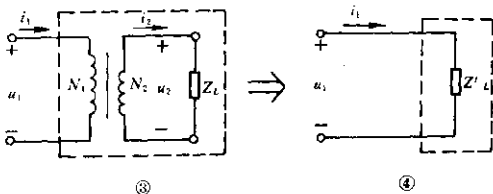
因为 $Z_L = \frac{U_2}{I_2}$

故 $Z'_L = \frac{U_1}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} U_2 / \frac{N_2}{N_1} I_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 Z_L$

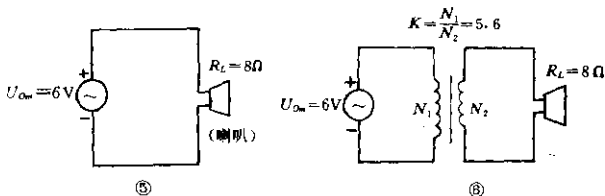
Z'_L 称为 Z_L 折算（反映）到变压器输入端的等效阻抗，当变压器的匝数比不同时，负载阻抗 Z_L 折算到输入端的等效阻抗 Z'_L 也不同。可见，变压器不但有变换电压和变换电流的功能，还有变换阻抗的功能。可以采用不同的匝数比，把负载阻抗变换为所需要的、比较合适的数值。这种做法通常称为阻抗匹配。阻抗匹配在电子设备中很有用处。例如，在有的收音机中，常将阻抗较小的扬声器，经输出变压器实现与收音机电路输出级的阻抗匹配，以使扬声器获得最大功率。



如果 I_2 增大, 则 I_1 成正比例增大



负载阻抗 Z_L 折算到(反映到)变压器
输入端的等效阻抗 $Z_L' = K^2 Z_L$



信号源与喇叭直接联接,
喇叭的输出功率

$$\begin{aligned}
 P &= \left(\frac{U_{om}}{\sqrt{2} R_L} \right)^2 \times R_L \\
 &= \left(\frac{6}{\sqrt{2} \times 8} \right)^2 \times 8 \\
 &= 2.25 \text{ W}
 \end{aligned}$$

信号源经输出变压器与喇叭联
接, 喇叭的功率

$$\begin{aligned}
 P &= \left(\frac{U_{om}}{\sqrt{2} K^2 R_L} \right)^2 \times (K^2 R_L) \\
 &= \left(\frac{6}{\sqrt{2} \times 5.6^2 \times 8} \right)^2 \times 5.6^2 \times 8 \\
 &= 71.8 \text{ mW}
 \end{aligned}$$

4-7 变压器的铭牌

130. 什么是变压器的铭牌值？ 变压器的铭牌是变压器的简单说明书，在铭牌上记载着变压器的额定值，故额定值又称为铭牌值，它是根据国家标准和使用的技术要求，由制造厂家根据设计和实验结果规定的各种技术数据。为了使变压器安全、经济地运行，并保证一定的使用寿命，必须弄清并严格遵守这些规定。

131. 什么是变压器的额定电压？ 变压器一次绕组额定电压 U_{1N} 是指一次绕组应加的正常工作的电压；二次绕组额定电压 U_{2N} 是指一次绕组加额定电压时二次绕组的开路电压即空载电压。

U_{1N} 、 U_{2N} 对单相变压器是指一次绕组和二次绕组电压有效值。对三相变压器是指线电压有效值。

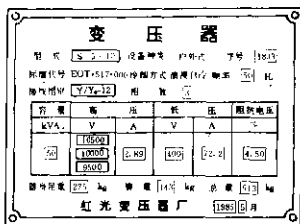
132. 什么是变压器的额定电流？ 额定电流是指根据变压器绝缘材料的容许温升而规定的一次绕组和二次绕组允许通过的最大电流值。

电流超过额定值时，变压器铜损增大，发热增加，将损坏绝缘使变压器寿命缩短乃至损毁。二次绕组电流达到额定值时变压器的负载称为额定负载。

额定电流 (I_{1N} 及 I_{2N}) 对单相变压器而言是指一、二次绕组中的电流有效值，对三相变压器而言是指线电流有效值。

133. 什么是变压器的额定容量？ 额定容量 (S_N) 是指变压器二次绕组额定电压和额定电流有效值的乘积。单相变压器为 $S_N = U_{2N}I_{2N}$ ；三相变压器为 $S_N = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$ 。

额定容量是一种视在功率，它反映变压器传送功率的能力。值得注意的是：变压器二次绕组输出的功率 (P_2) 并不等于额定容量 (S_N)，因为 (P_2) 与负载的功率因数有关，即 $P_2 = U_{2N}I_{2N}\cos\varphi_2$ 。



三相油浸自冷式铝线双线圈变压器的铭牌:容量 50 kVA, 一次侧额定电压 10 kV, 二次侧额定电压 400V

电力变压器新旧型号含义对照表

项 目	类 别	代 表 符 号	
		新 型 号	旧 型 号
相 数	单相 三相	D S	D S
绕组外绝缘介质	变压器油 空气 成型固体	不表示 G C	不表示 G C
冷却方式	油浸自冷式 空气自冷式 风冷式 水冷式	不表示 不表示 F W	J 不表示 F S
油循环方式	自然循环 强迫油导向循环 强迫油循环	不表示 D P	不表示 不表示 P
线圈数	双线圈 单线圈	不表示 S	不表示 S
调压方式	无励磁调压 有载调压	不表示 Z	不表示 Z
线圈导线材料	铜 铝	不表示 不表示	不表示 L
线圈耦合方式	自耦 分裂	O 不表示	O 不表示

4-8 自耦变压器

134. 自耦变压器主要应用在哪里？ 自耦变压器可用来调节电压、改变电炉温度、调节照明亮度、起动交流电动机等，在电力系统中也可做为普通的升压或降压变压器用。由于它有比普通变压器成本低、效率高的特点，故广泛应用在工业生产和实验室中。

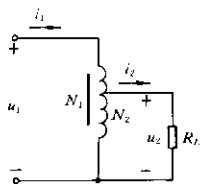
135. 自耦变压器的结构特点是什么？ 前面介绍的单相变压器至少有两个绕组，它们虽然装在同一个铁心柱上，但是相互间是绝缘的，一、二次绕组之间只有磁的耦合，没有直接的电的联系。而自耦变压器却只有一个绕组，二次绕组是一次绕组的一部分，它们之间除了有磁的联系外，还有直接的电的联系，如右图①所示。

自耦变压器的工作原理和电压、电流变换关系与普通单相变压器相同，因此也有

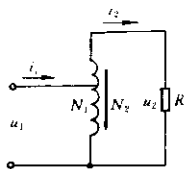
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad \cdot \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

136. 如何正确使用调压器？ 实验室中常用的调压器就是一种可改变二次绕组匝数（即输出电压可调）的自耦变压器，其外形和电路原理图如右图②所示。为了适应 110V 和 220V 电源电压的使用需要，原绕组的中心增加了一个抽头“2”。

当电源电压为 110V 时，接 1、2 端钮；电源电压为 220V 时，接 1、3 端钮；4 和 5 端钮用来接负载，其中 5 为滑动触头的引出端钮。二次绕组的匝数通过滑动触头均匀地改变，从而达到均匀改变输出电压的目的。使用调压变压器时，一、二次绕组不允许接错，否则可能引起短路事故，烧毁调压器绕组。另外在使用前，必须将滑动触头旋至零点位置，接上电源后再慢慢转动旋转手柄改变滑动触头位置，即可在 4-5 端获得不同的输出电压。

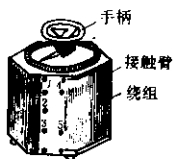


降压用

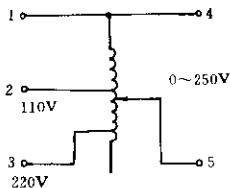


升压用

- ① 自耦变压器的二次绕组是一次绕组的一部分，
它们之间既有磁的联系，也有电的联系



② 自耦变压器外形图



③ 自耦变压器电路图

注意：使用时，一、二次绕组不能接错，按要求在一次绕组 1~2 或 1~3 端加上电压，转动旋转手柄，
则可在 4~5 端获得不同的输出电压

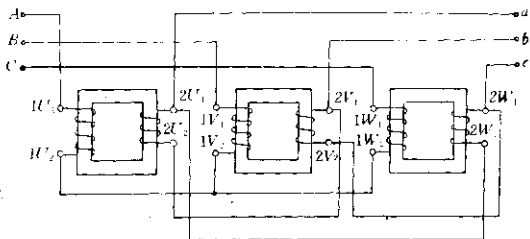
4-9 三相变压器

137. 如何实现三相交流电压的变换？三相交流电压的变换，既可以用三台技术数据相同的单相变压器联接成三相变压器组来完成 [右图①]，也可以用一台三相变压器来实现，一般中、小容量以用三相变压器的居多。

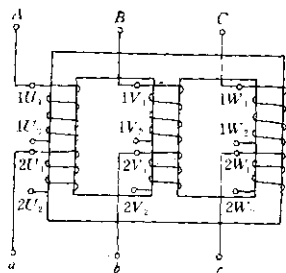
138. 三相变压器的基本结构是怎样的？三相变压器的铁心有三个心柱，每相的高、低压绕组同心地绕在一个心柱上，其结构原理如右图②所示。一般高压绕组的首端用 $1U_1$ 、 $1V_1$ 、 $1W_1$ 标明，末端用 $1U_2$ 、 $1V_2$ 、 $1W_2$ 标明；低压绕组的首端用 $2U_1$ 、 $2V_1$ 、 $2W_1$ 标明，末端用 $2U_2$ 、 $2V_2$ 、 $2W_2$ 标明，中点引出线用 N 表示。

139. 三相变压器的绕组有哪几种常用的联接方式？它们分别在哪些主要场合？三相变压器和三相变压器组的高、低压绕组可以接成星形(Y)或三角形(Δ)。为了制造和运行上的方便，国家标准中对三相变压器规定了五种标准联接方式： Y/Y_0 、 Y/Δ 、 Y_0/Δ 、 Y/Y 和 Y_0/Y ；而以 Y/Y_0 、 Y/Δ 、 Y_0/Δ 三种接法应用最广。其中分子表示高压绕组的联接法，分母表示低压绕组的联接法。例如， Y_0/Δ 表示高压绕组接成Y形并有中点引出线，低压绕组接成 Δ 形。

由于高压绕组接成Y形后，相电压只有线电压的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，因而每相绕组的绝缘要求可以降低；低压绕组采用 Δ 形，相电流只有线电流的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，故导线的截面积可以减小。所以，大容量、高电压的变压器通常采用 Y/Δ 或 Y_0/Δ ；其中 Y/Δ 用在三相三线制系统中，一般高压不超过60kV，低压为3~10kV； Y_0/Δ 主要用在110kV以上的高压输电系统中，一般需要使高压绕组的中点接地或者通过阻抗接地。 Y/Y 适用于容量不大的三相配电变压器，以供给照明和动力混合负载，低压一般为400V，高压不超过35kV。



① 由三台技术数据相同的单相变压器联接而成的三相变压器组,联接方式为Y/Δ



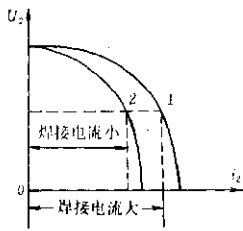
② 三相变压器的结构原理图

4-10 电焊变压器

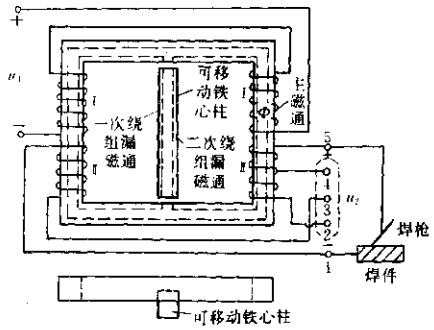
140. 电焊变压器的基本结构是什么？ 电焊变压器（即交流电焊机）实质上是一种专供电弧焊用的特殊降压变压器，因而它也由铁心及绕组构成。但为了满足电焊变压器能正常工作而必须具备“陡降”外特性 [右图①]，因此，电焊变压器具有特殊的结构。右图②所示的是常用的磁分路式电焊变压器的结构示意图，图中 I 是一次绕组，II 是二次绕组，它们共同绕在电焊变压器的两个心柱上，中间的可移动铁心柱（在普通变压器中没有）可通过旋转手柄将其移进或移出。

141. 磁分路式电焊变压器是如何工作的？ 在焊接前（空载时），磁分路式电焊变压器的输出电压约为 60~90V（足够的电弧点火电压）。焊接时，先把焊条与焊件相碰，这时电焊机的输出端短路，由于这种电焊变压器中的漏磁通可通过活动铁心形成路径，故两个绕组的漏磁通较大，漏磁阻抗较大，因此，短路电流虽然较大，但受到了限制，一般小于额定焊接电流的 1.5 倍。短路电流在焊条和焊件的接触处产生较大的热量，温度较高，然后迅速把焊条提起，于是在电压的作用下，焊条和焊件之间产生电弧，对焊件进行焊接。其电弧性质相当于一个电阻，电弧两端的电压约为 30V。在焊接过程中，当焊条和焊件之间的距离发生变化时，即电弧的弧柱发生变化时，由于电弧的电阻比电路中的阻抗小得多，因此焊接电流的变化不大，这对于维持电弧稳定与保证焊件质量是很有利的。从上述可见，磁分路式电焊变压器从空载至短路，输出电压变化较大，但输出电流变化不大，这说明磁分路式电焊变压器具有陡降的外特性。

当焊接不同的焊件和使用不同规格的焊条时，则要求调节焊接电流的大小，这可通过移动中间的铁心柱来实现，也可以通过改变二次绕组的匝数，对焊接电流进行粗调节。



① 电焊机陡降的外特性 输出电压变化大, 输出电流变化小



② 磁分路式电焊变压器的结构特点——具有可移动铁心柱, 使电焊机具有陡降的外特性, 同时可通过它调节焊接电流的大小

第五章 异步电动机

5-1 三相异步电动机的用途和结构

142. 三相异步电动机适用于哪些场合？ 电动机是将电能转变为机械能的装置。根据电流种类的不同，电动机分为交流电动机和直流电动机两大类。异步电动机是交流电动机的一种；它有三相和单相之分。三相异步电动机广泛用于驱动各式机床、水泵、鼓风机、轧钢机、起重机、吊车、抽水机等工农业生产机械。

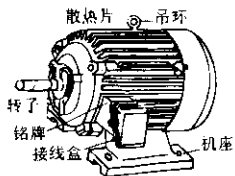
143. 三相异步电动机的基本构造由哪几部分组成？ 主要由两部分组成：即定子和转子。定子与转子之间有一定气隙，以便转子能拖动生产机械自由转动。气隙一般为 $0.2\sim 2\text{mm}$ 。

144. 定子构造是怎样的？ 定子主要由机座、定子铁心和定子绕组等构成。

①机座：用来支承铁心和端盖。一般用铸铁铸造，大型电机采用钢板焊接而成。

②定子铁心：它是电动机磁路的一部分，是用互相绝缘、 0.5mm 厚的硅钢片冲片叠压而成的一个圆筒体，固定在机座上。在硅钢片内圆周表面均匀地冲有许多槽；槽孔内嵌放三相定子绕组。

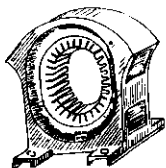
③定子绕组：它是电动机的定子电路。每相绕组均由绝缘铜线或铝线绕制而成。三相绕组按一定规律嵌放在定子铁心槽中。它们的六个线端（三个首端、三个末端），分别接到机座外的接线盒中。根据需要，三个绕组可以接成星形或三角形，再接到三相电源上。三相绕组中通入三相电流，便产生磁场，称为旋转磁场。



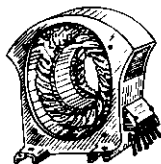
三相异步电动机外形



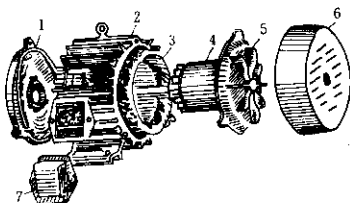
定子硅钢片



未装绕组的定子



已装绕组的定子



三相鼠笼式异步电机的部件

- 1-端盖 2-定子 3-定子绕组 4-转子
5-风扇 6-风扇罩 7-接线盒盖

145. 转子构造是怎样的？ 转子主要由转子铁心和转子绕组构成。

①转子铁心：它也是电动机磁路的一部分，与定子铁心相似，也是用互相绝缘、0.5mm厚的硅钢片冲片叠压而成，但形状是圆柱形。它的外圆周表面均匀地冲有许多槽，用来嵌放转子绕组。转子铁心固定在转轴上。

②转子绕组：转子绕组是电动机的转子电路。分鼠笼式和绕线式两种。

鼠笼式转子：这种转子的绕组是用铜条嵌入转子铁心槽中，两端各用一个铜环焊接着，使转子电路闭合。这些铜条和铜环构成一个外形好像鼠笼的结构，故叫鼠笼式转子。中小功率的鼠笼式异步电动机的转子绕组大都是采用熔化的铝液，一次浇铸而成。浇铸时在端环上同时铸成许多叶片，作为冷却用的风扇。

绕线式转子：这种转子的绕组和定子绕组相同，也是用绝缘铜线或铝线绕制而成的三相绕组。三个绕组按一定规律嵌放在转子铁心槽中，接成星形。三个绕组的另一端分别与一个铜制滑环连接。滑环彼此之间以及滑环与轴之间都是绝缘的。通常三个滑环通过固定在端盖上的三组电刷与外部三个变阻器连接。因此，绕线式转子电路中的电阻是可以改变的。

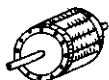
绕线式异步电动机的构造比鼠笼式异步电动机的构造复杂，但它的起动和调速性能要好些。多用于重负载起重设备，如起重机、卷扬机等。



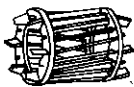
转子硅钢片



鼠笼绕组



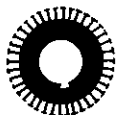
鼠笼式转子



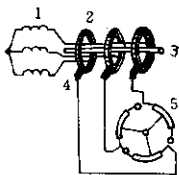
铸铝鼠笼绕组



铸铝鼠笼式转子

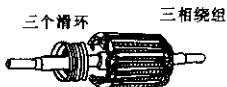


绕线式转子硅钢片



绕线式转子与外加变阻器连接

1—转子绕组 2—滑环 3—轴
4—电刷 5—变阻器



绕线式转子

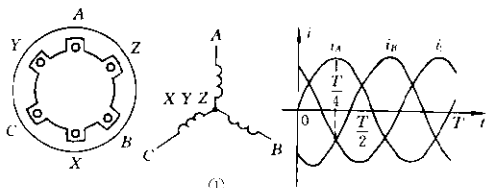
5-2 三相异步电动机的工作原理

146. 旋转磁场是怎样产生的？ 定子的三个绕组的轴线彼此相隔 120° ，通入对称三相电流（右图①）。选三个时刻来观察三相电流产生的合成磁场。假定三个绕组中电流的方向都是从首端（A、B、C）流入，从末端（X、Y、Z）流出。从电流波形图看出，当 $t=0$ 时， $i_A=0$ ， $i_B<0$ 为负值，电流从 Y 端流入； $i_C>0$ 为正值，电流从 C 端流入。根据右手定则，三个电流产生的合成磁场方向是由上向下（右图②）。当 $t=T/4$ 时， $i_A>0$ ，电流从 A 端流入； $i_B<0$ ， $i_C<0$ ，电流分别从 Y、Z 端流入，合成磁场方向转过 90° ，改为由右向左。当 $t=T/2$ 时， $i_A=0$ ， $i_B>0$ ，电流从 B 端流入； $i_C<0$ ，电流从 Z 端流入；合成磁场方向又转过 90° ，改成由下向上。电流不断变化，合成磁场方向也不断旋转，由此得出结论：彼此相隔 120° 的三个绕组中通入对称三相电流产生的磁场是一个旋转磁场。

