

节 能 与 环 境 保 护 丛 书

冷热电联产技术

严俊杰 黄锦涛 何茂刚 编著



节能与环境保护丛书

冷热电联产技术

严俊杰 黄锦涛 何茂刚 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

冷热电联产技术/严俊杰, 黄锦涛, 何茂刚编著.
北京: 化学工业出版社, 2006. 1
(节能与环境保护丛书)
ISBN 7-5025-8153-7

I. 冷… II. ①严…②黄…③何… III. 热电厂-
热能-综合利用 IV. TM611

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 157957 号

节能与环境保护丛书

冷热电联产技术

严俊杰 黄锦涛 何茂刚 编著

责任编辑: 戴燕红 郑宇印

责任校对: 陶燕华

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限责任公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 339 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8153-7

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

节能与环境保护丛书

主 编 林宗虎 院士

副主编 俞炳丰 教授

张 旭 教授

车得福 教授

序

为了全面建设小康社会、不断开创中国特色社会主义事业的新局面，必须大力推进科技进步和创新，进一步发挥科学技术对经济社会全面发展的关键性作用。要大力发展高新技术和先进适用技术。要大力加强能源领域的科技进步和创新，提高我国资源特别是能源和水资源的使用率，减少资源浪费。要大力加强生态、环境领域的科技进步和创新，降低污染物的排放，加强对废弃物的再次利用，发展循环经济。这些都是中央当前对我国广大科技人员提出的殷切希望和要求。

我国虽然资源不少，但人口众多，人均能源资源十分有限。人均化石燃料仅为世界均值的 56%，石油天然气人均可采储量仅为世界均值的 8%。水力资源可开发量虽达 3.79 亿千瓦，但人均不到 0.3 千瓦。且一次能源消耗中主要为煤炭，约占总能源消耗的 70%，即使到 2050 年，煤炭耗量预计也将占一次能源总耗量的 50%，因此环境污染严重。我国三分之一以上国土受到酸雨危害，如不采取措施，二氧化碳排放量预计将从 2000 年占全球总量的 12.7% 增加到 2020 年的 16.7%。此外，空气中的粉尘、二氧化硫和氮氧化物的污染也很严重。因此，加强节能、提高能源利用率和改善能量利用中的环境保护已成为我国经济持续发展中的一个重要课题。

随着我国国民经济发展和人民生活水平的提高，家用电器的大量使用和建筑业的迅速发展不仅使能耗进一步增大，并且引起新的环境保护问题。

为了促进和推动节能工作，改善能量利用中的环境保护，特编辑出版了这一套丛书。这套丛书共 9 本，书名分别为：《强化传热技术》，《烟气热能的梯级利用》，《蒸汽凝结水的回收及利用》，《建筑环境与建筑节能》，《热泵技术》，《城市垃圾的处理与利用技术》，《冷热电联产技术》，《热管技术》和《洁净燃烧技术》。每本著作均由知名专家根据国内外近期科研成果和工程实践执笔编著，可供大专院校师生、科研院所和工矿企业相关科技人员应用和参考。希望这套丛书能对我国的节能和环保事业的发展有所裨益。

中国工程院院士

林宗虎

前 言

能源的合理利用及提高其利用效率不仅关系到资源节约和经济发展,而且影响到生态环境和人类前途,因此世界各国均把建立可靠、安全、稳定、高效的能源供应保障体系作为国民经济可持续发展的战略。

冷热电三联产是实现能量梯级利用、提高一次能源利用率的重要技术规划和措施之一。在欧美,进行热电联产已有 100 多年历史,后能源价廉,多数国家发展较慢,20 世纪 70 年代能源危机以来,促使人们考虑如何更有效地利用现有能源,各国政府都把“节约能源”、提高能源利用率作为本国的能源战略,这次能源危机促进了热电联产的发展。近年来,由于人们环境保护意识的进一步增强,世界各国对冷热电等多联产技术的开发和利用方兴未艾。本书针对目前国内外冷热电联产的相关理论和技术进行比较详细地介绍,可以为热电联产系统和冷热电多联产系统的设计、运行提供丰富的系统知识和理论基础。

本书分为 11 章,主要介绍了热负荷、冷负荷、热电联产、供热热力网、热电厂供热机组的特性及热力系统分析、制冷技术、制冷工质及载冷介质、冷热电三联产、冷热电联产系统经济性、新能源供热、制冷等。

