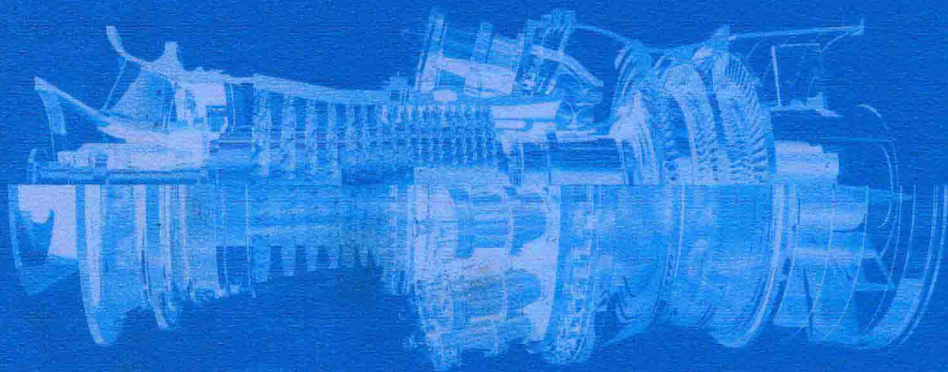


燃气轮机及其联合循环 发电技术 的实践与探索

RANQILUNJI JIQI LIANHE XUNHUAN FADIAN JISHU DE SHIJIAN YU TANSUO

刘惠明 著

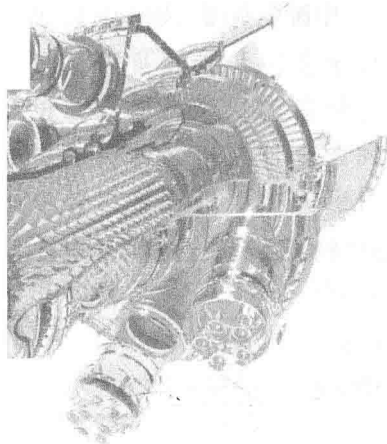


华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

燃气轮机及其联合循环 发电技术的实践与探索

RANQILUNJI JIQI LIANHE XUNHUAN FADIAN JISHU DE SHIJIAN YU TANSUO

刘惠明 著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气轮机及其联合循环发电技术的实践与探索/刘惠明著. —广州: 华南理工大学出版社, 2018. 6

ISBN 978 - 7 - 5623 - 5627 - 1

I. ①燃… II. ①刘… III. ①燃气轮机 - 联合循环发电 - 研究 IV. ①TM611. 24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 090810 号

燃气轮机及其联合循环发电技术的实践与探索

刘惠明 著

出 版 人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

http: //www. scutpress. com. cn E-mail: scutc13@scut. edu. cn

营销部电话: 020 - 87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 毛润政

印 刷 者: 虎彩印艺股份有限公司印刷

开 本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 19 字数: 463 千

版 次: 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 60.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

序 一

伴随着我国的改革开放,燃气-蒸汽联合循环发电产业在20世纪80年代中期开始了应用的第一个高潮,其标志就是以大庆油田和沿海发达地区为代表的B、E级燃气轮机发电;从2003年开始的伴随西气东输和引进国外LNG而来的F级燃气轮机打捆招标为第二个高潮;而从2015年分布式能源的“元年”起,则开启了当前我国燃气轮机应用的第三个高潮。刘惠明先生是伴随中国改革开放时期燃气轮机发电的发展而成长起来的资深专家,涉足燃气轮机发电技术30余年,对燃气轮机及其联合循环发电技术实践经验丰富、学术造诣颇深。现在他将多年来陆续完成和发表的文章选编成《燃气轮机及其联合循环发电技术的实践与探索》出版,这是他进入燃气轮机发电领域30余年来潜心钻研、辛勤耕耘的结晶,积极实践和努力探索的总结,凝结了他大半生的心血,也在一定程度上折射出我国燃气轮机及其联合循环发电技术发展的历程,是我国燃气轮机及其联合循环发电产业的一份宝贵财富。

本书所剖析的问题、总结的经验和提出的理论,对燃气轮机发电厂的生产和发展,都起到过重要的参考和指导作用。从中可以见到刘惠明先生对燃气轮机及其联合循环发电事业的一贯而又与时俱进的思想脉络。相信对于从事燃气轮机发电的专业技术人员而言,是一部不可多得的著作;对全国的燃气轮机及其联合循环电厂都有借鉴、参考意义;也将对当前我国燃气轮机应用的第三个高潮起到一定的促进作用。

