

分类号_____

密级_____

U B C _____

华中科技大学

硕士学位论文

热电冷三联产系统的节能研究

学位申请人：熊霞利

学科专业：热能工程

指导教师：叶涛 副教授

论文答辩日期 2004. 4. 29

学位授予日期_____

答辩委员会主席 黄树红

评阅人 黄树红 刘华堂

A Thesis Submitted in Partial of Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering

**Energy Saving Analysis of Combined Cooling,
Heating and Power System**

Candidate: **Xiong Xiali**

Major: **Thermal Engineering**

Supervisor: **Prof. Ye Tao**

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P.R.China

April, 2004

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 保密，在_____年解密后适用本授权书。
 不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

年 月 日

指导教师签名：

年 月 日

摘 要

本文对热电冷三联产、热电联产冷分产以及热电冷三分产三种能量供应系统的能耗特点进行了分析，建立了这三种系统一次能耗的数学模型。从一次能耗和一次能耗率的角度较深入地研究了三联产系统的节能性。

根据理论分析，首先推导出热电联产系统 μ 值的计算公式。通过对不同类型的供热机组 μ 值进行计算，得出了 μ 值的大小主要与汽轮机的进汽参数和背压排汽(或抽汽参数)有关的结论，并指出 μ 值反映的实质是联产系统所消耗的总一次能在热、电、冷各部分上的比例分配大小。

对联产制冷系统和分产电压缩式制冷系统的一次能耗和当量热力系数进行了研究，发现热电冷联产吸收式制冷系统的节能性主要与两种制冷系统制冷机组的性能系数 COP 值和供热机组的 μ 值有关。

根据建立的系统一次能耗的数学模型，通过选取不同的锅炉、供热机组和溴化锂制冷机，组成三联产系统，详细地计算和分析了他们的能耗特点，并对三联产相对于热电联产、冷分产和热电冷三分产节能性进行了分析。研究表明，三联产比二联产系统有一定的节能性，两种系统都采用背压机组时的节能率高于采用抽凝机组的节能率。影响三联产节能性的因素主要有：①汽轮机的容量和参数；②制冷机组性能系数；③热负荷率 X (主要表现在锅炉效率随着锅炉负荷率的变化、汽轮机相对内效率随着进汽量的变化)；④全国平均发电效率 η_{ec} 。

对分布式楼宇热电冷联产，本文也从一次能耗的角度分析了制冷系统的节能性，指出其有较高节能率，值得大力推广。

关键词：热电冷联产， 制冷系统， 一次能耗， 一次能耗节能率

Abstract

This paper aims at primary energy saving of CCHP. Based on previous research, it analyzes the primary energy consume of three kinds of systems: CCHP system, Combined Heating and Power system (CHP) with independent electric refrigeration, and independent Heating, Cooling and Power system (HICP). It builds up the mathematical models for these three kinds of systems. From the view of primary energy consume and primary energy consume ratio, the factors which affect energy saving of CCHP system is studied deeply.

Based on theoretical analysis, a formula for calculating parameter μ of CCHP is deduced. It is concluded that variable μ is influenced by steam parameters of steam turbine, such as inlet steam pressure and temperature, extraction pressure and temperature, or backing pressure. And it is pointed out that variable μ essentially is the allocation proportion of energy among heating, power and cooling in CCHP system.

After making a study of primary energy consumption and equivalent thermodynamic coefficient between absorption refrigeration and electric compression refrigeration systems, it concludes that energy saving performance in refrigeration system of CCHP is related to coefficient of performance of refrigerator and the parameter μ .

According to the mathematical models that have been built, the ingredients of CCHP system are chosen, such as boiler, turbine and lithium bromide refrigerator. Then the total primary energy consumption of three kinds of system is compared. The study indicates that CCHP system is energy-saving compared to CHP system. And if the steam turbine is backpressure, the amount of energy saving is larger. The major factors which influence the energy saving of CCHP system are as following: ① capacity and steam parameters of steam turbine; ② coefficient of performance of refrigerator; ③ heating load rate; ④ average national heat generating electricity efficiency.

This paper also analyzes the refrigeration of BCHP system from the view of primary energy. And it points out that the energy saving of BCHP system is high. So it is worth promoting and developing.

Key words: Combined Cooling, Heating and Power; Refrigeration system; Primary energy consumption; Energy saving ratio of primary energy

目 录

摘 要	I
Abstract	II
1 绪 论	1
1.1 课题研究的背景与意义	1
1.2 国内外热电冷三联产的发展研究动态	3
1.3 本文的主要工作及创新	5
2 热电冷联产系统的特点及节能研究动态	6
2.1 热电冷联产的原理	6
2.2 热电冷联产的主要形式及特点	7
2.3 国内热电冷联产的节能研究动态	9
3 基于热电厂的热电冷联产节能分析	15
3.1 热电冷联产系统比较的基础	15
3.2 数学模型的建立	16
3.3 各系统一次能耗比较	23
4 热经济性计算与分析	24
4.1 三联产制冷系统与电压缩式制冷系统节能分析	24
4.2 三联产系统和热电联产、冷分产系统的热经济性比较	28
4.3 热电冷三联产系统和热电冷三分产热经济性比较	47
4.4 小结	52
5 分布式热电冷联产的节能分析	53
5.1 分布式热电冷联产系统的能耗特点	53
5.2 分布式热电冷联产制冷系统节能分析	54
5.3 本章小结	57



“制冷百家”

物性查询，论文查看，制冷、暖通最好的微信公众号，关注送论文资料

6 结 论	58
致 谢	60
参考文献	61
附录 1 攻读学位期间发表论文目录	64
附录 2 符号与符号说明	65

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

1 绪 论

1.1 课题研究的背景与意义

随着人们对气候变化、环境污染、能源供应安全、能源效率的日益关注，热电冷联产受到了各界的高度重视。实现能源、环境和经济的协调发展已成为人们共同追求的目标。热电冷联产系统作为一种能源综合利用技术，在能源转换效率方面所具有的突出优势，因此在世界各国的能源领域具有显著地位。在我国，《中国 21 世纪议程》、《中华人民共和国节约能源法》、《中华人民共和国大气污染防治法》等文件与法规中，都明确表示鼓励发展热电联产与集中供热，将其作为可持续发展战略的重要组成部分，并在税收等方面给予优惠政策。

热电冷联产是在热电联产的基础上发展起来的，具有很多优点。总的说来，热电冷联产具有以下几点重要意义^[1,2]。

(1) 缓解夏季电力供需矛盾。随着人民生活水平的提高，人们对居住舒适要求越来越高，制冷与供热需求也越来越大。夏季，空调器大多数是以电力为动力。在一些大城市，如上海，北京，武汉，南京等地，夏季负荷中，空调负荷几乎占总用电负荷的 1/4。因此，降低空调负荷对于缓解夏季供需矛盾很重要。据上海电力工业统计分析，从 1986—2001 年，用电最高负荷出现在 7—8 月，这使得电力峰谷差增大。热电冷联产是通过汽轮机的抽汽或背压排汽供给溴化锂机组进行制冷。利用已建成的热电厂发展溴化锂吸收式制冷机组，一方面替代电力空调，节约大量电力；另一方面增加热电厂的热负荷，可以使热电厂的发电量增加，缓解供需矛盾。

(2) 提高热电厂的设备利用率及经济效益。根据我国电力系统热电厂（6MW 以上机组为主）经验，其供热节能约为 30%，供热成本比单供热低 30%—40%。但是热电联产生活供热受季节影响太大，使热电机组不能达到预定的负荷而使效率降低。一般来说，冬季工业生产维持正常工艺参数需求的热量，居民采暖需求量大，热电厂自身供热损耗也较大，所以冬季热电厂的热负荷较大。而夏季，采暖和通风热负荷为零，只有工业生产和生活热水负荷，夏季出现热负荷低谷。机组在低负荷下运行，设备利用效率低。采用热电冷联产，即用溴化锂吸收式制冷对于增加供热机组夏季供热量，提高机组热效率和全厂经济效益是显而易见的。在“三北”地区，冬季采暖时

间约为 4—5 个月，夏季制冷时间长 2—3 个月，全年在较高负荷运行时间约为 6—8 个月；在长江中下游地区，冬季采暖期约为 3 个月，夏季制冷时间约为 5—6 个月，这样全年在较高负荷下运行时间也可达 8—9 个月。可见，热电冷联产可增加热电厂的夏季热负荷，平衡冬季和夏季热负荷的峰谷差，这样就提高了热电厂的设备利用率，相应地提高了热电厂的经济效益。

(3) 节省能源。传统的动力系统的技术开发主要着眼于单独的设备，例如集中供热、直燃式中央空调及发电设备。这些设备的共同问题在于单一目标下的能耗高，尚未达到有限能源资源的高效和综合利用。热电冷联产系统与远程送电比较，可大大提高能源利用率。大型发电厂的发电效率一般为 35%—40%，扣除厂用电和线损率，终端利用率只能达到 28%—35%，而热电冷联产系统的能源利用率可达到 70% 以上。下图是热电冷联产的能源利用过程示意图。

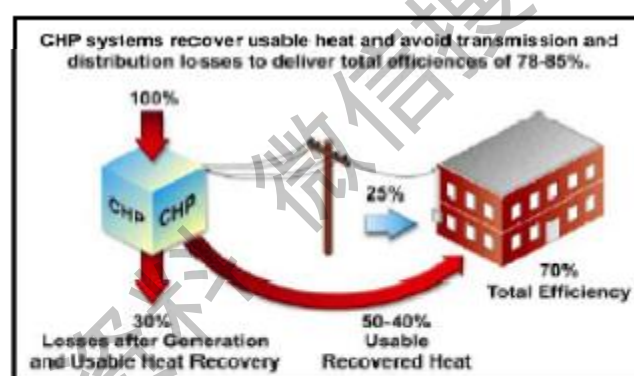


图 1-1 热电冷联产的能源利用过程示意图

(4) 有利于环境保护。以氟利昂 (CFC) 作为制冷剂的空调机组，会引起臭氧层破坏而导致温室效应；而现在采用的氢氧氟烃 (HCFC) 虽然对环境影响小些，但是仍对臭氧层有破坏能力。而热电冷联产 (CCHP) 在降低碳和污染空气的排放物方面具有很大的潜力。因采用溴化锂吸收式机组，溴化锂作为吸收剂无毒无害，对环境保护很有利。据有关专家估算，如果从 2005 年起，每年 25% 的新建筑及从 2010 年起 50% 的新建筑均采用 CCHP 的话，到 2020 年的 CO_2 的排放量将减少 19%。

(5) 小型天然气热电冷联产系统能增强能源供给可靠性。近年以来，美国和加拿大、英国、澳大利亚等国相继发生的大停电事故，深刻说明传统能源供应形式存在着严重的技术缺陷。而以天然气热电冷联产系统 (分布式能源系统) 为核心的新型能源体系具有效率高、灵活性强、分散度高、安全可靠的特点，可作为传统大电厂、大

电网的有益补充，能增强整个国家和地区的能源供给的可靠性。

由于热电冷联产具有以上优点，受到了国家政府部门、学术界、能源电力公司等的大力关注，特别是西气东输工程的建设，为燃气—蒸汽联合循环热电冷联供和分布式热电冷联产（楼宇热电冷联产）提供了极好的机遇和市场。对于热电冷三联产的技术经济性和热经济性分析引起了广大学者的兴趣，有不少前辈做了很多工作^[8]。但由于热电冷联产系统庞大，系统的装置和流程组合方式多样化，对于热电冷联产系统的节能性研究有一定难度，有些文章对其节能性分析时，是从宏观和经验上描述，有些文章为了简化，做了不是很符合实际的假设。因而，较深入地研究三联产系统各部分的能耗特点和系统的节能性，可以为三联产系统设计和优化提供参考，这对于提高能源利用效率，促进热电冷联产事业的快速发展有很大意义。

1.2 国内外热电冷三联产的发展研究动态

1.2.1 国外热电冷联产的发展

国外热电冷联产起步较早，特别是从二十世纪八十年代后，发展较迅速。热电冷联产发展较迅速的国家主要有美国、加拿大、法国、德国和日本^[9-11]，见表 1-1。

表 1-1 世界上主要的城市集中三联供

国家	城市	集中三联供区域	种类
美国	洛杉矶	哈卡商业街	DHC
	纽约	国际空港、罗斯奇	DHC
	芝加哥	罗哈托住宅区	DHC
加拿大	多伦多	多伦多市街区	DHC
德国	汉堡街区	汉堡街区	DHC
法国	巴黎	巴黎街区	DHC
日本	札幌	札幌市安区	DHC
	东京	新宿市中心	DHC
	大阪	千旦街区	DHC

注：DHC 为区域热电冷联产

目前，国际上，特别是在欧美等国，由于环境和能源问题，人们越来越关注环境效益和效率高的机械设备研究。在此情况下，分布式发电、供能方式的热电冷联产发展迅猛^[12-14]。这种热电冷联产系统一般采用微型燃气轮机作为主要动力，对医院、车

站、机场、金融中心、电子信息中心等供电热冷，此系统也称为楼宇热电厂（BCHP）。

1.2.2 国内热电冷联产的发展

1.2.2.1 热电冷联产的应用

国内热电冷联产应用起步晚，只是近十年来才慢慢开始发展，还处于探索阶段，与欧美、日本等国有一定的差距。

全国多个城市拥有在燃煤热电厂基础上建立的热电冷联产系统，如济南热电冷联产系统的供冷总容量近几年已从无发展到 49.6MW，杭州两个正在建设的热电冷联产系统供冷总容量将超过 120MW。在燃气轮机或内燃机基础上建立的燃气热电冷联产系统也已出现，如上海黄浦区中心医院和浦东国际机场热电冷联产系统，北京的燃气集团大楼和清华大学校园热电冷联供系统等。

1992 年在山东淄博市张店热电厂率先实施热电冷联产，主要用户为宾馆、商厦、办公楼和住宅等。据张店热电厂计算，实现三联产后，电厂可多创产值 170 多万，并且提高了热电厂的热效益，每年节标煤 1800 吨^[5]。

上海黄浦区中心医院从 1999 年开始采用三联供。医院每天节省能源费 8400 元左右，能源利用率达 70% 以上并有效改善了大气质量。但是，此系统由于设计负荷与运行负荷不平衡，使机组偏离额定负荷下运行，因此，需进一步改进。这也给我国小型热电冷联产事业提供了宝贵的经验，并为今后的发展奠定了基础。

1.2.2.2 我国热电冷联产的研究现状

由于我国在能源结构、价格、管理体制以及冷、热、电负荷等外部条件与国外存在差异，这就造成了热电冷联供系统在我国大中城市的推广应用，仍需要研究一些技术方面的重要课题。

热电冷联供系统评价体系的研究，需建立一套以能源系统为中心的热电冷联供系统评价体系，从经济—能源—环境等各种角度全方位对热电冷联供系统进行评价，由于从其环境效益是很明显的，因此国内对于热电冷联产系统是否节能研究较多。节能方面的观点主要有三种：一种观点认为 CCHP 系统一定是节能的，另一种认为节电但不节能，还有一种观点认为节能是有条件的。这三种观点论述都有自己的理由，很多都是工程运行数据，但是在理论上都没有提出很有效的评价依据。

常见的热电冷联产系统有两种，一种是基于热电厂的热电冷联产系统，利用锅炉

产生的高压高温蒸汽带动汽轮机发电，同时利用汽轮机的抽汽或排汽对外供热和驱动吸收式制冷机组制冷；另一种是楼宇热电冷联产，利用燃气轮机发电，其排气余热直接或间接用于供热和带动吸收式制冷机组制冷。热电冷联产系统相对于热电联产、冷分产和热电冷三分产的节能性是一个很值得探讨的问题。国内已有一些文献^[16-18]对其节能性进行研究，但由于评价标准和评价对象不一样，得出了不同的结论。

1.3 本文的主要工作及创新

本文从能源的品位，也即做功能力的角度，全面分析了热电冷联产的节能性。本文的创新点有以下几点：

(1) 计算 μ 值时，现有文献都只是采用前苏联巴突尔克斯在《吸收式制冷机》一书中给出的值进行计算，从而有一定的局限性。本文根据定义，推导出 μ 值的计算公式，并且对不同的机组进行计算。指出 μ 值反映的实质是联产系统所消耗的总一次能在热、电、冷各部分上的比例分配大小。

(2) 建立热电冷三联产、热电联产冷分产和热电冷三分产三种能量供应系统一次能耗的数学模型。

(3) 通过选取不同的锅炉、供热机组和溴化锂制冷机，组成三联产系统，从一次能耗和一次能耗率的角度，详细的计算和分析了他们的能耗特点。把三联产与热电联产、冷分产和热电冷三分产进行了能耗比较和节能分析。

(4) 在楼宇热电冷联产方面，本文也进行了详细的分析，从一次能耗的角度分析了该系统的节能性。

2 热电冷联产系统的特点及节能研究动态

2.1 热电冷联产的原理

热电冷联产系统包括三个子系统：制冷系统、供热系统和发电系统，每个系统都是复杂的体系，因此了解他们的工作原理显得尤为重要。

2.1.1 制冷原理

从低于环境温度的空间或物体中吸取热量，并将其转移给环境介质的过程称为制冷。理想的制冷循环是逆卡诺循环，完成逆卡诺循环的结果是，消耗了一定数量的机械功，将从冷源取得的热量排给热源。

人工制冷的办法很多，按物理过程的不同有：液体气化法、气体膨胀法、热电法、固体绝热去磁法等。在热电冷联产中主要采用液体气化制冷法，蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷都属于液体气化制冷法。图 2-1 和图 2-2 分别给出了压缩式制冷和吸收式制冷的原理图。

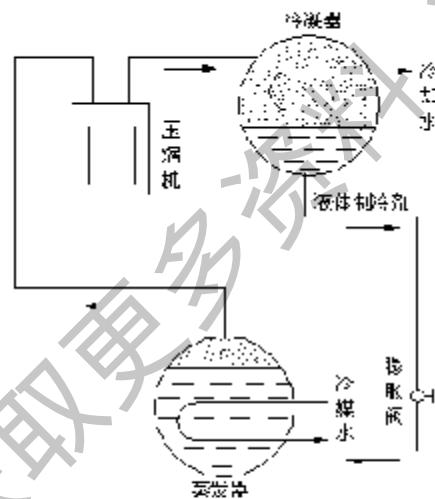


图 2-1 压缩式制冷机原理图

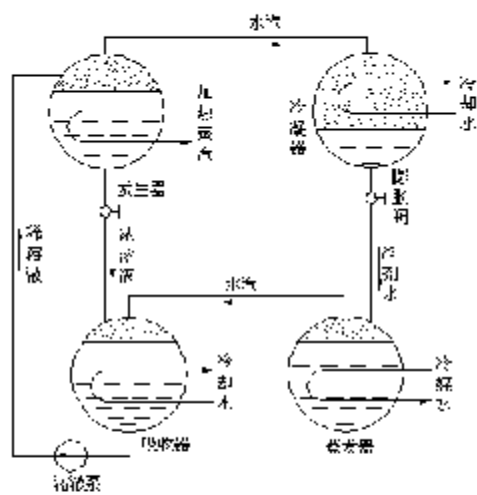


图 2-2 吸收式制冷原理图

2.1.2 热电冷联产工作原理

根据能源的梯级利用原理，使燃料通过热电联产装置发电后，变为低品味的热能用于采暖、生活供热等用途的供热，这一热量也可驱动吸收式制冷机，用于夏季的空

调，从而形成热电冷三联供系统。

2.2 热电冷联产的主要形式及特点

2.2.1 基于热电厂的热电冷联产

热电冷联产系统是在热电联产系统的基础上加上吸收式制冷机组而成。燃料在锅炉中产生的高温高压蒸汽，带动汽轮发电机组发电，做功后的低品位的汽轮机抽汽或背压排汽用于供热，同时作为吸收式制冷机的热源，使吸收式制冷机产生冷冻水，供应给用户。热电冷联产系统的主要设备型式多样，可以组成多种配置方案。以满足不同用户对热电冷负荷的要求，具体组成型式见表 2-1。

表 2-1 热电厂的热电冷联产系统常用组成型式

序号	名称	特点	组合方案示意图
1	锅炉+背压式汽轮机+吸收式制冷机	此组合可增加背压机组的夏季热负荷，因此可提高背压供热机组发电效率和能源利用率。	
2	锅炉+抽凝式汽轮机+吸收式制冷机	此组合可根据冷热负荷的变化调节经过凝汽器的蒸汽量，便于运行管带和调节负荷。	
3	锅炉+抽背式汽轮机+吸收式制冷机	兼有抽凝机组和背压机组的特点，发电量、供热量、制冷量可以在一定范围内调节。	