本书第 1、2 章,第 4~6 章由西安交通大学严俊杰编写,第 9~11 章由西安交通大学黄锦涛编写,第 3 章、第 7、8 章由西安交通大学何茂刚编写。

在编写过程中,西安交通大学电厂热能研究所、热工教研室的部分研究生提供了大量帮助和支持。在此编者向他们表示深切的谢意。

限于编者水平,书中不足和错误在所难免,恳请读者批评、指正。

编者

2005 年 10 月

内 容 提 要

本书在介绍冷热电多联产的发展历史和现状的基础上，对目前国内外冷热电联产的相关理论和技术进行了比较详细的介绍。

主要包括热负荷、冷负荷、热电联产、供热热力网、热电厂供热机组的特性及热力系统分析、制冷技术、制冷工质及载冷介质、冷热电三联产、冷热电联产系统经济性、新能源供热制冷等。

本书为热电联产系统和冷热电多联产系统的设计、运行提供了丰富的系统知识和理论基础，可以作为高等学校本科生教材，以及作为从事冷热电多联产开发、设计、运行的工程技术人员的参考用书。

目 录

1 绪论	1	6.3 热电联产机组热力系统定量分析	77
1.1 热电联产在国内外的的发展状况	1	方法	77
1.2 冷热电联产在国内外的的发展状况	3	参考文献	86
1.3 冷热电联产系统的组成与应用领域	5	7 制冷技术	87
参考文献	7	7.1 常用制冷方法及其应用	87
2 热负荷	9	7.2 蒸气压缩式制冷	91
2.1 热负荷的分类	9	7.3 吸收式制冷	102
2.2 各种热负荷的计算方法	10	参考文献	109
2.3 热负荷图	12	8 制冷工质及载冷介质	110
2.4 年耗热量和最大热负荷利用小时数	18	8.1 制冷工质	110
参考文献	18	8.2 载冷和蓄冷介质	134
3 冷负荷	19	参考文献	138
3.1 冷负荷的分类及其计算方法	19	9 冷热电三联产	139
3.2 冷负荷计算	21	9.1 概述	139
3.3 建筑空调冷负荷估算	31	9.2 燃气轮机冷热电三联产	140
参考文献	33	9.3 楼宇冷热电联供的概念	142
4 热电联产	34	9.4 小型冷热电联供动力设备	146
4.1 热电联产的意义	34	9.5 楼宇冷热电联供系统实例	
4.2 热电联产的基本形式	36	(BCHP)	163
4.3 热电厂的热经济性	43	参考文献	168
4.4 热化系数	50	10 冷热电联产系统经济性	169
参考文献	53	10.1 热经济性评价指标	169
5 供热热力网	54	10.2 热经济性分析实例	171
5.1 供热系统载热介质	54	10.3 技术经济评价	181
5.2 热水供热系统	55	10.4 冷热电联产系统技术经济性	185
5.3 蒸汽供热系统	59	参考文献	194
5.4 热力网的调节	61	11 新能源供热、制冷	196
5.5 热电联产的热网加热器的热负荷		11.1 概述	196
分配	65	11.2 地热能供热、制冷	196
参考文献	70	11.3 太阳能采暖、制冷	200
6 热电厂供热机组的特性及热力系统分析	71	11.4 低温核供热	204
6.1 供热机组的动力特性	71	参考文献	211
6.2 热电联产机组的运行工况图	73		

1 绪 论

能源是国民经济发展的重要物质基础。能源工业是国民经济的基础产业，是实现现代化的物质基础，世界各国都把建立可靠、安全、稳定的能源供应保障体系作为国民经济的战略问题之一。中国是世界上能源蕴藏和能源生产大国，中国的一次能源生产居世界第三位，但人均能源占有量仅为世界人均值的 36% 左右。同时中国的能源利用率较低，目前仅为 32% 左右，与发达国家的能源利用率 40%~50% 相比，存在着较大差距，而单位国民生产总值能耗却是发达国家的 3~4 倍。中国政府对能源问题十分重视，提出了“节约与开发并重，近期把节约放在优先地位”的能源方针政策。

在能源供应日益紧缺的今天，合理利用能源，提高能源利用率已成为世界各国普遍关注的问题。冷热电三联产是在热电联产基础上发展起来的，它使燃料燃烧产生的具有较高品位的热能通过汽轮机或燃气轮机等热工转换设备发电，同时利用做过功的品位较低的热能（或称余热）冬季向用户供热、夏季利用消耗热能的制冷机组向用户供冷。

冷热电系统具有如下优点：

① 冷热电三联产是能源的分级利用，可以提高一次能源的利用率，达到能源综合利用的目的；

② 冷热电三联产稳定了用户的用热量，与只进行热电联产的系统相比增大了发电设备夏季的发电量，可以降低整体燃料消耗量；

③ 在夏季空调用电高峰季节，冷热电三联产中用消耗热能的制冷机组代替电制冷机组，一方面减少了 CFC 的使用和二氧化碳的排放量，有利于减轻温室效应和保护臭氧层，另一方面缓解电网用电压力；

