



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十三五”普通高等教育本科规划教材

燃气轮机与联合循环 (第二版)

姚秀平 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通

” 国家级规划教

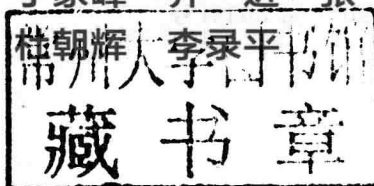


“十三五 普通高等教育本科规划教材

燃气轮机与联合循环

(第二版)

主 编 姚秀平
编 写 丁家峰 齐 进 张 莉 郑莆燕
主 审 姚朝辉 李录平



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书全面介绍了燃气轮机与联合循环发电装置。全书共八章：第一章从热功转换有效性的视角引出了燃气-蒸汽联合循环发电方式，介绍了联合循环的原理、类型和特点，分析了余热锅炉型联合循环的基本特性；第二章根据热力学原理分析了燃气轮机的基本特性；第三章介绍了燃气轮机各部件的工作原理和特性；第四章分析了燃气轮机的整体结构特点和运行调节特性；第五章简要介绍了联合循环所用余热锅炉、汽轮机和其他一些热力设备的工作原理和特性，并分析了联合循环机组的整体布置方案；第六章介绍了燃气轮机与联合循环的运行与控制系统；第七章介绍了燃煤流化床和整体煤气化联合循环；第八章简要介绍了几种新兴的、以燃气轮机为核心的联合循环。每章之后都附有思考题，部分章节还附有练习题。

本书既可作为普通高等院校能源与动力工程专业本、专科高年级学生的选修课教材，也可作为有关专业研究生及从事电站研究、设计、试验、运行等工作的技术人员和管理人员的阅读参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气轮机与联合循环/姚秀平主编. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2017.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 “十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-0732-0

I. ①燃… II. ①姚… III. ①燃气轮机—联合循环发电 ②蒸汽—燃气联合循环—高等学校—教材 IV. ①TK47 ②③TK14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 101184 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 吴玉贤 (010-63412540)

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 左 铭

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京天宇星印刷厂

版 次: 2010 年 5 月第一版 2017 年 6 月第二版

印 次: 2017 年 6 月北京第六次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 11.5

字 数: 277 千字

定 价: 28.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

本书第一版于 2010 年出版,六年来共印刷了五次。六年之中,燃气轮机与联合循环的教学、科研和生产实践都有了新的发展,对教材提出了新的要求;同时,教材在使用过程中也发现了一些问题和不足,因此需要进行修订。

本次修订在体系和章节上未做变动,但在内容上包括插图既有删减、调整,也有补充、修正。主要修订内容有三:

一是删减了一些失去时效的内容。主要包括:第一章对凝汽式汽轮机发展的预测、对联合循环形式发展的预测、对联合循环各设备相对重要性的讨论;第七章燃煤流化床联合循环中的部分内容;第八章程氏循环中的部分内容等。

二是对在教学中的难点做了进一步的阐述。主要包括:第三章压气机的分轴防喘振、透平的特性;第四章燃气轮机的变工况特性、燃气轮机的运行调节;第六章燃气轮机的温度控制、压气机进口导叶安装角的控制等。

三是更新了一些数据,修正了某些观点,强化了表述的严密性。

编者在本书的修订过程中,参阅了一些新出版的教材、著作、论文和来自国内外发电企业的技术资料,在此谨对上述文献资料的作者致以衷心感谢!

本书内容既涉及很深的理论基础,也涉及很专业的实践知识,因而难免有不妥之处,恳请读者不吝赐教!

编 者
2017 年 6 月

第一版前言

20 世纪 90 年代以来,燃气-蒸汽联合循环发电技术在全世界得到了快速发展。在此背景下,自 1999 年开始,编者在上海电力学院开出了一门旨在向热能与动力工程专业高年级学生介绍燃气-蒸汽联合循环发电技术基本知识的课程,同时也多次应邀向电厂技术人员介绍相关理论知识。在这些教学中,编者迫切感到需要有一本简明而系统、深刻而易懂的参考书,于是,在自己历年讲义的基础上,于 2004 年编写出版了一本力图贯彻该要求的教学用书,定名为《燃气轮机及其联合循环发电》。该书出版后曾为不少高校和电力企业在教学和职工培训中所采用,他们在使用过程中向编者反馈了一些有价值的意见。根据这些意见,编者感到有必要对前书在体例上作些调整以增加教学应用上的灵活性,在内容上作些扩充以满足电力企业职工培训需要,于是提出了本书的编写计划。

燃气-蒸汽联合循环是由燃气轮机、汽轮机、余热锅炉和其他许多热力设备按照一定的功能和工艺要求组合在一起的庞大复杂的系统,要认识和理解其原理、特性和运行控制规律,不掌握其各构成设备的原理、结构、特性和运行控制规律不行。然而,要在了一本为适应宽口径、大专业教育背景下高年级选修课教学需要而设计的篇幅有限的教材中,循序渐进、科学准确地阐述这些内容,选材和体系组织面临着很大挑战。