2.2.2 分布式热电冷联产（楼宇热电冷联产）

利用天然气作为燃料，采用的形式主要有：（1）燃气轮机+余热锅炉+供热式汽轮机—溴化锂吸收式制冷机组；（2）燃气轮机+直燃式溴化锂吸收式制冷机组。他们的具体组合方式见表 2-2。

表 2-2 分布式热电冷联产系统常用组成型式

序号	名称	特点	组合方案示意图
1	燃气轮机+直燃型吸收式制冷机	燃气轮机的高温排气可以直接接入直燃型吸收式机，用于制冷、供热。	
2	燃气轮机+余热锅炉（不补燃）+吸收式制冷机	发电量与供热制冷量具有一定耦合关系。	
3	燃气轮机+余热锅炉+汽轮机+吸收式制冷机	可进一步提高燃气蒸汽联合循环效率，使能源利用率提高。	

分布式热电冷联产的与基于热电厂的热电冷联产有以下优点：（1）实现热电冷联产可以通过进行余热回收，使用吸收式制冷机组提供空调或工艺用冷，可将能源效率提高到 70% 以上；（2）能源生产设备靠近用户，生产的热量、冷量和电量可直接使用，改进了功能的质量和可靠性，减少了输配电设备的投资和电网的输送损失；（3）装置容量小、占地面积小，初投资少，效益好^[19]。用户可以直接投资建设小型的分布式联产电站。（4）回收期短，一般只要 2~3 年^[20]。燃气轮机的发电容量见表 2。

表 2-3 燃气轮机的发电容量

技术类型	微型燃气轮机	迷你型燃气轮机	小型燃气轮机
容量范围 (kW)	30~200	200~1000	1000~15000

2.3 国内热电冷联产的节能研究动态

近几年,热电冷联产已备受关注,学术界对热电冷联产作了相关的大量工作。2003年度,中国电机工程学热电专业委员会召开了几次会议,主题涉及到热电冷联产的热经济性、技术经济性和工程推广与设计经验等。

对于热电冷联产系统的节能性问题,在国内学术界一直是有很大的争议。由于比较和计算方法不同,产生了不同的观点。下面介绍国内几种评价标准,主要有:制冷机性能系数,当量热力系数,节煤量,火用效率等。

2.3.1 制冷机的性能系数 COP^[21]

研究联产和对于分产节能性问题时,主要的区别是在制冷方面采用的是电压缩式制冷还是利用汽轮机排汽或抽汽热进行制冷。因此节能与否的主要争论就集中在制冷机的能源利用效率上。制冷机的性能系数定义为输出能量与输入能量的比值。

①压缩式制冷机的性能系数,也称为制冷系数 ξ :

$$\xi = \frac{Q_c}{W_{ce}} \quad (2-1)$$

式中: Q_c 为制冷量, kW; W_{ce} 为耗功量, kW。

②吸收式制冷机的性能系数,也称为热力系数 ζ :

$$\zeta = \frac{Q_c}{Q_{hc} + W_p} \approx \frac{Q_c}{Q_{hc}} \quad (2-2)$$

Q_{hc} 为耗热量, kW; W_p 为溶液泵耗功量, kW。

制冷机的性能系数在比较同种类型制冷机的制冷效果时,简单明了。但是对于不同种类的制冷机,不能单纯从制冷机的性能系数上进行比较,因为不同种类制冷机的输入能源不同,其品质也不相同。性能系数只是从量上说明,而没有从质上衡量。为了使能源得到充分利用,不仅要从量上进行比较,更要从质上说明孰优孰劣,以便指导能源的开发利用。

2.3.2 当量热力系数^[22,23]

当量热力系数是从能源品质的角度考虑，把不同品质的能源转换为一次能源进行比较，这样使得比较更准确，更具说服力。当量热力系数定义为：消耗 1kJ 燃料热能所得到的制冷量 kJ 数。

①压缩式制冷机的当量热力系数 ξ_{cc}

$$\xi_{cc} = \frac{Q_c}{W} \eta_g \eta_n \eta_m \quad (2-3)$$

式中， η_g 、 η_n 、 η_m 分别为全国平均火力发电效率、电网效率及拖动压缩机的电动机总效率。

②吸收式制冷机的当量热力系数 ξ_{ca}

吸收式制冷机的热源若采用汽轮机抽汽或背压排汽，由于蒸汽已经在汽轮机中作了功，设抽汽口或排汽口得到 1kJ 的热能所耗燃料热为 TkJ，而 1kJ 蒸汽热已做功 w kJ，每 1kW·h 在凝汽式汽轮机中所耗热能为 v ，故抽汽或排汽口处每得到 1kJ 热能实际上所耗燃料热能的 kJ 数为 $T - vw$ ，令 $\mu = 1/(T - vw)$ ， μ 表示每 1kJ 燃料燃烧产生的高位热相当于汽轮机抽汽或背压排汽口处低位热的 kJ 数。则吸收式制冷机的当量热力系数为：

$$\xi_{ca} = \frac{Q_c}{Q_b/\mu} \eta_p = \frac{Q_c}{Q_b} \mu \eta_p \quad (2-4)$$

式中， η_p 为蒸汽管道输送效率。

当量热力系数建立在热力学第二定律基础之上，从做功能力的角度对制冷机的性能进行评价，充分考虑了能源的品质，使能源得到充分利用，同时调动用户用能的积极性和正确性。但是对于 μ 值的计算式，国内还没有推导出，只是参照了前苏联巴赛尔克斯一书中的计算值。因此，对求 μ 值计算式显得尤为重要。

2.3.3 节煤量 ΔB ^[24-26]

通过计算热电冷联产的燃料节约量 ΔB 来评价三联产热经济性。根据情况不同，采用两种比较标准。

①热电冷联产与热电联产及压缩式制冷机制冷的组合相比较

$$\Delta B_c = [Q_c(n_i - n_x) + (W - W')(1 - \varepsilon)]b - (B' - B) \quad (2-5)$$

式中， ΔB_c 为节煤量(kgce/h)； Q_c 为制冷量(kW)； n_i 为压缩式制冷机的制冷电耗

(kW/kW); n_x 溴化锂制冷机的电耗(kW/kW); W 为供热式机组在有制冷负荷时的发电功率(kW); W' 为无制冷负荷时的发电功率(kW); B 为有制冷负荷时机组的耗煤量(kgce/h); B' 为无制冷负荷时机组的耗煤量(kgce/h); ε 为热电站厂用电率; b 为电网供电煤耗(kgce/kW·h)。

② 热电冷联产与热电冷分产相比较

建立数学模型时,是热电冷联产与区域锅炉房供热,凝汽式电厂发电及压缩式制冷机制冷的组合相比较。在供热量、制冷量及供电量相同的条件下,节煤量的表达式:

$$\Delta B_2 = [Q_{ho}(n_1 - n_2) - W(1 - \varepsilon)]b \frac{34.12Q_{ho}}{\eta_{b,d}\eta_{p,d}} B \quad (2-6)$$

式中, ΔB_2 为节煤量(kgce/h); W 为供热式机组发电功率(kW); Q_{ho} 为机组供热量(GJ/h); $\eta_{b,d}$ 为区域锅炉房锅炉效率; $\eta_{p,d}$ 为供热管道效率; B 为供热式机组的耗电量(kgce/h)。

节煤量是建立在热力学第一定律基础之上,其实质是按热量法来分配总热耗量,计算简单、直观、明确。但是,此计算式没有反映热、电、冷能量品位的不等价,又没有反映供热、制冷蒸汽参数品质差异的不等价,从而没有体现按质用能的原则。

2.3.4 热电冷联供系统发电煤耗^[27]

有的学者提出了热电冷联供系统发电煤耗,由于热电冷联产系统产出的有电和冷,是两种不同质的能,因而转换为相同品位的能源进行比较。首先,他们提出了吸收式制冷机等效发电效率 η_c 。

$$\eta_c = \frac{W_{cc} - W_a}{Q_b \eta_{sp}} \quad (2-7)$$

式中, η_c 为吸收式制冷机等效发电效率; W_{cc} 压缩式制冷机的电耗, kW; W_a 为吸收式制冷机的电耗, kW; Q_b 吸收式制冷机热耗; η_{sp} 电网输配效率。

对于热电冷联供系统,若仅考虑系统的发电和制冷而不研究供热,设所代替的压缩式制冷机电耗由发电效率为 η_{dv} 的电厂供给,则吸收式制冷机节省电量 $W_{cc} - W_a$ 所对应的一次能耗 Q_1 为:

$$Q_1 = \frac{W_{cc} - W_a}{\eta_{sp} \eta_{dv}} = \frac{Q_b \eta_c}{\eta_{dv}} \quad (2-8)$$

故而系统发电量 W_{sp} 所消耗的热量应为 $Q_0 - Q_1$; 于是热电冷联供系统发电效率的

定义如下:

$$\eta = \frac{W_{ry}}{Q_0 - Q_1} = \frac{W_{ry}}{Q_0 - Q_0 \eta_c / \eta_{tc}} \quad (2-9)$$

式中 W_{ry} 为热电冷联供系统发电量(扣除自用电), kW; Q_0 电厂总耗热量, kW; 而热电冷联供系统的发电煤耗(以标准煤计)为:

$$b = \frac{123}{\eta} = 123 \left(\frac{1}{\eta_E} - \frac{\alpha \eta_c}{\eta_{tc}} \right) \quad (2-10)$$

式中, 热电冷系统的热电比 $\alpha = Q_2 / W_{ry}$, 热电厂发电热效率 $\eta_E = W_{ry} / Q_0$ 。

评价热电冷系统是否节能, 可判断该系统发电煤耗是否小于作为比较对象的参考电厂发电煤耗即可。

由于电和冷品位不同, 因此比较不能简单的进行加减, 此评价指标把两种不同品质的能转换为相同品质的一次能源进行比较, 此评价比较合理。

2.3.5 火用能级 E_{Tj} [28,29]

从各自能量转换过程中的实际做功能力不同出发, 提出系统火用能级 E 及火用能级因子 R 。

(1) 联产系统的火用能级 E_{Tj} 和火用能级因子 R_{Tj} :

$$E_{Tj} = B_{Tj} q_l - \Delta E_{Tj,b} - \Delta E_{Tj,c} - \Delta E_{Tj,t} - \Delta E_{Tj,r} - \Delta E_{Tj,s} - \Delta E_{Tj,mg} - \Delta E_{Tj,m} \quad (2-11)$$

$$R_{Tj} = \frac{E_{Tj}}{B_{Tj} q_l} \quad (2-12)$$

式中, B_{Tj} 为联产系统燃料量, kg/h; q_l 为燃料低位发热量, kJ/kg; $\Delta E_{Tj,b}$ 、 $\Delta E_{Tj,c}$ 、 $\Delta E_{Tj,t}$ 、 $\Delta E_{Tj,r}$ 、 $\Delta E_{Tj,s}$ 、 $\Delta E_{Tj,mg}$ 、 $\Delta E_{Tj,m}$ 分别表示联产系统锅炉、管道、汽轮机做功、回热及热网(供热、冷)加热器换热温差、凝汽器内换热温差和机械、发电火用损及其它火用损, kJ/kg。

(2) 分产系统火用能级 E_d 及能级因子 R_d :

$$E_d = (B_d^e + B_d^h) q_l - 3600 W_{ce} - \Delta E_{d,b} - \Delta E_{d,c} - \Delta E_{d,t} - \Delta E_{d,r} - \Delta E_{d,s} - \Delta E_{d,mg} - \Delta E_{d,m} \quad (2-13)$$

$$R_d = \frac{E_d}{(B_d^e + B_d^h) q_l + 3600 W_{ce}} \quad (2-14)$$

式中, B_d^e 、 B_d^h 分别为分产发电和供热燃煤量, kg/h; W_{ce} 为制冷所需电功率(kW); $\Delta E_{d,b}$ 、 $\Delta E_{d,c}$ 、 $\Delta E_{d,t}$ 、 $\Delta E_{d,r}$ 、 $\Delta E_{d,s}$ 、 $\Delta E_{d,mg}$ 、 $\Delta E_{d,m}$ 分别表示分产系统锅炉、主

蒸汽管道、发电凝气流汽轮机做功、回热及供热热网加热器换热温差、凝汽器内换热温差和发电凝气流之机械及发电火用损、制冷系统火用损和其它火用损, kJ/kg。

用系统火用能级 E 及火用能级因子 R 作为评价标准,其实质是以热力学第二定律为基础,肯定了能量是有品质的,比较完全的比较了两个不同系统利用能源的程度和有效率。但是从式中可看出,这些火用损有不确定性,随着参数变化。也因为比火用因地而异,计算比较复杂,而且火用概念比较抽象,不易被非专业人员理解,不便于广泛采用。

2.3.6 火用效率^[30,31]

系统火用效率 η_{ex}

$$\eta_{ex} = \frac{N + Q_h \left(1 - \frac{T_c}{T}\right) - Q_c \left(\frac{T_c}{T} - 1\right)}{G_f E_f} \quad (2-15)$$

式中, N 为发电功率, kW; Q_h 供热量, kJ/h; Q_c 制冷量, kJ/h; T_0 为环境温度, K; T 为高温热源温度, K; T_c 为低温热源温度, K; G_f 为燃料消耗量, kg/h; E_f 为燃料火用, kJ/kg。此评价标准与上面的相似,优缺点也相似。

2.3.7 发电量减少法^[32]

利用热电厂的抽汽或背压排汽作为吸收式制冷机的热源。由于只有高于环境温度热能才能利用,供热蒸汽压力总是高于凝汽器压力,从而导致消耗同等量燃料热量所发电量要比被替代的凝汽式发电厂少,把所减少发电量,折合成一次燃料热,即应为联产供热或制冷所消耗的能量。有学者此法简称为发电量减少法。

供热汽轮发电机组的耗热量 Q (GJ/h):

$$Q = \frac{(1 + 0.0036\omega) Q_b \eta_b \eta_p}{K} \quad (2-16)$$

式中, Q_b 为供热量(GJ/h); K 为热电厂的热能利用系数; ω 为供热电能生产率; η_b 、 η_p 分别为锅炉效率和管道效率。

相同耗热量 Q 的凝汽式发电厂发电量 W (kW):

$$W = \frac{Q \eta_{pc}}{0.0036 \eta_{sc} \eta_{pc}} \quad (2-17)$$

式中， η_{pt} 、 η_{bc} 、 η_{pc} 分别为凝汽式发电厂的总效率、锅炉效率、管道效率。

联产供热的一次能耗量 $PE_h(\text{GJ/h})$ ：

$$PE_h = \frac{0.0036(W - W_h)}{\eta_{pt}} \quad (2-18)$$

式中， W_h 为联产机组发电量 (kW)。

联产供热的一次能耗率 PER_h ：

$$PER_h = \frac{PE_h}{Q_h} = \frac{(1 - 0.0036\omega)\eta_s\eta_p}{\eta_{bc}\eta_{pc}K} \frac{0.0036\omega}{\eta_{pt}} \quad (2-19)$$

同理得联产制冷一次能耗率 PER_r ：

$$PER_r = \frac{(1 - 0.0036\omega)\eta_s\eta_p}{COP} \frac{0.0036\omega}{\eta_{pt}} \quad (2-20)$$

式中， COP 为制冷机性能系数。

冷热联供系统的全年能耗为：

$$\sum Q = Q_c \cdot H_c \cdot PER_r + Q_h \cdot H_h \cdot PER_h \quad (2-21)$$

式中， H_c 和 H_h 分别为制冷和供热的年当量满负荷运行小时数，h/a。

从上面几种评价标准可看出，研究热电冷联产系统节能性，目前主要是以热力学第一定律和第二定律为基础。但由于热力学第一定律只是从能量守恒的角度进行分析，而没有考虑能源品位高低，对于能源利用没有遵从能源梯级利用原则。因而，在节能分析上更多的是从热力学第二定律出发，使能源在利用上能按质供能。以上几种评价标准是从不同的角度对热电冷联产的节能性进行分析，具有一定代表性和参考价值。

3 基于热电厂的热电冷联产节能分析

常见的热电冷联产系统有两种，一种是热电厂热电冷联产系统，利用锅炉产生的高压高温蒸汽带动汽轮机发电，同时利用汽轮机的抽汽或背压排汽对外供热和驱动吸收式制冷机组制冷；另一种是楼宇热电冷联产，利用燃气轮机发电，其排气余热直接或间接用于供热和带动吸收式制冷机组制冷。本章讨论基于热电厂的热电冷联产系统的节能性，针对上章叙述的几种评价标准存在的一些问题，本文对此将进行更全面的分析。

3.1 热电冷联产系统比较的基础

对热电冷联产系统进行节能分析，首先要确定比较基础。基于热电厂的热电冷联产系统是在热电联产的基础上，利用汽轮机的抽汽或背压排汽作为吸收式制冷机的热源，向用户提供冷量。比较的模型有两种：一种是热电联产冷分产，即采用热电厂的供热机组，对外供暖，制冷采用电压缩式制冷机；另一种是热电冷均分产，也就是凝汽式电厂（也称为替代电厂）发电，区域锅炉供暖，电压缩式制冷机制冷。

表 3-1 给出了三种要比较的热、电、冷能源供应方案。这三种系统分别如图 3-1、图 3-2 和图 3-3 所示。

表 3-1 三种热、电、冷能源方案

方案	电力供应方式	采暖方式	空调方式
方案 1 热电冷三联产	供热式汽轮机发电	热电厂抽汽或排汽+汽水热交换	热电厂抽汽或排汽+吸收式制冷机
方案 2 热中联产冷分产	供热式汽轮机发电	热电厂抽汽或排汽+汽水热交换	电压缩式制冷机
方案 3 热电冷分产	电网供电	区域锅炉房供暖	电压缩式制冷机

比较这三种系统的能耗，首先应设定可比条件，即根据能量供应相等的原则，设定各个系统对外供应的供热量、供冷量和发电量分别相等，分别为 $Q_{\text{热}}(\text{kW})$ 、 $Q_{\text{冷}}(\text{kW})$ 、 $W(\text{kW})$ ，制冷机所耗电量从电网取得。

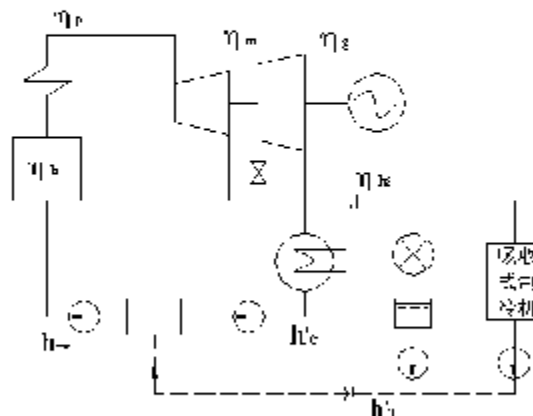


图 3-1 热电冷联产示意图

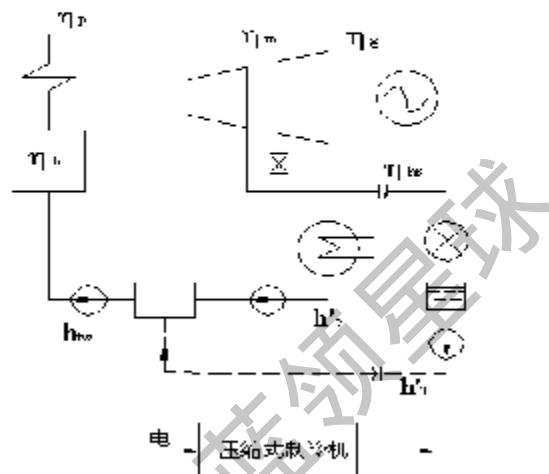


图 3-2 热电联产冷分产示意图

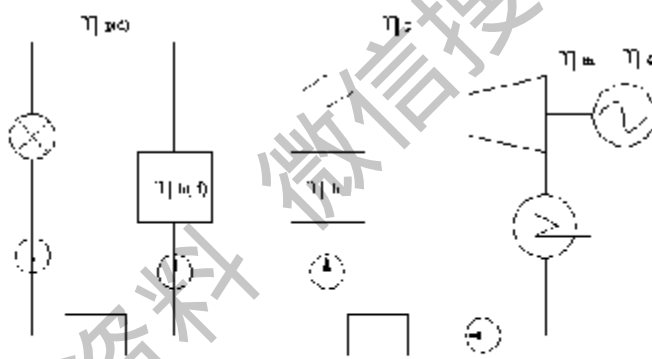


图 3-3 热电冷分产示意图

3.2 数学模型的建立

根据上面的比较对象，确立比较模型。由于热电冷联产系统包括三部分的能耗：制冷能耗、供热能耗、发电能耗。本文将分别对这三部分一次能耗进行比较分析。

组成热电冷联产系统的各种设备所消耗的能量品位和来源不同，向外输出的能量为三种不同质的能，因而其做功能力不同。为了能从本质上比较三种能量，就应有统一的比较标准，即从产能的一次燃料消耗量，进行能耗的分析比较，把它们都折算为一次能源消耗量。

