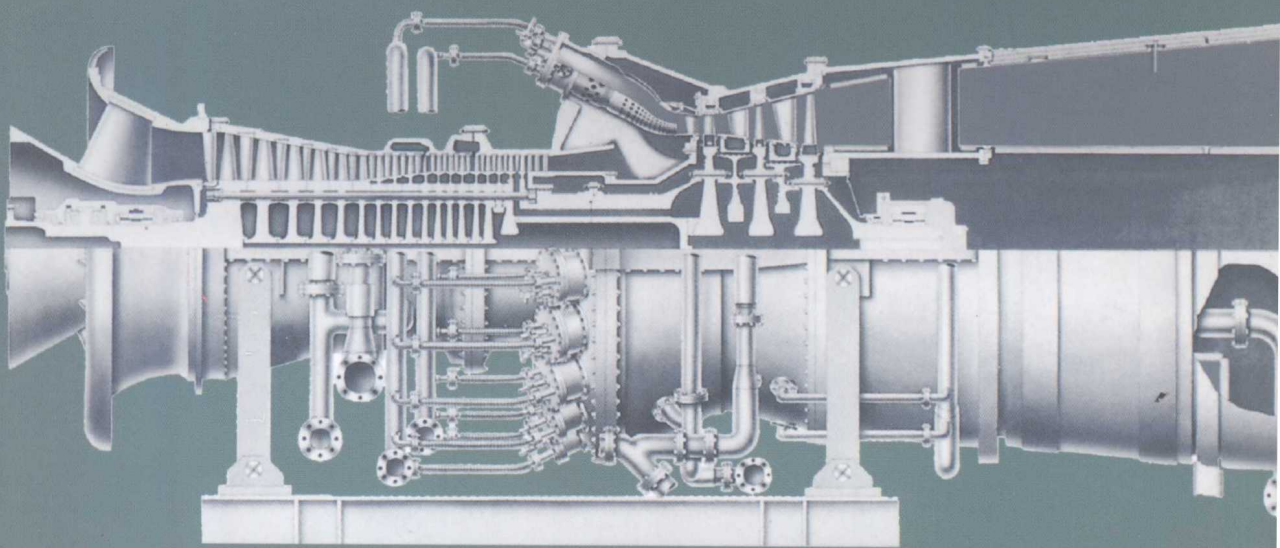


# 燃气轮机 与燃气—蒸汽联合循环装置

上

清华大学热能工程系动力机械与工程研究所  
深圳南山热电股份有限公司

编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

《燃气轮机与燃气—蒸汽联合循环装置》

编写委员会

又编委会成员中，本书的编写不仅符合其自身发展的需要，而且从整体上考虑，本书的编写也符合我国能源发展的战略目标。本书的编写也符合我国能源发展的战略目标。本书的编写也符合我国能源发展的战略目标。

# 燃气轮机与燃气—蒸汽

# 联合循环装置

上

清华大学热能工程系动力机械与工程研究所  
深圳南山热电股份有限公司

编著

清华大学热能工程系动力机械与工程研究所  
深圳南山热电股份有限公司  
赵士杭 段秋型 编写  
2007年8月第1版  
ISBN 958-7-5083-2400-5

1. 燃气—蒸汽联合循环装置  
I. 燃... II. 赵... III. 段... IV. 燃...  
TM611.31  
中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第040283号

中国电力出版社出版  
地址：北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn

中国电力出版社  
各新华书店均有代售

2007年8月第1版  
2007年8月北京第1次印刷  
787毫米×1092毫米 1/32开本 50.875印张 12.9千字  
印数0001—3000册 定价38.00元(上、下册)



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

本社地址：北京三里河路6号 100044  
电话：010-63411240 010-63411241 010-63411242  
010-63411243 010-63411244 010-63411245  
010-63411246 010-63411247 010-63411248  
010-63411249 010-63411250 010-63411251  
010-63411252 010-63411253 010-63411254  
010-63411255 010-63411256 010-63411257  
010-63411258 010-63411259 010-63411260

## 内 容 提 要

本书是一本全面介绍燃气轮机及其联合循环装置的著作,书中既有理论讲解又对现场操作具有很强的指导性。编写本书的主要目的是为了培养燃气轮机及其联合循环机组的运行和管理人员,并为设计研究人员提供深入学习设计、研究知识前的理论基础。全书共分二十五章,前十三章侧重于介绍燃气轮机的工作原理、性能、结构、调节控制系统以及某些必要的辅助设备和系统,后十二章则侧重于有关联合循环方面的工作原理、余热锅炉、汽轮机、轴系布置、技术经济分析等的论述。为了增强实用性,本书特别加强了对燃气轮机辅助设备和系统、燃气轮机和联合循环的调节控制系统、大型燃气轮机结构、联合循环电厂的应用实例、燃气轮机和联合循环机组的运行维护及联合循环机组的性能验收试验等内容的论述。

本书可供从事能源、发电工程、燃气轮机及燃气—蒸汽联合循环发电装置的科研、管理、运行、生产的工程技术人员和大专院校的师生阅读参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

燃气轮机与燃气—蒸汽联合循环装置/清华大学热能工程系动力机械与工程研究所,深圳南山热电股份有限公司编著. —北京:中国电力出版社,2007

ISBN 978-7-5083-5400-2

I. 燃… II. ①清…②深… III. ①燃气轮机②燃气—蒸汽联合循环发电—联合动力装置 IV. TK47 TM611.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 040583 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 50.875 印张 1545 千字

印数 0001—3000 册 定价 98.00 元 (上、下册)

### 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

# 《燃气轮机与燃气—蒸汽联合循环装置》

## 编写委员会

主任 焦树建

副主任 孙守林 张艳春

编委 (按姓氏笔画排序)

王存诚 叶大均 叶季生 吕泽华

李宇红 何光新 张晓泓 张旋洲

赵士杭 段秋生 索沂生 舒士甄

熊绍振

北京人民邮电出版社  
1995年10月第1版  
1995年10月第1次印刷

燃气轮机与燃气—蒸汽联合循环装置，按燃料分有天然气和液化石油气、煤和其  
不同燃料的热值可从 12.2 ~ 116MJ/

# 前言

随着我国天然气“西气东输”工程的建设以及广东和福建等省从国外引进相当数量的液化天然气现实的推动,燃气轮机及其联合循环在我国电力工业中的应用正蓬勃发展,方兴未艾。

为了适应这个形势的需要,在国家发展和改革委员会的领导下,通过中国技术进出口总公司的组织,按照以“市场换技术”的方针,就20多个燃气轮机电厂的建设项目,实施了第一批和后续项目捆绑招标工作,为我国引进了40多台FA型和E型燃气轮机及其联合循环机组的设备,以及相应的燃气轮机制造技术。这个举措大大地加快了我国建设燃气轮机及其联合循环电厂和重建我国燃气轮机制造业的步伐。

