

RANQI ZHENGQI LIANHEXUNHUAN
FADIAN SHEBEI JI YUNXING

杨顺虎 编著



燃气

蒸汽

联合循环发电设备及运行



责任编辑：潘宏娟 郑艳蓉 丰兴庆

燃气—蒸汽

联合循环发电设备及运行

- ☞ 燃油燃气锅炉实用技术
- ☞ 循环流化床锅炉的启动调试与安全运行
- ☞ 火电厂循环冷却水处理
- ☞ 循环流化床锅炉理论与运行
- ☞ 汽轮机数字式电液调节系统
- ☞ 电站锅炉运行与燃烧调整
- ☞ 电力用煤采制化技术及其应用(第二版)
- ☞ 300MW 火电机组调试技术
- ☞ 大型电站锅炉安全及优化运行技术
- ☞ 大型火电机组检修实用技术丛书

ISBN 7-5083-1444-1



9 787508 314440 >

ISBN 7-5083-1444-1

定价： 36.00 元

燃气—蒸汽

联合循环发电设备及运行

杨顺虎 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内
容
提
要

本书主要讲述了大型燃气轮机和联合循环发电设备的工作原理和设备结构,联合循环机组的电液调节系统的自动控制原理、各种保护系统及特点,联合循环机组的启停方式、正常运行维护、常见典型事故发生的原因、事故的预防措施及试验等内容。

本书适合从事大型燃气—蒸汽联合循环发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读或作为培训教材使用,也可供其他有关专业人员及高等院校热能动力工程类专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃气-蒸汽联合循环发电设备及运行/杨顺虎编著.北京:中国电力出版社,2003

ISBN 7-5083-1444-1

I.燃… II.杨… III.①燃气-蒸汽联合循环发电-发电设备-理论 ②燃气-蒸汽联合循环发电-发电设备-运行 IV.TM611.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第015390号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷厂印刷

各地新华书店经售

2003年10月第一版 2003年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 23印张 523千字

印数0001—3000册 定价36.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

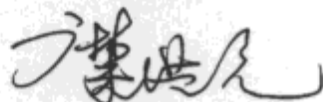
序 言

随着我国经济建设的高速发展，燃气轮机及联合循环发电在我国的应用不断扩大，温州龙湾发电厂就是在 20 世纪 90 年代建成的具有先进设备的大型燃气—蒸汽联合循环电厂。令人特别欣喜的是随着电厂的建成、壮大，也孕育了一批燃气轮机发电的专业人才。

杨顺虎同志编著的《燃气—蒸汽联合循环发电设备及运行》，包括燃气—蒸汽联合循环发电设备的原理和结构、控制和保护，以及运行和试验等，内容丰富，既有基本专业理论知识，又有实践经验、资料总结。这是为电厂专业技术人员提供的一本极好的教材和专业资料。

本书的出版充分表明我们的电厂里可不断熏陶出深深热爱燃气轮机发电事业的专业队伍。他们在专业工作中兢兢业业、刻苦钻研的精神及其在专业工作中取得的丰硕成果，必将在我国燃气轮机发电行业中进一步开花结果。我国燃气轮机发电专业队伍必将更加发展壮大，燃气轮机发电事业后继有人！

杨顺虎 编著
2002年8月8日



2002年8月28日

QA A12/17

前 言

为了适应燃气—蒸汽联合循环电厂建设迅速发展的需要，提高联合循环电厂运行人员的技术水平，特编写了本书。

鉴于我国目前为燃气—蒸汽联合循环电厂专门编写的书较少，把联合循环设备原理、结构和电厂实际运行相结合的书籍尤其缺乏，本书内容涵盖了大型燃气—蒸汽联合循环发电设备的工作原理和设备结构、控制和保护系统以及运行维护技术。在内容上侧重于重型燃气轮机技术，努力反映联合循环发电设备的新技术、新设备、新材料和新经验，突出实用性和先进性。

