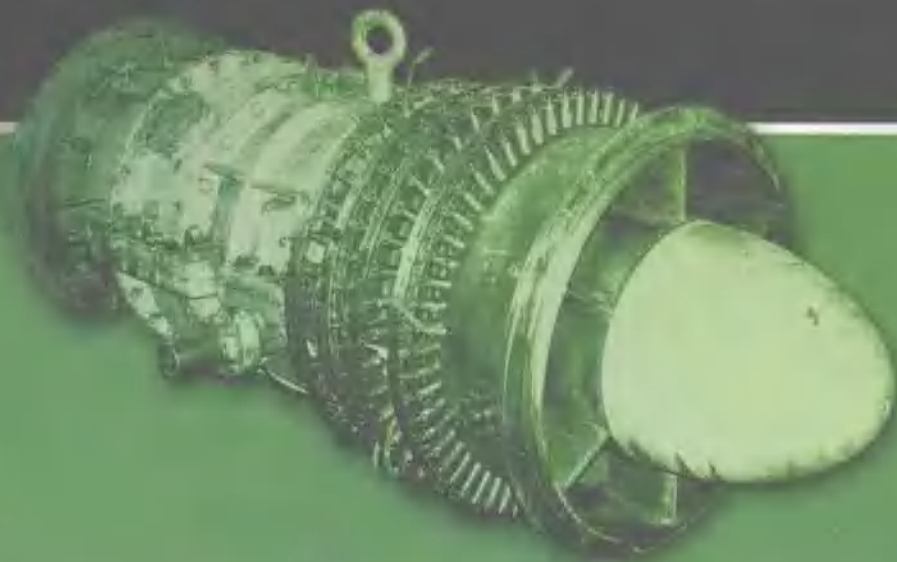




现代大功率 发电用燃气轮机

林公舒 杨道刚 编著

XIANDAI DAGONGLV FADIANYONG RANQI LUNJI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

现代大功率发电用燃气轮机

林公舒 杨道刚 编著



机械工业出版社

本书主要部分反映了作者数十年的工作经验。书中根据当前世界上不同公司生产的最新型号的大功率发电用燃气轮机(“FA”技术等级),阐述了燃气轮机的总体性能、本体结构、转子形式、低排放燃烧室、冷却系统、冷却叶片等主机关键部分,并对之进行了初步的归纳与分析。在总体设计、压气机、燃烧室等关键技术及性能试验,相关的辅助系统方面结合国内的发展经验作了比较全面的总结与分析。本书对制造厂、燃气轮机及联合循环电站等企业的技术、运行和管理人员以及有关科研机构、管理机构、电厂设计与高校的人员培训和学习有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

现代大功率发电用燃气轮机/林公舒,杨道刚编著. —北京:机械工业出版社, 2007.4

ISBN 978-7-111-21186-0

I. 现… II. ①林…②杨… III. 大功率—汽轮发电机 IV. TM311

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第037007号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:赵玲丽 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明 责任印制:李妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2007年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·24印张·593千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-21186-0

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68336294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

序

我们两个作者，距离太远，正值这两年我们都忙，而且最忙的周期不同，没有见面的时间；尽管现代化的通讯工具均被利用，但仍然影响在具体问题上的沟通。开始想各写各的序，我的“序”完成时，正值他最忙之际，我的合作伙伴回信说“有关序，就由你写吧，我没意见”。于是我的序就成为本书的序。

我的序本来包括两部分，第二部分“关于我国燃气轮机发展历史的一些要说的话”，初稿完成后，尊重出版社同志的意见删去了，只留下第一部分“关于本书”，如下：

编写本书的动机来自两方面：一方面是国内燃气轮机的需求与生产发展的需要，另一方面是相应科研发展的需要。从1997年或说是2003年开始，我国的燃气轮机的需求与生产又面临一个小起步，以后，整个国内燃气轮机事业可能又会出现一个高潮。为了迎接它，尽量抵消20年来人才断档的负面影响，希望本书能尽微薄之力。

20世纪80年代中期以前，国内曾经在从零开始的设计制造燃气轮机中，在国家对燃气轮机需要的高潮中，在工作人员忘我的有效劳动中，把与国外先进水平的差距拉近了10余年。在20世纪80年代初回忆这20年的历史，看出我们的步伐很快，成果的水平不低，具有独立发展的能力而不是什么都要靠外国的。这里的重点是试验台和试验，很多发展课题都是在相应试验台上做过试验的。80年代初，当川沪输气管线和青藏铁路决定停建和缓建时，国力的限制使得燃气轮机的科研在国外飞速发展的形势下，显出极大的反差，国内燃气轮机发展基本原地踏步。90年代，随着国家经济实力的逐步增强和认识的逐步深化，燃气轮机的发展也不同程度地反映到国家不同的科技发展规划中。尽管人们对它的发展热情很高，但总的说，数量众多的业内人士对在中国自己发展燃气轮机思想准备不足。究其根源是我国燃气轮机事业中理论战线不乏人才，但设计事业相对落后，许多人没有经历过燃气轮机设计过程，遇到具体问题设想很多，但定量的意见却与实际相差甚远，甚至发生了不能容忍的根本性的偏差，这个状态使燃气轮机的科研工作又差不多踏步了10年。新世纪开始的“打捆招标”同时提出了国产化与消化吸收这两方面既有联系又有所区别的任务，前者偏重于生产，后者则应更重视科研与研究。这两方面现在都与国外先进水平有很大的差距。由于这些年人才的断档，从事燃气轮机工作的人知识基础参差不齐，而目前现有书籍中内容偏向“古典”，现代燃气轮机的资料很少，这使得本书的内容向这方面倾斜。本书尽量从设计角度去理解资料，而不论述燃气轮机的设计，以给读者补充丢失的部分知识。