为此,我国正面临着急需培养大批燃气轮机及其联合循环机组运行、管理人员的任务,力求他们能够在较短的时间内,充分掌握机组的原理、性能、结构、系统、运行和维护知识,以便全面承担起机组安全和经济运行的任务。

本书正是为此目的而编写的。本书尽可能结合我国目前引进和联合制造的先进的FA与E型机组的实际,着重介绍重型结构的发电用燃气轮机及其联合循环机组的工作原理、性能、结构、调节控制系统以及某些必要的辅助设备和系统,力争使读者能够获得比较完整的有关燃气轮机及其联合循环机组工作的物理概念。当然,本书也能为从事研究和设计工作的人员服务,他们在掌握了本书提供的物理概念和理论基础知识后,就能顺利地进行有关机组设计计算和试验研究方面的专门训练。

本书共二十五章,前三十三章侧重于介绍燃气轮机本体方面的知识,后十二章则侧重于有关联合循环方面的讨论。为了增强实用性,本书特别加强了对燃气轮机辅助设备和系统,燃气轮机和联合循环装置的调节和控制系统,大型燃气轮机的结构,联合循环电厂的应用实例,燃气轮机和联合循环机组的运行、维护、检修以及性能验收试验等内容的论述。总体内容比较广泛,论述力求深入浅出,理论联系实际,希望便于读者接受。

本书由清华大学热能工程系动力机械与工程研究所组织本所教师和深圳南山热电股份有限公司经验丰富的技术专家合作编写而成。本书的编写分工如下:焦树建编写了第一章、第八章的第九节、十四章、十五章的一至十一节、十七章、二十一章、二十三至二十五章;索沂生编写了第二、三章和十五章中的十二节;叶季生编写了第四章;王存诚编写了第五、十三章;舒士甄编写了第六章;赵士杭编写了第七、十八章和第八章的一至八节;张艳春编写了第九章的第一至九节;何光新编写了第九章的第十节和十一节;段秋生编写了第十章;吕泽华编写了第十一章;李宇红编写了第十二和二十章;叶大均和张晓泓编写了第十六章;熊绍振编写了第十九章;张晓泓、金晓刚、吴成林编写了第二十二章。吕泽华参加了第十九章的部分编写;张旋洲参加了第二十二章的部分编写工作。

全书由张艳春和张晓泓同志负责协调和汇总;由焦树建、张晓泓、张艳春和孙竹林同志负责审稿。编写中我们参阅了大量国内外相关单位的学术著作、论文和工作报告,甚至引用或介绍了他们的论述和观点,在此特致感谢。

由于我们的理论水平和实践经验不足,出版时间又甚紧,书中难免有不少缺陷或不足之处,恳请广大读者批评指正。

清华大学热能工程系动力机械与工程研究所

深圳南山热电股份有限公司

2007年6月于北京

## 前言

第一章 概论	1
第一节 概述	1
第二节 目前我国发展燃气轮机及其联合循环的现实条件	4
第三节 燃气轮机及其联合循环机组的生产与使用现状	7
本章小结	10
第二章 热工基础知识	11
第一节 概述	11
第二节 工程热力学基础	11
第三节 流体力学基础	24
第四节 传热学基础	36
本章小结	39
第三章 燃气轮机热力循环	41
第一节 概述	41
第二节 理想简单循环	41
第三节 实际简单循环	43
第四节 回热循环	47
第五节 复杂循环	49
第六节 闭式循环	53
本章小结	54
第四章 压气机工作原理	55
第一节 概述	55
第二节 压气机级的工作原理	57
第三节 压气机叶栅的几何参数与叶片扭转规律	66
第四节 压气机工作过程的特点	67
第五节 压气机级中的能量损失	73
第六节 压气机变工况及特性曲线	77
第七节 压气机的喘振及防喘措施	83
本章小结	91
第五章 燃烧室工作原理与结构	96
第一节 概述	96
第二节 燃烧过程的热力学基本原理	97

第三节 燃烧过程的物理—化学原理概要	100
第四节 燃气轮机燃烧室的工作特点和性能指标	108
第五节 燃烧过程在燃烧室中的实现(气流组织和燃料供给)	109
第六节 燃烧室的变工况性能	112
第七节 燃烧室的结构和部件	114
第八节 低污染燃烧技术	124
本章小结	135
第六章 透平工作原理	137
第一节 概述	137
第二节 透平级的工作原理	138
第三节 多级透平	151
第四节 透平变工况及性能曲线	156
第五节 轴流式透平与轴流式压气机的比较	166
本章小结	170
第七章 燃气轮机变工况	173
第一节 概述	173
第二节 单轴燃气轮机的变工况性能	173
第三节 分轴燃气轮机的变工况性能	175
第四节 双轴燃气轮机的变工况性能	177
第五节 其他燃气轮机的变工况性能	179
第六节 变几何的影响	180
第七节 部件性能恶化与进排气压力损失的影响	181
第八节 大气参数变化的影响	183
第九节 燃气轮机带动压缩机时的平衡运行	184
第十节 燃气轮机的加载与减载	185
第十一节 燃气轮机的启动与停机	187
本章小结	191
第八章 燃气轮机结构	192
第一节 概述	192
第二节 结构要求与类型	192

