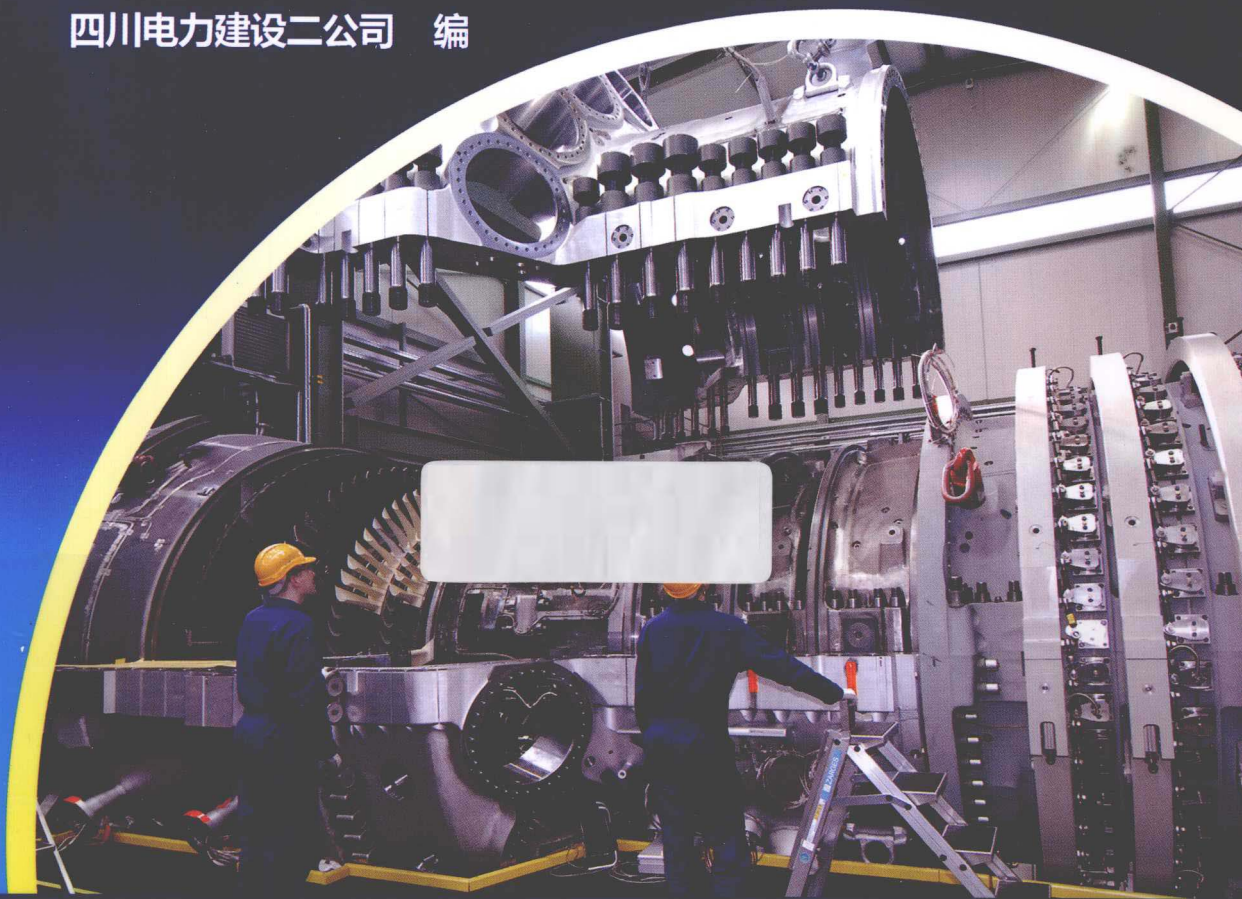


燃气轮机发电厂 安装与运行技术

四川电力建设二公司 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

燃气轮机发电厂 安装与运行技术

四川电力建设二公司 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以燃气轮机联合循环机组安装与运行的工序控制点为基础,介绍了燃气轮机原理、机组设备特点及应用,对页岩气发电应用前景进行了积极的建议;然后从工程项目建设中的安全、质量、进度管理等方面分别进行了阐述;讨论了具体的施工方案,重点说明安装过程技术控制措施;对机组运行、检修的具体问题进行了分析处理。

本书对于从事设计、安装及运行的技术人员来说,能够直接用来指导工作实践,是非常实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

燃气轮机发电厂安装与运行技术/四川电力建设二公司编. —北京:中国电力出版社, 2013. 3
ISBN 978-7-5123-4111-1

I. ①燃… II. ①四… III. ①发电厂-燃气轮机-设备安装②发电厂-燃气轮机-运行 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 038517 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 5 月第一版 2013 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 253 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

《燃气轮机发电厂安装与运行技术》

编 委 会

主 任 张晋斌 廖文兴 杜伟龙

副主任 王成福 李 武 杨洪忠 党显兵 黄光德
戚强国

主 编 简安刚

委 员 (按姓氏笔画排名)

