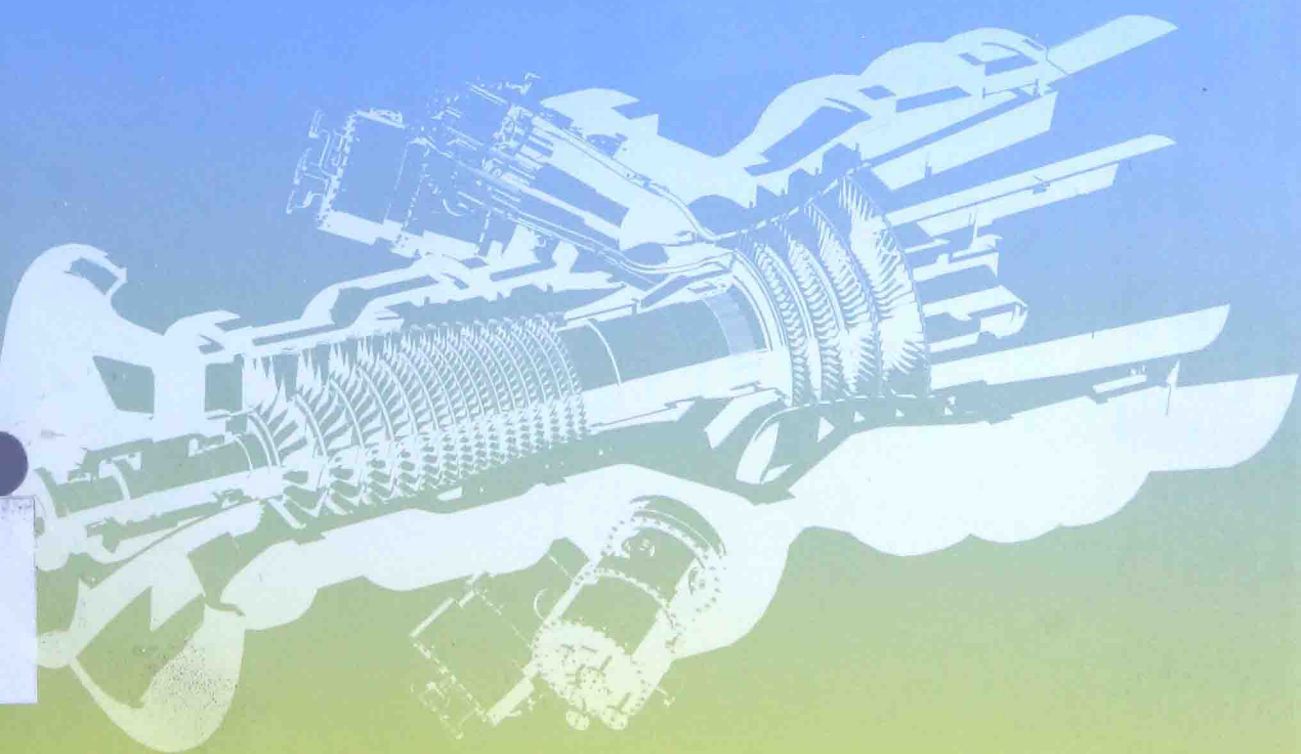


高效低碳环保
大型燃气轮机电厂

工程实践

—— 技术篇 ——

华北电力设计院有限公司 编

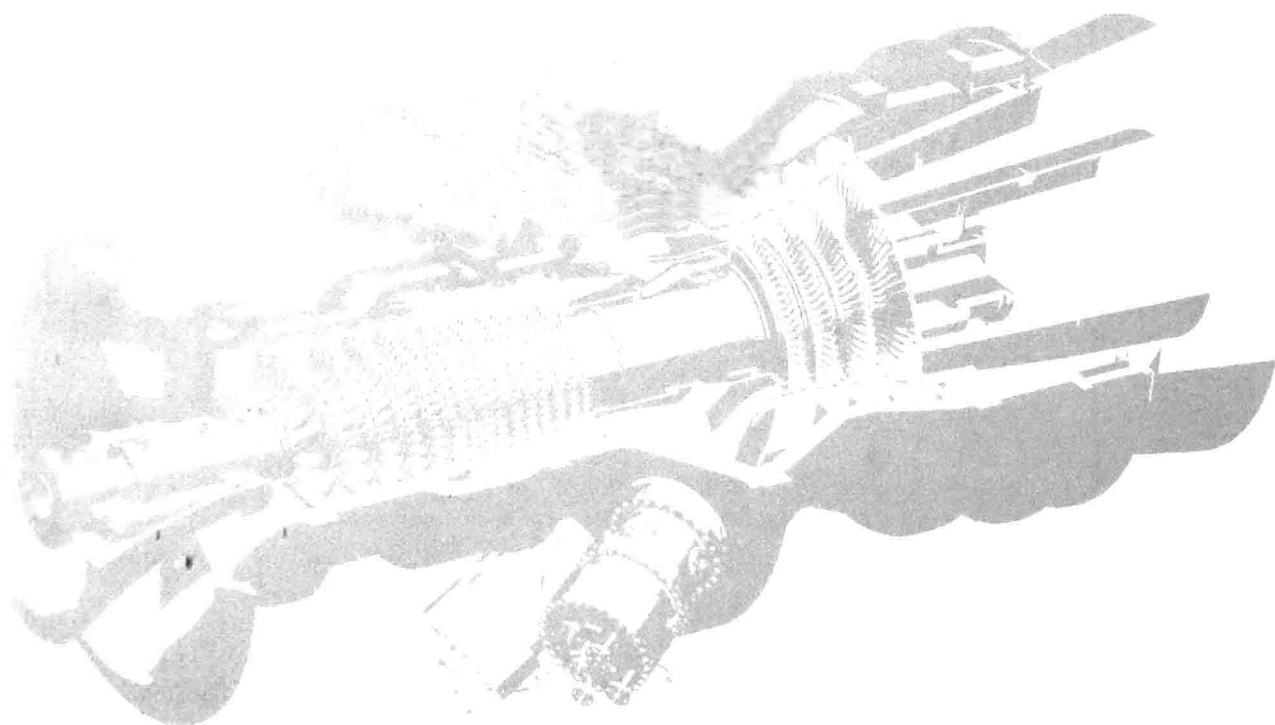


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

高效低碳环保 大型燃气轮机电厂 工程实践

—— 技术篇 ——

华北电力设计院有限公司 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

高效低碳环保大型燃气轮机电厂工程实践. 技术篇/华北
电力设计院有限公司编. —北京: 中国电力出版社, 2015.1
ISBN 978-7-5123-6897-2

I. ①高… II. ①华… III. ①发电厂—燃气轮机—发
电机组—电力工程 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 296555 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 29.75 印张 826 千字
印数 0001—2000 册 定价 90.00 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



华北院公司是中国能源建设集团有限公司旗下企业，在燃气轮机电厂设计方面处于国内领先地位，在国际市场上也崭露头角。燃气轮机电厂燃用天然气等相对清洁的能源，即使不采用脱硫脱硝技术，其二氧化硫及氮氧化物的排放也可低于国家规定的环保标准。相比于燃煤电厂，燃气轮机电厂还具有热效率高，工程总投资低，建设周期短，占地和用水量少，自动化程度高等优点。燃气轮机电厂的这些突出优势，使之成为贯彻节能减排要求的首选。

近年来，国家制定相关政策鼓励天然气及分布式能源项目，电力行业“十二五”规划提出“十二五”期间新增5800万kW燃气发电，“十三五”

期间新增4500万kW燃气发电。华北院公司把握燃气轮机业务发展机遇，加大科研力量，展开技术攻关。截至目前，华北院公司设计、建设的燃气轮机项目近50台，多个项目获得行业一等奖，华北院公司在燃气轮机项目上积累了丰富的工程经验。

这本书提炼了华北院公司承担燃气轮机项目的创新亮点和技术优势，希望华北院公司再接再厉、继往开来，为中国清洁能源应用，中国能源消费结构改善和美丽中国建设做出新的贡献。

