



普通高等教育“十二五”规划教材

热电冷联产原理与技术

葛 斌 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

热电冷联产原理与技术

编著 葛 斌
主审 曹祖庆



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书从能源合理、梯级利用和可持续发展的角度出发,系统地阐述了集中式、分布式热电冷联产的基本原理、热力学分析和经济性评价,着重介绍了汽轮机热电联产和吸收式制冷的概念和技术特征,分别介绍了循环函数法和热经济学分析法及其在联产系统计算分析中的应用,从冷热负荷变化与系统性能的关系着手,介绍负荷特性和需求分析,根据我国当前联产系统的发展与能源政策,介绍了供热机组配置选型、热电冷负荷优化分配、热电成本分摊方法。此外,还详细介绍了供热机组改造技术及其工程应用,并力求反映近年来热电冷联产系统的新发展。

本书可作为高等学校本科能源与动力工程、建筑环境与设备工程和相关专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热电冷联产原理与技术/葛斌编著. —北京:中国电力出版社, 2011.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2092-5

I. ①热… II. ①葛… III. ①热电冷联供—高等学校—教材
IV. ①TK01

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第182152号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011年9月第一版 2011年9月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12印张 288千字

定价 22.00元



敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书是编者在多年使用过的热电联产讲稿、讲义的基础上,结合多年的教学经验,不断总结修改而成的,其中包括了编者及本专业同行们在热电冷联产领域中的部分科研成果。

全书共分9章。它以常规汽轮机热电联产系统为重点,系统地阐述了集中式热电冷联产的基本原理、热力学分析和经济性评价方法;介绍了热电冷联产在国内外发展的概况和趋势,并对新近发展的分布式热电冷联产也做了扼要的介绍;介绍了循环函数法和热经济学分析法及其在联产系统计算分析中的应用;从冷热负荷变化与系统性能的关系着手,详细介绍了负荷特性和需求分析;扼要地介绍了吸收式制冷的概念和技术特征;根据我国当前联产系统的发展与能源政策,介绍了供热机组配置选型、热电冷负荷优化分配,并对热电成本分摊问题做了有益的讨论。此外,还详细介绍了供热机组改造技术及其工程应用,并力求反映近年来热电冷联产系统的新发展。

本书在写作上注意深入浅出,讲清基本原理,并注意到知识间相互的逻辑联系,以利于引导学生思考和解决问题能力的培养。本书可作为高等工科院校本科能源与动力工程、建筑环境与设备工程及相关专业的教材,也可供从事能源、供热、制冷等有关工作的工程技术人员参考。

本书除第9章第3节由张俊礼编写外,其余章节由葛斌编写。另外,孙锦承担了全书图表的绘制工作,王利承担了部分文字的输入工作。

本书在编写过程中,一直得到曹祖庆教授的指导和关心。他认真审阅了全书,提出了详细的修改意见,为提高本书质量给予了很大帮助,在此谨致以衷心的感谢。向本书所引用资料的编著者、支持本书出版的同事和我的几位研究生表示诚挚的谢意。

编著者

2011年8月

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 热电冷联产的概念	1
1.2 热电冷联产的发展概况和趋势	2
1.3 本书的主要任务及内容	5
第2章 热电联产的热经济性	6
2.1 热电冷联产的基本形式与特点	6
2.2 热电联产的热经济性分析	17
2.3 热电冷联产的主要热经济指标	19
2.4 热电联产系统的燃料节省条件	21
第3章 热负荷与冷负荷	25
3.1 冷热负荷的分类与特征	25
3.2 热负荷的确定方法	25
3.3 热负荷图	31
3.4 冷负荷的确定方法	38
第4章 供热系统及其运行调节	46
4.1 供热系统	46
4.2 热电厂供热系统	48
4.3 供热调节的基本原理	55
第5章 供热汽轮机	66
5.1 概述	66
5.2 背压式汽轮机	66
5.3 调节抽汽式汽轮机	69
5.4 供热机组的工况图	71
5.5 供热式汽轮机的热力设计特点	79
5.6 供热式汽轮机的调节	84
第6章 热电厂热力系统的计算	88
6.1 供热机组的热力系统计算	88
6.2 电厂方程式的应用	93
第7章 制冷原理与技术	99
7.1 概述	99
7.2 蒸气压缩式制冷	102
7.3 吸收式制冷	115