本书在编写过程中得到了科研单位、兄弟电厂的专家、制造厂商和作者同事的热情帮助；台州发电厂厂长李建国高级工程师、温州燃机发电有限公司总经理金建华高级工程师自始至终予以指导；中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会主任委员糜洪元高级工程师在百忙之中予以作序；本书由金丽萍高级工程师审阅，在此一并表示衷心的感谢！

燃气—蒸汽联合循环发电技术的发展迅速，所涉及的内容也较为广阔，限于作者水平有限，对其理解不够透彻，书中缺点和错误在所难免，恳请专家和读者批评指正。欢迎使用电子邮件 wzrjfdc@wz163.com 通信联系。

台州发电厂 杨顺虎
2002年8月于龙湾燃机

目 录

序言

前言

第一篇 燃气—蒸汽联合循环发电设备的原理和结构

第一章 绪论	3
第一节 燃气轮机和联合循环发电技术的发展和特点	4
第二节 我国燃气轮机和联合循环的制造业和发电业	6
第三节 燃气轮机和联合循环发电技术的发展趋势	8
第四节 燃气轮机和联合循环发电设备的分类和命名	10
第二章 燃气—蒸汽联合循环的原理	12
第一节 燃气轮机简单循环热力过程	12
第二节 燃气轮机的复杂循环	20
第三节 燃气—蒸汽联合循环原理	24
第四节 注蒸汽的燃气轮机循环	31
第三章 轴流式压气机的原理和结构	35
第一节 轴流式压气机的工作原理	35
第二节 压气机的特性曲线	41
第三节 轴流式压气机的结构	43
第四节 压气机的喘振及防喘措施	54
第四章 燃烧室的原理和结构	59
第一节 燃烧室工作过程的特点和要求	59
第二节 燃烧过程和气流的组织	62
第三节 燃烧室的变工况特性	67
第四节 燃烧室的结构和型式	68
第五节 气体燃料的燃烧技术	76
第六节 重油燃料的燃烧技术	78

第七节	燃烧室的低 NO_x 燃烧技术	82
第五章	燃气透平的原理和结构	90
第一节	燃气透平的工作原理	90
第二节	燃气透平的特性曲线	94
第三节	燃气透平的结构	95
第四节	燃气透平零部件的冷却	107
第五节	燃气透平高温部件的材料和涂层	113
第六章	燃气轮机的整体结构特点	117
第一节	燃气轮机的整体布置	117
第二节	转子的支承和轴向推力	119
第三节	燃气轮机的支架	121
第四节	燃气轮机的轴承和轴承座	123
第七章	典型燃气轮机发电设备的技术特点	130
第一节	GE 公司燃气轮机的技术特点	130
第二节	Siemens 公司燃气轮机的技术特点	137
第三节	Alstom 公司燃气轮机的技术特点	142
第四节	Mitsubishi 公司燃气轮机的技术特点	146
第八章	余热锅炉—汽轮机的原理和结构	149
第一节	概述	149
第二节	余热锅炉的型式	150
第三节	联合循环中的蒸汽循环方案	154
第四节	余热锅炉—汽轮机的热力参数	158
第五节	余热锅炉的结构特点	162
第六节	联合循环汽轮机的结构特点	169
第七节	联合循环发电机组的配置方式	175
第九章	燃煤的燃气—蒸汽联合循环	179
第一节	整体煤气化联合循环 (IGCC)	179
第二节	增压流化床燃烧联合循环 (PFBC-CC)	186
第十章	燃气轮机的主要辅助系统	191
第一节	燃气轮机的启动和盘车系统	191
第二节	燃气轮机的进气和排气系统	197

第三节	重油燃料处理系统	202
第四节	燃气轮机的燃料供给系统	206
第五节	燃气轮机的雾化空气系统	212

第二篇 燃气—蒸汽联合循环发电设备的控制和保护

第十一章	燃气轮机的控制系统	217
第一节	燃气轮机的主控系统	217
第二节	燃气轮机的顺序控制系统	229
第三节	燃气轮机的IGV控制系统	233
第四节	燃气轮机的燃料控制系统	236
第十二章	燃气轮机的保护系统	242
第一节	燃气轮机的超速保护	242
第二节	燃气轮机的超温保护	244
第三节	燃气轮机的燃烧监测	246
第四节	燃气轮机的熄火保护	250
第五节	燃气轮机的振动保护	251
第十三章	余热锅炉—汽轮机的控制和保护系统	253
第一节	余热锅炉的控制和保护系统	253
第二节	汽轮机的控制系统	257
第三节	汽轮机的保护系统	261
第四节	联合循环的烟气旁路控制	263
第五节	联合循环的蒸汽旁路控制	265
第六节	联合循环发电机组的协调控制	267