147. 旋转磁场的旋转方向由什么决定？ 从右图看出，旋转磁场旋转方向是沿 A-B-C 方向旋转，与电流相序一致。因此三相电流产生的旋转磁场的旋转方向是由三相电流的相序决定的。

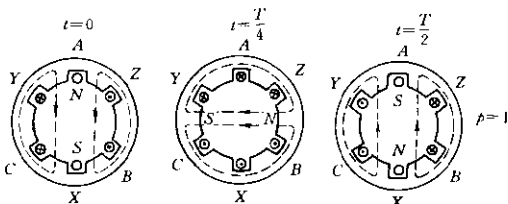
148. 旋转磁场的转速与什么因素有关？ 上述结构中，定子只有六个槽，每相绕组只由一个线圈组成。三相电流产生的合成磁场只有一个 N 极，一个 S 极，即一对磁极（磁极对数 $p=1$ ）。在电流变化一个周期内，磁场转一圈。因电流每秒变化 f （频率）个周期，故旋转磁场的转速为 $n_0=60f$ （r/min）。用上述同样方法观察定子有 12 个槽，每相绕组有两个线圈的情况（右图③）。这时，磁极对数 $p=2$ ，但转速慢了一半，即 $n_0=\frac{60f}{2}$ （r/min）。旋转磁场的转速

$$n_0 = \frac{60f}{p}。它与电源频率 f 和磁极对数 p 有关。$$

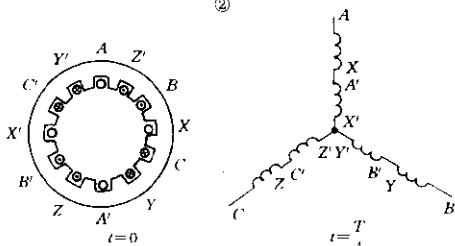


①

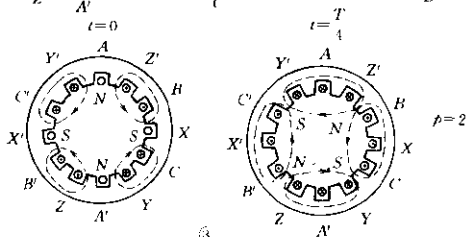
电流变化
一个周期，
磁场旋转
一圈



②



电流变化
一个周期，
磁场旋转
半圈



③

149. 三相异步电动机为什么会转动? 三相异步电动机的工作原理可用右图①来说明:图中 N 、 S 代表旋转磁场的一对磁极,沿顺时针方向旋转。由于转子导体切割磁力线,在转子导体中便产生了感应电动势和感应电流。此电流受磁场作用便产生电磁转矩,推动转子旋转。旋转磁场旋转方向是顺时针方向,相当于转子导体逆时针方向切割磁力线,根据右手定则可以决定感应电动势的方向。假定电流与感应电动势相位相同,则感应电流的方向与电动势方向一致。在 N 极,感应电流方向是穿出纸面。在磁场中,载流导体受力的方向由左手定则决定,方向向右。可见,电磁转矩的方向也就是转子旋转方向,跟旋转磁场旋转方向相同。如果改变定子电流的相序,则旋转磁场的旋转方向将改为逆时针方向,于是转子旋转方向也跟着改变。转子电流由感应产生,故这种电动机又叫感应电动机。

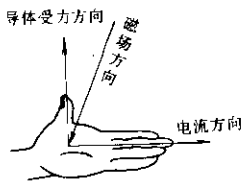
150. 转子的转速与哪些因素有关? 三相异步电动机转子电流的产生是由于转子导体切割旋转磁场磁力线,也就是说转子与旋转磁场之间有相对运动,或者说两者存在速度差。因此,转子的转速(n)一定小于旋转磁场转速(n_0)。(又叫同步转速)。当 $n=n_0$ 时,两者就无相对运动,转子导体就不能切割磁力线,也就不可能产生感应电流,不可能产生电磁转矩,电动机就转不起来。转子与旋转磁场间的相对运动用两者转速差(n_0-n)与旋转磁场转速(n_0)之比(S)来表示,即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

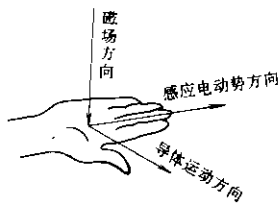
叫做转差率。一般用百分数表示, s 约为 $1\% \sim 6\%$ 。大、中功率电动机 s 较小,约为 $1\% \sim 3\%$ 。由上式得到公式

$$n = (1-s)n_0 = (1-s) \frac{60f}{p}$$

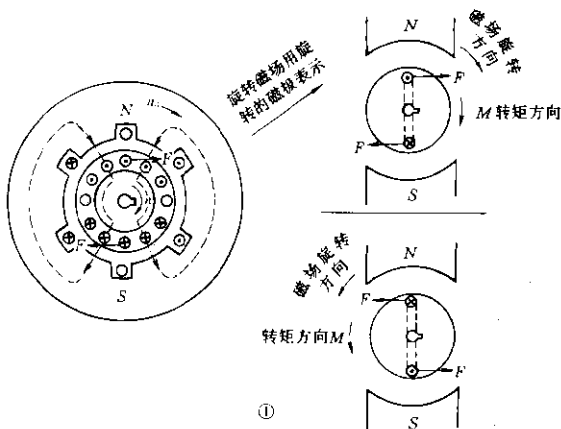
可见电动机的转速与电源频率、磁极对数及转差率有关。



左手定则



右手定则



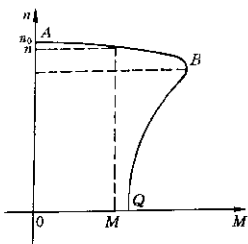
5-3 三相异步电动机的机械特性

151. 三相异步电动机的电磁转矩与哪些因素有关？ 三相异步电动机的电磁转矩是由于转子受旋转磁场作用力产生的，它的理论公式为 $M = C_m \Phi_m I_2 \cos \theta_2$ ，其中 C_m 是由电动机结构决定的常数， Φ_m 是磁极的磁通最大值， I_2 是转子电流有效值， θ_2 是转子电路中感应电动势与电流的相位差。 M 也可以用下式表示：

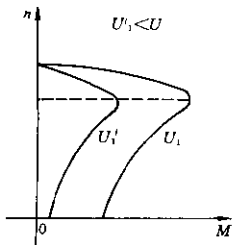
$$M = CU_1^2 \frac{s r_2}{r_2^2 + (s X_{20})^2}$$

式中 C 也是常数， U_1 是定子绕组的相电压， r_2 、 X_{20} 分别是转子电路电阻及转子静止时的感抗， s 是转差率。

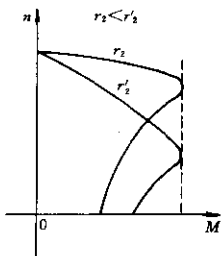
152. 三相异步电动机的机械特性是怎样的？ 电动机的转速 (n) 与电磁转矩 (M) 的关系叫做电动机的机械特性，用 $n \sim M$ 曲线表示。三相异步电动机的机械特性曲线如右图①所示。 B 点是 M 最大值点， Q 点是起动时的工作点。电动机在曲线 AB 段范围内工作时，能稳定运行。当电磁转矩等于负载转矩 (M_c) (包括轴上所带机械负载转矩和空载损耗转矩) 时，电动机匀速旋转。当负载转矩增大到 M_c' 时，由于 $M < M_c'$ ，电动机开始减速，转速降低。根据 AB 段特性曲线可知， n 减小，则 M 增大，直至 $M = M_c'$ 电动机便在新的较低转速下稳定运行。反之，若 M_c 减小，则 n 上升，使 M 减小，达到新的平衡时，转速已增大。在曲线 BQ 段，电动机不能稳定运行。例如当 M_c 增大时， $M < M_c$ ， n 下降。而 n 减小，迫使 M 进一步减小。 n 再下降， M 再减小，直至电动机停止转动为止。曲线 AB 段近似一条斜率不大的直线，说明当 M 变化时， n 变化不大。这种特性叫硬机械特性，反之，叫软机械特性。硬特性适合一般金属切削机床，因为切削吃刀量经常变化，硬特性可保持转速基本不变。



① 三相异步电动机的机械特性



② 绕组相电压对机械特性影响



③ 转子电路电阻对机械特性影响

153. 什么是额定转矩、最大转矩、起动转矩？与电动机性能有何关系？ 在额定转速时的电磁转矩叫额定转矩。它和电动机的额定功率 (P_{2N}) (指轴上输出的机械功率) 及额定转速 (n_N) 有下列关系 $M_N = 975 P_{2N} / n_N$

M_N 的单位为千克·米 ($\text{kg} \cdot \text{m}$)； P_{2N} 的单位为千瓦 (kW)； n_N 的单位为转/分 (r/min)。 P_{2N} 和 n_N 的数据在铭牌上标出，根据上式即可算出 M_N 。从而可以知道该电动机能否带动负载。上式说明，额定功率相同的电动机， n_N 低则 M_N 大；其次，由于转速 n 与磁极对数 p 成反比，所以极数多的电动机， n_N 低， M_N 大。

在机械特性曲线 B 点的转矩数值最大，叫最大转矩。它说明两点：第一，负载转矩不能大于 M_m ，否则，电动机就带不动负载，发生闷车现象。此时，电动机电流将剧增，发生严重过载，甚至烧毁电动机。第二， M_m 表示电动机短时过载能力。最大转矩通常用额定转矩的倍数来表示。 M_m 与 M_N 之比叫过载系数，即

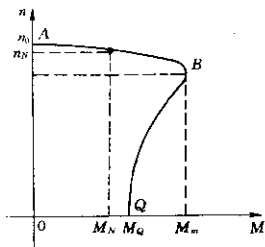
$$\text{过载系数} = M_m / M_N$$

一般约为 $1.8 \sim 2.2$ 。由 M_N 可以近似地估算出电动机的 M_m 值。

在额定电压下，电动机刚起动 ($n=0$) 时的电磁转矩叫起动转矩。它是衡量电动机起动性能的重要技术指标之一。 M_Q 大，则电动机加速快，起动过程短，同时说明带重负载起动的能力大。所以 M_Q 大，起动性能就好； M_Q 小，不易起动或起动时间长，甚至起动不了，电动机绕组就容易发热；带重负载起动能力小。起动转矩的大小也用额定转矩的倍数来表示。 M_Q 与 M_N 之比叫起动能力，即

$$\text{起动能力} = M_Q / M_N \quad (\text{比值约为 } 1.0 \sim 2.2)$$

由电磁转矩公式可知 M_Q 与定子相电压大小有关，降低电压，将使 M_Q 减小，对起动不利。从机械特性曲线 123 页图可知 M_Q 随转子电路电阻增大而增大。



M_m —最大转矩 M_N —额定转矩

M_Q —起动转矩 n_N —额定转速

n_0 —同步转速

已知某机床主轴电动机的额定功率为 7.5kW, 额定转速为 1440 r/min, 则可计算出它的额定转矩

$$\begin{aligned} M_N &= 975 \times \frac{P_{2N}}{n_N} \\ &= 975 \times \frac{7.5}{1440} = 5.08 \text{ kg} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

最大转矩和起动转矩估算如下:

设过载系数=2.2 则 $M_m = 2.2 \times 5.08 = 11.2 \text{ kg} \cdot \text{m}$

设起动能力=2 则 $M_Q = 2 \times 5.08 = 10.2 \text{ kg} \cdot \text{m}$

5-4 三相异步电动机的起动

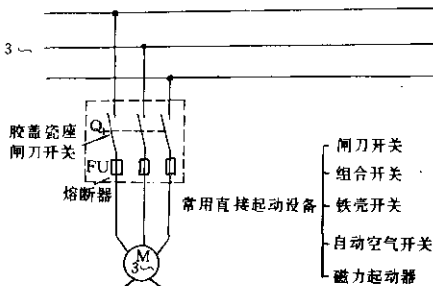
154. 三相异步电动机起动时有什么现象？ 转子中的感应电流是转子与磁场间相对运动而产生的。电动机在起动瞬间，转子转速为零（ $n=0$ 、 $s=1$ ），因相对运动速度很大，故转子导体切割磁力线速度很大，使转子中感应电流很大，定子绕组的电流也很大。所以三相异步电动机的起动电流（指定子绕组的线电流）很大，一般达到额定电流的5~7倍。

155. 起动电流大有什么不利？ 起动电流大产生的不良影响有二：①增大输电线上的电压降，使电网电压下降，影响附近电气设备的正常运行。由于三相异步电动机的电磁转矩与定子绕组相电压的平方成正比，电压的下降，可能造成运行中的电动机带不动负载而被迫停车，影响生产；②对于频繁起动的电动机，过大的起动电流会使电动机过热，影响它的寿命。

156. 在什么情况下，三相异步电动机可以直接起动？ 所谓直接起动，就是定子绕组直接加额定电压起动电动机。在电网容量比电动机的功率大得多时，电动机的起动电流虽然很大，但对电网电压不会有明显的影响，在这种情况下，电动机可以直接起动。10kW以下的电动机通常都可直接起动。这种起动方法的优点是设备少，线路简单，操作方便，起动时间短。

157. 减小起动电流有哪些方法？ 为了减小起动电流，三相鼠笼式异步电动机通常采用降低定子绕组电压的方法起动。当电动机的转速升高以后，再改为额定电压运行。这种起动方法叫降压起动。常用的方法有星形-三角形（Y- Δ ）起动法和自耦变压器起动法。降压起动法主要优点是可以减小起动电流，缺点是起动转矩较小。因此，它只适用于轻载或空载起动的情况。三相绕线式异步电动机采用在转子电路中串入电阻的起动方法。

三相异步电动机的直接起动



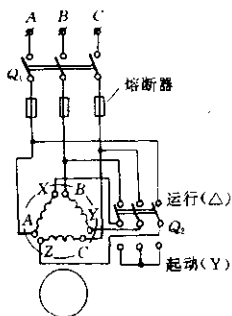
三相鼠笼式异步电动机允许直接起动的功率条件

电动机类型	工作方式	功率限制
变压器直接供电低压电动机	经常起动	<变压器容量 20%
	不经常起动	<变压器容量 30%
发电机直接供电低压电动机		0.1~0.12kW/1kVA 发电机容量
高压线路上的高压电动机		<线路短路容量 3%

158. 什么是Y-△起动法？ 这种起动方法只适用于定子绕组在正常运行时规定为三角形接法的电动机。具体方法是：先将定子三相绕组按星形接法连接进行起动。因为绕组的相电压降低为额定电压的 $1/\sqrt{3}$ ，所以起动电流减小了。当电动机转速升高后，再将三相绕组改为三角形连接，这时电动机在额定电压下运行。原理如右图①所示。Y-△起动法优点是设备简单。

159. 什么是自耦变压器起动法？ 这种起动方法采用自耦变压器原理实现降压起动。原理如右图②所示。起动电动机时，将定子绕组接到自耦变压器的副边，这时绕组电压低于电网电压，从而减小了起动电流。当电动机转速升高后，利用开关将定子绕组直接接到电网上，同时迅速将自耦变压器切除。这种起动方法的优点是不受电动机定子绕组接线方法的限制，容量较大的电动机常采用此法起动。缺点是设备费用较高。

160. 三相绕线式异步电动机怎样起动？ 绕线式异步电动机采用在转子电路中接入电阻减小起动电流的方法进行起动。接入的电阻一般采用一种专用设备，叫频敏变阻器（右图③）。频敏变阻器实质是一铁心线圈，在铁心柱上绕有三个线圈，接成星形。它的特点是：三个线圈的等效电阻（包括铁心损耗的等效电阻）随转子电流的频率不同而变化，实质是铁损随频率变化。频率高，线圈等效电阻较大；频率低，线圈等效电阻小。电动机起动时 $n=0$ ，转子电流频率最大，所以频敏变阻器线圈等效电阻也最大，起到减小起动电流的作用。当电动机转速升高后，转子电流频率很低，频敏变阻器线圈等效电阻也就很小了，相当于把转子绕组短接。最后，将频敏变阻器从转子电路中切除。



① Y-Δ 起动线路

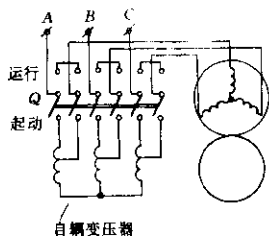
Q_1, Q_2 —闸刀开关

起动时:

Q_2 向下闭合, 绕组接成 Y

正常运行时:

Q_2 向上闭合, 绕组接成 Δ



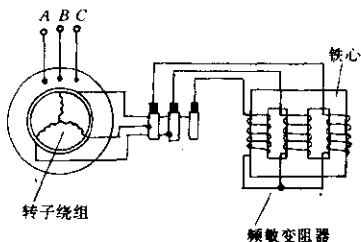
② 自耦变压器起动线路

起动时:

Q 向下闭合, 降压起动

正常运行时:

Q 向上闭合, 自耦变压器切除

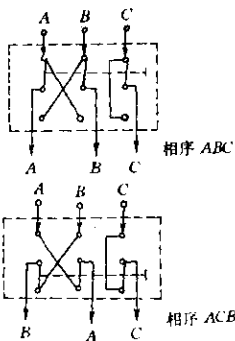
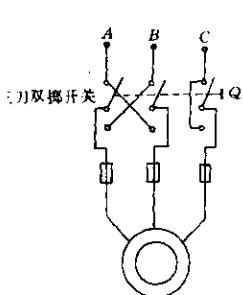
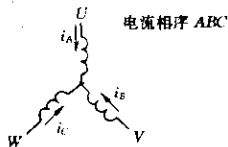
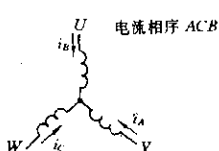
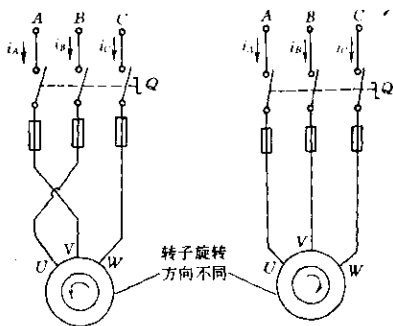


③ 三相绕线式异步电动机采用频敏变阻器起动的线路

5-5 三相异步电动机的反转

161. 怎样改变三相异步电动机的旋转方向? 在 5-2 节中已指出,三相异步电动机转子的旋转方向跟旋转磁场的旋转方向相同。因此,欲改变转子旋转方向,就必须改变旋转磁场的旋转方向。

三相异步电动机的旋转磁场的旋转方向是由定子绕组中三相电流的相序决定的,换句话说,改变定子绕组中三相电流的相序就能改变旋转磁场的旋转方向,于是转子的旋转方向也就跟着改变。具体方法也很简单,只要将定子绕组接往电源的三根导线,任意对调其中两根导线就可以,参阅右面各图。