④ 空调末端采用风机盘管，各空调房间互相独立，便于灵活控制和调节，有利于节能。因此，冷热电联产将会在世界各国得到广泛应用。

1.1 热电联产在国内外的的发展状况

1.1.1 热电联产在国内外的的发展历史

早在 19 世纪 80 年代，霍利就利用工厂排汽进行了加热应用，这也是最早的联产应用，后来到了 1893 年“汉姆博哥（Humburg）”的市政大楼接收中心电站的热量进行取暖热利用，从此余热用于取暖逐渐成为一种较普遍的选择方案。到了 20 世纪初，汽轮机在技术和经济上显示出超过蒸汽机的趋势，英国在 1905 年制造了世界上第一台热电联产汽轮发电机组，开始了汽轮机既发电又供热（供汽）的历史。此后，在欧洲和美国的工业企业中都相继出现了各种热电联产汽轮发电机组。如 1907 年美国的 WH 公司制成了可以调节抽汽压力的抽汽式热电联产汽轮发电机组。当时欧洲和美国的工业正在迅速发展，电力供应十分紧张，各行各业的生产发展需要有可靠的电力保证，许多工业企业或部门的生产过程既需要电能又需要热能，而热电联产机组能够同时满足电能和热能的需要，并且比分别提供电能和热能的其他方案在技术上、经济上更为有利，因此，自 1911 年起，热电联产机组在欧洲和美国得

到了快速的发展。迎来了热电联产技术发展的第一个高潮阶段。

随着汽轮发电机组容量越来越大，中心电站离城市也越来越远，这样使利用电站废热进行区域供暖的费用增加，而当时燃料便宜，电价相对较低，从经济角度出发，各企业都从电网购电，不愿发展热电联产项目，加上第二次世界大战的影响，使热电联产技术的发展出现了停滞的局面。但 20 世纪 70 年代的能源危机，促使人们重新考虑如何更有效地利用现有能源，各国政府都把“节约能源”、提高能源利用率作为本国的能源战略，这次能源危机促进了热电联产的发展，迎来了热电联产的第二个春天。

热电联产在中国的发展，也经历了上升、停滞、再上升三个阶段。大规模建设热电厂、发展热电联产工业是从解放后开始的，从第一个五年计划开始，进行了大规模的工业建设，热电联产和电力工业的发展齐头并进，在一些新兴的工业区，建设了区域性公用事业热电站，如富拉尔基、吉林、长春、北京、太原、包头、兰州、西安、洛阳、武汉、南京、石家庄、保定等高中参数热电厂。从 1953 年到 1967 年，共建成 6MW 以上供热机组的总容量达 2950MW，占火电机组总容量的 20%，其中公用电厂装机容量为 2450MW，占 80% 以上。这一时期奠定了中国热电联产工业的基础。

在“四五”计划期间，由于备战和十年动乱的影响，热电联产发展十分缓慢，甚至到了停滞的地步。“四五”期间仅投产供热机组 513MW，占新投产发电机组容量的 4.6%。其中，公用供热机组容量占 29%，大部分是自备热电厂。“五五”期间，仍没有相对稳定的国民经济发展规划，投产供热机的容量为 975MW，占新建火电装机容量的 6.8%，公用供热机组只占 23%，主要也是企业的自备热电厂。

“六五”计划期间，热电联产建设开始了新阶段，中央提出了到 2000 年工农业总产值翻两番，人民生活提高到小康水平的宏伟战略目标，在能源政策上提出了节约和开发并重的方针，在节约能源上采取了一系列措施，积极鼓励集中供热、发展热电联产。“六五”和“七五”期间，原国家能源投资公司共参与节能基建热电项目 291 个，总容量 6880MW（其中小热电 2210MW），总投资 91.6 亿元，共节约基建投资 52.6 亿元。

1.1.2 热电联产在国内外的发展现状

热电联产在北欧和东欧的发展较快。前苏联 60% 的采暖和工业用热来自热电站，热电占火电的比例为全世界最高，达到了 39%，供热机组装机容量 93000MW，年发电量 4900 亿 kW·h，热电站的年供热量为 5.5×10^{15} kJ，城市集中供热的热化率达到 70%，有的城市达到 100%。荷兰是欧洲热电联产最发达的国家之一，热电机组装机容量达 4000MW，工业用户占一半以上，主要用于区域供热及该国发达的园艺工业。德国拥有 22000MW 的热电容量，其中一半用于大型市政，另一半用于工业，占全国总电力需求量的 16% 以上。向规模庞大，但很陈旧的区域供热系统供热的机组多为汽轮机组，向工业用户供汽的设备多为燃气轮机机组。英国约有 3700MW 的热电容量，还有 200MW 的待建容量，自 1990 年英国开始电力工业私有化以来，热电容量增加 50%，到 2000 年达 5000MW 左右。英国的热电容量约占总发电量的 5%，绝大部分现有的供热机组是供应工业用热。

