

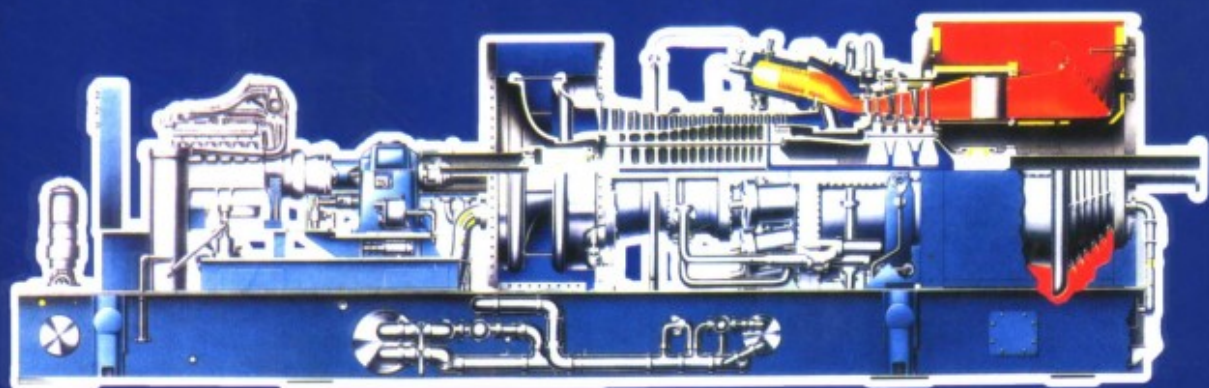
燃气轮机发电技术论文集

郭慧彬 徐建强 主 编



石油工业出版社

责任编辑：刘国辉
责任校对：王 群
封面设计：邵 鹏



ISBN 7-5021-4726-8



9 787502 147266 >

ISBN 7-5021-4726-8/TE·3297

定价:70.00元

燃气轮机发电技术论文集

郭慧彬 徐建强 主编

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气轮机发电技术论文集 / 郭慧彬等主编.

北京: 石油工业出版社, 2004.7

ISBN7-5021-4726-8

I. 燃…

II. 郭…

III. 汽轮发电机-发电-文集

IV. TM611.24-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 068427 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网址: www.petropub.cn

总机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 大庆油田科达思维特印刷

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 24.5 插页: 1

字数: 626 千字 印数: 1—1000 册

定价: 70.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

《燃气轮机发电技术论文集》

编 委 会

主 编： 郭慧彬 徐建强

副主编： 冯运成 张晓飞 翟宝占 黄庆龙

王懿德 闫文海 隋 铭 郭豫川

编 委（以姓氏笔划为序）：

王 莹 江海峰 仲维臣 安久胜

向连龙 全家仁 李 莉 李长仁

李国有 沐南庆 金 旭 张文刚

张继群 胡庆文 谭振忠 熊志敏

序

科学技术是第一生产力，是经济发展的首要推动力量，是人类社会进步的重要标志。当今世界，现代科学技术的发展，使科学与生产的关系越来越密切，科学技术一旦应用于生产过程，就会转化为现实的物质生产力，就会产生意想不到的巨大经济效益。

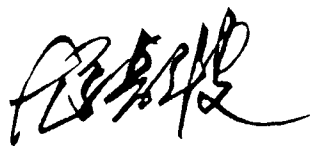
改革开放以来，我国电力工业获得飞速发展，新技术、新工艺、新设备在电力生产中得到广泛的应用。大庆油田燃机电厂正是在“春风化雨”的时代诞生，是国内第一家引进建设的重型燃气轮机发电厂。本着分期建设、分期施工、分期投产、尽快受益的原则，燃机电厂的工程建设于 1985 年破土动工，1986 年 9 月 1 号机组简单循环投产，1988 年 10 月 2 号机组简单循环投产，1990 年 8 月 2 号机组联合循环投运，实现了油田油气资源的梯级利用。