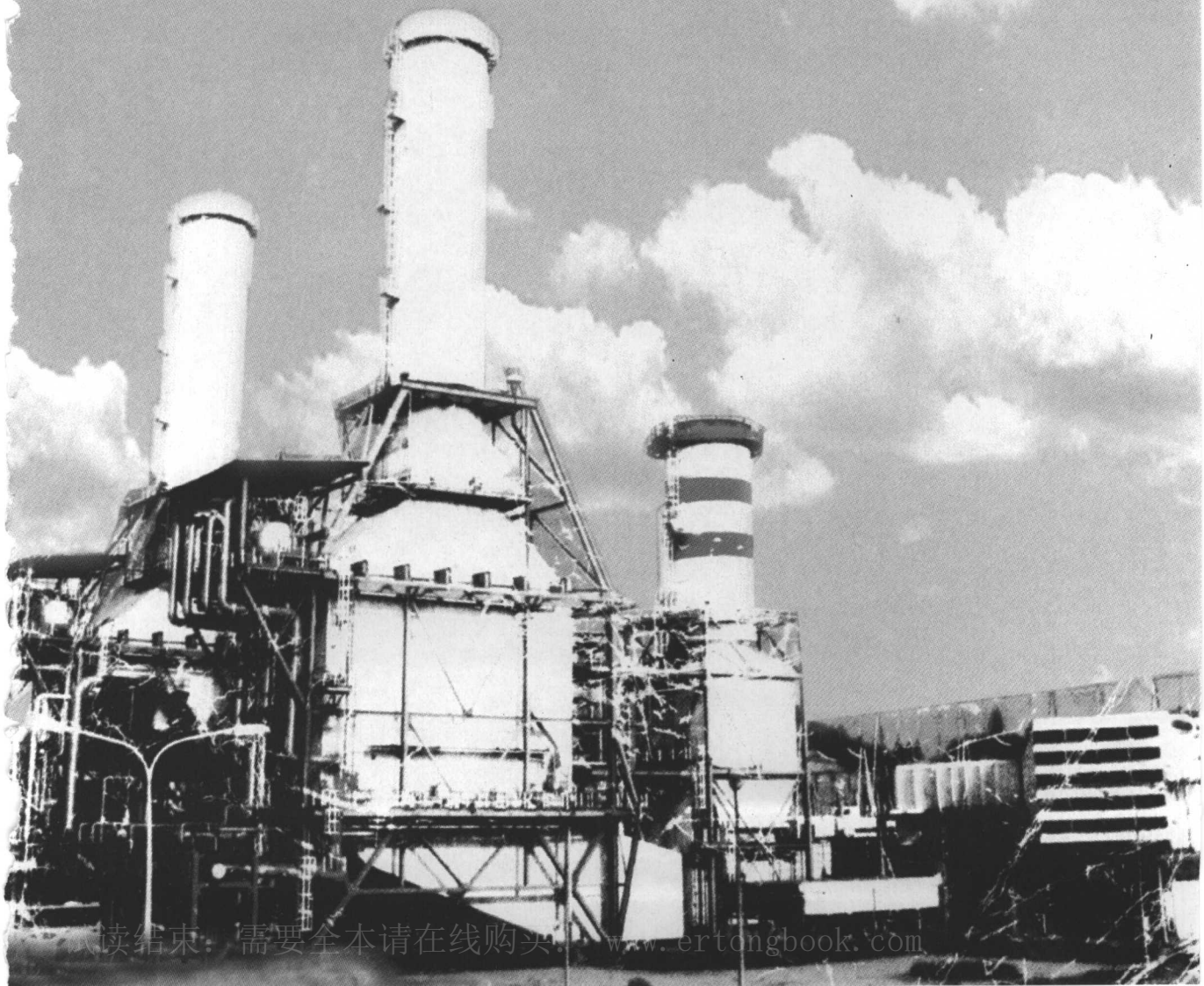
第三篇 燃气—蒸汽联合循环发电设备的运行和试验

第十四章	燃气—蒸汽联合循环发电设备的启动和停运	273
第一节	燃气轮机的启动	273
第二节	燃气轮机的停运	277
第三节	燃气轮机过渡工况的热应力	280
第四节	余热锅炉—汽轮机的启动	282
第五节	余热锅炉—汽轮机的停运	293

第六节	母管制余热锅炉的并汽	296
第七节	无烟气旁路的联合循环启停特点	298
第十五章	燃气—蒸汽联合循环发电设备的变工况运行	300
第一节	燃气轮机的变工况运行	300
第二节	余热锅炉的变工况运行	302
第三节	联合循环变工况运行特性	304
第四节	环境参数变化对联合循环性能的影响	310
第五节	燃气轮机性能老化的影响	313
第十六章	燃气—蒸汽联合循环发电设备的运行维护	317
第一节	燃气—蒸汽联合循环发电设备的运行监视	317
第二节	烧重油燃气轮机的运行	320
第三节	联合循环发电设备的水洗	323
第四节	燃气轮机的内部孔窥检查	326
第五节	联合循环发电设备的备用保养	328
第六节	燃气轮机发电设备的寿命管理	331
第十七章	燃气—蒸汽联合循环发电设备的运行事故	335
第一节	燃气轮机启动失败	335
第二节	烧重油燃气轮机运行中熄火	337