刘惠明先生是广东省电机工程学会燃机电厂专业委员会、中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会和学术期刊《燃气轮机发电技术》发展的重要参与者和见证人。他认真组织电厂技术人员踊跃投稿,带头撰写论文,多次在年会演讲并获得优秀论文奖,所在电厂也多次获得专业委员会学术年会“优秀组织单位”称号。他以执着的敬业精神、严谨的工作态度和满腔的热忱投入工作。不论是担任电厂领导或是作为资深专家,其敬业精神令人折服。“文如其人”,读者从本书的字里行间,也能感受到他的思想和风格。

是为序。

秦士考

(中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会主任委员)

2018年1月18日



序 二

刘惠明同志十多年来在福建能源集团电力企业工作，见证了福建能源集团电力板块的发展壮大，他为福建能源集团电力板块的发展做出了努力和贡献。

光阴似箭，转眼刘惠明同志将要光荣退休了，他收集了在电力企业工作期间的论文成书，这汇聚了他 30 余年来从事燃气—蒸汽联合循环机组发电工作期间的思索与心得。这些文字，是来自一线的真实体验和感悟，扎根于实际，势必能对福建能源集团电力企业今后在电力技术管理方面起到很好的借鉴作用。刘惠明同志长期坚持在实践中反思、在反思中实践，再实践、再反思，在反思、撞击中绽放出思想的火花，这才是真正的财富——有想法就有探索，有探索就有发展，有发展就有未来。

这本燃气轮机发电技术论文集内容涉及机组设计、建设、调试、运行、检修及生产技术管理的各个方面。翻阅文集，一种真实、新鲜、生动、绚丽的感觉油然而生，鲜活的素材、生动的描述、鲜明的见解、真挚的情感，抒写着他对发电技术工作的认真和执着，也抒写着他对电力事业的无私大爱。在这里，我既看到了老一辈科技工作者厚重的经验积累，又看到了他年轻时代上下求索的坚定信念，仿佛看到他忽而凝重的思考、忽而若有所思的顿悟，忽而蓦然回首的释然。艰难困苦、喜悦感动无不融入一篇篇心血凝成的力作中。

古语有云：人生有“三不朽”——太上立德，其次立功，其次立言。其实人生在世，有“一立”便足以不朽。立言就是著书立说。而刘惠明同志现在做的就是“立言”——以文章来阐释自己对发电技术的理解和真知灼见。虽然这些文章未必就能不朽，但能够和同事们相互交流心得、取长补短、学习借鉴，也不失为一大赏心乐事。

希望福建能源集团电力企业的科技工作者都能像刘惠明同志那样，善于学习、借鉴、思考，敢于实践、质疑、创新，用勤勉和智慧共同创造电力事业美好的明天！

周必信

(福建能源集团副总经理)

2018 年 1 月 18 日



前 言

本文选编了我在 1986—2017 年 30 余年来从事燃气—蒸汽联合循环机组发电工作期间撰写或主持撰写的专业技术方面的论文，共 30 篇。内容涉及燃气—蒸汽联合循环发电厂的机组设计、建设、调试、运行、检修及生产技术管理全过程；专业跨度包括机务、电气、热控和运行、检修及生产技术管理的各方面。

从 1981 年底大学毕业实习时，在北京 507 燃机电厂第一次见到引进的 PG5331 燃气轮机发电机组，到 1986 年从西北电网调到中原油田，从事国产燃气轮机发电机组的维护工作；自 1986—2017 年，我有幸参加了国内从 B 级、E 级到 F 级的三次新机组引进过程，亲眼见证了改革开放以来我国燃气轮机发电事业的蓬勃发展，亲自参加了多项重要技术问题的解决过程，也获得了一次次难得的学习和锻炼的机会，这段经历令人终生难忘。

书中含有四类不同的文章：第一类是我个人独自撰写的，共 15 篇；第二类是我与其他作者合著的，共 10 篇；第三类是译文，共 1 篇；第四类是我起草的技改项目技术总结报告或项目立项建议书，共 4 篇。在这里，我要对书中所有合作作者在本书编辑和出版过程中所给予的理解和支持，表示诚挚的谢意。

在自己从事燃气轮机发电工作 30 年退休之际，汇编这本论文集，既是对过去工作的纪念，也将是今后前进的基石。这些论文都是过去已经发表过的，属多年前成果，今天看来水平未必就高，论点也难免有失偏颇，但作为纪念文集，这些文章基本上保持了当年的原貌，只是在文字上做了少量更改。希望论文集的出版，能为广大专业技术人员提供一份系统的参考资料，也为燃气轮机及其联合循环发电以后的发展起到抛砖引玉的作用。