第三节	压气机结构、气封与材料	197	第十六节	水冲洗系统	343
第四节	透平结构、冷却与材料	205	第十七节	进气与排气系统	347
第五节	转子的连接与支撑	217	第十八节	蒸汽喷射系统	351
第六节	轴承与轴承座	219	第十九节	高压二氧化碳灭火系统	356
第七节	燃气轮机的固定与总体布置	226	第二十节	通风和加热系统	361
第八节	航机改型的燃气轮机	231	第二十一节	启动系统与设备(含 SFC)	364
第九节	某些大型燃气轮机的结构简介	235	本章小结		387
本章小结		254	<b>第十一章 燃气轮机控制系统</b>		390
<b>第九章 燃气轮机零部件运行安全性分析</b>		255	第一节	概述	390
第一节	概述	255	第二节	转速控制系统	393
第二节	机械振动的基础知识	255	第三节	温度控制系统	400
第三节	叶片激振力及频率计算	261	第四节	控制系统的动态特性	403
第四节	叶轮热应力及转子寿命管理	266	第五节	分轴燃气轮机调节的特点	409
第五节	转子振动的基本特征	274	第六节	输气管线用燃气轮机压缩机组的控制系统	413
第六节	转子的临界转速计算	277	第七节	燃气轮机发电机组的控制系统与实例	416
第七节	影响转子临界转速的因素	280	第八节	燃气轮机发电机组的保护系统与实例	419
第八节	转子的平衡	283	本章小结		422
第九节	转子在线监测与故障诊断技术简介	288	<b>第十二章 燃气轮机进气冷却和 LNG 的冷能利用</b>		423
第十节	轴系的扭振与稳定性	295	第一节	概述	423
第十一节	电厂的可靠性管理	296	第二节	燃气轮机进气冷却的基本原理和装置特点	423
本章小结		298	第三节	进气冷却的热工基础	427
<b>第十章 联合循环辅助系统与设备</b>		300	第四节	燃气轮机进气冷却技术的应用	432
第一节	概述	300	第五节	液化天然气(LNG)的冷能利用	433
第二节	启动机的类型	301	第六节	LNG 冷能在燃气轮机电厂中的利用	436
第三节	液力变扭器	302	本章小结		440
第四节	辅机传动与辅助齿轮箱	305	<b>第十三章 燃气轮机用润滑油与燃料的质量规范</b>		441
第五节	负荷齿轮箱及 3S 离合器	306	第一节	概述	441
第六节	启动离合器	309	第二节	燃气轮机用润滑油	441
第七节	盘车装置	310	第三节	燃气轮机用液体燃料	451
第八节	润滑油系统	312	第四节	燃气轮机用气体燃料	464
第九节	液压油供给系统	316	本章小结		481
第十节	进口可转导叶系统	317			
第十一节	燃料系统	322			
第十二节	跳闸油系统	332			
第十三节	雾化空气系统	335			
第十四节	冷却水系统	337			
第十五节	冷却空气与密封空气系统	339			

<b>第十四章 常规余热锅炉型燃气—蒸汽联合循环性能的理论分析</b> ..... 483	<b>第五节 汽轮机的运行特性</b> ..... 558
第一节 概述..... 483	<b>第六节 热电联供汽轮机的特点</b> ..... 559
第二节 热效率与功率比计算关系式的推导..... 483	<b>本章小结</b> ..... 564
第三节 各种参数的选择..... 487	<b>第十七章 联合循环机组轴系布置方案的分析</b> ..... 565
第四节 各种参数对 $\eta_{\text{cct}}$ 和 $\eta_{\text{cc}}$ 的影响..... 489	第一节 概述..... 565
第五节 补燃式和非补燃式联合循环特性的比较..... 491	第二节 联合循环机组的多轴布置方案..... 565
第六节 计算实例..... 493	第三节 联合循环机组的单轴布置方案..... 567
第七节 某些重要的推论..... 502	<b>本章小结</b> ..... 570
<b>本章小结</b> ..... 504	<b>第十八章 联合循环机组的变工况</b> ..... 571
<b>第十五章 联合循环中使用的余热锅炉</b> ..... 505	第一节 概述..... 571
第一节 概述..... 505	第二节 联合循环各组成部件的变工况性能..... 571
第二节 联合循环用余热锅炉的特点..... 507	第三节 蒸汽侧的滑压运行方式..... 573
第三节 余热锅炉的型式与分类..... 509	第四节 压气机进口导叶的调节规律..... 574
第四节 节点温差与接近点温差的选择..... 511	第五节 多压汽水系统的联合循环变工况..... 576
第五节 余热锅炉的汽水系统..... 514	第六节 多台燃气轮机组成的联合循环变工况..... 577
第六节 余热锅炉蒸汽参数的优化选择..... 518	第七节 大气参数变化的影响..... 578
第七节 装备多压力级余热锅炉的联合循环性能的比较..... 522	第八节 联合循环机组的启动与加载..... 580
第八节 余热锅炉的变工况特性..... 527	第九节 联合循环机组的减载与停机..... 583
第九节 余热锅炉的结构..... 528	<b>本章小结</b> ..... 584
第十节 设计余热锅炉时必须考虑的若干问题..... 532	<b>第十九章 联合循环控制系统</b> ..... 586
第十一节 余热锅炉停备用时的保养方法..... 535	第一节 概述..... 586
第十二节 余热锅炉的设计计算..... 536	第二节 集散控制系统的一般组成..... 587
<b>本章小结</b> ..... 544	第三节 两种常用的 DCS 系统简介..... 588
<b>第十六章 联合循环中使用的汽轮机</b> ..... 546	第四节 联合循环电厂中使用的 DCS 控制系统..... 598
第一节 概述..... 546	第五节 联合循环电厂控制系统的实例..... 604
第二节 蒸汽参数选择及热力系统设计..... 547	<b>本章小结</b> ..... 605
第三节 汽轮机的设计特点..... 552	<b>第二十章 联合循环机组的热电联产</b> ..... 606
第四节 汽轮机的结构特点..... 554	第一节 概述..... 606
	第二节 热电联产系统的主要性能



参数.....	607	第一节 概述.....	734
第三节 典型的燃气—蒸汽联合循		第二节 验收试验的内容与试验条件	
环热电联产系统.....	610	的规定.....	735
第四节 典型联合循环热电联产系		第三节 如何保持基本负荷工况试验	
统的性能分析.....	617	时 $T_{30} = \text{const}$ .....	737
第五节 热电冷联供系统的性能分		第四节 测点的布置与测量表计准确	
析简述.....	627	度的选择.....	739
本章小结.....	628	第五节 验收试验数据的修正.....	744
第二十一章 联合循环机组的应用实例.....	629	第六节 多轴布置方式联合循环的性	
第一节 概述.....	629	能修正与性能未达标责任的	
第二节 香港龙鼓滩发电厂(Black Point		辨识.....	749
Power Station) .....	629	第七节 单轴布置方式的、无 3S 联轴	
第三节 韩国 Seoinchon 发电厂 .....	631	器的联合循环的性能修正与	
第四节 英国 King's Lynn 电厂.....	634	性能未达标责任的辨识.....	751
第五节 葡萄牙 Tapada Do Outeiro		第八节 为保证验收试验成功尚需	
电厂.....	638	关切的若干问题.....	751
第六节 英国 Seabank 电厂.....	644	本章小结.....	752
第七节 日本东新泻电厂.....	653	第二十四章 燃气—蒸汽联合循环电厂	
第八节 英国 Rocksavage 电厂 .....	655	发电成本的计算.....	754
第九节 Nossener Brücke 燃气轮机		第一节 概述.....	754
地区供热厂.....	657	第二节 发电成本的两种计算方法.....	755
第十节 赫尔辛基 Vuosarri B 燃气轮机		第三节 燃气—蒸汽联合循环电厂的	
热电厂.....	659	发电成本.....	758
第十一节 上海宝钢燃用高炉煤气的热		第四节 用三种不同机组作调峰运行时	
电联产联合循环电厂.....	661	技术经济特性指标的比较.....	764
第十二节 荷兰 Buggenum IGCC 示范		第五节 E 型和 F 型燃气—蒸汽联合	
电厂.....	664	循环电厂技术经济特性指	
第十三节 我国镇海发电厂.....	669	标的比较.....	765
第十四节 我国深圳南山热电厂.....	671	第六节 几种火力发电厂发电成本的	
本章小结.....	679	特点.....	770
第二十二章 联合循环机组的运行与维护.....	680	本章小结.....	772
第一节 概述.....	680	第二十五章 联合循环的发展趋势与	
第二节 燃气轮机的运行.....	680	展望.....	774
第三节 燃气轮机日常检查与维护.....	691	第一节 概述.....	774
第四节 燃气轮机事故及处理.....	696	第二节 燃用天然气和液体燃料的联	
第五节 燃气轮机的检修.....	703	合循环机组的发展趋势.....	774
第六节 余热锅炉的运行与维护.....	721	第三节 燃煤的燃气—蒸汽联合循环	
本章小结.....	733	机组的发展趋势.....	780
第二十三章 联合循环机组热力性能的		本章小结.....	791
验收试验.....	734	参考文献.....	792