第 8 章 联产系统选型配置与凝汽式机组供热改造..... 123

8.1 概述 123

8.2 热电（冷）联产系统选型配置 123

8.3 凝汽式机组供热改造 130

8.4 热电冷三联供改造 148

第 9 章 热经济学基础及其应用..... 152

9.1 概述 152

9.2 热经济学原理 152

9.3 热经济学在热电冷联产中的应用 164

附录..... 178

附录 1 各种能源平均低位发热量及折算标准煤的系数 178

附录 2 压力单位换算表 178

附录 3 力单位换算表 179

附录 4 能、功与热单位换算表 179

附录 5 功率单位换算表 179

附录 6 几种构造的传热系数 K 179

附录 7 流体的流速和压力降推荐值 182

参考文献..... 183

第 1 章 概 述

1.1 热电冷联产的概念

能源是社会发展的物质基础,是人类文明生活的源泉和动力。人类发展经济及利用自然界丰富的资源,必须认识到资源有限的事实并考虑到生态系统的支持能力。因此,节约能源,抑制化石燃料的过度消耗;保护环境,净化人类生存的有限空间,既满足人类当前发展的需要,又不对子孙后代满足其需求的能力构成危害,这一“可持续发展课题”已成为人类当前和未来共同研究的迫切问题。热电联产以及由热电联产为基础最新发展的热电冷联产由于具有高效合理利用能源的特点,已成为各国政府和能源专家所关注的解决能源与环境问题的重要途径。

热电冷联产(CCHP)是在同一集成系统中同时或相继生产多种形式的有用能量,如机械能或电能、热能、冷能。它将燃料燃烧后产生的具有高品位的热能转换成电能,同时利用做过功的低品位的热能用于供热、制冷、干燥或作为生活热水等用途,实现能源的梯级利用。这种既产电又产热又制冷的先进能源利用方式,具有显著的经济与环境效益,与热电冷分产相比具有如下优点:

(1) 热能与电能同时生产,其中热能可直接或间接用于供热,也可以通过制冷设备用于制冷,其热力过程更加符合能量的分级利用原则,通过吸收式制冷循环和抽、排汽供热循环的有机结合,使系统内的中低温热能得到合理利用,从而提高一次能源的利用率。图 1-1 所示为在相同的热、电功率下,联产较分产消耗的燃料比较。

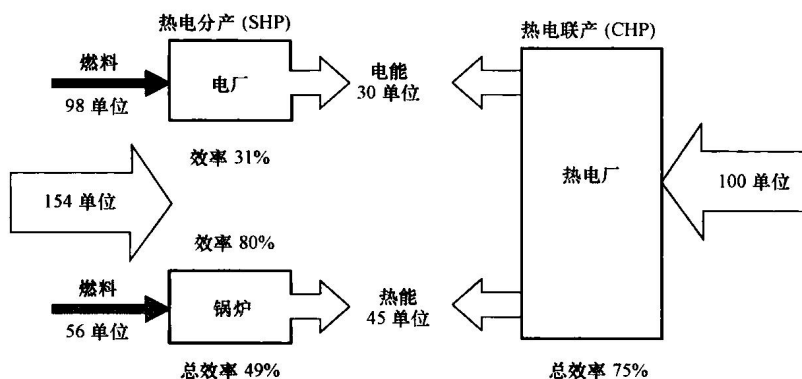


图 1-1 热电联产与热电分产的比较

热电冷联产本身不仅可节约能源,同时可以燃烧小型锅炉难以燃烧的劣质煤,从而节约优质煤,供给更需要的冶金、化工等行业使用。

(2) 减轻大气污染,改善环境。热电冷联产可以用高效低耗的燃烧设备代替已有的大量低效高耗的小锅炉,实行集中或分布式供热,减少粉尘、废气(如 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等)排放量,减轻大气污染,保护生态环境。

(3) 结合现有技术并不断研发新技术,热电冷联产具有多种功能,以适应工业、商业和

居民生活不同领域的需求。

(4) 热电厂大都建在热负荷中心，有的热电厂也成为当地的重要电源点，具有分布式能源系统的属性。这样，区域热电厂的上网电量就近消化，可减少电网输配电损失，也有利于能源系统的安全。

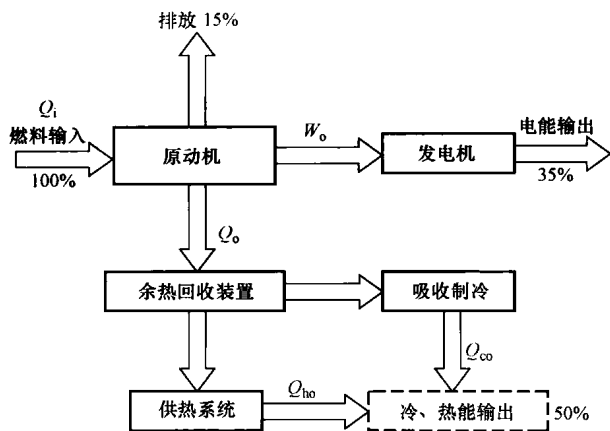


图 1-2 热电冷系统的基本结构

(5) 在热电联产的基础上配置吸收式制冷装置形成热电冷联产系统，可以增加夏季的热负荷，稳定全年用热量，有利于机组高效运行。另外，可减少电制冷容量，从而减轻温室气体和 CFC 的排放，同时也缓解夏季电网供电的压力。

热电冷联产系统一般包括动力系统和发电机（供电）、余热回收装置（供热）、制冷系统（供冷）等。图 1-2 所示为热电冷系统的基本结构。针对用户不同的需求，热电冷联产系统方案的可

