

燃气轮机发电动力装置 及应用

林汝谋 金红光 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

燃气轮机发电动力装置及应用

主编：林汝谋 金红光

参编：林汝谋 金红光 王存诚 刘卫宁

刘瑞同 吕泽华 崔 平

顾问：蔡睿贤



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是一本全面介绍燃气轮机及其联合循环发电动力装置的专著,内容涉及从基础理论到应用实践的各个方面。本书共有 11 章,第 1~6 章侧重于燃气轮机的基础知识,叙述其工作原理、主机与主要部件、联合循环、全工况特性以及调节与控制等,重视过程机理与概念的阐述,注意术语的规范性,并尽量避免深奥数学描述和繁杂的公式推导,力图做到深入浅出、通俗易懂;第 7~11 章侧重介绍燃气轮机应用涉及的重要方面,包括产品与性能,设计与制造,采购与验收,发电装置成套设计以及运行等,侧重总结归纳相关的科研成果与工作经验,并援引许多具体应用实例与标准以及国内外最新资料信息。

本书可供能源动力领域从事科研、管理、设计、运行等工作的人员阅读参考,同时也是燃气轮机发电厂的设计、管理、运行人员的必备参考书,还可作为燃气轮机及其相关专业的院校师生理论联系实际的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

燃气轮机发电动力装置及应用/林汝谋,金红光主编.

北京:中国电力出版社,2004

ISBN 7-5083-2393-9

I. 燃... II. ①林... ②金... III. 气轮发电机-动力装置 IV. TM611.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 073520 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 9 月第一版 2004 年 9 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 17.5 印张 466 千字 1 插图

印数 0001—3000 册 定价 35.00 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

燃气轮机是我近 50 年来一直从事的专业，虽然历经大学教学、工厂生产与科学院科研三种不同类型的任务，但主要的工作对象还是燃气轮机，所以现在看到燃气轮机在全球有大发展，在我国也有相应的情况，当然是很高兴的。燃气轮机在航空占绝对优势已是家喻户晓，但在发电等行业中也已有很大优势，例如美国近年火电的增量已是燃气轮机及其联合循环占绝大部分，在中国却仍不太为人所知。其实近年来全国人民代表大会中国国家发展和改革委员会（以前的计委）的报告中已多次具体提到重型燃气轮机的重要，这也说明了燃气轮机在我国的应用前景。

在新形势下，迫切需要一本与实际应用结合得更全面的燃气轮机专业书，它应该让从事燃气轮机的各种人员都能由此得到帮助，在普及性方面甚至还具有科普书刊的通俗易懂的魅力；但是它还应该是严谨、准确的。国内有关燃气轮机的教科书已有多种，但在理论上阐述较多，而按上述要求著述的近来还很少见。因此，本书是适应目前需要而写的，值得称道与祝贺。

写这样的书也不容易，需要作者既有理论基础的功底，更需要作者有丰富的实践经验。这次组织写作的作者，他们按各自所长，在书中分别发挥，相信能使所有章节都会各显特色，满足读者希望。本书的主编，他们分别是中国科学院工程热物理研究所燃气轮机联合循环科研组的第二任与第三任组长，都有过深入的理论熏陶与长期的实践经验。尤其是林汝谋同志，他接触燃气轮机已近 50 年，是我国亲自参加成功研制过最多地面实用燃气轮机的工程师，后来又成为我国著名学者吴仲华先生在发展燃气轮

2002.6.1

机方面的助手，如今年过花甲，能把多年的心得成书，以惠读者，我相信他对此一定会很高兴。我也为此对他以及所有作者表示由衷的祝贺。

中国科学院院士

蔡睿贤

2004年5月

前言

随着燃气轮机技术不断完善和天然气能源开发应用的比重加大,燃气轮机发展迅速,正在成为世界火电的主要动力和许多国家经济发展的关键技术。而随着我国“西气东输”国家重大工程实施和东南沿海地区液化天然气(LNG)进口与气站建设,燃气轮机及其联合循环电站发展应用前景广阔。为了满足相关人员的需要,特编写此书。现有的同类书籍多侧重于工作原理与性能介绍,多应用高等数学来描述,且多普适于所有类型的燃气轮机。本书拟侧重于大中型发电用途的燃气轮机,这也是目前国内外燃气轮机发展的重点。另外,本书还注意原理论述与应用概述并重、学术性与普及性的合理结合,尽量使它对有关学校的燃气轮机相关专业师生和相关部门的科研、管理、设计、运行等工作人员都有阅读参考价值,以拥有更大的读者范围。