燃气轮机及其联合循环发电技术的发展日新月异，但是对于一个企业乃至个人的技术水平来说，又无一不是在原有的基础上成年累月、一点一滴逐步积累的结果。如何能够做到既精通专业技术又具备生产技术管理的能力，是作为电厂生产一线的技术人员和生产技术方面的负责人必须努力达到的目标。我的体会是，首先要准确把握机组的运行和性能状况，从生产中存在的技术关键出发，在技术上提出解决问题的方向；第二要有较强的综合概括能



R

力，总工程师不是“总知道”和“总正确”，而是要善于从不同的技术见解中总结概括众人的智慧，通过理性的思维归纳出一个最佳的方案；第三要对技术监督工作高度关注，通过技术手段了解设备内部的微观变化过程，及时掌握设备状况的变化，时刻牢记“忽视技术监督工作，危害极大，长期放松，等于慢性自杀”；第四要不断学习国内外新的技术成果，跨学科、跨专业联合是当今解决复杂技术难题的有效途径，因某一专业复杂的技术难题，对另一专业来说可能解决起来很容易。

这本论文集得以出版，我要感谢中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会主任委员秦士孝先生、福建能源集团副总经理周必信先生及福建晋江天然气发电有限公司周朝宝、李秉正先生和公司同事的热心关怀和支持。《燃气轮机发电技术》编辑部的赵廉城老前辈，二十多年来，认真地审校我的每一篇论文；张继平女士协助并联系出版事宜，谨在这里致以深深的谢意。华南理工大学出版社的毛润政编审、吴俊卿副编审，对本书进行了精心的编辑和设计，一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请读者批评指正。邮箱：mslhming@163.com。

谨以此书庆祝我的外孙女万莘颐的出生，给今年的新春增添了无限欢乐。

刘惠明

2018年2月15日于深圳

目 录

燃气 - 蒸汽联合循环发电机组控制系统启动调试的体会	1
油田伴生气回收利用实践——燃气轮机在中原油田的应用	6
PG6531B 燃气轮机三级动叶故障及现场更换	29
GT13E2 型燃气轮机发电机组及其联合循环运行情况综述	34
大型燃气轮机发电机组静态变频启动装置及其运行维护	46
UNS2980B - Z 型微机同期装置及其应用	56
燃气 - 蒸汽联合循环发电厂选用 F - C 组合电器的分析	60
燃气轮机发电机转子绕组接地故障判断与现场处理	68
ABB 75MW 汽轮发电机组振动故障判断与处理	75
大型燃气 - 蒸汽联合循环发电厂安全经济运行中值得注意的几个问题的探讨	82
GT13E2 燃气轮机爆炸事故分析及改进措施	93
对发电厂变压器故障的分析及处理	100
第十九届 9FA/FB 燃气轮机用户年会在迪拜召开	109
提高 S109FA 单轴联合循环发电机组运行可靠性的探索	112
PG9351FA 型燃气轮机燃烧故障的分析与处理	127
燃气 - 蒸汽联合循环机组检修项目管理介绍	137
点检定修制在燃气 - 蒸汽联合循环电厂的应用	144
点检定修制在新建电厂实施过程中的难点及对策	151
PG9351FA 型燃气轮机功率下降原因分析及处理	156
大型燃气 - 蒸汽联合循环发电机组跳闸分析及防止对策	163
尽早布局, 谋划天然气分布式能源站项目	175
S109FA 单轴联合循环机组余热锅炉辅汽自供的实践与探索	179
燃气轮机蒸汽回注 (STIG) 在燃气分布式热电联产系统中的应用	191
燃气轮机进气冷却技术在国内推广应用遇到的瓶颈及对策	204
福建省动力与电气工程学科发展报告 (燃气轮机与 IGCC 部分)	217
重型燃气轮机的运行与维护 (译文)	238
PG6531B 燃气轮机蒸汽回注 STIG 改造工程技术总结报告	261
GT13E2 燃气轮机“油改气”工程总结报告	277
晋江燃气电厂 CDM 项目开发专题报告	288
发电机转子绕组匝间短路监测——福建省电力安全生产科技成果申报材料	293



燃气 - 蒸汽联合循环发电机组控制系统 启动调试的体会

摘要: 本文论述了燃气 - 蒸汽联合循环发电机组控制系统启动调试中值得注意的几个问题, 对改进电厂技术管理水平、充分发挥先进的自动化控制系统的作用、提高劳动生产率进行了探讨。

关键词: 联合循环机组; 控制系统; 调试

Experiences in Start-up Commissioning of Control System in S106B Combined Cycle Generation Set

Abstract: This paper deals with several problems in the control system of the gas-steam combined cycle generating unit, which deserve attention in debugging, and discusses how to improve the technical management level of the power plant, give full play to the advanced automation control system, and improve labor productivity.