选择范围很大，与热、电联产技术有关的选择有蒸汽轮机驱动的外燃烧式和燃气轮机驱动的内燃烧式方案；与制冷方式有关的选择有压缩式、吸收式或其他热驱动的制冷方式。另外，供热、供冷热源还有直接和间接方式之分。

1.2 热电冷联产的发展概况和趋势

1.2.1 国内外热电联产发展的回顾

我国采暖通风有着悠久的历史，远在新石器时代仰韶时期就有了火炕采暖，夏、商、周时代就有了火炉采暖，但是现代意义上的采暖通风技术的起源在西方。1673 年，英国工程师发明了热水在管内流动用于加热房间。英国第一次尝试区域供热是 1742 年，作为律师和园艺家的 Hugh Plat，用管道输送蒸汽为房间供暖。1791 年，英格兰 Halifax 的 Hogle 获得了用管道输送蒸汽供建筑物采暖的专利。但热电联产用于工业始于 1898 年 Clydebank 的一家烫毛厂。为了满足当时其他工业部门对蒸汽的需要，在 1903~1907 年间，出现了热能、电能联合生产的汽轮机，即背压式与调节抽汽式汽轮机。

20 世纪初，由于工业的迅速发展，许多生产企业或部门需要电能和热能，美国工业界普遍采用分散式热电联产。20 世纪 50 年代初，由于纯发电开始产生显著的规模效益，许多企业转向向公用电力公司购买电力，只有那些需要大量蒸汽或者有废热资源可利用的企业继续经营着他们的分散式热电厂，热电联产系统没能得到应有的发展。第二次世界大战后，区域供热在北欧、前苏联以及一些东欧社会主义国家得到普遍应用，并带动了热电联产的发展。而在欧洲其他国家，由于燃料丰富、廉价，热电联产发展缓慢。

在经历了 20 世纪 70 年代的石油危机后，热电联产受到了西方国家的重视。美国将区域供热列入政府节能计划，英国国会则评价区域供热为减少国家能耗的重要手段，而法国更是以立法的形式推动热电联产的发展。美国热电联产装机容量在 1980~1995 年的 15 年间增加

了2倍,2000年已占总装机容量的7%,1998年,热电联产的发电量为3060亿kW·h,约占全美发电量的9%。2003年,美国发电量为3848TW·h,其中3691TW·h来自电力行业,其余157TW·h来自工业及商业部门的热电联产电厂。1992年,丹麦热电联产的发电量占总发电量的40%,供热量占区域供热的60%,热电装机容量占总装机容量的56%,并于2005年提高到66%;欧共体在20世纪90年代支持了45项热电联产工程,2000年热电联产发电量已占总发电量的9%;在热电联产和集中供热方面一直走在世界前列的前苏联,1980年统计全国供热机组总容量达68000MW,占火电总装机容量的35.5%,1989年,前苏联供电煤耗率仅为328g/(kW·h),成为当时世界上煤耗率最低的国家,其中热电联产与集中供热作出了重要的贡献。

20世纪50年代初期,我国的热电联产事业开始起步,在前苏联帮助下建设了一批热电厂。1953~1967年期间,正是中国大规模经济建设的初期,也是各地电网发展的初期。这一时期由于以供工业为主,绝大多数热电厂选择了抽汽式机组,以保证供汽、供电。这一时期新投产6000kW及以上的供热机组容量占火电机组总容量的20%,居世界第2位。1971~1980年期间热电事业发展缓慢。改革开放后,学习世界先进国家技术,结合我国实际情况又建设了一批热电厂。1981年以后,我国在能源政策上提出了节约和开发并重的方针,在节约能源上采取一系列措施,积极鼓励集中供热,在此期间,热电联产建设开始新发展。1998年,我国供热机组已达24938.5MW,占火电装机总容量的12.7%,但供热机组仅为俄罗斯的1/3,美国的1/2。

1.2.2 热电冷联产的现状与发展趋势

当前俄罗斯是热电联产、集中供热最多的国家。俄罗斯热电联产基本上采用单机80MW~300/250MW的高压、超高压、亚临界、超临界压力机组。城市集中供热的热化率达到70%,有的城市达到100%。北欧的芬兰、瑞典、丹麦、荷兰等四个国家是当今世界上热电联产比重大,而且技术与管理方面十分先进的国家。北欧四国热电联产所占比重在30%以上。丹麦是世界上能源利用效率最高的国家,作为一个高寒地区国家,人均GDP超过3万美元,而一次能源消耗仅仅3.4t,为美国的38.8%。丹麦全国没有一个发电厂不供热,没有一个工业供热锅炉房不发电,热电联产成为能源系统的核心技术。过去20年,GDP实现翻一番,一次能源消耗没有增加,二次能源供应大幅度增加,污染排放降低20%。丹麦热电联产供热计划2005年提高到66%以上。荷兰的热电联产发展水平在欧盟名列前茅,其热电装机容量占总装机容量的40%。