本书偏向实用，偏向现代机组，偏向消化吸收现有资料。我们常说，用户与管理人员了解燃气轮机必须了解它的设计；设计人员了解燃气轮机必须了解它的总体。本书试图从设计的眼光、从总体的角度去看一台燃气轮机，以给读者尽量多的燃气轮机总体的概念。这不仅仅是设计人员的需要，也是运行人员的需要。很明显，这并不是论述如何去进行总体设计，

更不涉及部件方面的偏向设计的内容，而是引导人们去认识燃气轮机。

本书主要是为制造厂及燃气轮机联合循环电站等企业内的技术人员、运行人员、管理人员以及有关设计科研机构、管理机构、电厂设计人员与高校的人员培训和学习使用的；对于设计与开发工程师（特别是“十一五”的863工作人员），本书只能提供思考问题的起点。本书希望使用者具有初步的不同深度的叶轮机机械基础知识和一定的实践经历，因此关于燃气轮机ABC方面的内容基本不予重复。

本书编写的初衷是按机组总体设计的系统为纲的，与过去的许多书特别是教科书的系统不同，全书总体中突出了现代燃气轮机的技术关键，即压气机模化加级、冷却系统与冷却叶片和低排放燃烧技术等，而各章节也只按它的需要重点突出一部分内容。这样写书，从效果看，能否达到需要填补空白的目的，是否更适合主要对象为各岗位工作人员的人群的需要，笔者企图作一些试。但深受过教科书影响的笔者在本书进行到大半时信心发生了动摇，怀疑这样写的书有没有人愿意看，感谢许多同行朋友徐润涛、商中福、高南兴、林璇、叶东平、李逢平等看了初稿后给予我的肯定与鼓励，与他们商讨的一些原则性的问题增加了我的信心。高南兴同志用特快专递寄来了30余条修改意见，条条正确，足见挚友之真情。但即使如此，我仍然没有充分的信心，只有等待出版之后让更多读者去评价了。

本书第1章首先介绍与分析了当前国际上最先进的“FA”技术等级的燃气轮机，并从这一角度概括了现代燃气轮机的主要特点，它们实际囊括了燃气轮机总体结构的所有流派。该章后半部还补充了一些涉及燃气轮机的一些专业的和非专业的知识，以作为全书没有系统交代基础知识的补偿。

第2章的总体热平衡计算突出了冷却空气量对热平衡计算的影响。

第3章为总体结构部分，首先围绕国内机组发展的阶段阐述主要结构要素与材料。现代阶段机组主要突出冷却系统，而冷却叶片部分则归第6章。

第4、5、6章为三大主要部件压气机、燃烧室、透平，各分别围绕上述重点编写，压气机部分围绕现代大功率燃气轮机压气机发展的需要，重点总结“模化加级”的发展方法与经验。对国外该等级压气机从总体角度进行了技术分析，提出压气机的发展指标；基本内容的一部分包含了数十年国内自己发展工作的体会。透平一章（包括第3章的许多部分）的主要内容以具有冷却系统的现代高温透平的结构为主；重点是围绕冷却叶片，以介绍与分析外国的产品技术为主，热力及气动部分包括与冷却系统的联算均未列入。燃烧室一章包括了燃烧室的作用、性能指标、工作原理、结构特点、燃料及其燃烧特性，燃烧室的设计调试方法和经验，低污染燃烧室的设计原理和几个典型的现代发电用燃气轮机燃烧室等，是比较全面论述的一章。这些是主机三大件章节的基本特点。

第7章从设计角度本应该放在最前面，但本书淡化了总体设计的内容，为了保持完整性仍然把主要内容在这一章中阐述。

空气系统和辅机系统是燃气轮机不可缺少的重要组成部分，这部分涉及面较广，国内的实践比较丰富。在第8、9两章中主要围绕主机总体对系统的要求编制，只有个别系统照顾实际需要深入到部件。一般的通用性较大的系统连系统部分也基本从简。

作为燃气轮机设计与生产中具有特色的一些问题如试验、验收、起动、噪声、点火、防爆等一系列专门问题。只把试验验收单列一章，其他穿插在各章节中处理。

本书第5章、第10章由杨道刚编写，其余章节由林公舒编写。

本书借用了许多由王乃井、王年臣、车景斌制作的图片；胡平、叶东平、薛恒、李建平、刘福绵等同志供给了一些图和资料。编写过程中，平路光、王志刚在计算机应用方面给予许多帮助，特此致谢。

书中有一些小段落的开头没有使用章节序号，而是使用了“◎”类型的标记，该标记是指其上一个层次下的叙述，但不是或不一定是上一层次问题展开后应包含的全部。连续的以同样的“◎”号开始的段落表示它们处于同一层次。而“◎”号下面的以“○”号开始的段落则表示更低一层次的内容。

本书（特别是第2章）中的一些符号与公式沿用了编者计算程序中的习惯，与一些教科书使用的不一定相同，但由于其中公式的目的主要是为了表示量之间的关系，不是为了直接用它进行计算，因此没有进行完善化。

由于编者水平有限，错误在所难免，希望广大读者批评指正。

林公舒

2007年1月于哈尔滨汽轮机厂有限责任公司

主要符号表

1. 一般符号

b	叶片弦长
f	燃料流量与空气流量之比
G	质量(重量)流量
H	总焓
h	单位流量的焓
i	压气机的模化比
k	喘振余度
l	叶高
n	转速(有时称物理转速)(r/min)
N	功率或功率的热当量
p	压力
Q	热量
q_g	冷却空气流量与压气机进口空气流量的比值 ($q_g = G_{cg}/G_c$)
t	摄氏温度($^{\circ}C$)
T	热力学温度(K)
u	圆周速度
Δ	差值
κ	等熵指数($\kappa = c_p/c_v$)
π	压比或膨胀比
η	效率