经再三斟酌,编者决定采取以下几项原则:第一,以“够用”为度但至少能反映燃气-蒸汽联合循环发电系统全貌的要求来决定取材的广度;第二,以“够用”为度但至少能比较清楚地阐述燃气-蒸汽联合循环发电系统原理、特性、运行控制规律的要求来决定取材的深度;第三,在不破坏知识系统性、叙述连贯性和内容均衡性的前提下,根据所要面向读者的知识结构和学习能力,对所涉及的不同教学内容作详简不同的安排;第四,尽可能以新观点、新素材、新例证阐释经典内容,以充分反映这项科学和技术的发展与进步;第五,着重于概念阐释、现象描述、原理分析和定性讨论,而不拘泥于细节和精确计算。

依据上述原则,编者将在书中对燃气轮机作相对较详细的阐述,而对余热锅炉、汽轮机和其他热力设备仅作简要的介绍。这是因为:第一,燃气轮机是联合循环中最核心、最具有决定意义、原理和特性也最复杂的设备;第二,所要面对的读者在学习本课程以前基本上都已经掌握了常规汽轮机发电系统方面的知识,但对燃气轮机的知识相对生疏。正因如此,本书采用了《燃气轮机与联合循环》的名称。

本书由上海电力学院姚秀平教授主编。全书共八章,其中第三章第一节由张莉编写,第五章第一节由郑菊燕编写,第六章第三、四节由齐进编写,其余各章节的编写和全书的统稿工作由姚秀平完成。第一章首先从热功转换有效性的视角分析现有两种主要发电方式的优缺点,引出联合循环这种热功转换效率最高的发电方式,然后介绍联合循环的原理、类型和特性,分析发电厂目前应用最广泛的余热锅炉型联合循环的基本特性;第二章根据热力学循环理论分析燃气轮机这一联合循环中最重要设备的基本特性;第三章介绍燃气轮机各部件的工作原理和特性;第四章分析燃气轮机的整体结构特点和运行调节特性;第五章简要介绍联合

循环所用余热锅炉、汽轮机和其他一些热力设备的工作原理和特性,并讨论联合循环机组的整体布置方案;第六章介绍燃气轮机与联合循环的运行与控制系统;第七章介绍燃煤流化床和整体煤气化联合循环这两种最具有代表性、最有发展前途的燃煤型联合循环;最后一章简要介绍其他几种新兴的、以燃气轮机为核心的联合循环。每章之后都附思考题,部分章节还附有练习题,希望这些思考题和练习题能帮助读者融会贯通、提炼总结各章的内容。

本书既可作为热能与动力工程专业本、专科高年级学生的选修课教材,也可供有关专业研究生及从事电站设计、研究、试验和运行等工作的技术人员和管理人员阅读参考。本书在结构上已尽可能模块化,这样将使教师根据教学目的和教学时数灵活选择教学内容成为可能。比如,在以介绍联合循环发电技术为目的而教学时数有限的教学中,可以不讲第六章甚至第三、四章而不会产生不完整、不连贯的感觉。相反,在以介绍燃气轮机为目的的教学中,可以只讲第二、三、四章和第六章。在使用本书之前,读者应已具备热力学、流体力学、传热学、燃烧学以及汽轮机原理等方面的基本知识。

编者在本书编写的过程中参阅了一些公开出版的教材、著作、论文和来自国内外制造企业的技术资料,也听取并采纳了审稿人上海交通大学杜朝辉教授和长沙理工大学李录平教授在详细阅读全文文稿之后从各方面、特别是从体例安排方面所提出的重要意见和建议。在书稿付梓印刷之际,谨对上述文献资料的作者和杜朝辉、李录平两位教授致以衷心感谢!

由于编者理论水平所限,实践经验不足,书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者不吝赐教!

编 者

2009 年 11 月

目 录

前言	
第一版前言	
绪论	1
第一章 联合循环概论	3
第一节 联合循环的热力学原理	3
第二节 联合循环的类型及特点	7
第三节 常规余热锅炉型联合循环	10
思考题	15
练习题	16
第二章 燃气轮机的热力循环	17
第一节 主要参数和性能指标	17
第二节 理想简单循环的特性	18
第三节 实际简单循环的特性	20
第四节 联合循环燃气轮机的设计压比	23
第五节 复杂循环简介	24
第六节 循环计算	28
思考题	31
练习题	31
第三章 燃气轮机各部件的工作原理	32
第一节 压气机原理与特性	32
第二节 燃烧室原理与特性	50
第三节 透平原理与特性	64
思考题	75
第四章 电站燃气轮机的结构特点与运行特性	77
第一节 电站燃气轮机的整机结构特点	77
第二节 电站燃气轮机的运行特性	82
第三节 电站燃气轮机的运行调节方式	89
第四节 燃气轮机热部件的材料	92
思考题	93
练习题	94
第五章 联合循环的其他热力设备与机组布置	96
第一节 联合循环的余热锅炉	96
第二节 联合循环的汽轮机	106

第三节 联合循环的主要辅助设备和系统·····	109
第四节 联合循环机组的布置方案·····	114
思考题·····	118
练习题·····	118
第六章 燃气轮机联合循环的运行与控制·····	119
第一节 燃气轮机的启动·····	119
第二节 联合循环的启动·····	122
第三节 燃气轮机的控制·····	129
第四节 联合循环发电机组的控制·····	140
思考题·····	144
第七章 典型燃煤型联合循环·····	145
第一节 燃煤流化床联合循环·····	145
第二节 整体煤气化联合循环·····	153
思考题·····	160
第八章 其他形式的联合循环简介·····	161
第一节 程氏循环·····	161
第二节 湿空气透平循环·····	163
第三节 卡林那循环·····	164
第四节 热电(冷)联产的联合循环·····	165
第五节 基于燃料电池的联合循环·····	168
思考题·····	172
参考文献·····	173