Key words: combined cycle unit; control system; commissioning test

0 前言

20 世纪 80 年代以来, 从大庆油田喇二电站和华能汕头燃机电厂开始, 我国相继从国外引进了多套燃气 - 蒸汽联合循环发电机组, 其中大多数为 MS6000 系列联合循环发电机组, 这些机组的共同特点是出力大、自动化程度高, 普遍采用了以微处理机为基础的分布式控制系统。由于控制系统采用的新技术多, 因而对调试、运行及维护管理都提出了新的要求。从这些机组投产以来的情况来看, 机组控制系统的工作状况如何, 对机组的安全、稳定运行起着关键性的作用, 机组的启动调试是新机组投产发电前的最后一道工序, 而控制系统的启动调试是其主要的组成部分。它是对机组控制系统的设计、制造、安装水平的总检验, 其质量的优劣是直接关系到机组的安全和能否顺利投产及充分发挥生产效益的关键。因此, 如何搞好控制系统的启动调试工作就成为联合循环机组运行投产中的一个突出问题。本文就参加 S106B 燃气 - 蒸汽联合循环发电机组的控制系统启动调试和机组运行管理情况谈几点看法。



1 控制系统的重要性

目前我国引进的联合循环发电机组，按其结构布置，主要有两种方式：一种为单轴式布置——一台燃气轮机和一台蒸汽轮机从两端来共同驱动一台发电机，俗称“两头抬”；另一种为多轴式布置——一台或几台燃气轮机发电机组，其排气通过各自的余热锅炉，所有余热锅炉供汽给一台蒸汽轮机，蒸汽轮机驱动一台发电机。无论哪种布置方式的机组，本身系统都很庞大，运行参数之间相关性强，需要监视和控制的项目很多，因此，机组运行人员只有依靠比较完善的自动检测、自动调节、自动保护、自动信息显示和自动信息报告组成的自动化控制系统，才能对机组进行有效的控制和监视。

随着机组出力的提高，控制水平在广度和深度上有了质的变化，从气动调节系统、电液控制系统发展到计算机控制系统。随着机组自动化水平的不断提高，控制系统已成为保障机组安全、经济运行必不可少的支柱，地位越来越重要。

典型的联合循环发电机组除燃气轮机发电机组外，还包括余热锅炉、蒸汽轮机等几个控制对象，每一个控制对象都配置有包括独立的控制和保护功能的微机控制系统，用小型机或超小型机（如 PDP - 11、VAX）把子系统机连接起来，共同组成电站计算机数据采集与监控系统，做到控制功能分散、信息集中，从而大大提高了整个控制系统的可靠性。它也可以与电网管理系统结合起来，组成一体化的计算机监控系统，通过电站计算机数据采集与监控系统，在中央控制室就可以完成机组的启动、停机、运行调整、状态监视和紧急事故处理。尤其是配合较为完善的控制系统和可靠的连锁保护，简化了操作步骤，减少了误操作，有可能将机组的运行操作事故引起的强迫停机率降低到接近于零，提高了设备利用率和机组的安全性。

2 对启动调试人员的要求

联合循环发电机组广泛采用了基于微处理机的控制系统，对启动调试人员提出了更高的要求，启动调试人员应该掌握机组各种复杂的操作程序、试验方法和故障处理，投入的调试力量和调试周期也明显增加。控制系统不仅涉及的面广，而且技术水平要求也高，其内容不仅包括传统的常规仪表系统，而且有基于微处理机面向各个装置的就地控制系统（如 MARK - IV 燃气轮机控制系统、TRI - SEN 蒸汽轮机控制系统、SPEC. 200M 余热锅炉自动调节控制系统）和面向整个联合循环发电机组的中央计算机数据采集与监控系统 NETWORK3000。调试人员不仅要有一定的基础理论知识，还要有较为精通的技术水平，同时还要有一定的英语水平，并且要熟悉电厂的生产工艺流程，这几个方面决定了启动调试人员能否胜任调试工作。在柳屯电厂联合循环机组启动调试中，我们聘请了南京燃气轮机研究所进行技术咨询，组织了以热工自动化和电力自动化专业大中专毕业生为主、工人技师和技校毕业生为辅的启动调试队伍，与进行技术指导的外国专家一同工作。这样一是能及时掌握调试中出现的问题，反馈信息；二是配合外国专家工作，提高了工作效率；三是提高了对口人员的技术水平和处理实际问题的能力；四是为