中国能源建设集团有限公司董事长、党委书记

汪建平



神华集团有限责任公司以为社会发展提供绿色能源作为企业使命，坚持矿、路、港、电、化一体化发展，打造国际一流大型能源企业。神华集团的电力产业积极采用环保技术，有效控制污染物排放；积极转变发展方式，优化电源点结构，大力开发绿色发电项目。

华北院公司在燃气轮机发电设计方面创造了诸多国内领先的业绩，设计优化创新的同时也为用户带来良好的收益。由神华国华公司投资、华北院公司设计的在建北京燃气热电工程，项目设计技术指标和环保指标国内领先，项目设计获得2012年度电力行业优秀工程咨询成果奖。

在中国环境污染日趋严重的今天，燃气轮机发电作为洁净、高效、低碳的发电技术，其应用前景十分广阔。希望华北院公司在燃气轮机电厂设计方面继续努力，以技术创造效益，为用户提供优质的产品，为中国的能源建设事业及环保事业做出更大贡献。

神华集团有限责任公司副总经理



中国华能集团公司致力于建设具有国际竞争力的大企业集团。近年来华能集团不断加快结构调整步伐，优化发展煤电，大力发展水电，积极发展风电、太阳能及其他新能源发电，努力发展核电，继续发展天然气发电，持续提高传统能源的高效清洁利用水平和低碳清洁能源装机比重。

由我公司投资建设、华北院公司设计的北京高碑店热电厂燃气热电联产扩建工程，机组多项技术指标为同类机型中最好水平。项目机组供热能力、热效率及机组出力水平突出，能耗水平低，项目技术特点鲜明，突出节能环保，取得多个国内第一，获得国家优质工程金奖，并获得电力行业优秀工程设计一等奖等奖项。同时，工程整体上按花园式理念设计，建筑外观为后工业化造型，使电厂成为首都五环边一道美丽风景。

在工程项目建设中，华北院公司充分展现了其在燃气轮机电厂设计领域的行业领先优势，燃气轮机电厂设计队伍素质过硬，专业设计理念和技術国内领先。希望华北院公司在燃气轮

机电厂设计领域再接再厉，继续加大技术创新，以更好的服务回报客户，不断取得新的成绩。

中国华能集团公司副总经理、党组成员

北京能源投资（集团）有限公司作为北京市电力能源投资建设主体，担负着首都电力、热力等能源项目的投资、建设以及节能环保技术的开发等重任。集团以提高发展质量和效益为中心，坚持“稳字为首、北京为重、资源为先、效益为本”的“四为”导向，积极实施“稳节奏、谋布局、优结构、强管理、促发展”的经营方针，不断增强服务北京能力和可持续发展能力。