3.2.1 制冷系统的当量热力系数

前文提到的 μ 值，在各文献中还没有针对国内供热机组的计算表达式，本文对

此作了推算。

热电冷联产系统对外供热和溴化锂吸收式制冷机的热源是汽轮机的抽汽或是背压排汽，由于蒸汽已经在汽机中作了部分功 w (kW·h)，而每 1 kW·h 在凝汽机组中所耗热能为 γ kJ，所以在汽机抽汽口得到每 1kJ 的热能本应所耗燃料热能 T kJ 再减除 $w\gamma$ kJ，即

$$V(T-w\gamma) \text{ 令 } \mu = \frac{1}{V} \frac{1}{T-w\gamma} \quad (3-1)$$

μ 表示每 1kJ 燃料燃烧产生的高位热能相当于抽汽口处低位热能的 kJ 数，由于没有 μ 值的具体计算式，因此下面进行推算。

抽汽口每 kg 蒸汽可供热能

$$q_b = h_b - h'_b \quad (3-2)$$

式中， q_b —抽汽口每 kg 蒸汽可供热能；

h_b —抽汽口处蒸汽焓，kJ/kg；

h'_b —所抽蒸汽的饱和水焓，kJ/kg。

每 kg 抽汽耗能所消耗的燃料热 q 为：

$$q = \frac{q_b}{\eta_b \eta_p} \quad (3-3)$$

式中， η_b —锅炉效率；

η_p —管道效率。

在汽机抽汽口得到每 1kJ 的热能本应所耗燃料热能为：

$$T = \frac{q}{\eta_b \eta_p} = \frac{1}{\eta_b \eta_p} \quad (3-4)$$

1kJ 所抽蒸汽在汽轮机中已做的功为：

$$w = \frac{h_b - h'_b}{q_b \times 3600} \times \eta_m \eta_g \quad (3-5)$$

式中， w —1kJ 所抽蒸汽在汽轮机中已做的功，kW·h/kJ；

h_b —汽轮机进口蒸汽焓，kJ/kg；

η_m —汽轮发电机组机械效率；

η_g —发电机效率。

1kg 蒸汽在替代电厂中做功为：

$$w'=(h_0-h_c)\eta_m\eta_g/3600 \quad (3-6)$$

式中, w' —1kg 蒸汽在替代电厂中所做的功, kW·h/kg;

h_c —汽轮机排汽焓, kJ/kg。

1kW·h 的功需要蒸汽量为:

$$d=\frac{1}{w'}=\frac{3600}{(h_0-h_c)\eta_m\eta_g} \quad (3-7)$$

式中, d —1kW·h 的功需要蒸汽量, kg/(kW·h)

每 kW·h 功的热耗为:

$$\gamma=\frac{d \times (h_0-h_{jw})}{\eta_i\eta_p} \quad (3-8)$$

式中, γ —每 kW·h 功的热耗, kJ/(kW·h)

h_{jw} —锅炉给水焓, kJ/kg

由 $\mu=\frac{1}{V}=\frac{1}{T-w\gamma}$, 把 (3-1) ~ (3-7) 式代入可得到 μ 的计算式为:

$$\mu=\frac{1}{T-w\gamma}=\frac{1}{T-\frac{1}{(h_0-h_c)\eta_m\eta_g} \frac{(h_0-h_{jw})(h_0-h_c)\eta_i\eta_p}{\eta_i\eta_p (h_0-h_b)(h_0-h_c)-(h_0-h_b)(h_0-h_{jw})}} \quad (3-9)$$

当量热力系数 ξ 是指消耗一次能源 (燃料) 热能后, 能够产生多少冷量, 即消耗 1kJ 燃料热能所得到的制冷量 kJ 数。本文从系统的角度提出, 制冷系统的当量热力系数, 作为热电冷联产制冷系统节能的一个评价指标。制冷系统的当量热力系数是指系统消耗 1kJ 的一次燃料热能, 能输出多少 kJ 冷量。制冷系统设备主要包括制冷主机, 冷水泵, 冷却水泵, 冷却塔风机。制冷系统能耗包括两部分: 一是制冷机的能耗量, 二是冷水泵、冷却水泵和冷却塔风机等设备的耗电量。

(1) 热电冷联产吸收式制冷系统的当量热力系数计算。热电冷联产吸收式制冷系统的能耗包括两部分: 一是吸收式制冷机组的耗热量; 二是系统的耗电量, 包括溶液泵、冷却水泵、冷水泵和冷却塔风机等设备的耗电量, 则制冷系统的当量热力系数为:

$$\xi_{ca}=\frac{Q_c}{Q_{hc}/(\eta_{h_0})+W_e/(\eta_e\eta_c)} \quad (3-10)$$

式中, Q_c —吸收式制冷机的制冷量, kW;

Q_{ac} — 制冷机所需的热能, kW;

W_a — 溴化锂吸收式制冷系统的耗电量, kW;

η_{hs} — 供热效率;

η_e — 发电厂效率, 取全国平均水平发电效率 0.33;

η_n — 电网效率, 取为 0.90。

(2) 电压缩式制冷系统的当量热力系数计算。电压缩式制冷系统的能耗包括两部分: 一是压缩式制冷机的耗电量; 二是制冷系统的耗电量, 包括冷水泵、冷却水泵和冷却塔风机等设备的耗电量。根据定义, 电压缩式制冷系统的当量热力系数 ξ_{ce} 可表示为:

$$\xi_{ce} = \frac{Q_c}{W_c / (\eta_e \eta_n) + W'_c / (\eta_e \eta_n)} = \frac{Q_c \eta_e \eta_n}{W_c - W'_c} \quad (3-11)$$

式中, Q_c — 电压缩式制冷机的制冷量, kW;

W_c — 电压缩式制冷机耗电量, kW;

W'_c — 冷却水泵、冷水泵和冷却风机总的耗电量, kW。

3.2.2 热电冷联产系统的一次能耗

3.2.2.1 热电冷联产供热的一次能耗

由于供热蒸汽先在汽轮机中做过功, 因而它实际所耗一次能源应扣除做功所耗一次能源。设供热量为 Q'_{hs} , 则供热一次能耗为:

$$PE_{ht} = \frac{Q'_{hs}}{\mu \eta_{hs}} \quad (3-12)$$

式中 PE_{ht} — 热电冷联产系统供热一次能耗, kW;

Q'_{hs} — 热用户所需热量, kW;

η_{hs} — 供热效率。

3.2.2.2 热电冷联产制冷的一次能耗

由一次能耗率的公式 $PER = 1/\xi_{ca}$, 热电冷联产系统制冷的一次能耗为:

$$PE_{cr} = \frac{Q_c}{\xi_{ca}} = Q'_c / (\mu \eta_{hs}) + W_c / (\eta_e \eta_n), \quad (3-13)$$

式中, PE_{cr} — 热电冷联产系统制冷的一次能耗, kW;

Q'_c — 吸收式制冷机所需热量, kW。

又由制冷机的性能系数 COP 定义: $COP_{ca} = \frac{Q_c}{Q'_k}$,

上式可化为:

$$PE_{c,c} = \frac{Q_c}{COP_{ca} \cdot \mu \cdot \eta_{hc}} = \frac{W_c}{\eta_s \eta_{sc}} \quad (3-14)$$

3.2.2.3 热电冷联产系统发电一次能耗

热电冷联产系统发电量 W 包括三个部分: 供热汽流发电 W_{ha} 、制冷汽流发电 W_{hc} 、凝汽汽流发电 W_c , 即 $W = W_{ha} + W_{hc} + W_c$ 。 W_{ha} 和 W_{hc} 是在供热循环基础上的发电量。下面计算热电冷联产系统发电的一次能耗 (PE_{el})。

由 $W = W_{ha} + W_{hc} + W_c$, 得热电冷联产系统发电的一次能耗为:

$$PE_{el} = PE_{e,ha} + PE_{e,hc} + PE_{e,c} \quad (3-15)$$

式中, $PE_{e,i}$ —发电的一次能耗, kW;

$PE_{e,ha}$ —供热汽流发电的一次能耗, kW;

$PE_{e,hc}$ —制冷汽流发电的一次能耗, kW;

$PE_{e,c}$ —凝汽汽流发电的一次能耗, kW。

$PE_{e,ha}$ 、 $PE_{e,hc}$ 、 $PE_{e,c}$ 的计算式分别为:

$$PE_{e,ha} = \frac{W_{ha}}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_f \eta_{sc}} \quad (3-16)$$

$$PE_{e,hc} = \frac{W_{hc}}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_f \eta_{sc}} \quad (3-17)$$

式中 $\eta_{sc} = \frac{W_c}{Q_0}$, 表示供热汽流在汽轮机中实际内效率, 实际内功 W 与热耗 Q_0 之比。

$$PE_{e,c} = \frac{W_c}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_f \eta_{sc}} \quad (3-18)$$

把式 (3-16) ~ (3-18) 代入式 (3-15), 则热电冷联产系统发电的一次能耗为:

$$PE_{el} = PE_{e,ha} + PE_{e,hc} + PE_{e,c}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{W_{ha}}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta'_{ib}} + \frac{W_{hc}}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta'_{ib}} + \frac{W_c}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_c} \\
 &= \frac{W_a}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta'_{ib}} + \frac{W_c}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_c}
 \end{aligned} \tag{3-19}$$

式中， η_{ib} —供热汽流发电绝对内效率；

η_{ic} —凝汽汽流发电绝对内效率。

热电冷三联产系统一次能耗为： $PE_1 - PE_{h1} + PE_{c1} - PE_{c2}$ ；

3.2.3 热电联产冷分产系统的一次能耗

热电联产冷分产系统是指热电厂向外供电供暖，制冷系统采用电制冷机，也即是现在大多数所采用的形式。热电联产冷分产系统中，由于热电厂夏季热负荷低，机组在非设计负荷下运行，从而使供热机组夏季效率降低，设备利用率低。

热电联产冷分产系统的一次能耗同样也包括三部分：热电联产中发电一次能耗和供热一次能耗，还有电制冷一次能耗。压缩式电制冷机用电取自电网，采用全国平均发电水平。

3.2.3.1 热电联产冷分产系统供热的一次能耗

热电联产冷分产系统对外供热采用汽轮机的抽汽或是排汽，其供热一次能耗 PE_{h2} 与热电冷联产系统的供热一次能耗实质相同，因而两者计算式也相同，即

$$PE_{h2} = PE_h = \frac{Q_{hs}}{H\eta_{hs}}$$

3.2.3.2 热电联产冷分产系统制冷的一次能耗

电压缩式制冷系统的能耗包括两部分：一是压缩式制冷机的耗电量，二是冷水泵、冷却水泵和冷却塔风机等设备的耗电量。则电压缩式制冷系统的当量热力系数可表示为：

$$\xi_{ec} = \frac{Q_c}{W_c / (\eta_c \eta_n) + W'_c / (\eta_c \eta_n)} = \frac{Q_c \eta_c \eta_n}{W_c - W'_c} \tag{3-20}$$

式中 Q_c —电压缩式制冷机的制冷量，kW；

W_c —电压缩式制冷机耗电量，kW；

W'_c —冷却水泵、冷水泵和冷却风机总的耗电量，kW。

则热电联产冷分产系统制冷的一次能耗为：

$$PE_{c1} = \frac{Q_c}{\xi_{ca}} = \frac{W_e + W_c}{\eta_s \eta_a} \quad (3-21)$$

式中， PE_{c1} 为热电联产冷分产系统制冷的一次能耗，kW。

3.2.3.3 热电联产冷分产系统发电的一次能耗

热电联产冷分产系统发电 W ，可视为供热汽流发电 W_{hs} 与凝汽汽流发电 W_c 之和，即 $W = W_{hs} + W_c$ 。

热电联产冷分产系统发电的一次能耗为：

$$PE_{e2} = \frac{W_{hs}}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_{st}} + \frac{W_c}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_v} \quad (3-22)$$

式中， PE_{e2} —热电联产冷分产系统发电一次能耗，kW。

热电联产冷分产系统的一次能耗为： $PE_{e1} = PE_{e2} + PE_{c1} + PE_{c2}$

3.2.4 热电冷分产系统的一次能耗

热电冷分产系统是区域锅炉房供热，凝汽式电厂发电及电压缩式制冷机制冷的组合。此系统的一次能耗包括：区域锅炉房供热一次能耗，凝汽式电厂发电一次能耗，和电制冷机制冷的一次能耗。

3.2.4.1 热电冷分产系统供热的一次能耗

由于供热采用的是区域锅炉房供热，因此供热一次能耗为：

$$PE_{h2} = \frac{Q'_{hs}}{\eta_{b(2)} \eta_{p(2)}} \quad (3-23)$$

式中， PE_{h2} —热电冷分产系统供热一次能耗，kW；

Q'_{hs} —热电冷分产系统供热量，kW；

$\eta_{b(2)}$ —热电冷分产系统区域锅炉效率；

$\eta_{p(2)}$ —热电冷分产系统管道效率。

3.2.4.2 热电冷分产系统制冷的一次能耗

热电冷分产系统制冷采用电压缩式制冷机，因此其一次能耗与热电联产冷分产系统制冷一次能耗相同，即 $PE_{c3} = PE_{c2}$ 。

3.2.4.3 热电冷分产系统发电的一次能耗

在此系统中采用凝汽电厂发电，故发电一次能耗为：

$$PE_{e3} = \frac{W}{\eta_b \eta_p \eta_c \eta_g \eta_i} \quad (3-24)$$

式中， PE_{e3} —热电冷分产系统发电一次能耗，kW；

W —凝汽式电厂发电量，kW；

η_i —凝汽式发电厂的绝对内效率。

则热电冷分产系统一次能耗 PE_3 为：

$$PE_3 = PE_{ha} - PE_{c1} + PE_{e3} = \frac{Q'_{ha}}{\eta_{ha} \eta_{p(d)}} - \frac{Q_c}{\xi_{cc}} + \frac{W}{\eta_b \eta_p \eta_c \eta_g \eta_i} \quad (3-25)$$

3.3 各系统一次能耗比较

下表是各种系统各部分一次能耗计算公式。通过对供热机组选型，可分别计算出各系统的一次能耗，并且进行比较分析。一次能耗率即为消耗一次能与产生的能量之比。

表 3-2 各系统一次能耗表

	制冷一次能耗	发电一次能耗	供热一次能耗
热电冷联产系统	$\frac{Q'_{ha} + W_c}{\mu \eta_{ha} \eta_c \eta_g}$	$\frac{W_a}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_i} + \frac{W_c}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_c}$	$\frac{Q'_{ha}}{\mu \eta_{ha}}$
热电联产冷分产系统	$\frac{W_a + W_c}{\eta_c \eta_m}$	$\frac{W_{ha}}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_i} + \frac{W_c}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_c}$	$\frac{Q'_{ha}}{\mu \eta_{ha}}$
热电冷分产系统	$\frac{W_a + W_c}{\eta_c \eta_m}$	$\frac{W}{\eta_m \eta_g \eta_b \eta_p \eta_i}$	$\frac{Q'_{ha}}{\eta_{ha} \eta_{p(d)}}$

4 热经济性计算与分析

4.1 三联产制冷系统与电压缩式制冷系统节能分析

4.1.1 μ 值与汽轮机组参数的关系

经过计算,发现 μ 值大小与供热式机组的初参数和抽汽参数(或背压排汽参数)有关,图4-1给出了 μ 值与汽轮机进汽压力和抽汽压力(或背压排汽压力)的关系曲线,图4-2给出了汽轮机进汽压力、抽汽(排汽)压力和 μ 值大小关系三维图。

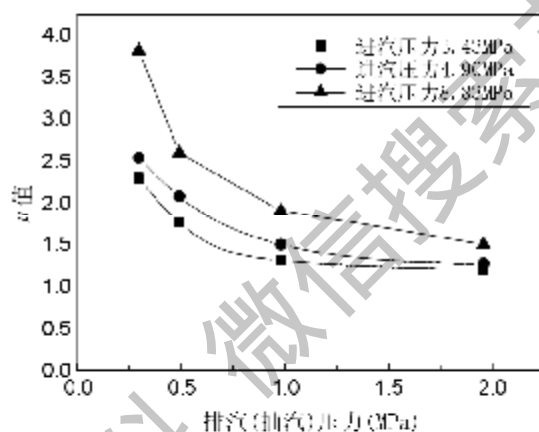


图4-1 μ 与汽轮机抽汽参数(排汽参数)的关系

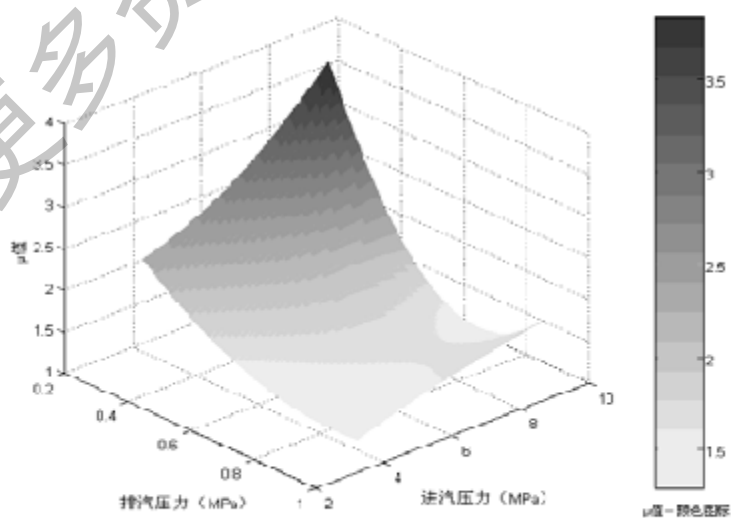


图4-2 μ 值与汽轮机进汽压力和抽汽(排汽)压力的关系

从图中可看出，汽轮机初参数一定的情况下，抽汽或背压排汽的压力越低， μ 值越大；在抽汽或背压排汽压力一定的情况下，汽轮机进汽压力越高， μ 值越大。

4.1.2 三联产制冷系统的节能性及其影响因素

表 4-1 是制冷量为 1163kW 的三联产吸收式制冷系统与分产电压缩式制冷系统的能耗比较。表中的 W_a 、 W_{p1} 、 W_{p2} 、 W_f 、 W_{p3} 分别表示制冷机组的耗电量、冷水泵的耗电量、冷却水泵的耗电量、冷却塔风机的耗电量和吸收式制冷机的溶液泵的耗电量， W_T 表示设备总耗电量， Q 表示蒸汽热能。根据表 4-1 制冷系统的能耗，可分别计算出它们的总的一次能耗和当量热力系数。表中的 ξ_c 表示制冷系统当量热力系数。

表 4-1 1163kW 制冷系统能耗比较表

	压缩式制冷系统			吸收式制冷系统					
	活塞式	螺杆式	离心式	$\mu=3.2$		$\mu=2.65$		$\mu=1.86$	
				单效式	双效式	单效式	双效式	单效式	双效式
$W_a(\text{kW})$	281.16	247.70	231.40	—	—	—	—	—	—
$W_{p1}(\text{kW})$	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34
$W_{p2}(\text{kW})$	26.96	26.96	26.96	63.15	48.58	63.15	48.58	63.15	48.58
$W_f(\text{kW})$	8.25	8.25	8.25	16.09	12.38	16.09	12.38	16.09	12.38
$W_{p3}(\text{kW})$	—	—	—	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
$W_T(\text{kW})$	348.70	315.25	298.95	117.58	99.30	117.58	99.30	117.58	99.30
$Q(\text{kW})$	—	—	—	1795.16	945.45	1661.43	903.93	1661.43	903.93
性能系数 COP 值	4.13	4.70	5.03	0.64	1.23	0.69	1.29	0.69	1.29
一次能 (kW)	1174.1	1061.4	1006.6	956.8	629.7	1022.8	675.4	1289.1	820.2
ξ_c	0.99	1.09	1.16	1.21	1.85	1.14	1.72	0.90	1.42