本书共有11章。第1~6章侧重于燃气轮机的基础知识,叙述其工作原理、主机与主要部件、联合循环、全工况特性以及调节与控制等。第7~11章侧重于介绍燃气轮机应用涉及的重要方面:产品与性能,设计与制造,采购与验收,发电装置成套设计以及运行等。本书是一本全面介绍燃气轮机及其联合循环装置的著作,内容涉及从基础理论到应用实践的各个方面:基础知识突出工作原理阐述,包括新概念的介绍,注意术语的规范性和定义的准确性,尽量避免深奥数学描述和繁杂的公式推导,力图做到深入浅出、通俗易懂;应用方面则覆盖相关的重要方面,侧重总结归纳有关的科研成果与工作经验,并援引许多具体应用实例与标准以及国内外最新资料信息,有较大的实用参考价值。

本书由中国科学院工程热物理研究所林汝谋、金红光、崔平,清华大学王存诚、吕泽华以及南京汽轮电机厂刘卫宁、刘瑞

同等七位同志编著。第1、5、9章由林汝谋研究员执笔，第2、4章由金红光研究员执笔，第3章由王存诚教授执笔，第6章由吕泽华教授执笔，第7章由崔平高级工程师等执笔，第8、10、11章由刘瑞同高级工程师等执笔。并由林汝谋、金红光研究员担任主编，蔡睿贤院士担任顾问。

在本书编写过程中，曾得到陈智勇、段立强、徐威、徐玉杰等同志各种帮助，在此一并深表谢意。

由于作者的理论水平和实践经验有限，书中难免有许多缺点与错误，恳请读者批评指正。

林汝谋 金红光

于北京中关村

2004年5月

目 录

序

前言

第1章 概述	1
1.1 燃气轮机简介	1
1.2 国外燃气轮机的发展和应用概况	3
1.3 我国燃气轮机的简况	11
第2章 燃气轮机热力循环	14
2.1 概述	14
2.2 简单循环的燃气轮机	26
2.3 改善燃气轮机性能的热力循环措施	36
2.4 热力循环的计算	44
第3章 燃气轮机主机及主要部件	52
3.1 主机概述	52
3.2 燃气透平	52
3.3 压气机	77
3.4 燃烧室	95
3.5 主机总体结构	129
第4章 燃气蒸汽联合循环装置	144
4.1 概述	144
4.2 联合循环装置构成	162
4.3 联合循环的热力性能	185

第5章 燃气轮机全工况特性	201
5.1 燃气轮机全工况特性概述	201
5.2 影响燃气轮机全工况特性的因素	224
5.3 燃气轮机全工况特性分析	238
5.4 大气条件对燃气轮机性能的影响	253
第6章 燃气轮机发电机组的调节与控制	261
6.1 燃气轮机调节的基本原理	261
6.2 燃气轮机发电机组控制系统与实例	275
6.3 燃气轮机发电机组保护系统与实例	284
6.4 联合循环发电装置的控制系統	290
第7章 燃气轮机产品与性能	299
7.1 世界燃气轮机市场与主要制造厂商	299
7.2 世界大中型燃气轮机产品与性能	304
7.3 国产重型燃气轮机产品与性能	325
第8章 燃气轮机设计与制造	331
8.1 燃气轮机设计概论	331
8.2 热力方案与设计参数选择	338
8.3 热部件材料选择与冷却技术	346
8.4 重型燃气轮机的制造与工艺	357
第9章 燃气轮机采购与验收	368
9.1 概述	368
9.2 燃气轮机的采购问题	369
9.3 燃气轮机的验收试验	388
9.4 联合循环装置的采购与验收	411