德国拥有22000MW的热电容量,占全国总电力需求量的16%以上。英国电力私有化以后,Enron Corporation在Teesside建立了一个发电容量1725MW的热电站,向ICI'S Wilton工厂供应工艺用热,该热电厂是当时世界上最大容量的热电厂。1999年,英国宣布热电联产的目标是到2010年生产能力要翻一番,达到10000MW;到2020年,英国热电联产发电量达到全国发电总量的25%。

美国热电联产与发电工业同步增长,2009年,其装机容量达到全国总装机容量的9%,发电量超过全国总发电量的12%,每年减少CO₂的排放超过4亿t。计划到2020年热电联产装机容量占总装机容量的29%。日本将热电联产作为21世纪城市建设必不可少的设施,认为是附加值很高的社会资本,因此制定了相关的法令和优惠政策保证该事业发展。

“十一五”期间,我国新增供热机组装机容量约60000MW。到2010年,供热机组装机

总容量已达到 130 000MW, 约占同期全国火电机组装机总容量的 18.2%, 我国热电联产年供热量已位居世界前列。

目前, 北京、沈阳、吉林、长春、郑州、秦皇岛和太原等中心城市已有 200、300MW 大型抽汽冷凝两用机组或供热机组在运行, 星罗棋布的热电厂在大江南北、长城内外迅速发展。区域热电厂从城市的工业区蔓延到了乡镇工业开发区, 苏州地区一些村镇办热电厂也在发挥着重要作用。南京华润电力公司 $2 \times 600\text{MW}$ 超临界压力燃煤抽凝机组已分别于 2010 年 1 月和 4 月先后投运、福建鸿山热电有限公司首台 600MW 超临界压力燃煤抽凝机组也于 2011 年 1 月完成 168h 试运行正式投产。

热电冷联产是在热电联产的基础上发展起来的, 它可以利用汽轮机的抽汽、排汽集中供热制冷, 也可以采用燃气轮机、内燃机动力装置或其他原动机构成小规模(数千瓦至 50MW 的小型模块式)、分布式系统布置在用户附近, 可独立地输出电、热或(和)冷能。这样集中式与分布式优势互补, 共同发展。美国对 CCHP 做了很多开创性的工作和商业化研究, 工业界提出了“CCHP 创意”和“CCHP 2020 年纲领”, 支持能源部总体商用建筑 CCHP 规划。到 2020 年, 美国实施 CCHP 战略目标为: 50% 新建商用、写字楼类建筑采用 CCHP; 15% 现有商用、写字楼类建筑采用 CCHP。美国 CCHP 将成为商用建筑、写字楼建筑高效使用矿物能源的典范, 同时最大限度地降低污染物排放量。热电冷联产从 1978 年美国公共事业管理政策法公布后, 先在美国推广, 然后被其他先进国家接受。日本是一个能源极度匮乏的国家, 目前以注重节能著称。在能源供应中, 以热电联产系统为热源的区域供热(冷)系统是仅次于燃气、电力的第三大公益事业。日本将热电联产与吸收式制冷机集成为热电冷联产系统, 将其热驱动的制冷机用于大型建筑空调, 而电空调不足三成。燃气轮机热电(冷)联产和汽轮机驱动压缩式制冷设备是日本热电(冷)联产的主要形式。到 2010 年底, 日本 CHP 系统的容量已达到 10.02GW。近年来, 欧洲将热电冷联产系统高效节能技术放在优先发展的位置。为了促进热电联产及热电冷联产, 欧洲各国采取各种不同的鼓励政策和措施, 如英国对热电联产项目免除气候变化税、商务税, 采用节能项目补贴金等; 丹麦制定法律要求用户优先使用热电联产的电力以及可再生能源, 还实行热电冷联产项目投资补贴、优惠贷款、投产发电补贴等; 德国制定的新热电法, 激励措施为热电企业享有并网权。并网可双向交易, 不并网获高额补贴, 热电联产电厂可获得售电量补贴, 对分布式系统还返还给电厂节约电网建设和输送成本。欧洲委员会已批准了强制购买热电冷联产和可再生能源发电的政策等。

我国热电冷联产是在热电厂利用低压汽源实现供热制冷以改善室内温湿环境的。近年来, 天然气分布式热电冷系统在我国一些城市, 如北京、上海、广州等得到示范应用。北京燃气集团、上海浦东机场、广州大学城等燃气式热电冷联供示范项目先后投入运行。随后这种以天然气内燃机、燃气轮机为主的热电冷系统在我国东部沿海地区有了较快的发展。我国热电联产和热电冷联产的发展是在科学的基础上有计划进行的。在我国中长期科学和技术发展规划纲要中, 以热电冷联产为主要形式的分布式能源系统已被列为重要发展方向之一。日前由中科院工程热物理研究所、中科院理化技术研究所、浙江大学、清华大学、中国科技大学、上海交通大学、北京化工大学, 以及东莞理工学院 8 家单位联合承担的 973 计划项目“多能源互补的分布式冷热电联供系统基础研究”正在紧锣密鼓地开展工作, 目的是要解决关键的科学技术问题。这项科研成果的完成无疑将会给热电冷联产的发展奠定坚实的基础,