# 第一章

## 概论<sup>[1]</sup>

### 第一节 概述

众所周知,一个国家的经济实力和水平与这个国家占有的能源资源及其利用情况密切相关,而把能源资源转化为电能,则是能源利用工作中最为重要的手段,因而电力工业的发展标志着—个国家的发达程度。

自1979年我国执行改革开放政策以来,国民经济一直持续发展,人民的生活水平明显改善。到2003年底我国国民生产总值达到11.67万亿元,按现汇率计算,人均国内生产总值突破了1000美元,跨上了一个重要的台阶。2006年底我国电力系统实际达到的装机容量为6.22亿千瓦,但人均发电量还不及2200kW·h。显然,这与我国是一个能源生产和消费大国的地位极不相称,特别是无法满足国民经济飞速发展的需要,甚至已成为制约经济发展的重要因素。因此,优先发展能源产业,其中包括电力工业,必将是我国一项长期的战略任务。

长期以来,我国的能源结构以煤为主,它决定了煤炭在我国发电能源结构中的地位。据预测:即使到2030年,燃煤电站占我国发电总装机容量的比例仍将高达58.5%,发电量则占65.7%。由此可见,煤电仍然是我国电力工业的主导。但是从环保的角度看,煤电的污染排放(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>)问题非常严重,至今尚未获得有效的控制,这已成为我国电力工业实施可持续发展战略的“瓶颈”环节。因此除了发展燃煤电站的环保装置(FGD、DE-NO<sub>x</sub>)外,还必须发展洁净煤发电技术,并有条件地调整我国的能源结构,即:用优质的清洁能源——例如天然气,来替换部分发电用的燃煤。燃烧天然气的燃气轮机及其联合循环发电机组则是目前提高能源资源的利用效率,并相当彻底地解决环境污染问题的首选技术。

众所周知,燃气轮机是从20世纪50年代开始逐渐登上发电工业舞台的<sup>[1]</sup>。但是由于当时的单机容量小,热效率又比较低,因而在电力系统中只能作为紧急备用电源和调峰机组使用。1960年左右,欧美的大电网都曾发生过电网瞬时解列的大停电事故,这些事故促使人们认识到电网中有必要配备一定容量的燃气轮机发电机组,因为燃气轮机具有快速“无外电源启动”的特性,它能保证电网运行的安全性和可恢复性。欧美国家的经验表明:从安全和调峰的要求出发,在电网中安装功率份额为8%~12%的燃气轮机发电机组是必要的。

80年代以后,由于燃气轮机的单机功率和热效率都有很大程度的提高,特别是燃气—蒸汽联合循环机组渐趋成熟,再加上世界范围内天然气资源的进一步开发,燃气轮机及其联合循环机组在世界电力系统中的地位发生了明显的变化,它们不仅可以用作紧急备用电源和尖峰负荷机组,而且还能携带基本负荷和中间负荷。

表1-1和表1-2给出了目前已经生产的燃气轮机及其联合循环机组的性能参数。由此可见,燃气轮

表 1-1

某些典型的燃气轮机发电机组的性能参数<sup>[2]</sup>

公司名称	机组型号	ISO 基本功率 (MW)	压 比	燃气初温 (°C)	供电效率 (%)	单位售价 (美元/kW)
GE 发电	PG9231 (EC)	169.1	14.0		35.20	160
	PG9351 (FA)	255.6	17.0	1288	37.00	160

续表

公司名称	机组型号	ISO 基本功率 (MW)	压 比	燃气初温 (°C)	供电效率 (%)	单位售价 (美元/kW)
Alstom	GT13E2	165.1	14.6	1260	35.69	166
	GT26	263.0	32.0	1167/1245	37.00	148
Siemens (KWU)	V64.3A	67.4	15.8	1310	34.93	236
	V84.3A	180.0	16.6	1310	38.00	170
	V94.3A	265.9	17.0	1310	38.60	159
三菱	M701F	270.3	17.0	1349	38.21	160
	M701G	334.0	21.0	1427	39.54	165
GE 船用与工业	LM6000-PD	41.12	29.4	1160	40.67	296
R—R 公司	Trent 60	51.50	33.0		41.92	299
普惠	FT8	25.49	19.3	1121	38.56	382

表 1-2 某些联合循环发电机组的性能参数<sup>[2]</sup>

公司名称	机组型号	ISO 基本功率 (MW)	供电效率 (%)	所配燃气轮机的情况	单位售价 (美元/kW)
GE 发电	S109EC	259.3	54.0	1 台 MS9001EC	354
	S109FA	390.0	56.7	1 台 MS9001FA	306
	S209FA	786.9	57.1	2 台 MS9001FA	341
Alstom	KA13E2-2	480.0	52.9	2 台 GT13E2, 三压蒸汽轮机	332
	KA13E2-3	720.0	52.9	3 台 GT13E2, 三压蒸汽轮机	360
	KA26-1	392.5	56.3	1 台 GT26	446
Siemens (KWU)	GUDI. 94. 2	239.4	52.2	1 台 V94. 2	348
	GUDI S. 94. 3A	392.2	57.4	1 台 V94. 3A	396
三菱	MPCP1 (M701F)	397.7	57.0	1 台 M701F	295
	MPCP2 (M701F)	799.6	57.3	2 台 M701F	396
	MPCP1 (701G)	489.3	58.7	1 台 M701G	

机的单机功率已经超过 334MW, 热效率已达 35%~41.92%; 而联合循环机组的单机功率已达到 489.3MW, 热效率已超过 58.7% (在 2005 年已提高到 60%)。显然, 从热力性能的角度看, 它们完全可以承担基本负荷, 而且比超超临界参数的燃煤蒸汽轮机电站还要优越。