绪 论

自然界天然形态的能源(即一次能源)包括煤炭、石油、天然气、核能、水能、风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等,除少数能直接被人类所使用外,大多数要再转换成二次能源,如电、汽油、柴油、焦炭、煤气、蒸汽、热水、氢等之后,才能方便地使用。在各种各样的二次能源中,电能由于清洁且便于远距离输送而为人类所青睐。随着科学技术的进步和社会文明程度的提高,电能在世界终端能源消费中所占的比重将会不断提高。

电能的生产(俗称发电)方式因一次能源种类而异,大体上有两种类型:一类是热力发电,即先将一次能源转换成热能,然后转换为机械功,再通过发电机转换为电能;另一类是非热力发电,即不经过热能而直接将一次能源转换为电能。前者如火力发电、核能发电、地热发电、太阳能热发电、垃圾焚烧发电、海水温差发电等;后者如水力发电、风力发电、太阳能光伏发电、潮汐发电等。目前,热力发电仍占据着统治地位,其发电量估计占世界总发电量的70%以上。

热力发电的技术核心是热机,热机是用于将热能转换为机械功的机械装置。迄今为止,已经发展成熟且适合大规模发电应用的热机主要是汽轮机和燃气轮机。

汽轮机是最早被应用于发电领域的热机,它是一种依靠由不同热源产生的高温高压蒸汽推动安装在轮轴上的叶轮而旋转的机械装置。世界上的第一台汽轮机诞生于1883年,由瑞典工程师古斯塔夫·拉伐尔设计并制造,是一种只有一个叶轮的单级冲动式汽轮机,容量不大。不久(1884年),英国工程师查尔斯·帕森斯就设计出了装有多级叶轮的多级反动式汽轮机,突破了容量上的限制。此后,汽轮机逐渐被广泛地应用在发电领域。

燃气轮机应用于发电领域的时间则晚很多。燃气轮机是一种依靠由燃料与空气混合燃烧而形成的高温高压燃气推动轮轴上的叶轮而旋转的机械装置。这种装置的雏形出现得很早,公元690年左右,我国古代天文学家张遂就曾利用燃气使铜轮转动;至公元959年前后,我国民间已开始大量流行用蜡烛燃烧热气流推动的走马灯;1550年,意大利达·芬奇(Leonardo da Vinci)设计出了利用壁炉烟道烟气推动叶轮转动的装置。到18世纪末,人们已开始主动利用热力循环知识来设计燃气轮机,1791年,巴贝尔(J. Barber)曾建议带有往复式压气机的气轮机;1872年,侨居英国的美国工程师布雷顿(G. Brayton)创建了一种把压缩缸与膨胀缸分开、等压加热的煤气机。

然而,直到20世纪40年代,燃气轮机才从试验模型发展成为具有工业价值的动力装置。1939年,瑞士BBC公司制成了世界上第一台发电用燃气轮机,功率4000kW,效率18%;同年,EW公司(后并入BBC公司)制成了第一台闭式循环气轮机,Heinkel工厂制成了第一台涡轮喷气式飞机发动机;1940年,BBC公司又制成了第一台燃气机车,其功率为2200马力,效率达16%。自此以后,燃气轮机技术受到各种需求,尤其是航空业需求的刺激,经历了几个快速发展时期。不过,直到20世纪80年代,燃气轮机才开始广泛地用于发电领域。

上述两种热机各有自己的特性。汽轮机的优点是对一次能源几乎不加选择,只要能用于

产生高温高压蒸汽,不管是煤炭、石油、天然气、核能、太阳能、生物质能、地热,还是可燃垃圾,都可以接受,缺点是需要比较笨重的辅助设备及系统;燃气轮机的优点是轻便、灵活,缺点是只适合燃用石油、天然气等液体和气体燃料。

与燃气轮机几乎同时出现的,还有另外一种大功率的热力发电技术,这就是燃气-蒸汽联合循环。实质上,燃气-蒸汽联合循环并不是一种独立的热机,而是一种将汽轮机和燃气轮机耦合在一起的发电系统。与单独的汽轮机或单独的燃气轮机发电技术相比,燃气-蒸汽联合循环的突出优点是热效率高,同时,可部分地保留燃气轮机轻便灵活的特性,经进一步发展后,也可部分地保留汽轮机能利用煤炭等固体燃料的特性,并且可以与燃料电池等新型发电技术相结合,派生出各种各样其他形式的发电系统。因此,就全世界而言,燃气-蒸汽联合循环目前已成为发电领域的首选技术。

在对前述各种发电技术的发展前景进行展望时,可以概括地说,人类选择什么样的发电技术,除了与技术本身的有效性和成熟度有关,更重要的取决于有什么样的一次能源可供利用。

就全球来看,人类社会目前正处在由常规能源时代向新能源时代过渡的时期。在这个过渡期内,一次能源演化的总趋势可能会是:由以石油天然气为主,逐步向以比较丰富的煤炭为主,再到以核聚变能和各种可再生能源为主演化。在这个过程的起点即当今的石油天然气时代,燃气-蒸汽联合循环是首选发电技术。之后,燃煤的联合循环可能会发挥重要作用。再以后,核聚变能和各种可再生能源发电技术就会担当起主要角色。