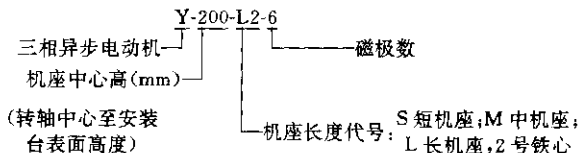


5-6 三相异步电动机的铭牌和额定值

162. 三相异步电动机铭牌上有哪些技术数据？有什么用途？

有下列技术数据：型号、功率、电压、电流、转速、频率、温升、绝缘等级、接法及工作方式等（其中功率等数值都是指的额定值）。这些数据是正确使用、检查和维修电动机的主要依据。

163. 型号包括什么内容？ 型号一律用大写印刷体的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，它代表了电动机的主要特征，例如



164. 功率的意义是什么？ 功率是电动机在额定状态（额定电压、额定频率、额定负载）下运行时，转轴上输出的机械功率，也叫电动机容量。

165. 电压的意义是什么？ 指电动机在额定状态下运行时加在三相定子绕组上的线电压。有的铭牌上标出如 220/380V，都是指的线电压。

166. 电流的意义是什么？ 指电动机在额定状态下运行时定子绕组的线电流。如铭牌上标有两个电压，则也有两个额定电流值。

167. 频率指什么？ 指允许加在定子绕组上的电源频率。我国工业用电的标准频率为 50Hz。

168. 转速指什么？ 电动机在额定电压、额定频率下，输出额定功率时，转子每分钟的转数叫额定转速。

异步电动机产品名称代号

产品名称	新代号	新代号的 汉字意义	老代号
异步电动机	Y	异	J、JS、JO
绕线式异步电动机	YR	异绕	JR、JRO
隔爆型异步电动机	YB	异爆	JB、JBS
起重冶金用异步电动机	YZ	异重	JZ
起重冶金用绕线式异步电动机	YZR	异重绕	JZR
高起动转矩异步电动机	YQ	异起	JQ、JGQ

电动机铭牌

三相异步电动机			
型号 Y132M-4	功率 7.5kW	频率 50Hz	
电压 380V	电流 15.4A	接法 Δ	
转速 1440r/min	绝缘等级 B	工作方式 连续	
年 月 日	编号	××电机厂	

绕组绝缘等级与允许温度关系

绝缘等级	A	E	B	F	H
极限工作温度(°C)	105	120	130	155	180

电动机绝缘等级与温升关系

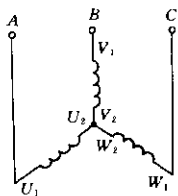
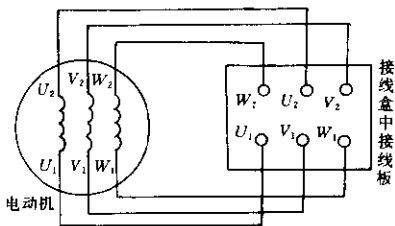
绝缘等级		A	E	B	F	H
温升(°C)	电阻法	60	75	80	100	125
	温度计法	55	65	70	85	105

169. 温升和绝缘等级的意义是什么？ 电动机在运行时，绕组温度高出周围环境温度（国家标准规定为 40°C ）的允许值，叫允许温升。因此，绕组允许的最高温度等于温升加环境温度。电动机的温升是由所用绝缘材料的绝缘等级决定的，也就是由所用绝缘材料的耐热等级决定的。每一绝缘等级规定有相应的允许最高温度。

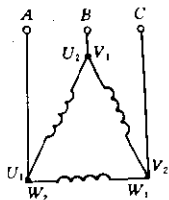
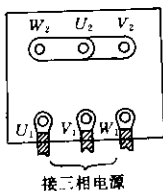
170. 接法指什么？ 指三相定子绕组在正常运行时的接法。凡铭牌上标有两种额定电压者，应有两种接法。如电压为 $220/380\text{V}$ ，则接法应该是 Δ/Y ，即：当电压为 220V 时，三相绕组接成三角形（ Δ ），如电压为 380V 时，则接成星形（ Y ）。说明两种接法时，每相绕组的相电压都是 220V 。

171. 工作方式有几种？ 分为连续、短时、断续三种方式：①连续工作方式是指电动机在铭牌上的额定值条件下，能够长期连续运行。适用于水泵、鼓风机等。②短时工作方式是指电动机在规定条件下，只能在限定时间内短期运行。适用于转炉、闸门等的驱动。③断续工作方式是指在规定条件下，只能断续地运行。适用于升降机、起重机等设备。

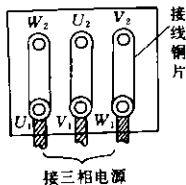
接线盒的接线方法



Y 接法



Δ 接法

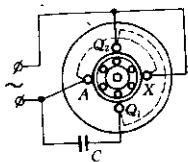


5-7 单相异步电动机

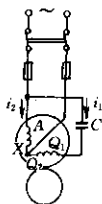
172. 单相异步电动机适用于哪些场合？ 单相异步电动机的使用只需要单相交流电源，这是它的主要优点。但它的功率因数和效率都低，一般制成小容量电动机，功率从几瓦到几百瓦，广泛用于电钻、风扇、搅拌机、砂轮、电冰箱、洗衣机、空气压缩机、空气调节器、吸尘器以及自动控制设备中。

173. 常见单相异步电动机有几种？ 常见的有电容分相式电动机和罩极式电动机两种。

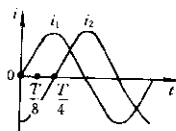
174. 电容分相式电动机的结构和工作原理是怎样的？ 电容分相式电动机的原理性结构和电路如右图①所示。定子上有两个绕组，一个叫工作绕组，另一个与电容串联的绕组叫起动绕组。两个绕组的轴线相交成 90° ，电流的相位差也近似为 90° ，起动绕组中电流超前。因此，两绕组中电流产生的合成磁场也是旋转磁场；旋转磁场的旋转方向是从电流超前的绕组指向电流滞后的绕组。这种电动机的转子也做成鼠笼式。工作原理和三相鼠笼式异步电动机的工作原理相同。在旋转磁场作用下，转子电路中产生感应电流，从而产生电磁转矩，推动转子旋转。转子旋转方向也跟旋转磁场旋转方向相同。欲改变转子旋转方向，只须改变电容的串联位置，即将电容改为与工作绕组串联就可以，因为这时旋转磁场的旋转方向已改变。



结构示意图

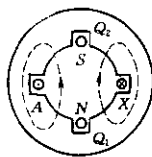


接线图

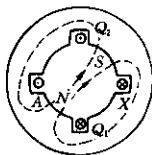


两绕组中电流波形

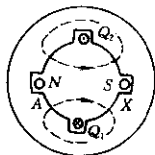
① 电容分相式单相异步电动机



$t=0$



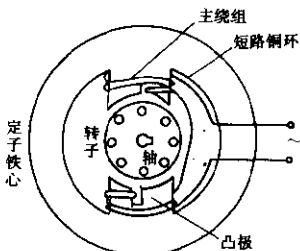
$t=\frac{T}{8}$



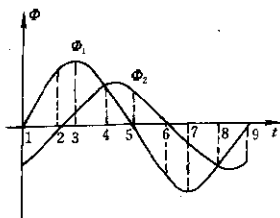
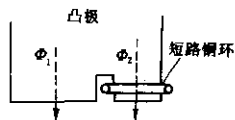
$t=\frac{T}{4}$

两绕组中电流产生的磁场——旋转磁场
 旋转磁场旋转方向——由超前的电流转向滞后的电流（由 Q₂ 转向 A）

175. 罩极式电动机的结构和工作原理是怎样的？ 它的原理性结构如右图①所示。主要也是由定子和转子两部分组成。定子分定子铁心和定子绕组。定子铁心不是多槽形状，而是做成一个凸极形状，由硅钢片冲片叠压而成。在每个磁极端部的一边开有一个小槽。定子绕组分为两部分：每个磁极上装有一个集中绕组，也叫主绕组；另一绕组是一个小铜环，嵌入磁极端部的小槽中，将部分磁极端部罩起来，小铜环又叫罩极线圈。转子也呈鼠笼式结构。通过每个磁极的磁通由两部分磁通合成，即未穿过铜环部分的磁通(Φ_1)与穿过铜环部分的磁通(Φ_2)。理论分析证明，由于电磁感应作用，两部分磁通产生了相位差，它们的合成磁场是不断向前移动的，有的叫“扫动磁场”，前进的方向是由未被铜环包围的部分指向罩极部分。这种向前移动的磁场实质上是一种椭圆度很大的旋转磁场。在这种磁场作用下，产生电磁转矩使转子旋转。但这种电动机的旋转方向是无法改变的。



① 罩极式单相异步电动机结构示意图

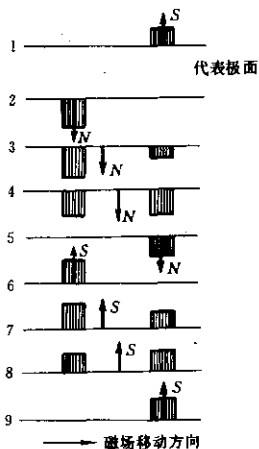


右方是 Φ_1 与 Φ_2 合成磁场
——移动磁场的图解

每一时刻磁通大小用方块表示

$\Phi > 0$, 磁通穿出极面

$\Phi < 0$, 磁通进入极面



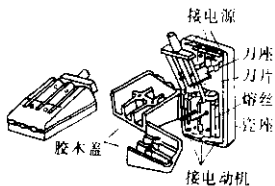
第六章 低压电器和控制系统

6-1 低压电器

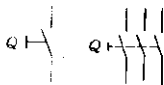
176. 常用的低压电器有几种？各有何功能？ 常用的低压电器一般分为控制电器和保护电器。前者的功能是接通或切断电源或线路；后者的功能是在线路发生短路或过载等故障时，迅速切断电源以保护电气设备。控制系统主要由主电路和控制电路（又叫辅助电路）组成。前者是和电动机定子绕组联接的电路，电流较大；后者是对各电器触头动作（开、闭）进行控制的电路，电流较小。常用的控制电器有闸刀开关、组合开关、按钮、接触器等。保护电器有熔断器、热继电器等。

177. 什么是闸刀开关？ 闸刀开关简称刀开关。它由瓷座、刀片、刀座及胶木盖等组成。通常用作隔离电源的开关，以便能安全地对电气设备进行检修或更换保险丝。也可用作直接起动电动机的电源开关。选用时，闸刀开关的额定电流约大于电动机额定电流三倍。根据刀片数多少，闸刀开关分单极（单刀）、双极（双刀）、三极（三刀）。将三极闸刀开关和熔断器组装在一个用铸铁或钢板制成的箱壳内，就叫铁壳开关，铁壳侧面有手柄供操作开关之用。

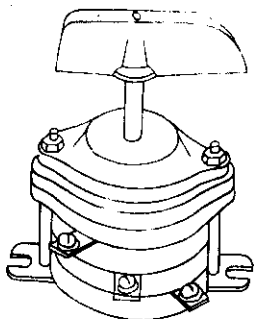
178. 什么是组合开关？ 组合开关又叫转换开关，实质是一种三极闸刀开关。常用的三极组合开关有三对静触头和三对动触头。三对动触头装在绝缘方轴上，利用手柄转动方轴使动触头与静触头接通或断开。常用的组合开关有 HZ5 和 HZ10 系列，其额定电压直流为 220V，交流为 380V；额定电流分 10A、25A、60A 及 100A 四种。



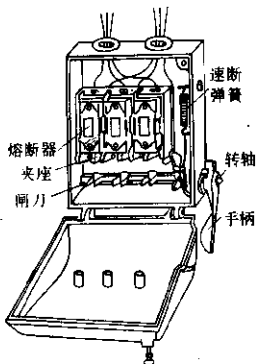
闸刀开关外形和结构



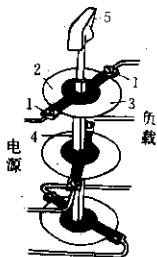
闸刀开关图形和文字符号



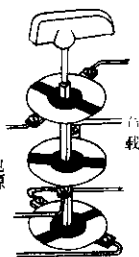
HZ10~225/3T 组合开关外形



铁壳开关结构



组合开关接通状态



组合开关断开状态

- 1—静触头 2—动触头 3—绝缘垫板
4—绝缘方轴 5—手柄

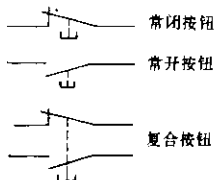
组合开关图形和文字符号 Q_T

179. 什么是按钮开关？ 按钮开关简称按钮，用来接通或断开控制电路。它分常开按钮、常闭按钮和复合按钮三种，常开按钮由一对常开触头（包括一对静触头和一对动触头，触头又叫触点）、按钮帽和复位弹簧组成。不工作时，动、静触头是断开的。用手将按钮帽按下，动、静触头便闭合；手一松开，在复位弹簧作用下，动、静触头又断开。所以常开触头又叫动合触头。用作电动机起动的常开按钮叫起动按钮。常闭按钮则与此相反，它有一对常闭触头。按下按钮帽时，动、静触头断开；手一松则闭合，所以又叫动断按钮。用作电动机停止的常闭按钮叫停止按钮。复合按钮则是由常开按钮和常闭按钮组合而成。它有一对常开触头和一对常闭触头。按下按钮帽时，常闭触头先断开，随之常开触头再闭合；手松开，各触头恢复原先状态，即常开触头先断开，然后常闭触头闭合。常见的有 LA2、LA10、LA18、LA19、LA20、LA25 等系列。复合按钮既可用作起动按钮，又可用作停止按钮。

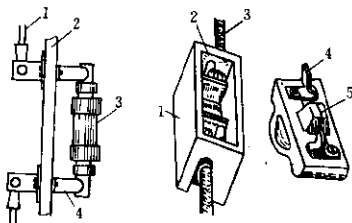
180. 什么是熔断器？ 熔断器俗称保险丝，是常见的一种保护电器。其作用是当电路发生短路或严重过载故障时，能迅速切断电源，以保安全。它的型式多样，有管式、插入式、螺旋式等。熔断器的主要部件是熔体（熔片或熔丝），由电阻率较高，易熔的铅锡合金制成。熔体的熔断电流大小与线径有关。熔体的选用，一般应根据电路的工作情况而定。在照明、电热等电路中，熔体的额定电流应等于或稍大于负载电流。在电动机电路中，为了防止电动机启动时将熔体熔断，在不经常启动或启动时间不长的场合，熔体的额定电流约为电动机额定电流的 1.5~2.5 倍；在某些重负载启动线路中，可稍微取大些倍数。



按钮外形和结构



按钮图形符号
按钮文字符号: SB

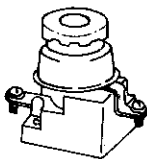


①管式熔断器

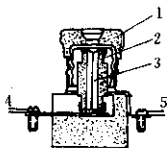
- 1—导线 2—绝缘底板
3—装有铜片的绝缘套管
4—弹性铜片

②插入式熔断器

- 1—瓷盒 2—弹性铜片
3—导线 4—铜片 5—熔丝



熔断器的外形



③螺旋式熔断器

- 1—瓷帽 2—熔断体
3—熔丝 4—进线 5—出线

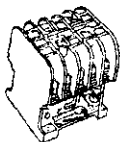
几种常见熔断器外形和结构



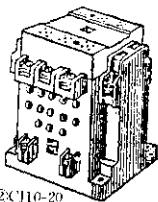
熔断器图形符号
熔断器文字符号: FU

181. 交流接触器的结构和工作原理是怎样的？ 接触器主要用来控制主电路中触头的动作，实现接通或断开主电路的任务。本书只介绍交流接触器。它主要由电磁铁（包括铁心及吸引线圈）、触头、复位弹簧及灭弧罩等组成。铁心分动铁心和静铁心。吸引线圈套装在静铁心上。有三对常开主触头，用时与负载串联，还有两对常开、两对常闭的辅助触头，用时接在控制电路中。所有动触头和动铁心机械地连接在一起。当吸引线圈有电流时，动铁心被吸向静铁心，使主触头和常开辅助触头闭合，常闭辅助触头断开。当吸引线圈断电，无电流通过时，铁心失去磁性，在复位弹簧作用下，动、静铁心分开，使已闭合的触头断开，已断开的触头闭合。常见的交流接触器为CJ10系列，它的吸引线圈的额定电压有36V、110V、220V及380V四种，主触头额定电流有5A、10A、20A、40A、60A、100A、150A七种。

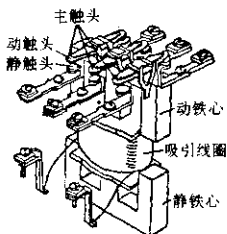
182. 热继电器的结构和工作原理是怎样的？ 当电动机发生过载故障时，电流超过额定值，如时间长或电流过大，温升将超过允许值，轻则影响电动机的寿命，严重时可能烧毁电动机绕组。因此，必须在控制系统中安装热继电器。它由发热元件、双金属片、导板及推杆等动作机构、一个常闭触头和复位按钮等组成。发热元件是用阻值不大的电阻片或电阻丝绕在双金属片上制成，一般有二个或三个，使用时与电动机定子绕组串联。双金属片是由两种热膨胀系数不同的金属片辗压而成。当电动机过载时，发热元件的电流超过预定值（预先调整好的规定值），发热量增加，使双金属片温度升高。由于热膨胀系数不同，双金属片向热膨胀系数较小的一方弯曲，推动导板及推杆，使串联在控制电路中的常闭触头断开，迫使主电路断电。双金属片冷却后，触头才复位闭合。也可按下复位按钮使其复位。常见的热继电器有JR0、JR5、JR10、JR14、JR15、JR16等系列。



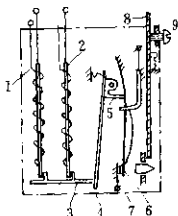
①CJ10-10



②CJ10-20



交流接触器结构主要部分



热继电器结构示意图

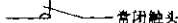
- 1-发热元件 2-双金属片 3-绝缘导板
- 4-补偿片 5-推杆 6-动触头 7-静触头
- 8 复位按钮 9-调节螺钉



吸引线圈

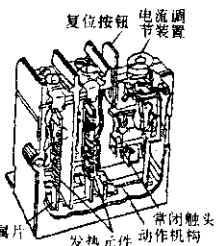
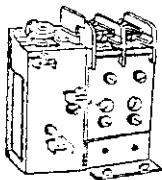


常开触头



常闭触头

交流接触器图形和文字符号



热继电器外形和结构



发热元件



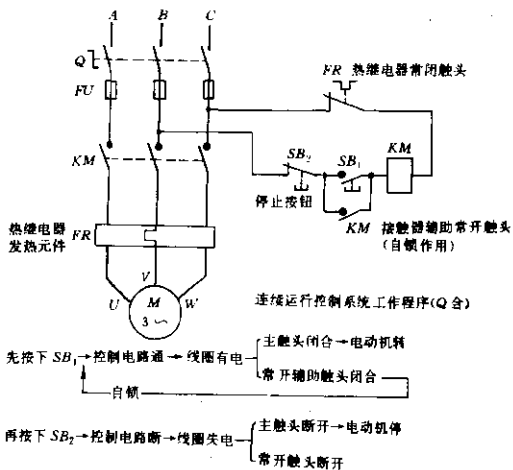
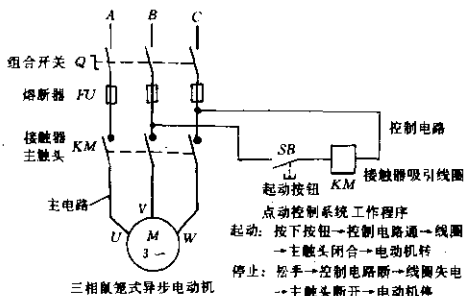
常闭触头