2. 部件的符号(部件符号应用在“一般符号”中、“下标”中或图形中,均表示以下的意义)

y	压气机
R	燃烧室
T	透平或燃气透平
GT	燃气轮机或燃气透平
ST	汽轮机
$HRSG$	余热锅炉

3. 上标

* 滞止参数的(在很多地方的滞止参数中“*”号

号省略)

4. 下标

a	燃气轮机机组进口截面
1	压气机进口截面
2	压气机出口截面
3	透平进口截面
4	透平出口截面
5	余热锅炉排气截面
0	表示参数的原始状态
cc	联合循环的
ch	喘振点的
d	电机的
e	表示装置的电端
f	辅机的
g	表示装置的联轴器端
s	等熵过程的终点参数;蒸汽的
t	透平的
w	水的
y	压气机的
z	轴向的

5. 第2章中,通过封闭界面能量的表示法:

Q_{air}	压气机进口空气总能量
$Q_{coolwater}$	冷却水总能量
Q_{fuel}	燃料总能量
Q_{flogas}	气体燃料总能量
Q_{gas}	燃气总能量
$Q_{nitrogen}$	注入氮气总能量
$Q_{outheat}$	对外散热总能量
$Q_{water(1)}$	冷凝器补水总能量

通过界面的质量(重量)流量表示为

$G_{\times \times \times}$, $\times \times \times$ 为与上述相应的下标

目 录

序	
主要符号表	
第1章 概论	1
1.1 燃气轮机的基本知识	1
1.1.1 燃气轮机的工作原理	2
1.1.2 燃气轮机的应用	3
1.1.3 燃气轮机的燃料	4
1.2 燃气轮机的发展	6
1.2.1 我国燃气轮机发展的简述	6
1.2.2 国外燃气轮机发展的简要历史	10
1.2.3 现代大功率发电用燃气轮机	12
1.3 燃气轮机有关的一些名词和概念 的说明	23
1.3.1 ISO条件(与NEMA条件) 及机组设计的大气条件	23
1.3.2 总能系统和联合循环的类型	25
1.3.3 “重型”与“轻型”燃气 轮机	30
1.3.4 透平进气温度 T_3 的几种 习惯用法	33
1.3.5 “F”技术	34
1.3.6 氧化和腐蚀	35
1.3.7 最佳压比	40
1.3.8 高温材料	41
1.3.9 再热循环	42
1.3.10 NO _x 排放	44
1.3.11 燃气轮机的起动	45
第2章 燃气轮机和联合循环部件热力 外特性与热平衡计算	47
2.1 总体的简单概述	47
2.2 燃气轮机与联合循环中部件的热力 外特性与效率	47
2.2.1 大气条件与ISO条件的使用	48
2.2.2 联合循环三个主要部件的 (热力)外特性	48
2.2.3 燃气轮机中直接进行热平衡 计算的两个部件的外特性	56
2.3 联合循环的系统平衡方程与效率	59
2.3.1 系统平衡方程式	59
2.3.2 总体效率	61
2.3.3 部件效率	62
2.4 透平压气机的热平衡(理论表达式)	63
2.4.1 理论上的透平压气机的热平衡 方程	64
2.4.2 使用压气机与透平效率的 表达式	65
2.4.3 理论表达式实用化的问题	66
2.5 稳态热平衡方程的实用表达式	66
2.5.1 自己设计机组时,对冷却空气量 影响的考虑	66
2.5.2 应用于核算机组的热平衡	69
2.6 当量冷却空气量的计算方法	69
2.6.1 设计模型	69
2.6.2 基本热平衡方程式	72
2.6.3 热平衡模型的启示	73
2.7 起动过程透平压气机的热平衡计算	73
2.7.1 起动过程运行点参数的半经验 公式	74
2.7.2 起动过程运行线上的点	74
附录2A 空气与燃气的热物性	76
第3章 结构与材料	82
3.1 结构设计概述	83
3.2 20世纪80年代前燃气轮机结构的 发展	84
3.2.1 了解历史是了解现代燃气轮机 结构的基础	84
3.2.2 第一阶段机组的结构特点的 补充分析	93
3.3 20世纪70年代前国内外材料的 发展	97
3.3.1 材料的开发与使用	97
3.3.2 主要的高温材料的寿命问题	101
3.3.3 高温部件的材料	104
3.3.4 其他部件的材料	106