提供有力的支撑。据预测,到2020年,中国热电(冷)联产装机容量将达到2亿kW,形成年节约2亿t标准煤的能力,减少SO₂排放360万t,减少氮氧化物排放130万t,减少CO₂排放35 000万t。若将现有建筑实施CCHP的比例从4%提高到8%,到2020年,CO₂的排放量将减少30%。届时,热电冷联产将为能源节约、环境保护,促进经济和社会发展作出更大贡献。

1.3 本书的主要任务及内容

热电冷联产是一种建立在能源梯级利用概念的基础上,将制冷、供热及发电过程一体化的联产系统。其能量产品的生产、传输、使用分别由热源、热(冷)网、用户完成。热源是将一次能源如化石燃料转换成二次能源如热水或蒸汽等,输出产品为热能、冷能和电能,目前我国广泛应用的热源是热电厂和集中供热锅炉。利用核能、太阳能、地热、生物质能、工业余热也可作为集中或分布式供能系统的热源。热(冷)网是由热源通过载热(冷)质向用户输送和分配热(冷)能的管道系统。从供能系统获得热(冷)能的单位或个人称为系统的热(冷)用户。

热和冷在本质上都是热在数量上的度量,其区别仅是相对于环境温度而言的“正、负热能”。因此,本书重点介绍热电联产的基本原理和技术,考虑到冷能的需求日益增多,对于制冷原理和技术也做了简要介绍。我国以煤为主的能源结构决定了本书研究的对象是以燃煤热电厂蒸汽动力循环和供热循环为主,辅之以制冷循环。供热制冷系统热源来自于常规热电厂背压式汽轮机或抽汽式汽轮机的排汽或抽汽;或新近发展的燃用天然气动力装置的排气。

本书主要包括:热电冷联产节能的基本原理和系统设备的热力学分析;热负荷、冷负荷性质及计算方法;供热机组的动力特性和运行调节原理;联产热力系统计算及热经济指标分析;凝汽式机组供热改造技术和应用;制冷原理及其在供热机组改造和分布式热电冷系统中的应用;热经济学原理及其在热电冷系统设计、运行中的应用;热电联产成本分配问题的讨论;同时,热化系数的确定及热电负荷优化分配等也做了简要介绍。从原始热负荷、供热机组的热力特性出发,着重研究以汽轮机热电联产为热源的集中供热系统热力计算、热经济性、技术经济性,在工程中实现热电联产系统的经济条件,热电厂热化系数的选择、热网基本参数和热电联产方案的确定等。还讨论了热电机组和热网的设计、运行方面的相关技术经济的基本问题。不仅注重热力学意义上的节约能源,还注重热经济学指导下非能量成本的节约,力争做到既节能又省钱。

第2章 热电联产的热经济性

2.1 热电冷联产的基本形式与特点

热电联产既有集中式能源系统，也有分布式能源系统，主要取决于应用的目的，其系统结构一般由以下独立部件组成：原动机（热机）、发电机、余热回收装置、热力管道、监控系统等。根据热电联产所用的能源及驱动系统形式的不同，热电联产可以分为以下几种基本形式：燃气轮机热电联产、内燃机热电联产、蒸汽轮机热电联产、联合循环热电联产以及燃料电池热电联产。表2-1列出了各种热电联产的技术特点。

表2-1 热电联产的技术特点

系统类型	优点	缺点	容量
燃气轮机	高可靠性 低排放 热能能级高 无需冷却水	压气机压缩比高 低负荷时效率低 随着环境温度升高，出力下降	500kW~250MW
微型燃气轮机	运动部件少 结构紧凑重量轻 低排放 无需冷却水	成本高 机械效率相对较低 热电联产限于较低温度热产品	30~250kW
点燃式往复式内燃机	部分负荷效率较高 具有快速启停和黑启动能力 投资成本相对较低	维护成本较高 热电联产仅限低温热产品：热水、低压蒸汽 排放相对较高 若余热未利用则需冷却外壳和润滑系统 低频噪声较大	在分布式能源应用中 <5MW
压燃式往复式内燃机	具有良好的负荷适应能力 可用性超过95% 适当维护，可靠性高		高速（1200r/min） 时，不大于4MW； 低速（102~514r/min） 时，4~75MW
蒸汽轮机	总效率高 燃料适应性好 能适应多种热能能级需求 寿命长、可靠性高 热电比可变	启停时间长 电热比低	50~250MW
燃料电池	低排放、低噪声 运行负荷范围内效率高 模块化设计，安装、扩建灵活	成本高 功率密度低和持续时间较短 除纯氢外，燃料需要处理	5kW~2MW

2.1.1 蒸汽轮机热电联产

锅炉产生高温高压蒸汽送入汽轮机，通过蒸汽轮机和发电机将蒸汽热能变成电能，利用蒸汽轮机的抽汽或排汽对外供热。常规蒸汽轮机热电联产燃用的是化石燃料，也有用固体垃圾、农业副产品作为燃料的。这种形式的热电联产目前是国内外发展热化事业的基础，是联