代永强 江利民 张 萍 李 华 陈华峰

杨火生 肖 平 李能强 罗 利 林思龙

范立江 钱 毅 郭忠琼 穆遵明

序

日趋严重的环境问题警示我们，转变能源发展形式已刻不容缓，只有大力开发清洁能源的高效应用，减少温室气体的排放，促进环境质量的进一步改善，才能实现天更蓝水更绿的美丽中国。随着页岩气开发的急剧升温，研究对其合理应用已经成为当务之急。页岩气是一种重要的非常规天然气资源，中国的储量巨大，其主要成分与天然气近似，将极大地影响世界能源格局。在大力发展燃气轮机技术的形势下，需要指导性强、通俗易懂的作业指导书，基于此，我们编写了本书。提供给燃气轮机安装与运行的专业人士，希望能够在现场施工中，达到切实可行的指导与参考的目的。

当今时代，科技创新是一个企业、一个行业，甚至是一个国家持续发展的动力。为了适宜当前的发展形式，四川电力建设二公司注重科技创新，始终作为实现企业跨越式发展的重点工作来抓，不断提高电力建设技术水平，在滑动安全网、炉内LED灯具上获得国家专利，成果已经广泛应用于施工现场，不但提高了工程质量，降低了施工成本，而且有力推动了转型升级，实现多个突破。在编著本书时，总结科研工作经验，借鉴先前出版的《垃圾焚烧发电安装与运行技术》和《火力发电厂脱硫脱硝施工安装与运行技术》两本书，克服生产任务繁重，技术资料缺乏等诸多困难，发挥严谨务实的工作作风，力求在内容上理论联系实际，注重生产实践，保证《燃气轮机发电厂安装与运行技术》的实用性。

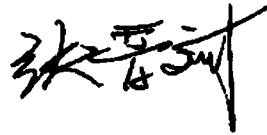
作为清洁能源应用的探索者，四川电力建设二公司把施工过程的经验结集成册，以推动节能环保事业的不断拓展。我们为客户提供天然气应用的整套解决方案，满足资源、技术与市场多重需求，能够充分整合技术优势，在大型燃气轮机联合循环机组的设计、安装、调试、运行，实现产业合作。为新兴工业园区、大型厂矿企业以及公共建筑等，提供分布式能源项目的咨询、设计、融资、建造、运营的一体化服务。相信在各界同仁的关心支持下，本书的出版，能够最大限度提高能源应用效率，争取在天然气应用创新领域有所建树，实现节能减排的目标。

公司依托自身日积月累、扎实深厚的技术，认真总结，不断提炼，希望《燃气轮机发电厂安装与运行技术》的出版，能够推动低碳节能的燃气轮机技术的发展。公司将以积极的心态，饱满的热情，在参与全球市场竞争的同时，始终以国际一流企业标准进行自我审视，力求通过技术创新占领产业制高点，努力转变发

展方式，形成长期竞争优势。我们将以更加奋发有为的精神，认真高效的团队，诚实守信的服务，投入国际竞争，努力跨入新的市场，实现更高的产业层次，为发展成为世界一流企业打下坚实的基础。

尔后，行动起来。

是为序。

A stylized handwritten signature in black ink, appearing to read '张彦苏' (Zhang Yansu).

2013.9.21

前 言

近几年来，由于能源消费导致的环境问题越来越突出，我国政府正加大整治力度，持续进行节能减排，并提出了减量化、再利用和资源化的能源发展战略。事实上，发展低碳经济和转变经济增长方式已经成为科学发展的必然要求。

天然气作为清洁能源，具有高效节能、储量丰富、启停方便的特点，对电网调峰起到重要作用，更适宜于分布式能源建设，实现冷、热、电联产。近年来，中国正加大页岩气的开发应用，不断促进产业升级。燃气轮机热电联产，能够满足用户在不同时段对冷、热、电的需求变化，达到最佳的一次能源利用效率。这样，能够大幅度减少碳排放，改善生态环境。

作为世界能源技术的重要发展方向，燃气轮机循环发电能够促进山区页岩气的应用，加之燃料方便运输、储存，具有可调节和可中断的供应特点，对水电、太阳能、风能等其他类型的能源供应，起到重要的支持和调节作用。因此，作为分布式能源系统中的重要动力装置，燃气轮机热电联产技术发展迅速。在这样的背景下，四川电力建设二公司结合工程实例，总结工程经验，将燃气轮机中的安装与运行技术结集成册，以期提高行业应用水平，实现能源与环境的和谐发展。

限于时间和作者水平，疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者提出意见和建议，以便进一步修订，使之更趋完善。

编 者

2013 年 3 月

目 录

序
前言

第一章	1
-----	---

绪论

第一节 燃气轮机的原理及应用	1
第二节 燃气轮机理论与实践	8
第三节 燃气轮机设备特点	11
第四节 辅助系统构成	18
第五节 设备选型	22
第六节 页岩气发电前景	27