在我国,由于资源的限制,石油天然气时代可能永远也不会到来。我国一次能源演化的总趋势可能会是:由以煤炭为主,到煤炭与各种能源并存,再到以核聚变能和各种可再生能源为主演化。基于此,我国的发电技术可能会从以常规汽轮机发电为主,过渡到各种发电技术并存,再过渡到核聚变能和各种可再生能源发电为主。

无论如何,燃气-蒸汽联合循环都是一项重要的发电技术。

第一章 联合循环概论

第一节 联合循环的热力学原理

一、汽轮机循环与燃气轮机循环的局限性

由热力学原理可知，任何一种热机循环所能达到的最高热效率均可表示为

$$\eta = 1 - \frac{\overline{T}_2}{\overline{T}_1}$$
 (1-1)

式中 $\overline{T}_1$ ——循环工质在高温热源的平均吸热温度，K；

$\overline{T}_2$ ——循环工质在低温热源（冷源）的平均放热温度，K。

由此可见，欲使热机循环达到较高的热效率，必须使工质的平均吸热温度 $\overline{T}_1$ 尽可能地高、平均放热温度 $\overline{T}_2$ 尽可能地低。然而，实际情况往往是：一种单独的热机循环可以实现较低的工质平均放热温度，却不能实现较高的工质平均吸热温度；或者相反。发电行业传统上采用的汽轮机循环和燃气轮机循环就是这样两种具有相反特征的例子。

汽轮机是以水和水蒸气为工质的热机，在最简单情况下，由给水泵、锅炉、汽轮机和凝汽器四大设备按照图 1-1 所示的方式组成热力系统。系统中：给水泵的作用是提高工质的压力，为实现热能向机械功的转换提供条件；锅炉的作用是提高工质的温度，将燃料的化学能转换为工质的热能；汽轮机的作用是通过工质的膨胀将其热能转换为机械功，并带动发电机产生电能；凝汽器的作用是用冷却水吸收掉工质中的废热，并回收工质。

理想汽轮机循环的温熵图如图 1-2 所示。在该循环中，单位质量工质从高温热源（锅炉）吸收的热量可由图上的面积 $a-2-3-4-5-b-a$ 表示，对外所做的功可由面积 $1-2-3-4-5-6-1$ 表示，向低温热源（凝汽器）放出的热量可由面积 $a-1-6-b-a$ 表示，效率可由面积 $1-2-3-4-5-6-1$ 与面积 $a-2-3-4-5-b-a$ 之比间接表示。

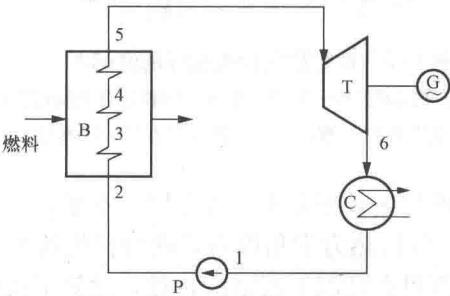


图 1-1 汽轮机循环的热力系统
P—给水泵；B—锅炉；T—汽轮机；
C—凝汽器；G—发电机

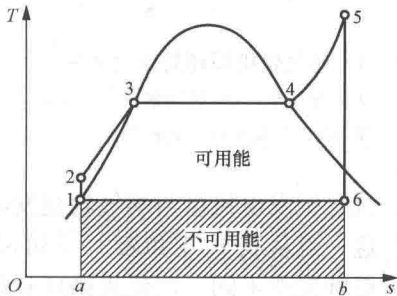


图 1-2 理想汽轮机循环的温熵图
1—2—给水压缩过程；2—3—4—5—给水转化为蒸汽过程；
5—6—蒸汽膨胀过程；6—1—排汽凝结过程

燃气轮机是以空气和燃气为工质的热机。如图 1-3 所示，它一般由压气机（compress-

sor)、燃烧室 (combustor) 和透平 (turbine) 三大部件构成, 其中: 压气机的作用与汽轮机循环中给水泵的作用类似, 是提高工质的压力; 燃烧室的作用与汽轮机循环中锅炉的作用类似, 是提高工质的温度, 将燃料的化学能转换为工质的热能; 透平与汽轮机循环中汽轮机的作用类似, 是通过工质的膨胀将其热能转换为机械功。与汽轮机所不同的是, 燃气轮机中的压气机是由透平直接驱动的, 透平发出的机械功在抵消掉压气机的耗功之后才能带动发电机产生电能, 如图 1-4 所示。

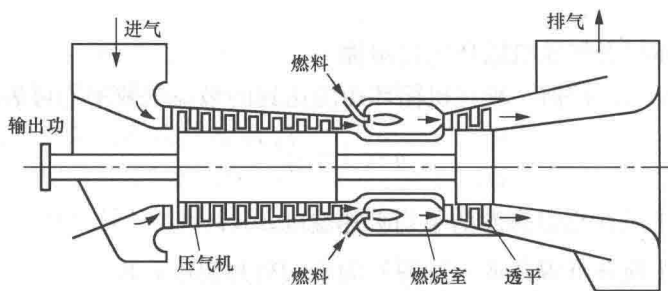


图 1-3 燃气轮机的组成及工作过程示意

理想燃气轮机循环的温熵图如图 1-5 所示。在该循环中, 单位质量工质所获得的热量可由图上的面积 $a-2-3-b-a$ 表示, 对外所做的功可由面积 $1-2-3-4-1$ 表示, 向大气放出的热量可由面积 $a-1-4-b-a$ 表示, 效率可由面积 $1-2-3-4-1$ 与面积 $a-2-3-b-a$ 之比间接表示。