总的来说, 燃气—蒸汽联合循环具有以下一些优点: ①供电效率远远超过燃煤的蒸汽轮机电站; ②在国外, 交钥匙工程的比投资费用约为 500~600 美元/kW, 它要比带有 FGD 的燃煤蒸汽轮机电站 (1100~1400 美元/kW) 低很多; ③建设周期短, 可以按“分阶段建设方针”建厂, 资金利用最有效; ④用地和用水都比较少; ⑤运行高度自动化, 每天都能启停; ⑥运行的可用率高达 85%~95%; ⑦便于快速无外电源启动; ⑧由于采用天然气或液体燃料, 污染排放问题解决得很彻底, 一般无飞尘, SO<sub>x</sub> 和 NO<sub>x</sub> 都很少, 特别是在燃烧天然气时, 还可以大大地减少 CO<sub>2</sub> 的排放量, 如表 1-3 所示。当然, 解决污染问题的功劳应归之于所用的洁净燃料的特性。

表 1-3 燃用不同燃料时热力发电厂的 CO<sub>2</sub> 排放情况

项目	燃 料		燃 烧		发 电		
	燃料含碳量 (kg/GJ)	相对值 (%)	燃烧产 CO <sub>2</sub> 量 (kg/GJ)	相对值 (%)	发电效率 (%)	发电 CO <sub>2</sub> 排放量 [kg/(MW·h)]	相对值 (%)
木材	27.3	112	100	112	35	1030	124

续表

项目 燃料种类	燃 料		燃 烧		发 电		
	燃料含碳量 (kg/GJ)	相对值 (%)	燃烧产 CO <sub>2</sub> 量 (kg/GJ)	相对值 (%)	发电效率 (%)	发电 CO <sub>2</sub> 排放量 [kg/(MW·h)]	相对值 (%)
褐煤	26.2	108	96	108	37	935	113
烟煤	24.5	100	90	100	39 45*	829 718	100 87
重油	20.0	82	74	82	39	753	91
原油	19.0	78	70	78	39	716	87
天然气	13.8	56	51	56	40 50**	507 405	61 49

\* 近期采用超超临界参数的蒸汽轮机发电机组时。

\*\* 采用燃气—蒸汽联合循环机组发电时。

综上所述可以看出：在燃烧天然气或液体燃料的前提下，无论在供电效率、比投资费用、发电成本、污染排放量以及运行维护的可靠性方面，燃气—蒸汽联合循环发电方式都要比有 FGD 的燃煤蒸汽电站优越。因而它越来越受到人们的青睐，在世界的发电容量中所占的份额更是明显地快速增长。事实也正是如此：自 20 世纪 70 年代的能源危机以来，美国和西欧的一些政府都开始鼓励电力工业使用天然气，据不完全统计，到 1990 年底，全世界已经投入运行的烧天然气的联合循环发电机组的总功率为 14019MW，在 1991~1996 年之间，投入运行的这种新机组容量之总和不会低于 27400MW。而目前烧油和烧天然气的联合循环的装机容量则已高达 400GW。

然而，燃气—蒸汽联合循环毕竟是以烧天然气或液体燃料为前提的，它是否也能燃用常规的固体燃料——煤呢？假如可以的话，这将为燃气—蒸汽联合循环开辟一条崭新的发展道路。为了实现这个理想，从上世纪 70 年代开始人们就致力于研究开发燃煤的燃气—蒸汽联合循环的各种方案，其中有一个“整体煤气化燃气—蒸汽联合循环”方案（简称 IGCC），它的设计思想是：使煤在高压、高强度、高效率的气化炉中气化成成为中热值煤气或低热值煤气，进而通过洗涤和脱硫处理，把煤气中的微尘、硫化物、碱金属等杂质清除干净，最后，把洁净的人造煤气输送到燃气—蒸汽联合循环中去燃烧做功。显然，这种方案的供电效率一定会比烧天然气的联合循环机组低一些，因为在人造煤气的制备过程中必然要损失一部分热能，同时还会增大电站的厂用电消耗。但是，只要设计得当，IGCC 的供电效率在 21 世纪初期就能做到 45%，预计在 2010 年后可以提高到 50%~52%<sup>[3]</sup>，即要远远地高于超超临界参数的燃煤蒸汽轮电站期望实现的效率指标。其污染排放量则是各种洁净煤发电技术中最低者之一（它只有 NSPS 标准中规定的极限排放量的 10%~30%），完全能够满足 21 世纪内日益严格的环保质量的要求。目前，IGCC 的单机容量已经做到 300MW 等级，可以适应规模经济的需要，运行可用率则与常规的燃煤蒸汽轮电站相仿。主要缺陷则是比投资费用比较高，预计到 2010 年后才有可能下降到 1000 美元/kW 的水平。

此外，近年来随着全球范围内的能源与动力需求结构，特别是电力系统的放松控制以及环境保护等要求的变化，一种以中、小型和微型燃气轮机为核心的分布式能源系统和电源装置正迅猛崛起，大有与大、中型燃气轮机共占市场的趋势。这种发、供电方式具有以下一些优点和特点<sup>[4]</sup>：它没有或具有很低的输配电损耗（对于集中供电方式而言，这种损耗至少高达 10% 左右，在我国甚至达到 15% 以上）；无需建设配电站，可以减少输配电成本；适合多种热电比的变化，可使系统根据热负荷或电负荷的需求进行灵活的调节，有利于提高设备的利用率；便于近距离地向用户供热和制冷，无需建立昂贵的输送管网，因而既能节省投资费用，又能充分提高能源的利用效率，土建和安装成本都能降低；各电站互相独立，便于自行控制，不会发生大规模的供电事故，因而供电的可靠性高，非常适宜于为商业区、居民区乃至机场和地铁站等提供电力、供热和制冷；在燃用清洁燃料的前提下，即使在人口稠密的城市地区，也能满足高标准环保质量的要求。显然，分布式供电、供热（甚至制冷）方式是集中供电、供热方式的

一种不可缺少的补充。这是目前世界电力工业中出现的一个由传统的集中供电和供热模式,向着依靠大型和中、小型发电站广泛结合的分布式电力系统模式过渡的新趋势。这将为中、小型和微型燃气轮机在电力工业中的推广应用,提供一个崭新的机遇和市场。

总之,通过以上的综述和分析,不难看出:在今后世界电力工业的发展历程中,不论是烧天然气、液体燃料还是固体燃料——煤,开发大容量的、高效率的燃气轮机及其联合循环是一个必然的趋势,它既能节省世界上日趋紧张的能源资源,又能保护环境。燃气轮机及其联合循环的发电机组必将成为世界电力工业中的一个重要组成部分,它的作用也将日益增强。