第三节	燃气轮机热通道过热	338
第四节	燃气轮机的振动	340
第五节	余热锅炉烟道尾部再燃烧	344
第十八章	联合循环发电机组的验收和试验	346
第一节	燃气轮机的性能试验	347
第二节	联合循环的性能试验	350
第三节	燃气轮机甩负荷试验	353
附录一	大中型燃气轮机的性能参数	356
附录二	大中型燃气—蒸汽联合循环机组的性能参数	357
参考文献		358

第一篇

燃气—蒸汽联合循环发电设备的 原理和结构



第一章

绪论

燃气轮机 (Gas Turbine) 是一种以气体作为工质、内燃、连续回转的、叶轮式热能动力机械。它主要由压气机 (Compressor)、燃烧室 (Combustion) 和燃气透平 (Turbine) 三大部件构成。图 1-1 所示为最简单的等压燃烧加热的开式循环燃气轮机及其工作过程示意：压气机从外界连续吸入空气并使之增压，同时空气温度也相应提高；压送到燃烧室的空气与燃料混合燃烧成为高温、高压的燃气；燃气在透平中膨胀作功，推动透平带动压气机和外负荷转子一起高速旋转；从透平中排出的乏气排至大气自然放热。这样，燃气轮机就把燃料的化学能转变成热能，又把部分热能转变成机械功。通常，燃气透平发出的机械功约 2/3 左右用来驱动压气机，其余的 1/3 左右的机械功驱动负荷 (发电机等)。