注：耗电量数据来自文献[33]，蒸汽热能 kW 参考 [34] [35]

三联产制冷系统相对于分产电压缩式制冷系统的节能性主要取决于两种制冷系统采用的制冷机组的性能系数和 μ 值的大小，下面分别进行论述。

4.1.2.1 制冷机组性能系数对节能性的影响

由表 4-1 可看出，对电压缩式制冷系统，若采用不同类型的制冷机组，因制冷机组的性能系数 COP 值不同，制冷系统的一次能耗不一样，当量热力系数也不一样。不同类型的电压缩式制冷系统一次能耗的顺序由大到小依次为：活塞式>螺杆式>离心式。图 4-3 给出了电制冷机性能系数与制冷系统一次能耗的关系图。对于吸收式制冷系统，双效式溴化锂吸收式制冷机的性能系数明显高于单效式制冷机，因此其系统的一次能耗明显低于单效式制冷机制冷系统的一次能耗，如图 4-4 所示。

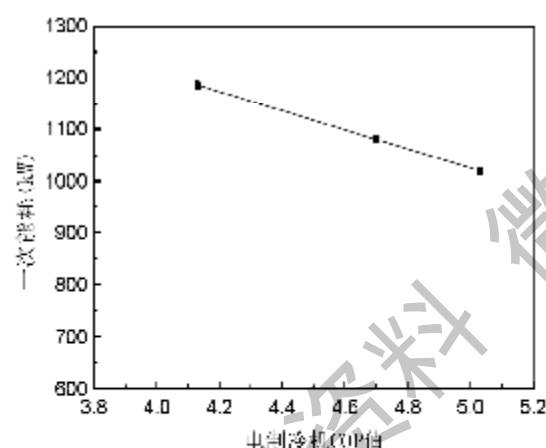


图 4-3 电压缩制冷系统一次能耗与制冷机性能系数的关系

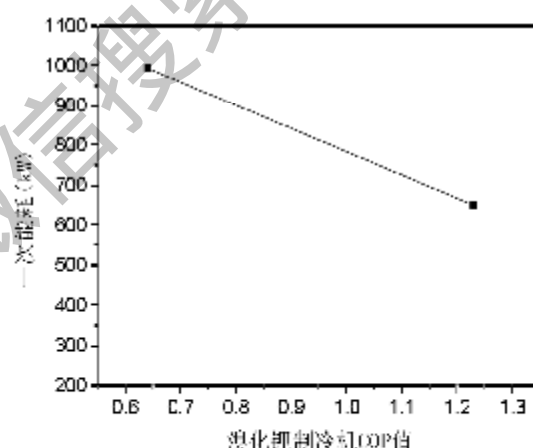


图 4-4 吸收式制冷机性能系数与系统一次能耗的关系

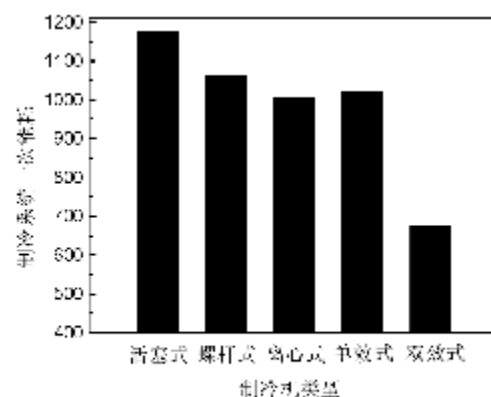


图 4-5 溴化锂吸收式制冷机 μ 值为 2.65 时，各种制冷系统能耗

4.1.2.2 μ 值大小对三联产制冷系统节能性的影响

μ 值对三联产制冷系统的一次能耗影响很大。图 4-6 给出了制冷系统一次能耗与 μ 值大小关系。 μ 值越大，抽汽口处每 kJ 热能相当于一燃料热能数越小，因此制冷机消耗的一次能耗越低，三联产制冷的一次能耗就越低。

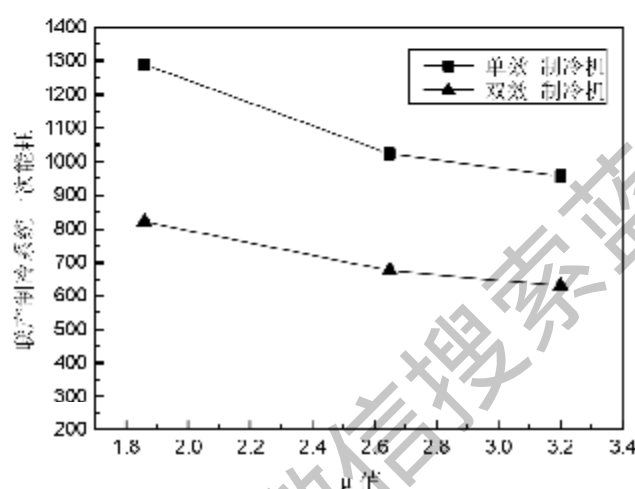


图 4-6 三联产制冷系统一次能耗与 μ 值关系

当 μ 值较大时，采用双效溴化锂制冷机，三联产制冷系统一次能耗明显小于电压缩式制冷系统的一次能耗，两系统当量热力系数之比达到了 1.86~1.43:1。值得注意的是，当 μ 值较小时（热电机组为背压式中压机组，其蒸汽初参数不高，而排汽压力较高），单效吸收式制冷系统的一次能耗还大于电压缩式制冷系统的一次能耗。

吸收式制冷系统的当量热力系数与 μ 值大小有很大关系。不同的蒸汽初参数和汽轮机抽汽或背压排汽参数，吸收式制冷系统的当量热力系数不相同。汽轮机蒸汽进口参数越高，汽轮机抽汽或背压排汽参数越低，则 μ 值越大，相应地，热电冷联产吸收式制冷系统的当量热力系数亦越大，三联产制冷系统的节能性越好。

总之，热电冷三联产的溴化锂吸收式制冷系统，相对于电压缩式制冷系统的节能性主要与以下两个因素有关：一是两种系统所采用制冷机的性能系数，即 COP 值；另一个是热电冷三联产的 μ 值。现在从经济效益考虑，一般常用的是双效的吸收式制冷机。表 4-2 是当热电冷三联产制冷系统采用双效溴化锂制冷机时， μ 值不同的情况下，相对于各种电压缩式制冷机制冷系统的节能率数据表。根据此表，绘出了三联产制冷系统节能率与 μ 值和制冷机类型的关系图，见图 4-7。

表 4-2 三联产制冷系统采用双效溴化锂制冷机的节能率

电制冷机类型	三联产制冷系统相对于分产电制冷系统的节能率 (%)		
	$\mu=3.2$	$\mu=2.65$	$\mu=1.86$
离心式	37.4	32.9	18.5
螺杆式	40.6	36.4	22.6
活塞式	46.4	42.5	36.1

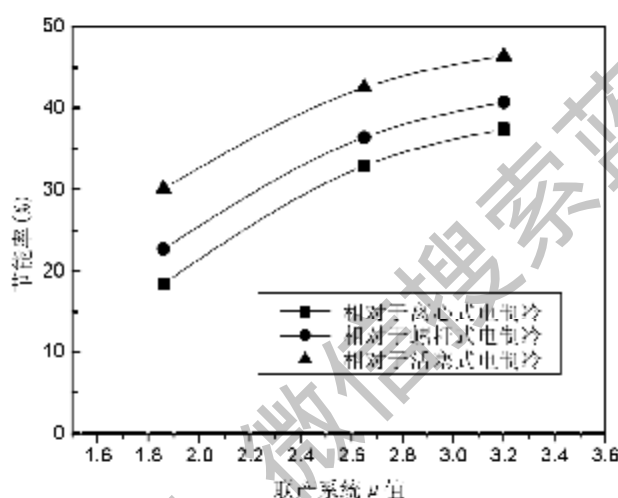


图 4-7 三联产制冷系统节能率与 μ 值和制冷机类型的关系

4.2 三联产系统和热电联产、冷分产系统的热经济性比较

热电厂一年的热负荷可分为比较稳定的常年热负荷和随季节变化的热负荷。所以按时间来看，热电厂机组的运行有三种典型的工况：需要生活供热的冬季、需要制冷的夏季和既不需要生活供热，也不需要制冷的过渡期。由于三联产是在热电联产的基础上发展起来的，在比较这两个系统时，在冬季和过渡期他们的热负荷相同，热经济性也相同。所以只要比较夏季有制冷需求的情况。下面对两种系统分别为背压式供热机组和抽凝式机组的能耗进行比较。

4.2.1 背压式供热机组的节能性比较与分析

4.2.1.1 理论计算公式

按照论文第三部分的数学模型，当两种系统都采用背压式供热机组时，它们的热力系统图分别如图 4-8 和图 4-9 所示。在夏季，三联产热负荷大，按照以热负荷定

其电负荷，根据能量供应相等的原则，这时三联产发电量的不足部分 ($W-W_{in}$) 要由电力系统补偿 W_{cs} ，补偿电量消耗的一次能按电网中火电机组的平均发电水平所需的一次能耗计算。设热电厂夏季供热热负荷（常年热负荷） Q_{hs} 是机组额定总供热 Q_b 时的 X ($X < 1$ ，是实际供热热负荷与额定供热热负荷之比) 倍，此时，三联产背压机组进汽量是 $X D_0$ 。

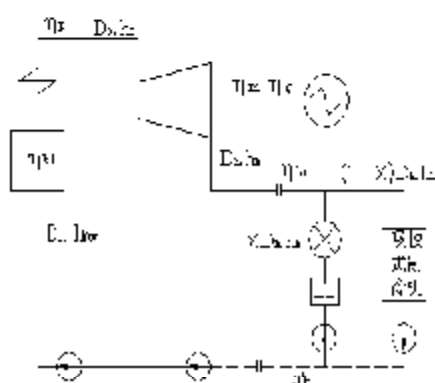


图 4-8 三联产采用背压机的热力系统图

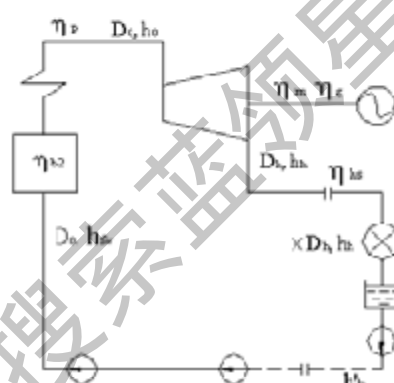


图 4-9 三联产采用背压机的热力系统图

根据系统能耗数学模型，对两种系统进行分析，得出他们的具体计算公式，分别如表 4-3 和表 4-4 所示。注：表中各符号意义见图 4-8 和图 4-9 所示。

表 4-3 三联产系统各部分一次能耗计算公式

项目	计算公式	编号
总供热量	$Q_b = Q_{hs} + Q_{hw} = D_b (h_b - h_b)$	(4-1)
背压机组消耗的总一次能	$Q_0 = D_0 (h_0 - h_b) / \eta_b \eta_p$	(4-2)
三联产供热的一次能耗	$PE_{ht} = Q_{hs} / \mu_t$	(4-3)
单个吸收式制冷系统所需的一次能 pe_{ca}	$pe_{ca} = q'_{hc} / (\mu_c \eta_{ac}) - w_a / (\eta_c \eta_a)$ $q_{hc} / \mu_c + w_a / (\eta_c \eta_a)$	(4-4)
Q_{hs} 的热量可供 α 个耗热量为 q'_{hc} 的制冷系统	$\alpha = Q_{hs} / q'_{hc}$	(4-5)
三联产制冷系统的一次能耗	$PE_{rl} = \alpha pe_{ca}$	(4-6)
三联产发电的一次能耗	$PE_{el} = W / (\eta_m \eta_g \eta_s \eta_p \eta'_{st})$ $- Q_0 - Q_{hw} / \eta_c$	(4-7)
三联产系统总的一次能耗	$PE_T = PE_{ht} + PE_{rl} + PE_{el}$	(4-8)

表 4-4 热电联产、冷分产系统各部分一次能耗计算公式

项目	计算公式	编号
总供热量	$Q_{hs} = X \cdot D_h (h_h - h_k)$	(4-9)
背压机组消耗的总一次能	$Q_{\sigma} = X \cdot D_h (h_p - h_h) / \eta_{hs} \eta_p$	(4-10)
三联产供热的一次能耗	$PE_{h2} = Q_{hs} / \mu_2$	(4-11)
单个电制冷系统的一次能耗为	$pe_{es} = (w_e + w'_e) / (\eta_e \eta_s)$	(4-12)
三联产电制冷系统的一次能耗为	$PE_{e2} = \alpha pe_{es}$	(4-13)
三联产进汽 $X \cdot D_h$ 时的发电量为	$W_{in} = X \cdot W \cdot \eta_T$ η_T 为进气 $X \cdot D_h$ 工况下汽轮机相对内效率与额定工况下相对内效率的比值	(4-14)
三联产发电的一次能耗为	$PE_{e2} = W_{in} / (\eta_w \eta_g \eta_s \eta_e \eta'_w) + W_{cs} / \eta_e$	(4-15)
热电联产、冷分产系统总的一次能耗	$PE_2 = PE_{h2} + PE_{e2} + PE_{e2}$	(4-16)

表 4-3 和表 4-4 中各符号意义如下:

D_h —蒸汽进汽量, kg/s; D_h —抽汽量, kg/s; q'_{h2} —制冷量为 1163kW 时吸收式制冷机所需热量, kW; q_{h2} —供热机组需供给 1163kW 制冷机的热量, kW; W —供热机组额定工况下发电量, kW; w —1163kW 冷量的制冷机的耗电量, kW; w'_e —压缩式制冷冷却水泵、冷水泵和冷却风机总的耗电量, kW; X —供热负荷率; η_{hs} —三联产系统锅炉效率; η_{es} —热电联产冷分产系统锅炉效率; μ_1 、 μ_2 —分别为热中冷三联产和热中联产冷分产时供热机组的 μ 值。

4.2.1.2 机组设备选择

根据不同容量和参数的组合,选取了有代表性的背压式汽轮机、电站锅炉和溴化锂吸收式制冷机组进行了计算,机组型号见表 4-5、表 4-6、表 4-7^[36,37,38]。

表 4 5 背压式汽轮机参数表

序号	型号	功率 (MW)	额定进汽参数			额定排汽参数	
			流量 t/h	压力 MPa	温度 ℃	压力 MPa	温度 ℃
1	B6-3.43/0.49	6	57.96	3.43	435	0.49	226
2	B12-4.9/0.49	12	106	4.9	435	0.49	199
3	B25-8.83/0.98	25	215	8.83	535	0.98	275
4	B50-8.83/0.294	50	370	8.83	535	0.294	146

表 4-6 电站锅炉参数表

序号	型号	蒸发量 t/h	蒸汽压力 MPa	蒸汽温度 (°C)	设计效率 (%)
1	CG-65/39-M ₂	65	3.82	450	89.62
2	NG-130/54-M	130	5.3	450	91
3	CG-220/100-M	220	9.81	540	91.64

表 4-7 溴化锂吸收式制冷机技术参数表

序号	型号	制冷量 (kW)	蒸汽				耗电功率		
			耗量 (kg/h)	压力 (表压) MPa	凝结水温度 °C	凝水背压 MPa	溶液泵功率 kW	冷剂泵功率 kW	真空泵功率 kW
1	SXZ4-115D	1150	1560	0.4	<85	<0.05	3	2.2	1.1
2	SXZ4-115D	1150	1560	0.4	<85	<0.05	3	2.2	1.1
3	16JT-836	1231	1575	0.8	≤95	—	3	2.2	1.1
4	XZ-100	1163	2700	0.098	—	—	5.5	2.2	1.1
5	SXZ6-116D	1163	1560	0.6	≤90	≤0.05	3	2.2	1.1

4.2.1.3 计算结果和分析

在进行两种能量供应系统一次能耗比较时,对于已经选定汽轮机、锅炉和制冷机的系统,他们的节能性与机组的运行工况有关。表 4-8 是电压缩式制冷采用螺杆式机组时,三联产系统与热电联产、冷分产系统各部分一次能耗的计算结果表。下面分别对这两种系统的冷、热、电各部分的一次能耗进行比较和分析。

(1) 制冷系统一次能耗的比较与节能分析

上文已经指出,热电联产、冷分产的夏季热负荷率 X_1 ,则联产制冷热负荷与总热负荷之比(联产制冷热负荷率) $X_2 = 1 - X_1$ 。根据表 4-8 中的数据,得出了节能量与联产制冷热负荷率 X_2 的关系图,见图 4-10 至图 4-11。

从图中可看出,对于已经选定的系统,三联产制冷系统相对于电制冷系统总节能量随着制冷系统总耗能量的增大而增大,但增加的速率是一定的,也就是说其节能率是一定的。

图4-12给出了四种不同组合型式的三联产制冷系统相对与分产电制冷系统的节能率大小。前面分析指出，制冷系统节能率的大小与汽轮机的 μ 值和溴化锂机组的性能系数有关，图4-12也刚好反映了这一点。

表4-8 两种系统一次能耗计算结果

汽轮机 型号	热 负 荷 率 X	热冷三联产系统				热联产、冷分产系统				总 节 能 量 (kW)	总 节 能 率 (%)
		制 冷 一 次 能 耗 (kW)	供 热 一 次 能 耗 (kW)	发 电 一 次 能 耗 (kW)	系 统 总 能 耗 (kW)	制 冷 一 次 能 耗 (kW)	供 热 一 次 能 耗 (kW)	发 电 一 次 能 耗 (kW)	系 统 总 能 耗 (kW)		
B6-3.43 A.49	0.9	3190	18720	26884	48795	3529	19102	27162	49793	998	2.0
	0.8	6380	16640	26884	49904	7058	17334	27203	51595	1691	3.3
	0.7	9570	14560	26884	51014	10585	15190	27216	53291	2277	4.3
	0.6	12760	12480	26884	52124	14114	13867	27360	55341	3217	5.8
B12-4.9 A.49	0.9	5668	33004	50411	89083	6362	33678	51240	91280	2997	2.4
	0.8	11337	29337	50411	91085	12723	30560	51609	94892	3807	4.0
	0.7	17005	25670	50411	93086	19085	27602	51907	98594	5508	5.6
	0.6	22674	22003	50411	95088	25447	24722	52458	102627	7539	7.3
B25- 8.83 A.98	0.9	11329	53019	113663	188011	13754	64306	114687	192747	4736	2.5
	0.8	22658	56018	113663	192332	27508	58352	114719	201079	8747	4.1
	0.7	33986	49015	113663	196664	41262	52705	114916	208883	12219	5.8
	0.6	45312	42013	113663	200988	55016	47206	115112	217334	16346	7.5
B50- 8.83 A.294	0.9	8068	40329	202888	251285	9991	41152	206932	258075	6790	2.6
	0.8	16137	35488	202888	254513	19982	37342	209073	266397	11884	4.5
	0.7	24206	31367	202888	258461	29973	33728	210893	274594	16133	5.9
	0.6	32274	26886	202888	262048	39963	30209	213748	283920	21872	7.7

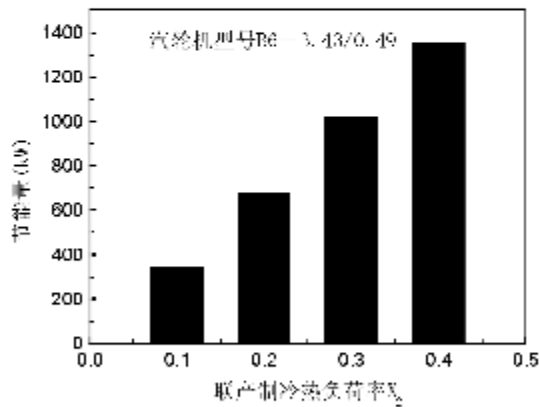


图 4-10 三联产制冷系统节能量与制冷热负荷率 X_2 的关系

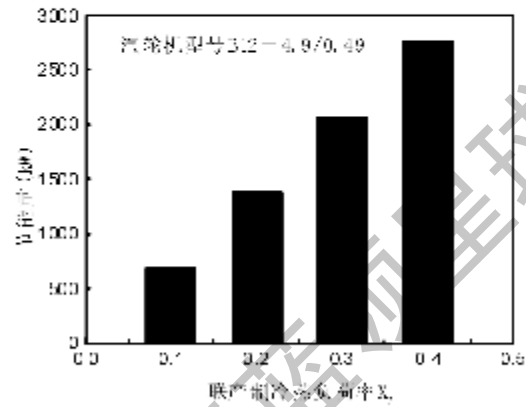


图 4-11 三联产制冷系统节能量与制冷热负荷率 X_2 的关系

在图 4-12 中，组合 1 三联产系统采用 B6-3.43/0.49 式汽轮机和 SXZ4-115D 式溴化锂制冷机， μ 值为 1.76；组合 2 三联产系统采用 B12-4.9/0.49 式汽轮机和 SXZ4-115D 式溴化锂制冷机， μ 值为 1.80；组合 3 三联产系统采用 B25-8.83/0.98 式汽轮机和 16JT-836 型双效机， μ 值为 1.91；组合 4 三联产系统采用 B50-8.83/0.294 式汽轮机和 XZ-100 型单效溴化锂制冷机， μ 值为 3.72。对比表明， μ 值越大，三联产制冷系统的节能率越高。