因而,可以毫不夸张地说:在世界范围的电力工业中,燃气轮机与燃气—蒸汽联合循环机组正在异军突起。

## 第二节 目前我国发展燃气轮机及其联合循环的现实条件

如前所述,燃气轮机及其联合循环已经成为世界电力工业的一个重要组成部分,并将获得飞速发展。显然,这一现实是以燃气轮机技术的日益成熟以及天然气和石油资源的广泛应用为后盾的。表 1-4 中给出了 1994 年世界主要国家中一次能源消费的构成情况。由此可见,在大多数工业发达国家的一次能源消费中,以“石油和天然气为主”则是一个显著的特点,这正是世界范围内燃气轮机及其联合循环发展的基础。

表 1-4

1994 年世界主要国家中一次能源消费的构成<sup>[5]</sup>

%

国别	项目	总消费 (Mtce)	石油	天然气	煤炭	核电	水电
美国		2898.00	39.8	26.3	24.3	8.6	1.0
中国		1227.37	17.4	1.9	75.0	0.4	5.3
俄罗斯		949.43	24.5	50.4	19.6	3.8	2.3
日本		683.57	56.2	11.3	17.1	14.7	1.3
德国		476.00	40.6	18.3	28.9	11.7	0.5
法国		331.43	39.0	11.9	6.1	40.0	3.0
加拿大		317.86	35.7	28.5	11.2	12.5	12.0
英国		311.14	37.7	28.2	23.2	10.6	0.3
印度		303.43	31.8	7.4	57.3	0.6	2.8
意大利		214.43	61.5	27.2	8.5	0	2.7
世界总计		11319.71	40.1	23.0	27.2	7.2	2.5

然而,我国却是一个在一次能源的消费中以煤为主的国家,如表 1-4 所示,1994 年煤炭占 75%,石油占 17.4%,天然气仅占 1.9%。也就是说,在目前我国是否存在一个急需发展燃气轮机及其联合循环的形势呢?而且我国是否具备向燃气轮机及其联合循环机组提供足够的天然气或液体燃料的条件呢?

我国的电力工业急需燃气轮机及其联合循环的现实是肯定的,因为目前我国缺电的局面还没有根本缓解,经济发达的东南沿海地区电力供需矛盾仍然比较突出,全国总体缺电容量约为 10%,而且许多地区电网的峰谷差相当大,急需启动快、调峰特性好、建设周期短的燃气轮机及其联合循环机组来适应建设发展的需要,特别是在某些沿海开放地区更是如此。因此近年来,在这些地区陆续引进了一批燃气轮机及其联合循环机组,例如:广东省(含深圳市)燃气轮机及其联合循环的总装机容量已经超过 4GW;海南省的总装机容量已接近 600MW;上海市已达 520MW;浙江省已经建成总量为 700MW 的烧重油的燃气—蒸汽联合循环电站等。这些都说明:我国的电力工业对燃气轮机及其联合循环是有所需求的,而且已经打破了我国过去长期实行的“发电设备只准烧煤”的燃料政策的限制。

环境保护政策的制订也为促进燃气轮机及其联合循环机组在我国的使用提供了机会。目前,因煤炭

的燃烧而造成的严重污染已经引起我国各界的关注。1995年8月29日我国政府公布了新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》，1996年3月7日则发布了《火电厂大气污染排放标准》。在有天然气资源的条件下，用燃气轮机及其联合循环机组来改造燃煤电站不仅是节约能源，更是改造中心城市环境污染最简捷的途径。例如：陕甘宁地区的天然气进京后，在北京地区合理地使用燃气轮机及其联合循环机组的问题已经提到日程上来了。又如，在某些地区（如兰州）已经开始着手用燃气轮机及其联合循环机组来改造燃煤旧电站，其原因就在于为了改变已经出现的、难于容忍的大气污染的恶劣情况。

显然，目前我国是否能够在电力工业中适当使用燃气轮机及其联合循环发电机组，主要取决于以下三个条件：①在近期或稍长的时间内，我国究竟能够提供多少天然气资源供发电工业使用？②如何合理地确定天然气的价格，使其发电成本能够与廉价的、污染严重的煤电相竞争？③从长远的观点看，我国是否能够为我国的电力工业提供自制的、优质而廉价的燃气轮机及其联合循环机组的硬件和消耗性热备件。

我国究竟有多少天然气资源？蕴储量究竟是丰富还是贫瘠？这个问题并未真正搞清楚。根据1994年油气资源评估表明，我国天然气资源量为38万亿 $m^3$ ，其中川渝、鄂尔多斯、柴达木、塔里木、莺歌海等10个含气盆地的天然气资源量为34万亿 $m^3$ ，又经过6年的勘探发现，上述五大气区的资源量有了较大幅度的增加。到2000年底，全国天然气的资源量已经增加到48万亿 $m^3$ ，其中五大气区为19.37万亿 $m^3$ ，占总资源量的41.2%。显然这是一个好兆头。但有一点是必须指出的：我国的产气区大多远离工业发达的地区，这就给输电或输气带来困难，它们都会提高燃气轮机及其联合循环机组的发电成本。当然，随着近海地区海洋天然气资源的逐渐开发（如接近上海的东海和接近海南岛的南海地区），有可能为燃气轮机发电行业的持续发展提供资源支持，例如：海南省有意利用南海的天然气资源（储量为3800亿 $m^3$ ）建立天然气发电基地，向广东地区输送，确实是一个值得鼓励的发展动向。此外，根据我国的能源规划<sup>[5]</sup>，东南沿海地区都将从邻国进口一部分液化天然气（LNG），作为补充能源，例如广东省的LNG工程已经启动，一期工程已于2005年建成并开始供气，2007年的供应量将达到325万t/a，二期工程的供应量将扩大到500万t/a。福建省也已决定从印尼引进200万t/a的LNG。此外，从俄罗斯引进管道输送天然气的谈判工作也在进行，它有可能为我国东北地区、环渤海地区和韩国提供200亿 $m^3/a$ 的管输天然气。这些情况都为我国电力工业应用天然气资源，发展以燃气轮机及其联合循环发电机组为核心的、清洁和高效的发电技术提供了物质基础。

必须指出：天然气的价格对于燃气轮机及其联合循环的发电成本有决定性的影响，因为在燃气轮机发电成本的三项组成部分——设备的折旧成本、机组的运行维护成本以及燃料成本中，燃料成本的比例将高达60%~65%，设法降低天然气的价格则是降低燃料成本的关键。