电厂的运行、维护和管理锻炼了队伍。

3 制订周密合理的计划

在联合循环机组的运行中,燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机三者之间紧密地联系在一起,燃气轮机的启动、余热锅炉的暖炉及蒸汽轮机的冲转等相互交织在一起;多个控制对象的微处理机子系统经高速数据通道组成为一个分布式计算机控制系统,从而使得热力、电气、燃料、化学等专业都采用自动化技术。可以说,能否搞好燃气-蒸汽联合循环发电机组各个部分的启动调试工作,在很大程度上取决于控制系统技术水平的高低。所以在机组启动调试阶段,整个工作的重点是以控制系统为中心的。即便是热力设备专业的技术人员,除应掌握热力设备的结构和运行技术之外,还必须掌握热工自动化控制的基础知识,正确认识热力设备本身的结构及运行与控制系统之间的密切关系,否则就无法搞好热工设备的启动调试。

显然,搞好联合循环机组的启动调试工作,是直接影响机组早日安全、顺利投产的关键。为了搞好启动调试工作,调试人员要经过严格的培训:熟悉机组的工作原理、工艺流程,严格按规程进行操作;掌握各自专业的说明书和技术规范;正确使用各种测试仪器,正确测量和记录测试数据;认真做好启动调试前设备和系统的检查、试验及准备工作,尽早发现存在的问题或隐患,提前消除和采取预防措施。尤其重要的是必须制定一个热力、电气、控制、燃料等专业齐全的周密合理的调试计划,详细说明调试项目、方法和程序以及调试中可能发生的故障和原因分析及消除、预防措施,以指导机组的启动调试。调试时,按此计划精心组织、精心安排、精心调整,才能顺利地完成启动调试工作。对于联合循环发电机调试是以热机的分步调试、盘车、点火、冲转、并网为中心的。在燃机点火之前的分步调试中,主要抓 MARK-IV 控制系统,从而使燃机点火以后能用 MARK-IV 盘监视、控制和校准调试;在蒸汽轮机冲转前主要抓就地控制台和 TRI-SEN 速度控制器部分;在余热锅炉调试过程中主要抓以 SPWC. 200M 为基础的自动调节控制系统,从而使给水自动调节、主蒸汽温度调节、除氧器水位和压力调节器等几套主要自动调节控制系统及时地投入工作,保证机组的安全、稳定运行。

4 做好控制系统启动调试的前期工作

控制系统启动调试的前期工作,涉及控制设备的制造、运输、商检、安装。在一期工程商检中,由于包装不善、运输中受海水盐雾腐蚀,大量控制插件锈蚀损坏,特别是 MARK-IV 控制盘几乎每个插件都严重锈蚀,我们认真检查、严格把关、据理力争,迫使外商无条件更换了 MARK-IV 盘和大量的插件。

联合循环发电机组自动化程度高,所以分布在机(燃气轮机发电机/蒸汽轮机)、炉(余热锅炉)、电(发电机)等各部分的传感器、变送器、伺服阀以及就地的接线盒、端子箱、控制柜及连接电缆大量增加,我厂调试人员对照图纸和控制规范,对整个控制系统进行了认真的分步检查:

- (1) 对照系统流程图, 熟悉现场设备, 检查一次仪表;
- (2) 对一次仪表进行检查、校验;
- (3) 通过计算机系统对各控制器的输入、输出端口进行检查;
- (4) 对机组现场到各控制柜的线路进行检查;
- (5) 综合性检查控制系统能否满足现场运行所要求的功能。

通过检查、校验, 发现了大量的接线错误、插件接触不良、接线端子松动以及控制常数与控制规范不一致、控制程序不合理等问题, 从而把问题消灭在调试之前, 使机组在投产试运期间, 没有因控制系统而影响运行。

尽管机组的控制系统技术上很先进, 装置的可靠性也很高, 但从图纸、资料及装置上也存在着一些实物与资料不符之处, 特别是图纸资料版本更新修正频繁, 这些都要求调试人员随时掌握最新版本的图纸、资料。对启动调试过程事先将记录表格做好, 尤其是已修改的内容, 要标注清楚, 以便存档备查。

5 切实搞好培训工作

联合循环发电机组自动化程度高, 使得控制系统的专业分工越来越细, 要求越来越高, 一个人难以全面掌握, 加上机组运行维护人员缺乏实际操作锻炼的机会, 而电厂运行却要求技术人员能一专多能, 全面掌握机组的各种操作和故障处理。因此, 控制系统的调试和运行人员的技术水平有待提高, 对控制系统人员的培训必须切实引起重视。

(1) 对缺乏实际锻炼机会的人员应首先安排在模拟培训器上进行模拟操作训练, 从而尽快地熟悉和掌握控制系统的工作原理、运行操作和各种可能出现的故障以及故障处理的操作步骤。