丹麦和芬兰热电联产和区域供热是北欧发展最快的。自 1973 年以来，丹麦由热电联产提供区域供暖的热量由原来的 33% 提高到 64%。1991 年，丹麦的热电联产电站满足 40% 的全国用热需求和 28% 的全国用电需求，到 1995 年，丹麦拥有热电联产电站 240 座，成为世界上热电容量占全国总发电量比例最高的国家。芬兰 73% 以上的区域供暖用热来自热电联产电站，同时热电联产电站也满足 30% 的总用电量需求，区域供热供应了 45% 的建筑采暖，

到 1996 年，90％以上总用热需求是通过热电联产提供的。

1978 年，美国国会通过的“国家能量法”，促进了美国热电联产事业的发展。1980～1985 年美国的热电联产容量增加了 10000MW 以上，到 1987 年又增加了 20000MW，到 2000 年，美国所新增加的发电能力，基本都是用热电联产来实现的，热电联产容量占美国总发电量的 10％左右。

最近几年，中国热电联产事业得到了迅速发展，经过 40 多年来热电建设的经验积累，目前已形成一条中国式的热电联产发展道路。

到 2003 年底为止，中国热电联产的情况是，供热设备容量 30000MW，年供热量 $20 \times 10^8 \text{ GJ}$ ；平均供热厂用电率 $7.10 \text{ kW} \cdot \text{h/GJ}$ ；供热标准煤耗率 40.77 kg/GJ 。6000kW 及以上供热机组占同容量火电装机总容量的 10％。在运行的热电厂中，规模最大的为吉林热电厂，装机容量 850MW，在北京、沈阳、吉林、长春、郑州、秦皇岛和太原这些中心城市已有一批 200MW、300MW 大型抽汽冷凝两用机组运行。

1.2 冷热电联产在国内外的的发展状况

1.2.1 冷热电联产在国外的发展现状

世界上一些经济基础比较雄厚的国家，人民的生活水平也较高，能承受得起冷热电联产系统的巨额投资，且这些国家重视节能工作，环境保护意识很强。因此，三联产系统首先在经济发达国家得到了应用。表 1-1 列出了国外部分冷热电三联产系统。

表 1-1 世界上主要城市的冷热电联产系统

国 家	城 市	冷热电三联供区域	种 类	年 份
美国	洛杉矶	哈卡商业街、洛杉矶国际空港、逊丘里弟街区	D H C	
	巴托阿多		D H C	1938 年(非商业) 1964 年(商业)
	纽约	国际空港、罗斯奇弟鲁街区	D H C	
	华盛顿	卡皮杜鲁商业街	D H C	
	芝加哥	罗哈托住宅区	D H C	
	特弟斯巴左	NBS(美国标准局)	D H C	
	奥玛哈	奥玛哈街区	D H C	
	达累斯萨达母	达累斯萨达母街区	D H C	
	萨阿多里阿	萨阿多里阿街区	D H C	
加拿大	多伦多	多伦多市街区	D H C	
	温哥华	温哥华政府区	D H C	
	勒斯脱	勒斯脱街区	D H C	
法国	巴黎	巴黎街区	D H C	1967
英国	伦敦	伦敦市街区	D H C	1994(一期) 1996(二期)
	曼彻斯特	曼彻斯特机场	D H C	1993 年投运
葡萄牙	里斯本	世博新村	D H C	1998 年投运
日本	札幌	札幌市地铁车站	D H C	1989 年
	东京	新宿市中心(东京煤气公司运营)	D H C	1991 年投运
	大阪	千里街区	D H C	
韩国	汉城	汉城五个大街区	D H C	