3.4 第一阶段发展的总结性的话	107	4.3.6 “可控扩压”问题	144
3.5 冷却系统	107	4.3.7 全三维设计	145
3.5.1 国外燃气轮机发展第一阶段的 冷却系统举例	108	4.4 压气机的加级	146
3.5.2 国外燃气轮机发展第二阶段的 冷却系统	112	4.4.1 平均级压比	146
3.6 转子	115	4.4.2 首级轮毂比	147
3.6.1 不可拆式转子	116	4.4.3 子午面流道	148
3.6.2 可拆式的转子	118	4.4.4 跨声速级	150
3.6.3 叶轮的预应力处理	123	4.4.5 母型通流的调整	150
3.7 燃烧室形式	123	4.5 国外大功率燃气轮机的压气机的 统观分析	152
3.7.1 分管与环管型燃烧室	123	4.5.1 国外压气机使用的原始叶型	152
3.7.2 从单筒型燃烧室到环型 燃烧室	124	4.5.2 国外相关压气机的简况	154
3.8 静子的一些问题	125	4.5.3 关于整台压气机试验	160
3.8.1 静子的一般问题	125	4.6 已有压气机的综合分析 with 压气机 加级的目标值	161
3.8.2 快速起动	126	4.7 进一步发展压气机的一些问题和 前期工作的一些启示	161
3.8.3 主机支架与底架	126	4.7.1 加级工作的程序	162
3.8.4 从检修角度看结构的一些 问题	126	4.7.2 程序路线中的一些问题	163
3.8.5 本体随机测点	127	4.7.3 与现有参考资料的比较	164
附录 3A 典型的 GE 公司 MS9001FA 机组各主要部件的材料	128	附录 4A 压气机的喘振	166
第 4 章 压气机	130	第 5 章 燃烧室	169
4.1 概述	130	5.1 概述	169
4.1.1 本章的重点	130	5.2 燃烧室的工作特点和性能指标	170
4.1.2 设计思想中重要的一点	131	5.2.1 燃烧室的工作特点	170
4.1.3 从总体角度看压气机	131	5.2.2 燃烧室的性能指标	171
4.1.4 现代燃气轮机用的压气机 主要指标	132	5.2.3 燃烧室中燃烧过程的组织	175
4.2 压气机的外特性	132	5.3 燃烧室的结构	180
4.2.1 流动相似的条件	132	5.3.1 燃烧室结构的基本要求	180
4.2.2 压气机特性曲线	134	5.3.2 燃烧室的总体结构	180
4.2.3 压气机的模化	137	5.3.3 燃烧室主要部件的结构	183
4.2.4 加级后的压气机及其对母型 压气机的影响	137	5.4 燃料及其燃烧问题	186
4.2.5 关于压气机效率的问题	139	5.4.1 燃料的燃烧计算	186
4.3 压气机发展的道路	139	5.4.2 天然气的燃烧	191
4.3.1 母型级	140	5.4.3 液体燃料的燃烧及喷嘴	194
4.3.2 “平面叶栅”方法	141	5.4.4 重油和原油的燃烧	195
4.3.3 模化加级方法	141	5.4.5 低热值煤气的燃烧	201
4.3.4 其他提高压比与流量的办法	142	5.5 燃烧室的试验调整	204
4.3.5 可转导叶与放气	143	5.5.1 概述	204
		5.5.2 燃烧室试验的目的和方案	204
		5.5.3 燃烧室试验的基本设备和测试 内容	206
		5.5.4 燃烧室的模化试验工况	208

5.5.5 燃烧室调整试验的若干措施	211
5.6 低污染燃烧室	213
5.6.1 概述	213
5.6.2 常规燃烧室的主要污染 排放物	213
5.6.3 主要污染排放物的控制方法	214
5.6.4 干式低污染 (DLN) 燃烧室 的原理	216
5.6.5 四大燃气轮机制造商的 DLN 燃烧室	217
第6章 透平	226
6.1 概述	226
6.1.1 热物性	226
6.1.2 透平的级数	227
6.1.3 冷却系统	228
6.1.4 材料	229
6.1.5 由于冷却系统而引起通流 热力计算的问题	229
6.1.6 某些与传统机组有比照点 的结构方面	230
6.2 冷却	231
6.2.1 冷却系统的复述	231
6.2.2 冷却叶片的发展与叶片冷却 形式	235
6.2.3 现代级燃气轮机第1级透平 叶片的冷却形式	244
6.2.4 冷却系统的试验研究	247
6.3 透平的其他部件结构形式概述	248
6.3.1 冷却叶片与气动方面的协调	248
6.3.2 长柄叶根	249
6.3.3 整体围带与叶片强度方面 试验设备	250
6.3.4 其他一些相关结构问题的 概述	251
6.4 关于透平结构和材料的一些补充	258
6.4.1 关于透平结构部分的设计	258
6.4.2 关于燃烧室出口温度场和温度 场中的最高温度区	258
6.4.3 有关透平叶片和轮盘材料的 补充	259
6.5 涂层	262
6.5.1 涂层的概述	262
6.5.2 具体的涂层	262

第7章 燃气轮机的总体设计简述

7.1 概述	264
7.1.1 总体设计的一般概念	264
7.1.2 总体设计的内在性质	265
7.1.3 燃气轮机动力装置的总体性 概述	266
7.2 大功率发电用燃气轮机的总体性 问题	268
7.3 燃气轮机本体设计的总体性	269
7.3.1 总体对燃气轮机提出的要求	269
7.3.2 燃气轮机的初步设计	270
7.4 小结	276
附录7A 一些历史事件的记录	277

第8章 燃气轮机电站的总体布置及

进排气系统部件

8.1 关于主机总体布置方面的一些 问题	280
8.1.1 从箱装体到厂房式布置	280
8.1.2 电厂总体布置的一些问题	282
8.1.3 箱装体结构形式的有关问题	287
8.2 主流道的主要附件的概述	289
8.2.1 进气系统	290
8.2.2 排气系统	292
8.3 进气过滤	295
8.3.1 进气过滤的一般概念	295
8.3.2 空气过滤器的型式和性能	299
8.3.3 高效过滤器	304
8.4 进气加热与冷却	309
8.4.1 进气加热与冷却的概述	309
8.4.2 进气冷却	311
8.4.3 进气加热	312
8.4.4 进气消声器	312
8.4.5 进气导管	314

第9章 燃气轮机的辅助系统

9.1 概述	315
9.1.1 辅助系统分类 I	315
9.1.2 辅助系统分类 II	315
9.1.3 辅助系统通论	316
9.2 燃气轮机中以润滑油为工质的 油系统	317
9.2.1 油系统的基本任务	318
9.2.2 对油系统的基本要求与系统的	