第10章 燃气轮机发电装置成套设计	437
10.1 发电装置成套概述	437
10.2 燃气轮机主机与联合循环选型	438
10.3 成套范围与主要辅助系统	458
10.4 发电装置总体布置设计	493
第11章 燃气轮机发电装置运行	497
11.1 燃气轮机的启动	497
11.2 燃气轮机的运行	510
11.3 燃气轮机的维护	527
参考文献	548

概 述

1.1

燃气轮机简介

燃气轮机 (Gas Turbine) 是以连续流动的气体为工质、把热能转换为机械功的旋转式动力机械, 包括压气机、加热工质的设备 (如燃烧室)、透平、控制系统和辅助设备 etc.

走马灯 (见图 1-1) 是燃气轮机的雏形, 我国在 11 世纪就有走马灯的记载, 它靠蜡烛在空气中燃烧后产生的上升热气推动顶部风车及其转轴上的纸人马一起旋转。15 世纪末, 意大利人列奥纳多·达芬奇设计的烟气转动装置, 其原理与走马灯相同。

现代燃气轮机发动机主要由压气机、燃烧室和透平三大部件组成。当它正常工作时, 工质顺序经过吸气压缩、燃烧加热、膨胀做功以及排气放热等四个工作过程而完成一个由热变功转化的热力循环。图 1-2 所示为开式简单循环燃气轮机工作原理图。压气机从外界大气环境吸入空气, 并逐级压缩 (空气的温度与压力也将逐级升高); 压缩空气被送到燃烧室与喷入的燃料混合燃烧产生高温高压的燃气; 然后再进入透平膨胀做功; 最后是工质放热过程, 透平排气可直接排到大气, 自然放热给外界环境, 也可通过各种换热设备放热以回收利用部分余热。在连续重复完成上述的循环过程的同时, 发动机也就把燃料的化学能连续地部分转化为有用功。一般, 透平的膨胀功约 $2/3$ 用于带动压气



图 1-1 走马灯

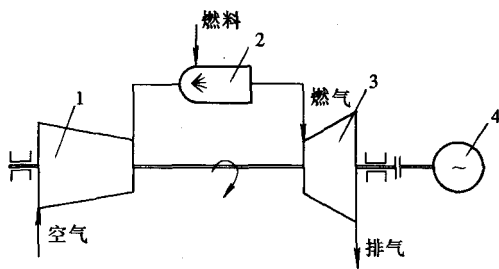


图 1-2 开式简单循环燃气轮机工作原理图

1—压气机；2—燃烧室；3—透平；4—负荷

机，1/3左右才是驱动外界负荷的有用功。

燃气轮机有重型与轻型两类结构型式，重型的零部件较厚重，设计寿命与大修寿命都长；轻型的结构紧凑而轻，所用的材料较好，但寿命较短。图 1-3 所示为南京汽轮机厂研制的 1000kW 发电用的燃气轮机剖视图，机组为水平中分的重型结构。

燃气轮机动力装置是指包括燃气轮机发动机及为产生有用的动力（例如电能、机械能或热能）所必需的基本设备。为了保证整个装置的正常运行，除了主机的三大部件外，还应根据不同情况配置控制调节系统、启动系统、润滑油系统、燃料系统等。

燃气轮机区别于活塞式内燃机有两大特征：一是发动机部件的运动方式，它为高速旋转且工质气流朝一个方向流动（不必来回吞吐），这使它摆脱了往复式动力机械功率受活塞体积与运动速度限制的制约，因此在同样大小的机器内每单位时间内通过的工质量要大得多，产生的功率也大得多，且结构简单、运动平稳、润滑油耗少；二是主要部件的功能，其工质经历的各热力过程是在不同的部件中进行的，故可方便地把它们加以不同组合来处理，以满足各种用途的要求。