美国 1938 年在哈西杜的某大楼内首先建立了城市集中冷热电三联产系统，最近几十年，美国为了发展冷热电三联产事业，采取了更新经营模式、联合研究和政策扶植等措施，并编制了长达 20 年的研究发展目标，工业界也提出了“CCHP（即 DHC）创意”和“2020 年纲领”，以支持美国能源部的总体商用建筑冷热电联供规划，因此美国成为冷热电三联产应用技术较为成熟的少数国家之一。日本由于社会发达而资源缺乏，故对冷热电三联产工程十分重视。据报道，在 20 世纪 80 年代后半期中，日本对区域供热和制冷的需求增长了一倍，达到每年 $2.5 \times 10^7 \text{ GJ}$ ，因此在东京、札幌、大阪等许多城市都出现了冷热电三联产系统。1998 年 5 月，欧洲第一套冷热电三联产机组在葡萄牙首都里斯本的世博新村投入运行，其机组的主要技术指标为，发电量 5MW、制冷量 60MW、供热量 44MW、管网总长 44km、冷水储罐 15000m³，其工艺过程为天然气在燃气轮机中燃烧发电，其排气被引至余热锅炉中产生蒸汽，蒸汽供给城市热力管网及制冷机组，而吸收式机组保证第一阶段的冷冻水的生产，即由 12℃ 降为 8℃，然后经压缩机冷却至 4℃。经测算，这样一套三联产机组的总效率较单独生产电（能）的机组的效率由 30% 提高到 85%。1990 年 10 月，韩国汉城委托芬兰柯诺能源有限公司为汉城及其卫星城建立了目前世界上最大的区域冷热电三联供系统，此工程提供的总热负荷为 4290MW，总冷负荷为 1120MW，覆盖区域 73km²，覆盖人口 245 万人。

1.2.2 冷热电联产在国内的发展现状

中国的冷热电三联产系统是最近几年才发展起来的。1992 年，山东省淄博市率先利用张店热电厂的低压蒸汽的热源，实现了冷热电三联产。随后，济南、南京、上海等城市也相继出现了冷热电三联产系统。表 1-2 列出了国内部分城市的冷热电三联产系统。

表 1-2 中国的冷热电联产系统

城市	三联产区域	种 类	概 况	年 份
淄博	张店	热电厂汽源	1993 年供冷 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，供暖 $108 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，供汽 15.5t/h，铺设蒸汽管网 12km，投资 600 万元；铺设二级管网 20km，投资 800 万元；建冷暖站 6 座	1993 年投运
淄博	岫山村(万杰集团)	热电厂汽源	利用村属 12MW 热电厂排汽和冷暖站 1 座实现对全村 718 户、1905 人的三联供	
济南	顺花玉小区	热电厂汽源	采暖面积 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，空调面积 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，其中 60% 实现了集中供热、供冷、供生活用热水，热源为热电厂送来的低压蒸汽，小区设有汽水换热站，冬季用汽水换热器将蒸汽换成热水，用来供暖、供生活用热水，夏季用蒸汽型溴化锂制冷机制冷、供生活用热水	
北京	热力公司办公楼	热电厂热源	供热、供冷面积 5600m ² ，三联供方案，制冷：热电厂蒸汽+吸收式制冷；采暖：热电厂热水+板式换热器；室内：风机盘管机组	1995 年 6 月投运
常州	市中心区文化宫地段	热电厂热源	冬季热负荷 11592MW，夏季冷负荷 15666MW，三联供方案同上	1997 年
太原	东山热网-太原火车站	热电厂热源	享受东山热网三联供项目的第一用户是太原火车站，该站选用热水两段型溴化锂吸收式冷水机制冷，供水温度 7℃，供冷面积 $2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，用户室内温度达 23℃，供冷效果完全符合国家规定	

续表

城市	三联产区域	种 类	概 况	年 份
上海	黄浦区中心医院新大楼	燃气轮机+余热锅炉+吸收式制冷机	燃气轮机选用美国 Solar 公司的 SAT-URN T1501 型余热锅炉,其参数为 0.8MPa,额定蒸发量 3300kg/h,2 台溴化锂吸收式制冷机组	1998 年 3 月一次试车成功
哈尔滨	哈尔滨制药厂	自备热电厂+吸收式制冷机组	哈尔滨制药厂三联供公用工程系统经过 10 多年的改造建设,形成了额定蒸汽蒸发量 175t/h,额定发电能力 9000kW,额定供压缩空气能力为 800m ³ /min,额定制冷能力 38850kW 的冷热电联产系统	1984 年额定蒸发量为 70t/h,额定发电 6000kW,两炉两机相继并网发电;1996 年溴化锂制冷机已增设至 20 台,额定制冷能力为 38850kW

虽然冷热电联产目前还是个新兴的研究方向,但由于其在大幅度提高能源利用率及降低二氧化碳和污染空气的排放物方面具有很大潜力,目前已经在西方发达国家和中国某些地区得到了较快的发展。中国 20 世纪 80 年代初期制定了“能源开发与节约并重,近期把节约放在优先地位”的能源发展总方针。这一节能规划的实施使得中国能以较少的能源投入支撑了经济持续稳定地增长,并且对提高经济效益,推进技术进步,减少环境污染等方面也起到极其重要的作用。未来中国的能源需求,尤其是优质能源的需求量也将持续上升,而随着人们对因能源使用而导致的局部地区乃至全球环境问题认识程度的逐渐加深,中国面临的环境压力也将越来越大。相信随着现代社会人居环境水平的提高和环保意识的增强,冷热电三联产事业必将在中国得到更大的发展。