基本配备	318	10.2 验收试验的内容与试验条件的规定	356
9.2.3 系统经济性与油系统型式问题	322	10.2.1 试验内容	356
9.2.4 现代大功率燃气轮机油系统的原则性系统图及一些有关部件的说明	325	10.2.2 关于试验工况达到稳定条件的规定	357
9.3 燃气轮机中以燃料供给和满足燃烧需要为其主要职能的辅助系统部分	328	10.2.3 关于测试数据读取的规定	358
9.3.1 系统设置概述	328	10.2.4 关于试验参考条件的规定	358
9.3.2 燃油系统及与燃油系统有关的一些系统	329	10.2.5 其他	358
9.3.3 雾化空气系统	338	10.3 验收试验中有关测试仪表和测量方法的规定	359
9.3.4 气体燃料系统(天然气)	340	10.4 验收试验中试验数据的整理和修正	360
9.4 属于机组总体的其他辅助系统概述	348	10.4.1 实测燃气轮机功率和功率因数的计算	361
9.4.1 机组清洗系统	348	10.4.2 燃气轮机输出功率的修正	361
9.4.2 其他系统简述	349	10.4.3 实测燃气轮机热效率的计算	364
附录 9A 关于压气机的定期清洗问题	350	10.4.4 燃气轮机热效率的修正	364
附录 9B 轻柴油的规格	353	10.4.5 压气机和燃气透平等熵效率的计算	366
附录 9C 气体燃料一些物理性质的计算	354	10.4.6 试验报告	367
第 10 章 燃气轮机的性能验收试验	356	参考文献	368
10.1 概述	356	编后话	372

第1章 概 论

本章第一部分基本知识简述中主要是对燃气轮机最一般的概述,包括原理、特点、应用、燃料、发展状况、发展趋势等一般知识。第二部分名词说明中除专门归纳了一些一般知识之外,在一些实际中有不同理解或看法的问题上,作者具有明确的观点。

本书的“现代大功率发电用燃气轮机”(以下经常简称为“现代级燃气轮机”)主要叙述对象是目前国际市场上已经成熟销售的“F”技术等级、250MW 功率等级的发电机组。

图 1-1 为美国通用电气公司(以下简称 GE 公司)目前正在电站试运行的 MS9001FB 燃气轮机本体的外形图。该机组功率为 250MW 等级,属本书要叙述的“现代大功率发电用燃气轮机”的一种型号。图 1-1 从压气机承力缸开始显示,不包括压气机进气缸。机组周围的管道是本体管路的一部分。



图 1-1 GE 公司 9FB 本体外形图

目前国际市场成熟销售的 50Hz 的现代大功率燃气轮机机组有美国 GE 公司的 MS9001FA (以下有时简称 9FA)、法国 Alstom (原 ABB) 公司的 GT26、德国 Siemens (以下有时简称为西门子) 公司的 V94.3A^① (或 V94.3)、日本三菱公司的 M701F (以下有时简称为 701F) 等;以及它们的 60Hz 系列的产品如 MS7001FA、GT24、V84.3A、M501F 等;它们均已批量生产,单台运行小时数均以万计。还有它们的改进型如 GE 公司的 MS9001FB (以下简称 9FB) 等。它们都是当今世界上最先进的批量生产的成熟的机组,是本书讲述的内容。另有蒸汽冷却型(如 GE 公司的 9H、三菱西屋公司的 501G 等)的机组也属现代大功率发电燃气轮机之列,这种机型的内冷却系统与上述以空气为介质的冷却系统的机组有很大的不同,目前基本均处于样机运行阶段,各制造厂更希望更多地积累些运行经验与数据。同时由于商业方面的原因,也不急于更快地推出更新的机组。本书不以之作为重点。

1.1 燃气轮机的基本知识

本节仅对燃气轮机基本知识作最简单的叙述。

① 本书校稿时该型号机组已将型号重新命名为 SGT5-4000F。该公司其他型号机组亦重新命名,本书中未作改动。

1.1.1 燃气轮机的工作原理

燃气轮机是把热能转换为机械功的旋转机械，包括压气机（在燃气轮机中通常称压缩机为压气机）、加热工质的设备（如燃烧室）、透平、控制系统和辅助设备等；一般应用空气作为工质。燃气轮机动力装置是燃气轮机及为产生有用的动力（例如电能、机械能或热能）所必需的全部基本设备。简单循环燃气轮机是最简单热力循环的燃气轮机，也是目前最常用的燃气轮机，如图 1-2 所示。它先由压气机将空气压缩到一定的压力，然后在燃烧室中加入燃料燃烧后产生高温的燃气，再经过透平膨胀产生功。由于高温燃气膨胀所做的功大于压缩空气所需的功，于是就产生了有效功。即透平的膨胀功除了带动压气机之外（透平与压气机同轴），剩余的功率输出带动发电机或其他负荷。同时，经过透平膨胀后的燃气直接排向大气（在联合循环中则经过余热锅炉等部件后排向大气）。因此，要求压气机与透平都具有高度先进的气动性能，以保证压缩空气所需的耗功绝对值尽可能小，透平所做的有效功尽可能大。也就是说，要求它们的效率尽可能高。

简单循环是最简单的燃气轮机循环，它的主要部件是压气机、燃烧室、透平，常常称为燃气轮机三大件，习惯上常常把它们称为燃气轮机本体，而把它及所有燃气轮机需要的辅机统称为燃气轮机装置。燃气轮机的热力循环属热力学中的布雷登（Brayton）循环，与所有热力机械的循环一样，循环效率

值首先取决于循环的最高温度 T_3 与进口温度 T_1 的比值。循环的最高温度越高效率越高，反之越低。一般燃气轮机循环（开式循环）的进口温度是大气温度，具有由地球气候条件决定的变化相对不太大的确定值。因此首先决定效率的要素是循环的最高温度，即燃气透平的进口温度（通常简称之为 T_3 ）。 T_3 常常是衡量燃气轮机性能水平的特征量。本书描述的现代大功率发电用燃气轮机， T_3 是 1300℃ 等级。

简单循环的焓熵图（ $i-s$ 图）^① 如图 1-3 所示。理想工况下，空气在压气机中实现等熵压缩^②（无损失情况下点 1 到点 2），燃烧室中实现等压燃烧（点 2 到点 3）、透平中实现等熵膨胀（点 3 到点 4），对于开式循环的机组，点 4 到点 1 过程在大气中完成。在实际工况中，图示的工况点（1, 2, 3, 4）已包含有生成该点过程的熵增，都不是等熵过程的终点；