燃气轮机区别于汽轮机有三大特征：一是工质，它采用空气而不是水，故可不用或少用水；二是多为内燃方式，使它免除庞

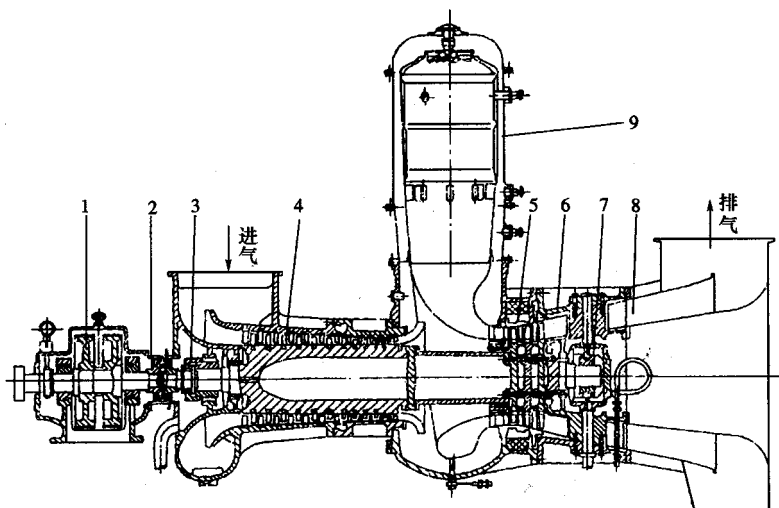


图 1-3 1000kW 重型燃气轮机主机剖视图

- 1—负荷齿轮箱；2—联轴器；3—前轴承；4—压气机；5—透平；
6—扩压段；7—后轴承；8—排气蜗壳；9—燃烧室

大的传热与冷凝设备，因而设备简单，启动和加载时间短，电站金属消耗量、厂房占地面积与安装周期都成倍地减少，但直接燃用廉价而丰富的煤就变得困难；三是高温加热高温放热，使它有更大的提高系统效率的潜力，但也使它在简单循环时热效率较低，且高温部件的制造需更多的镍、铬、钴等高级合金材料，影响了使用经济性与可靠性。

1.2 国外燃气轮机的发展和应用概况

1.2.1 发展简史

1905 年，法国勒梅尔 (C. Lemale) 和阿芒戈 (R. Armand) 研制出首台能输出有效功的燃气轮机，但效率仅有 3%~4%，没有获得实际应用。1920 年，德国 H·霍尔茨瓦特制成首台实用的 370kW 燃气轮机，其效率为 13%，但因采用等容加

热循环，存在断续爆燃等许多缺点而被放弃。到了 20 世纪 30 年代中叶，随着科技的长足进步，特别是气动热力学解决了设计高效率压气机的问题，高温铬镍合金的出现使其能采用较高的透平初温，为研制更为实用的等压加热循环（布雷顿循环）奠定了基础，使燃气轮机发展进入了实用阶段。

1939 年秋，瑞士研制出第一台发电用燃气轮机（功率 4000kW，热效率 18%），与此同时，德国则研制出第一台飞机用燃气轮机（4900N 推力的涡轮喷气发动机）。1941 年，瑞士制造的第一辆燃气轮机机车（功率 1640kW）通过验收试验。1947 年，英国第一艘装备有燃气轮机的舰艇下水，它以 1860kW 燃气轮机作为加力动力。1950 年，英国制成第一辆燃气轮机汽车（功率 75kW）。此后，燃气轮机在更多部门获得应用。早期发展中，除了燃用柴油和天然气外，还燃用重油、渣油，并研究过直接燃用煤。

20 世纪中叶，开始出现燃气轮机与其他热机相结合的复合装置。最早出现的是燃气轮机与自由活塞内燃机相结合的装置。后来发展了柴油机 - 燃气轮机复合装置。1949 年世界首套燃气蒸汽联合循环装置投入运行，由于它能有效利用燃气轮机高温排气的热量，明显地提高了系统效率，得到越来越广泛的应用。