发电厂是技术密集型企业，燃气轮机发电更是一个技术先进的系统工程，其装备为技术密集型的现代化设备，具有大型化、高速化、连续化、精密化和自动化等特点，没有一批能胜任组织、决策、指挥的生产技术管理人员，管理好燃机发电运行是难以想象的。建厂 18 年来，燃机电厂创造了联合循环单机连续运行 215 天和年累计运行 8296h 的国内外最高纪录，美国 GE 公司赠匾示贺：“中国最富有运行经验、运行水平最好的用户”；17 年来的运行生产，燃机电厂积累了丰富的联合循环机组安装、调试、运行与维修实践经验，造就并培养出众多的技艺技能较高的运行、维修与管理人才，不但能独立自主地完成燃机大修作业，而且承担了国内外多家燃机发电厂的运行和维修的技术服务；16 年来的科技进步，燃机电厂共完成各种技术革新、技术改造和备件国产化项目 321 项，其中燃气轮机冷却水系统由闭式循环改为开式循环、燃气轮机 88TK 风冷系统改造、燃气轮机控制系统 Mark-Ⅱ 升级 Mark-V、STAG106 联合循环机组起动系统升级改造技术研究、单轴联合循环控制系统 Mark-IV 升级为 Mark-VI 和 1 号机组联合循环余热利用技术研究等 6 个项目荣获大庆石油管理局科学技术进步一等奖。科技人员在运行生产中发挥着极其重要的作用，科技成果已转化为燃机电厂经济效益的一个新的增长点。

我们的时代是创新的时代，以信息技术为代表的高新技术的产生和发展，正在把历史的航船牵引到一个新的经济时代——知识经济时代，我们要时刻紧紧地把握这个时代的创新精神。诚如伏尔泰所言：“谁不具备这个时代精神，谁将承受这个时代的全部不幸。”大到国家，小如企业，都必须不断进行知识创新、技术创新和管理创新，不断超越自我，不断接受创新事物，厚积薄发，与时俱进。燃机发电技术日新月异，从 6000 系列已发展到 9000 系列，甚至还有更大型的机组，联合循环发电效率从 44% 提高到 57%，甚至达到 60%，单机容量从 34MW 提高到 256MW，甚至超过 300MW。原理是一样的，但技术在不断更新。不走出去，不收集情报和技术资料，不交流学习，那么就永远处于技术等级的低层次，所以只有跟踪燃机发电前沿技术，才能不断创新。创新的基础是学习与交流，熟悉套路，才能打破常规。积累知识，探求规律，入得门来，才能破门而出。

今天，燃机电厂奉献出《燃气轮机发电技术论文集》，以迎接我国方兴未艾的燃气轮机及联合循环发电事业的大发展，期能对我国燃机发电运行与维修的创新实践有所裨益。这是一种可贵的技术交流探索方式。

是为序，非序也。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Chen Qian, the author of the preface.

2004 年 3 月

前 言

大庆石油管理局电力总公司燃机电厂(以下简称大庆油田燃机电厂),是根据大庆石油管理局原顾问、我国著名科学家吴仲华教授的建议,为提高油田油气资源的梯级利用水平,经国家计委和原石油工业部批准,从美国通用电气公司引进建设的 MS-6001B 型燃气轮机组发电厂,总装机容量 97MW。整个工程是按照分期建设、分期施工、分期投产、尽快受益的原则建设的。1985 年 3 月 27 日破土动工,1986 年 9 月 1 号机组简单循环投产,1988 年 10 月 2 号机组简单循环投运,1990 年 8 月 2 号机组联合循环投产,2002 年 5 月 1 号机组联合循环改造工程竣工投产。截止到 2003 年 6 月,1 号、2 号机组分别累计运行 101275h 和 92328h,总累计发电 638654 万 kW·h,获取了良好的经济效益和社会效益,并将燃机联合循环发电技术能力提高到较高的档次。

企业技术能力反映了一个企业从外界获取先进的技术与信息,并结合内部的知识,创造出新的技术与信息,实现技术创新与扩散,同时又使技术与知识得到储备与积累的能力。燃机电厂是一座引进建设的燃气轮机发电厂,是一个技术密集型企业。随着燃气轮机及联合循环发电技术的不断进步与创新,我们也在不断提高对引进技术与信息进行分析、综合和激活的能力。燃机发电技术能力是蕴涵在电厂内部人员、信息、设备和组织等要素中的所有知识的总和,所反映的是电厂的内在潜力。从本质上说,燃机电厂技术能力就是电厂所拥有的联合循环发电的全部知识,因而电厂技术能力的增长过程,应建立在知识学习和积累的基础上。在现实中,电厂之间创造力的差别是很明显的,这种差别主要来源于电厂所拥有的知识库的差别。而电厂知识库储量的增加,必须建立在电厂技术学习的基础上,通过技术学习,电厂面对技术变化的能力得以不断提高。学习在技术能力提高的过程中起着核心作用,它对技术能力的静态特性和动态特性均产生重大影响。所谓静态特性就是电厂的技术知识储量水平,而动态特性则是对知识储量的运用和操作,是知识储量递增和重组提高的过程。燃机电厂在打造学习型企业的实践中,兼收并吸,推陈出新,逐步形成自己的特色,从而构成自己的三大比较技术优势——单轴布置、EX2100 励磁系统和 Mark-VI 控制系统,并以此开拓出对外技术服务的国内国外两个市场。