第二章	31
-----	----

工程项目管理

第一节 项目管理基本涵义	31
第二节 工程项目质量控制	45
第三节 安全管理	52

第三章	67
-----	----

施工管理

第一节 施工现场管理	67
第二节 施工方案专题	73
第三节 安装技术	115

第四章	133
-----	-----

燃气轮机运行

第一节 启动过程	133
第二节 燃气轮机的运行	136

第五章	144
------------	-----

检修管理

第一节 状态检修	144
----------	-----

第二节 维修检查	146
----------	-----

第三节 燃机主要故障与处理	152
---------------	-----

后记	159
----	-----

第一章 绪 论

第一节 燃气轮机的原理及应用

一、概述

燃气轮机 (Gas Turbine) 是近几十年迅速发展起来的热动力机械, 它是以连续流动的气体为工质带动叶轮高速旋转, 将燃料的能量转变为有用功的内燃式动力机械, 是一种以空气及燃气为工质的旋转叶轮式热力发动机。它的结构与飞机喷气式发动机一样, 也类似蒸汽轮机, 主要结构由压气机 (空气压缩机)、燃烧室 (加热工质的设备) 和燃气轮机 (透平或动力涡轮) 三部分组成, 为了保证整个装置的正常运行, 除了主机三大部件外, 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。

燃气轮机的工作原理就是工质顺序经过吸气压缩、燃烧加热、膨胀做功以及排气放热四个工作过程, 完成一个由热变功转化的热力循环。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, 推动动力叶片高速旋转; 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。被驱动的主轴把输出的机械功用作驱动动力之用。因此, 由压气机、燃烧室、透平再加上控制系统及基本的辅助设备, 就组成了燃气轮机装置。如果用以驱动发电机供应电力, 就成了燃气轮机发电装置。

目前, 广泛应用的是按开式循环工作的燃气轮机。燃气轮机热电冷联产系统既可以单独使用, 承担给一栋大楼或一个小区同时提供冷、热、电三种能量的任务; 城市新建的经济开发区或者是工业园区, 在规划的时候就采用这种方式。这种以天然气为燃料的燃气蒸汽联合循环发电机组适用于大城市及负荷中心地区, 将用户与能源供给中心紧密地结合起来, 具有建设周期短, 运行方式灵活的特点, 是主要世界能源发展的努力方向。

这种以燃气轮机为主要能源供给系统不仅产出电能, 还将发电后的余热用来加热锅炉, 大大提高了能源利用率, 具有良好的社会效益、节能效益和环境效益。具有效率高、占地少、保护环境、适合负荷特性灵活、输电损失小、供电可靠性高、初投资低等优点。

实际上, 在负荷较为集中的地区, 常采用联合循环发电方式: 燃气轮机及发电机与余热锅炉、蒸汽轮机共同组成的循环系统, 它将燃气轮机排出的高温乏烟气, 通过余热锅炉回收转换为蒸汽, 再将蒸汽注入蒸汽轮机发电。形式有燃气轮机、蒸汽轮机同轴推动一台发电机的单轴联合循环, 也有燃气轮机、蒸汽轮机各自推动各自发电机的多轴联合循环。

二、燃气轮机进展历程

燃气轮机是继汽轮机和内燃机问世以后, 吸取了二者之长而设计出来的, 它是内燃的, 避免了汽轮机需要庞大锅炉的缺点; 又是回转式的, 免去了内燃机中将往复式运动转换成旋转运动而带来的结构复杂, 磨损件多, 运转不平稳等缺点。但由于燃气轮机对空气动力学和高温材料的要求超过其他动力机械, 因此, 人们一起在努力发展燃气轮机新技术并使之实用化, 包括现在中国正潜心于发展高温材料的国产化, 致力于中国制造的燃气轮机发展。

世界上的工业燃气轮机经过近 70 年的发展,技术已经成熟。特别是近 20 多年,美国、西欧和日本各国都制定了扶持燃气轮机的产业政策和计划,投入大量研究开发资金,使燃气轮机性能指标逐步提高。目前,先进燃气轮机的效率已达 $36\% \sim 41.6\%$,最大单机功率已达 340MW。组成联合循环机组后,发电效率最高达 60% ,联合循环机组已成为发电市场的主流机组。

20 世纪 80 年代末起,重型燃气轮机普遍采用了航空发动机的先进技术,发展了一批大功率、高效率的燃气轮机,既具有重型燃气轮机的单轴结构、寿命长等特点,又具有航空发动机的高燃气初温、高压比、高效率的特点,透平进口燃气温度达 1300°C 以上,简单循环发电效率达 $36\% \sim 38\%$,单机功率达 200MW 以上。

20 世纪 90 年代后期,大型燃气轮机开始应用蒸汽冷却技术,使燃气初温和循环效率进一步提高,单机功率进一步增大。透平进口燃气温度达 1400°C 以上,简单循环发电效率达 $37\% \sim 39.5\%$,单机功率达 340MW。

这些大功率高效率的燃气轮机,主要用来组成高效率的燃气蒸汽联合循环发电机组,由 1 台燃气轮机组成的联合循环最大功率已达 530MW,供电效率 60% 。另外,燃气轮机及其联合循环由于初始投资少,占地面积小,耗水量少,环保性能好,已经成为燃用天然气和石油制品的电厂的主要选择方案。如今燃气轮机已经成为电力工业的一个重要组成部分,燃气轮机技术得到了快速发展。