(2) 对有实际经验的技术人员, 要进行继续教育, 促进知识更新, 特别是控制技术、计算机技术及电厂专用自动化技术的再教育。

(3) 培训形式多样化, 采取“走出去”和“请进来”相结合的方针, 举办多种层次的培训班、研究班和专题讨论会。

(4) 定期举办各种技术经验交流会, 就联合循环发电机组在科研、制造、安装、运行维护管理及事故处理等方面进行广泛的交流。

6 提高机组运行管理水平

机组的运行自动化水平是电厂综合性技术指标之一, 它是建立在设备质量、系统设计、施工调试、运行维护管理水平基础上的, 运行经验表明, 任一环节出现问题, 都会影响机组自动化的实现。联合循环发电机组自动化项目多、技术新, 增加了控制系统的投资, 用于机组控制系统的投资占整套机组总投资的 6% ~ 7%, 远远高于相同容量的火电机组对自动化的投资。先进的自动化技术装备要由相应水平的人员掌握和管理才能发挥效益, 我们不仅要引进国外的先进技术, 更重要的是要提高生产管理水平和运行操作维护水平。具有什么样的技术水平, 就需要相应水平的企业管理, 两者要同步进行。



本来是高度集中控制管理的自动化技术,由于技术和管理水平赶不上新技术、新设备的要求,不得不对单元集中控制管理机组实行机、炉、电分控的落后管理组织和方法,造成设备先进而运行人员众多,以至于不能大幅度提高劳动生产率的现象。

国外燃气-蒸汽联合循环发电机组皆采用单元集中控制管理,设备条件良好,自动化程度高,组织机构简练,职责划分明确且范围较宽,管理高度集中,生产上一般分为运行和检修管理,厂部除少数技术职能机构外不设其他机构。运行人员平均每班每单元机组两个人(包括值长),值长或单元机组控制员负责中央控制室的工作,操作员负责现场巡回检查和操作。值长都是由单元机组控制员提升的,对全厂的控制和操作比较熟悉,能全面负责电厂的运行工作。设备检修一般由制造厂、电力公司和承包商三方面的人员进行,电厂维护人员只负责日常维修及控制系统的维护、调试工作。技术部门的主要职责是运行性能指标和有关仪表、控制设备方面的管理、试验和分析,特别重视运行分析工作,分析主要指标的变化规律和设定值的合理性,提出改进意见,提高经济效益。

显而易见,我们目前的组织机构庞大,职责不明确,随着机组自动化水平的提高和职工素质的日益提高及经济体制改革和市场经济的深入,我们应积极借鉴国外和华能大连电厂的经验,将过去形成的机、炉、电分别运行管理、设备检修分工过细的陈旧模式,逐步以单元集中控制管理、设备检修综合管理的简化机构来代替。这就要求我国各燃气-蒸汽联合循环发电厂积极探索,互相交流,努力创造条件,找到更加适合实际的运行管理体制,使先进的技术设备和自动化系统真正地发挥出应有效率。

作者附言:

本文发表在《燃气轮机技术》1993, 6 (3), 是对原石油部中原油田柳屯燃气电厂引进国外 S106B 燃气-蒸汽联合循环发电机组生产准备、分部调试、试运行工作的总结。本文最后一节:提高机组运行管理水平,是对照国外培训期间对燃气轮机电厂运行维护及生产技术管理的参观学习和对比同期华能汕头、重庆江北燃机电厂建设进度及生产管理的经验而提出的设想和建议。这些设想和建议,在 1993 年底我受中原油田委派到深圳美视电厂工作以后,逐步得到了推行。

油田伴生气回收利用实践——燃气轮机 在中原油田的应用

刘惠明 吴关镇

摘要：本文简要回顾了中原油田伴生气回收利用的实践——燃气轮机应用的情况；重点总结了中原油田国产燃气轮机发电机组的运行情况和新引进 S106B 燃气-蒸汽联合循环发电机组的启动调试及性能试验结果，对机组运行中出现的主要问题、处理措施以及目前依然存在的隐患进行系统的梳理，以提高机组的管理水平和运行效率，保证机组的安全稳定运行。

关键词：中原油田；伴生气；航改机；重型燃气轮机；性能试验；应用

Practice of Recovery and Utilization of Oil Field Associated Gas—Application of Gas Turbine in Zhongyuan Oilfield

Abstract： This paper briefly reviews the practice of the recovery and utilization of gas turbine in Zhongyuan Oilfield; emphatically summarizes the running situation of domestic gas turbine generators in Zhongyuan Oilfield and the start-up, commissioning and performance test results of the newly introduced S106B gas-steam combined cycle power generation unit. The main problems in the equipment operation, treatment measure and the hidden danger that still exists in the system are also discussed, in order to improve the management level and efficiency of the unit, and ensure the safe and stable operation of the unit.