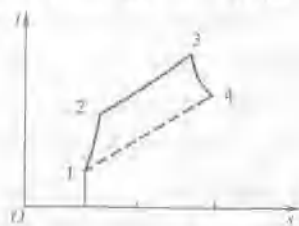


图 1-3 简单循环的 $i-s$ 示意图

通俗点说这些点的形成都包含有形成过程的损失。除了简单循环之外，还有间冷、再热、回热以及由它们分别以不同方式组合而成的复杂循环。还有由不同工质组成的不同循环的组合，称之为联合循环。大功率发电用燃气轮机一般用之与汽轮机的朗肯（Lanken）循环组成燃气-蒸汽联合循环，是最常见的一种联合循环，习惯上常常把这种特定工质的联合循环简称为“联合循环”，而淡化了完整意义上的联合循环的含义。本书中的“联合循环”这个

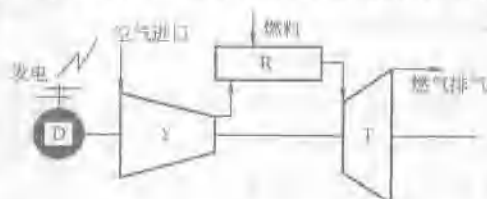


图 1-2 简单循环燃气轮机示意
Y—压气机 R—燃烧室 T—透平 D—电机

① 按目前标准，比焓的推荐符号为 h ，因而焓熵图应写为 $h-s$ 图，本书仍按目前行业内的习惯称 $i-s$ 图，下同。但本书公式中的焓的符号已使用 h 和 H 。

② 按吴仲华先生的意见称为“等熵压缩”，不称为“绝热压缩”，与目前标准一致。

词多数情况下均按上述的习惯说法使用,即指燃气-蒸汽联合循环。

大功率发电机组的控制系统目前大部分使用数字电调,执行机构使用高压油动机。一般的有两部分功能:一为转速调节的功能,维持给定的转速,一般误差为 $\pm 1\text{r/min}$;一为功率调节的功能,一般通过燃料量的控制达到。比较早的联合循环电液控制系统,各部件(燃气轮机、汽轮机等)各有自己的控制部件,整个电厂另有自己的总线(DCS)。目前燃气轮机的控制系统(如GE公司的Mark VI)把小范围的主辅机全部包括甚至扩大到全车间以至全厂的主控,大大减少了用户的工作量。整个控制部分不属于本书的范围,内容从略。

1.1.2 燃气轮机的应用

燃气轮机的用途很广,除了发电之外,还用作直接驱动、拖动压缩机、泵等机械的动力,以及其他更为广泛的场合。最重要的用途如:航空发动机领域燃气涡轮发动机,已在航空动力中占了绝对的统治地位;船舶的驱动动力,目前世界上军用主力舰只使用燃气轮机作为主动力的已占六成以上;坦克的动力,美国的主战坦克M-1使用燃气轮机已经30年以上,目前已扩大到全球范围内使用;天然气输送管线压缩机的驱动动力,目前多数使用燃气轮机;大型输油管线的增压泵的驱动动力燃气轮机和电动机是惟一的选择,俄罗斯和前苏联的燃气轮机主要为输油输气管线使用和船用,功率为适合于该用途的中小功率等级,仅管线使用就生产了数千台。除此之外,还有如用于核反应堆的氦气轮机等。分散式发电系统使用数百千瓦的微型燃气轮机组成的各种联合循环发电装置是目前世界电力新技术发展的一个重要分支。至于本书所述的大功率联合循环则是目前发电领域的重要发展方向,目前世界上主要发电设备制造厂的年生产量中,燃气轮机和联合循环设备都超过了一半。国内学术界正在极力推荐三联供、多联供等联合循环的形式;小型的以氦气为工质的循环国内也正在进行研制。

燃气轮机的发展开始于20世纪30年代末40年代初。1941年前后的两三年,实用的喷气式航空发动机、机车用燃气轮机、发电用燃气轮机以及略后一些的机械驱动用燃气轮机相继出现,50年代就已大量应用。目前,世界上正在销售的燃气轮机的规格品种仅在参考文献[1]中登录的就有近200种(其中没有包括俄罗斯和前东欧一些国家生产的燃气轮机,也没有包括军用的燃气轮机和微型燃气轮机,但它反映了民用燃气轮机的基本水平和最高水平),其功率等级为500kW~250MW。有84种以上燃气轮机用以组成联合循环,凡是发电用的燃气轮机几乎都按可以组成联合循环的原则设计。

燃气轮机的重大特点之一是功率密度大,即常说的体积小、重量轻、功率大,目前机组的比重量比起汽轮机、低速柴油机要轻得多,也比同功率等级的高速柴油机要轻。可能达到的功率则远较活塞式发动机大。在火力发电领域,燃气轮机的联合循环与简单的蒸汽循环相比无论在效率、功率密度、运行的灵活性可靠性方面均占优势,如联合循环效率目前已逼近60%,而现有参数的汽轮机组效率最多只能到45%的数量级。

作为发电用燃气轮机目前最大的限制条件是燃料。煤是我国目前和今后几十年内的主要供应能源;烧煤的燃气轮机机组目前还未进入大量商业运行阶段,因而,目前一段时期,我国火电发展的主力仍然是汽轮机。在能源发展并多样化的当前,煤的生产量还将稳步增长,但它在能源中占的比例将相对稳步下降,气体燃料的发展速度将相对加快。供给燃烧发电的气体燃料只能用于联合循环而不会再用于电站锅炉,这也是最近一段时间国内燃气轮机需要量增加的主要原因。预计在不久的将来,我国的气体燃料消费比例还要继续上升,燃气轮机