第一台用于商业化的燃气轮机诞生于 1939 年,由瑞士 BBC 公司制造,功率 4000kW,正式投运后,全世界开始更多的关注燃气轮机的快速发展。由于燃气轮机本身固有的优点和其技术经济性的不断提高,具有效率高、功率大、体积小、投资省、运行成本低和寿命周期较长等优点,主要用于发电、交通和工业动力。燃气轮机分为轻型燃气轮机和重型燃气轮机,轻型燃气轮机为航空发动机的转型,其优势在于装机快、体积小、启动快、简单循环效率高,主要用于电力调峰、船舶动力。重型燃气轮机为工业型燃机,其优势为运行可靠、排烟温度高、联合循环组合效率高,主要用于联合循环发电、热电联产。

燃气轮机从 20 世纪 50 年代开始进入发电行业。随着燃气轮机及其联合循环技术日臻成熟、世界范围天然气资源的进一步开发以及人们环境保护意识的增强,它在世界电力系统中的地位发生了显著的变化,不仅可以用作紧急备用电源和尖峰负荷机组,而且还能承担基本负荷运行。

在石油天然气工业中,由于油田的位置相对较偏,其开发和建设往往会使用电量急剧增加。建造大功率烧煤电站不具备条件(没有煤炭,交通不便,水源紧张,施工困难等),周期也不能满足要求,而燃气轮机电厂功率不受限制,建造速度快,对现场条件要求不高,油田有充足的可供燃用的气体。比如在四川达州地区,由于发现了新的气田,因此,燃气轮机发电得到了应用。

在其他工业园区,有多种工业需要,不仅需要大量电能,而且需要大量热(例如蒸汽)。这时用燃气轮机来功热联供,在满足这两方面需要的同时,还能有效地节能,故应用发展较快。近年来,燃气轮机在电站中得到了迅速的发展,由于燃气轮机启动迅速,且能在无外界电源的情况下启动,机动性好,用它带尖峰负荷和作为紧急备用机组,可保证电网的安全运行,因而被广泛地应用。

燃气轮机发电主要有三种方式,一种是燃气轮机发电机组,排气直接供热,这种方式的

发电机组容量通常较小，如图 1-1 所示。第二种是燃气轮机蒸汽循环模式。由燃气发电机组的排气产生的热量加热蒸汽，用热用户提供蒸汽，同时，热能也带动制冷机，这种方式可以供应较小的负荷区域。如成都某会展中心采用此种方式，根据负荷需求开机停机，夏天供冷，冬天供热，蒸汽还可以供与附近的海洋公园，如图 1-2 所示。第三种是燃气轮机发电机组和排汽至余热锅炉，推动汽轮发电机继续发电、供热，这种方式称为联合循环模式，如图 1-3 所示。

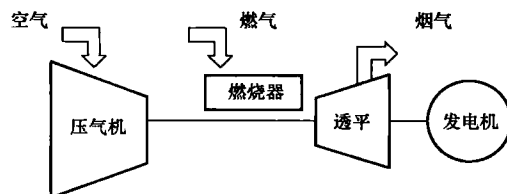


图 1-1 燃气发电模式

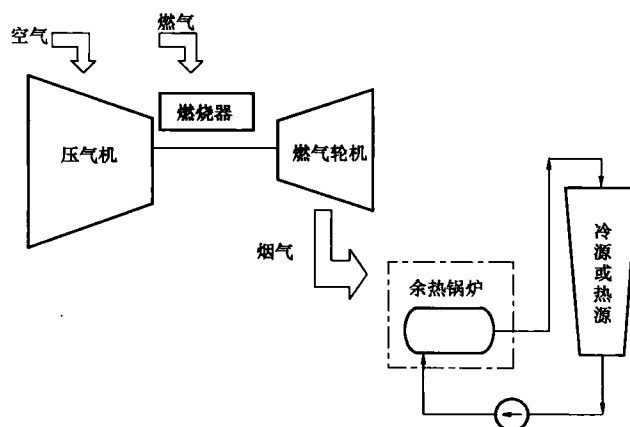


图 1-2 燃气—蒸汽循环模式

先进的燃气轮机已普遍应用模块化结构，运输、安装、维修和更换都比较方便，而且广泛地应用了振动和温度监控，焰火保护等措施，其可靠性和可用率大为提高，指标已超过了蒸汽轮机电站的相应指标。此外，在环保方面，出于燃气轮机的燃烧效率很高，排气干净，未燃烧的碳氢化合物，CO、SO_x 等排放物一般的都能够达到严格的环保标准，再结合应用注水或注蒸汽抑制燃烧、干式低 NO_x 燃烧室，或者在排气管路中安装选择性催化还原装置（SCR）等技术措施，可使氮化物的排放满足最严格的环保要求。因此，燃气轮机发电机组，特别是燃气—蒸汽联合循环机组已作基本负荷机组或备用机组得到了迅速的应用。