集团在北京投资建设的7个燃气热电厂，均由华北院公司设计。电厂设计立足于清洁高效、环境友好、少人值守的理念，突出了去工业化城市花园式电厂特点，实现了经济效益与社会效益的共赢，堪称国内城市电厂的典范。

华北院公司在燃气热电厂建设过程中展现了过硬的燃气轮机电厂设计实力和水平，项目技术指标先进，提供了令人满意的服务。本书对城市燃气热电厂的建设具有重要的参考价值和借鉴意义。



北京能源投资（集团）有限公司总经理

何明生

天津能源投资集团有限公司（以下简称“能源集团”）作为天津市能源项目建设与运营管理主体，以能源产业政策和市场需求为导向，以“四源”，即：电源、气源、热源、新能源产业为主业，大力实施政府能源产业规划。作为天津市能源产业投融资平台，以雄厚的综合实力在服务保障天津能源供应事业中发挥着政府主力军的作用。

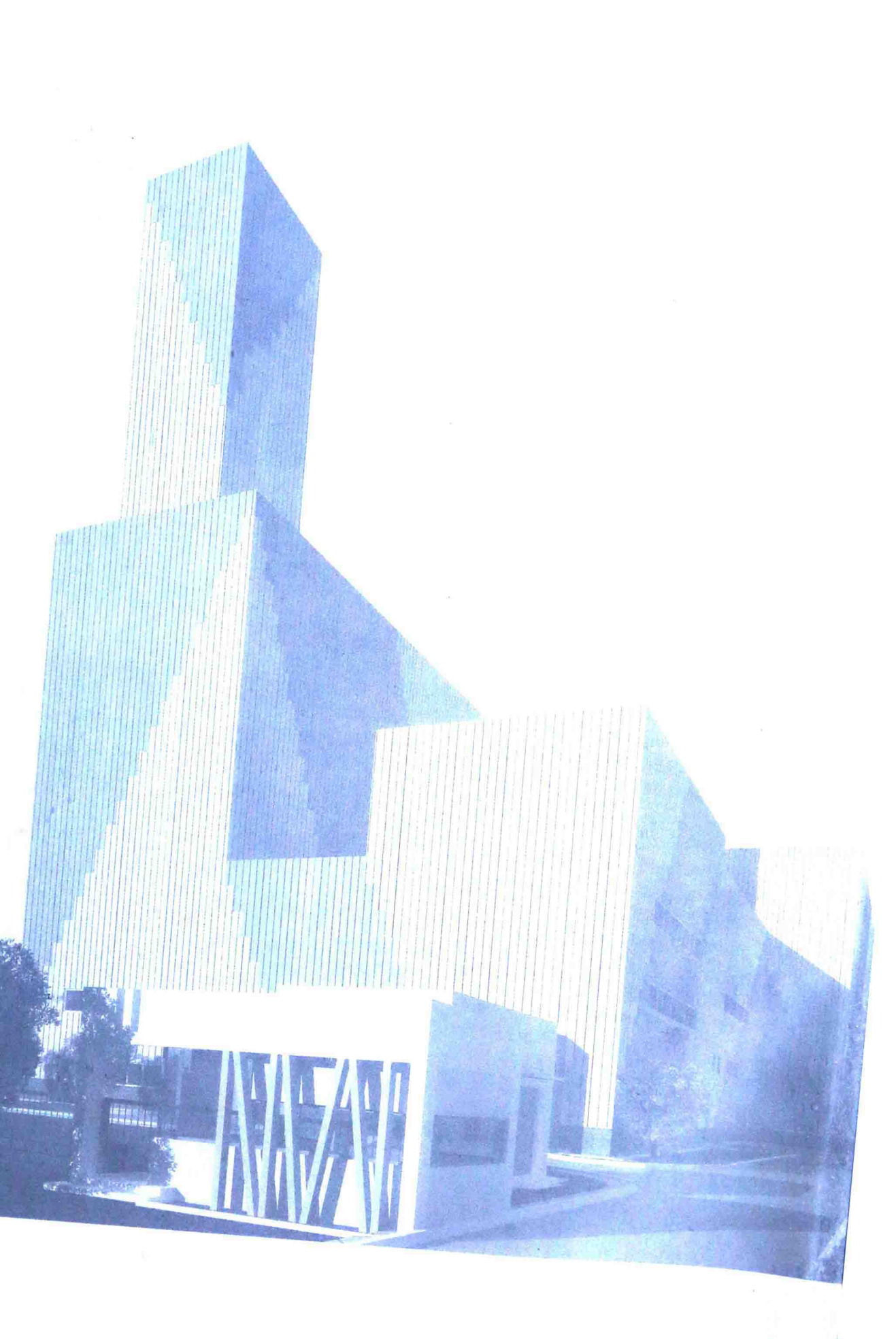
华北院公司作为目前国内设计燃气轮机电厂最多的专业设计院，承揽了天津市所有的燃气轮机供热电厂设计。在建的陈塘庄热电厂煤改气搬迁工程为能源集团投资、华北院公司设计，该工程装机容量创国内最大，规划6套“二拖一”机组，机组配置先进、供热能力大、热效率高，获得电力行业工程咨询成果一等奖。