Key words： Zhongyuan Oilfield; associated gas; navigational change; heavy duty gas turbine; performance test; application

0 引言

中原油田油气生产的一个显著特征是富含伴生气，每吨原油伴生气量平均达到 120m^3 （伴生气油气比为 $1:(80 \sim 100)\text{m}^3/\text{t}$ ），伴生气含量为国内其他油田所少有。但早期由于多种因素的限制，油田伴生气大多直接排放或者燃烧，仅仅被“天井”烧掉的油田伴生气就有几十亿立方米之多。这一方面不利于油田综合效益的改进和发展，另一方面燃烧的气体所释放的有毒气体也在一定程度上对环境造成了污染，不利于人民的生活。从这两个角度上看，如何有效地对油田伴生气加以回收利用，提高石油伴生气的



回收率，是油田提高综合治理能力和综合经济效益所面临的主要问题之一，也是早期中原油田能源短缺形势下所首先面临思考的现实问题。当时，油田能源的使用状况是：一方面电能的用量越来越大，供不应求；另一方面作为油田副产能源的石油伴生气却尚未得到充分利用。为了缓解当时油田用电紧张的局面，并充分利用石油伴生气，经过认真调研和及时决策，认为广泛采用燃气轮机和天然气发动机作为油田设备的动力，具有重大的现实意义。

燃气轮机及天然气发动机的应用，特别是燃气轮机发电厂的建设（到 1986 年底，随着中原油田 3 个最大的天然气放空燃烧的火炬在濮一联、濮二联、文一联上空的同时熄灭，放空的伴生天然气全部进入中（原）沧（州）、中（原）安（阳）管网，每天回收天然气 100 万 m³），基本上消灭了油田伴生气放空火炬，利用干气发电，既节约了能源，又保护了环境，还可代替电网供电，缓解了动力紧张的压力，有力地支持了油气开采和油田建设。

中原油田 1988 年原油产量 722 万 t，跃居全国第四位，仅次于大庆油田、胜利油田、辽河油田；天然气产量 12.88 亿 m³，居全国第二位，仅次于四川油田。油田开采过程中产生的伴生气是溶解在原油中的甲烷、乙烷、丙烷、丁烷的混合气体。中原油田伴生气中乙烷、丙烷含量较高。油田伴生气经过透平膨胀机深冷分离加工，取得三大部分产品：一是干气，二是液化气（乙烷、丙烷、丁烷），三是轻油（如在用轻油调和车用汽油的研究中掺入甲醇）等，油田伴生气的组成如表 1 所示。干气主要成分是甲烷，是燃气轮机和天然气发动机的燃料。

表 1 油田伴生气的组成

伴生气	N ₂	CO	CH ₄	C ₂ ⁰	C ₃
体积占比（%）	0.71	0.55	72.94	12.16	8.32
伴生气	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	
体积占比（%）	3.84	1.31	0.14	0.02	

1 燃气轮机在中原油田的应用概况

中国的燃气轮机动力装置发电事业开始于 20 世纪 50 年代末期。原水电部于 1959 年从瑞士 BBC 公司引进 2 套功率为 6200 kW 的简单循环燃气轮机列车发电站用于大庆油田发电，燃料为大庆油田原油，曾为大庆油田的初期开发做出过重要贡献，从而开辟和启动了国内燃气轮机动力装置发电领域的研究。改革开放以后，燃气轮机动力装置事业也随着国家经济的发展而飞速发展，在石油工业领域获得广泛应用。其后 30 年，几乎是与油田同步发展，随着油田的开发和建设，用电量急剧增加，建设大功率燃煤电站又不具备条件（没有煤炭、交通不便、水源紧张、施工困难），而且周期也不能满足要求。而燃气轮机电厂功率不受限制，建设速度快，对现场条件要求不高。同时油田有液体或气体燃料的充分供应条件，于是油田就利用油田开发过程中一时难以有效利用的伴

生气作燃料，价格便宜，发电成本低，增加了燃气轮机的竞争力。也有的工业集团利用自己的燃气轮机独资在油田建电站，购买燃料气生产电力再卖给油田。

1986 年原石油部组织了“中原、大庆油田使用燃气轮机的情况调研”。当时有已经运行及正在安装的燃气轮机机组 23 套，进口机组 10 套，单机功率从 800 kW 到 50 MW，装机功率占油田所需动力的三分之一，用于发电、驱动注水泵、天然气输送管道增压和天然气处理，而且大部分燃气轮机机组配备了余热锅炉，实行热电（或功）联供。以 1986 年国内第一条中原—沧州天然气输气管道驱动 T4500 燃气轮机压缩机组和大庆油田喇二电厂 S106B 燃气—蒸汽联合循环发电机组为示范样本，进口燃气轮机及联合循环（或热电联供）机组数量大幅增长，为油田的生产提供了强大动力。表 2、表 3 分别列举了中原油田国产航空改型燃机及重型燃气轮机的配置及使用情况。