燃气轮机及联合循环发电属技术密集型系统工程,具有“三多一高”特点:设备多、系统多、保护多和故障停机率高,连续安全经济平稳运行有一定难度。对此,大庆油田燃机电厂深入贯彻“科学技术是第一生产力”的方针,坚持科技兴厂战略,大力实施科研创新、技术攻关和技改措施,积极开展备品备件国产化工作,以消除设备缺陷为重心,以连续安全运行为中心,以增加发电量为目标,以提高经济效益为目的,实施目标控制。在消除设备缺陷、优化工艺流程、消化吸收引进技术、联合科技攻关、加快备件国产化、开拓市场技术服务、建设燃机维修和培训基地、开展现代化管理等诸多方面,燃机电厂进行了积极探索,积累了相应的实践经验,使燃机发电的技术含量和创新能力进一步得到提高。

为弘扬科技创新,强化学术交流,本书收录了大庆油田燃机电厂2000年以来经评审推荐的优秀论文和兄弟单位学术论文共52篇,内容包括燃气轮机联合循环调试、试运行、运行管理、故障排除、维修改造、科研攻关等多个方面,具有较强的专业性、学术性、应用性和指导性,谨供从事燃机发电的技术人员学习参考与交流。

本书在编撰出版过程中,得到大庆石油管理局领导、石油工业出版社的大力支持,在此一并表示衷心的感谢!

水深则所载者重,土厚则所植者蕃,编者力求所著具有较高的学术水平,然而受时间、经验和水平能力所限,疏漏不当之处在所难免,请读者批评指正。



2004年3月

目 录

关于大庆外围油田建设大型燃气—蒸汽联合循环电厂的探讨·····	徐建强 王懿德 黄庆龙(1)
天然气发电的技术经济分析 ·····	崔剑仇 范 邦 沈邱农 沈鸣浩(15)
从天然气利用看我国燃气轮机热电联产的发展 ·····	李宇红(23)
燃气轮机联合循环电厂运行模式和配置选择 ·····	董卫国(29)
天然气发电技术的特点和应用前景 ·····	糜洪元 张继平(36)
燃气轮机天然气燃料系统及应用 ·····	何安富(42)
从几个实例浅议GE公司的燃气轮机发展 ·····	张春霞(47)
GE 重型燃气轮机的性能及参数·····	Frank J.Brooks(51)
GE 重型燃气轮机的运行和维护·····	R.F.Hoeft(63)
MS6001B燃气轮机联合循环优化方案研究 ·····	魏应新 马云翔 陈起铎 罗春新(77)
106B 单轴联合循环机组的运行与维护 ·····	江海峰 郭豫川(85)
关于燃气轮机发电厂计算自耗电率的探讨 ·····	曾安四(91)
燃气轮机热参数故障诊断数学模型的研究·····	王永泓 翁史烈 宋华芬(98)
燃烧低热值煤气时燃气轮机特性计算与分析 ·····	白慧峰 邓世敏 危师让(108)
燃气轮机透平叶片寿命及其影响因素 ·····	肖俊峰 朱宝田(113)
燃气涡轮第一级导叶强度分析及寿命评估 ·····	李 颖(117)
汽轮发电机组振动故障的多征兆诊断方法 ·····	李 勇 孙海波 曹祖庆(124)
高温通道的运行与维护 ·····	郭明威 赵 兰(129)
抽凝式汽机与燃气轮机的前置匹配问题 ·····	苏大为(136)
燃气轮机振动问题典型故障分析·····	王伯铭(139)
燃机电厂1号机组联合循环余热利用技术研究总结报告·····	徐建强 王懿德 仲维臣 李永树 李长仁 吕 萍(146)
燃机电厂发电机励磁系统升级改造设想 ·····	仲维臣 刘若林(162)
STAG106联合循环机组起动系统升级改造 ·····	徐建强 王懿德 熊志敏(169)
PG6531 燃气轮机朗肯循环国产主机设计配置 ·····	徐建强 王懿德 陈 滨(176)