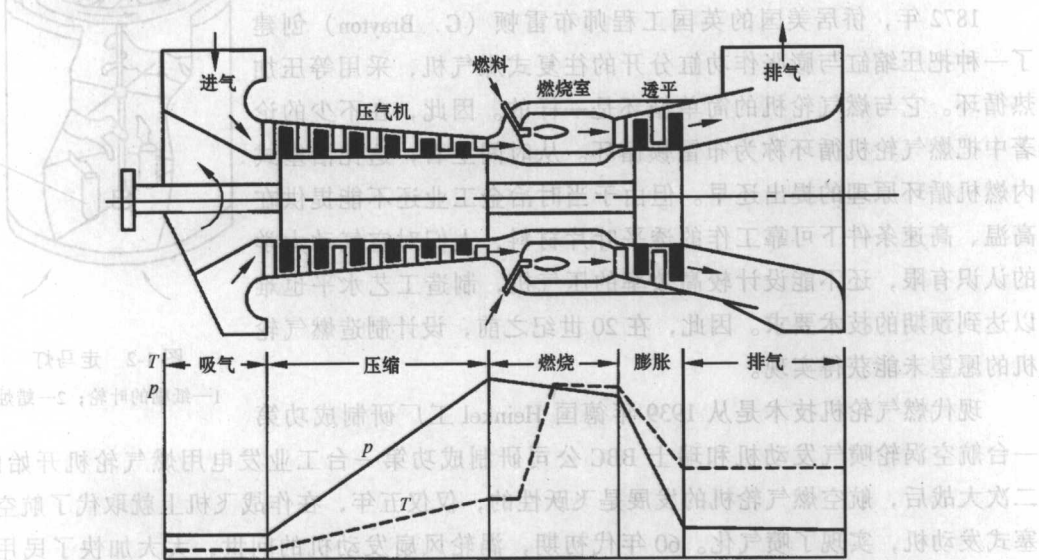


图 1-1 燃气轮机的工作过程

由于燃气轮机循环的工质放热温度 (排气温度) 还很高 (约 450 ~ 600℃)，且大型机组排气流量高达 100 ~ 600 kg/s，因而有大量的热能随着高温燃气排入大气。而对于蒸汽动力循环 (朗肯循环) 来说，由于材料耐温、耐压程度的限制，汽轮机进汽温度一般为 540 ~ 560℃，但是蒸汽动力循环放热平均温度很低，一般为 30 ~ 38℃。由于燃气轮机的排气温度正好与朗肯循环的最高温度相接近，如果将两者结合起来，互相取长补短，形成一种工质初始工作温度高而最终放热温度低的燃气—蒸汽联合循环。这种循环也可概括地称

为总能系统，在系统中能源从高品位到中低品位被逐级利用，形成能源的梯级利用。

燃气—蒸汽联合循环发电机组就是将燃气轮机的排气引入余热锅炉（HRSG-Heat Recovery Steam Generator），产生高温、高压蒸汽驱动汽轮机，带动发电机发电。因而，联合循环的热能利用水平较燃气轮机循环或汽轮机循环都有明显提高。目前，燃气轮机的热效率达 40%，联合循环机组的热效率接近 60%。

第一节 燃气轮机和联合循环发电技术的发展和特点

一、燃气—蒸汽联合循环发电技术的发展

人们对燃气轮机在原理方面的认识可以追溯到古代，公元 800~900 年左右，我国已有了走马灯（图 1-2）。走马灯就是利用蜡烛燃烧产生的高温气体来推动纸糊的叶轮转动的。从原理上讲，这就是现代燃气轮机的雏形；所不同的是在走马灯中仅用了自然对流来使气体流动，而没有压气机。1510 年，意大利达·芬奇也曾设计利用壁炉烟道气体来转动叶轮，但这要比我国晚很多年。

1872 年，侨居美国的英国工程师布雷顿（G. Brayton）创建了一种把压缩缸与膨胀做功缸分开的往复式煤气机，采用等压加热循环。它与燃气轮机的简单循环是一样的。因此，在不少的论著中把燃气轮机循环称为布雷顿循环。从时间上看，这比活塞式内燃机循环原理的提出还早。但由于当时冶金工业还不能提供在高温、高速条件下可靠工作的透平叶片材料，人们对空气动力学的认识有限，还不能设计较高效率的压气机，制造工艺水平也难以达到预期的技术要求。因此，在 20 世纪之前，设计制造燃气轮机的愿望未能获得实现。