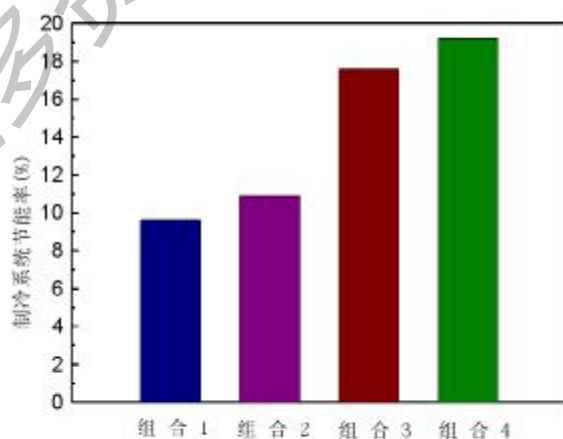


图 4-12 不同组合的三联产制冷系统的节能率

(2) 供热系统一次能耗的比较与节能分析

当三联产系统和二联产都在额定工况下时，两个供热系统的形式完全相同，他们的一次能耗也相同。但当二联产热负荷不足，热负荷率低的时候，情况有点不同。这主要体现在随着锅炉热负荷率的降低，锅炉效率有所降低，此时，在背压排汽处每 kJ 蒸汽所消耗的一次能比额定情况下增加，在计算公式上也表现为二联产的 μ 值降低。锅炉效率与锅炉负荷率的关系与具体的锅炉型号和运行情况有关，根据文献^[16]提供的资料，我们选取锅炉效率随负荷率变化曲线如图 4-13 所示（额定工况下，锅炉效率取 0.9 时的情况）。从图中看出，锅炉效率随锅炉负荷率的变化比较平缓。

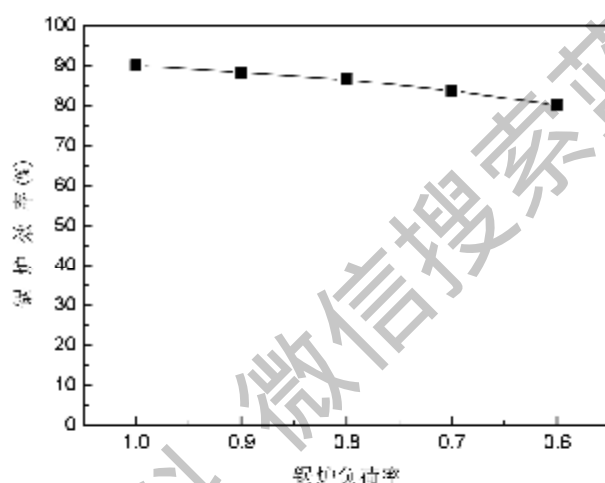


图 4-13 锅炉效率与锅炉负荷率的关系

根据表 4-8 的计算结果，可得到了三联产供热系统相对于二联产供热系统的一次能耗节约量和节约率，并分别绘出一次能耗节约量和节约率与热负荷率 x 的关系，如图 4-14~图 4-18 所示。

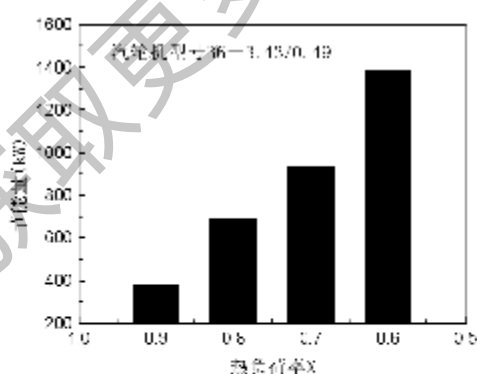


图 4-14 供热系统一次能耗节约量与供热负荷率的关系

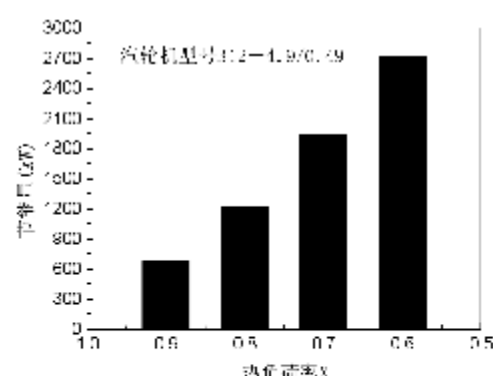


图 4-15 供热系统一次能耗节约量与供热负荷率的关系

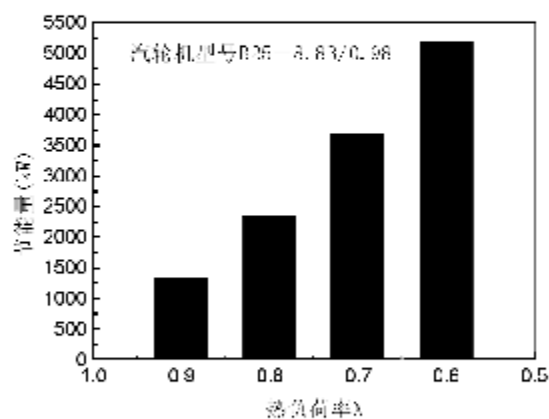


图 4-16 供热系统一次能耗节约量与供热负荷率的关系

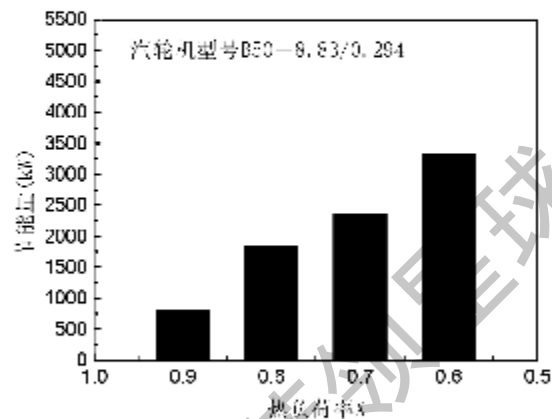


图 4-17 供热系统一次能耗节约量与供热负荷率的关系

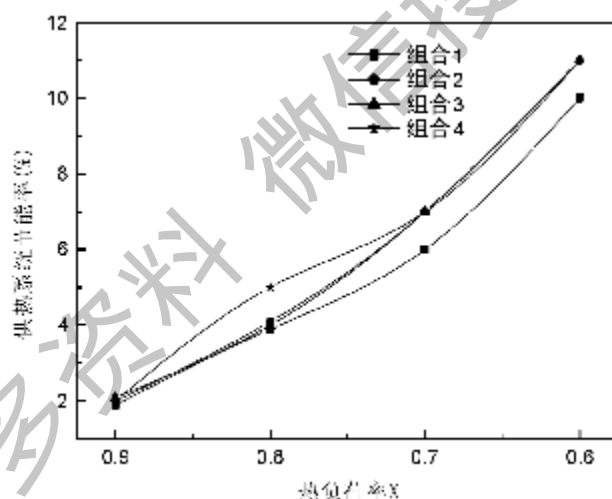


图 4-18 供热系统一次能耗节能率与供热负荷率的关系

从图 4-18 可看出，供热系统的节能性主要与供热负荷率 X 有关，而与汽轮机的容量和参数关系不大。随着三联产供热负荷率 X 的降低，三联产供热系统节能率增加。原因是按照以热定电的原则，当三联产供热系统供热负荷率降低时，锅炉负荷率也随之降低，因此其一次能耗增加。

(3) 发电部分一次能耗比较与节能分析

对于热电冷三联产，由于制冷需要蒸汽，热负荷率为 1，其发电量和发电的一次能耗不变。下面主要分析二联产系统发电的一次能耗。二联产系统发电一次能耗由两

部分组成，背压式供热机组发电部分的一次能耗和由于少发电从电网补充 W_{cs} 时的所需一次能耗之和。所以影响二联产发电一次能耗的因素主要有两个。

①热负荷率 X 和背压汽轮机内效率对发电一次能耗的影响

背压汽轮机的特点是当汽轮机组的负荷变化较大时，其相对内效率 η_{oi} 也将发生显著变化，见图 4-19^[42]。由于低负荷(背压供热蒸汽流量减少时)运行时，汽机内效率急剧恶化，而外部损耗(汽机、发电机机械损耗)仍保持不变，致使背压机组发电量的减少，结果导致发电一次能耗急剧上升。

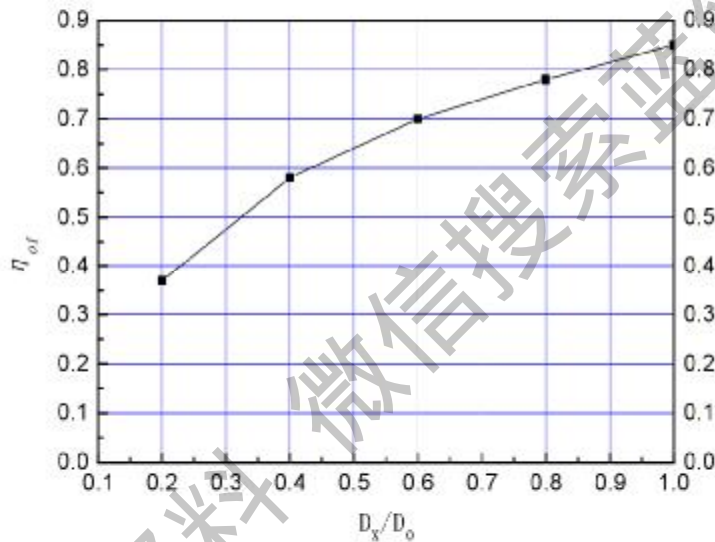


图 4-19 背压式汽轮机的效率曲线

表 4-9 给出了采用 B6-3.43/0.49 供热机组时，两种系统发电一次能耗和一次能耗率随 X 变化的数据。表 4-10 给出了采用 B50-8.83/0.294 型供热机组时，两种系统发电一次能耗和一次能耗率随 X 变化的数据。图 4-20 是二联产系统采用 B6-3.43/0.49 型供热机组时，各部分的发电一次能耗率与热负荷率 X 的关系图。图 4-21 是二联产系统采用 B50-8.83/0.294 型供热机组各部分发电一次能耗率与热负荷率 X 的关系图。

从图 4-20 可看出，随着热负荷率的降低，二联产供热机组的发电量降低，发电的一次能耗率显著增加，这种情况对热电厂是很不利的。因此，对背压式供热机组的热电厂来说，在热电联产的基础上增加吸收式制冷系统进行区域热电冷联供，不但能降低发电一次能耗，提高全厂的热效率；还能因为多发电，多供热制冷增加经济效益。

表 4-9 B6-3.43/0.49 型供热机组发电一次能耗的比较

热负荷率 X	三联产系统 (6MW)		二联产系统 (6MW)							
	发电一次能耗 kW	发电一次能耗率	供热机组发电部分			电网补电 W_{cs} 部分			总发电	
			发电量 kW	一次能耗 kW	一次能耗率	电网补电 W_{cs} kW	一次能耗 kW	一次能耗率	一次能耗 kW	一次能耗率
0.9	26894	4.48	5184	24689	4.76	816	2473	3.03	27162	4.527
0.8	26894	4.48	4416	22403	5.07	1584	4800	3.03	27203	4.534
0.7	26894	4.48	3696	20234	5.47	2304	5982	3.03	27216	4.536
0.6	26894	4.48	2952	18124	6.14	3048	9236	3.03	27360	4.560

表 4-10 B50-8.83/0.294 型供热机组发电一次能耗的比较

热负荷率 X	三联产系统 (50MW)		二联产系统 (50MW)							
	发电一次能耗 kW	发电一次能耗率	供热机组发电部分			电网补电 W_{cs} 部分			总发电	
			发电量 kW	一次能耗 kW	一次能耗率	电网补电 W_{cs} kW	一次能耗 kW	一次能耗率	一次能耗 kW	一次能耗率
0.9	202888	4.05	43200	186325	4.31	6800	20606	3.03	206932	4.13
0.8	202888	4.05	36800	169073	4.59	13200	40000	3.03	209073	4.18
0.7	202888	4.05	30800	152711	4.96	19200	58182	3.03	210893	4.22
0.6	202888	4.05	24600	136778	5.56	25400	76970	3.03	213748	4.27

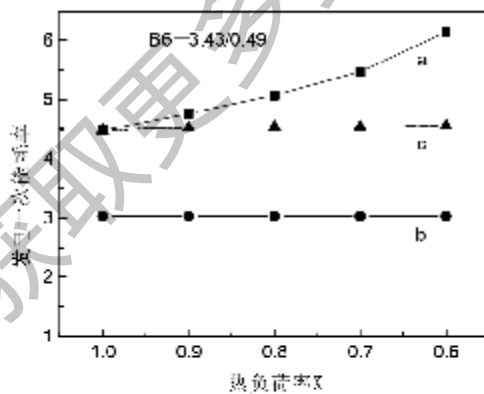


图 4-20 发电一次能耗率与热负荷率的关系

a—供热机组发电一次能耗率; b—电网补电一次能耗率; c—系统平均一次能耗率

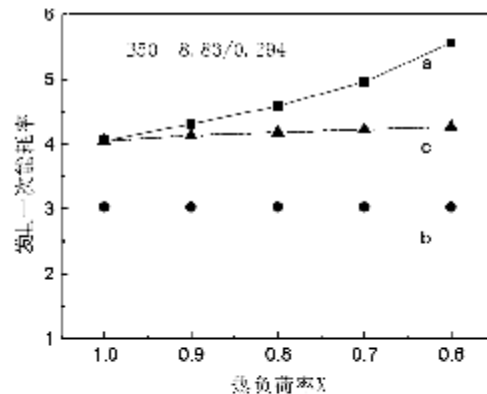


图 4-21 发电一次能耗率与热负荷率的关系

a—供热机组发电一次能耗率; b—电网补电一次能耗率; c—系统平均一次能耗率

②全国平均发电效率 η_e

对按照两种系统发电量相等的比较原则，三联产发电量不足部分 W_e 的电从电网取得，取全国火电平均发电效率 0.33 时，其发电一次能耗率为 3.03，小于热电机组在额定工况下的发电一次能耗率。因此从总体上来看，补充电量对三联产系统一次能耗有降低的作用（而且补充电量越大，对三联产发电一次能耗越有利），这就抵消了一部分三联产发电节能效果。 η_e 越高，三联产补偿电量部分的一次能耗率越小，三联产发电相对于二联产的节能率降低。

(4) 三联产系统相对于二联产系统的节能性和影响因素

前面分别从能量供应的热、电、冷三个方面分析了热电冷三联产系统相对于热电联产、冷分产系统的节能性和影响因素。从整体上讲，影响三联产相对二联产节能性的因素主要有①汽轮机的容量和参数；②制冷机组性能系数；③热负荷率 X （主要表现在锅炉效率随着锅炉负荷率的变化、背压汽轮机相对内效率随着进汽量的变化）；④全国平均发电效率 η_e 。

一般来说，汽轮机的容量越大，参数越高，三联产整个系统的节能性越好，热负荷率 X 越低，三联产的节能率越大。图 4-22 给出了系统总节能率与背压式汽轮机容量参数和热负荷率 X 的关系。

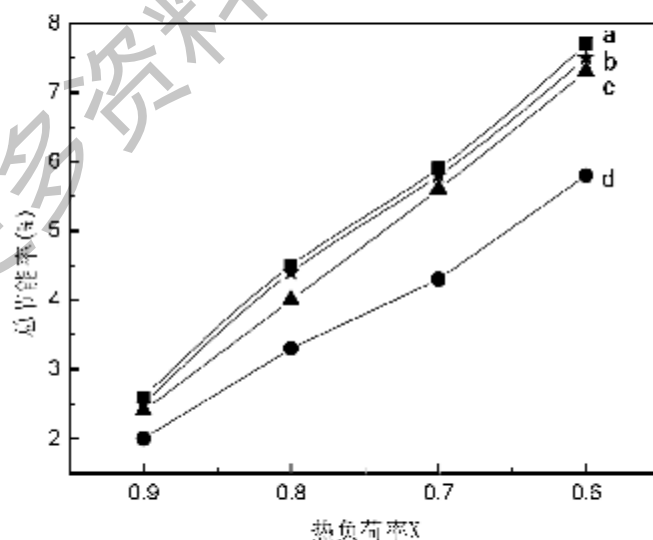


图 4-22 系统总节能率与背压式汽轮机容量参数和热负荷率 X 的关系

a—B50—8.83/0.294 b—B25—8.83/0.98;
c—B12—4.9/0.49 d—136—3.43/0.49

三联产相对于二联产的一次能耗节约量的效益是非常可观的。以采用 B50—8.83/0.294 汽轮机的热电冷三联产系统为例，当热负荷率为 0.6 时，三联产整个系统每秒节约一次能 21872kJ，按煤的低位发热量 29270kJ/kg 计算，一小时能节约 2690 kg 标准煤。以一年制冷 5 个月计算，每年能节约 9684 吨标准煤，按每吨标准煤 400 元人民币计算，节约费用约 387 万人民币。

4.2.2 抽凝式供热机组的节能性比较与分析

4.2.2.1 理论计算公式

在夏季无采暖负荷时，二联产系统抽凝机组偏离设计工况运行。若在热电联产的基础上，利比抽汽作为吸收式制冷机的热源进行制冷，则可假设夏季热电冷三联产系统中供热机组在额定工况下运行。比较热电冷三联产系统和热电联产冷分产节能性时，按照论文第三部分的数学模型，若选用抽凝式供热机组，两种系统的热力系统图分别如图 4-23 和图 4-24 所示。首先为了使两者具有可比性，两机型应相同，并且要满足能量供应相等的原则。在此前提条件下，假设进汽量 D_0 相同进行分析。

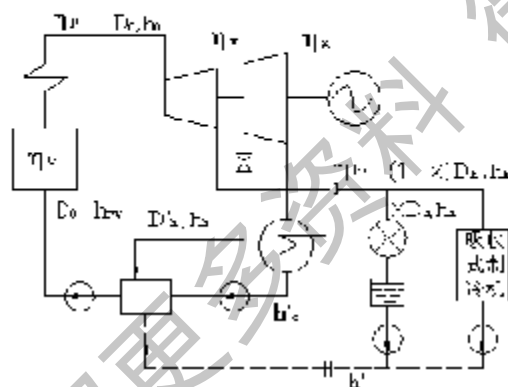


图 4-23 三联产为抽凝机组的热力系统图

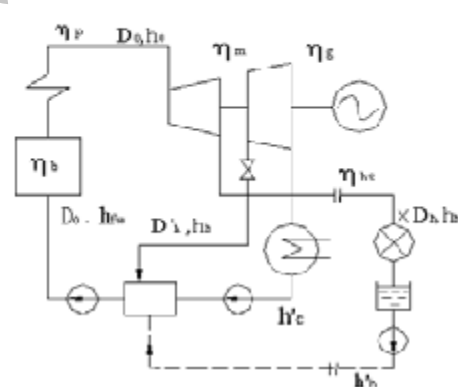


图 4-24 二联产为抽凝机组的热力系统图

根据以上假设条件，在进汽量 D_0 相同时，对于相同的供热机组，由于三联产系统热负荷比二联产系统的大，即前者抽汽比后者多，因而三联产系统发电量比二联产少。根据能量供应相等的原则，这时三联产比二联产少发电量部分 ($W - W_{th}$) 要由电网补偿 W_c ，补偿电量消耗的一次能按电网中火电机组的平均发电一次能耗计算。设热电厂夏季供热热负荷（常年热负荷） Q_{th} 是机组额定总供热 Q_b 时的 X ($X < 1$) 倍。