华北院公司在大型燃气轮机电厂设计方面经验丰富，且善于总结，敢于创新，主动服务意识强，设计的燃气轮机电厂技术指标先进，节能减排效果明显，为天津市的碧水蓝天起到了积极的作用。



天津能源投资集团有限公司党委书记、董事长

李兆生



编写委员会

主任委员 刘朝安

副主任委员 朱大宏 詹 扬

委 员 （按姓氏笔画排序）

于存亮 王健山 韦思亮 卢 安 危元华 关韵铎

汤晓舒 孙永斌 李玉峰 李惠民 连艳红 张兴无

张 钧 张富礼 陆 勇 陈赢展 林 炜 段 冰

曾小超 鞠 红

主 编 孙永斌 于存亮

副 主 编 李惠民 陈赢展 张富礼 韦思亮 林 炜 鞠 红

关韵铎 张 钧 王健山 段 冰 卢 安 李玉峰

汤晓舒 连艳红 曾小超 陆 勇 张兴无

参编人员 （按姓氏笔画排序）

丁 宁	丁国光	习从婷	于 南	马占芳	尹琥瀛
王 见	王 慧	王 馨	王子庠	王云泽	王 冰
王丽娜	王建肖	王英林	王秋瑾	王艳蕾	王惠芸
王 慧	付 铁	冯 璟	冯丽娟	卢立果	卢 放
史小薇	史沁鹏	申 斌	关 欣	刘 伟	刘 军
刘军梅	刘 利	刘 娟	刘海燕	刘 皓	刘韞颖
刘磊明	吕 贝	孙 政	孙兰英	孙育文	孙玲玲
孙 娟	安 梅	朱常慎	邢宇萌	何赞峰	吴彩虹
宋 昉	张 华	张 鹏	张力强	张治宇	张 玮
张清宇	李 雅	李 霞	李正枫	李红军	李 玲
李晶晶	杜 卉	杨 菁	沈涵孜	邵一鸣	陆 敏
陈 良	陈 磊	陈 明	陈永辉	陈昀昀	陈贤进
陈晓勇	陈 静	孟 凌	孟宪彬	孟淑芳	林宏文
罗建国	范立婷	侯全辉	段丽平	胡 志	赵 然
赵丽霞	钟文英	唐海峰	夏应朴	徐 清	徐英特
徐春丽	徐 洁	徐淑娇	敖子陶	贾 静	贾丹瑶
贾江涛	贾运智	贾京芳	贾宝荣	郭 茹	郭海斌
钱 忠	钱莉莉	陶祯燕	陶 蕾	高北凤	康 征
曹 建	曹希萍	曹炫军	曹瑞春	梁守朋	龚宇红
葛利春	董 浩	蒋征平	谢玉珑	韩 晔	韩新勇
鲁燕宁	解 鹏	熊 灿	翟立新	潘国英	潘 莉
冀长青	穆长生	薛 蓉	薛晶晶		

序



自 1939 年世界第一台重型燃气轮机在瑞士投入发电运行以来，燃气轮机和燃气蒸汽联合循环发电技术迅速发展。燃气轮机发电具有污染排放少、比投资低、建设周期短、用地用水量少、启动迅速、便于调峰等特点。2012 年全球天然气发电量占全球发电总量的 22%，绝大部分来自燃气轮机联合循环。燃用天然气的燃气轮机二氧化碳排放量不到超临界燃煤电站的一半，没有 SO_2 和粉尘污染， NO_x 排放已经达到 15ppm ~ 25ppm 甚至更低，成为名副其实的高效、洁净、环保的火力

发电方式。

燃气轮机既适合于带基本负荷发电，也适合调峰运行，因此在电网中具有不可或缺的重要地位。随着我国国民经济和社会发展水平的提高，电网峰谷差进一步加大，燃气轮机发电是许多经济发达地区如长三角、珠三角、沿海 LNG 接收站周边地区调峰电源的首选。为调整能源结构、减少二氧化碳排放和大气污染，我国正在大力发展核电、风电、太阳能发电等非化石新能源。由于核电不适宜大幅度调峰，风电和太阳能发电具有较大的不稳定性和间歇性，采用燃气轮机调峰对电网就尤为必要。

燃气轮机不仅在当代电力工业中具有不可替代的重要意义，未来也有重要的战略地位。近三四十年以来发展的整体煤气化联合循环（IGCC）技术、正在研究开发的近零排放煤基发电和二氧化碳捕获储存（CCS）技术，都是以燃气轮机为主动力设备。从这个意义上说，燃气轮机是 21 世纪最具有发展潜力的能源动力装备。

目前燃气轮机技术已经非常成熟，我国已经引进了 E 和 F 级燃气轮机制造技术进行本地化制造，十年来已经建设了一大批燃气轮机联合循环电站。近十几年来国际上出现了更为先进的 G、H 和 J 级燃气轮机，其单循环与联合循环热效率已经分别达到 40% ~ 41% 和 60% ~ 61%，为所有发电方式之冠。