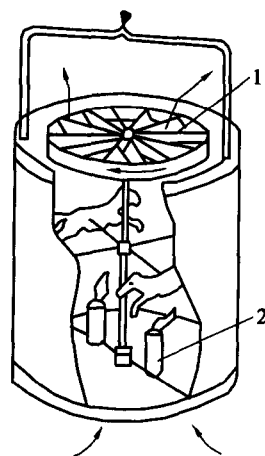


图 1-2 走马灯

1—纸糊的叶轮；2—蜡烛

现代燃气轮机技术是从 1939 年德国 Heinkel 工厂研制成功第一台航空涡轮喷气发动机和瑞士 BBC 公司研制成功第一台工业发电用燃气轮机开始的。二次大战后，航空燃气轮机的发展是飞跃性的，仅仅五年，在作战飞机上就取代了航空活塞式发动机，实现了喷气化。60 年代初期，涡轮风扇发动机的问世，大大加快了民用运输机燃气轮机化的进程并迅速成为各种军用飞机的动力装置。几乎在同一时期，各种类型的工业燃气轮机在电力、石油、化工、交通运输和国防等部门也得到了广泛应用和大力发展。在电力工业中，燃气轮机不但在中、小功率范围内逐渐取代了柴油机，而且在大功率火电厂也打破了由汽轮机作主机的一统天下的局面，并步入百万千瓦以上的火电站。

燃气—蒸汽联合循环的采用，在西方已有 40 多年历史。早期联合循环是以蒸汽为主，燃气轮机不过是作蒸汽锅炉的炉膛增压之用。第一台实用的联合循环机组，是用燃气轮机来扩建汽轮机电站形成的发电机组，于 1949 年投入运行，它不仅提高了原有电站的发电量，同时也提高了电站效率。到了 60 年代，整个概念被颠倒过来。燃气轮机在循环中作

为主要的动力设备，而它的排气余热则被用来产生蒸汽，在汽轮机中作功。由于燃气—蒸汽联合循环在不增加燃料供给量的情况下可以增加出力三分之一甚至更高，并可燃烧各种燃料，现在已作为一种成熟的动力系统被全世界所接受。

随着人们对气体动力学等基础科学认识的深化，冶金水平、冷却技术、结构设计和工艺水平的不断提高和完善，通过提高燃气初温、增大压气机增压比、充分利用燃气轮机的排气余热、与其他类型动力机械的联合使用等途径，使得燃气轮机的性能在最近 20 年中取得了巨大的技术进步，燃气轮机发电在世界电力结构中的比例不断增加。

纵观世界火电动力发展动态，日本烧液化天然气（LNG）联合循环标准单元电站和美国的电站分阶段建设“三步曲”模式，代表着当今世界火电动力发展新趋势。

美国 EPRI 首先提出分阶段建设电站“三步曲”战略部署：即以最短建设周期（一般为一年）建成单循环燃气轮机发电机组，先发电运营；接着配上余热锅炉和汽轮机组，成为高效率、烧油（气）的联合循环电站；再经过几年或待到天然气短缺、涨价时，装上煤气化装置，变为煤气化联合循环电站。它以最少投资，去满足负荷逐步增长的需要和适应能源供应形势变化，很快得到电力同行推崇仿效。

日本是个技术先进、经济发达的国家，但资源、能源十分贫乏，故十分重视发展各种能源利用技术，如提高一次能源转换为电的效率、利用不同燃料以及余热利用等技术。这些方面，燃气轮机总能系统占有十分重要位置。为了以最高效率利用进口燃料，日本法定烧天然气电站必须采用联合循环，日本九大电力公司联合执行一个建设燃用液化天然气（LNG）大型联合循环电站的国家计划。

资料显示，1968 ~ 1995 年世界范围内共销售发电用燃气轮机 13373 台，总容量达 377517MW，而其中机组台数的 32.24%、容量数的 43.58% 是在 1990 年至 1995 年增长的。美国早在 1987 年燃气轮机发电装置的生产总量就已超过了汽机生产总量。据美国能源部信息局预测，1998 ~ 2007 年 10 年内，计划新装机 52044MW，其中燃煤机组占 4.9%，燃油机组占 2.8%，燃气机组占 88.7%，燃油、燃气机组大部分是燃气轮机及联合循环机组。