1.3 冷热电联产系统的组成与应用领域

1.3.1 冷热电联产系统的组成

冷热电三联产系统包括由蒸汽轮机、燃气发动机或柴油机发动机等带动的发电机组,抽汽、排汽或工业过程余热驱动的制冷机组,及抽汽、排汽或工业过程余热提供的供热及生活热水系统。冷热电联产系统按照各部分的功能分为五个部分,即驱动系统、发电系统、供热系统、制冷系统和控制系统。图 1-1 为冷热电联产系统简图,表 1-3 为冷热电联产系统构成。将下述设备进行不同的组合就组成不同型式的冷热电联产系统。

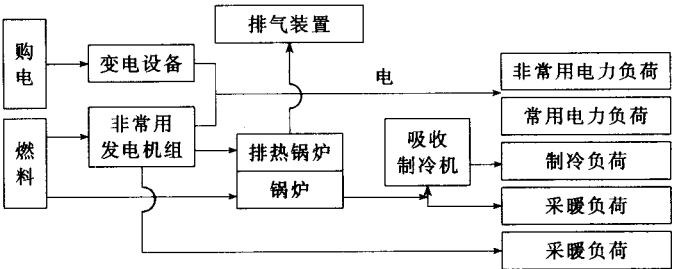


图 1-1 冷热电三联产系统简图

(1) 驱动系统的分类

驱动系统可分为蒸汽轮机系统、燃气轮机系统、柴油发动机系统、燃气发动机系统和燃料电池系统等。

① 蒸汽轮机系统 锅炉产生高压蒸汽,以抽汽或排汽作为制冷、采暖和生活热水的热

源，欧洲和中国广泛采用的热电联产即为这种形式。但存在如下问题：a. 发电效率较低；b. 单位出力的初投资高，目前，中国已达 1 万元/kW；c. 启、停时间较长；d. 占地大；e. 当蒸汽量比发电量多时，蒸汽会有余量等。

表 1-3 冷热电联产系统构成

分 类	设备及组成	能源转换过程或功能	分 类	设备及组成	能源转换过程或功能
驱动系统	蒸汽轮机	高压蒸汽→动力	供热系统	热源	抽、排汽→供热热媒
	燃气轮机	煤气、天然气、油→动力		热力网	供热热媒的输送
	柴油发动机	油→动力		热用户	热量消费者
	燃气发动机	煤气、天然气→动力	制冷系统	压缩式制冷机	蒸汽动力→冷水
	燃料电池	煤气、天然气→动力		吸收式制冷机	蒸汽、燃气、油→冷水
发电系统	发电机	动力→电			

② 燃气轮机系统 利用煤气、天然气、油等燃料驱动燃气轮机并发电，将排气引入余热锅炉内，以低压蒸汽或热水形式回收，满足用户采暖、空调和热水的要求。

③ 柴油发动机系统 发动机的排气进入余热锅炉，产生蒸汽或热水；汽缸水套冷却通过热交换器产生热水用于制冷、采暖和生活热水。以柴油发动机作为能源驱动的发电机大多数为备用设备，仅用于天然气管网不涉及的地区，在有天然气管网的地方，大多采用燃气发动机系统。柴油发电机在额定负荷时的热平衡为发电量约为 30%，冷却水、润滑油的放热约为 27%，排气的放热约为 34%，其余为发电机的辐射散热。它的跟踪负荷变化能力强，具有如下特征：a. 发电效率高，发电量和回收热量的比适合于热电联产系统；b. 单位出力的初投资低；c. 运行简单，启停时间短；d. 小型、质量轻；e. 可作为备用机。排热的形态如下：a. 在满负荷时，排气温度约为 450~500℃，便于安装热回收装置，但为了避免亚硫酸气体的腐蚀，只能回收到 200℃ 以上的能量，此时仅能回收一半的排热量，用脱硫装置能够除去排气中的 SO_x，但处理含量为 400~1000ppm (1ppm=1μL/L，下同) 的 NO_x 却很困难；b. 冷却水，发动机汽缸套内的放热量约为总输入能量的 30%，具有回收的可能性。冷却水温度约为 90℃，能满足用户采暖、制冷和生活热水的要求。

④ 燃气发动机系统 从燃气发动机的冷却水、排气中可进行热回收，系统构成同柴油发动机系统。但柴油发动机排气中含有许多污染物，不能直接用于直燃机，而燃气发动机排气非常洁净，可直接利用，发电效率约为 30%。但热平衡不同于柴油发动机系统，其冷却水的放热量多，排气量少，但温度高，而且能回收到 160℃ 的能量，能量的利用程度与柴油发动机系统基本相同。