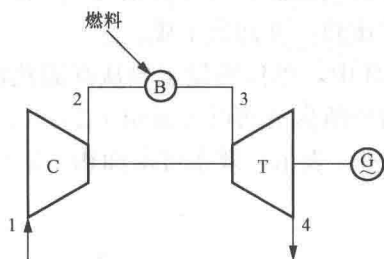


图 1-4 燃气轮机循环的热力系统

C—压气机; B—燃烧室;
T—燃气轮机; G—发电机

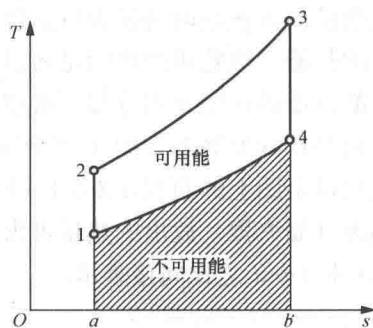


图 1-5 理想燃气轮机循环的温熵图

1—2—空气压缩过程; 2—3—空气与燃料混合燃烧过程;
3—4—燃气膨胀过程; 4—1—排气在大气中放热过程

目前, 汽轮机发电机组与燃气轮机发电机组的供电效率差不多处于同一水平, 最高都在 45% 左右, 这一点从表 1-1 和表 1-2 可以看出。但从热力学角度看, 两种机组所采用的热力循环的特点则完全不同。汽轮机循环利用了蒸汽可在常温下凝结的特性, 达到了较低的工质平均放热温度, 但工质平均吸热温度不高。例如, 国产汽轮发电机组的排汽温度一般在 32℃ 左右, 主蒸汽温度最高则为 610℃。燃气轮机循环的工质平均吸热温度很高, 燃气初温最高达到了 1550℃, 但工质平均放热温度不低, 排气温度往往在 500℃ 以上, 大功率燃气轮机的排气温度更是高达 550~650℃。

表 1-1 国产大功率燃煤汽轮发电机组的主要技术参数

单机容量 (MW)	蒸汽参数		煤耗率与供电效率			
	压力 (MPa)	主蒸汽温度/再热 蒸汽温度 (℃)	煤耗率 (g/kWh)	平均煤耗率 (g/kWh)	供电效率 (%)	相对煤耗率 (%)
300	16.70	538/538	320~340	330	37.8	100
600	16.70	538/538	310~330	320	39.0	97.0
600	24.20	566/566	290~300	295	42.3	89.4
1000	25.00	600/610	270~290	280	44.6	84.8

注 我国汽轮发电机组的排汽压力一般为 0.004 9MPa，对应的饱和温度为 32℃左右。

表 1-2 国外一些先进燃气轮机发电机组（50Hz）的主要技术参数

制造公司	机组型号	ISO 基本功率 ^① (MW)	压比	燃气初温 (℃)	供电效率 (%)	备 注
GE	PG9351FA	255.6	15.4	1327	36.0	
	MS9001HA.02	470	21.8	1566	41.5	
	LSM100	100	42.0	1380	46.0	航机改型
西门子	V94.3A	265	17.0	1310	38.5	
	SGT5-8000H	375	19.2	1556	40.0	
三菱重工	M701F	270	17.0	1400	38.2	
	M701G2	334	21.0	1500	39.5	
安萨尔多 (前 ABB 技术)	GT26	320	30.0	1260	40.0	

注 所列燃气轮机的排气温度均为 550℃~650℃。

① ISO 基本功率是指在国际标准化委员会所规定的 ISO 环境条件下燃气轮机连续运行所能达到的功率。ISO 环境条件：温度 15℃，压力 0.101 3MPa，相对湿度 60%。

一般来说，提高汽轮机循环的工质平均吸热温度是困难的。这是因为，要提高蒸汽的平均吸热温度，需要同时提高主蒸汽的压力和温度，而压力和温度的同时提高必然要求锅炉汽包、汽轮机汽缸等部件壁厚加大，使其在热态下工作的可靠性变差，机组的安全性难以保证。据预测，汽轮机进一步发展的方向大体有两个：一是开发新材料以便把主蒸汽参数提高到 35.0MPa/700℃/720℃的水平；二是采用两次再热等手段改进热力系统及设备的设计。这两种手段结合起来，大约可使汽轮机组的供电效率提高到 50%左右，但是需要付出艰苦的努力。

与汽轮机相比，燃气轮机的工作压力不高，高温部件的结构可以做得比较轻巧，在采用空气或水蒸气对燃烧室与透平关键部件进行冷却的基础上，提高燃气初温相对容易一些，但降低工质的平均放热温度却很困难。因为燃气轮机在进气温度一定时，要降低排气温度，必须提高循环的压比，而在目前的技术水平下，既提高燃气轮机的压比，又保证其具有良好的运行性能还存在困难。总的来看，燃气轮机发展的主要方向也仍然是提高燃气平均吸热温度。从理论上讲，燃气初温再提高 100~200℃是可能的，这可以使燃气轮机发电机组的供电效率在现有基础上再提高几个百分点。但即便加上其他方面的改进，简单循环燃气轮机的