MS6001 型燃气轮机压气机首级动叶弯曲原因及检修工艺···隋 铭 李长仁 任晓光(185)	
MS6001 型燃气轮机运行故障分析与处理 ···徐建强 王懿德 杨海斌(191)	
燃机电厂 3S 离合器故障分析及解决方案 ···熊志敏 张 健(196)	
发电机失磁保护分析及改进 ···仲维臣 赵凤学(201)	
燃机电厂 MS6001 型燃气轮机组效率降低的故障分析及处理 ···王德春 谭振忠(211)	
燃气轮机轮间温度故障诊断处理 ···隋 铭 安久胜 任晓光(217)	
2 号机组轴系振动原因分析及处理方案····徐建强 李长仁 葛长存(221)	
Mark VI 控制系统编程工具软件介绍 ···李永树 张 健(228)	
联合循环发电机组进口导叶的控制与调整 ···张 建 李永树(236)	
燃机电厂 Freelance 2000 硬件结构分析 ···李永树 董秋菊(241)	
STAG106 联合循环机组汽轮机回油含水故障处理 ···王德春 张生年(247)	
汽轮机进冷汽、进水的危害及预防 ···刘忠权 薛晓峰(254)	
燃机电厂 1 号汽轮机真空度恶化的原因探讨 ···王德春 刘忠权(260)	
影响燃气—蒸汽联合循环机组效率的因素 ···陈小翠 胡庆文 祁慧玲(265)	
同步发电机励磁控制系统及其数学模型 ···姜惠兰 徐建强(270)	
频率偏移对励磁调节器的影响及校正算法 ···姜惠兰 徐建强(285)	
基于模糊—神经网络的励磁控制系统 ···姜惠兰 徐建强(296)	
测振在线诊断管理····李 莉 王崇达 全家仁(318)	
互相关系数的分解研究 ···周 欣 李 莉(322)	
利用信息网络系统实现电厂生产、运行管理自动化的可行性分析····	
·····谭振忠 刘建华 胡庆文(326)	
燃机电厂污水处理回用的可行性探讨 ···万阿鹏 全家仁(332)	
变频调速节能技术的应用 ···王 艳 王 波(337)	
发电机组电刷装置的缺陷消除 ···戚立民 邵 群(342)	
需求中的清洁能源 ···黄庆龙 王懿德 译(347)	
综合应用现代化管理方法全面提高燃机发电经济效益 ···徐建强 王懿德 安久胜(356)	
以现代化管理方法进行燃气轮机大修作业 ···徐建强 王懿德(370)	
最大需量的分析与控制 ···王 莹 沐南庆(373)	
发电设备维修与管理浅议 ···杨国庆 张文刚(378)	

关于大庆外围油田建设大型燃气—蒸汽联合循环电厂的探讨

徐建强 王懿德 黄庆龙

21 世纪是我国天然气大发展的世纪,西气东输、俄气南供、进口液化天然气 (LNG)、近海气登陆和煤层气的开发利用等,将使我国天然气的供应量得到较快发展,为燃机联合循环发电创造了可行条件;大型燃气—蒸汽联合循环机组的发电运行符合国家整体利益,是国家发展航空航海业涡轮机的需要,又是电力工业发展的自身要求,有利于缓解环境保护的压力,有利于优化和调整电源结构,有利于电网安全经济运行。天然气工业的发展是大规模利用燃气轮机的必要条件,为了实现大庆石油管理局的资源优化和可持续发展,本文就大庆外围油田建设大型燃气—蒸汽联合循环电厂进行了技术经济的可行性分析,以便于更好地利用燃气轮机发电技术,经济合理地使用天然气资源。

一、燃气轮机与联合循环发电技术的发展

燃气轮机发电是一种洁净能源、绿色电力。从 20 世纪 80 年代开始,燃气轮机的单机功率和热效率都有了很大程度的提高,燃气轮机及其联合循环在世界电力工业中的地位也发生了明显的变化。目前全世界每年新增的发电装机容量中,有 1/3 以上采用燃气—蒸汽联合循环 (STAG) 机组,而发达国家则接近 1/2,美国则近 3/5。据《燃气轮机发电技术》的不完全统计,全世界现有烧重油和烧天然气的燃气轮机及其联合循环的装机总容量已超过 4.5 亿 kW。从 1987 年始,美国发电用燃气轮机年生产总功率数已经超过了发电用蒸汽轮机的年生产总功率,这是世界发电设备制造业发展过程中出现的一次重大的历史转折,展示了今后燃气轮机及其联合循环发电的广阔发展前景。