半个多世纪以来，燃气轮机提高性能的传统途径是：依靠耐热材料和冷却技术来不断提高初温，应用内流气动热力学的先进设计来相应增大压比以及完善有关部件性能等。早期燃气轮机的透平进口燃气温度（初温）只有 600 ~ 700℃，热效率也很低。开始主要靠耐热材料性能的改善，每年平均上升约 10℃；20 世纪 60 年代后，还借助于空气冷却技术，透平初温 T_3 平均每年升 20℃；从 20 世纪 70 年代开始，充分吸收先进航空技术和传统汽轮机技术，沿着传统的途径不断提高性能；到了 20 世纪 80 年代，已把初温升至 850 ~ 1000℃。目前已开发出一批“FA”、“3A”型技术的新产品，它代表着当今工业燃气轮机的最高水平：循环中透平初温 $T_3 \approx 1300^\circ\text{C}$ ，压比 $\epsilon_c = 15 \sim 30$ ，简单循环单

机功率 $P_{gt} \geq 250\text{MW}$ 、效率 $\eta_{sc} = 36\% \sim 38\%$ ，联合循环功率 $P_{cc} \geq 350\text{MW}$ 、效率 $\eta_{cc} = 55\% \sim 58\%$ 。正在研制的新一代燃气轮机，采用更有效的蒸汽冷却技术，采用定向结晶、单晶叶片等先进工艺，以保证达到 1430°C 以上的初温， $P_{gt} \geq 280\text{MW}$ 、 $\eta_{sc} \geq 39\%$ ， $P_{cc} \geq 480\text{MW}$ 、 $\eta_{cc} \geq 60\%$ 。

美国工业燃气轮机在总体上处于世界领先地位，实施多项大的发展计划，已开发出“FA”型产品，正在开发“H”型。欧洲在发电用大型燃气轮机方面毫不逊色，德国、瑞士和瑞典有自己研制的高性能燃气轮机。日本、英国、意大利、法国等国也生产当今性能最好的“FA”型燃气轮机，但多沿用外国的技术。另外，英国和法国在航机陆用领域有很大进展，日本则在开发高温的陶瓷燃气轮机上进展迅速。

1.2.2 应用概况

燃气轮机动力装置具有功率大、质量轻、尺寸小、启动快、安装周期短、工程总投资少、可燃用多种燃料、污染排放低以及不用冷却水或少用水等优点。它从 20 世纪 40 年代航空发展应用开始，迅速扩展到其他领域，目前在发电、原油与天然气输送、交通运输以及冶金、化工等部门都已得到了比较广泛应用。

(1) 发电用燃气轮机。燃气轮机发电机组能在无外界电源的情况下快速启动与加载，很适合作为紧急备用电源和电网中尖峰负荷，能较好地保障电网的安全运行，故很快就得到广泛应用。从安全与调峰的角度，在电网中装备 $8\% \sim 15\%$ 总装机容量的燃气轮机机组是很有必要的。燃气轮机移动电站（包括列车电站、卡车及船舶电站）具有体积小、启动快、机动性好等优点，适合于边远无电网地区与新建设的工矿、油田等急需电力的单位和新兴城市。随着高效大功率机组的出现，燃气轮机联合循环发电装置已开始电网中承担基本负荷和中间负荷。实际上，目前功率在 100MW 以上的燃气轮机多用于发电，而 300MW 以上的机组几乎全部用于发电。此外，分布式 $20 \sim 5000\text{kW}$ 微型与小型燃气轮机发电装置的兴起，也受到广泛的关注。另外，随着高温气冷堆

一闭式氦气轮机核电站的发展，又为燃气轮机提供了一个新的、很有潜力的应用前景。总之，随着燃气轮机发电动力装置的兴起，世界火电站的发展格局发生重大变化：汽轮机长期占主导地位的局面开始变化，“大型火电站以联合循环为主，中小机组热电并供居多”已是许多国家电站发展的主要格局。大量经验表明，简单循环燃气轮机发电机组是调峰、应急以及移动电站的最佳选择。烧石油或天然气时，燃气蒸汽联合循环电站优势明显，目前只有它能同时达到供电效率大于 55%、运行可用性大于 90%、 NO_x 排放量小于 10×10^{-6} 。燃煤联合循环是把洁净煤技术和高效总能系统相结合的先进发电技术，现有很多相关的装置投入商业验证运行。