供电效率也很难提高到 50% 以上。

二、联合循环的热力学原理

既然单独的汽轮机循环和燃气轮机循环由于自身的局限性, 效率上难以有大幅度突破, 那么能否将两者结合起来, 构成一种效率更高的循环呢? 答案是肯定的, 这就是所谓的燃气-蒸汽联合循环。

图 1-6 所示为余热锅炉型联合循环的热力系统图, 图 1-7 为其在理想条件下的温熵图。该系统的原理是: 用余热锅炉 (heat recovery steam generator, HRSG) 吸收燃气轮机排气的热量产生蒸汽, 然后用汽轮机将蒸汽的热量转换为机械功。由于燃气轮机排气的温度比较高, 而汽轮机循环能够利用的蒸汽温度又比较低, 所以理论上是可以实现的。

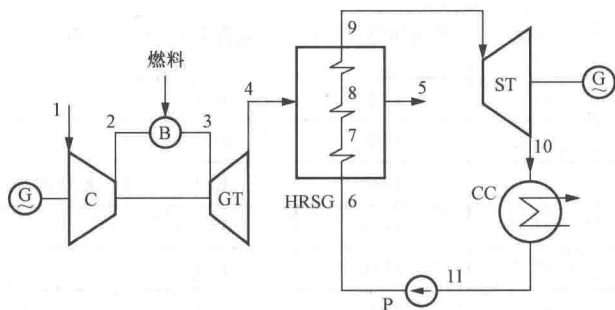


图 1-6 余热锅炉型联合循环的热力系统

C—压气机; B—燃烧室; GT—透平; HRSG—余热锅炉;

ST—汽轮机; CC—凝汽器; P—给水泵; G—发电机

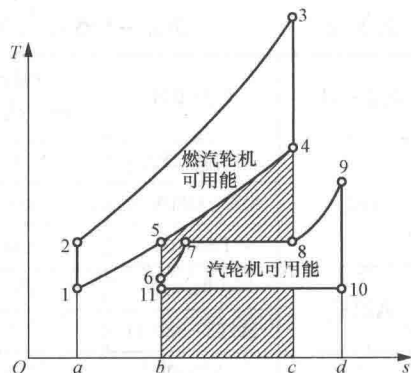


图 1-7 理想余热锅炉型联合循环的温熵图

在该循环的燃气轮机子循环中, 单位质量工质所获得的热量可由温熵图上的面积 $a-2-3-c-a$ 表示, 对外所做的功可由面积 $1-2-3-4-1$ 表示, 通过余热锅炉传向给水的热量可由面积 $b-5-4-c-b$ 表示, 向外界放出的热量可由面积 $a-1-5-b-a$ 表示。

在该循环的汽轮机子循环中, 与单位质量空气相对应的蒸汽 (注意: 当流过燃气轮机的空气量为单位值时, 流过汽轮机的蒸汽量并不一定为单位值) 从余热锅炉吸收的热量可由面积 $b-6-7-8-9-d-b$ 表示, 它与面积 $b-5-4-c-b$ 相等, 对外所做的功可由面积 $6-7-8-9-10-11-6$ 表示, 通过凝汽器向外界放出的热量可由面积 $b-11-10-d-b$ 表示。显然, 在联合循环中, 汽轮机子循环的可用能来自燃气轮机子循环, 是后者不可用能的一部分。

在一定意义上可以认为, 燃气轮机是工作于高温区的一种热机, 宜于利用高品位的热量; 汽轮机是工作于低温区的一种热机, 宜于利用低品位的热量; 而联合循环按照热量梯级利用的原则将燃气轮机和汽轮机结合起来, 可以将高品位和低品位的热量同时利用起来。由于联合循环同时利用了燃气轮机循环平均吸热温度高和汽轮机循环平均放热温度低的优点, 又同时克服了两者的缺点, 所以可以达到较高的循环效率。

国外某些燃用天然气的联合循环发电机组 (50Hz) 的主要技术数据见表 1-3, 将其与表 1-1 和表 1-2 做一对比可以看出, 联合循环发电机组的供电效率一般比单独的汽轮机或燃气轮机发电机组高出 15~20 个百分点, 最高效率已达到 60% 以上。

表 1-3 国外某些联合循环发电机组（50Hz）的技术数据（燃天然气时）

公司名称	机组型号	ISO 基本 功率（MW）	供电效率 ^① （%）	所配燃气 轮机情况	备注
GE	S-109FA	390.8	56.7	1 台 9FA，三压汽轮机	单轴 ^②
	S-209FA	786.9	57.1	2 台 9FA，三压汽轮机	多轴 ^③
	S-109HA.02	701.0	61.4	1 台 9HA.02，三压汽轮机	单轴
西门子	GUD1S.94.3A	390.0	57.3	1 台 V94.3A，三压汽轮机	单轴
	GUD2S.94.3A	780.0	57.3	2 台 V94.3A，三压汽轮机	多轴
	SCC5-8000H	570.0	60.7	1 台 SGT5-8000H，三压汽轮机	单轴
三菱重工	MPCP1（701F）	398.0	57.0	1 台 M701F，三压汽轮机	单轴
	MPCP2（701F）	804.7	57.4	2 台 M701F，三压汽轮机	多轴
	MPCP1（701G）	498.0	59.3	1 台 M701G2，三压汽轮机	单轴
安萨尔多 （前 ABB 技术）	KA26-1	467.0	59.5	1 台 GT26，三压汽轮机	单轴