华北院公司从事燃气轮机电站设计已经有 50 多年的历史，迄今为止设计业绩为全国的四分之一，积累了丰富的工程设计与项目建设经验。当前我国能源电力工业正面临巨大的发展机遇和挑战，提高能源利用效率，降低污染排放，减少煤炭消耗，增加天然气发电、水电、风电和太阳能发电等洁净高效能源的比重等已经成为全社会的共识。本书的出版，必将对进一步推动我国燃气轮机联合循环发电产业的技术进步产生积极的作用。

清华大学教授，中国工程院院士

清华大学燃气轮机研究院院长

燃气轮机与煤气化联合循环国家工程研究中心主任

前言

近年来,随着我国工业化、城镇化的进程,能源消费在支撑发展的同时,也带来了生态环境的问题,调整优化能源消费结构亟待解决。2013年,雾霾席卷了大半个中国,中国科学院大气物理研究所的研究表明,北京PM_{2.5}中各种排放源的年度平均贡献率分别为:燃煤26%,机动车19%,工业粉尘10%,餐饮11%等。由此可见,燃煤成为PM_{2.5}的主要来源。2013年9月国务院发布《大气污染防治行动计划》、北京市发布《北京市2013—2017年清洁空气行动计划》。北京计划到2017年燃煤总量比2012年削减1300万t;煤炭占能源消费比重下降到10%以下,优质能源消费比重提高到90%以上。煤炭消耗减少主要通过使用电力、天然气、煤制天然气、太阳能等清洁能源实现。

大型燃气蒸汽联合循环发电机组由于热效率高、污染低、工程总投资低、建设周期短、占地和用水量少、自动化程度高等一系列优点,其推广应用已成为国内一线城市区域供热的必然趋势。另外,天然气相对清洁,烟气达到近零排放,即使不采用脱硫、脱硝技术,其燃烧产生的二氧化硫极少,氮氧化物排放量也低于国家规定的环保标准。

华北电力设计院有限公司(以下简称华北院公司)是由成立于1953年的原电力工业部华北电力设计院改制成立的大型国有高新技术企业。华北院公司以创建“极具价值创造力的国际型工程公司”为企业愿景,秉承“信任·责任”的核心价值观,依靠雄厚的综合技术实力和项目管理能力,向客户提供高水平的工程咨询、勘测设计以及总承包等工程建设服务。近年来,华北院公司不断加大科技投入,在100万kW超超临界机组、交直流特高压输变电、电站空冷、大型燃气轮机及洁净煤燃烧、IGCC及煤气化、海水淡化等方面积极开展技术攻关,并获得了一定的技术和市场优势。

华北院公司是最早进入燃气轮机项目市场的设计企业之一,从20世纪50年代至今,华北院公司已完成及正在设计、建设的国内大型燃气轮机项目近50台(套),装机容量达1360万kW,占全国燃气轮机市场的近20%,已形成在北京市和宁夏回族自治区市场的全覆盖以及在天津、山西、内蒙古等地区的绝大部分市场覆盖,同时实现了在广东省部分区域及白俄罗斯、加纳等海外市场的延伸。

为了总结、推广大型燃气轮机项目建设经验,华北院公司自2013年1季度开始策划《高效低碳环保大型燃气轮机电厂工程实践》的编制工作,对华北院公司负责设计、建设完成以及将要完成的燃气轮机项目,经过数百位燃气轮机专业设计人员及技术专家大半年的资料收集、整理,于2013年底出版了《高效低碳环保大型燃气轮机电厂工程实践 工程篇》,得到了各届的好评。又历经一年时间完成了本书的编写工作。希望该书的出版可以为推广高效低碳环保大型燃气轮机项目建设、减少环境污染做出贡献。同时,感谢二十年来为国家在大型燃气轮机项目的勘察、设计、咨询工程及技术发展中做出贡献的华北院公司工程技术人员,并感谢项目建设单位对华北院公司的信任与支持。

由于编制时间较为仓促,且由于水平有限,经验不足,疏漏错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。



目录

推荐序
序
前言

1 燃气轮机发电技术	1
1.1 燃气轮机发展简史	1
1.2 燃气轮机工作原理	2
1.3 燃气轮机关键部件及技术要求	6
1.4 燃气轮机发电	7
1.5 燃气蒸汽联合循环	7
1.6 发电用燃气轮机及联合循环性能	11
1.7 燃气轮机发电技术的发展	12
2 调峰发电典型工程	16
2.1 概述	16
2.2 天津滨海燃气轮机电厂工程	17
2.3 东莞天明/丰明电力有限公司工程	30
2.4 东莞虎门电厂“以大代小”技改工程	44
2.5 深圳市东部电厂	63
3 城市环保热电联产工程	83
3.1 概述	83
3.2 北京太阳宫燃气热电冷联供工程	84
3.3 华能北京热电厂燃气热电联产扩建工程	102
3.4 北京草桥燃气联合循环热电厂二期工程	123
3.5 北京三热天然气燃气轮机联合循环发电工程	148
3.6 北京西北热电中心京西燃气发电厂工程	166
3.7 大唐国际北京高井燃气热电联产工程	189
3.8 北京东北热电中心京能燃气热电厂工程	225
3.9 神华国华(北京)燃气热电工程	255
3.10 陈塘庄热电厂煤改气搬迁工程	278
3.11 华能天津临港经济区燃气热电联产工程	299
3.12 郑常庄燃气热电工程	314
3.13 北京京能未来科技城燃气热电联产工程	330