的需求也将继续增长。可预见的 2~3 年之后,即使新增燃气轮机的需要量会较 2005 年有所减少,但预计联合循环的需要量仍然还是不会减少,如表 1-1 所示的预测。在国内天然气开发的初期,各方面能源都紧张,供工业使用的天然气存在和民用争“气”的问题,达到平衡之后,作为燃料的天然气一般占总产量的 40% 左右。

表 1-1 国内发电设备新装机容量构成预测

年 份	2000 年	2010 年	2020 年	年 份	2000 年	2010 年	2020 年
总装机容量 (%)	100	100	100	气电 (%)	0.3	5.4	4.2
水电 (%)	24.8	25.8	27.1	新能源 (%)	0.1	0.7	1.0
煤电 (%)	69.3	63.3	58.6	其他 (%)	4.8	2.5	1.6
核电 (%)	0.7	2.3	7.5				

表 1-1 中,天然气发电(气电)项 2010 年之所以增加得特别快,是因为从 2004 年开始,国家在两捆招标中集中安排了 40 套燃气-蒸汽联合循环发电项目,使用“F”级的燃气轮机组成燃用西气东输的天然气与进口的液化天然气(LNG)的联合循环,每套 400MW 等级,2008 年完成建设。接着还在 2005 年开始安排第三捆的打捆招标项目,近 20 套。

燃气轮机的制造是涉及多学科的一系列高技术的组合,一些发达国家对其部件出口与技术交流均有限制,取得关键成果所需的试验设备建设和运行费用都很高,但是,要自己发展没有这些试验设备是不行的。

发电用燃气轮机的大量应用始于 20 世纪 50 年代,当时许多西欧的燃气轮机生产商看准油田,用于基本负荷,如 BBC 公司的机组就有许多用于这种负荷。发达国家的用户很大一部分用于尖峰负荷,GE 公司则看准了这些用户。不论什么用户,低的单位成本与良好的启动可靠性都是主要的设计要求,单位成本中燃料费用是经济性的主要一环。同时,燃气轮机功率在发电设备的队伍中显著偏小,增大功率也是重要的因素。因此,燃气轮机在固定式场合使用的一开始就强调了提高经济性和提高功率两方面。为了达到这个目的,20 世纪 60 年代一开始,世界燃气轮机生产厂就根据自己的生产习惯在基本一致的方向下形成两个技术流派:以瑞士 BBC 公司与一些西欧公司为代表的强调提高部件效率、复杂循环、多轴、重油等方面和以 GE 与西屋等美国公司为代表的强调提高初温、简单循环、单轴等方面。

为了保持在现有设计水平下可能达到的高效率,压气机和透平都要维持一定的线速度,以保持最佳速比(u/C_1)。因此,现有机组系列中比较小功率(流量)的产品必须有比较高的转速,数万千瓦及以下的机组,设计转速一般都在 3000r/min 以上,因而在发电使用时需要有减速箱。功率越大,转速越低;发电机组对于 50Hz 的全转速就是 3000r/min,对于 60Hz 的全转速就是 3600r/min,两者相差 1.2 倍,因此 3000r/min 和 3600r/min 的机组常常是一个系列机组中的两个机型,如 GE 公司的 9000 系列和 7000 系列、西门子公司的 V9x.x 和 V8x.x、西屋三菱公司的 M701 和 M501 等。目前尚无半转速(1500r/min)的燃气轮机发电机组出现。

1.1.3 燃气轮机的燃料

燃气轮机的燃料目前有气体燃料和液体燃料两类。气体燃料中如天然气、液化石油气等均为高热值的燃料;高炉煤气、用空气气化的整体煤气化联合循环(IGCC)合成气等为低热值的;也有中热值的,如焦炉煤气、一些品种的油田伴生气、用氧气气化的 IGCC 合成气

等。原则上说,燃气轮机可以适应不同的气体燃料,只是燃烧室特别是燃烧器要相应地符合要求。液体燃料目前主要是石油基炼制燃料,轻柴油是基本燃料之一。重油和渣油也有燃烧的余地,但要求的燃烧室和辅机系统的设施不同,一些型式的燃烧室(主要指热容强度较大的燃烧室)目前还不能很好适应。燃气轮机的燃料中最好的是天然气。天然气具有热值高、成分比较单纯、组织燃烧比较容易、火焰短等特点。这些特点都是有利于燃烧的重要因素;含引起热腐蚀的杂质(如 V、Na 等)少,是延长叶片寿命的重要因素;在气体输送过程前,一般都要经过脱硫,到燃气轮机入口处一般含硫量很低,故烧天然气的联合循环烟囱排烟温度可以低到 80°C ;这些都是天然气作为燃料的优势。最一般的燃料是轻柴油(国外叫蒸馏油,典型的牌号是 #2 蒸馏油),燃用轻柴油时的 NO_x 排放量一般的要比燃用天然气时高。其他一些比较特殊的燃料如重油、高炉煤气、合成气等,原则上都可以燃烧,但要做到长期安全满发,常常需要选择特别适合它的燃气轮机型号。目前所有公司的“F”技术级的机组能够稳定燃烧的还只能说是天然气和轻柴油。而燃用轻柴油时,要达到 NO_x 排放的保证值 42×10^{-6} 的指标都要注水。从燃烧器本身说,都有燃烧重油和燃烧空气气化 IGCC 合成气的条件,但目前均在努力试验中,成功的还只是部分机组。

燃用重质燃料是中国用户经常要提出的问题,不时地成为国内用户关注的热点。1950 年~1960 年,10 年间世界上安装了大量的燃用重质燃料的燃气轮机。到 20 世纪 60 年代,随着廉价石油与天然气越来越多,燃气轮机市场转移到主要用来承担以天然气或蒸馏油为首选燃料的电网尖峰负荷。60 年代以后,当天然气储量开始下降后,使用重质燃料的比例又开始回升。许多机组都具有燃用双燃料的能力,以含灰燃料作为二次燃料;或要求配置有相应的设施,以具有换用重质燃料的可能性。几年以后,当天然气再次大量出现时,这种情况又变化了。直至现代,重质燃料仍然不时被一些用户所关注。包括中国也是如此。