产集中供热的最主要形式。因此,本书着重介绍以蒸汽轮机热电联产为基础的热电冷联产系统。通常凝汽式汽轮机对外只供电或做机械功,装有凝汽式汽轮机的发电厂称为凝汽式电厂;供热式汽轮机则对外同时供热和发电,装有供热式汽轮机的发电厂称为热电厂。供热式汽轮机有背压式汽轮机、调节抽汽式汽轮机、凝汽采暖两用机、低真空供热的凝汽式汽轮机。

一、背压式汽轮机(B型、CB型)

背压式汽轮机利用排汽向外供热,其排汽压力通常较凝汽式汽轮机的排汽压力高。尽管单位质量蒸汽在汽轮机内焓降减小,但无冷源损失,因此采用这种机组热能利用率高。另外,其结构简单,不需要凝汽器,投资少。但若偏离设计工况或在低功率下运行,由于整机焓降小,其机组的相对热效率 η_{ri} 显著下降。背压机运行时热和电不能独立调节,常以热定电,由电网供应所缺的电量。所以,热负荷的大小,对背压式汽轮机经济性影响较大。抽汽背压式汽轮机,即CB型,在背压排汽供热的同时,还设有一级较高压力的调节抽汽供热。因此,CB型机组可承担两种不同参数的热负荷。

二、调节抽汽式汽轮机(C型、CC型)

根据热负荷的要求,调节抽汽式汽轮机可以向外提供一种或者两种不同参数的蒸汽,而且供汽参数和流量可以控制。C型表示汽轮机带有一级调节抽汽,CC型表示汽轮机带有二级调节抽汽。通常抽汽压力调整范围为0.78~1.23MPa供工业用汽;压力调整范围为0.118~0.245MPa供采暖用汽;设计抽汽压力大于3.9MPa供化工厂用汽。

与背压式机组相比,调节抽汽式汽轮机具有如下特点:

(1) 这种汽轮机相当于背压式机组和凝汽式机组复合运行,热电负荷在一定的范围内可独立调节,即当发电功率不变时,供热抽汽量可以在一定范围内变动;当供热量不变时,发电功率也可以在一定范围内变动。

(2) 考虑到摩擦鼓风损失,为了保证低压缸有足够的冷却蒸汽,调节抽汽式汽轮机存在最小凝汽流量。

(3) 供热抽汽的流量和压力是通过旋转隔板来进行调节的,这样凝汽流必然存在节流损失,所以它的凝汽流的绝对内效率比同参数的凝汽机组低,这对节能有不利的影响。为了减少旋转隔板的节流损失,有的热电厂中压和低压抽汽分别采用调节阀进行调整控制,如图2-1所示。另外,采用超临界参数以提高供热机组的循环效率。该机组也可认为是凝汽采暖两用机组的进一步改进,即增加中压缸前的压力为3.9MPa的工业抽汽。

三、凝汽采暖两用机组(简称两用机)

这是一种改造型的供热机组,即在大型凝汽式机组中低压缸之间的导汽管上加装蝶阀用来调节抽汽量,便于在采暖期增加对外供热;在非采暖期则以纯凝汽方式运行。由于受蝶阀压损的影响,国产200MW两用机热经济性会下降0.1%~0.5%。两用机在抽汽运行时具有调节抽汽式汽轮机的特点,但比单抽汽式机组热经济性稍低,在非采暖期却比单抽汽式机组纯凝汽运行热经济性高,加之两用机的设计、制造简单,改造容易,成本低,是适应我国当前热电联供迅速发展的一项有效措施。我国改进制造的200、300MW凝汽—采暖两用机已在北方如北京、沈阳、吉林、长春、郑州、哈尔滨、秦皇岛、太原等城市的热电厂投入运行。

平绝热膨胀做功,做过功的燃气排向大气等压放热,这样周而复始地不断循环完成热功转换。燃气轮机的排气温度较高,可达 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$,借助尾部热回收装置可将透平高温排气中的余热用于供热或制冷。

根据余热回收方式的不同,燃气轮机联产系统可分为蒸汽型和烟气型联产系统两类。在蒸汽型联产系统中,余热锅炉(HRSG)是一个重要的设备,高温排气至余热锅炉将热量传给给水,产生蒸汽,冬季可直接供热或驱动吸收式热泵供热;夏季可用蒸汽驱动溴化锂吸收式机组制冷。因而可以将从余热锅炉中排出来的烟气温度大幅度降低,余热得到较好的利用。烟气型联产系统是将排气余热直接由烟气型溴化锂吸收式冷热水机组回收利用,夏季与蒸汽型溴化锂吸收式制冷装置基本相同,在蒸发器内制取冷媒水供空调或工艺过程使用。冬季通过阀门切换,关闭冷剂水泵和冷却水系统,发生器产生的高温冷剂蒸汽,进入发生器,在管簇外冷凝放热,加热管内热水,供采暖用。该类机组冷水、热水采用同一回路,供冷与采暖通过阀门切换控制,季节变换比较方便。两种联产系统都可以采用补燃方式,当燃气轮机停运或余热不能满足冷热负荷需求时,对余热锅炉或溴化锂机组补燃来提供负荷需要的驱动热量,以提高系统的负荷应变能力。