热继电器图形和文字符号

6-2 三相鼠笼式异步电动机的点动和连续运行的控制系统

183. 三相鼠笼式异步电动机的点动控制系统是怎样组成和工作的？ 所谓点动（俗称点车）就是不要求电动机连续运行，而是一点一点地转动。如机床刀架的调整、试车、电动葫芦的升降等，都要求进行点动控制。这种控制系统由闸刀开关、熔断器、一只接触器和一个起动按钮组成。接触器的三个主触头分别串联在三相主电路中。接触器的吸引线圈和起动按钮的常开触头串联组成控制电路，接在两根火线之间。合上电源开关后，按下起动按钮，控制电路有电，接触器的吸引线圈中有电流，铁心吸合，主触头闭合，电动机通电开始转动；手一松开，控制电路断电，吸引线圈中无电流，主触头立即断开，电动机失电停转。

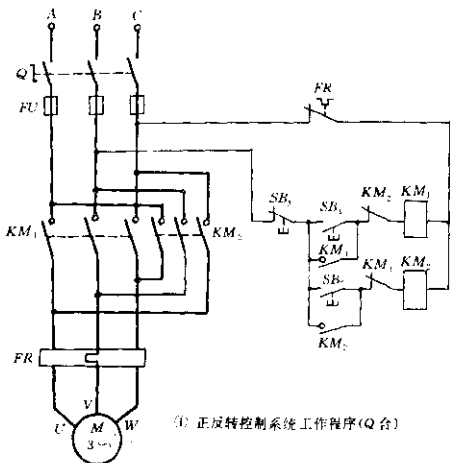
184. 三相鼠笼式异步电动机连续运行的控制系统是怎样组成和工作的？ 在点动控制系统中再增加一个停止按钮就能实现连续运行控制，主电路接线方法不变。控制电路有两处改变：一是将停止按钮的常闭触头与起动按钮的常开触头串联（吸引线圈仍串联在控制电路中）；二是将接触器的一对常开辅助触头与起动按钮的常开触头并联。当按下起动按钮时，接触器线圈通电，主触头与并联在起动按钮两端的常开辅助触头均闭合，电动机开始转动。手松开后，由于常开辅助触头已闭合，控制电路仍是通路，吸引线圈中仍有电流，接触器铁心继续吸合着，主触头仍是闭合的，所以电动机能继续运行。将接触器常开辅助触头与起动按钮常开触头并联所起的作用叫做自锁。欲使电动机停止，只须按一下停止按钮就行。因为这时控制电路断电，主触头断开，电动机因失电而停转。为了安全，通常还安装一个热继电器作过载保护。接线方法是热继电器的常闭触头接入控制电路，把发热元件串接在主电路中。



6-3 三相鼠笼式异步电动机的正反转控制系统

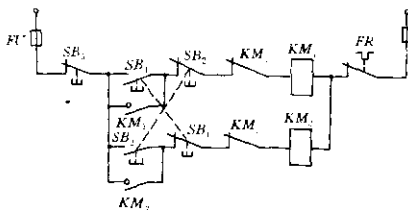
185. 三相鼠笼式异步电动机的正反转控制系统是怎样组成和工作的? 许多生产机械在运行过程中,常常要求改变运动部件的运动方向,如机床工作台的前进与后退,升降机的上升与下降等。采用电动机正反转控制系统便能满足上述要求。这种控制系统采用两条相同的连续运行控制回路。它由两个接触器、两个起动按钮、一个停止按钮、一个热继电器、闸刀开关和熔断器等组成。其中一个接触器和起动按钮,分别叫正转接触器和正转起动按钮,另一个叫反转接触器和反转起动按钮。接线方法如右图①所示。为了防止两个接触器同时动作,将正转接触器的常闭辅助触头与反转接触器的线圈串联,而反转接触器的常闭辅助触头则与正转接触器的线圈串联。当正转接触器得电工作时,它的常闭触头是断开的。因此,即使按下反转起动按钮,反转接触器线圈电路仍然不通,不可能工作,反之亦然。从而保证两个接触器不可能同时动作。按下正转起动按钮,正转接触器工作,它的主触头闭合,电动机与A-B-C相序电源连接,电动机沿某一方向旋转(叫正转);按下反转起动按钮,则反转接触器工作,相应的主触头闭合,电动机改为与C-B-A相序电源连接。相序变了,电动机反转。

186. 什么叫联锁? 利用两个接触器的两对常闭辅助触头的适当联接,使一个接触器工作时,另一个接触器不能同时工作,这种联接叫联锁或互锁(又叫电气联锁),有相互制约之意。另有一种机械联锁,它是利用复合按钮的机械动作进行互相制约的。即用两个复合按钮分别代替正、反转起动按钮。将正转起动复合按钮的常闭触头与反转接触器线圈串联,反转起动复合按钮的常闭触头与正转接触器线圈串联。按下正转起动复合按钮时,它的常闭触头先断开,使反转接触器不能工作,反之亦然。



(1) 正反转控制系统工作程序(Q合)

- | | |
|---|----------------------------------|
| 正转: 按下 $SB_1 \rightarrow KM_1$ 线圈有电 | KM_1 主触头闭合 \rightarrow 电动机正转 |
| | KM_1 常开触头闭合(自锁) |
| | KM_1 常闭触头断开(KM_2 不能得电) |
| | 电动机反转 |
| 反转: 先按下 $SB_2 \rightarrow$ 电动机停 \rightarrow 再按 $SB_2 \rightarrow KM_2$ 线圈有电 | KM_2 常开触头闭合 |
| | KM_2 常闭触头断开(KM_1 不能得电) |



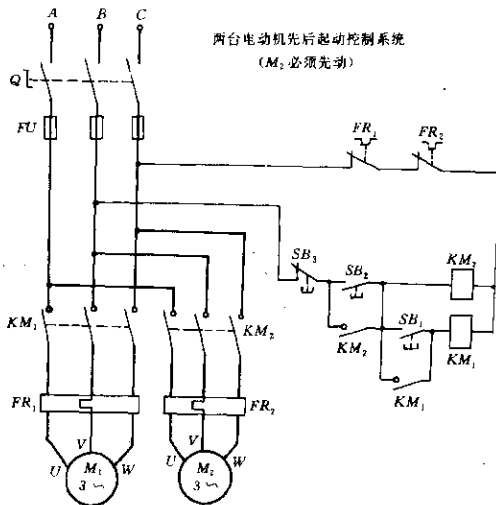
(2) 具有双重互锁(电气的和机械的)的正反转控制电路

6-4 两台三相鼠笼式异步电动机 先后起动的控制系统

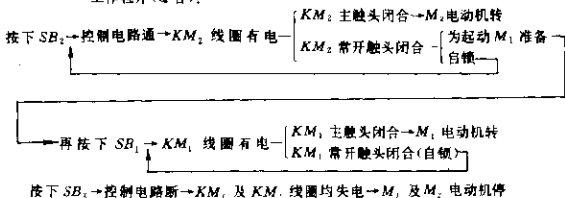
187. 先后启动是什么意思？ 备有多台电动机的生产机械在工作过程中，常常要求各电动机必须按照规定的顺序启动。例如机床的主轴电动机必须在油泵电动机启动之后才启动，以便进刀时能可靠地进行冷却和润滑。

188. 两台三相鼠笼式异步电动机先后启动，控制系统是怎样组成和工作的？ 每台电动机的运行分别由各自的连续运行控制系统进行控制。为了实现按先后次序启动的目的，必须保证第一台电动机启动后，第二台电动机的控制电路才能接通电源。否则，即使按下第二台电动机的启动按钮，因其控制电路未接通电源，故不能将电动机启动。接线方法是将第二台电动机的控制电路（包括启动按钮、接触器线圈及常开辅助触头）与第一台电动机控制电路中的接触器线圈并联，如右图所示。注意以下两点：①用于两台电动机的过载保护的热继电器的两个常闭触头是互相串联的，接入第一台电动机控制电路中，任一台电动机发生过载故障时，两台电动机同时停车。②只需用一只停止按钮。两台电动机先后启动的控制电路有多种，前面介绍的是其中之一。

两台电动机先后启动控制系统
(M_2 必须先动)



工作程序(Q合):



6-5 阅读三相异步电动机继电器—接触器控制系统原理图的方法

189. 什么叫继电器—接触器控制系统? 由继电器、接触器等低压电器组成的控制系统叫做继电器—接触器控制系统,又叫有触点控制系统。这种控制系统的优点是结构简单,维修方便,价格较低,原理容易掌握。主要缺点是触头容易损坏,容易出故障,产生火花干扰周围电子设备。目前已广泛采用数字控制系统、计算机控制系统来实现要求更高的自动控制。

190. 如何阅读三相异步电动机继电器—接触器控制系统原理图? 阅读电气原理图时应遵守下列原则:

①必须首先了解生产工艺过程及对电动机提出的要求,例如是否需要正、反转,有无延时控制要求等。

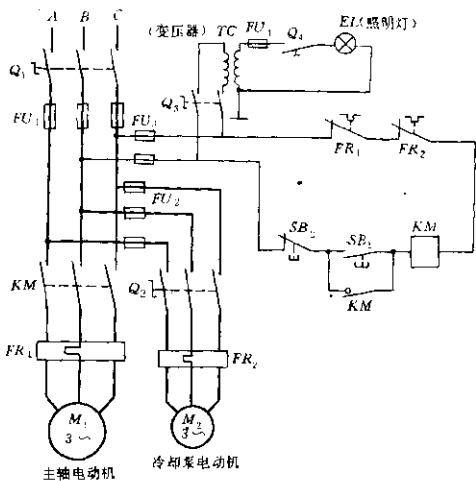
②了解系统中采用了哪些电器元件及其作用。

③先阅读主电路:主电路通常用粗线条画在原理图的左边。阅读时应了解主电路由哪些电动机和电器组成,采用了哪些保护电器,各电器如何动作以实现生产工艺要求。

④阅读控制电路:控制电路通常用细线条画在原理图的右边。它是根据生产工艺对电器动作的先后次序提出的要求,从上到下,从左到右绘制而成。因此,阅读时也应从上到下,从左到右依次了解各电器的作用和动作条件,重要的是应了解每个电器通电后,相应的哪些触头应动作及其作用。

⑤最后阅读照明、信号指示、检测等电路。这些电路也用细线条画出。

⑥在原理图上,同一个电器都是用同一个文字符号表示,但其元件可能画在不同的电路中,例如接触器的吸引线圈画在控制电路中,而其主触头却画在主电路中,阅读前应查找清楚。



C620-1型普通车床电气控制系统

读图：

- (1) 系统组成：左边两组粗线条为 M_1 及 M_2 主电路，另有控制电路及照明电路
- (2) 主电路分析： M_1 主电路由接触器 KM 控制， M_2 容量小，用组合开关 Q_2 控制，较为节省且方便
- (3) 控制电路：有接触器线圈 KM ，起动按钮 SB_1 ，停止按钮 SB_2 ，常开触头 KM 作自锁用，此外还有两个热继电器的常闭触头 FR_1 及 FR_2
- (4) 保护装置：各部分电路都有短路保护，两台电动机均有过载保护
- (5) 照明电路：照明灯由照明变压器供电
- (6) 工作程序：

闭合 Q_1 →	{	Q_3 合 → Q_1 合 → 照明灯亮
		Q_2 合 → M_2 转

 按下 SB_1 → KM 线圈有电 → KM 主触头闭合 → M_1 电动机转 (同时自锁)

停车：先按 SB_2 → M_1 停 → 断开 Q_1 → M_2 停

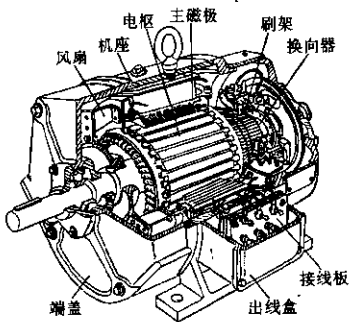
第七章 直流电动机

7-1 直流电动机的基本结构

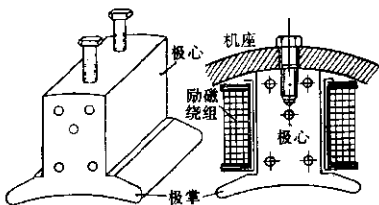
191. 直流电动机主要使用在哪些场合？ 直流电动机是将直流电能转换为机械能。它广泛应用于需要较大起动转矩的生产机械（如起重机械、电车、电气机车等），或者要求调速范围广、调速平滑的生产机械（如龙门刨床、轧钢机等）；家用电器诸如录音机、录像机、小型干洗器、电动剃须器等，也采用直流电动机为动力源。

192. 直流电动机的定子主要由哪些部件组成？ 主要由磁极、机座和端盖组成。磁极是用来在电机中产生磁场的，它由极心、极掌和励磁绕组组成。极心上放置励磁绕组，励磁绕组通入直流电流时，便产生恒定磁场，改变电流方向便可以改变磁场的方向；极掌面呈圆弧形，它可使电机空气隙的磁场分布合适，并用来支撑励磁绕组。磁极由硅钢片叠成，固定在机座上。机座也是磁路的一部分，通常用铸钢或厚钢板制成。

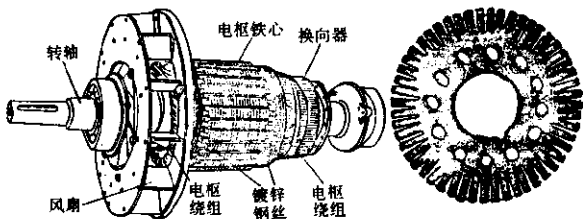
193. 直流电动机的转子（电枢）由哪些部件组成？ 它主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器和转轴等部件组成，如右图③所示。电枢铁心是电机磁路的一部分，由硅钢片叠成，呈圆柱状，在外圆上有均匀分布的槽，槽内嵌放电枢绕组。电枢绕组由许多线圈构成，它们按一定规则嵌放在电枢铁心槽内，并按一定的规则和换向器相联。换向器是直流电机中的一种特殊装置，其外形如右图③所示，它是由许多互相绝缘的铜片（换向片）组成，装在转子的一端。每一换向片又按一定的规则与电枢绕组联接，通过换向器与固定电刷滑动接触，使电枢绕组与外电路相连接。



① 撬开电机部分外壳后，所看到的直流电机结构



② 直流电机的磁极由极心、极掌和励磁绕组构成



③ 直流电机的电枢主要由电枢铁心、电枢绕组和换向器，转轴等组成

7-2 直流电动机的工作原理

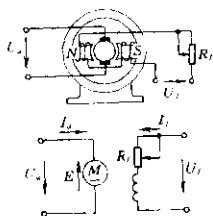
194. 直流电动机的励磁方式有哪几种？ 直流电动机的励磁方式有他励、并励、串励和复励四种，它们的接线方式如右图①~④所示。他励电动机的励磁绕组与电枢绕组分别由两个不同的直流电源供电。并励电动机的励磁绕组与电枢绕组并联由同一直流电源供电。串励电动机的励磁绕组和电枢绕组串联，接同一直流电源。复励电动机有两个励磁绕组，一个与电枢绕组串联，另一个与电枢绕组并联，然后同接于一直流电源。电枢绕组电流大，导线较粗；励磁绕组一般电流较小（与电枢绕组串联者例外），导线较细，匝数多。

此外，还有一类直流电动机的磁极由永久磁铁制成，这种直流电动机称为永磁式直流电动机。

195. 直流电动机的电磁转矩是怎样产生的？ 直流电动机的励磁方式可能不同，但工作原理相同，下面以他励直流电动机为例说明直流电动机的工作原理。如右图⑤所示，当励磁绕组和电枢绕组中都通入直流电流时，电枢中的导体在磁场中要受到电磁力的作用，力的方向可由左手定则来确定（见右图⑤），这些力作用在电枢上产生电磁转矩，使电动机转动起来。设 B 为磁感应强度， L 为导体长度（即电枢长度）， I_a 为电枢电流，则电枢绕组所受到的电磁力 $F \propto BI_a L$ 。而对于给定的电机，电磁转矩 (M) 与电磁力 (F) 成正比，每个磁极的磁通 (Φ) 与磁感应强度 (B) 成正比，而导线的有效长度 (L) 是一个不变的常数，因此电磁转矩 M 的大小可表示为

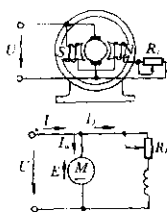
$$M = K_M \Phi I_a$$

式中， Φ 为每极磁通； I_a 为电枢电流； K_M 为转矩系数，与电枢结构有关。电磁转矩的方向由磁通 Φ 及电流 I_a 的方向决定。欲改变直流电动机的旋转方向，就要改变电枢电流或磁通的方向，通常都采用改变电枢电流方向的办法。



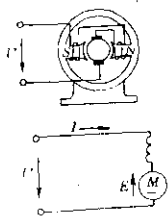
他励电动机
励磁绕组与
电枢绕组
分别由不同
的直流电
源供电

(1)



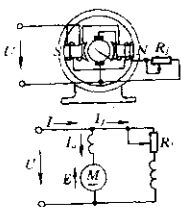
并励电动机
励磁绕组与
电枢绕组
并联,由同
一直流电
源供电

(2)



串励电动机 - 励
磁绕组与
电枢绕组
串联,由同
一直流电
源供电

(3)

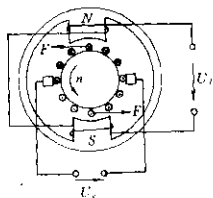


复励电动机 - 有
两个励磁
绕组分别
与电枢串
联和并联,
由同一直
流电源供
电

(4)

U 箭头表示电
位下降方向

E 箭头表示电
位上升方向



通电的电枢导体在
磁场中受到电磁力
的作用,产生电磁
转矩,使电枢转动。
电磁力 F 的方向由
左手定则决定

(5)

196. 直流电动机电枢中的感应电动势是如何产生的？ 直流电动机的电枢在电磁转矩的作用下转动后，电枢导体因切割磁力线而产生感应电动势（ E ）。根据右手定则可知，此电动势与电枢电流的方向正好相反 [参见右图①]，即感应电动势的方向与外施电压方向相反，故称为反电动势。由于该电动势（ E ）是因导体切割磁力线而产生，故可知其大小与每极磁通（ Φ ）及电机转速（ n ）成正比，即

$$E = K_E \Phi n$$

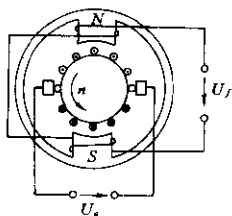
式中 K_E 为电动势系数，与电枢结构有关。

197. 他励电动机电枢电路的端电压与感应电动势的关系如何？

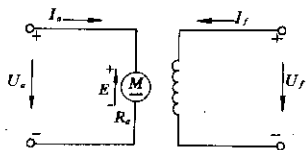
由上述可知，电枢电路的端电压与感应电动势的方向相反。根据克希荷夫电压定律，作用于电动机的端电压等于反电动势与电枢电压降之和 [右图②]，即

$$U_a = E + I_a R_a$$

该式即为他励电动机电枢电路的电压平衡方程式，式中， U_a 为电枢外施端电压（电源电压）， E 为电枢中产生的反电动势， R_a 为电枢电路总电阻。



- ① 电动机转动后, 电枢导体因切割磁力线而产生感应电动势, 其方向由右手定则确定, 与外施电压方向相反——反电动势



- ② 他励电动机电路的电压平衡方程式

$$U_a = E + I_a R_a$$

电源电压 = 反电动势 + 电枢电压降

7-3 他励直流电动机的机械特性

198. 什么是他励电动机的机械特性？直流电动机电枢转速与转矩之间的关系，即 $n=f(M)$ 曲线，称为直流电动机的机械特性。机械特性与励磁方式有关，他励直流电动机与并励直流电动机机械特性相似，故主要讨论他励直流电动机的机械特性。