在此情况下，计算还存在一个问题，由于供热机组运行是一个复杂的系统，因而需要进行简单简化处理。我们知道，抽凝机组一般设有多级抽汽回热，这在计算中会带来很大的不便，为了使计算简便，而且计算误差小，我们假设汽轮机只有一级抽汽，且抽汽参数额定，运用热平衡原理计算回热抽汽量和凝汽抽汽量。也可以利用供热机组运行工况图，查出进汽量为额定值时，在不同抽汽负荷下的发电量。

当进汽量相同，等于额定进汽量 D_0 时，根据系统能耗数学模型，对两种系统进行分析，得出他们的具体计算公式，分别如表 4-11 和表 4-12 所示。

表 4-11 三联产系统采用抽凝机组时的一次能耗计算公式

项目	计算公式	编号
总供热量	$Q_h = Q_{hw} + Q_{hc} = D_0 (h_3 - h_2)$	(4-17)
抽凝机组消耗的总一次能	$Q_0 = D_0 (h_3 - h_{3c}) / (\eta_c \eta_h)$	(4-18)
三联产供热的一次能耗	$PE_{h1} = Q_h / \mu$	(4-19)
三联产制冷系统的一次能耗	$PE_{c1} = Q_{hc} / (\mu \eta_w) + W_c / (\eta_c \eta_a)$	(4-20)
三联产发电的一次能耗为	$PE_{e1} = K(W_h / \eta'_{th} + W_c / \eta_w) = Q_0 - Q_{hw} / \mu$	(4-23)
补偿电的一次能耗	$PE_{e2} = W_{c2} / (\eta_c \eta_a)$	(4-24)
三联产系统总的一次能耗	$PE_1 = PE_{h1} + PE_{c1} + PE_{e1} + PE_{e2}$	(4-25)

注： $K = 1 / (\eta_m \eta_g \eta_{th} \eta_{el})$

表 4-12 热电联产、冷分产系统能耗计算公式

项目	计算公式	编号
供热一次能耗	$PE_{h2} = Q'_h / (\mu \eta_{hw})$	(4-26)
制冷一次能耗	$PE_{c2} = (W_c + W'_c) / (\eta_c \eta_a)$	(4-27)
发电一次能耗	$PE_{e2} = K(W'_h / \eta'_{th} + W_c / \eta_w)$	(4-28)
系统总的一次能耗	$PE_2 = PE_{h2} + PE_{c2} + PE_{e2}$	(4-29)

4.2.2.2 机组设备选择和计算结果

根据不同容量和参数的组合，选取了有代表性抽凝式汽轮机、机组型号见表 4-13^[13]。

表 4-13 抽凝式汽轮机性能参数图

序号	型号	功率 (MW)	额定进汽参数			额定抽汽参数			抽汽 压力 MPa
			流量 t/h	压力 MPa	温度 ℃	流量 t/h	压力 MPa	温度 ℃	
1	C12-35/10	12	102.1	3.43	435	60	0.98	305	0.005
2	C12-4.9/0.686	12	90.5	4.9	470	50	0.686	272.3	0.004
3	C12-4.9/0.98	12	88	4.9	470	50	0.98	304	0.005
4	C25-8.82/0.49	25	135.5	8.83	535	70	0.49	214.2	0.0035
5	C50-8.82/0.98	50	307	8.83	535	160	0.98	267.7	0.0033

前文已提到此计算的简化处理，即假设只有一级抽汽回热，且与供热抽汽蒸汽参数相同，没有供热蒸汽回水，也就是补水量等于供热扣汽量。由于热电联产冷分产系统，供热机组不是在额定工况下运行，因此，其汽轮机内效率会降低。两种系统的一次能耗计算结果见表 4-14。

表 4-14 进汽量相等时两种系统的一次能耗

汽轮机型号	热负荷率 X	热电冷三联产系统				热电联产、冷分产系统				总节能量 (kW)	总节能率 (%)
		制冷一次能耗 (kW)	供热一次能耗 (kW)	发电一次能耗 (kW)	系统总能耗 (kW)	制冷一次能耗 (kW)	供热一次能耗 (kW)	发电一次能耗 (kW)	系统总能耗 (kW)		
C12-1.9/0.686	0.9	4581	26011	52893	83785	4649	26011	53756	84116	637	0.75
	0.8	9162	23121	55246	87531	9298	23121	56346	88765	1234	1.39
	0.7	13753	20231	57679	91663	13957	20231	59236	93425	1762	1.89
	0.6	18334	17341	60166	95841	18606	17341	62126	98075	2234	2.28
C12-4.9/0.98	0.95	1798	22702	55484	79984	1916	22702	55708	80326	342	0.42
	0.9	3596	21507	56635	81738	3842	21507	56903	82252	514	0.62
	0.8	6975	19117	59362	85454	7663	19117	59293	86073	619	0.72
C25-8.82/0.49	0.9	3082	17926	90142	111150	4214	17926	90567	112707	1557	1.38
	0.8	6164	15934	91664	113762	8428	15934	92559	116921	3159	2.7
	0.7	9248	13942	93131	116321	12641	13942	94550	121134	4813	3.97
	0.6	12326	11951	94564	118841	16855	11951	96542	125348	6507	5.19

	0.9	4930	27249	167255	199434	6071	27249	167859	201179	1745	0.87
C50-8.82	0.8	9860	24221	169869	203950	12142	24221	170887	207250	3300	1.59
#0.98	0.7	14790	21193	172438	208421	18214	21193	173915	213322	4901	2.30
	0.6	19720	18166	174964	212588	24285	18166	176942	219393	6805	3.10

4.2.2.3 计算结果分析

(1) 两种制冷系统的一次能耗和节能分析

热电冷三联产与热电联产冷分产的制冷部分分别采用的是吸收式溴化锂制冷机和压缩式制冷机。影响二者制冷性能的主要是其当量热力系数，这一点在前文已经分析。

对于三联产系统，不同的抽汽参数和抽汽量也对制冷系统节能大小影响很大。图 4-25 和图 4-26 分别表示的是采用 C12-4.9/0.686 型和 C25-8.82/0.49 型供热机组的热电冷三联产制冷系统的节能量与制冷热负荷率 X_2 的关系图。从图 4-25 和图 4-26 可看出，制冷负荷越大，也即制冷热负荷率 X_2 越大，节能量越大。比较两图，可得自结论，对于不同机组，容量越大，节能量也越大。

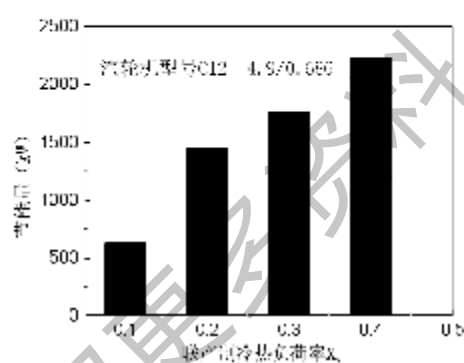


图 4-25 三联产制冷系统节能量与制冷热负荷率 X_2 的关系

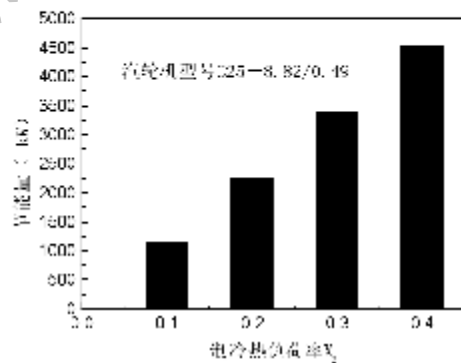


图 4-26 三联产制冷系统节能量与制冷热负荷率 X_2 的关系

在图 4-27 中，组合 1 三联产系统采用 C12-4.9/0.686 式汽轮机和 SXZ6-116D 式溴化锂机， μ 值为 1.62；组合 2 三联产系统采用 C12-4.9/0.98 式汽轮机和 16JT-836 式溴化锂制冷机， μ 值为 1.41；组合 3 三联产系统采用 C25-8.83/0.49 式汽轮机和 SXZ4-115D 型双效吸收式制冷机， μ 值为 2.49；组合 4 三联产系统采用 C50-8.83/0.98 式汽轮机和 16JT-836 型溴化锂制冷机， μ 值为 1.97。对比表明， μ 值越大，

三联产制冷系统的节能率越高。当机组选定后，制冷系统的节能量是 X_2 的线性函数。在热电冷三联产中，制冷系统节能性主要与制冷机的性能、汽轮机抽汽参数、蒸汽管网效率等因素有关。

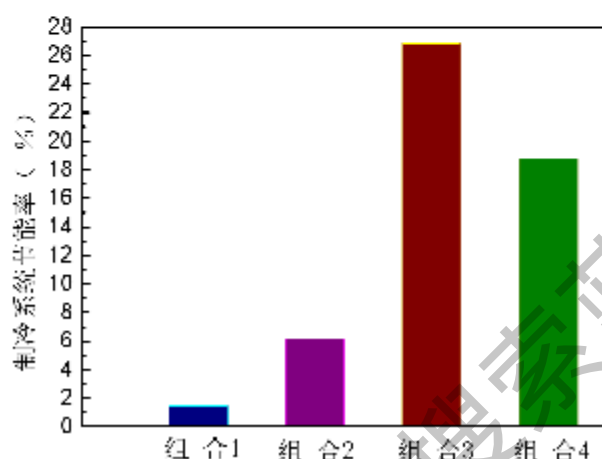


图 4-27 不同组合的三联产制冷系统的节能率

(2) 两种系统供热的一次能耗和节能分析

抽凝式供热机组供热一次能耗主要与抽汽压力、温度和抽汽量、锅炉效率、管网效率等因素有关。热电冷三联产系统和热电联产冷分产系统采用相同的供热机组和锅炉，当进汽量相等时，供热量不变的情况下，两种系统的供热一次能耗相等，这一点从表 4-14 中的计算结果可看出。

(3) 两种系统发电一次能耗和节能分析

本文分析是假设两种系统供热机组的进汽量不变。对于热电冷三联产系统而言，由于抽汽量比热电联产冷分产系统的大，根据供能相等的原则，三联产系统需要从电网取电补偿。三联产发电一次能耗包括两部分，机组发电部分的一次能耗和补偿电的一次能耗，而补偿电量的多少和热电联产发电量有关。当进汽量一定时，三联产系统发电量与汽轮机的相对内效率、供热负荷率等因素有关。

在相同进汽量的情况下，抽汽式汽轮机的相对内效率外在表现为抽汽量与发电量的关系。图 4-28 是抽汽式汽轮机的工况图^[38]。

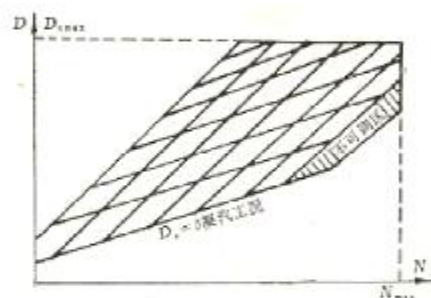


图 4-28 一级调节抽汽式汽轮机工况图

表 4-15 给出了采用 C50-8.82/0.98 供热机组时，两种系统发电一次能耗和一次能耗率随 X 变化的数据。表 4-16 给出了采用 C25-8.82/0.494 型供热机组时，两种系统发电一次能耗和一次能耗率随 X 变化的数据。从表中可看出，机组越大，发电一次能耗率越小，但是都大于相同容量参数的纯凝汽式发电机组的一次能耗率。

表 4-15 C50-8.82/0.98 型供热机组发电一次能耗的比较

热负荷率 X	二联产系统		三联产系统						
	发电一次能耗 kW	发电一次能耗率	电网补电 W_{cs} 部分			供热机组发电		总发电	
			电网补充电 W_{cs} kW	一次能耗 kW	一次能耗率	一次能耗 kW	一次能耗率	一次能耗 kW	一次能耗率
0.9	167859	3.291	8011	2424	3.03	164831	3.283	167255	3.280
0.8	170887	3.295	1663	5038	3.03	164831	3.283	169869	3.275
0.7	173915	3.299	2510	7607	3.03	164831	3.283	172438	3.271
0.6	176942	3.304	3344	10133	3.03	164831	3.283	174964	3.268

表 4-16 C25-8.82/0.49 型供热机组发电一次能耗的比较

热负荷率 X	二联产系统		三联产系统						
	发电一次能耗 kW	发电一次能耗率	电网补电 W_{cs} 部分			供热机组发电		总发电	
			W_{cs} kW	一次能耗 kW	一次能耗率	一次能耗 kW	一次能耗率	一次能耗 kW	一次能耗率
0.9	90567	3.513	517	1567	3.03	88575	3.507	90142	3.498
0.8	92559	3.523	1019	3089	3.03	88575	3.507	91664	3.489
0.7	94550	3.534	1504	4556	3.03	88575	3.507	93131	3.480
0.6	96542	3.545	1976	5989	3.03	88575	3.507	94564	3.473

图 4-29 是二联产系统采用 C25-8.82/0.49 型供热机组时, 各部分的发电一次能耗率与热负荷率 X 的关系图。图 4-30 是二联产系统采用 C50-8.82/0.98 型供热机组各部分发电一次能耗率与热负荷率 X 的关系图。

从图 4-29 和图 4-30 可看出, 随着负荷率的减小, 热电联产冷分产系统发电一次能耗率增大, 三联产系统由于从电网取电补偿, 其系统发电一次能耗率减小。随着热负荷率的降低, 在进汽量不变的情况下, 供热机组在偏离额定工况下运行时, 汽轮机相对内效率减小, 从而使发电能耗增大。因此, 对抽凝式供热机组的热电厂来说, 在热电联产的基础上增加吸收式制冷系统进行区域热电冷联供, 不但能降低发电一次能耗, 而且提高了全厂的热效率。

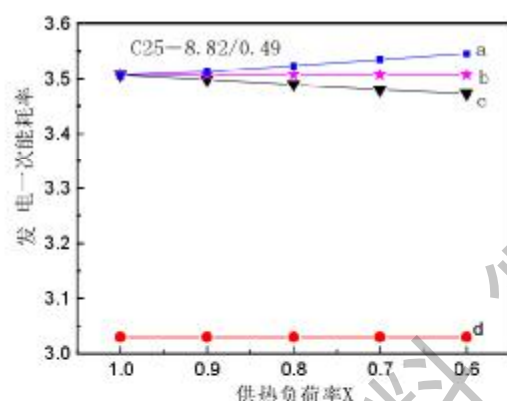


图 4-29 发电一次能耗率与热负荷率的关系
a—二联产供热机组发电一次能耗率; b—三联产供热机组一次能耗率; c—三联产系统发电一次能耗率; d—电网平均发电一次能耗率

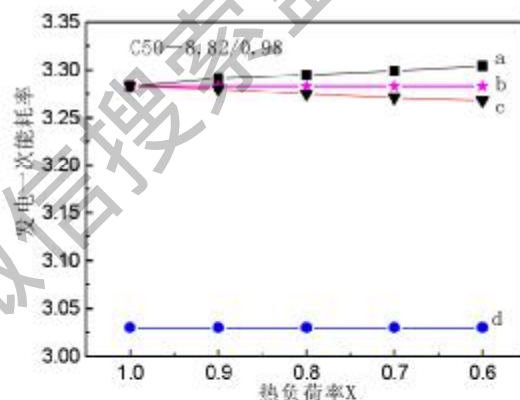


图 4-30 发电一次能耗率与热负荷率的关系
a—二联产供热机组发电一次能耗率; b—三联产供热机组一次能耗率; c—三联产系统发电一次能耗率; d—电网平均发电一次能耗率

(4) 三联产系统相对于二联产系统的一次能耗和节能分析

前面分别从能量供应的热、电、冷三个方面分析了抽凝式供热机组的热电冷三联产系统相对于抽凝式热电联产、冷分产系统的节能性和影响因素。从整体上讲, 影响三联产相对二联产节能性的因素主要有: ①汽轮机的容量和参数; ②制冷机组性能系数、 μ 值和热力管网效率; ③热负荷率 X (主要表现在抽凝式供热汽轮机的相对内效率随抽汽量的变化); ④全国平均发电效率 η_e 。

与背压机组节能性相同, 抽汽式汽轮机的容量越大, 初参数越高, 抽汽参数越低, 三联产整个系统的节能性越好。热负荷率 X 越低, 三联产的节能率越大。图 4-31 给

出了系统总节能率与抽凝式汽轮机容量参数和热负荷率 X 的关系。

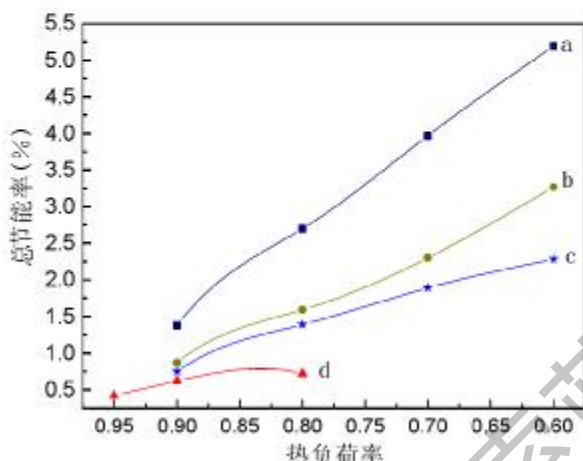


图 4-31 三联产系统总节能率与抽凝式汽轮机参数和热负荷率 X 的关系

a—C25—8.82/0.49 b—C50—8.82/0.98;

c—C12—4.9/0.686 d—C12—4.9/0.98

从图 4-31 可看出，随着供热负荷率的减小，三联产系统节能性增大。这是因为热电联产机组在夏季供热负荷减小，机组偏离额定工况下运行，机组偏离额定工况越远，发电能耗增大，制冷能耗也增大，整个系统能耗越大。

从上图还可发现，机组进汽参数越高，节能性越好；抽汽参数越低，系统总的节能性也越好。图中曲线 a 和曲线 b 分别表示的是 C25—8.82/0.49 型和 C50—8.82/0.98 型抽凝式供热机组总节能率，两机组进汽压力和温度相同，抽汽参数不同，前者抽汽压力低，后者高。很明显，a 节能性比 b 节能性好。同样，c 和 d 曲线表示的是 C12—4.9/0.686 和 C12—4.9/0.98 两种供热机组总节能变化曲线，也说明对于相同进汽参数的机组，抽汽压力越低，节能性越好。从 b 和 d 两条曲线分析，两机组抽汽参数相同，但是进汽参数不同，b 的参数比 d 的高，因此说明，抽汽参数相同的机组，初参数越高，热电冷三联产系统越节能。

4.2.3 供热机组分别为背压式和抽凝式的热电冷联产系统比较分析

分析发现，背压式供热机组和抽凝式供热机组，两种系统各有特点。

背压式供热机组由于背压排汽全部用于供热，没有冷源损失，故其能源利用率高，在有稳定热负荷时，优先考虑背压式供热机组。但是背压机组有一个很大的问题是，偏离设计工况运行时，汽轮机相对内效率变化很大，这从图 4-19 可明显看出。

抽凝式供热机组一部分蒸汽被抽出，对外供热；其它凝汽汽流做完功后的排汽热在凝汽器中损失，从而有冷源损失，能源利用率不及背压式。但是抽凝式供热机组可根据热负荷调节抽汽量，满足热与电的要求。而且当抽汽负荷变化大时，汽轮机内效率变化相对要小些。