从工质循环方面看,燃气轮机热电冷联产应用较多的有简单循环与回热循环两类。简单循环多用于大中型燃气轮机联产机组,由于其排气温度高,大多底部设有蒸汽动力循环和供热制冷循环。在这类无补燃机组的能量产品中,发电效率较高,热能冷能所占比例较小,热电比可能小于或接近于1。对于微型燃气轮机通常进口气温低,压比也不大,底部不设蒸汽动力循环,若采用简单循环发电效率较低,如宝曼 TG80 微型燃气轮机热电联产系统在简单循环时效率低于15%,而余热可用于供热制冷比例较大,热电比或冷电比为2~6。因此,用于联产的微型燃气轮机多采用回热器将排气中的余热部分回收,预热进入燃烧器的压缩空气,以提高系统的发电效率。可见,由于回热使排气中的余热部分回收用以做功或发电,减少了热能、冷能产品占总能量产品中的比例,即热电比、冷电比将下降。宝曼 TG80 微型燃气轮机系统回热循环发电效率为25%~28%,热电比或冷电比为1~1.9。

燃气轮机可用于多种系统配置,常用的配置方案包括:①单台燃气轮机用于发电的简单循环;②单台燃气轮机配余热锅炉用于热电联产;③联合循环热电联产由余热锅炉产生高压蒸汽,该蒸汽进入汽轮机做功,汽轮机的抽汽和排汽用于供热或制冷。

燃气—蒸汽联合循环热电联产系统流程如图2-2所示。图中显示的三种联产的方式,其热效率分列如下:

- (1) 燃气轮机发电+余热锅炉发电效率为40%~60%,即供热 A +供热 $B=0$ 。
- (2) 燃气轮机发电+余热锅炉发电+供热效率为60%~85%,即供热 $B=0$ 。
- (3) 燃气轮机发电+余热锅炉直接供热效率为80%~85%。该方式由于无底部蒸汽循环,严格地说不属于联合循环,因余热部分没有发电。

燃气—蒸汽联合循环热电厂符合能量梯级利用的原则,具有较高的热效率,可达70%~85%。若配置溴化锂装置可以同时承接冷、热负荷,或在不同时段分别承接这两种负荷,这样可使机组常处于高负荷区稳定运行,因而进一步提高能源利用率。减少燃料的消耗不仅可直接节约能量生产成本,也可间接减少环境污染。因此,天然气联合循环热电冷系统是天然气工业理想而现实的应用方向,它具有气、热、电、冷协调运行的优势,而使其具有良好的经济性和调节的灵活性。

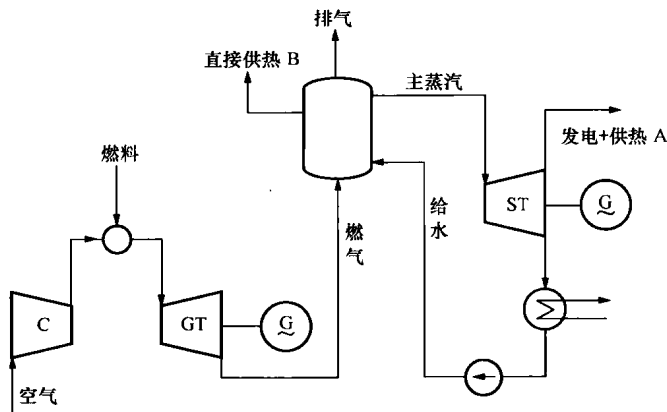


图 2-2 燃气—蒸汽联合循环热电联产热力系统示意

从热力学分析可知，不补燃的联合循环比补燃机组发电效率要高，而不补燃的联合循环发电效率的关键是燃气轮机的效率。GE 公司的 PG9391 的效率是 39.49%，Siemens 公司 V64.3A 的效率为 36.8%，而同样是 Siemens 公司的 V94.3A，发电效率则达 38.0%。燃气—蒸汽联合循环供热制冷系统的能源利用率取决于排气余热的合理利用，这部分能量占输入燃料能量的 60%~70%。

燃气轮机进气温度和压比决定了排气温度，而排气温度的高低又决定了余热锅炉热负荷的产量。为了合理利用排气中的余热，设置双压或三压换热系统以减少换热过程中的温差，同时降低烟囱的排气温度，以减少排放的热能损失。图 2-3 所示为排烟温度对联合循环热电冷系统总效率的影响。