199. 他励电动机的转速与哪些因素有关？根据他励电动机的反电动势公式 $E=K_E\Phi n$ 和电枢电路的电压平衡方程式 $U_a=E+I_a R_a$ ，可得他励电动机的转速为

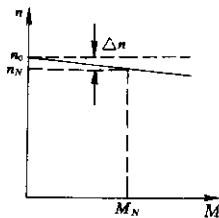
$$n = \frac{E}{K_E\Phi} = \frac{U_a}{K_E\Phi} - \frac{R_a}{K_E\Phi} I_a$$

再将电磁转矩公式 $M=K_M\Phi I_a$ 代入上式，得

$$n = \frac{U_a}{K_E\Phi} - \frac{R_a}{K_E K_M \Phi^2} M = n_0 - \Delta n$$

式中 $n_0 = \frac{U_a}{K_E\Phi}$ ，是 $M=0$ 时的转速，实际上是不存在的，因为即使电动机轴上没有加机械负载，电动机的转矩也不能为零，它还要平衡空载损耗转矩。所以，通常 n_0 称为理想空载转速，显然 n_0 与电枢端电压 (U_a) 成正比。 $\Delta n = \frac{R_a}{K_E K_M \Phi^2} M$ 是电动机有负载运行时的转速降。显然，负载增加时，负载转矩增加，与其平衡的电磁转矩也增加，转速 (n) 将下降。所以，他励直流电动机在运行时，当电枢电压 (U_a) 和励磁电压 (U_f) 为常数时，转速随负载的增加而下降。

200. 他励电动机的机械特性曲线有什么特点？他励电动机有负载运行时的转速降 $\Delta n = \frac{R_a}{K_E K_M \Phi^2} M$ ，由于电枢电阻 (R_a) 一般很小，故随着负载的增加，电动机的转速 (n) 下降不多，机械特性曲线向下倾斜不大，是一种硬特性。这是他励(并励)直流电动机的优点。



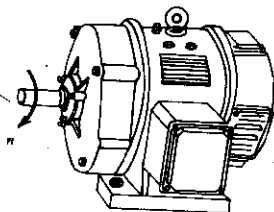
①

他励电动机的机械特性是硬特性,负载增加时,转速下降不多

负载大,电枢电
流大,转速低

转速如何随
负载变化?

负载小,电枢电
流小,转速高

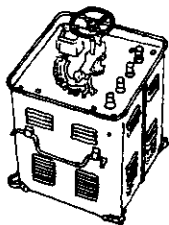
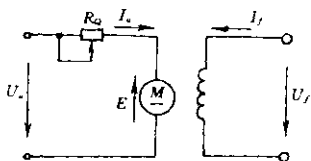


②

7-4 他励直流电动机的起动

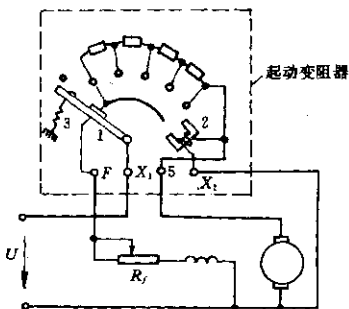
201. 为什么直流电动机不能直接起动? 直流电动机直接加额定电压起动时, 由于在起动时 $n=0$, 反电动势 $E=K_E\Phi n=0$, 故电枢电流具有最大值, 即 $I_{\omega}=\frac{U_a}{R_a}$, 称为起动电流。因电枢电阻 R_a 很小, 所以 I_{ω} 很大, 通常可达额定电流的 $10\sim 20$ 倍。这样大的起动电流会使换向器产生强烈的火花, 使换向器发热烧黑而损坏。此外, 他励电动机的电磁转矩 $M=K_M\Phi I_a$, 与电枢电流成正比, 过大的起动转矩会使电动机及其所拖动的生产机械突然遭受猛烈的机械冲击, 以至损坏传动机构 (如齿轮) 和生产机械。由此可见, 直流电动机决不允许直接起动。

202. 如何限制直流电动机的起动电流? 为了限制起动电流, 常用的方法是起动时在直流电动机电枢电路中串接起动电阻 R_Q , 为了获得较大的起动转矩而又不损伤换向器, 通常把起动电流限制为额定电流 I_{aN} 的 $1.5\sim 2.5$ 倍, 即 $I_{\omega}=\frac{U_a}{R_a+R_Q}=(1.5\sim 2.5)I_{aN}$, 据此可求出 $R_Q=\frac{U_a}{I_{\omega}}-R_a$ 。起动时, 先将起动电阻 R_Q 放在最大值处, 随着电动机转速升高, 将起动电阻逐渐消除。这种起动方法不仅适用于他励电动机, 对其它直流电动机也一样适用。



- ① 限制直流电动机起动电流的方法
——起动时,在电枢电路中串接起
动电阻 R_0

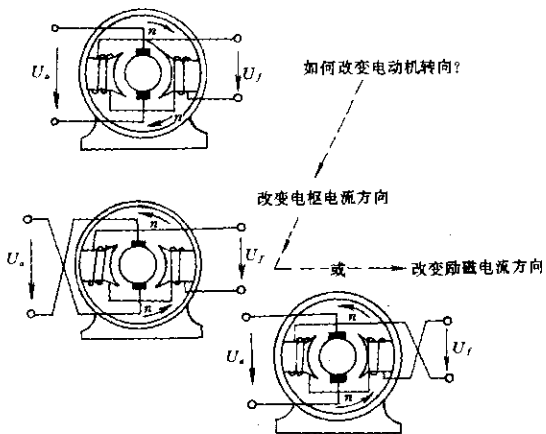
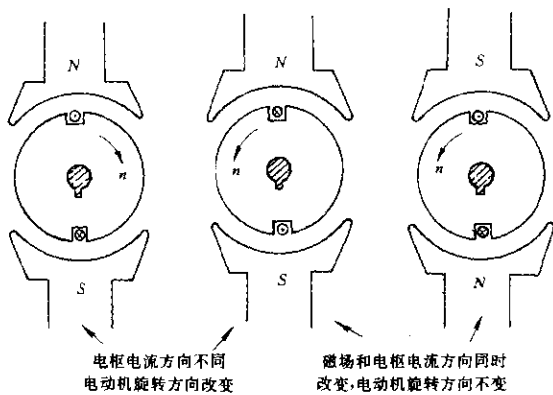
- ② 并励直流电动机
起动变阻器外形



- ③ 并励直流电动机的起动线路: 1—手柄及衔铁 2—电磁铁 3—弹簧
起动步骤: 调节 $R_f=0$ → 手柄从“0”位顺时针方向慢慢转动, 起动电阻
逐步减小(电动机转速逐渐升高) → 手柄与最后一个铜触点接触, 起动电阻
为零, 电动机在额定电压下工作 → 电磁铁吸住衔铁

7-5 他励直流电动机的反转

203. 如何实现他励直流电动机的反转？ 如果改变电枢电流的方向或励磁电流的方向，便可使直流电动机反转。但必须注意只能二者仅变其一，而不能同时改变。通常采用改变电枢电流方向的办法来实现电动机的反转。



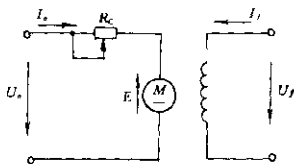
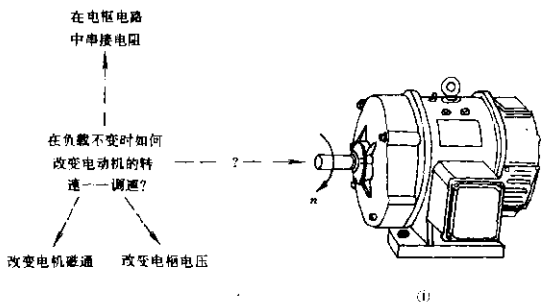
7-6 他励直流电动机的调速

204. 什么叫电动机的调速？ 所谓调速是指在电动机的机械负载不变的条件下，改变电动机的转速。电动机在负载变化时发生的转速改变不能叫做调速。

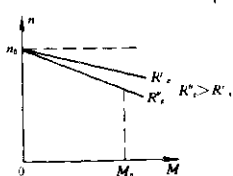
205. 他励直流电动机有哪几种调速方法？ 他励（并励）直流电动机的转速公式为 $n = \frac{U_s}{K_E \Phi} - \frac{R_a}{K_E K_M \Phi} M$ ，从该式可以看出，当转矩（ M ）不变（也就是负载不变）时，影响电动机转速的因素是电枢电路电阻（ R_a ）、电机磁通（ Φ ）和电枢端电压（ U_s ）。因此，只要改变以上三个因素中的任何一个，都能达到调速的目的，故他励（并励）直流电动机有三种调速方法：①在电枢电路中串入电阻；②改变电机磁通；③改变电机电枢的端电压。

206. 什么是电枢串接电阻调速？它有什么特点？ 调速线路如右图②所示，它是在电枢电路中串接一调速电阻（ R_c ），此时转速公式为 $n = \frac{U_s}{K_E \Phi} - \frac{R_a + R_c}{K_E K_M \Phi} M$ ，可见改变 R_c 的大小可以调节电动机转速，在负载转矩一定的情况下， R_c 越大，转速越低。

这种调速方法的特点是：①只能使电动机的转速在额定值以下作平滑调节；②采用这种调节方法时，电动机的理想空载转速不变，而转速降增大，故使电动机的机械特性变软，降低了运行的稳定性；③由于调速电阻上流过较大的电枢电流，因此能量损耗较大，不经济；④调速范围（指电动机在额定负载下可能达到的最高转速与最低转速之比）不大，一般为 1.5 : 1。这种调速的主要优点是比较简单，常用在调速范围不大的小功率直流电动机中。



② 在电动机电枢电路中串接电阻 R_c 的调速线路。注意： R_c 不能用启动电阻 R_0 代替



③ 改变电枢电阻调速的机械特性——特性较软，转速只能下调

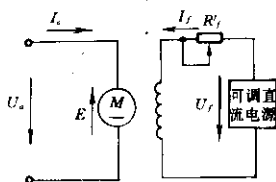
207. 什么是改变电机磁通调速？它有什么特点？ 改变电动机磁通的调速线路如右图①所示，它通过改变励磁电压 (U_f) (需一台可调节的专用直流电源) 或改变励磁电路中的电阻 (R'_{f}) 来调节励磁电流，达到改变磁通 (Φ) 的目的。由转速公式 $n = \frac{U_a - I_a R_a}{K_E \Phi}$ 可知，在电枢电压 (U_a) 和负载 (即 I_a) 不变时，改变磁通 (Φ)，电动机的转速将发生变化，磁通 (Φ) 越小，转速就越高。

这种调速方法的特点是：①由于电动机在额定状态下运行时，其磁路已接近饱和，故通常只能减小磁通，即只能使电动机的转速在额定值以上作平滑无级调节；②调速后的机械特性仍较硬，因此电动机运行的稳定性较好；③由于励磁电流较小，故调速电阻上的功率损耗小，比较经济，控制也方便。

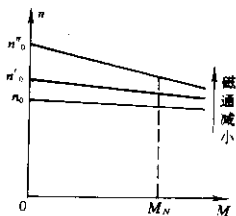
由于这种方法只能使电动机转速升高，而电机的最大转速受到电机机械强度和换向的限制，故调速范围也有限。

208. 什么是改变电枢电压调速？它有什么特点？ 右图③是改变电枢电压调速的线路图。此种调速方法必须有一套可调节输出电压的直流电源。由转速公式 $n = \frac{U_a}{K_E \Phi} - \frac{R_a}{K_E K_M \Phi^2} M$ 可知，在励磁电流 (I_f) 为额定值和负载不变时，降低电枢电压 (U_a)，电动机的理想空载转速将降低，但转速降不变，所以改变电枢电压调速，得到的机械特性曲线是一组平行线，如右图④所示，且 U_a 愈低，则 n 愈低。

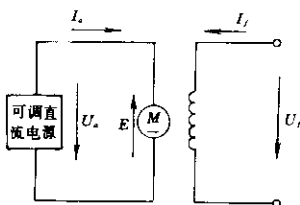
这种调速方法的特点是：①为了使电动机的绝缘不受损害，通常只能降低电压，即只能使电动机的转速在额定值以下作平滑无级调速；②调速后电动机的机械特性硬度不变，稳定性较好；③调速幅度较大，可达 6~10 倍；④控制灵活方便。



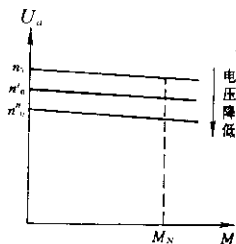
① 改变电机磁通的
调速线路——
调 U_f 或调 R_f



② 改变电机磁通调速的
机械特性——特性较
硬, 转速只能上调



③ 改变电枢电压
的调速线路



④ 改变电枢电压调速的
机械特性——特性较
硬, 转速只能下调

第八章 电工测量

8-1 电工仪表的种类

209. 电工仪表有哪几种？ 电工仪表分两大类：①直读式仪表——直接用仪表指针在标尺上指示被测量的数值。②数字式仪表——将被测的模拟量转换成数字量直接显示出来。

210. 仪表误差有几种？ 仪表误差分两种：①基本误差——指仪表在正常工作条件下，由制造工艺等因素造成的误差，如标尺不精确，轴承摩擦等。②附加误差——仪表偏离正常条件产生的误差。

211. 仪表误差表示的方法有几种？ 仪表误差表示方法有三种：①绝对误差 (ΔA) ——仪表的读数 (A_X) 与被测量的实际值 (A_0) (用标准表测量的读数) 之差即 $\Delta A = A_X - A_0$ 。②相对误差 (γ) ——绝对误差与实际值之比的百分数，即 $\gamma = \Delta A / A_0 \times 100\%$ (或近似地认为 $\gamma = \Delta A / A_X \times 100\%$)。③引用误差 (γ_m) ——绝对误差与仪表量程 (标尺的满标值) A_m 之比的百分数即 $\gamma_m = \Delta A / A_m \times 100\%$ 。

212. 常用电工直读式仪表有哪几种？ ①按结构与工作原理不同分为磁电系、电磁系、电动系等。②按用途不同分为工程用和实验室用。③按电流种类不同分为直流、交流、交直流两用三种。④按被测量不同分为电压表、电流表、频率表、功率表、电度表等。⑤按仪表准确度不同分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级。

213. 用什么表示仪表的准确度？ 仪表的准确度用仪表的最大引用误差表示，即 $\pm K\% = \Delta A_m / A_m \times 100\%$ (K 是仪表准确度等级值， ΔA_m 是最大绝对误差)。以上所说的误差均指基本误差而言。

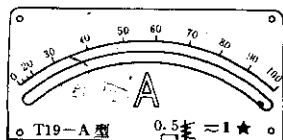
常用电工仪表标准等级

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差%	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

常用电工仪表符号


表盘符号	说明	表盘符号	说明
	磁电系仪表	$\angle 60^\circ$	倾斜 60° 放置
	电磁系仪表	☆	绝缘强度试验, 电压为 500V
	电动系仪表	☆	绝缘强度试验, 电压为 2kV
	整流式仪表	Ⓐ	安培表(电流表)
	直流	mA	毫安表
~	交流(单相)	μA	微安表
⌈	交直流两用	V	电压表
3~	三相交流	mV	毫伏表
1.5	以标尺量程百分数表示准确度(例如 1.5 级)	kV	千伏表
$\sqrt{\cdot}$	以标尺长度百分数表示准确度(例如 1.5 级)	W	瓦特表(功率表)
Ⓢ	以指示值的百分数表示准确度(例如 1.5 级)	kW	千瓦表
⌊ (↑)	垂直放置	kWh	电度表
⌊ (→)	水平放置	MΩ	兆欧表

电流表表盘标记



A: 100A 电流表

0.5: 0.5 级

: 电磁系

⌈: 交直流两用

⌊: 水平放置

I: 防御外磁场能力为 I 级

☆: 试验电压为 500V

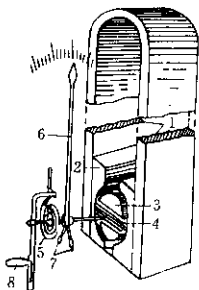
8-2 磁电系、电磁系、电动系仪表

214. 磁电系仪表的结构和工作原理是怎样的？磁电系仪表的结构如右图①所示。它是利用通有电流的线圈在永久磁铁产生的磁场中受力而转动的原理制成的。永久磁铁和圆柱形铁心为固定部分，形成磁路。圆柱形铁心作用有二①减小磁阻，增大磁通；②在气隙中形成均匀辐射磁场。可动部分有线圈、螺旋游丝、指针等。线圈用细导线绕在一个铝框上，通电流后，因在磁场中受力产生作用力矩而转动。铝框作用有二：①支撑线圈；②产生阻尼力矩，使可动部分能较快地停止在平衡位置。两个游丝分别与线圈两端连接，它的作用，一是在扭转时产生阻止线圈转动的反抗力矩；一是引导电流通过线圈。当电流通过线圈时，在作用力矩作用下，线圈开始转动，游丝被扭转产生反抗力矩。当作用力矩与反抗力矩相等时，指针便停止在平衡位置。理论分析证明，指针偏转角 α 与通过线圈的电流 I 成正比即 $\alpha=kI$ 。

线圈和指针的偏转方向与通入线圈的电流方向有关。改变电流方向，指针的偏转方向也随之改变。当线圈中通入交流时，线圈势必跟着迅速改变转动方向。但由于转动部分有惯性，来不及跟随电流变化而变化，实际上，只能在零点位置微微抖动或不动。因此，磁电系仪表不能直接用来测量交流电流，只能测直流电流。应注意接线钮旁的“+”号表示电流流入的端钮。

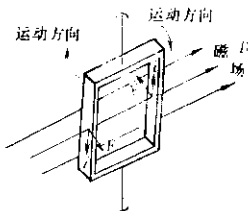
由于磁电系仪表指针偏转角与线圈电流成正比，所以刻度是均匀的。由于磁场由磁铁产生，故灵敏度高，准确度也高。附加整流装置便可测量交流电。如附加其它变换器，则可用于测量多种非电量如温度、压力等，所以这种仪表应用十分广泛。它的缺点是结构复杂，价格较贵。由于游丝和线圈只能承受很小的电流（一般约几十微安至十几毫安），所以过载能力较低。

磁电系仪表

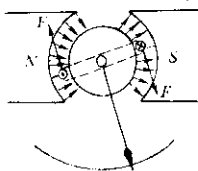


① 磁电系仪表的结构:

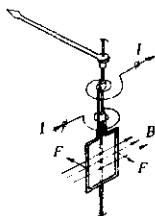
- 1-蹄形磁铁 2-极掌 3-圆柱形铁心
 4-线圈 5-螺旋游丝 6-指针
 7-平衡锤 8-调零器