3.14	宁夏东部热电股份有限公司 4×200MW 级联合循环热电冷联产工程	357
3.15	北京海淀北部燃气热电冷联供工程	376
3.16	北京经济技术开发区天然气联合循环热电厂工程	391
3.17	神华煤制油副气回收利用燃气—蒸汽联合循环发电工程	410
3.18	宁夏盐池哈纳斯高沙窝槽式太阳能—燃气联合循环 (ISCC) 发电站工程	418
4	海外燃气轮机工程	434
4.1	概述	434
4.2	白俄罗斯明斯克 2 号热电站改造工程	434
4.3	白俄罗斯明斯克 5 号热电站一期改建工程	446
参考文献		462
后记		463

燃气轮机发电技术

1.1 燃气轮机发展简史

燃气轮机具有悠久的发展历史。作为燃气轮机重要部件的透平，其雏形在古代就已经出现，在公元前 150 年，古埃及亚历山大城的希罗描述的希罗球，是最早的透平雏形。在我国南宋高宗年间（1131—1162 年）已经有了走马灯的记载。

1.1.1 国外

1791 年，英国人巴贝尔首次使用了燃气轮机（Gas Turbine）这一名词，描述了燃气轮机的工作过程，还提出了具体设计，它具有压气机、燃烧室和透平等现代燃气轮机的特征。该设计在当时没有受到重视，未进行制造和试验，但该设计是燃气轮机开始进入具体创建和研制的标志。

此后的 19 世纪和 20 世纪的前 40 年，是燃气轮机不断试验而最终成功应用的时期。1872 年，德国人施托尔策设计了一台燃气轮机，并于 1900—1904 年进行了试验，但因始终未能脱开启动机独立运行而失败；1905 年，法国人勒梅尔和阿芒戈制成第一台能输出功的燃气轮机，但效率太低，因而未获得实用。

1920 年，德国人霍尔茨瓦特制成第一台实用的燃气轮机，其效率为 13%、功率为 370kW，按等容加热循环工作，但因等容加热循环以断续爆燃的方式加热，存在许多重大缺点而被人们放弃。

随着空气动力学的发展，人们掌握了压气机叶片中气体扩压流动的特点，解决了设计高效率轴流式压气机的问题，因而在 20 世纪 30 年代中期出现了效率达 85% 的轴流式压气机。与此同时，涡轮效率也有了提高。在高温材料方面，出现了能承受 600℃ 以上高温的铬镍合金钢等耐热钢，因而能采用较高的燃气初温，于是等压加热循环的燃气轮机终于得到成功的应用。

1939 年，在瑞士制成了 4MW 发电用燃气轮机，效率达 18%。同年，在德国制造的喷气式飞机试飞成功，从此燃气轮机进入了实用阶段，并开始迅速发展。

由于 1939 年有两种不同用途的燃气轮机被成功应用，人们将 1939 年作为燃气轮机发展获得成功的年份。

随着高温材料的不断进展，以及涡轮采用冷却叶片并不断提高冷却效果，燃气初温逐步提高，使燃气轮机效率不断提高。单机功率也不断增大，在 20 世纪 70 年代中期出现了数种 100MW 级的燃气轮机，最高能达到 130MW。

与此同时，燃气轮机的应用领域不断扩大。1941 年瑞士制造的第一台燃气轮机机车通过了试验；1947 年，英国制造的第一艘装备燃气轮机的舰艇下水，它以 1.86MW 的燃气轮机作为动力；1950 年，英国制成第一辆燃气轮机汽车。此后，燃气轮机在更多的领域中获得应用。

1.1.2 国内

中国从 20 世纪 60 年代开始燃气轮机的设计制造，以自主设计和仿制为主，主要为航空发动机。一直延续到 80 年代。从 20 世纪 80 年代到 2003 年，国内的燃气轮机设计制造业出现了停滞期，造成我国的燃气轮机事业至少落后发达国家 30 年。

新中国成立前没有燃气轮机工业，新中国成立后全国各地试制过十几种型号的陆海空用途的燃气轮机。1956 年我国制造的第一批喷气式飞机试飞，1958 年起又有不少工厂设计试制过各种燃气轮机。

1962 年上海汽轮机厂试制船用燃气轮机，1964 年与上海船厂合作制成 550kW 燃气轮机，1965 年制成 6000kW 列车电站燃气轮机，1971 年制成 3000kW 卡车电站。在这期间与 703 研究所合作制造了 3295、4410、18380kW 等几种船用燃气轮机。

1969 年哈尔滨汽轮机厂制成 2200kW 机车燃气轮机和 1000kW 自由活塞式燃气轮机，1973 年与 703 研究所合作制成 4410kW 船用燃气轮机，与长春机车车辆厂合作制成 3295kW 机车燃气轮机。

1964 年南京汽轮电机厂制成 1500kW 电站燃气轮机；1970 年制成 37kW 泵用燃气轮机；1977 年制成 21700kW 快装式电站燃气轮机；1984 年与 GE 公司合作生产了 PG6541B 型 36000kW 燃气轮机。

1978 年东方汽轮机厂制成 6000kW 燃气轮机；1972 年杭州汽轮机厂制成 200kW 燃气轮机；1972 年青岛汽轮机厂制成 1500kW 卡车电站燃气轮机。