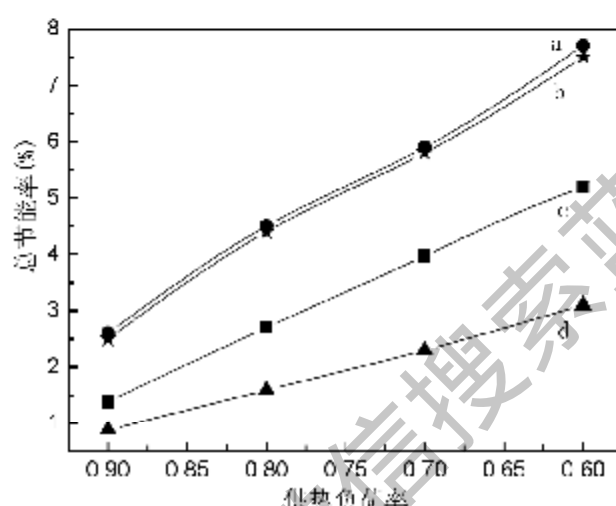


图 4-32 背压机组和抽凝机组三联产系统节能率比较

a—B50—8.83/0.294 b—B25—8.83/0.98；

c—C25—8.82/0.49 d—C50—8.82/0.98

图 4-32 是 B50—8.83/0.294 型、B25—8.83/0.98 型背压供热机组和 C25—8.82/0.49、C50—8.82/0.98 型抽凝式供热机组系统总节能率随供热负荷率变化图。图中，a 和 b 是背压式供热机组的热电冷三联产系统总节能率曲线；c 和 d 抽凝式供热机组的热电冷三联产系统总节能率曲线。从图中可看出背压式三联产系统总节能率比抽凝式大。b 和 d 两机组进汽参数相同，排汽或抽汽参数也相同，b 的总结节能率比 d 大很多。这说明背压式供热机组如果在有稳定热负荷时，比抽凝式的更节能。而且当机组容量相等时，背压机组的节能趋势也比抽凝式好。

4.3 热电冷三联产系统和热电冷三分产热经济性比较

前文已经比较分析了热电冷三联产与热电联产冷分产的节能性，下面分析热电冷联产与热电冷分产系统。

热电厂的热电冷联产形式有两种，分别采用背压式和抽凝式供热机组和吸收式制冷机结合的系统。热电冷分产系统是采用纯凝汽式汽轮机发电，区域锅炉供热和电压

缩式制冷机制冷。下文主要介绍采用热电冷联产与热电冷分产系统的节能情况。

4.3.1 三联产系统选用背压式机组的情况

表4-17是采用背压式供热机组的热电冷联产系统与热电冷分产系统各季节能耗计算表。

表4-17 背压式热电冷联产与热电冷分产能耗各时期计算公式对照表

季节		热电冷三联产 ⁽¹⁾	热电冷分产 ⁽²⁾
冬季	供热一次能耗	$PE_{ht} = \frac{Q'_{hs}}{\mu\eta_{hs}}$	$PE_{hs} = \frac{Q'_{hs}}{\eta_{hs(d)}\eta_{p(d)}}$
	发电一次能耗	$PE_{el} = \frac{W}{\eta_m\eta_g\eta_s\eta_p\eta'_s}$	$PE_{es} = \frac{W}{\eta_m\eta_g\eta_s\eta_p\eta_i}$
夏季	供热一次能耗	$PE_{ht} = \frac{XQ'_{hs}}{\mu\eta_{hs}}$	$PE_{hs} = \frac{XQ'_{hs}}{\eta_{hs(d)}\eta_{p(d)}}$
	制冷一次能耗	$PE_{cl} = \frac{(1-X)Q'_{hs}}{\mu\eta_{hs}} + \frac{W_c}{\eta_c\eta_o}$	$PE_{cs} = \frac{W_c + W'}{\eta_c\eta_o}$
	发电一次能耗	$PE_{el} = \frac{W}{\eta_m\eta_g\eta_s\eta_p\eta'_s}$	$PE_{es} = \frac{W}{\eta_m\eta_g\eta_s\eta_p\eta_i}$
春秋	供热一次能耗	$PE_{ht} = \frac{XQ'_{hs}}{\mu\eta_{hs}}$	$PE_{hs} = \frac{XQ'_{hs}}{\eta_{hs(d)}\eta_{p(d)}}$
	发电一次能耗	$PE_{el} = \frac{W_{hs}}{\eta_m\eta_g\eta_s\eta_p\eta'_s}$	$PE_{es} = \frac{W_{hs}}{\eta_m\eta_g\eta_s\eta_p\eta_i}$

(1) 冬季节约一次能耗

冬季节约一次能耗为:

$$\Delta PE = \frac{Q'_{hs}}{\eta_{hs(d)}\eta_{p(d)}} - \frac{Q'_{hs}}{\mu\eta_{hs}} \left(\frac{W}{\eta_m\eta_p\eta_m\eta_g\eta'_s} - \frac{W}{\eta_m\eta_p\eta_m\eta_g\eta_i} \right) \quad (4-30)$$

则临界节能条件为:

$$\frac{Q'_{hs}}{\eta_{hs(d)}\eta_{p(d)}} - \frac{Q'_{hs}}{\mu\eta_{hs}} = \left(\frac{W}{\eta_m\eta_p\eta_m\eta_g\eta'_s} - \frac{W}{\eta_m\eta_p\eta_m\eta_g\eta_i} \right) \quad (4-31)$$

上文已令 $K = 1/(\eta_s\eta_p\eta_m\eta_g)$, 则上式为:

$$\frac{Q'_{hs}}{W} = K \frac{\frac{1}{\eta'_s} - \frac{1}{\eta_i}}{1 - \frac{1}{\eta_{hs(d)}\eta_{p(d)}}} \frac{1}{\mu\eta_{hs}} \quad (4-32)$$

(2) 夏季节约一次能耗

同理，夏季一次能耗差为：

$$\Delta PE = \frac{XQ'_{ha}}{\eta_{b(d)}\eta_{p(d)}} - \frac{Q'_{ha}}{\mu\eta_{hw}} - KW\left(\frac{1}{\eta'_{ab}} - \frac{1}{\eta_i}\right) + \frac{W_s - W' - W_a}{\eta_s\eta_n} \quad (4-33)$$

令 $R = \frac{Q'_{ha}}{W}$ ，临界节能条件式为：

$$R = \frac{K\left(\frac{1}{\eta'_{ab}} - \frac{1}{\eta_i}\right) \frac{W_s + W' - W_a}{W\eta_s\eta_n}}{\eta_{hw}\left(\frac{X}{\eta_{b(d)}\eta_{p(d)}} - \frac{1}{\mu\eta_{hw}}\right)} \quad (4-34)$$

4.3.2 三联产系统选用抽凝式机组的情况

表 4-18 是采用抽凝式供热机组的热电冷联产系统与热电冷分产系统各季节能耗计算表。

表 4-18 抽凝式热电冷联产与热电冷分产能耗各时期计算公式对照表

季节		热电冷三联产	热电冷分产
冬季	供热一次能耗	$PE_{ht} = \frac{Q'_{ha}}{\mu\eta_{hw}}$	$PE_{ht} = \frac{Q'_{ha}}{\eta_{b(d)}\eta_{p(d)}}$
	发电一次能耗	$PE_{cs} = \frac{W_h}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta'_{ab}} + \frac{W_c}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta_n}$	$PE_{cs} = \frac{W}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta_n}$
夏季	供热一次能耗	$PE_{ht} = \frac{XQ'_{ha}}{\mu\eta_{hw}}$	$PE_{ht} = \frac{XQ'_{ha}}{\eta_{b(d)}\eta_{p(d)}}$
	制冷一次能耗	$PE_{cl} = \frac{(1-X)Q'_{ha}}{\mu\eta_{hw}} + \frac{W_a}{\eta_s\eta_n}$	$PE_{cl} = \frac{W_s - W' - W_a}{\eta_s\eta_n}$
	发电一次能耗	$PE_{cs} = \frac{W_h}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta'_{ab}} + \frac{W_c}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta_n}$	$PE_{cs} = \frac{W}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta_n}$
春秋	供热一次能耗	$PE_{ht} = \frac{XQ'_{ha}}{\mu\eta_{hw}}$	$PE_{ht} = \frac{XQ'_{ha}}{\eta_{b(d)}\eta_{p(d)}}$
	发电一次能耗	$PE_{cs} = \frac{W_{ha}}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta''_{ab}} + \frac{W_c}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta''_{ac}}$	$PE_{cs} = \frac{W_{ha} + W_c}{\eta_m\eta_g\eta_b\eta_p\eta_n}$

夏季，抽凝式供热机组三联产系统与分产系统一次能耗差：

$$\Delta PE = Q'_{hs} \left(\frac{X}{\eta_{bc,d}\eta_{p,d}} - \frac{1}{\mu\eta_{hs}} \right) + \frac{W_c + W' - W_a}{\eta_c\eta_n} - K \left(\frac{W_h}{\eta'_{ih}} + \frac{W_c}{\eta_c} - \frac{W}{\eta_i} \right) \quad (4-35)$$

设抽凝式供热汽轮机的相对内效率为 η'_i ，即 $W/\eta'_i = W_h/\eta'_{ih} + W_c/\eta_c$ ，又 $W_h + W_c =$

W ，临界节能条件为：

$$R = \frac{K \left(\frac{1}{\eta'_i} - \frac{1}{\eta_c} \right) - \frac{W_c + W' - W_a}{W\eta_c\eta_n}}{\eta_{hs} \left(\frac{X}{\eta_{bc,d}\eta_{p,d}} - \frac{1}{\mu\eta_{hs}} \right)} \quad (4-36)$$

4.3.3 全年一次能耗

设夏季制冷时间为 τ_s ，冬季采暖时间为 τ_w ，春秋两季稳定热负荷时间为 τ_c ，机组年运行时间为 T ，则 $T = \tau_s + \tau_w + \tau_c$ 。

(1) 背压机组热电冷联产系统全年一次能耗为：

$$PE = \frac{Q'_{hs}}{\mu\eta_{hs}} (\tau_w - \tau_s - X\tau_c) + \frac{W_a\tau_s}{\eta_c\eta_n} + KW \left[\frac{1}{\eta'_{ih}} (\tau_w - \tau_s) + \frac{1}{\eta''_{ih}} \tau_c \right] \quad (4-37)$$

(2) 抽凝式供热机组热电冷联产系统全年一次能耗为：

$$PE = \frac{Q'_{hs}}{\mu\eta_{hs}} (\tau_w - \tau_s - X\tau_c) + \frac{W_a\tau_s}{\eta_c\eta_n} + K \left[\left(\frac{W_h}{\eta'_{ih}} + \frac{W_c}{\eta_c} \right) (\tau_w + \tau_c) - \left(\frac{W_{hs}}{\eta''_{ih}} + \frac{W_c}{\eta_c} \right) \tau_c \right] \quad (4-38)$$

(3) 三分产系统全年一次总能耗：

$$PE = \frac{Q'_{hs}}{\eta_{bc,d}\eta_{p,d}} \tau_w + \frac{XQ'_{hs}}{\eta_{bc,d}\eta_{p,d}} (\tau_s + \tau_c) + \frac{W}{\eta_m\eta_g\eta_h\eta_n} T - \frac{W_s}{\eta_s} - \frac{W'}{\eta_n} \tau_s \quad (4-39)$$

对采用 B6-3.43/0.49 型供热机组的热电冷三联产系统在夏季、冬季、过渡期的一次能耗进行计算，并且与热电冷分产系统的一次能耗进行比较，下面给出各部分能耗比较图。

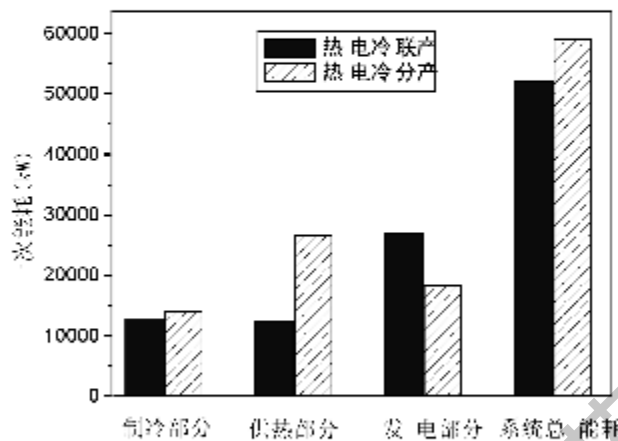


图 4-33 两种系统夏季的能耗图

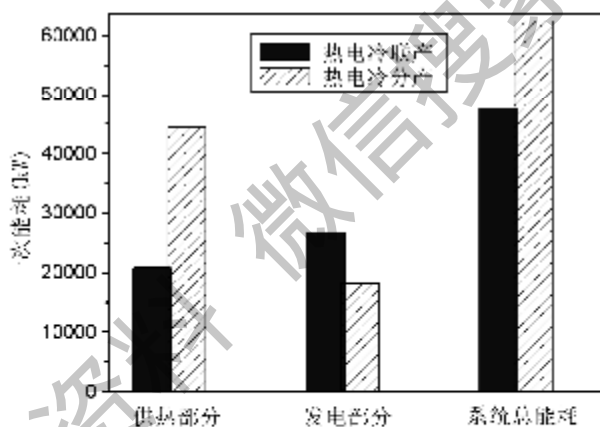


图 4-34 两种系统冬季的能耗图

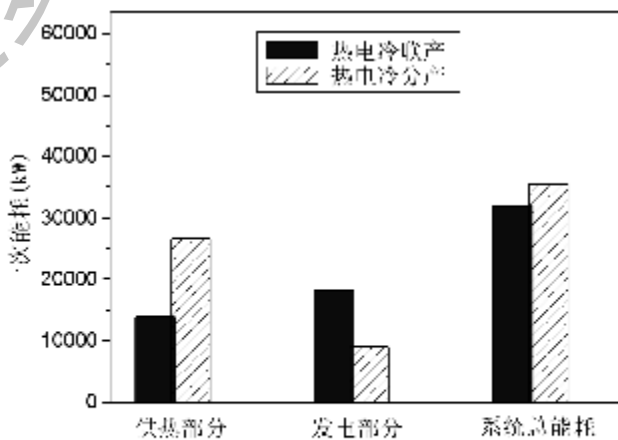


图 4-35 两种系统过渡期的能耗图

从上面三个图中可看出，三联产机组全年发电一次能耗比三分产的（发电一次能耗取全国平均发电一次能耗）。但是从全年来看，三联产系统冬季、夏季和过渡期供热一次能耗都比三分产的小，夏季制冷一次能耗三联产的也比二联产的小。因而三联产系统总一次能耗小于分产系统的总能耗，采用三联产系统具有很好的节能效果。

经过计算，热电冷三联产与热电冷三分产相比较，在热负荷率大的冬季和夏季是节能的。但在春秋过渡期，当热负荷率 X 很低时，三联产不一定节能。

4.4 小结

本部分首先分析了汽轮机进汽参数和排汽或抽汽参数对 μ 值的影响，并得出结论，进汽参数越高，排汽或抽汽参数越低， μ 值越大。而且 μ 值大小也影响了热电冷三联产系统中制冷部分的一次能耗大小。经过计算分析， μ 值越大，制冷系统节能性越大。

本部分还分别对热电冷二联产系统和热电联产冷分产系统进行计算分析和比较，对系统中每部分能耗都进行了比较分析，发现机组供热负荷率 X 和制冷负荷率 X_2 对三联产系统节能影响很大，制冷负荷率 X_2 越大，系统节能性也越大。

最后，比较了热电冷三联产和热电冷分产的节能性，并且得出了三联产系统临界节能条件和全年总的一次能耗。

5 分布式热电冷联产的节能分析

5.1 分布式热电冷联产系统的能耗特点

广义的分布式能源系统 (Distributed Energy System, DES) 是从提高能源利用效率和降低排放的角度, 通过发展用户侧分布式供能和分布式发电, 来实现地区性电力的良好控制和余热资源的更好利用。其技术类型包括有燃气轮机和微型燃气轮机、内燃机、燃料电池, 以及以垃圾/生物质为燃料资源的能量利用装置, 其容量范围可以从几 kW 到 50kW。本文所分析的分布式能源系统重点是以燃气轮机为动力机的热电冷三联产。

分布式能源在国外应用较多, 特别是 20 世纪 90 年代以来, 随着燃气技术的发展和机组性能的提高, 以燃气轮机为动力机的热电冷联产系统迅速发展。德国 1995 年就有 255 台燃气轮机的热电联产机组, 总装机容量 3152MW; 2700 台柴油机驱动的联产机组, 总装机容量 1450MW^[45]。到 2000 年底, 日本全国热电总装机容量为 2212MW, 共 1413 项, 其中民用燃气热电总装机容量为 478MW, 共 1002 项^[44]。

论文第三、四部分已经指出, 热电厂的热电冷三联产是利用汽轮机的抽汽或排汽来供热, 由于其蒸汽参数高于纯凝汽参数, 所以抽汽或排汽在汽轮机中只作了部分功, 用这部分蒸汽来供热或制冷是以减少了发电量为基础的。因此热电厂热电冷三联产的节能性是有一定局限性的。

而以天然气为热源的分布式热电冷联产是直接或间接利用其排汽的余热进行制冷的, 若没有采用燃气-蒸汽联合循环发电时, 则不影响其发电量, 可视为余热利用。对分布式热电冷三联产的能量系统进行分析时, 常用热能利用效率来衡量, 即发电效率加上供热效率, 得到整个热电联产的效率。表 5-1 给出了部分燃气机的热电联合循环效率^[45]。

从表 5-1 可看出, 燃气机的热电效率都在 70% 以上, 明显高于热、电分产时的效率。根据美国马里兰大学楼宇热电冷联产的数据表表明^[46], 其节能率达到了 20%, 而且运行 3 年多来, 状况良好。下面主要比较分布式热电冷联产制冷部分和分产电压缩式制冷部分的一次能耗和一次能耗率。

表 5-1 燃气机热电效率数据

项目	单位	Saturn 20	Centaur 40	Centaur 50	Taurus 60	Titan 130
燃机出力	kW	1181	3418	4234	5069	12533
燃气耗量	GJ/h	17.7	45.0	53.1	61.3	139.3
燃机发电折热能	GJ/h	4.25	12.30	15.24	18.25	45.12
排气量	t/h	22.7	65.8	67.2	77.7	176
排气温度	℃	512	443	502	496	482
燃机效率	%	24.0	27.3	28.7	29.8	32.4
蒸汽折合净热能	GJ/h	9.03	20.25	25.86	29.28	77.4
供热效率	%	51.01	45.00	48.71	47.77	55.56
联合循环发电效率	%	75.03	72.35	77.41	77.53	87.95
热中比	%	212.34	164.59	169.68	160.45	171.55

5.2 分布式热电冷联产制冷系统节能分析

5.2.1 制冷系统一次能耗的理论分析

本文分析的楼宇热电冷三联产，采用燃气轮机先发电，其排气带动余热锅炉产生蒸汽，作为溴化钾吸收式制冷机组的热源。

与热电厂的热电冷联产相同，楼宇热电冷三联产吸收式制冷系统的热源为低品位能，因此应换算为一次能源进行比较。在此系统中，吸收式制冷机的热源是已经做过功的蒸汽，我们首先提出燃气轮机—余热锅炉系统的 μ 值。燃气轮机的 μ 值含义与汽轮机 μ 值含义类似。该系统中 μ 表示每1kJ燃料燃烧产生的高位热能相当于燃气轮机排汽(处低位热能的kJ数。通过理论分析得出燃气轮机的 μ 值计算公式：

$$\mu = \frac{1}{\eta} \frac{1}{\omega \gamma} = \frac{1}{\frac{Q_f \eta_b}{D_1 (h_2 - h_1)} - \frac{P}{D_2 c_p (t_p - t_0)}}, \quad (5-1)$$

式中， Q_f 为一次燃料热量，kJ/h；

D_1 为余热锅炉产生的蒸汽量，kg/h；

D_2 为燃气轮机排气量，kg/h；

h_1 为余热锅炉给水焓，kJ/kg；

h_2 为余热锅炉出口蒸汽焓，kJ/kg；

P 为燃气轮机发电功率, kW;

η_b 为非补燃余热锅炉效率;

v 为燃气轮机发电热耗率, kJ/kW·h;

c_p 为燃气轮机排气比热 kJ/(kg·K);

t_p 为燃气轮机排气温度, K;

t_0 为环境温度, ISO 条件下为 288K。

根据美国 Solar 公司提供的小型燃气轮机技术参数^[11-14], 由公式 (5-1) 计算出 μ 值, 见表 5-2。

表 5-2 SOLAR 小型燃气轮机技术参数及 μ 值表

型号	功率 (MW)	排气量 (t/h)	排气温度 (°C)	燃料量 (GJ/h)	蒸汽量 (t/h)	热耗率 (kJ/kW·h)	μ
Saturn20	1.21	22.84	505	17.72	3.8	13795	2.73
Centau40	3.52	67.00	435	45.37	8.4	12910	2.32
Centon50	4.60	68.68	510	53.49	11.0	12270	3.08
Taurus60	5.50	78.82	510	61.79	12.0	11840	2.96
Taurus70	7.52	97.90	490	76.36	14.3	10650	2.98