铝框起阻尼作用,铝框随线圈在磁场中运动时,产生感应电流 I ,此电流受磁场作用产生阻尼力矩,与运动方向相反,使可动部分迅速停止在平衡位置



通电流的线圈在磁场中受力,产生作用力矩



电流途径示意图

215. 电磁系仪表的结构和工作原理是怎样的？ 电磁系仪表是钢片被线圈电流产生的磁场磁化后，根据磁性的同性相斥，异性相吸的原理制成的。它有两种结构形式：推斥型和吸引型。

推斥型如右图①所示。圆形线圈是固定的。两块钢片中，一片固定在线圈内壁上，另一片则装在转轴上。还有游丝和指针等。其工作原理是：电流通过线圈产生磁场，使钢片磁化。被磁化了的钢片对应两端的极性相同，由同性相斥产生的作用力矩使可动部分偏转。游丝只用来产生反抗力矩。当作用力矩和反抗力矩相等时，指针便偏转一个角度。理论分析证明，指针偏转角 α 与线圈中电流 I 的平方成正比，即

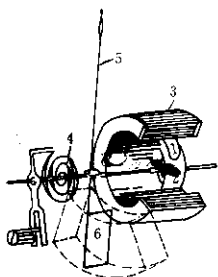
$$\alpha = kI^2$$

电流方向改变时，指针偏转方向不变，所以这种仪表既可以测量直流电流，也可测量交流电流。测交流时，电流 (I) 是交流电流的有效值。

吸引型如右图②所示。它与推斥型结构不同之处是，线圈做成扁平形状，且中间有条窄缝。只有一块钢片偏心地安装在转轴上。电流通过线圈时产生磁场，使钢片磁化。被磁化了的钢片则被线圈磁场吸引，从而产生作用力矩使指针偏转。游丝也是用来产生反抗力矩的。两个力矩平衡时，指针偏转角也是与电流平方成正比。

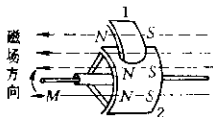
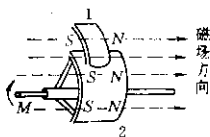
这种仪表最大优点是能测直流和交流，结构简单，价格便宜，所以应用也很广泛。钢片采用坡莫合金材料时，能获得较高的准确度。由于电流不通过游丝，而线圈可以用粗导线绕制，允许通过较大的电流，所以过载能力较大。它的缺点是，由于磁场较弱，故灵敏度低，本身消耗的功率较大。其次，由于 α 与 I^2 成正比，所以刻度不均匀。

电磁系仪表



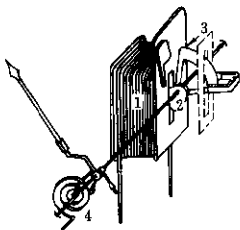
排斥型结构

1—固定钢片 2—动钢片
3—线圈 4—游丝 5—指针 6—阻尼片



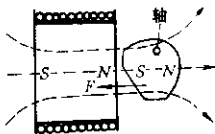
排斥型原理：同性相斥，磁场方向改变，力矩 M 方向不变

①排斥型



吸引型结构

1—线圈 2—钢片
3—阻尼片 4—游丝



吸引型原理示意图

②吸引型

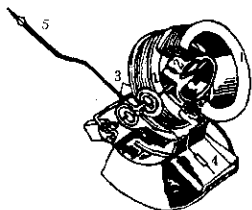
216. 电动系仪表的结构和工作原理是怎样的？ 电动系仪表的工作原理与磁电系仪表工作原理相似，但结构有所不同。其主要区别就是电动系仪表的磁场不是用永久磁铁产生，而是由通过固定线圈的电流产生。它的结构如右图①所示。固定线圈有两个，根据需要可以串联，也可以并联。可动部分跟磁电系仪表基本相同。这种仪表的工作原理可用右图②来说明。当固定线圈和可动线圈都有电流通过时，可动线圈受力产生作用力矩，游丝产生反抗力矩与之平衡，使指针发生一个偏转。从右图②可以看出，当固定线圈和可动线圈中电流同时改变方向时，作用力矩方向不变，所以可以测交流电流。理论分析证明，指针偏转角 (α) 与两线圈中电流 (I_1 、 I_2) 的关系如下：在直流电路中， $\alpha = kI_1I_2$ ；在交流电路中， $\alpha = kI_1I_2\cos\varphi$ 。交流时， I_1 、 I_2 为有效值， φ 为两电流间的相位差。

电动系仪表主要用途之一是做成功率表，用来测量交流电路中的平均功率或直流功率。测量时，固定线圈与负载串联，可动线圈串联一个大电阻 (R_d) 之后，再与负载并联，如右图③所示。设负载电流为 I ，电压为 U ，因为 $I_1 = I$ ， $I_2 = \frac{U}{R_d}$ ， φ 是负载端电压与电流的相位差，所以
$$\alpha = kI_1I_2\cos\varphi = kI \cdot \frac{U}{R_d}\cos\varphi = k' UI\cos\varphi = k' P$$

使用时应注意：①接线柱旁有“*”号的两端叫极性端，测量时应接在一起。否则指针反转。②外壳上有两组接线柱，细的叫电压端钮，粗的叫电流端钮，不能接错，否则将造成短路！③功率表标尺上只有分格，没有功率数值，被测功率要通过计算才知道。方法如下：设 α 为读数，单位为格，则被测功率为 $P = c\alpha$ 。其中 c 叫功率表的功率常数，它的单位是瓦/格，根据测量时选用的电压量程 (U_N) 和电流量程 (I_N) 决定，即

$$c = \frac{U_N I_N}{\alpha_m}, \quad (\alpha_m \text{ 为标尺上最大格数})。$$

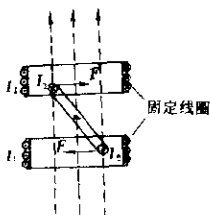
电动系仪表



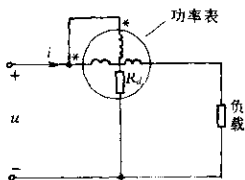
① 电动系仪表结构

- 1- 固定线圈 2- 可动线圈 3- 游丝
4- 阻尼片 5- 指针

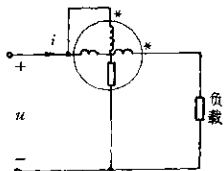
由电流 I_2 产生的磁场



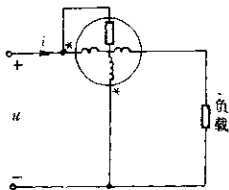
② 产生作用力矩的原理



③ 接线正确

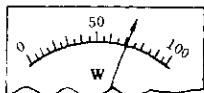


接线不正确(指针反转)



接线不正确(指针反转)

功率表标尺



$U_N = 250\text{V}$ $I_N = 0.5\text{A}$

$a_m = 100$ 格 读数 = 70 格

$$\text{测量值} = \frac{U_N I_N}{a_m} \times \text{读数} = \frac{250 \times 0.5}{100} \times 70 = 87.5\text{W}$$

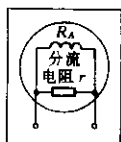
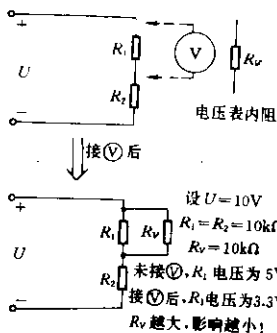
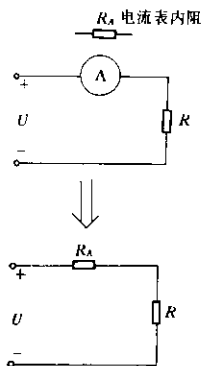
8-3 电流表和电压表

217. 电流表是怎样做成的？ 磁电系、电磁系和电动系仪表的指针偏转角大小都由线圈中电流大小决定，所以都可做成电流表。磁电系仪表的游丝和线圈只允许通过很小的电流，欲做成能测较大电流的安培表，必须安装“分流电阻”（分流器），如右图①所示。分流电阻的阻值很小，并联在线圈（包括游丝）两端，使大部分电流从分流电阻流过。电磁系仪表要测大电流时，因线圈有电感，故不能采用分流电阻，而是将线圈分为几段。测小电流时，几段线圈串联；测较大电流时，几段线圈并联。或者直接用粗导线绕制线圈，匝数少，可以直接测较大电流。电动系仪表和电磁系仪表相似，采用将固定线圈分段的办法来扩大量程。

218. 电压表是怎样做成的？ 仪表线圈电阻都较小，特别是磁电系和电动系仪表可动线圈只允许通过很小的电流，所以线圈两端能承受的电压也较小，通常只有几十毫伏。欲做成能测几伏以上的电压表，就必须用一个较大的电阻（叫附加电阻）与线圈串联。线圈与附加电阻串联可达到扩大电压表量程的目的。

219. 使用电压表与电流表应注意什么？ ①电压表与被测电路两端并联；电流表则应串联接入被测电路。②使用磁电系仪表时“+”“-”端不能接错，“+”端是电流流入的一端。③选择仪表时，电压表内阻越大越好；电流表内阻越小越好。④有些电压表表盘上注有每伏多少欧字样，例如 $1000\Omega/V$ ，它说明允许通过仪表的电流值及仪表内阻大小。标有上述数字的电压表，如量程为 $30V$ ，则允许通过的电流为 $I = \frac{1V}{1000\Omega} = 1mA$ ，内阻为 $30 \times 10^3 = 30k\Omega$ 。

220. 如何用电压表和电流表测量电阻？ 分别测出电阻两端电压 (U) 和通过电流 (I)，由式 $R=U/I$ ，便可计算出被测电阻大小。应根据被测电阻和仪表内阻大小，选择合理的测量线路（右图③）。

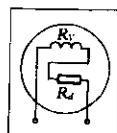


R_A —表头内阻

①

磁电系电流表并联分流电阻后, 可以扩大量程 n 倍

$$r = \frac{1}{n-1} R_A$$

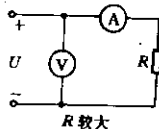
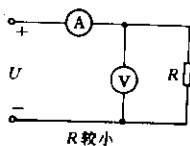


R_v —附加电阻
 R_V —表头内阻

②

电压表串联电阻后, 可以扩大量程 n 倍

$$R_v = (n-1) R_V$$



③ 用(V)及(A)测电阻线路

8-4 万用表

221. 万用表有什么用途？ 万用表又叫繁用表。一般可用来测量直流、交流电压，直流电流，电阻及音频电平等。有的还可以测量交流电流、电容、电感及晶体管 β 值等。

222. 万用表的结构是怎样的？ 主要由一个 μA 级的磁电系仪表表头、不同的测量线路和转换开关组成。测量电压、电流的线路和原理与一般电压表、电流表相同。

223. 万用表测量电阻的原理是怎样的？ 右图中有测量电阻的原理电路。图中“+”、“-”是两支表棒的插孔，接被测电阻 (R_x)。未接电阻时，电源电路和表头均无电流通过，指针停止在左端不动，表示 $R_x = \infty$ ；如果将两表棒短接，被测电阻为零，这时通过表头的电流最大，指针将偏转到最右端停止，表示 $R_x = 0$ 。接入数值不同的电阻，则指针偏转角大小不一样。根据指针偏转的大小便可决定被测电阻的数值。测电阻时所用的标尺的刻度和普通电压表、电流表的刻度不一样。普通仪表左端为零点，而万用表的零点 ($R_x = 0$) 在最右端。指针偏转角越小，被测电阻值越大。

224. 怎样使用万用表？ 使用方法如下：①仪表应水平放置。先观察指针是否指零（电压零点），如不在该处，则用机械零位调节器将指针调至零位。②测电压、电流时，应将转换开关旋至 V 或 V 或 mA 范围内的适当量程档，按电压表、电流表使用方法进行测量。测直流电压、电流时，必须注意“+”、“-”极性。③测电阻时，转换开关应指向“ Ω ”档。先将表棒短接，指针应指向满刻度 ($R_x = 0$ 处)。如指针不在 $R_x = 0$ 的位置，则调节零欧姆调节器使之指零，然后进行测量。测量结果应该是标尺上的读数乘以转换开关所指倍率。

225. 使用万用表应注意什么？ 应注意以下几点：

①测量前应选好量程。如事先不知道被测量的大小，则应由大而小逐级选择量程，直至合适为止。

②不允许在带电情况下转动转换开关。

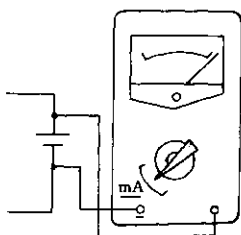
③测量电阻时，必须在被测电阻不带电情况下进行测量。当调零旋钮不能使指针调到零 ($R_x=0$) 位时，应更换干电池。

④测量高电压时，最好用单手操作，即先将一根表棒固定，再用单手操作另一根表棒。如果允许断电，则先断电，待将两根表棒固定后再测量。

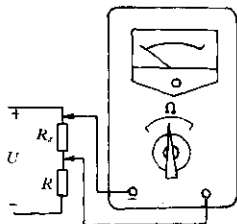
⑤万用表表盘上有数条刻度线，因此，读数前，应仔细看清楚相应的刻度。

⑥测量完毕，最好将转换开关旋至电压最高档，防止下次使用时发生事故。

不遵守测量规则, 将烧毁万用表!

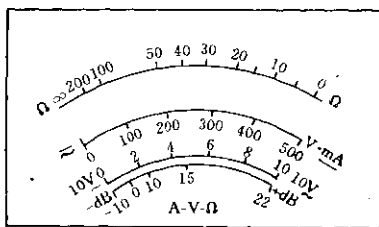


防止误用 mA 档测电压



不允许在带电情况下测电阻

万用表表盘上的刻度线



最上面的一条刻度线是电阻刻度, 测量值 = 刻度值 × 倍率 (如 × 100)

第二条刻度线是直流电压、电流及交流电压刻度, 测量值 = 刻度值 × $\frac{\text{选用的量程}}{500}$

例如: 选直流电压 100 量程, 指针指示刻度值为 300, 则测量值 = $300 \times \frac{100}{500} = 60\text{V}$

第三条刻度线是 10V 以下交流电压专用刻度

最下面的一条刻度线是电平刻度, 单位为分贝 (dB)

8-5 兆欧表

226. 兆欧表有什么用途？ 兆欧表俗称摇表，用于测量电气设备的绝缘电阻，从而判断电气设备绝缘状况完好程度。

227. 兆欧表的工作原理是怎样的？ 右图①是兆欧表的外形。因绝缘电阻阻值较大，故兆欧表内部备有一台手摇直流发电机，电压分 500V 和 1000V 两种规格。兆欧表的测量机构和磁电系仪表相似，磁场也是由永久磁铁产生，但可动部分有两个线圈，无游丝。指针偏转角大小由两线圈中电流的比值决定，因而可以避免电源电压波动对测量的影响。测量线路如右图②所示。由图看出，和绝缘电阻串联的线圈中电流与被测绝缘电阻 R_x 大小有关，而另一线圈中的电流是固定的。因此，指针偏转角大小由绝缘电阻大小决定。

228. 测量时如何接线？ 兆欧表外壳上有三个接线端钮，分别标有“L”、“E”（接地端钮）、“G”（屏蔽端钮）字样。测量一般绝缘电阻时，只须将被测电阻接在 L 与 E 两端即可。如果被测绝缘电阻有一端接地，则这一端应接在 E 端钮上。测量电缆的绝缘电阻时，为了消除线芯绝缘层表面漏电所引起的误差，还必须将电缆线芯与壳之间的内层绝缘物用导线接至 G 端钮上（右图③）。

229. 使用兆欧表应注意什么？ 应注意以下几点：

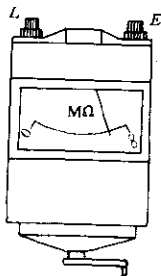
①测量之前，先检查一下仪表是否完好。方法是不接电阻先摇动几下，指针应指在“∞”处；再将 L 与 E 两端短接，慢慢摇动，指针应指零。兆欧表不测量时，指针无固定位置。

②用手摇动发电机时，转速应保持约 120r/min，摇动要均匀。

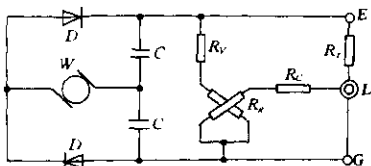
③测量电气设备的绝缘电阻时，必须先切断设备的电源。遇到带电容性质的设备（如电缆），应先将线路放电。

④最好连续摇动一分钟后在读数。

⑤测量时应将兆欧表平放。



① ZC25 型兆欧表外型

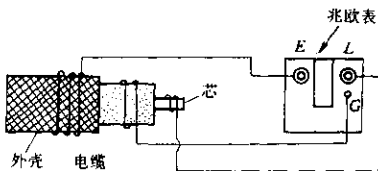


② 兆欧表原理线路

W—手摇直流发电机 R_x —线圈电阻

E—接地端钮 L—线路端钮

G—屏蔽端钮 R_x —被测绝缘电阻



③ 电缆绝缘的测量方法

8-6 电 度 表

230. 电度表有什么用途? 电度表俗称火表,是用来测量电能的。电能的单位是瓦·秒($W \cdot s$),通常用千瓦·小时($kW \cdot h$)表示。平常说1°度,就等于 $1kW \cdot h$ 。

231. 电度表的结构和工作原理是怎样的? 电度表分单相电度表 and 三相电度表两种。本书只介绍单相电度表,它的外形如右图①所示。它的结构主要有测量机构和积算机构(即计算器)。右图②就是电度表的积算机构。数码滚轮上面的数字表示测量结果,单位为千瓦·小时($kW \cdot h$)。测量机构(右图③)主要由固定的电压元件(线圈)、电流元件(线圈)、一个可以绕轴旋转的铝质圆盘以及传动机构等组成。线圈电流产生的磁通穿过铝盘,并在盘中产生感应电流。此电流与磁场的相互作用产生使铝盘旋转的力矩。同时,铝盘通过永久磁铁空隙时,会产生制动力矩。当两个力矩达到平衡时,铝盘就以稳定的速度旋转。可以证明,铝盘的稳定转速(n)(r/min 或 r/h)与被测电路的平均功率(P)成正比,即 $n=KP$ 。因此,铝盘在单位时间内(如每小时)的转数(N)就代表被测电能的数值 W ,即

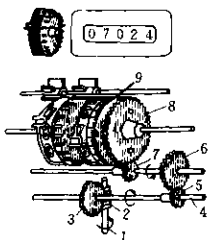
$$N=CW$$

铝盘的转轴经过传动机构与积算机构衔接。当铝盘旋转了一定数目的圈数后,数码滚轮按比例转动一个位置,显示一个数值,例如每千瓦小时(即一度电)铝盘旋转600圈。也就是说,铝盘旋转600圈,数码滚轮的个位数加1,表示用了一度电的意思。电度表的结构和工作原理较为复杂,有兴趣的读者可参阅有关电工仪表方面的书籍。

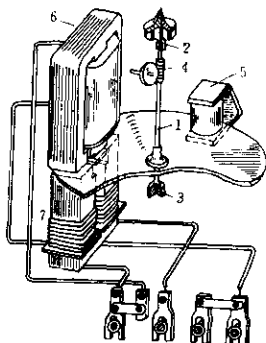
232. 使用电度表应如何接线? 电度表的接线方法与功率表基本相同。具体接线方法如右图④所示。