1. 发达国家燃机及联合循环发电现状

在近 10 多年来,燃气轮机技术得到了突飞猛进的发展,高温冷却技术不断完善,燃气初温不断提升,机组效率迅速攀升,稳定性和可靠性不断增强。至今大型“F”级燃气轮机的燃气初温已达到 1300℃左右,联合循环总效率超过 56%,该等级的机型已步入成熟期,正在全世界广泛应用。为进一步追求更高的效率,世界几大主要供货商都在向更高的 1430~1500℃的燃气初温发展,并已逐步将部分“G”级和“H”级机型投入商业化生产。

美国 GE 公司、德国 SIMENS 公司、欧洲 ALSTON 公司、日本 MITSUBISHI 公司是世界有代表性的主要燃气轮机制造商。表 1 为其目前所能提供的部分大功率燃气轮机机组及其相应的联合循环装置。据有关统计资料显示,世界范围内燃气—蒸汽联合循环机组新增的发电量与常规火力发电机组新增发电量已基本持平。GE、SIMENS、ALSTON 等公司近几年来均获得了大量的订单,在目前的情况下,其新订机组的供货期甚至要推到 2005 年以后。产业化生产带来的规模经济效益将反过来进一步促进技术的升级与更新换代。在燃机技术迅猛发展的同时,与燃气轮机配套组成联合循环机组的余热锅炉、蒸汽轮机和发电机的设计和制造技术亦得到同步发展。目前,国外主机制造商对大型联合循环机组已

具备完整的、系统的和规模化的本体设计、动力岛设计、制造、试验的雄厚实力，并已在全球取得了大量的实绩。

2. 我国燃机及联合循环发电现状

我国从 20 世纪 60 年代到 80 年代，曾有上海汽轮机厂、南京汽轮机厂、沈阳黎明公司、东方汽轮机厂和哈尔滨汽轮机厂仿制、自制或自行设计生产为数极少的小型燃机，其中虽有成功的经验，但绝大多数都存在效率低、可用率差或事故频繁等问题。20 世纪 80 年代后期，随着国民经济的迅速发展，燃气轮机电站得到了较大规模的应用。据初步统计，我国燃机和联合循环发电的总装机容量已达到 900 余万 kW，占全国总装机容量的 2.6%，不到发达国家装机水平的 1/9。

表 1 大功率燃机及其联合循环比较

参 数 \ 厂 家	GE	SIMENS	ALSTON	MITSUBISHI
机 型	S109FA	V94.3A	GT26	M701F
燃机功率, MW	255.6	258	265	260.4
效率, %	37.6	38.39	38.37	37.29
总功率, MW	390.8	385.5	393	397.7
总效率, %	56.7	57.1	58.5	58.2
千瓦造价, 美元/kW	356	358	358	360

注：本价格来源于燃机价格手册，价格为原产地的 FOB 价。价格包括燃机、汽轮机、余热锅炉、主变压器、常规控制及电厂其他辅助生产系统。

目前，国内仅有南京汽轮机厂引进 GE 公司技术生产 38MW 的 6B 型燃机（其中关键部件进口），但该机组的燃气初温仅仅为 1000℃，为国外 20 世纪 80 年代初技术水平。此外，南京汽轮机厂、沈阳黎明公司和上海汽轮机厂等还作为国外公司分包商加工过燃机气缸等部件。与国外大型燃机设备制造商相比，我国的燃机制造商由于在较长时间内基本上中断了燃机技术的研究工作，近几年来才又重新将燃机产品排入工作日程，事实上已错过了一段相当好的发展机遇。对于大型燃机（“F”级以上）配套的余热锅炉，尚未见有国内的设计制造商。

3. 我国燃机及联合循环发电最新动态

据中国能源网消息，为了适应国内燃料结构和电力结构调整的要求，配合西气东输和引进液化天然气（LNG）工程，国家决定建设一批高效率、低污染的大型燃气—蒸汽联合循环电厂。目前，由中国技术进出口总公司、国信招标公司以及有关业主单位组成的招标方，正在进行 10 座电厂（站）的捆绑招标工作，装机数量 23 台，总容量约 900 余万 kW，接近我国现有的燃气—蒸汽联合循环发电装机容量之和，并且要求预留 16 套同样设备的扩建余地。所谓“捆绑”招标，其实质含义包括：（1）有资格的燃气轮机制造商必须和国内有一定资格的制造商组成投标联合体，才能参加投标；（2）投标方对 10 座联合循环电厂