大型电站以联合循环为主，中小型机组以热电并供居多，将是西方国家今后发展的格局。燃气—蒸汽联合循环电站方兴未艾之势由此可见一斑。

二、燃气—蒸汽联合循环发电的主要优点

(1) 电厂的整体循环效率高。常规燃煤电厂由于其循环及设备的限制，其热效率已很难有突破性的提高。目前超临界的 600MW 火电机组，其供电效率约 40% 左右。而燃气—蒸汽联合循环发电效率达 58 ~ 60%，它把天然气的资源利用率整整提高了 50%。

(2) 对环境污染极小。燃气—蒸汽联合循环采用油或天然气为燃料，燃烧效率高，令火电厂最头痛的 SO_2 排放没有了， NO_x 、CO 排放量降低到几个至几十个 ml/m^3 水平，燃气轮机噪声可作隔声处理，距机组 1m 处可降至 80dB，100m 处为 60dB。

(3) 在同等条件下，单位投资较低。目前，大功率燃气轮机电站和联合循环电站交钥匙工程的比投资费用分别为 \$200 ~ 300/\text{kW}\$ 和 \$500 ~ 600/\text{kW}\$，而 600MW 的燃煤超临界参数机组的单位造价为 \$1100/\text{kW}\$。

(4) 调峰性能好，启停快捷。燃气轮机从启动到带满负荷运行，一般不到 20min，快

速启动时更短。联合循环发电机组热态启动 60min、温态 90 min、冷态 120 min 可带满负荷。而汽轮发电机组启动至满负荷为：热态 90min，温态 180min，冷态 300min。按目前发展趋势来看，为了提高电网运行的机动性和安全性，用占电网总容量 15% ~ 20% 的燃气轮机作为应急备用电源或负荷调峰机组是完全必要的。

(5) 占地少。联合循环电厂由于无需煤场、输煤系统、除灰等系统，厂区占地面积比火电厂小得多。燃气轮机和余热锅炉都是户外布置，安装场地少。与同容量火电厂相比，联合循环电厂占地面积只有火电厂的 30% ~ 40%，建筑面积也只有火电厂的 20%。

(6) 耗水量少。燃气轮机不需要大量冷却水，一般燃气轮机单循环只需火电厂 2% ~ 10% 的用水量，联合循环也只需同容量火电厂的 1/3 左右，这对于缺水地区建电厂尤为重要。

(7) 建厂周期短，且可分期投产。由于燃气轮机在制造厂完成了最大的可能装配后集装运往现场，施工安装简便，建厂周期短。还可分单循环和联合循环两期建设，一般单循环只需 5 ~ 6 个月就可商业运行，而联合循环一般一年内可发电运行。

(8) 自动化程度高，运行人员少。由于联合循环电厂采用先进的集散式控制系统，控制人员可以大大减少，一般只有同容量火电厂人员的 20% ~ 25%。

总之，燃气—蒸汽联合循环是一种有显著优点的、有较大发展潜力的动力装置。随着世界性的电力体制改革，电力市场的建立，环境意识的增强，加快了联合循环发电的发展步伐。在 21 世纪，由联合循环取代传统的锅炉—汽轮机发电的模式已成定局。

第二节 我国燃气轮机和联合循环的制造业和发电业

一、我国燃气轮机及联合循环制造业的发展

我国燃气轮机制造业始于 20 世纪 50 年代末期（引进机组）；60 年代，我国燃气轮机发电站的建设及其设备的制造生产已初具规模。自 60 年代开始，我国先后仿制过 1.5MW、6MW、23MW 发电用燃气轮机；70 年代还自行设计了 3MW、6MW 发电用燃气轮机和 3000hP、4000hP 机车燃气轮机（长征 I 号和长征 II 号），一些航空发动机厂也在航机改型方面作了不少工作。

80 年代后期，南京汽轮电机厂与美国 GE 公司合作生产 36MW 的 MS6001B 燃气轮机，但处于国外 80 年代水平，且产量远不能满足国内市场需要。1986 年，中国航空技术进出口公司、成都发动机公司与美国联合技术公司、透平动力和船舶技术公司（TPM）及 PW 公司开始联合设计、生产、销售和开发 FT8 陆海用燃气轮机。