① 单相电度表外形



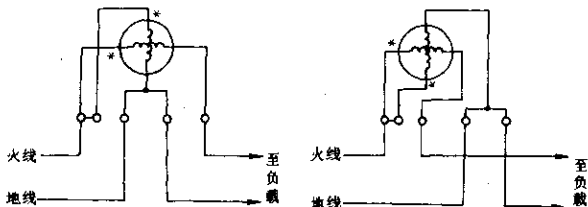
② 电度表的轮式积算机构



③ 单相电度表结构示意图

- 1—转轴 2—上轴承 3—下轴承 4—蜗轮
5—产生制动力矩的永久磁铁
6—电压元件 7—电流元件

- 1—铝盘转轴 2—蜗轮 3—齿轮
4—轴 5、6、7、8—小齿轮 9—滚轮



④ 单相电度表接线方法

第九章 安全用电

9-1 触电与急救

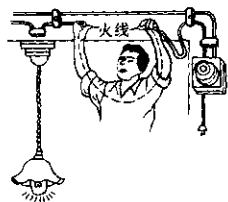
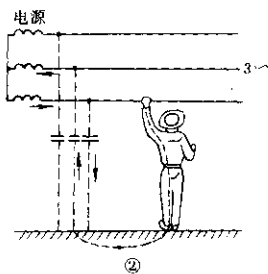
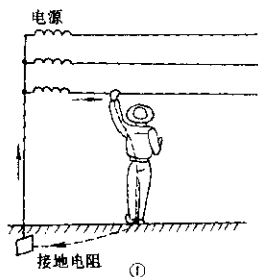
233. 什么叫触电？ 人体因触及带电体，受到电压的作用，造成局部受伤，甚至死亡的现象，叫做触电。

234. 什么是安全电压？ 通过人体 50Hz 的电流超过 50mA 时，将严重损伤心脏和神经系统，危及生命安全。当人体接触 36V 以下电压时，通过人体的电流一般不超过 50mA ，比较安全。因此，规定 36V 为安全电压。但在潮湿场所或在金属构架上工作，安全电压等级还要降低，通常采用 12V 或 24V 。

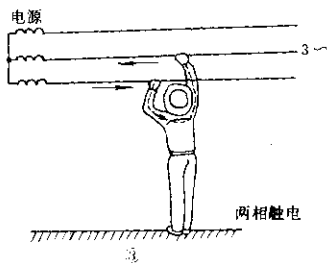
235. 触电有哪些类型？ ①单相触电。电流通过人体、大地、接地电阻再回到电源。这时人体将受到相电压的作用，电流大大超过 50mA ，这是很危险的。②电源中点不接地的单相触电，这时电流通过人体、大地，输电线与大地之间形成的电容和绝缘电阻再回到电源，也很危险。③两相触电。因为两手触及两根火线，电压为线电压，且电流通过心脏，这是最危险的一种触电形式。

236. 发生触电事故，采取什么急救措施？ 首先应切断电源，隔断触电者与电源的联系。如无法断开电源，则尽快用干燥木棒或带有绝缘手柄的工具，将电线拨开。切勿用手直接接触触电者，以防自己触电。其次，如触电者脱离电源后，已失去知觉，则应抬其到空气畅通的地方进行人工呼吸，并立即送医院抢救。

237. 防止触电，有哪些安全措施？ 当电气设备的绝缘损坏时，机壳就会带电，人体触及机壳就可能发生触电事故。为防止触电事故的发生，应采用保护接地或保护接零安全措施。



单相触电的类型

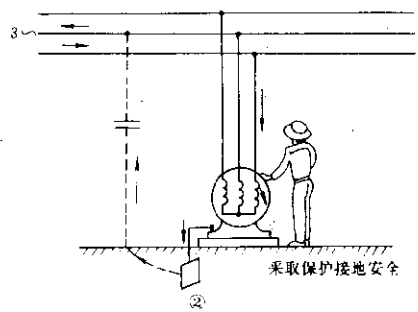
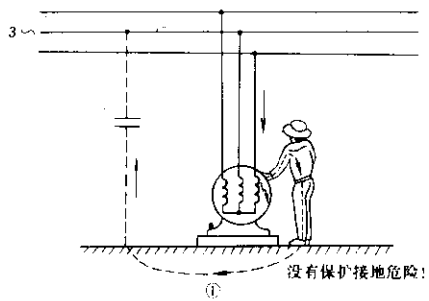
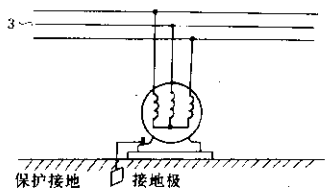


9-2 保护接地

238. 什么叫保护接地？ 在正常情况下，将电气设备的金属外壳或构架用导线与接地极可靠地连接起来，使之与大地做电气上的连接，这种接地的方式就叫保护接地。通常可用埋入地下的钢管、钢条或自来水管作为接地极。如果自来水管的接头处有麻丝、油漆等绝缘物，则应在接头的两端用导线连接起来。

239. 如果电气设备没有保护接地，会发生什么现象？ 右图①所示是一台没有保护接地的电动机接在三相三线制电源上。当其内部绝缘损坏，而使外壳带电时，如人体触及其外壳，将有电流从输电线经过绝缘损坏处流入人体、大地，再通过输电线与大地之间形成的电容回到电源。这样就可能发生触电事故。

240. 为什么电气设备有了保护接地就能防止触电事故？ 上述电动机采用保护接地（右图②）之后，即使内部绝缘损坏，外壳带电，人体触及外壳时，因为人体电阻比接地极电阻（ 4Ω 以下）大得多，所以经接地极电阻分流后，绝大部分电流都从接地极通过，人体也就不会发生触电。因此，在三相三线制供电系统中，所有电气设备必须有保护接地。



9-3 保护接零

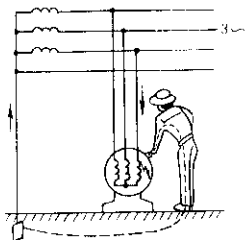
241. 什么叫保护接零？ 保护接零又叫保护接中线。在三相四线制系统中，电源中线是接地的，将电气设备的金属外壳或构架用导线与电源零线（即中线）直接连接，就叫保护接零。

242. 三相四线制系统中的电气设备没有保护接零为什么不安全？ 右图①中的电动机是无保护接零的。当电动机一相绕组导线碰壳时，则电机外壳带电。人体触及外壳便造成单相触电事故。

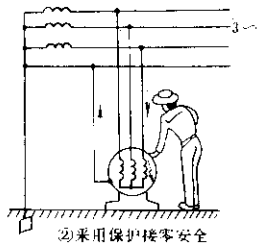
243. 在三相四线制系统中，有了保护接零为什么可以防止触电呢？ 如果上述电动机采取了保护接零措施（右图②），则当电机一相绕组碰壳时，由于外壳已与中线连接，形成短路，会立即将熔断器的熔丝熔断，自动切断电源，因此可以免除触电危险。

244. 在三相四线制系统中，可否采用保护接地措施呢？ 如果采用了保护接地，一旦电气设备绝缘损坏，使外壳带电时，电流将通过保护接地的接地极、大地、电源的接地极而回到电源。因为接地极的电阻值基本相同，则每个接地极电阻上的电压将是相电压的一半。如相电压为220V，则电气设备外壳对地将有110V电压。人体触及外壳时，就会触电。所以在三相四线制系统中的电气设备不允许采用保护接地，必须采用保护接零。

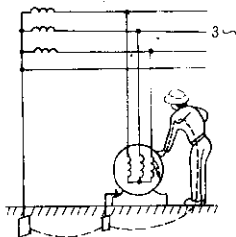
245. 如何使用三脚插头和三孔插座？ 单相用电器最好用三脚插头和三孔插座。接线时，应把用电器的外壳用良导线接至相长的插脚上，同时插座的相应孔应直接接至电源中线上（右图③）。不允许把进线的中线代替电源中线接到插座上（右图④）。因为当进线的中线断开，且用电器绝缘损坏时，就会使用电器外壳带电，以致引发触电事故。



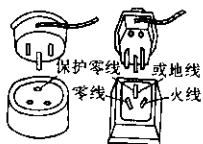
①无保护接零不安全



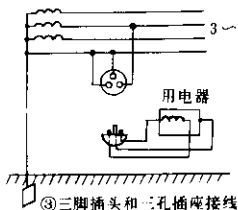
②采用保护接零安全



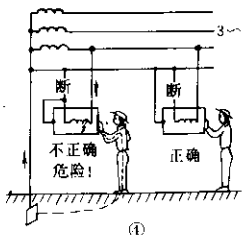
在三相四线制系统中,不允许用保护接地



三脚插头和三孔插座外形



③三脚插头和三孔插座接线



④

9-4 安全用电常识

246. 安全用电要注意什么事项？ 为了防止触电事故的发生，首先思想上要重视，安全第一。必须认真贯彻执行各项安全规章制度，严格遵守安全操作规程，并应采取各种安全技术措施。此外，还应注意以下几点：

①一切裸露的带电体应放在一般人体接触不到的高处（2.5m以上）或加防护罩。

②在任何情况下，均不得用手去鉴定接线端或裸导体是否带电，必须用完好的验电设备进行鉴定。

③不得随意加大熔丝规格，更不允许用铜丝或其它导电材料代替熔丝。更换熔丝时，应先切断电源，切勿带电操作。

④对于容易引起触电的场所，应用36V或更低的安全电压。在潮湿、有导电灰尘、有腐蚀性气体的情况下，则应选用24V、12V或6V电压。

⑤不无故损伤输电线，也不乱拉电线。不要在输电线上晒衣物；晒衣物用的铁丝不得靠近输电线，更不能与输电线交叉搭线或绕在一起，以防将输电线绝缘磨损，导致发生触电事故。

⑥有人触电时，应按前面介绍的方法进行急救。

9-5 电气火灾及其预防

247. 引起电气火灾的原因有哪些？

①线路发生短路：由于导线截面选择过小，绝缘等级不够，导线穿过墙壁未用瓷管保护，导线相互间距过小，年久失修，绝缘老化等都容易引起线路发生短路。过大的短路电流使导线熔化，绝缘烧，条件适宜时将造成火灾。

②线路或电气设备长期超负荷运行：如变压器长期超负荷运行，则温度升高，当达到变压器油的着火点时，便会引起火灾。

③接触电阻过大：由于导线间连接不好，或者接线柱接触松动，在连接处便形成大的接触电阻，电流通过时会产生过热现象，或者在连接处产生火花，均易引起火灾。

④使用电热电器后不切断电源，时间长了有可能引起火灾。

⑤在产生静电火花的周围有爆炸性气体混合物存在，也易引起火灾。

248. 如何预防电气火灾？

①根据使用场所的情况及对电气设备提出的要求，合理选用防爆型、防湿型、防水型等电气设备。

②严禁爆炸性气体进入电气设备和通风系统。

③设备和导线的容量要选择适当。

④定期测试电气线路、设备和变压器油的绝缘情况。

⑤防止电气设备长期超负荷运行。

⑥对电气设备和线路加强日常维修，并定期进行大检修。

⑦严格遵守操作规程，加强责任心，防止麻痹大意。

发生电气火灾时，首先应切断电源。电气灭火一般用干性化学灭火粉末，二氧化碳灭火器、四氯化碳灭火器等。对有油的设备，用干燥的黄砂灭火。

复 习 题

- 1-1 所有实际电路都由____、____及____组成。
- 1-2 电路模型是由_____组成。
- 1-3 描述电路的基本物理量是____和_____。
- 1-4 电气设备的额定电流和额定电压是指在正常工作条件下允许通过的_____和允许承受的_____。
- 1-5 电路的工作状态有三种,即____、_____和_____。
- 1-6 线性电阻元件中 u 与 i 成____比,服从_____定律。
- 1-7 电容元件具有_____的功能。
- 1-8 电容元件中电流与____变化率成正比。
- 1-9 电感元件具有_____的功能。
- 1-10 电感元件的电压与____变化率成正比。
- 1-11 电压源的____与负载大小____关。
- 1-12 克希荷夫电流定律的数学表示式为_____。
- 1-13 克希荷夫电压定律的数学表示式为_____。
- 1-14 电阻串联时,总电阻等于____;各电阻电压与其电阻成____比。
- 1-15 两个电阻并联时,总电阻的计算公式是____;通过每个电阻的电流与其阻值成____比。
- 1-16 电容元件两端电压逐渐____的过程叫充电过程;电压逐渐____的过程叫放电过程。
- 1-17 电容的充放电电流都是按____规律____的;其变化的快慢仅由____大小决定。

2-1 正弦电流（电压）的三要素是____、____及____。

2-2 正弦电流瞬时值表示式为 $i(t) = 10\sqrt{2} \sin(100\pi t + 45^\circ)$ A，它的最大值是____ A，有效值为____ A，频率是____ Hz，初相是____。

2-3 两同频率正弦电流的相位差等于它们的____之差。

2-4 如果 $i_1 = \sin(\omega t + 60^\circ)$ A， $i_2 = 2\sin(\omega t - 30^\circ)$ A，则相位上 i_1 ____ i_2 。

2-5 在正弦电流电路中，电阻元件的电压与电流有效值之间是____，相位差是____，瞬时值之间是____。

2-6 在交流电路中，电容元件的电压与电流瞬时值之间是____，有效值之间是____，相位上电流____电压____。

2-7 在交流电路中，电感元件的电压与电流瞬时值之间是____，有效值之间是____，相位上电压____电流____。

2-8 容抗 $X_C =$ ____，感抗 $X_L =$ ____。

2-9 RC 串联电路中，相位上，电流____电压； U_R 、 U_C 及 U 三者关系是____；阻抗 $Z =$ ____。

2-10 RL 串联电路中，相位上，电压____电流； U_R 、 U_L 及 U 三者关系是____；阻抗 $Z =$ ____。

2-11 RLC 串联电路中，各电压有效值之间的关系是____；总电压与电流有效值关系是____；阻抗 $Z =$ ____。

2-12 RLC 串联电路中，电压与电流的相位差 $\varphi = \text{tg}^{-1}$ ____。
当 $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ 时，电路呈现____性质； $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ 时，电路呈现____性质；
 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时，电路呈现____性质。

2-13 由 R 、 L 、 C 元件组成的交流电路，总电压与总电流的相位差，由电路____及电源____决定。

2-14 在交流电路中，只有____元件消耗功率，它的平均功率计算公式是____。

- 2-15 在交流电路中, 电容和电感元件的平均功率均等于_____。
- 2-16 所谓平均功率是指_____。
- 2-17 一般交流电路的平均功率的计算公式是 $P=$ _____。
- 2-18 视在功率的定义是 $S=$ _____; 单位为_____。
- 2-19 功率因数是_____。
- 2-20 由 R 、 C 、 L 元件组成的电路中, 满足_____条件, 就叫电路发生谐振。
- 2-21 发生串联谐振的条件是_____。
- 2-22 串联谐振的特点是 a _____、 b _____。
- 3-1 对称三相电压 (电流) 的条件是 a _____、 b _____、 c _____。
- 3-2 所谓相序, 是指三相电压 (电流) 最大值出现的_____。
- 3-3 对称三相负载必须是每相负载的_____和_____完全相同。
- 3-4 对称三相电路的条件是_____和_____。
- 3-5 负载星形联接的对称三相电路中, 线电压有效值等于_____有效值的_____倍。
- 3-6 中线的作用是_____。
- 3-7 负载三角形联接的对称三相电路中, 线电流有效值等于_____有效值的_____倍。
- 3-8 对称三相电路的总平均功率的计算公式是_____; 其中功率因数角是_____与_____的相位差。
- 4-1 电气设备中的线圈, 大都绕在_____上。
- 4-2 铁磁材料的主要特性有_____、_____、_____。
- 4-3 磁路欧姆定律的表示式是_____。
- 4-4 在直流铁心线圈中, 励磁电流与铁心的材料种类及尺寸_____; 而磁通的大小与铁心的材料种类及尺寸_____; 磁通是_____ , 在线圈和铁心中_____感应电动势。

4-5 在交流铁心线圈中，磁通是_____，在线圈和铁心中_____感应电动势。

4-6 交流铁心线圈外加电压有效值与铁心中磁通最大值的的关系式是_____。

4-7 直流电磁铁在衔铁吸合前电磁吸力____，而在衔铁吸合后电磁吸力____；交流电磁铁在衔铁吸合前后电磁吸力_____。

4-8 交流铁心线圈的铁心由硅钢片叠成，其目的是_____。

4-9 变压器的基本结构主要由_____和_____构成。

4-10 变压器的主要功能有_____、_____和_____。

4-11 降压变压器的初级绕组，其匝数____，导线截面积____；而次级绕组的匝数____，导线截面积_____。

4-12 变压器的额定容量是指_____的乘积，其单位为_____。

4-13 自耦变压器的主要特点是_____。

4-14 电焊变压器的主要特点是_____。

5-1 三相异步电动机的结构主要由_____和_____组成。

5-2 三相异步电动机的定子主要由_____、_____及_____组成。

5-3 三相异步电动机的转子主要由_____及_____组成。

5-4 产生三相旋转磁场的条件是_____及_____。

5-5 旋转磁场的旋转方向由三相电流的_____决定。

5-6 旋转磁场的转速（同步转速）公式是_____。

5-7 三相异步电动机是由转子电路中的_____与旋转磁场相互作用产生_____，使转子转动。

5-8 三相异步电动机转子的旋转方向与_____的旋转方向相同。

5-9 将接往电源的三根导线中任意两根____就可以使电动机反转。

5-10 电动机的机械特性是指转子____与____的关系。

5-11 三相异步电动机的负载增大时,电动机的转速____,但变化____。

5-12 三相异步电动机的电磁转矩与定子绕组____电压平方成正比。

5-13 额定转矩 M_N 、电动机额定功率 P_{2N} 及额定转速 n_N 之间的关系是_____。

5-14 过载系数是用_____表示; 起动能力是用_____表示。

5-15 三相异步电动机起动时,绕组中____很大,可能影响附近电网电压_____。

5-16 通常采用的降压起动方法有_____及_____两种。

5-17 三相异步电动机的额定功率是指_____; 额定电压是指_____; 额定电流是指_____; 温升是指_____。

5-18 单相异步电动机常见的有_____及_____两种。

6-1 常见的保护电器有____、____等。

6-2 常见的控制电器有____、____、____、____等。

6-3 熔断器的主要作用是_____。

6-4 热继电器的主要作用是_____。

6-5 接触器的主要作用是_____。

6-6 闸刀开关主要用作_____或_____。

6-7 实现控制电路中的自锁是采用_____。

6-8 实现控制电路中的电气联锁是采用_____。

7-1 直流电动机的定子主要由____、____、____等组成。

7-2 直流电动机的转子(电枢)主要由____、____、_____。

____、和____等组成。

7-3 直流电动机的励磁方式有四种，即____、____、____及____。

7-4 直流电动机的电磁转矩主要由____及____的大小决定。

7-5 直流电动机电枢绕组中的反电动势主要由____及____的大小决定。

7-6 他励电动机的转速与____、____、____、____等因素有关。

7-7 他励电动机的机械特性的主要特点是____。

7-8 使用并励电动机时，将接到电源的两根线对调，____改变其转向。

7-9 他励电动机的调速方法有三种，即____、____、____。

7-10 有一台他励电动机的额定电压 $U_n=220\text{V}$ ，电枢电路电阻 $R_a=0.2\Omega$ ，额定功率 $P_2=5.5\text{kW}$ ，励磁电压 $U_f=110\text{V}$ ，励磁电路电阻 $R_f=90\Omega$ ，效率 $\eta=0.8$ ，则励磁电流 $I_f=$ ____；电枢电流 $I_a=$ ____。

8-1 按仪表结构和工作原理不同，常用直读式电工仪表有三种____、____、____。

8-2 仪表误差的表示方法有三种____、____、____。

8-3 仪表的准确度是用仪表的____表示。

8-4 直读电工仪表的准确度等级分为七级即____、____、____、____、____、____、____。

8-5 磁电系仪表：灵敏度____、刻度____、过载能力____。

8-6 电磁系仪表：灵敏度____、刻度____、过载能力____。

8-7 使用直流电表时，应注意极性，“+”端表示电流____端。

8-8 选用电压表时，内阻越__越好；选用电流表时，内阻越__越好。

8-9 一般万用表能测__、__、__、__。

8-10 万用表测电阻的刻度线的零位 ($R_x=0$) 在最__端，与一般仪表__同。

8-11 兆欧表是用来测__电阻的。

8-12 电度表是用来测量__的。

9-1 触电方式常见的有__和__两种。

9-2 通过人体心脏的最大电流（频率 50Hz）不允许超过__ mA。

9-3 安全电压指__ V 以下的电压。

9-4 发现有人触电，首先应采取下列措施：
_____。

9-5 当触电者未脱离电源前，切不可__，以免同陷危险。

9-6 为防止人体因接触电气设备外壳而触电，应采用的安全技术措施有__和__。

9-7 在三相三线制供电系统中，电气设备应采用保护__。

9-8 在三相四线制供电系统中，电气设备应采用保护__。

9-9 在三相四线制供电系统中，电气设备不允许采用保护__。

9-10 电气灭火一般采用__、__及__等。

测 验 题

本测验题全部是选择题，请您从 A、B、C、D 中选择正确的答案。测验题分三种，即 1 分题（20 题）、2 分题（20 题）及 4 分题（10 题），共计 50 题，满分为 100 分。

（一） 1 分题（每题 1 分）：

1. 50mA 等于多少 A?