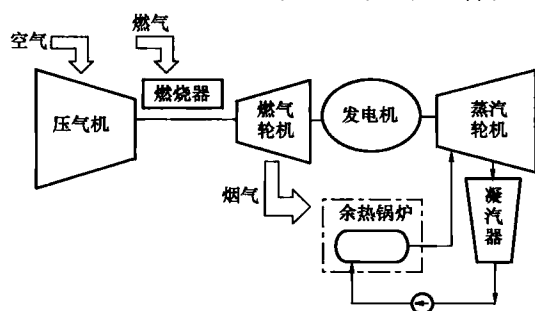


图 1-3 燃气联合循环模式

近年来，燃气轮机的发展重要还是围绕着增加单机功率，提高效率和经济性，燃用多种燃料和廉价燃料，减少对环境有害影响来进行的。诸如加强高温材料的开发，提高冷却技术，发展闭回路蒸汽冷却燃气轮机，发展新型航空改型燃气轮机，开发先进的燃气轮机循环，进一步发展清洁煤技术等。

三、燃气轮机特点

高效大功率的燃气—蒸汽轮机联合循环机组的出现，已可直接替代常规燃煤蒸汽轮机发

电机组,因而燃气轮机市场大功率机组占主要份额。由于燃气轮机排放污染小的优点,在经济发达地区或人口密集地等特定地区不宜再装燃煤机组,而主要以燃气轮机发电。世界上许多著名大城市作出不再装燃煤机组的决定,由燃气轮机发电替代。由于燃气轮机启动快,快速反应性能好,在电网中发挥调峰、调节或应急备用的作用;燃气轮机占地面积小,耗水少或不耗水,是海上平台或沙漠地区的发电动力,此外油气田直接使用油、气为燃料,当然应用燃气轮机发电。在实际应用中,燃气轮机相比于燃煤电站而言,主要有以下特点:

1. 发电的高效率

燃气—蒸汽联合循环由燃气轮机简单循环和朗肯循环构成,实现了能源的梯级利用,发电效率高达 56% 以上,形成极具经济性与环保性的火力发电特点。这是常规燃煤电厂根本无法比拟的高效率,把天然气的资源利用率整整提高了 50%。

2. 排放的低污染

燃气轮机利用天然气燃烧发电,相对于其他燃料发电,天然气燃烧后不产生灰尘和炉渣,因而不会对环境产生灰渣污染;天然气燃烧后几乎不产生二氧化硫,常规燃煤电厂的废气、废水排放没有了,成熟的技术把氮化物与二氧化硫的排放量降到极低的水平,起到了改善整个生态环境,保护环境的目的。

3. 节约用水, 减少用地

由于燃机冷却用水量极少(不足同容量汽轮发电机组冷却用水量的 1/80),只有余热锅炉需用化学除盐水,汽轮机需要冷却水,联合循环需水量大大降低,节约宝贵的水资源。燃气轮机发电最适宜缺水地区的应用。燃气轮机、余热锅炉均采用模块设计安装,辅助系统又少,因而联合循环占地面积较小,一般不足常规燃煤电厂的 2/5,节约宝贵的土地资源。特别有利于在城市市场负荷中心使用。

4. 运行维护方便, 费用较低

燃气—蒸汽联合循环电厂自动化控制程度极高,操作简单,能够节约大量的人工成本,提高工作效率,降低劳动力成本。由于联合循环辅助设备简单,故障率较低,大修周期高于 4800h,维护方便,维护费用较低。

5. 厂用电率低

大型燃气轮机联合循环电厂厂用电率一般为 2%~3%,而同等燃煤电厂一般接近 7%,与联合循环电厂相比降低 4%。以一个 60 万 kW 等级电厂来计,每年电厂本身可节约用电 1.2 亿 kWh,大大降低能耗,经济效益十分可观。

6. 机组运行灵活

燃气机组的快速加载能力强,有利于加强系统的调频能力和事故反应能力。燃气—蒸汽联合循环机组的加载速率大于 2%,可以满足系统快速加载要求。燃气—蒸汽联合循环机组的最小稳态负荷为 5%,作为电网事故备用时的可调容量高达 95%,远高于煤电调峰机组的 60%。由于大型燃气—蒸汽联合循环机组在 10min 内可启动并网带负荷,根据有关规定可以作为系统的冷备用,增强了系统对事故的反应能力。

四、中国的应用情况

20 世纪 60 年代末期开始,我国还是从瑞典、英国、加拿大、日本、美国等国引进了数十台燃机,分别用于尖峰负荷电站,列车电站,基本负荷电站和输油管线上。进入 20 世纪 80 年代,随着国民经济的高速发展,特别是在经济特区、沿海和南方城市,普遍存在着电

力建设跟不上国民经济发展的状况,解决电力供需矛盾已是燃眉之急,因此纷纷引进并建成了一批简单循环燃气轮机和燃气—蒸汽联合循环电站。到 20 世纪 80 年代后期,装机总量已近 1800MW。进入 90 年代,发展速度更快。燃气轮机电站正以其独具的优点,引起人们越来越多的关注和兴趣,不断获得应用和发展。