(站)都要投标,不允许只投标其中的一两个或几个电厂(站);(3)国外制造商要向国内制造商转让技术,投标方必须提交参与投标的设备在国内制造的进度计划方案、在国内建立备品备件供应和维修中心的方案。参与投标的燃气轮机应为单机功率 220~260MW 的“F”级(或相当于“F”级),联合循环发电功率为 350~400MW,效率 57%~58.5%。

拟建电厂有上海 1 座,北京 1 座,张家港 1 座,戚墅堰 1 座,望亭 1 座,惠州 1 座,深圳 2 座,浙江和兰州各 1 座。按照招标文件中初拟的进度,10 座电厂(站)分别于 2004 年下半年至 2006 年底建成投产。这么短的时间内建成这么多先进的燃气—蒸汽联合循环电厂(站),无疑将是我国燃机电站建设史上的一件大事,更是我国燃机联合循环发电建设史上的里程碑。

二、联合循环发电的特点

谈及经济可持续发展总离不开资源和环境两大话题,谈及电力总离不开一次能源及其能量转换对资源和环境的影响。人们之所以高度重视水能、太阳能、风能、地热资源和生物能的开发和利用,究其原因,主要是它们属于可再生能源,又是洁净能源。然而,限于种种原因,对于 21 世纪而言,世界仍将以不可再生的化石燃料资源为主,这是不争的事实。20 世纪在化石燃料资源开发利用上的辉煌成就之一就是燃气轮机联合循环技术的高速发展,并将在 21 世纪,至少 21 世纪前 50 年对经济可持续发展产生巨大影响。高科技的燃气轮机联合循环技术与最洁净的化石燃料之一的天然气资源完美结合,创造了并将继续创造着辉煌的业绩,其建设周期短、起停快、可靠性高等显著特点已广为世人所青睐。

1. 燃机发电的高效率

燃气—蒸汽联合循环由燃气轮机简单循环(Brayton)和朗肯循环(Rankie)构成,实现了能源的梯级利用,发电效率高达 56%以上,形成极具个性的火力发电特点。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. 燃机发电的低污染

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 SO_2 ,常规燃煤电厂最头痛的 SO_2 排放没有了, NO_x 的排放量仅为燃煤的 19.2%, CO 的排放量仅为燃煤的 42.1%,燃机成熟的技术把 NO_x 、 CO 的排放量降到 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 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(不足同容量汽轮机冷却用水量的 1/80),只有余热锅炉须用化学除盐水,汽轮机需要冷却水,联合循环需水量大大降低,一般仅为同容量汽轮机组的 1/3,因而可节约宝贵的水资源。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,又可节约宝贵的土地资源。

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,因而电厂员工仅为常规燃煤电厂的 1/2,甚至更少,可节约大量的人力,提高工作效率,降低劳动力成本。由于联合循环电厂辅助设备简单,故障率较低,机组大修周期高于 48000h,维护方便,维护费用较低。

5. 适宜中等或常规负荷运行，调峰方便

STAG 机组的设计是专为带中等负荷或常规负荷可靠运行（满负荷连续运行）。联合循环机组热效率对负荷变化比较敏感，当单台机组负荷由 100% 降至 80%~85% 左右，机组热效率下降并不明显，但突破这个临界区域时，机组热效率迅速下降。因此，STAG 机组比较合理的运行方式为：低谷时停机，中等负荷时根据电网需求带 80%~100% 的负荷，高峰时带满负荷。

STAG 机组带中等负荷（80%~85%）运行，由于其用气量较大，可以缓解天然气供给系统的用气调峰压力，有利于启动下游用气市场，对天然气开发和利用起支撑作用。因而从 STAG 机组运行经济性和天然气供给系统本身运行可行性的角度考虑，STAG 机组适宜带中等负荷运行，部分用于调峰。

6. 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%，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 kW·h，大大降低能耗，经济效益十分可观。

7. 机组运行灵活

STAG 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，大型燃气—蒸汽联合循环机组的加载速率大于 2%，可以满足系统的快速加载要求。

（1）燃气—蒸汽联合循环机组的最小稳态负荷为 5%，作为电网事故旋转备用时的可调容量高达 95%，远高于煤电调峰机组的 60%。

（2）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。

三、我国天然气资源和应用前景

从我国天然气资源开发利用，燃气轮机发电机组的环保优势、高效节能优势、对天然气管网调峰优势和国家有关部委文件，以及国际燃气轮机发电机组供不应求火爆局面和最近的捆绑式招标大动作，我们看到了我国燃气—蒸汽联合循环的开发、应用、发展的良好前景。