近 50 年来，我国在燃气轮机的研究、设计、制造方面取得了较大成绩，积累了许多经验，在试验研究方面也取得了相当水平的科研成果。不过，由于工业燃气轮机的研制工作在 80 年代前后的停顿，造成了我国燃气轮机技术水平与国外先进水平的明显差距，至今不具备设计制造大型高性能燃气轮机的能力。

随着燃气—蒸汽联合循环发电技术的广泛应用，杭州锅炉厂和哈尔滨 703 研究所生产

的余热锅炉的技术水平已能满足 MS5000、MS6001B 系列燃气轮机的联合循环配套要求，其性能与进口同类设备相当。最近，杭州锅炉厂又成功推出与 MS9001E 系列燃气轮机配套的联合循环双压、三压余热锅炉，这无疑有利于我国联合循环发电设备逐步国产化的进程。

二、我国燃气轮机及联合循环发电业的发展

我国使用天然气燃气轮机发电始于 20 世纪 70 年代。相继在黑龙江大庆、山东胜利、新疆克拉玛依、中原油田等地建成了一些使用天然气或油田伴生气发电的机组，但功率都较小，采用功率为 36MW 的燃气轮机。

80 年代尤其 80 年代中期以后燃气轮机发电业有了很大的发展，分布的地理位置已经由过去主要在油田，而走向我国改革开放较早的特区如深圳、汕头等地。

20 世纪 90 年代，我国燃气轮机发电事业具有鲜明的特点：① 发展速度更快。到 2000 年底，我国燃气轮发电机组总装机容量达 8GW。② 突破地域的局限性。在油田和南方经济特区继续迅速发展的同时，在经济基础雄厚的华东地区也得到了迅速发展。③ 燃气轮机发电提高到一个新水平。引进的机组有更高的水平与更大的容量，如 GE 公司 PG9171E 型、Siemens 公司 V94.2 型、ABB 公司 GT13E2 型等 100MW 级的 E 型机组。

燃气轮发电机组燃用重油发电是降低燃料成本的重要途径，但燃用重油的难度很大。我国南方部分燃气轮机电厂于 20 世纪 90 年代初开始进行燃用重油的试验，通过多次试验摸索，终于获得在 MS5000 系列和 MS6001B 系列等燃气轮机上长期燃用重油连续发电的成功，取得了可贵的经验和较好的经济效益。

在燃气轮机进气冷却技术方面，利用余热锅炉的排气余热产生热水、给溴化锂机组提供热能从而生产出低温冷冻水对压气机入口空气进行冷却，使燃气轮机在大气温度较高时仍处于设计工况下运行的节能技术，近期在我国也得到了应用。有的电厂还采用将冷冻水雾化喷向入口空气予以直接冷却。两种型式各有特点，但都有显著的节能和保持机组设计出力的效果。

20 世纪 90 年代初，哈尔滨 703 研究所利用国内技术和设备对部分原属简单循环的机组进行双工质循环技术改造，即利用燃气轮机排气的余热产生一定压力的蒸汽，然后回注到燃气透平的热通道中，不仅可提高燃气轮机组的出力，而且改善了排烟对环境的污染，取得了明显的效果。

我国一次能源以煤为主，燃煤联合循环更显重要。以燃气轮机为主体的洁净煤发电技术，目前主要研究的是整体煤气化燃气—蒸汽联合循环（IGCC）和增压硫化床燃煤的燃气—蒸汽联合循环（PFBC-CC），现都已建立了试验性电站。

三、我国燃气轮机及联合循环发电业的展望

与国际相比，我国燃气轮机发电占的比例很低，燃天然气的更少。据粗略统计，我国天然气发电机组的装机容量约占全国发电设备总装机容量的 0.3%，燃煤发电目前仍是我国发电的主要方式。众所周知，燃煤电厂对大气的污染较为严重，因此，大力发展联合循环发电，对改善大气质量是十分必要的。

我国具有丰富的天然气资源，根据第二轮全国天然气油气资料分析评价结果来看，我