1. 发展历史

中国的燃气轮机主要是依靠当时苏联援建,上海汽轮机厂 1962 年试制船用燃气轮机,1964 年与上海船厂合作制成 750hp (550kW) 自由活塞燃气轮机,1965 年制成 6000kW 列车电站燃气轮机,1971 年制成自行设计的 3000kW 卡车电站燃气轮机,另外同 703 所合作制造了 4000hp (3295kW)、6000hp (4410kW)、改装喷气发动机成 25 000hp (18 380kW) 等几种船用燃气轮机组。

哈尔滨汽轮机厂 1969 年制成自行设计的 3000hp (2.24MW) 机车燃气轮机,制成 1MW 的自由活塞燃气轮机,另外,改装航空发动机成 10 000hp (7.35MW) 及 22 000hp (16.18MW) 燃气轮机,1973 年与 703 所合作设计制造成 6000hp (4.41MW) 船用机组,与长春机车车辆厂合作设计制成 4000hp (3.295MW) 机车燃气轮机。20 世纪 80 年代又试验重油燃烧和匹配紧凑式回热器以改善其技术经济性指标。

南京汽轮电机厂 1964 年制成 1500kW 电站燃气轮机;1970 年试造了 50hp (37kW) 泵用燃气轮机,1972 年制成自行设计的 1000kW 电站燃气轮机,1977 年制成 20MW 快装电站燃气轮机;20 世纪 80 年代,同 GE 公司技术协作,生产出 PG6541B 型 36.6MW 燃气轮机。

除此之外,还可以提到的是东方汽轮机厂 1978 年试制成 6MW 发电用燃气轮机,杭州汽轮机厂和青岛汽轮机厂 1972 年制成 200kW 燃气轮机,北京重型电机厂 1979 年改装涡轮螺桨发动机成 2MW 机组,在中原、克拉玛依等油田运行,成都发动机公司与 PW 公司和 TPM 公司于 1986 年签订了一起研制、生产并推销 PW 公司 JT8D 涡扇发动机的工业变型 FT8 型燃气轮机的合同,功率为 24.8MW,效率为 38.7%。

2. 中国制造 QD-128

当前,中国自主产权的燃气轮机比较好的是 QD-128,这款燃气轮机是由沈阳航空发动机设计研究所设计,沈阳黎明航空发动机集团公司进行成套设计并加工制造的,完全拥有自主知识产权,百分之百国产化的中等功率水平的燃气轮机已用于国内某通信公司的自急电源,并在 2011 年 12 月出口至伊拉克。

它的燃气发生器是采用先进的成熟技术设计的,其输出功率是国内自行研制型号中输出功率最大的,热效率也是国内自行研制型号中最高的,其技术性能处于世界中等偏上水平。

QD-128 燃气轮机具有良好的性能,设计时大量采用成熟机种的技术和结构,严格按照国军标和型号规范进行研制的,其主要结构的强度、寿命、设计裕度都满足了英国和俄罗斯的设计规范。在研制中,吸取了国内外航机改燃机的经验教训,对长寿命使用中容易发生的耗损型、蚀损型和磨损型等故障,采取了有效的改进措施。该型燃气轮机工作参数裕度较大,具有可靠的试验基础,并采取了保护轴承寿命的措施,其制造所需的材料、工艺及成附件完全立足于国内,所采用的新材料和新工艺已通过专家评审鉴定,具有较好的工作可靠性。

基本结构类型为轴流、双轴、后输出轴。可广泛用于发电、热电联供、管输增压等动力

装置。也可用于医院、电信系统、机场、宾馆、现代化小区、石油天然气等部门，建立自己独立的能源系统。主要技术参数有：功率 12 800kW，热耗率 14 100kJ/kW 时，热效率 30%，压比 13.5，流量 62kg/s，动力涡轮转速 4700r/min，出口温度 516℃。

3. 引进机组自主化生产

大型燃气轮机是技术密集型产品，集多项高新技术于一体。其核心技术包括高效率高性能的通流部分设计技术、燃烧技术、先进的冷却技术、高温部件材料、制造工艺、涂层保护技术、高转速机械轴系稳定性、总能系统的优化技术、先进控制技术等。实现燃气轮机的自主化制造，需要投入大量的资金和装备。在消化吸收引进制造技术、实现燃气轮机联合循环成套设备自主化生产的基础上，还必须有针对性地对燃气轮机关键技术进行科研攻关，进行二次开发，掌握大型燃气轮机研制的核心技术，逐渐形成自主设计开发体系，促进我国燃气轮机产业发展。

(1) 消化吸收引进技术。自主化制造的 F 级燃气轮机各项技术性能指标应达到国外同类产品水平，并形成批量生产能力。其中包括压气机研制、燃气透平研制、燃烧系统研制、燃气轮机控制系统研制、燃气轮机总装配技术消化吸收。关键制造技术包括：大型压气机和透平缸加工技术，叶轮端面齿、轮槽及拉杆孔的加工技术，长拉杆制造技术，压气机叶片制造技术，燃烧室部件制造技术，带冷却通道的单晶和定向结晶透平叶片成型技术，叶片涂层技术，转子组装技术，燃气轮机总装和试车技术等。同时相应地形成具有自主知识产权的制造标准和工艺规范。