⑤ 燃料电池系统 在燃料电池系统中，直接将天然气等变换为电力，在发电的同时，利用回收的热能采暖、制冷和供应热水。发电效率约为 40%，排热为 130℃ 高温水或 70℃ 热水，综合热效率可达 80%。它具有如下特征：a. 发电效率高；b. 使用化学过程转换为电，噪声、振动小；c. 即使小型亦能高效；d. SO_x、NO_x 排量少；e. 启动需要一定的时间。

(2) 供热系统的组成分类

供热系统由热源、热力网和热用户三部分组成。热源负责制备热水、蒸汽，热力网负责热水、蒸汽的输送，热用户指用热的场所，可以是民用住宅、公用建筑，也可以是工业厂房。热用户对热量的需求也被称为热负荷，热负荷可详细划分为采暖和通风热负荷、热水供应热负荷、生产热负荷（包括工艺热负荷、生产动力热负荷）。热负荷也可根据随时间的变

化特征分成季节性热负荷和非季节性热负荷，采暖和通风热负荷为季节性热负荷；热水供应热负荷和生产热负荷统称为常年性热负荷。

(3) 制冷系统的组成及分类

冷热电三联产的制冷方式总体上可分为压缩式和吸收式两种，其中压缩式制冷又可分为电动压缩式制冷和蒸汽压缩式制冷；吸收式制冷有氨-水吸收制冷和溴化锂-水吸收制冷。电动压缩式制冷要消耗高品位的电能，蒸汽压缩制冷要消耗高品位的热能。而吸收式制冷消耗的是汽轮机抽汽、排汽或其他工业过程的余热等低品位的热能，实现了能量的分级应用。其基本工作原理为使用高沸点的物质（吸收剂或溶剂），在一定条件下可以吸收（或溶解）低沸点物质（制冷剂或溶质），组成二元溶液，溶液的温度低，溶质的溶解度就大；溶液的温度高，溶质的溶解度就小，利用溶液的这一特性制冷。目前，由于溴化锂-水吸收制冷技术比较成熟，而且可很方便地与热电联产技术结合，实现冷热电联产，因此，现在运行的冷热电联产机组大部分采用了这一技术。

1.3.2 冷热电三联产的应用领域

冷热电联产已经采用和将来可能采用的主要领域有三方面。

(1) 工业领域中的三联产 工业领域中水泥厂、造纸厂、制药厂、食品加工厂、纺织印染厂、橡胶厂等本身的工艺过程就需要一定数量和参数的蒸汽，而且热负荷一般比较稳定。有时它们还因需用压缩空气和制冷（冷冻及空调）而消耗一定的电力。实现冷热电三联产则可以达到节电和节能的目的。

工业领域中实现三联产的一个途径是建设小规模“工业能源中心”。特别是对开发区、工业区和新建的工业城（园）来说，通过集中的“工业能源中心”向工厂供热，为居民制冷，给全区提供电力，有节电节能及改进环保的多重效果。

(2) 城市建设和改造中的三联产 建设规模较大的“城市能源中心”，通过地下管道向市内各重要建筑物供热、供冷和供电，是城市三联产的主要途径。

实际上，这主要是现有热电厂的扩建和改造。热电厂的蒸汽（热源）通过一级管网输向由各种换热和制冷设备组成的“冷暖站”（溴化锂吸收式制冷机是通常采用的制冷设备），然后，由二级管网将“冷暖站”产生的冷水或热水输向用户的风机盘管实现空调或取暖。为保证正常运转、监控或调节，需配有完善的控制和计量系统。

实施冷热电三联产对热电站来说具有众多好处。特别是夏季由于热负荷不足，而电负荷大增，利用吸收式制冷空调则“削平”了用电的高峰，“填齐”了热负荷的波谷，既节电又节能，还带来了环保效益。

对城市来说，也可以利用垃圾焚烧炉来获得蒸汽，或者在邻近油气田和大型焦化厂、钢铁厂的地区，在汽轮机的前面前置燃气轮机，可兼得较好的环保效益。在人口稠密而又有众多未被利用的低品位热能的地方，利用热泵先提高其品位，然后加以利用使之产生一定规格的蒸汽或热水，也可以实现三联产。

(3) 各种民用场合中的三联产 各种民用场合，像高层住宅、宾馆、医院、体育场馆、休闲中心、集体宿舍及火车站、轮船码头和飞机场等各种建筑和场所，对设施齐全、生活舒适有较高的要求。在这些地方实行独立的封闭式三联产也大有可为。

参 考 文 献

1 徐二树，宋之平等．热电联产的发展．电力情报，2001，(3)