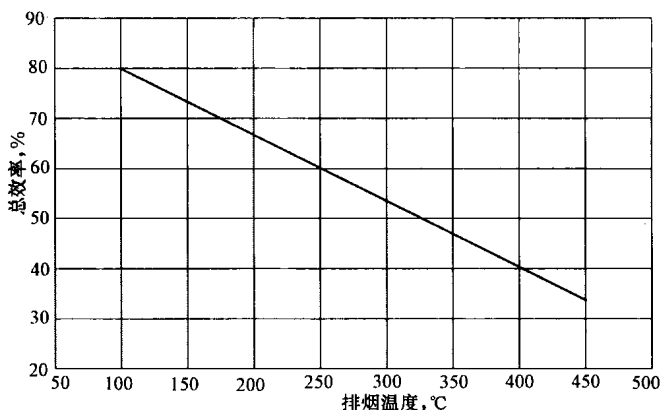


图 2-3 排烟温度对联合循环热电冷系统总效率的影响

联合循环热电冷系统具有分布特性，尤其是微型燃气轮机联合循环热电冷系统多建于能量产品的应用现场，减少 NO_x 的排放和减少噪声对用户及周围居民的影响极为重要。对于燃用天然气的燃气轮机，已有成熟技术有效地降低 NO_x 的排放，如采用喷水和喷蒸汽的措施，但从节约用水的角度看，应开发干式降 NO_x 技术。对于噪声的控制，除采用消声器降低空气动力性噪声外，可根据设计要求，配合相应的隔声、隔振、阻尼等综合措施来降低机械机体辐射的噪声。实践表明，无论从技术还是从经济方面看，都完全能够满足工业企业或

城市区域的环境噪声标准。

燃气—蒸汽联合循环热电冷系统除了考虑主设备效率、系统配置和投资的因素外，还要考虑到热电冷负荷是由各自用户需求控制的，因此天然气网、电网、热（冷）网间的稳定协调运行问题在建设中需要周密的规划和切实可行的措施予以解决。发展燃气热电冷联产可以为天然气应用市场的开发提供出路，利用燃气轮机的燃料适应性强这一特点，提高能源系统的安全性和应变能力。当燃气热电联产达到一定规模时，其燃机热电厂的用户化、小型化、分散化及其黑启动性能的优势，有助于能源安全稳定供应。在一定范围内，尤其是在大电网出现重大事故时，这些分散、独立的电源将为电网供电的安全、应变能力的提高作出重要的贡献。

整体煤气化燃气—蒸汽联合循环（integrated gasification combined cycle, IGCC）是一种先进的洁净煤（CCT）发电技术，具有高效、低污染、节水、综合利用好等优点。其原理是：煤经过气化和净化后，除去煤气中 99% 以上的硫化氢和接近 100% 的粉尘，将固体燃料转化成燃气轮机能燃用的清洁气体燃料，以驱动燃气轮机发电，再使燃气发电与蒸汽发电供热制冷联合起来。

IGCC 的工艺过程如下：煤经气化成为中低热值煤气，经过净化，除去煤气中的硫化物、氮化物、粉尘等污染物，变为清洁的气体燃料，然后送入燃气轮机的燃烧室燃烧，加热气体工质以驱动燃气轮机做功，燃气轮机排气进入余热锅炉加热给水，产生过热蒸汽驱动蒸汽轮机做功，其原理如图 2-4 所示。

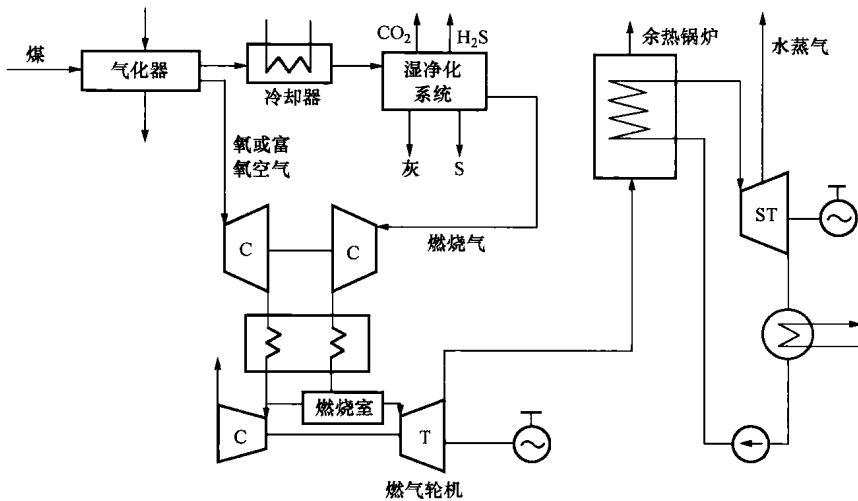


图 2-4 整体煤气化燃气—蒸汽联合循环热力系统

它的主要优点是：①发电效率高，目前已达 43%~46%，若底部循环增加供热制冷将使整个系统的效率进一步得到提高；②环保性能好。脱硫率达 98%~99% 以上， NO_x 排放等同于天然气， CO_2 排放也减少；③燃料适应性强，对高硫煤有独特的适应性；④耗水只有常规电站的 $1/3 \sim 1/2$ ，利于节约水资源；⑤可用于对燃油联合循环机组及老燃煤电厂改造，达到提高效率、改善环保、延长寿命的多重目的。由于 IGCC 具有上述优点，我国已把它列入 21 世纪 CCT 计划。