根据制造的难易程度以及对加工设备的精密度要求，较容易实现自主化制造的是燃气轮机总装，压气机缸体、燃烧室缸体、透平缸体的加工，进而是压气机的动静叶片制造，难度较大的是压气机转子、燃烧室、透平转子和叶片以及控制系统的自主化制造。

从发达国家燃气轮机产业发展经验分析，有两个项目目标将标志自主化制造的技术水平和产品质量水平，即燃气轮机转子的加工和组装，燃烧室和透平叶片等热通道部件的制造。只有完成了这两大部分的自主化制造后，才能真正实现燃气轮机制造的自主化。

(2) 燃气轮机辅助系统制造技术消化吸收。燃气轮机辅助系统主要包括燃气轮机进排气系统、天然气调压系统及前置模块、润滑油系统及控制油系统、压气机水洗系统、变频启动系统、罩壳及消防系统等，是实现自主化制造的主要组成部分，由于这部分设备国外制造商大多是向分包商采购，因此也只向国内企业提供采购技术规范。辅助系统的自主化首先需要国内企业按技术规范进行设计，然后进行制造采购。一般来说，除了少量关键部件目前尚需进口外，辅助系统的大部分可以实现自主化制造。

(3) 燃气轮机设计技术研究。这也是燃气轮机核心技术开发的重要内容，包括：燃气轮机热力系统参数优化设计的计算机程序开发，燃机控制技术，单轴布置的长轴系联合循环机组的轴系稳定性研究，高温转子及叶片材料制造技术；压气机通流部分的气动设计规律和方法以及各级叶形的成型规律研究，压气机各级之间的匹配规律和整台压气机特性曲线的研究，相关的计算机程序开发，压气机各级叶轮、持环、动静叶片的强度和振动特性分析和结构设计研究；燃气透平通流部分的气动设计规律和方法以及各级叶形的成型规律研究，各级叶轮和动静叶片的温度场计算，特别重点研究透平动叶和静叶的冷却结构，燃气透平各级叶轮、持环、动静叶片的强度和振动特性分析和结构设计研究；燃烧室燃烧过程组织方法的研究，干式低 NO_x 燃烧室中空气流量及燃料流量的分配规律研究，与燃烧稳定性、火焰管和

过渡段壁温有关的特征速度分析, 燃料喷嘴特性和设计方法研究; 燃气轮机联合循环机组特性研究, 包括功率和热效率随大气温度、大气压力、燃料特性、流阻损失系数、冷却水温、大气相对湿度、老化效应而变化的修正曲线的理论计算方法和程序研究。

(4) 三压再热余热锅炉和联合循环汽轮机自主化制造。这部分设备我国自主化制造的条件比较充分, 需要投入的主要是设计技术的研究。三压再热余热锅炉含自然循环和强制循环两种炉型, 关键技术包括锅炉结构和受热面布置研究, 高效传热和烟气阻力小的翅片管研究, 低温段受热面的低温腐蚀机理研究, 多压再热余热锅炉热力系统研究及方案设计, 多压余热锅炉设计软件开发等。

适用于三压再热循环和单轴布置的大功率联合循环汽轮机的关键技术也集中在设计技术研究, 主要包括多压补汽的高中压缸及低压缸研制, 汽轮机高中低压旁路系统及控制装置研制, 真空除氧式凝汽器及抽气系统研制及工艺研究, 汽轮机快速启停的转子和汽缸结构设计技术研究, 汽轮机滑压变工况特性研究, 轴向或侧向排汽低压缸结构及轴承支承方式研究等。

五、燃气轮机发电技术的探索

到 21 世纪的今天, 燃气轮机发电技术发展的目标仍然是高效、洁净及便于应用等方面, 但是技术路线该有一种革命性的变化。对此加以研究也许能使我国作为新兴的发展中国家缩短发展历程, 加快跨入世界先进行列。

1. 洁净煤发电技术

当前, 最具发展潜力的洁净煤发电技术正在世界各地积极发展, 其中, 最具影响力的是整体煤气化联合循环 (IGCC-Integrated Gasification Combined Cycle) 发电系统, 是将煤气化技术和高效的联合循环相结合的先进动力系统。

IGCC 主要由两大部分组成, 即煤的气化与净化部分和燃气—蒸汽联合循环发电部分。第一部分的主要设备有气化炉、空分装置、煤气净化设备 (包括硫的回收装置), 第二部分的主要设备有燃气轮机发电系统、余热锅炉、蒸汽轮机发电系统。IGCC 的工艺过程如下: 煤经气化成为中低热值煤气, 经过净化, 除去煤气中的硫化物、氮化物、粉尘等污染物, 变为清洁的气体燃料, 然后送入燃气轮机的燃烧室燃烧, 加热气体工质以驱动燃气透平做功, 燃气轮机排气进入余热锅炉加热给水, 产生过热蒸汽驱动蒸汽轮机做功。