注: 1. 表列数字为 ISO 条件值; 2. 锅炉工况: 蒸汽压力 $P=1\text{MPa}$, 100%饱和蒸汽, 温差 13.8°C , 给水温度 99°C 。

与汽轮机 μ 值的实质一样, 它反映了热电冷三联产系统总一次能耗在发电所消耗一次能和余热供热所消耗的一次能两部分上的分配问题。 μ 值越小, 说明发电部分所消耗的一次能占总能耗比例越少, 供热部分消耗的一次能耗越多。反之, μ 值越大, 说明供热部分消耗的一次能耗占总能耗比例越少, 而发电部分所消耗的一次能越多。对于以燃气轮机为动力源的三联产系统, μ 值的大小主要与燃气轮机的性能, 特别是与燃气轮机的发电热耗率和排气温度有关。燃气轮机的发电热耗率越大, μ 值越大; 排气温度越低, μ 值越大。

采用燃气轮机的楼宇热电冷联产的溴化锂吸收式制冷系统的一次能耗为

$$PE_{ca} = Q'_{hc}/(\mu\eta_{hc}) + W_a/(\eta_c\eta_a) \quad (5-2)$$

当量热力系数为:

$$\xi_{ca} = \frac{Q_c}{Q'_{hc}/(\mu\eta_{hc}) + W_a/(\eta_c\eta_a)} \quad (5-3)$$

$$\text{系统一次能耗率, } PER = 1/\xi_{ca} \quad (5-4)$$

5.2.2 两种制冷系统的一次能耗计算结果及分析

表 5-3 是电压缩式制冷系统与三联产吸收式制冷系统的能耗数据。根据表 5-3 中制冷系统的能耗，由公式 (5-2)、(5-3) 和 (5-4) 可分别计算出它们的一次能耗、一次能耗率和当量热力系数，结果见表 5-4。

表 5-3 1163kW 制冷系统能耗比较表

各部分能耗	压缩式制冷系统			溴化锂吸收式制冷系统(蒸汽双效型)				
	活塞式	螺杆式	离心式	$\mu=3.08$	$\mu=2.98$	$\mu=2.96$	$\mu=2.73$	$\mu=2.32$
冷水机组(kW)	281.16	247.7	231.4	—	—	—	—	—
冷水泵(kW)	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34	32.34
冷却水泵(kW)	26.96	26.96	26.96	48.58	48.58	48.58	48.58	48.58
冷却塔风机(kW)	8.25	8.25	8.25	12.38	12.38	12.38	12.38	12.38
溶液泵(kW)	—	—	—	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
电耗小计(kW)	348.70	315.25	298.95	99.30	99.30	99.30	99.30	99.30
蒸汽热能(kW)	—	—	—	839.23	839.23	839.23	839.23	839.23

注：吸收式制冷机选用上海开利 16JT836 型^[3]。

表 5-4 1163kW 制冷系统当量热力系数表

	压缩式制冷系统			溴化锂吸收式制冷系统(蒸汽双效型)				
	活塞式	螺杆式	离心式	$\mu=3.08$	$\mu=2.98$	$\mu=2.96$	$\mu=2.73$	$\mu=2.32$
一次能耗(kW)	1174.1	1061.4	1006.6	640	653	657	684	746
一次能耗率	1.01	0.92	0.86	0.55	0.56	0.56	0.59	0.64
系统当量热力系数	0.99	1.09	1.16	1.81	1.78	1.77	1.70	1.56

从表 5-4 可看出，对于燃气轮机—余热锅炉—双效式吸收式制冷机系统的一次能耗明显低于分产电压缩式制冷系统的一次能耗。因而在相同制冷量的情况下，三联产制冷系统比分产制冷系统要节能。从上表还可看出，燃气轮机的 μ 值越大，制冷系统所需的一次能耗越少，一次能耗率越低，当量热力系数也越大，也即节能率越高。

在所计算的制冷系统中，三联产制冷系统相对于采用离心式制冷机分产制冷系统的节能率都在 25%以上，最大的达到了 36%。

5.3 本章小结

通过对分布式热电冷三联产的能耗特点进行分析表明，以燃气轮机为动力源的热电联产系统热能效率明显高于分产的能源利用率。以制冷系统的一次能耗率为指标，对两种制冷系统的一次能耗进行了比较和分析，发现以燃气轮机为核心的分布式热电冷联产的制冷系统也有很大节能效果。

获取更多资料 微信搜索 蓝领学术

6 结 论

(1) 本论文从系统一次能耗和一次能耗率的角度对热电冷三联产、热电联产冷分产以及热电冷三分产的三种能量供应系统的能耗特点进行分析,能够同时从能源的数量上和能源的质上对能源有效利用提供指导。通过建立这三种系统一次能耗的数学模型,能够较好的反映一次能源在热、电、冷各部分的利用和分配,用它们来比较三联产系统的相对热电联产冷分产以及热电冷三分产的节能性是科学可行的。

(2) 根据理论分析,首先推导出热电联产系统 μ 值的计算公式。通过对不同类型的供热机组 μ 值进行计算,得出了 μ 值的大小主要与汽轮机的进汽参数和背压排汽或抽汽参数有关的结论,并指出 μ 值反映的实质是联产系统所消耗的总一次能在热、电、冷各部分上的比例分配大小。

(3) 对联产制冷系统和分产电压缩式制冷系统的一次能耗和当量热力系数进行了研究,发现热电冷联产吸收式制冷系统的节能性主要与两种制冷系统制冷机组的性能系数 COP 值和供热机组的 μ 值有关。当 μ 值为 1.86 时,联产制冷系统采用双效溴化锂制冷机组,与采用离心式制冷机组、螺杆式制冷机组和活塞式制冷机组的分产电压缩式制冷系统相比,节能率分别达到 18.5%、22.6%和 30.1%。

(4) 根据建立的系统一次能耗的数学模型,通过选取不同的锅炉、供热机组和溴化锂制冷机,组成三联产系统,详细地计算和分析了他们的能耗特点,并对三联产相对于热电联产,冷分产和热电冷三分产节能性进行了分析。

研究表明,三联产比二联产系统有一定的节能性,这符合三联产是在二联产的基础上发展起来的规律。当两种系统都采用背压机组时,随着供热负荷率 α 的减小,二联产系统总一次能耗增加,因此三联产的相对节能率增加。其一次能耗节约率比较大,以采用 B50-8.83/0.294 汽轮机的热电冷三联产系统为例,当热负荷率为 0.6 时,节能率达到 7.7%,能产生很好的经济效益。当两种系统采用抽凝机组时,三联产也是节能的,但节能率没有同容量背压机组的节能率大。影响三联产节能性的因素主要有①汽轮机的容量和参数;②制冷机组性能系数;③热负荷率 α (主要表现在锅炉效率随着锅炉负荷率的变化、汽轮机相对内效率随着进汽量的变化);④全国平均发电效率

η_{en}

一般情况下，热电冷三联产与热电冷三分产相比较，在热负荷率大的冬季和夏季是节能的。但在春秋过渡期，当热负荷率 α 很低时，三联产不一定节能，并得出了临界节能条件。

(5) 分布式热电冷联产与热电厂热电冷联产的能耗特点有点不同，它利用燃气轮机的排气为热源，如果不采用燃气—蒸汽联合循环，不影响发电量。通过从一次能耗的角度对分布式热电冷制冷系统的节能性，指出其有较高节能率，值得大力推广。但由于目前气价偏高，天然气楼宇热电冷联产只能逐步推广。相信随着西气东输工程的建设与国家能源政策的调整，燃气—蒸汽联合循环热电冷联供和分布式热电冷联产（楼宇热电冷联产）将会有极好的发展机遇和市场空间。

(6) 热电冷三联产系统是一个大型复杂的能量供应系统，影响系统能耗的因素很多，我们所做的一些探索性工作为这个大系统的能耗分析与设备选型提供了一个新的思路。但由于我的学识有限，文中难免有错误之处，还请各位专家多多指教。

致 谢

本论文是在导师叶涛老师的悉心指导下完成的。三年来，叶老师在学习和生活上给予我无微不至的关怀。在论文的选题、资料的收集、课题研究方法以及论文的撰写和修改等每个细节上，叶老师都倾注了大量的心血。叶老师那严谨求实的治学态度和平易近人的为人处世作风，使我受益匪浅。在此，谨向导师表示崇高的敬意和深深的感谢！

同时，我也十分感谢热动教研室和实验室的老师，他们在我的学习和课题研究中，给予我极大的关心和帮助。

感谢我的室友王春梅、张晓玲，和她们使我的生活更加光彩欢畅。感谢能源与动力工程学院 2001 级所有硕士研究生给我的帮助。

感谢我的男友阳东升，在学习和生活上，他给了我无穷的信心和动力，使我度过了难忘的研究生生活。

最后，要感谢我的父亲、姐姐和哥哥，正是他们无私的关爱和照顾，给了我巨大的精神动力，使我取得了现在的成就！我将在今后的工作和学习上加倍努力，来回报他们的爱！

熊震利

2004 年 4 月于喻园

参考文献

- [1] 叶涛, 李树人等. 热电发电厂. 北京: 中国电力工业出版社, 2004
- [2] 朱成章. 发展溴化锂吸收式空调对热电企业的作用. 热电技术, 2000(4): 4~7
- [3] V.Havelský. Energetic efficiency of cogeneration systems for combined heat, cold and power production. *International Journal of Refrigeration*, Vol: 22, Issue: 6, September, 1999 pp. 479~485
- [4] Marrero, I.O; Lefsafer, A.M; Razani, A.; Kim, K.J. Second law analysis and optimization of a combined triple power cycle *Energy Conversion and Management* Vol: 43, Issue: 4, March, 2002 pp. 557~573
- [5] Lazzarin, Renato M.; Gasparella, Andrea. New ideas for energy utilisation in combined heat and power with cooling: I. applications *Applied Thermal Engineering* Vol: 17, Issue: 4, April, 1997 pp. 369~384
- [6] Moné, C.D.; Chau, D.S; Phelan, P.E. Economic feasibility of combined heat and power and absorption refrigeration with commercially available gas turbines. *Energy Conversion and Management*. Vol: 42, Issue: 13, September, 2001 pp. 1559-1573
- [7] 张家驹. 热电冷联供节电又节能. 工厂动力, 1994(4): 11~19
- [8] 钟史明. 推广溴化锂制冷装置发展热电冷三联产. 热电技术, 1996(2): 7~10
- [9] 张万坤, 陆震等. 天然气热、电、冷联产系统及其在国内外的应用现状. 流体机械, 2002,30(12): 50~53
- [10] 李先瑞. 国外城市集中三联供的发展. 中国能源网, 2003-05-1
- [11] 张国芳. 国外热电冷三联产的现状和前景—热电厂工程系列报告之四. 热能动力工程, 1995, 10(5): 259~265
- [12] Hernández-Santoyo, Joel; Sánchez-Cifuentes, Augusto. Trigeneration: an alternative for energy savings. *Applied Energy* Volume: 76, Issue: 1~3, September - November, 2003, pp. 219~227
- [13] Tozer, R.M., Absorption chillers applied to CHP systems. *Building Services Engineering Research and Technology*, CIBSE, UK 1995 pp. 175~188
- [14] GG aidment, X. Zhao and S. B. Riflat. Combined cooling and heating using a gas engine in a supermarket. *Applied energy*, 2001,68(4): 321~335
- [15] 李先瑞. 国内城市集中三联供发展概况. 中国能源网, 2003-07-31

- [16] 严德隆、张维君. 热电冷三联产综合节能条件. 中国能源, 1996, (4): 29~33
- [17] Mone, C. D.; Chau, D. S.; Phelan, P. H. Economic feasibility of combined heat and power and absorption refrigeration with commercially available gas turbines energy. Conversion and Management, Sep 2001, Volume: 42 Issue: 13 pp. 1559-1573
- [18] 魏兵. 溴化锂吸收式制冷机的应用分析. 节能技术, 2002, 20(3): 30~32
- [19] 杨思文. 大力推广吸收式制冷机, 发展热电冷联合生产系统. 热电冷联产学术交流会议文集, 扬州, 1997, (8): 47~53
- [20] Monty Goodell. The Economic and Ecological Advantages of Onsite Trigenation Technologies and Integrated Energy Systems.
- [21] 郑贤德主编. 制冷原理与装置. 北京机械工业出版社, 2004.
- [22] 杜垲, 钱瑞年, 杨思文. 热、电、冷三联供应月分析. 动力工程, 1998, 18(2): 55~59
- [23] 顾昌. 热电冷联产的热经济性分析. 中国能源, 1994(3): 31~34
- [24] 郑体宽. 热电发电厂. 北京: 水力电力出版社, 1992
- [25] 张韵辉. 热电冷联产系统的节能性及评价指标研究. 武汉大学, 2001
- [26] 付林, 江亿. 从发电煤耗看热电厂冷联供系统的热经济性. 热能动力工程, 1999, 14(79): 10~13.
- [27] 冉景煜, 张力, 杨琳. 热电冷联产节能判定的新方法. 重庆大学学报, 2000, 23(5): 131~134
- [28] 吕静, 王中铮. 热电冷三联产评价标准述评. 节能, 1998, (7): 10~12
- [29] Facchini, Bruno; Frasci, Daniele; Manfreda, Gianpaolo. Exergy analysis of combined cycles using latest generation gas turbines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Apr 2000; Volume: 122; Issue: 2 pp. 233-238
- [30] 马捷, 黄芳, 苏永康. 基于热电厂的热电冷三联产技术及评价标准. 能源技术, 2000, (4): 199~201
- [31] 杜垲. 热电冷三联供应用分析. 能源研究与利用, 1997(6): 16~9
- [32] 陈君燕. 冷热联供系统的能耗估算. 暖通空调, 2001, 31(3): 12~15
- [33] 严德隆、张维君. 热电冷三联产综合节能条件. 中国能源, 1996(4): 29~33.
- [34] 戴永庆. 溴化锂吸收式制冷技术及应用. 北京机械工业出版社, 2001
- [35] 戴永庆. 溴化锂吸收式制冷空调技术实用手册. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [36] 化工部热工设计技术中心站编. 热能工程设计手册. 北京: 化学工业出版社, 1998

- [37] 范季贤, 汤蕙芬, 张伏生等. 供热制冷设备手册. 天津: 天津科学技术出版社, 1996
- [38] 小型热电站设计手册编写组. 小型热电站设计手册. 北京: 水利电力出版社, 1989
- [39] 王新雷. 小型供热机组的特点和应用条件. 海口, 中国电机工程学会热电专业委员会学术会议论文集. 2003.(9): 40~49
- [40] 金宏亮, 郭恩震. 负荷率与热电厂的经济效益. 能源研究与利用, 1997 (5): 8~12
- [41] 遇井牵, 杜治文. 供暖锅炉超负荷运行的探索(二)——供暖锅炉超负荷运行时的效率及经济分析. 北京节能, 1998(6): 23~25
- [42] 王乃宁, 张志刚. 汽轮机热力设计. 北京: 水力电力出版社, 1985
- [43] 俞建洪. 论燃气轮机热电冷联产分布式电源系统. 福建能源开发与节约, 2003, (3): 10~15
- [44] 段洁仪, 冯继蓓, 梁永建. 楼宇式天然气热电冷联供技术及应用. 煤气与热力, 2003, 23, (6): 337~341
- [45] 中国能源网, <http://www.china5c.com>, 2004
- [46] University of Maryland, <http://www.enme.umd.edu/cccc/bchp>, 2004
- [47] 张秋耀. 论燃气-蒸汽联合循环热、电、冷联供在我国的发展. 工程建设与设计, 2001 (6): 4~7
- [48] 索拉小型燃气轮机技术参数, 美国 SOLAR 公司, <http://www.solar.com>, 2003

附录 1 攻读学位期间发表论文目录

- [1]. 熊霞利, 叶涛, 丁学俊, 阳东升. 基于热电冷三联产的吸收式制冷系统节能分析. 华中科技大学学报, 2003, 31(10): 63~65
- [2]. 熊霞利, 叶涛, 阳东升. 基于热电冷联产的溴化锂吸收式制冷系统的节能分析. 中国电机工程学会热电专业委员会学术会议论文集. 海口, 2003(9): 241~245
- [3]. 阳东升, 黄凤洪, 刘根凡, 陈良才, 熊霞利等. 蛋黄卵磷脂制备工艺及超临界 CO_2 脱除蛋黄油实验研究. 过滤与分离, 2003(4): 1~4
- [4]. 熊霞利, 叶涛, 阳东升. 楼宇热电冷联产制冷系统节能研究. 暖通空调, 待刊

附录 2 符号与符号说明

μ —每 1kJ 燃料燃烧产生的高位热能相当于抽汽口处低位热能的 kJ 数

q_h —抽汽口每 kg 蒸汽可供热能, kJ/kg

h_h —抽汽口处蒸汽焓, kJ/kg

h'_h —所抽蒸汽的饱和水焓, kJ/kg

q —每 kg 蒸汽所消耗燃料热, kJ/kg

η_b —锅炉效率

η_p —管道效率

w —1kJ 所抽蒸汽在汽轮机中已做的功, kW·h/kJ

h_0 —汽轮机进口蒸汽焓, kJ/kg

η_m —汽轮发电机组机械效率

η_g —发电机效率

w' —1kg 蒸汽在替代电厂中所做的功, kW·h/kg

h_c —汽轮机排汽焓, kJ/kg

d —1kW·h 的功需要蒸汽量, kg/(kW·h)

γ —每 kW·h 功的热耗, kJ/(kW·h)

h_{f0} —锅炉给水焓, kJ/kg

Q_c —制冷量, kW

Q_{kc} —制冷机所需的热能, kW

ζ_{cc} —压缩式制冷系统的当量热力系数

ζ_{ca} —吸收式制冷系统的当量热力系数

W'_c —溴化锂吸收式制冷系统的耗电量, kW

η_{th} —供热效率

η_e —发电厂效率

η_n —电网效率

W_c —电压缩式制冷机耗电量, kW

W'_c —冷却水泵、冷水泵和冷却风机总的耗电量, kW

PE_{ht} —热电冷联产系统供热一次能耗, kW

Q'_{ha} —热用户所需热量, kW

η_{hs} —供热效率

PE_{cl} —热电冷联产系统制冷的一次能耗, kW

Q'_{hc} —吸收式制冷机所需热量, kW

PE_{el} —发电的一次能耗, kW

$PE_{e, ha}$ —供热汽流发电的一次能耗, kW

$PE_{e, hc}$ —制冷汽流发电的一次能耗, kW

$PE_{e, c}$ —凝汽汽流发电的一次能耗, kW

η_{ht} —供热汽流发电绝对内效率

η_{hc} —凝汽汽流发电绝对内效率

PE_{cl2} —热电联产冷分产系统制冷的一次能耗, kW

PE_{el2} —热电联产冷分产系统发电一次能耗, kW

PE_{el3} —热电冷分产系统发电一次能耗, kW

PE_{ht2} —热电冷分产系统供热一次能耗, kW

PE_3 —热电冷分产系统一次能耗, kW

Q'_{ha} —热电冷分产系统供热量, kW

η_{bcg} —热电冷分产系统区域锅炉效率

η_{pzd} —热电冷分产系统管道效率

W —发电量, kW

η_i —凝汽式发电厂的绝对内效率

D_G —蒸汽进汽量, kg/s

D_h —抽汽量, kg/s

q'_{hc} —制冷量为 1163kW 时吸收式制冷机所需热量, kW

q_{hc} —供热机组需供给 1163kW 制冷机的热量, kW

w —1163kW 冷量制冷机的耗电量, kW

w'_s —压缩式制冷冷却水泵、冷水泵和冷却风机总的耗电量, kW

X —供热负荷率

W_{ex} —补偿电量, kW
 τ_{c} —夏季制冷时间, h/a
 τ_{w} —冬季采暖时间, h/a
 τ_{e} —春秋两季稳定热负荷时间, h/a
 T —机组年运行时间, h/a
 Q_f —一次燃料热量, kJ/h
 D_f —余热锅炉产生的蒸汽量, kg/h
 D_g —燃气轮机排气量, kg/h
 h_1 —余热锅炉给水焓, kJ/kg
 h_2 —余热锅炉出口蒸汽焓, kJ/kg
 P —燃气轮机发电功率, kW
 η_b —非补燃余热锅炉效率
 v —燃气轮机发电热耗率, kJ/kW·h
 c_p —燃气轮机排气比热 kJ/(kg·K)
 t_p —燃气轮机排气温度, K
 t_0 —环境温度, ISO 条件下为 288K