2003 年国家通过市场换技术进行了打捆招标，引进了 E、F 级燃气轮机的制造技术。与此同时自主研发成功了 QD128，设计制造了 R0110，虽然还需要修改和完善，但揭开了中国自主研发设计的历程。

从 2008 年开始，国家成立了燃气轮机与煤气化联合循环国家工程研究中心，承担国产燃气轮机 CGT-60FA（B）的研发，计划于 2016 年研发成功原型机，并在成功带负荷验证运行的基础上进行模化放大，进而形成国产燃气轮机的产品系列，实现燃气轮机的自主设计、自主制造、自主维修。“十二五”期间，国家已经确立了两机重大专项，燃气轮机事业将迎来巨大的发展。图 1-1 为中国燃气轮机技术历程。

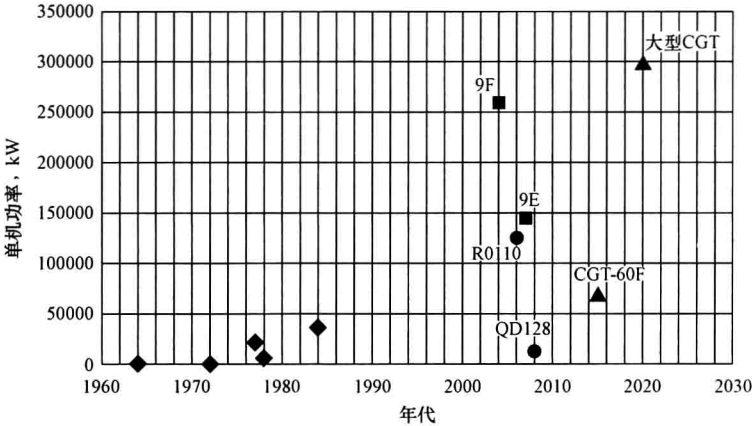


图 1-1 中国燃气轮机技术历程

1.2 燃气轮机工作原理

1.2.1 燃气轮机基本工作原理

燃气轮机是以气体为工质，把燃料燃烧时释放出来的热量转变为有用功的动力机械。燃气轮机由压气机、燃烧室和透平等部件组成。图 1-2 是典型的燃气轮机及其工作过程示意图。

空气被压缩机连续吸入并压缩，压力升高，随后进入燃烧室，在燃烧室中与燃料混合燃烧成为高温燃气，高温燃气进入透平膨胀做功，压力降低，最后排至大气。由于燃烧后的高温燃气做功能力显著提高，燃气在透平中的膨胀功大于压缩机压缩空气所消耗的功，因此使透平在带动压缩机后还有多余的功率，可以带动负载。按照这种原理工作的燃气轮机为等压燃烧加热的开式循环燃气轮机，

也是目前应用最广泛的燃气轮机。

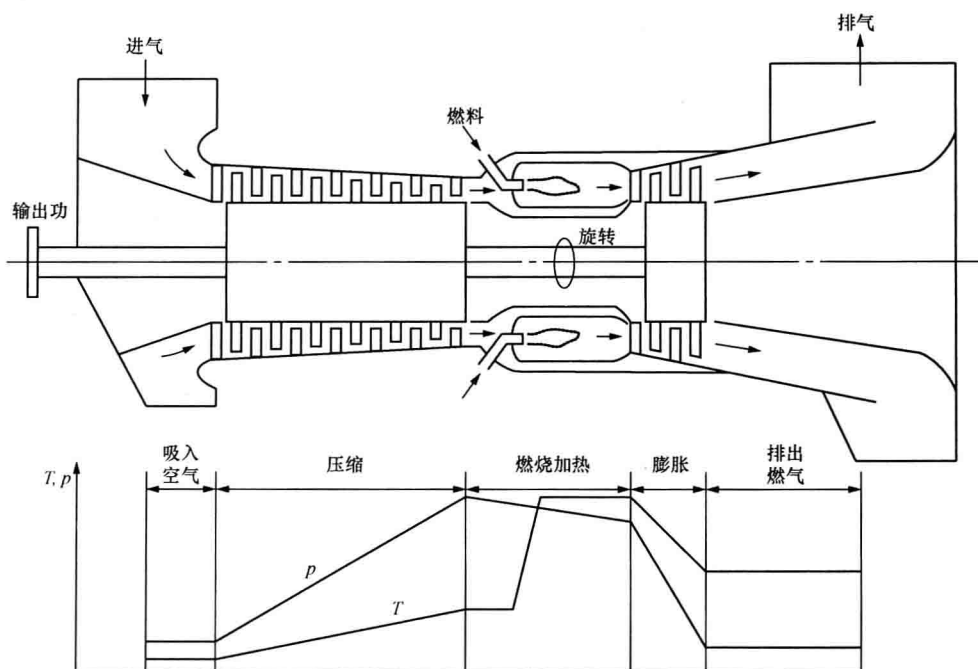


图 1-2 燃气轮机及其工作过程示意图

1.2.2 燃气轮机热力学原理

1.2.2.1 燃气轮机理想循环

为便于分析,首先假设燃气轮机中的工质为理想气体,气体的热力性质和流量不变,热力过程中没有损耗,即理想的情况,称为理想循环。为便于说明,将图 1-2 进一步简化为图 1-3 (a) 所示的简单示意图。