1. 我国天然气资源与应用前景

天然气（NG）是一种洁净、高效、优质气体能源和化工原料，向来受到发达国家的重视。与发达国家相比，我国天然气工业目前尚处于起步阶段，在能源消费结构中仅占 2.2%，远低于世界平均水平 24%（亚洲平均水平 8.8%）。然而，我国拥有较丰富的天然气资源，已探明的天然气总资源为 38 万亿 m^3 。据专家分析，未来 10 年内我国将会发现更多的天然气，预计 2005 年我国天然气年产量将由 2001 年的 303 亿 m^3 达到或超过 500 亿 m^3 ，应用前景越来越广阔。

依据发达国家天然气市场的构成，我国天然气市场的具体构成为：（1）发电；（2）民用；（3）化工；（4）其他工业用气。

在人口密集、污染严重、经济发达的东南沿海地区，天然气正成为新建电厂的主要能源。天然气发电是稳定用气的最大用户，从美英等国尤其是泰国的经验来看，天然气发电厂是天然气的基本负荷用户，经济效益最好，应用前景最好。所以，规划兴建的天然气发

电厂都是基本负荷电厂（80%~100%负荷连续运行，兼具调峰性能）。

2. 大庆地区天然气资源情况与应用前景

目前大庆已在肇源徐深1井发现了300亿 m^3 的深层天然气田，新增天然气产量除弥补当前的需量不足外，最佳经济效益当是用于联合循环发电。另据新华网消息，根据中俄最新磋商，2003年6月底之前，双方将完成输气项目可行性研究报告的政府审批工作。2008年西伯利亚科维克金油气田开始正式向中国东北地区供应天然气，干线途径大庆、哈尔滨、长春、沈阳、大连，年输送量为200亿 m^3 。

四、东北电网规划建设联合循环电厂的必要性

从电源结构看，东北电网水电装机只占总装机容量的14.6%，绝大部分为火力发电机组。东北地区煤炭资源主要分布于辽宁、内蒙古东部三盟一市和黑龙江东部地区。

1. 弥补一次能源短缺，减轻铁路运输压力

内蒙古东部三盟一市的煤炭储量丰富，但几乎都是褐煤，不易长途运输，且受开发条件限制，吨煤投资较高，近期内和远期内尚不具备大规模开发条件。黑龙江省属煤炭调出省，煤炭资源主要分布在东部地区，大部分是优质的动力煤，适宜长途运输至负荷中心发电和供热，然而受铁路运输等条件限制，只能以运定产。辽宁省是我国重工业省份，能源需求量大，占全区能源需求近一半，原本煤炭资源丰富，但早期开发的抚顺、阜新、南票和沈阳矿区已处于萎缩阶段，需从内蒙古东部和黑龙江东部输送煤炭和电力，每年尚需从关内通过铁路和水路补给大量煤炭。综上所述，东北地区一次能源分布不均，供应短缺。为解决上述问题，在市场经济条件下，东北地区电力规划在现有基础上，对其他能源供给方式也做了多方面的探讨、研究、分析和比较。如开发核电以减少煤炭供应短缺和运输压力，从俄罗斯输电及从俄罗斯输送天然气到东北等。俄罗斯的伊尔库茨克和萨哈林岛等地区天然气资源丰富，萨哈林岛紧靠中国东北地区，至中国边境仅有912km。

2. 改善电网运行状况

东北全区目前发电装机容量已超过3000万kW，其中水电装机461.8万kW，只占整个装机容量的14.6%，电网运行调峰容量严重不足，最大峰谷差已达832万kW。从全区水力资源开发情况看，辽宁省境内已开发80%，吉林省已达90%，黑龙江省10%。然而黑龙江省80%的水力资源分布于黑龙江界河和嫩江流域，开发十分困难。根据东北电网2010年电力发展规划，2010年全区发电装机将达6500万kW，仍以火电为主，届时峰谷差将越来越大，调峰也将越来越难。规划建设大型燃机联合循环电厂，可改善电网运行状况和电源结构，中等负荷（80%~85%）运行，满发调峰，并推行峰谷差电价，技术上合理，经济上可行。