(2) 工业用燃气轮机。主要用在石化、油田、冶金等工业部门，用于带动各种泵、压缩机及发电机等，以承担注水、注气、天然气集输、原油输送以及发电等任务。例如，前苏联生产的地面用燃气轮机中，大部分是用于输气管线的，美国索拉公司生产的五千多台工业燃气轮机，约有 80% 用于石油工业。作为驱动动力的工业燃气轮机多为变转速运行，多采用独立动力透平输出功率的分轴或三轴轴系方案。另外，燃气轮机总能系统以联合循环和热电并供的形式广泛用于石化企业和冶金部门，成为重要的节能技术。

(3) 船用燃气轮机。目前，俄、美、英等国的军舰都已大批配备燃气轮机。前苏联早在 1957 年，就确定了现代化舰艇采用燃气轮机及核动力的动力政策；美国军舰从 20 世纪 60 年代开始大量配备燃气轮机；英国 1969 年后，新设计建造的中型水面舰艇几乎全部采用燃气轮机作为主推进动力。随着舰船用燃气轮机性能的不断改善，全世界逐年新造的舰艇中，装备燃气轮机的比例不断增加。在舰艇中，燃气轮机常采用组合装置的形式，如柴油机—燃气轮机组动力装置，前者作为巡航动力，后者作为加力动力，还有两台燃气轮机组合的全燃气轮机组动力装置。由于舰船的负荷变化规律和牵引特性的特殊要求，船用的燃气轮机

也多采用分轴或三轴轴系方案。另外，燃气轮机气垫船也在国内外得到应用。但由于商船对经济性要求高，商船用燃气轮机仍处于试验阶段。

(4) 机车用燃气轮机。燃气轮机机车能够较好地满足铁路牵引动力的要求，如好的牵引特性、加速性等，因此得到一定的发展应用。法国、加拿大等国采用燃气轮机的高速火车已正式载客运行。国内外在铁路上都有研制与使用过烧重油的燃气轮机机车经验。由于燃气轮机机车在高原寒冷地区运行时，具有随海拔升高功率下降小、单机功率大、效率高等优势，许多专家都认为它很适合于高原寒冷地区的铁路使用。然而与现有的牵引动力相比，燃气轮机机车的部分负荷经济性较差，特别是空载油耗特性大的问题比较突出，需要进一步研制经济性高的机车燃气轮机。

(5) 车辆用燃气轮机。美国从 20 世纪 80 年代开始，正式开始使用燃气轮机作为坦克的动力装置，批量生产的 XM-I 型坦克用 AGT1500 型燃气轮机。英国已购买了它的生产专利，原联邦德国已将它装在豹-II 型坦克上进行了试验，前苏联把燃气轮机装备到 T-80 型坦克上进行试验，并已小批量应用。法、意、日、加、瑞典等国也都进行了某些研制工作或装车试验工作。坦克燃气轮机一般采用较高的燃气初温和回热循环，与柴油机相比，其突出的优点是质量轻、寿命长以及低温（ $-20 \sim -50^{\circ}\text{C}$ ）启动性能好。燃气轮机也能用作汽车发动机，美国一直在研制，为了提高性能和减小尺寸，采用比较高的燃气初温和旋转式回热器。为适应车辆动力的扭矩特性和负荷的要求，车辆用燃气轮机多采用分轴或三轴，有时还采用可调导叶的动力透平，以改善加速性能和变工况性能。

现在，燃气轮机及其联合循环动力装置已成为世界主要动力设备之一，图 1-4 汇总了世界发电用燃气轮机增长趋势的情况。世界动力市场中，燃气轮机销售量不断增长，工业燃气轮机的市场主要在发电领域（约占 70%），近 10 年世界新增发电设备中，燃气轮机及其联合循环在美国约占 2/3、在全世界约占 1/3。目