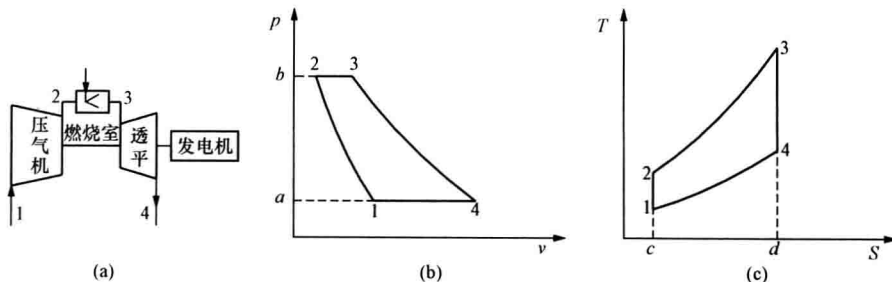


图 1-3 燃气轮机理想循环热力过程示意图

(a) 燃气轮机理想循环示意图; (b) 压力-比容曲线; (c) 温-熵曲线

图 1-3 (a) 中的数字表示每个热力过程的起点和终点,则燃气轮机的热力过程可分解为如下几个过程:

- 1-2 是空气在压气机中被等熵压缩的过程;
- 2-3 是气体在燃烧室中被等压加热的过程;
- 3-4 是气体在透平等熵膨胀做功的过程;
- 4-1 是气体排入大气后被等压冷却的过程。

相应的压力-比容、温-熵曲线如图 1-3 (b)、(c) 所示。以上几个过程由英国工程师布雷顿提出,因此常被称为布雷顿循环。

按照热力学计算，可以得出理想循环情况下，燃气轮机单位工质对外做功为

$$W_t = c_p T_1^* \left[\tau \left(1 - \frac{1}{\pi^m} \right) - (\pi^m - 1) \right] \tag{kJ/kg}$$

燃气轮机热效率为

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^m} \tag{\%}$$
$$m = \frac{k-1}{k}$$

式中： c_p 是工质的比热容； T_1^* 是压气机入口温度； τ 是透平入口温度与压气机入口温比； k 是工质的比热比； π 是压气机出口压力与入口压比。以上参数中，只有 τ 和 π 为变量，其他为常数。

经计算可以得到图 1-4 所示的理想循环燃气轮机比功及效率曲线。

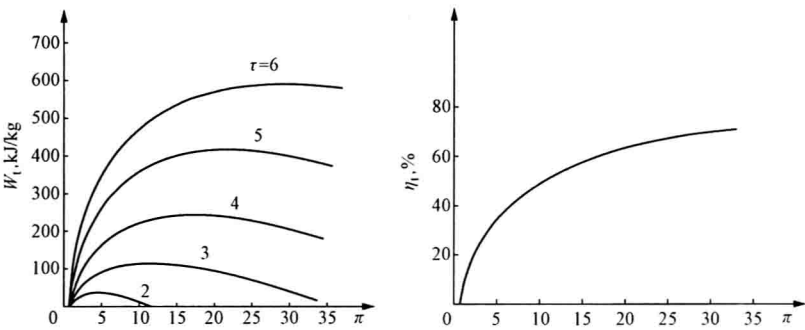


图 1-4 理想循环燃气轮机比功及效率曲线示意图

从图 1-4 可以看出：

- 1) 当压比不变时，理想循环燃气轮机比功随温比增加而增加；
- 2) 当温比不变时，比功随压比增加而增加并有一最大值；
- 3) 热效率仅与压比有关，压比越大，热效率越高。

1.2.2.2 燃气轮机实际循环

实际的燃气轮机循环与理想循环还存在着较大差距。

首先是循环中各个过程都存在着损失，实际的压缩过程和膨胀过程都不是等熵的，即压气机效率和透平效率都小于 1；燃烧室中存在气体流动压力损失和不完全燃烧损失。其次是作为工质的燃气和空气的热力性质不同，两者的流量也有差别。此外，还存在着燃气轮机的进气、排气压力损失和机械损失等。考虑以上影响因素后，燃气轮机实际循环的温-熵曲线则变为图 1-5 所示。

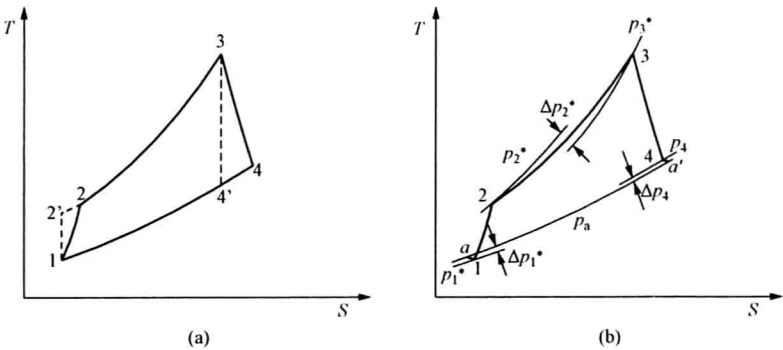


图 1-5 燃气轮机实际循环热力过程示意图

(a) 考虑压气机及透平效率后的温-熵曲线；(b) 进一步考虑压力损失后的温-熵曲线