据国外的计算表明：同等容量的发电机组在分别燃烧天然气、LNG和煤时，它们各自的发电成本是有差别的，如表1-5所示。

表 1-5 几种类型发电站中发电成本的比较

项目	发电方式	燃油机组	烧管道天然气的联合循环机组	烧液化天然气的联合循环机组	烧煤粉的常规带FGD的机组	烧煤粉的常规不带FGD的机组
	电站规范（机组台数×功率，MW）		2×550	2×550	2×550	2×550
建设工期（工程开始到投产，a）		4	4	4	4	4
比投资费用（美元/kW）		860	510	510	1400	1160
负荷因数（%）		85	90	90	70	70
供电效率（%）		36.27	45.46*	45.46**	34.79	35.89
燃料价格（美元/kJ）		2.138~3.792	2.370	5.214***	1.232~1.866	1.232~1.896
发电成本 [美元/（MW·h）]						
其中	基本建设费	20.5	11.3	11.3	30.7	25.8

续表

发电方式		发电方式				
		燃油机组	烧管道天然气的联合循环机组	烧液化天然气的联合循环机组	烧煤粉的常规 FGD 的机组	烧煤粉的常规不带 FGD 的机组
其中	运行维护费	2.5	4.2	4.2	9.3	6.4
	规划费	30.1~53.5	29.5	64.8	16.6~25.5	16.2~20
	合计	53.1~76.5	45	80.3	56.6~65.5	48.4~52.2

\* 目前联合循环供电效率已达 56.5%。

\*\* 把液化天然气的设备费用都考虑到燃料费中去。

\*\*\* 1995 年美国管道输送的天然气的实价。

由表 1-5 中可以看出：当天然气的价格比较低廉时，燃用天然气的联合循环机组的发电成本要比同等功率的烧煤粉带 FGD 的机组低。

可是在我国情况适得其反，因为在我国同等热量的煤的价格要比同等热量的天然气价格低很多，这就为在我国扩大使用烧天然气的燃气轮机发电机组带来了障碍。

我国的天然气价格要为国外的 1 倍以上。究其原因：我国气田分布得比较分散，开采成本较高，再加上产气地段远离工业发达的使用区，输运容量比较小、距离又远，没能按规模经济方式运行。加上我国气与煤的价格比不合理（美国的气与煤的价格比为 2:1，我国则为 4:1），电价中又不全面考虑清洁燃料发电与脏煤发电的差异，这对于天然气发电和洁净发电技术的推广极其不利。此外，由于目前我国的天然气行业是垄断性的，在价格管理上仍然存在较大幅度的降价空间。据初步测算：在我国只有把天然气价格降低到 1.0 元/m<sup>3</sup> 以下时，天然气发电才能与煤电竞争。因而天然气的价格已经成为我国是否能够进一步发展以烧天然气的燃气—蒸汽联合循环为代表的清洁发电技术的关键。当然，这个问题必须由国家统筹解决。

我国天然气“西气东输”工程的建设以及广东省液化天然气工程的实施，更加奠定了我国较大规模地建设燃气轮机及其联合循环电站的决心。

为了配合这两大工程的建设，我国原国家计委于 2001 年 10 月发布了《燃气轮机产业发展和技术引进工作实施意见》，此后，又于 2004 年发布了 428 号文，委托中国技术进出口总公司，按照市场换技术的方针，就 17 个燃气轮机电站建设项目实施捆绑招标，为我国引进了 PG9351FA、M701F 和 V94.3A 燃气轮机的部分制造技术和 40 多台燃气轮机及其联合循环机组的设备。这个举措大大地加快了我国建设燃气轮机及其联合循环电站以及重建我国燃气轮机制造业的步伐。

目前，第一批 23 台机组的招标工作已经完成，合同已经生效并开始执行，有些机组已经投运。第二批 16 台机组的招标工作也已结束。显然，我国机械工业部门和电力工业部门面临的艰巨任务是：

(1) 按照合同规定的工程进度，哈尔滨动力设备股份有限公司、东方电气集团公司和上海电气（集团）总公司必须与美国 GE 动力公司、日本三菱重工业株式会社和德国 Siemens 股份公司合作，按时、按质地完成 40 多台套 PG9351FA、M701F 和 V94.3A 燃气轮机及其联合循环机组的制造任务，以便向我国 17 个电站提供全套设备。与此同时，上述三大制造厂应逐渐完成设备和工艺的改造，达到并提高合同规定的机组制造的本地化率，完成对上述三种机组制造技术的消化和吸收工作。

(2) 积极组织对 40 多台机组的安装、调试与性能验收工作，使它们按计划投入商业运行。

(3) 迅速组织运行人员的培训工作，使他们能充分了解机组的性能、结构和运行操作规程，以便参与机组的性能调试与验收工作，此后将全面承担起机组安全和经济运行的任务。

(4) 培训燃气轮机及其联合循环机组的设计研究人员，为今后进一步消化吸收机组的设计技术准备条件，以便重建我国燃气轮机的设计和研究体系。

如前所述，2010 年之前在我们建成一批燃用天然气的燃气—蒸汽联合循环电站的同时，我国还将引进 FA 型和 E 型燃气轮机的制造技术，机组制造的本地化率有望达到 70% 左右。这就是说“我国电

力系统中使用的燃气轮机类型将主要定位于 FA 型和 E 型这类大型高效的燃气轮机及其联合循环机组”。但是，由于在电力系统中燃气轮机所携带的负荷性质的不同，燃气轮机的类型和功率等级应该是多种多样的，在规划我国电力系统中应用燃气轮机及其联合循环时必须注意这个特点，防止“一刀切”。概括地说，电力系统中应该分别配备以下几种燃气轮机类型，而不只是限于几种大容量的机型<sup>[6]</sup>，即：

(1) 大型高效率的燃气—蒸汽联合循环型的机组。这种机组主要在电力系统中承担中间负荷和基本负荷。它的特点是功率大、效率高、在电网中能够长期地稳定运行，力求启停次数少，以保证机组的使用寿命和很高的可用率。但是这种机组的启动加载性能较差，即使安装有 3S 离合器，能使燃气轮机单独启动，在热态下从启动到加载至满负荷工况的耗时一般不少于 25min，即满足电网紧急需要的适应能力比较差。通常，在国外天然气价格比较低廉的情况下，只要有足够的年运行小时数，这种机组的发电成本会比燃煤的有 FGD 的蒸汽轮机电站低，因而在电力系统中的生存能力很强，它是燃煤电站的积极竞争者和替换者。目前，国外正在发展的 G 型和 H 型燃气轮机及其联合循环机组主要是为此目的而设计的。我国当前拟建的 23 台 F 级的联合循环电站原意也应以此为f目标，但由于我国天然气价格要比国外高很多，致使它的发电成本尚无法与环保质量差的煤电相竞争，因而只能作为两班制承担中间负荷和调峰任务的机组运行，力求以峰值电价来维持低额利润。