所谓重质燃料(外国包括 ISO 称之为含灰燃料)主要指石油通过不同馏程蒸馏分出汽油、煤油和柴油后剩余的部分。按中国石油部门的习惯,各种馏程得到的上述“剩余的部分”称之为渣油,而在渣油中加入一部分柴油使之降低一些粘度,以达到具体标准对粘度的要求,所得到的油品则谓之重油。燃气轮机有可能烧的重质燃料基本上是各种不同牌号(即各种粘度)的重油。它们的碳氢比都比较大,对于这种燃料的使用有几方面的问题:雾化与燃烧的难度较大,对于热容强度较高的燃烧室(分管型、环管型等)应使用雾化空气;燃烧时辐射热大,使燃烧室部件壁温升高,寿命降低;它们含有的钠(Na)、钾(K)、钒(V)和铅(Pb)之类腐蚀元素还往往较多,从而加速透平部件的高温腐蚀而需要预处理;与此同时,这种燃料中的某些元素还会直接引起结垢,或与用于防腐蚀的添加剂化合而引起结垢,缩短了机组维修的周期。目前,这些问题在“F”级以外的机组上均得到了解决,烧重油机组的经验在国内越来越丰富。原油尽管粘度不高也属重质燃料之列,它所含的重质成分在燃烧时具有和重油燃烧同样的问题;而包含在其中的轻质油成分(如汽油、煤油等)则由于太容易燃烧而会引起火焰筒的局部过热,燃用原油只是在新油田刚刚开发时的短期可能出现的现象,一般是在烧重油机组的基础上燃烧室要再作些修改。

20 世纪 70 年代前开发的燃用重质燃料的技术包括开发并设计燃烧室、燃料处理系统和控制系统。其中在热腐蚀方面,确定了微量元素(钒、钠、钾)对燃气轮机所用高温材料的影响,确定了为保证可靠运行所要求的燃料质量和微量元素极限值,评估了积灰沉淀速度,包括积灰清除方法和它们对性能的影响,在以上基础上开发了用于去除或抑制腐蚀性微量元

素的燃料处理系统，一直用到现在。重质燃料目前在国内时有应用，比例不小。真正可以燃烧重油的机组，世界上宣布的很多，但许多人仍然认为单筒型燃烧室的机组对于燃用重油仍然具有它的优势，而非单筒型的燃烧室（如 GE 公司的分管型）能够燃用重油都是因为雾化空气系统。由于“F”等级的现代大功率燃气轮机目前暂时还没有烧重油的要求与先例，故在此不准备进一步展开。

固体燃料直接燃烧的可能途径之一是通过将煤制成细煤粉或水煤浆，这些方法都在一些早期试验机组上做过试验。它们在燃气轮机上直接燃烧的试验到现在都还没有成功，暴露出的主要问题不在于燃烧方面，而是燃料中无法去除得很干净的灰分堵塞通流部分（包括气封与冷却孔等），对于现代燃气轮机更是那样，尤其是冷却空气的通道。在煤燃料中将燃烧以前的灰分去除到常规含灰量要求以下（ $\text{ppm}(10^{-6})$ 等级）就是比较困难的，即使达到了一定程度，燃烧以后高温燃气的除灰也还是问题，而在燃气透平本体的有限体积中还要清灰也是很难实现的。

目前正初步投入商业运行的燃用固体燃料（煤）的办法有两种：

一是在整体煤气化联合循环（IGCC）装置中（见本章后部），燃料通过气化生成合成气，再经过燃料气（合成气）的净化后通入燃气轮机的燃烧室中燃烧使用，如图 1-19 所示。一是通过增压流化床联合循环（PFBC）装置在增压流化床锅炉中燃烧，然后再净化燃气后通入透平膨胀，即以增压流化床锅炉（PFBC 锅炉）作为燃气轮机循环的燃烧室，如图 1-20 所示。目前，IGCC 和 PFBC 尽管在技术上还有需要探讨和逐步改进的方面，但在我国建立试验电站的主要问题是它的单位功率的造价太高。我国的能源结构即使多样化了也仍然需以煤为主，短时间内不会改变，因此燃煤的联合循环是现在开始的一段时间内的方向，我国正在努力中。

1.2 燃气轮机的发展

1.2.1 我国燃气轮机发展的简述

1.2.1.1 20 世纪 80 年代中期以前产品的快速发展

我国燃气轮机工业起步于建国之初，50 年前，在国家的关怀和推动下，我国从“一五”初期就注意了燃气轮机技术力量的培养。20 世纪 50 年代末 60 年代初，一批分别从不同岗位调入的、国外培养和学习回国的、本国高校毕业的技术人员形成我国燃气轮机工业技术最初的也是后来第一代的骨干力量，形成了一个实际存在的民用燃气轮机的技术集体。尽管在发展过程中也有风风雨雨分分合合，但到了 80 年代初，试验研究设备已门类齐全、初具规模，试验研究成果累累。产品和国外先进水平的差距与 50 年代末比已缩短了 10 年以上。

当时国内几个工厂基本同步。以笔者工作的哈尔滨汽轮机厂（以下简称哈汽）为例，哈汽于 20 世纪 50 年代末由运输式机组自行设计起步，3500 马力^②、4500 马力机车用，和 6000 马力船用、自由活塞船用运输式机组等，也生产了一些发电用的机组，如 2650kW、3000kW、12000kW 的发电机组。除个别特例之外，独立进行燃气轮机新产品研制不可缺少

② 非法定计量单位，1 马力 = 735.499 W。