① 机组效率有高热值（HHV）和低温值（LHV）之分，本书未作声明时，一律采用低温值效率。

② 燃气轮机与汽轮机同轴，共同驱动一台发电机的联合循环机组称为单轴机组。

③ 燃气轮机与汽轮机不同轴，各驱动一台发电机的联合循环机组称为多轴机组。

第二节 联合循环的类型及特点

一、联合循环的类型

图 1-6 所示为一种最简单的联合循环，实际上，联合循环的形式多种多样。广义地说，凡是两个或两个以上的热机循环耦合在一起的循环均为联合循环。一般联合循环须由前置（topping，又称为顶置）循环和后置（bottoming，又称为底置）循环两部分构成。前置循环是工作于高温区、输入大部分热量的循环，它会产生大量的余热；后置循环是工作于低温区、以前置循环的余热为主要热源的循环。前置循环和后置循环通常用换热设备耦合在一起。到目前为止，应用最广泛的联合循环是燃气-蒸汽联合循环。这种循环能获得广泛应用的原因如下：

- （1）组成联合循环的设备已在各自单一循环的动力机组上经过了长期运行考验，可靠性高，开发费用低。
- （2）燃气轮机与汽轮机所采用的工质都是易得、廉价的物质。
- （3）现代燃气轮机排气的温度水平与现代汽轮机蒸汽过程的温度水平具有良好的搭配。

燃气-蒸汽联合循环的形式也是多种多样的，其分类见表 1-4。按照前置循环与后置循环相耦合的方式不同，可将它们分为余热锅炉型联合循环、补燃余热锅炉型联合循环、增压锅炉型联合循环、排气助燃锅炉型联合循环、给水加热型联合循环、程氏循环、湿空气透平循环、以卡林那循环为基础的联合循环。按照循环所用的燃料不同，可将它们分为常规燃油（气）型联合循环、燃煤型联合循环和核能型联合循环。按照煤被燃烧利用的方式不同，燃煤型联合循环又分为常压流化床联合循环、增压流化床联合循环、整体煤气化联合循环、直接燃煤（煤粉或水煤浆）的联合循环。按照用途，可将它们分为单纯发电的联合循环、热电

联产联合循环和冷热电三联供联合循环。各种循环都有其自己的特点, 分别适用于不同的场合。本书的主要论述对象是单纯发电用的联合循环。

表 1-4 燃气-蒸汽联合循环分类

按照前置循环与后置循环 相耦合的方式分类	按照燃料性质分类	按照用途分类
余热锅炉型联合循环 补燃余热锅炉型联合循环 增压锅炉型联合循环 排气助燃锅炉型联合循环 给水加热型联合循环 程氏循环 湿空气透平循环 以卡林那循环为基础的联合循环	常规燃油(气)型联合循环 燃煤型联合循环: (1) 常压流化床联合循环 (2) 增压流化床联合循环 (3) 整体煤气化联合循环 (4) 直接燃煤联合循环 核能型联合循环	单纯发电的联合循环 热电联产联合循环 冷热电三联供联合循环

二、三种基本形式的联合循环

在上述各种类型的燃气-蒸汽联合循环中, 余热锅炉型、补燃余热锅炉型和增压锅炉型是三种最基本的联合循环, 也是联合循环发电机组所采用的主要形式。现简要介绍这三种联合循环的基本工作原理和特点。

余热锅炉型联合循环是目前燃气-蒸汽联合循环机组所采用的主要形式, 其热力系统和其在理想条件下的温熵图已分别表示在图 1-6 和图 1-7 中。这种形式联合循环的优点是: 技术成熟、系统简单、造价低、启停速度快。其汽轮机功率一般占机组总功率的 30%~35%。

补燃余热锅炉型联合循环的热力系统和其在理想条件下的温熵图分别如图 1-8 和图 1-9 所示。它与余热锅炉型联合循环的主要不同在于在余热锅炉中也加入一定燃料, 利用燃气中剩余的氧气燃烧, 提高余热锅炉效率以及蒸汽的参数。在热力过程上可以理解为: 温度为 T_4 的燃气轮机排气首先被补充的燃料加热到温度 T_{12} , 然后用来对给水加热, 温度降低到 T_5 后排向大气。燃气在余热锅炉中放出的热量可由面积 $b-5-4-12-c-b$ 表示, 它与给水在过程 6-7-8-9 中吸收的热量, 即面积 $b-6-7-8-9-d-b$ 相等。

补燃余热锅炉型联合循环的优点是: 在燃气轮机参数低、效率低、排气温度低的特定条件下, 可使蒸汽参数及流量大幅度提高, 从而使机组的容量增大、效率提高; 同时, 机组的变工况性能也可得到改善。但是, 补燃余热锅炉型联合循环并不是纯粹能量梯级利用的联合循环, 其中有一部分热量只参与了汽轮机循环。所以, 只有在由小型燃气轮机构成的联合循环或者在由常规燃煤机组改造而成的联合循环中, 这种形式才有优越性。