燃气轮机的使用是解决石油工业电力不足以及能源综合利用的一项带有战略性的重大决策，特别是在全国缺电的情况下，要实现“以气换电”就得推广应用燃气轮机。所以中原油田利用自身得天独厚的有利条件——有为数可观的天然气、油田伴生气，改变过去主要依靠电网的情况，通过认真规划和技术改造，将现有的伴生气用于燃气轮机发电和热电联供，实现“以气换电”，从而在解决缺电和合理利用综合能源方面产生了长期而深远的影响，取得了积极的成果。

表 2 中原油田国产航空改型燃机及使用情况统计表

机种	机型	功率 (kW)	转速 (r/min)	流量 (kg/s)	压比	热效率	燃料	制造厂	用途	使用 情况
涡浆 6	WJ6G1	2000	1000/300	20.4	7.45	20.8	伴生气	南方公司	发电	文留电厂
涡轴 5	WZ5G	1140	3000	13.3	6.50	17.8	伴生气	无锡 608 所	机械驱动	压缩机动力
涡轴 6	WZ6G	750	18 000	4.9	4.05	21.5	伴生气	兰翔 (370 厂)	机械驱动	注水 泵站
涡喷 6	WP6G1	4050	5900	44.7	6.95	21.1	天然气	黎明 (410 厂)	热电并供	黎明航 机电站
涡扇 9	WS9G1A	4400	6583	24.23	7.93	26	炼油 厂气	西航公司 (430 厂)	热电并供	计划在炼 油厂二期

表3 中原油田重型燃气轮机及使用情况统计表（天然气）

机型	功率 (kW)	排烟温 度 (°C)	转速 (r/min)	流量 (kg/s)	压比	热效率	制造厂	用途	使用 情况
RF—20	20 000	481	5100/3000	118.8	8.50	26.47	南汽厂*	发电（简单循环）	文留电厂
MS6001	36 660	543	5100/3000	136.6	11.70	33.8	英国 JBE	发电（联合循环）	柳屯电厂
T4500	3052	435	15 500/1500	18.21	9.7	26.86	美国索拉	天然气增压机组	中—沧输气管线
MS1002	5440	530	14 400/10 290	23.83	8.30	21.5	意大利新比隆	机械驱动	第三气体处理厂
MS3002	10 900	510	6450	530	6.95	24.3	意大利新比隆	机械驱动	中原化肥厂

注：* 南汽厂为南京汽轮电机厂。

1.1 燃气轮机发电机组

1.1.1 文留发电厂

文留发电厂原名航机电站，是中原油田的自备电厂，以天然气为主要燃料。安装有 YD-2000 航机发电机组 6 台，RF-20 型国产燃气轮发电机组两台，装机容量为 4.8 万 kW。年发电量在 1 亿 kW·h 以上。1985 年发电量占中原油田总用电量的 34.96%，1989 年创历年发电量最高纪录，年发电量 4 亿 kW·h。

(1) 航机电站（国产航改型 YD-2000 移动发电机组）

1979 年，中原油田处于油田勘探开发初期，由于电力供应不足，为此组建了航机电站，安装有 YD-2000 移动发电机组 6 台，单机额定功率 2000 kW，总装机容量为 12 MW，以简单循环连续运行发电。

在所有航空发动机改装中，用涡浆螺旋桨发动机改装是最简单的一种。WJ6 涡喷发动机额定转速为 12 300 r/min，减速器为两级封闭差动行星式，速比为 0.087 32。输出转速为 1074 r/min，直接驱动螺旋桨。改装时，在原连接螺旋桨处，换上内、外齿联轴器，直接带动六极 TF143/71-6 型发电机。

早期的两台机组（包括 2 台备用发动机），在 1978 年中原油田急需发电动力组装移动式电站驱动采油设备，其配置发电机转速 1000 r/min，而当时 WJ6 发动机的减速器未变，仍为 1074 r/min，正常情况下必须在机内减速器中更换原齿轮和齿轮架，但一时制造不出来，所以就直接交付使用了。当时的型号为 WF6C，后来将新齿轮和齿轮架换上后，则改为 WF6，在 1983 年航空部统一命名后改为 WJ6G1（1000 r/min）和 WJ6G1A（3000 r/min）。机组最早是燃烧轻柴油，1982 年电站开始在 2[#] 机组试烧天然气，进而全部烧伴生气；在油田改烧天然气后，机组热效率达到 23% 以上。这四台机