(2) 中型的、有快速启动和加载能力的燃气轮机。由于要求快速启动和加载，这种机组一般是航机改型的轻结构类型，功率等级比较小 (20~50MW)，要求能在 3~10min 之内完成从启动、加载至满负荷的全过程 (如 FT8 25~50MW 的机组，从冷机到满负荷的正常启动时间为 8min。快速启动时，带到满负荷的时间仅 3min；又如 GE 公司即将投产的 LMS100 100MW 的机组，从启动到满负荷的设计时间为 10min；再如川崎公司 GPS 系列备用型机组的启动时间为 42s)。这种机组主要在电力系统中承担快速启动和加载任务，以适应调峰负荷或处理电网紧急事故的需要。它并不刻意追求机组的效率 (当然若有高效率机组也是希望优选的)。

(3) 适用于分布式电站的热电联产型或热电冷三联供型的燃气轮机及其联合循环机组。这种机组的功率与分布式电站的使用场所密切相关。对于比较大的小区来说，单机功率可以达到 20~30MW；对于大型的机场来说，单机功率一般为 4~5MW；大型医院和商城则为数百千瓦等级；一般银行、旅社仅需数十千瓦等级，适宜选用微型燃气轮机系列的机组。对于分布式电站来说，特别侧重的是高效的能源利用效率。在热电联供的条件下，能源的利用效率可以达到 75% 以上；当采用热电冷联供时，则有望达到 80% 以上。与热电冷分供方案相比，三联供方案可以节省能源 42% 左右。应该说：采用热电冷联供的分布式电站方案可以使天然气资源获得最有效的利用。

此外，功率为数兆瓦的移动式电站 (卡车电站或列车电站) 也是电力工业中使用的一种燃气轮机类型。

总之，随着天然气资源的开发和应用，我国电力系统中必将逐渐增多对燃气轮机及其联合循环机组的使用，在电力系统中燃气轮机的类型不应该是单一的，而必须多样化。

国外的实践经验表明：为了确保整个电力系统的安全性，燃气轮机的总装机容量应占全电力系统总装机容量的 8%~12%。目前我国的比例仅为 2%~3%，因而在我国增大燃气轮机的使用量是急需的。

就国外的经验而言，一般天然气产量的 20% 用于发电，我国在近期内则有可能把这个比例提高到 40% 左右。

总之，我国燃气轮机工业正进入一个重建和复兴的阶段，燃气轮机及其联合循环机组在我国电力工业中的作用将逐渐增强。到 2030 年左右燃气轮机及其联合循环机组的装机容量有望达到全国发电设备总装机容量的 10% 左右，任重而道远，但发展的前景则是乐观的。

### 第三节 燃气轮机及其联合循环机组的生产与使用现状

目前，世界上能设计和生产重型燃气轮机的主导工厂只有 4 家，即美国的 GE 公司、德国的 Sie-



mens 公司、法国的 Alstom 公司和日本的三菱公司。原先美国的西屋公司也是生产燃气轮机的主要厂商,后来与德国的 Siemens 公司合并,其专利技术一部分归 Siemens 公司所有,另一部分则为日本三菱公司继承和发展,致使三菱公司取代了西屋公司的原有地位,而成为世界上具有独立设计和生产重型燃气轮机能力的四大厂商之一。这些公司既生产 50Hz 的燃气轮机发电机组,也同时生产 60Hz 的机组。它们生产的 50Hz 的简单循环燃气轮机的型号和性能参数如表 1-6 所示。由这些燃气轮机组成的联合循环机组的型号与性能参数如表 1-7 所示。

表 1-6 某些典型燃气轮机的型号与性能参数<sup>[7]</sup>

厂 商	型 号	第一台生 产年份	ISO 基荷 功率 (kW)	热耗率 (%)	热效率 (%)	压缩比	空气流量 (kg/s)	透平排气 温度 (°C)	比价 (美元/kW)
GE Power Systems	PG6581 (B)	1999	42100	11225	32.07	12.2	141.1	547.8	267
	PG6111 (FA)	2003	75900	10295	34.97	15.6	202.8	602.8	245
	PG9171 (E)	1992	126100	10653.5	33.79	12.6	417.8	542.8	165
	PG9231 (EC)	1994	169100	10310.7	34.92	14.0	508.0	556.1	160
	PG9351 (FA)	1996	255600	9756.9	36.90	17.0	640.5	602.2	160
	PG6591C	2003	42300	9925.7	36.27	19.0	117.0	569.4	266
Siemens Power Generation	PG9001H		292000	9113.5	39.50	23.0	685.0		
	W251B11/12	1982	49500	11022.7	32.66	15.3	175.1	513.9	250
	V64.3A	1996	67400	10305.4	34.93	15.8	191.9	582.8	236
	V94.2	1981	159400	10495.3	34.30	11.4	508.9	547.2	155
	V94.2A	1997	182300	10233.7	35.18	13.8	519.8	567.2	158
Mitsubishi Heavy Industries	V94.3A	1995	265900	93244.4	38.60	17.0	655.9	584.4	159
	M701DA	1981	144100	10347.6	34.80	14.0	440.9	542.2	155
	M701F	1992	270300	9419.4	38.20	17.0	650.9	586.1	160
	M701G	1997	271000	9303.3	38.70	21.0	737.1	587.2	165
Alstom	M701G2		334000	9102.9	39.50				
	GT8C2	1998	57000	10584.9	34.01	17.6	200.0	508	281
	GT13E2	1993	165100	10083.9	35.70	14.6	532.1	524	166
	GT26	1994	263000	9727.4	37.00	32.0	607.4	615	148

表 1-7 某些典型联合循环机组的型号与性能参数<sup>[7]</sup>

厂 商	型 号	第一台生 产年份	净功率 (kW)	热耗率 (%)	热效率 (%)	燃机功率 (kW)	汽轮机功率 (kW)	比 价 (美元/kW)	蒸汽循 环方式
GE Power Systems	S106B	1987	64300	7330.9	49.0	41600	23800	595	三压无再热
	S106C	2002	62800	6666.3	54.0	42200	21300		三压无再热
	S106FA	1991	118100	6582.0	54.7	75100	44000	713	三压再热
	S109E	1986	189200	6935.0	52.0	121600	70400	475	三压无再热
	S109EC	1994	259300	6661.1	54.0	166600	96600		三压再热
	S109FA	1994	390800	6349.9	56.7	254100	141800	354	三压再热
	S109FB	2002	412900	6202.2	58.0	266700	151720	359	三压再热
	S109H	1997	480000	6001.8	60.0			427	蒸汽冷却三 压再热