五、大型燃机电厂建设规模

大型燃机电厂的建设规模及分期建设计划与电网的电力需求、电源规划、燃料供给条件、厂址建设条件等密切相关。

大型燃机电厂的建设规模应满足电网电力需求和电源规划的要求，根据大型燃机电厂在电网中的作用和地位确定合适的电源点和建设规模。首先，大庆地区耗电量巨大，电网电力需求量大；其次，在全国的大型燃机电厂的建设规划中惟独缺少东三省，燃机发电的

电源点特别少，燃机发电装机容量不成比例；第三，因应经济发展和环境保护，电源规划中应有电源结构替代。因此，大庆石油管理局有条件有能力依据现有经济条件与实力高屋建瓴，统筹规划，建设“F”级以上燃气轮机组成的燃气—蒸汽联合循环电厂（与国家本次捆绑式招标机组同步），实现东三省大型燃机发电的零突破，壮大大庆石油管理局的经济规模。

大型燃机电厂的建设规模应与燃料供给条件相适应。对于大型天然气项目而言，作为长期的稳定用户，为了保证项目的实施成功，发电用气约占总用气量的 70% 左右。在东三省惟有大庆有着得天独厚的条件。首先，肇源徐深 1 井发现了 300 亿 m^3 规模的深层天然气田；其次，2008 年西伯利亚科维克金油气田开始正式向我国东北地区供应天然气，年输送量为 200 亿 m^3 。随着油田深层天然气的不断发现以及俄罗斯天然气管线建设，大庆未来的天然气供给应该说是有保障的。

六、机 型 选 择

由于“F”级燃气轮机组成的联合循环机组性能远高于“E”级燃气轮机组成的联合循环机组，因此，目前大型燃机电厂几乎无一例外采用“F”级及以上的燃气轮机组成的联合循环机组。同样的考虑，联合循环机组的汽水循环方式亦大多应用“三压再热”，以提高联合循环机组的整体效率和运行的经济性。日本东京电力公司一次性安装 8 台 STAG109FA 型机组；香港中华电力公司的龙鼓滩（Black Point）电厂安装有 6 台 STAG109FA 型机组，总容量超过 2000MW。S109FA 型机组运行最长的已有超过 50000h 和 600 余次起动经验。因此，本文关于大型 STAG 机组的机型选择仅就 S109FA “F”级三压再热联合循环机组不同轴系布置进行比较。

大型燃气—蒸汽联合循环机组按轴系布置可分为单轴和多轴配置方案（见图 1），多轴配置方案又可分为一拖一、二拖一、三拖一等。三拖一多轴机组运行的灵活性较差，在部分负荷运行时其经济性亦较差，很少应用，本文不作论述。

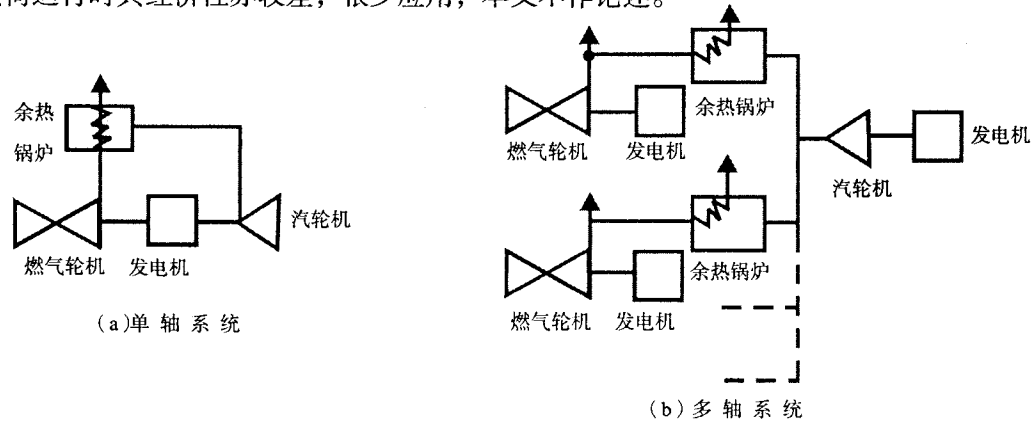


图 1 STAG 系统布置图

多轴一拖一机组在机组性能布置方案与单轴机组较为接近，但仍有差别，详见表 2。从表 2 可知，单轴机组布置方案在技术经济上比一拖一多轴机组方案具有更大优势。由于 2 套单轴机组的总出力和 1 套多轴二拖一机组的总出力相当，为便于比较，下面采用