A: 0.05A; B: 0.5A; C: 0.005A; D: 5A.

2. 在下列欧姆定律的说明中，哪个是错误的?

A: R 一定时， I 与 U 成正比; B: $I = \frac{R}{U}$;

C: U 一定时， I 与 R 成反比;

D: 电阻的电压与流过电阻的电流成正比。

3. 下列电气设备哪种是负载?

A: 发电机; B: 干电池; C: 太阳能电池; D: 电熨斗。

4. $f = 50\text{Hz}$ 的正弦电流的周期是多少?

A: 50s; B: 2s; C: 0.02s; D: 0.2s.

5. 有 $u = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, $i = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$, 则 u 与 i 的相位差是多少?

A: $\frac{\pi}{4}$; B: $\frac{3}{4}\pi$; C: $-\frac{\pi}{4}$; D: $\frac{\pi}{2}$

6. 日常用的交流电压为 220V 是指什么值?

A: 瞬时值; B: 最大值; C: 有效值; D: 平均值。

7. 在三相电路的有关说明中，哪个是错的?

A: 由对称三相电压源供电的电路叫三相交流电路;

B: 三个电压源可以接成 Y 形或 Δ 形;

C: 对称三相电流的瞬时值总和为零;

D: 三个电压的总和为零。

8. 对称三相电路的条件是什么?

A: 电源和负载均为对称; B: 电源对称;

C: 负载对称; D: 必须有中线。

9. 左图三相负载是什么接法?

A: 串联; B: 并联; C: Δ 接法; D: Y 接法。

10. 已知变压器原副两绕组匝数比为 2, 如原绕组端电压为 220V, 则副绕组端电压为多少?

A: 220V; B: 110V; C: 440V; D: 55V。

11. 变压器铁心用硅钢片叠制而成, 其目的是什么?

A: 减少铁损; B: 降低噪音;

C: 增大磁通; D: 减小涡流损耗。

12. 变压器额定容量为 2kVA, 原边额定电压为 220V, 则原边额定电流是多少?

A: 0.9A; B: 1.1A; C: 9.1A; D: 91A。

13. 三相异步电动机转子转速 n 与旋转磁场转速 n_0 比较如何?

A: $n=n_0$; B: $n>n_0$; C: $n<n_0$; D: $n=\frac{1}{2}n_0$ 。

14. 三相异步电动机铭牌上标明温升是 75°C , 则绕组允许的最高温度是多少?





A: 75°C ; B: 115°C ; C: 125°C ; D: 135°C 。

15. 熔断器有什么作用?

A: 过载保护; B: 短路保护;

C: 防止电压过低; D: 起动电流大时, 有保护作用。

16. 交流接触器的常开触头图形是怎样的?

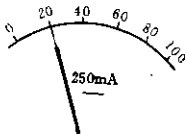
A: ; B: ; C: ; D: .

17. 直流他励电动机的负载增大时, 电动机的转速如何变化?

- A: 没有变化; B: 略有升高;
C: 稍有下降; D: 急速下降。

18. 直读式电工仪表的准确度等级是按什么误差划分的?

- A: 相对误差; B: 引用误差;
C: 绝对误差; D: 最大引用误差。



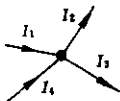
19. 左图是量程为 250mA 的磁电系电流表表盘, 指针指示值是多少?

- A: 50mA; B: 20mA;
C: 40mA; D: 25mA。

20. 流过人体心脏的电流(50Hz)最大不能超过多少 mA?

- A: 100; B: 50; C: 30; D: 10。

(二) 2 分题 (每题 2 分)

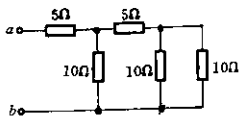


21. 在左图电路中, 根据电流定律列写出的方程哪个是正确的?

- A: $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$; B: $I_1 + I_4 = I_2 + I_3$;
C: $I_1 + I_3 = I_2 + I_4$; D: $I_1 = I_2 + I_3 + I_4$ 。

22. 对电容充电时, 为了缩短过程, 可采取什么措施?

- A: 加大电压; B: 降低电压;
C: 减小充电电路电阻; D: 增大充电电路电阻。



23. 左图电路中, a、b 两端间总电阻是多少欧?

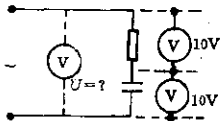
- A: 5Ω; B: 10Ω;
C: 15Ω; D: 20Ω。

24. 若在电容元件上施加正弦电压, 则流过电容的电流, 在相位上与电压比较如何?

A: 超前 45° ; B: 滞后 90° ; C: 超前 90° ; D: 同相。

25. 下列哪个式子是错的?

A: $I = \omega CU$; B: $P = UI \cos \varphi$; C: $X_L = 2\pi fL$; D: $i = \frac{U_m}{X_C}$ 。



26. 在左边串联交流电路中, 总电压有效值 $U = ?$

A: 20V; B: 10V;

C: 14.1V; D: 200V。

27. 对称三相电路中, 当负载为 Y 接时, 已知线电压有效值为 380V,

则负载相电压是多少?

A: 380V; B: 220V; C: 127V; D: 269V。

28. 对称三相电路中, 当负载为 Δ 接时, 已知负载相电流有效值为 10A, 则线电流是多少?

A: 17.3A; B: 14.1A; C: 30A; D: 20A。

29. 在对称三相电路中, 线电压为 380V, 线电流为 5A, 负载 Y 接法而功率因数角为 0.8, 则电路总平均功率是多少?

A: 8.8kW; B: 15.2kW; C: 26.3kW; D: 21.5kW。

30. 交流电磁铁的衔铁在吸合前后, 线圈中电流如何变化?

A: 增大; B: 减小; C: 不变; D: 基本不变。

31. 在直流铁心线圈的铁心中, 当气隙加大时励磁电流将怎样变化?

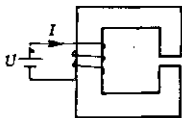
A: 增大; B: 增大很多;

C: 减小; D: 不变。

32. 一台三相异步电动机铭牌上标明的额定功率为 10kW, 额定转速为 2920r/min,

则它的额定转矩是多少?

A: 33kg·m; B: 3.3kg·m;



C: $3300\text{kg}\cdot\text{m}$; D: $34\text{kg}\cdot\text{m}$ 。

33. 指出下列结论中哪个是错误的?

A: 对称三相电流的瞬时值之和在每时刻都恒等于零。

B: 在对称三相电路中, 中线电流为零。

C: 负载星形连接时, 线电流必等于相电流。

D: 负载三角连接时, 线电流必等于相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。

34. 误将交流电磁铁接入电压相同的直流电源, 线圈中电流将会如何?

A: 与交流情况相同; B: 比交流时小;

C: 比交流时略大; D: 超过额定值很多。

35. 交流接触器接入电源后, 电磁铁被卡住, 不能吸合时, 线圈中电流情况如何?

A: 等于零; B: 很小; C: 很大; D: 等于额定值。

36. 热继电器具有过载保护作用, 为什么在电动机起动时, 电流很大, 而热继电器不动作?

A: 有机械惯性; B: 发热元件有热惯性;

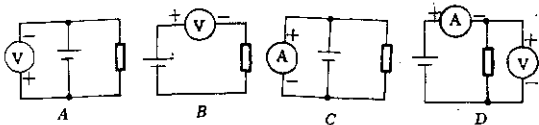
C: 不灵敏; D: 有复位按钮。

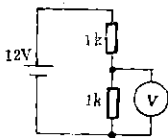
37. 他励电动机在运行时, 如果激磁绕组电路突然断开, 会发生什么现象?

A: 停转; B: 转速下降;

C: 转速不变; D: 转速急剧上升。

38. 在下列电路中的电压表 V 和电流表 A 的联接, 哪个图是正确的?





39. 在左电路中, 用内阻为 $2k\Omega$ 的伏特表测量电压时, 伏特表的读数是 多少?

- A: $10V$; B: $4.8V$;
C: $6V$; D: $4V$ 。

40. 国家标准规定安全电压最高值是多少?

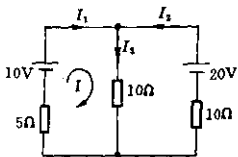
- A: $50V$; B: $36V$; C: $24V$; D: $12V$ 。

(三) 4 分题 (每题 4 分)

41. 两只白炽灯泡, 一只是 $110V, 100W$, 另一只是 $110V, 60W$ 。能否把两只灯泡串联后接于 $220V$ 电源?

- A: 可以;
B: 不可以, 因 $100W$ 灯泡电压超过额定值;
C: 不可以, 因 $60W$ 灯泡电压超过额定值;
D: 将 $60W$ 灯泡换成 $200W$ 灯泡就可以。

42. 在左图回路 I 中, 根据电压定律列写出的方程哪个是正确的?



- A: $10 = 5I_1 + 10(I_1 + I_2)$;
B: $-10 = 5I_1 + 10(I_1 + I_2)$;
C: $10 = 5I_1 - 10(I_1 + I_2)$;
D: $10 = -5I_1 + 10(I_1 + I_2)$ 。

43. 测得一交流电路的电压 $u = 141\sin(\omega t + 90^\circ) V$, 电流 $i = \sin(\omega t + 30^\circ) A$, 此电路消耗的平均功率是多少?

- A: $141W$; B: $35.4W$; C: $50W$; D: $61.2W$ 。

44. 在 RLC 串联电路中, 已知 $u = 141\sin(100t - 30^\circ) V$, $R = 8\Omega$, $L = 0.1H$, $C = 2500\mu F$, 问电流有效值是多少?

- A: $14.1A$; B: $5.6A$; C: $10A$; D: $1A$ 。

45. 三相四线制的中线规定不能安装保险丝，宿舍里的照明线路的中线（俗称地线）是否允许安装保险丝？

A: 不可以； B: 负载小可以；

C: 可以； D: 负载大可以。

46. 三相异步电动机在正常运行时，如果转子突然被卡住而不能转动，电动机的电流将如何变化？

A: 电流为零； B: 不变；

C: 急剧增大； D: 减小。

47. 一台三相异步电动机的额定电压为 380V，额定电流为 6.5A，功率因数为 0.86，在额定状态运行时，输入电动机的功率是多少？

A: 6.37kW； B: 3.68kW； C: 2.13kW； D: 4.28kW。

48. 一台单相变压器额定容量为 10kVA，电压为 3300/220V，今欲在副边接 220V、40W 白炽灯，变压器在额定状况下运行，能接多少只白炽灯？

A: 25 只； B: 250 只； C: 200 只； D: 50 只。

49. 将一台额定频率为 400Hz 的变压器，接在相同电压，但频率为 50Hz 的电源上，电流将如何变化？（与 400Hz 时比较）

A: 没有变化； B: 减小； C: 增大； D: 增大很多。

50. 一只内阻为 100Ω ，量程为 5mA 的磁电系电流表，欲改成量程为 1A 的安培表，应并联多少欧的分流电阻？

A: 5Ω ； B: 0.5Ω ； C: 0.05Ω ； D: 0.1Ω 。

复习题答案

- 1-1 电源；负载；中间环节
1-2 电路元件
1-3 电流；电压
1-4 最大电流值；最高电压值
1-5 有负载工作状态；断路状态；短路状态
1-6 正；欧姆
1-7 储存电荷和电场能量
1-8 电压
1-9 储存磁场能量
1-10 电流
1-11 端电压；无
1-12 $\sum_{k=1}^b i_k = 0$
1-13 $\sum_{k=1}^l \mu_k = 0$
1-14 各电阻的总和；正
1-15 $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ；反
1-16 增大；减小
1-17 指数；衰减；RC
- 2-1 最大值；频率（周期）；初相
2-2 $10\sqrt{2}$ ；10；50；45°
2-3 初相

2-4 超前

2-5 $U_R = RI$; 零; $u_R = Ri$

2-6 $i = C \frac{\Delta u_C}{\Delta t}$; $I = \omega C U_C$; 超前; 90°

2-7 $u_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$; $U_L = \omega LI$; 超前; 90°

2-8 $\frac{1}{\omega C}$; ωL

2-9 超前; $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$; $\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$

2-10 超前; $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$; $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$

2-11 $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$; $U = ZI$; $\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$

2-12 $\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$; 电感; 电容; 电阻

2-13 参数; 频率

2-14 电阻; $P = U_R I = I^2 R$

2-15 零

2-16 在一个周期内瞬时功率的平均值

2-17 $UI \cos \varphi$

2-18 UI ; 伏安 (VA)

2-19 $\cos \varphi$

2-20 总电压与电流同相

2-21 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$

2-22 电流达到最大; 当 $\omega L \gg R$ 时 $U_L = U_C \gg U$

3-1 频率相同; 最大值相同; 相位彼此相差 120°

3-2 先后顺序

- 3-3 电阻；电抗
- 3-4 电源对称；负载对称
- 3-5 相电压； $\sqrt{3}$
- 3-6 保持负载相电压对称
- 3-7 相电流； $\sqrt{3}$
- 3-8 $P = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi$ ；相电压；相电流

- 4-1 铁心
- 4-2 高导磁性；磁饱和性；磁滞性
- 4-3 $\Phi = NI/R_m$ ； $R_m = L/\mu S$
- 4-4 无关；有关；恒定不变；不产生
- 4-5 随时间交变；会产生
- 4-6 $U = 4.44 f N \Phi_m$
- 4-7 最小；最大；不变
- 4-8 减小涡流损耗
- 4-9 铁心；绕组
- 4-10 变换电压；变换电流；变换阻抗
- 4-11 多；小；少；大

4-12 变压器二次绕组额定电压和额定电流有效值；伏安 (VA) 或千伏安 (kVA)

4-13 自耦变压器只有一个绕组（二次绕组是一次绕组的一部分）和原副边有直接的电的联系

4-14 具有陡降的外特性（焊接时，输出电压变化较大，但输出电流变化不大）

- 5-1 定子；转子
- 5-2 机座；定子铁心；定子绕组
- 5-3 转子铁心；转子绕组

5-4 三个绕组的轴线彼此相交成 120° ；三相绕组中通入对称三相电流

5-5 相序

$$5-6 \quad n_0 = \frac{60f}{p}$$

5-7 感应电流；电磁转矩

5-8 旋转磁场

5-9 对调

5-10 转速；电磁转矩

5-11 下降；不大

5-12 相

$$5-13 \quad M_N = 975 \times \frac{P_{2N}}{n_N}$$

5-14 M_m/M_N ； M_Q/M_N

5-15 电流；下降

5-16 $Y-\Delta$ 起动；自耦变压器起动

5-17 在额定状态运行时轴上输出的机械功率；在额定状态运行时加在三相定子绕组上的线电压；在额定状态运行时定子绕组的线电流；绕组温度高出周围环境温度的允许值

5-18 电容分相式电动机、罩极式电动机

6-1 熔断器；热继电器

6-2 闸刀开关；组合开关；按钮；接触器

6-3 短路保护

6-4 过载保护

6-5 接通或断开主电路

6-6 隔离电源的开关；直接起动电动机的电源开关

6-7 将接触器常开辅助触头与起动按钮并联

6-8 将接触器常闭辅助触头串接在另一需要相互制约的控制

电路中

- 7-1 磁极；机座；端盖
- 7-2 电枢铁心；电枢绕组；换向器；转轴
- 7-3 他励；并励；串励；复励
- 7-4 每极磁通 Φ ；电枢电流 I_a
- 7-5 每极磁通 Φ ；电机转速 n
- 7-6 电枢电路电阻；电枢电压；电机磁通；负载
- 7-7 具有硬特性，即负载增加时电动机转速下降不大
- 7-8 不能
- 7-9 在电枢电路中串入电阻；改变电机磁通；改变电枢端电压
- 7-10 $I_f=1.2A$ ； $I_a=31.25A$

- 8-1 磁电系；电磁系；电动系
- 8-2 绝对误差；相对误差；引用误差
- 8-3 最大引用误差
- 8-4 0.1；0.2；0.5；1.0；1.5；2.5；5.0
- 8-5 高；均匀；低
- 8-6 低；不均匀；大
- 8-7 流入
- 8-8 大；小
- 8-9 直流电压；交流电压；直流电流；电阻
- 8-10 右；不
- 8-11 绝缘
- 8-12 电能

- 9-1 单相；两相
- 9-2 50

- 9-3 36
- 9-4 切断电源，隔断触电者与电源的联系
- 9-5 用手直接接触触电者
- 9-6 保护接地；保护接零
- 9-7 接地
- 9-8 接零
- 9-9 接地
- 9-10 干性化学灭火粉末；二氧化碳灭火器；四氯化碳灭火器

测验题答案

(1)	A	(2)	B	(3)	D	(4)	C	(5)	B
(6)	C	(7)	D	(8)	A	(9)	D	(10)	B
(11)	D	(12)	C	(13)	C	(14)	B	(15)	B
(16)	C	(17)	C	(18)	D	(19)	A	(20)	B
(21)	B	(22)	C	(23)	B	(24)	C	(25)	D
(26)	C	(27)	B	(28)	A	(29)	C	(30)	B
(31)	D	(32)	B	(33)	D	(34)	D	(35)	C
(36)	B	(37)	D	(38)	D	(39)	B	(40)	B
(41)	C	(42)	A	(43)	B	(44)	C	(45)	C
(46)	C	(47)	B	(48)	B	(49)	D	(50)	B