- 2 杨玉军. 我国热电联产的发展趋势. 中国能源, 2004, 26 (10)
- 3 李先瑞. 国外区域供热供冷技术在高层建筑中的应用. 节能与环保, 2002, (9)
- 4 石兆玉. 供热系统运行调节与控制. 北京: 清华大学出版社, 1994
- 5 E. 索柯洛夫. 热化与热力网. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 6 强国芳. 国外冷热电三联产的现状与前景. 热能动力工程, 1995, 10 (5)
- 7 吴子斌. 我国冷热电三联供发展对策研究. 大连: 大连理工大学, 2000
- 8 张清滨摘译. 欧洲第一套冷热电三联产机组简介. 工程设计 CAD 与智能建筑, 2001, 11
- 9 李娥飞. 暖通空调设计通病分析手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- 10 朱成章. 从热电联产走向冷热电联产. 国际电力, 2000, 2
- 11 Irwin Stambler. Cogen Loop Improves Flexibility of Tokyo District Heating and Cooling Plant. *Gas Turbine World*, 1990, 20 (5)
- 12 张殿军. 改造区域供热系统为区域供热与供冷联合系统. 区域供热, 1998, 1
- 13 李先瑞. 国内城市集中三联供发展概况. 区域供热, 1997, 6
- 14 杨玉恒. 发电厂热电联合生产及供热. 北京: 水利电力出版社, 1989
- 15 武学素. 热电联产. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- 16 J. Marecki 著. 热电联合生产系统. 西安: 西安交通大学出版社, 1992
- 17 石兆玉. 供热系统运行调节与控制. 北京: 清华大学出版社, 1994
- 18 赵伯英. 供热工程. 北京: 冶金工业出版社, 1988

2 热 负 荷

2.1 热负荷的分类

无论是工业企业、市政建筑、居民住宅还是各种公用建筑，都有各种目的的热消费需求。当热量用于不同目的时，它的需求量及其变化规律对载热质种类及参数就有不同的要求，这就要求对不同种类的热负荷分别进行研究。根据热负荷的服务目的不同，一般可分为采暖热负荷、通风热负荷、热水供应热负荷、工艺热负荷和生产动力热负荷等。这几种热负荷的特性如下。

① 采暖热负荷 采暖热负荷是当室外环境温度低于供暖设计温度时，为保证室内温度维持设计温度，不间断地由供热设备向室内输送的热量。其热负荷大小首先决定于房屋内外的温度差，由于采暖的室内温度保持一定，采暖热负荷的大小就主要取决于室外空气温度。

采暖热负荷在一昼夜内可以认为是不变的，而一年中变化是很剧烈的。夏天为零，采暖期间它的变化范围可以很大，随室外温度的变化而变化。

② 通风热负荷 通风热负荷是根据通风系统设计的要求而确定的。通风系统一般是以自然通风或机械通风方式将室内被有害物质污染的空气排除，并为其提供新鲜空气的系统。由于有害物质分为粉尘、有害蒸气和气体、余热、余湿四类，前两类对人体危害较大，因此粉尘排除必须采用除尘设施，其他三类用新鲜空气置换或稀释，以达到卫生标准要求。只有装有强迫送风的通风系统才有通风热负荷。

通风热负荷的大小和供暖热负荷一样，首先取决于外界空气温度。其不同之处在于通风热负荷不是全昼夜的，只有在通风系统工作的时候才有这种负荷。通风热负荷不只在一年内是变化的，而且一昼夜内也是变化的。

③ 热水供应热负荷 热水供应热负荷是将热量用于加热水供应给用户使用。这种热水可用于印染、漂洗等生产工艺过程。同时随着人们物质和文化生活水平的提高，生活热水供应的发展规模也在日益增大。

热水供应热负荷与室外气温无关，全年变化小，而一昼夜内却是不均衡的。它的变化主要取决于工厂的工作班次（两班或三班制）及居民的生活习惯，难以进行精确计算，深夜可能降为零，上班时或居民工作结束后负荷增大，非工作日或节假日的民用热水量也比平时增大30%左右。根据卫生要求，热水负荷的水温一般为60~65℃。热水用量标准或定额可以通过相关专用手册确定。

④ 工艺热负荷 工艺热负荷是以各种生产为目的的热消费，主要用于烘干、加热、熨平、蒸馏、清洗等工艺过程。多用0.15~0.6MPa的低压饱和蒸汽，它的大小及变化情况完全决定于工艺过程的性质及企业的生产制度。这种热负荷在一昼夜内有极大的变化，但在全年之内变化规律大致相同。

由于工业企业中用热设备的种类和工作性质不同，工作制度不一致，这种热负荷不可能用某个固定的公式来确定，一般是用综合各种生产工艺过程的计算用热量来确定，还应该考