IGCC 技术把高效的燃气—蒸汽联合循环发电系统与洁净的煤气化技术结合起来, 既有高发电效率, 又有极好的环保性能, 是一种有发展前景的洁净煤发电技术。在目前技术水平下, IGCC 发电的净效率可达 43%~45%, 今后可望达到更高。而污染物的排放量仅为常规燃煤电站的 1/10, 脱硫效率可达 99%, 标准状况下, 二氧化硫排放约在 25mg/m³ (目前国家二氧化硫为 1200mg/m³), 氮氧化物排放只有常规电站的 15%~20%, 耗水只有常规电站的 1/2~1/3, 利于环境保护。

2. 新材料的研发

一些发达国家在燃气轮机发展道路上做过了大量的工作, 自压气机、透平、叶形、燃烧、材料、涂层、热部件的冷却, 以及机械结构、制造工艺和控制技术等, 都是通过反复试验研究, 逐步取得进展的。

美国 GE 公司 20 世纪 40 年代在航空喷气发动机上按气动理论设计制造第一台压气机, 以后的机组在叶形设计上不断试验研究改进, 在新型机组上加级增加压比, 建立大型的压气

机试验台,叶形从亚音速研究到跨音速,超音速,到今天代表最新技术的是采用可控扩压叶形全三维设计。从 20 世纪 70 年代开始涡轮压气机的模化设计技术,让燃气轮机技术发展进入了一个快速期,由此开始新研究、设计一台新机组就不必从原始的叶形理论计算、试验开始了,完全可以由现有性能优良机组的水平上模化放大改进了,该公司因此派生出大批机种型号。

众所周知,叶片材料是燃气轮机提高燃气初温和提高机组热效率的首项技术。各燃气轮机开发公司对高温部件材料从母合金研究开始,发展钴基,镍基,以后研究同向结晶、定向结晶,最新技术采用单晶材料,选定一种新材料往往通过几十种材料的优化筛选,要做金相、蠕变、拉伸、冲击、冷热疲劳等各种试验研究,花费几十年的时间。美国 GE 依靠叶片材料的改进来提高燃气初温几乎已走到尽头。从 GE 颁布的材料性能曲线来看,目前采用的 DSGTD-111 (定向结晶) 和 SCALLOYS (单晶合金) 能使燃气初温的提高已是很有限制的,GE 在 H 级机组上采用 1430℃ 的初温是采用蒸汽闭式冷却后得到的,这一技术使燃气初温提高了 500~800℃,而蒸汽闭式冷却是利用蒸汽和能源回收的一项能源综合利用技术。

事实上,在综合利用能源优化技术和改善材料参数是提高燃气轮机发电热效率的有效方式。ALSTOM 的 GT24/GT26 机型采用两段分部燃烧,这也是燃气轮机技术的一种革命性的新突破。两次燃烧过程的特点是,通过使燃气膨胀到居中的一个压力状态,把燃烧过程分成两个阶段,即所谓的再加热过程,把燃气加到更高的平均温度。与燃气轮机传统的单级燃烧过程相比,它可以获得更高的效率和更大的功率密度。这些机组能在采用不是最高的燃气初温的条件下实现高效率和高性能。其主要技术优点是:

1) 初温低、效率高 [初温 1260℃ (比 GE9351FA 的温度 1327℃ 低 67℃),简单循环效率达 39.3% (GE9351FA 高 1.7%)]。

2) 由于两次燃烧,压气机采用 30:1 的高压比的航空型压气机后,排气温度仍能达到 657℃ (比 GE9351F 的排气温度 609℃ 高 48℃),因此其联合循环效率可达 58.96% (比 GE9351FA 约高 1.49%)。

3) 采用三级可调导叶,使压气机流量调节范围达到 60%,因此联合循环机组在 50% 部分负荷运行时,相对热耗比常规机组低 15%。

4) 由于两次燃烧环保型燃烧室的采用,一次燃烧室火焰温度较低,NO_x 也较低,两次燃烧室出口的 NO_x 比其在进口更低。

两次燃烧过程可以看成由两套燃烧室和涡轮机串联在一起,即燃气由第一级的涡轮机排出,再进入第二级燃烧室进行加热。由一组 22 级高效亚音速压气机将空气以两倍于常规燃机压比的高压压入第一级环形环保燃烧室,燃料与高压空气充分混合,并在第一级环形环保燃烧室燃烧,排出的高温燃气驱动第一台涡轮单级高压涡轮。与常规燃气轮机不同的是,燃气由高压涡轮出口排出后,会进入第二级环形环保燃烧室,在这里,将再一次喷入燃料并自动点燃,从而对燃气再一次加热,以便在接下来的四级低压涡轮中膨胀作功。



第二节 燃气轮机理论与实践

一、热力过程

简单循环的燃气轮机,其通流部分由进排气管道和燃气轮机的三大件即压气机,燃烧