增压锅炉型联合循环的热力系统和其在理想条件下的温熵图分别如图 1-10 和图 1-11 所示。它将产生燃气的燃烧室与产生蒸汽的锅炉合二为一, 利用外置的锅炉省煤器来回收透平的排气余热。在热力过程上可以理解为: 由压气机送来的温度为 T_2 的空气在增压锅炉中被加热到 T_{13} 的温度, 首先经过 13-3 的放热过程将部分热量传向给水, 使其经历过程 12-7-8-9 变为过热蒸汽, 然后进入汽轮机膨胀做功; 燃气轮机的排气在省煤器中将热量传向给水, 温度降低到 T_5 后排向大气; 给水在省煤器中吸收燃气轮机排气的热量后, 其温度从 T_6 升高到 T_{12} 。燃气在增压锅炉和省煤器中放出的热量可由面积 $b-5-4-3-13-c-b$ 表示, 它与给水吸

收的热量, 即面积 $b-6-7-8-9-d-b$ 相等。

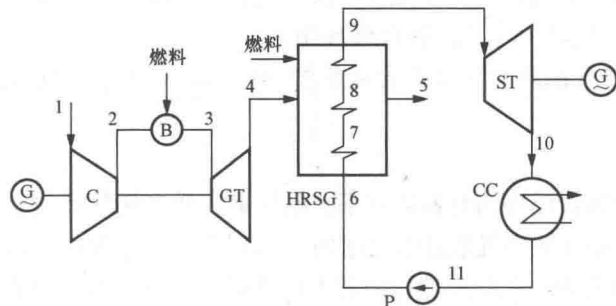


图 1-8 补燃余热锅炉型联合循环的热力系统
C—压气机；B—燃烧室；GT—透平；HRSG—余热锅炉；
ST—汽轮机；CC—凝汽器；P—给水泵；G—发电机

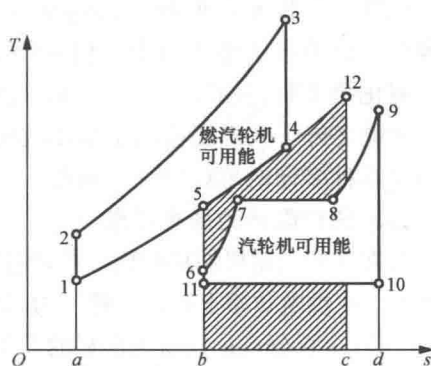


图 1-9 理想补燃余热锅炉型
联合循环的温熵图

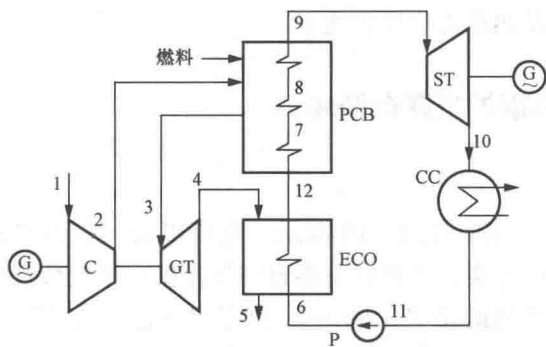


图 1-10 增压锅炉型联合循环的热力系统
C—压气机；GT—透平；PCB—增压锅炉；ECO—省煤器；
ST—汽轮机；CC—凝汽器；P—给水泵；G—发电机

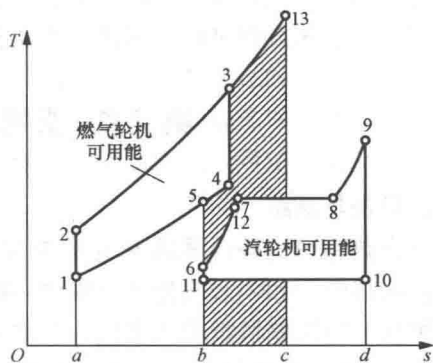


图 1-11 理想增压锅炉型联合循环的温熵图

增压锅炉型联合循环的优点是：在燃气轮机排气温度较低的情况下，可使蒸汽参数及流量不受限制，从而可达到较大的机组容量和较高的机组效率。同时，由于燃烧是在较高的压力下进行的，且烟气的质量流速较高，所以锅炉的传热效率高，所需的传热面积小，锅炉尺寸紧凑。但是，这种形式的联合循环存在着系统复杂、制造技术要求高、燃气轮机不能单独运行的缺点。另外，与补燃余热锅炉型联合循环类似，它并不是纯粹能量梯级利用的联合循环，其中有一部分热量只参与了汽轮机循环。所以，目前只在燃煤的联合循环中采用。

三、燃煤型联合循环

20 世纪 70 年代以来，世界各主要工业国都曾努力发展过燃煤的燃气-蒸汽联合循环发电技术。目前，已有一些燃煤的联合循环在世界各地投入示范运行，其中最主要的两种是增压流化床联合循环和整体煤气化联合循环。

增压流化床联合循环（pressurized fluidized bed combustion combined cycle, PFBC-CC）是按照前述增压锅炉型联合循环方案开发的燃煤型联合循环发电技术，其中的增压锅炉是具有洁净燃煤特点的增压流化床锅炉。与常规燃油（气）型的增压锅炉型联合循环相