

发电厂热工自动化技术丛书

燃气轮机发电机组 控制系统

丛书主编 / 孙长生 主编 / 章素华 主审 / 吴革新



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

发电厂热工

燃气轮机发电机组 控制系统

丛书主编 / 孙长生 主编 / 章素华 主审 / 吴革新



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本丛书由电力行业热工自动化技术委员会组织编写,共11册,内容包括燃煤、燃气、核电机组的整个热力系统、热工过程控制设备与系统、设计与安装调试、运行维护与检修、热工技术与监督管理、故障分析处理与过程可靠性控制等多方面。

本书为《燃气轮机发电机组控制系统》分册,由国内长期从事燃气轮机自动化专业的专家精心编撰而成。书中简明扼要地介绍了燃气轮机的主设备、燃气轮机辅助系统、燃气轮机发电机及电气系统和燃机测量技术,以GE公司燃气轮机控制系统技术为主,详细编写了MARK-VI控制系统的主控系统、伺服控制、顺控系统、保护系统、操作界面和控制程序修改,最后介绍了燃气轮机联合循环和余热锅炉控制技术,以及从日常工作中搜集的燃机控制系统故障分析处理案例等内容。以帮助读者快速了解和学习被控对象的测量与控制原理,掌握实用燃气轮机控制系统技术。

本书兼顾燃气轮机技术的基础知识和工程实践,是一本实用的工程技术类图书,可供从事燃气轮机电厂设计、安装调试、运行维护的工程技术人员使用,也可作为大专院校热能与自动化专业的教科书和燃气轮机发电厂热工自动化专业的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

燃气轮机发电机组控制系统/章素华主编. —北京:中国
电力出版社,2012.4
(发电厂热工自动化技术丛书/孙长生主编)
ISBN 978-7-5123-2884-6

I. ①燃… II. ①章… III. ①发电厂-燃气轮机-发电
机组-控制系统 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 058555 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>)
汇鑫印务有限公司印刷
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 30.25印张 719千字 1插页
印数 0001—3000册 定价 88.00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

《发电厂热工自动化技术丛书》

主 编 单 位

丛书主编单位 浙江省电力公司电力科学研究院、
中国电力企业联合会科技发展服务中心

各分册主编单位

- 第一册 《热工自动化系统及设备基础技术》
——华北电力科学研究院有限责任公司
- 第二册 《汽轮机热力过程控制系统》
——神华国华（北京）电力研究院有限公司
- 第三册 《锅炉热力过程控制系统》
——湖南省电力公司科学研究院
- 第四册 《单元机组及厂级控制系统》
——广东电网公司电力科学研究院
- 第五册 《脱硫、脱硝、公用及辅助控制系统》
——广东电网公司电力科学研究院
- 第六册 《燃气轮机发电机组控制系统》
——中国华电集团电气热控技术研究中心、
浙江省电力公司电力科学研究院、
江苏华电戚墅堰发电有限公司等
- 第七册 《压水堆核电站过程控制系统》
——大亚湾核电运营管理有限责任公司
- 第八册 《热工自动化系统安装调试技术》
——浙江省火电建设公司、
浙江省电力公司电力科学研究院
- 第九册 《热工自动化系统检修维护技术》
——浙江省电力公司电力科学研究院、
浙江浙能嘉兴发电有限公司
- 第十册 《热工过程技术管理与监督》
——浙江省电力公司电力科学研究院
- 第十一册 《热控系统典型故障分析与预控》
——浙江省电力公司电力科学研究院

《发电厂热工自动化技术丛书》

审 委 会

主 任 金耀华
副主任 黄世强 金 丰 许继刚
委 员 段 南 王利国 仝 声 胡文斌 沈丛奇
毕诗芳 盛建华 吴革新 叶江琪

编 委 会

主 编 孙长生 朱北恒
副主编 尹 淞 尹 峰
编 委 李劲柏 刘武林 岳建华 陈世和 骆 意
章素华 施可登 孙 耘 张秋生 项 谨
王建强 黄 勃

《燃气轮机发电机组控制系统》

编 审 人 员

主 编 章素华
副主编 章 真 齐桐悦 孙长生
参 编 陈福湘 章 褪 张建江 刘 骅 吴书泉
陆红英 庞 军 丁永君
主 审 吴革新

热工自动化系统在发电厂机组安全稳定运行中的地位已不言而喻。热工自动化专业技术从主体上涉及热控系统设计、安装、调试、运行维护、检修和技术管理方方面面。因此不断提高发电厂热工专业技术人员的技术素质与管理水平，是发电企业的一项重要工作。

热工专业人员既要有扎实的专业理论基础，又要有丰富的专业实践经验，同时还要求有一定的热力系统知识。因此，热工专业知识的掌握，应该是基础理论联系实际经验、热力过程结合控制系统设备的渐近过程。随着技术的发展和新建机组的不断增多，新老电厂的热工专业人员都面临着专业知识和技术素质再提升的需求。

为了给热工专业人员提供系统、完整、实用、可操作、案例丰富的教材，推动热工专业培训工作的深化，造就业务精湛娴熟的专业人才队伍，电力行业热工自动化技术委员会根据专业知识的要求，组织编写了本套《发电厂热工自动化技术丛书》。丛书汇集了一批热爱自己的事业、立足岗位、善于吸取前人经验、勤于钻研、勇于实践的资深前辈、热工专家和现场技术人员的集体智慧。尤其可贵的是，在专业技术竞争激烈的今天，他们将自己长期用心血与汗水换来的宝贵经验，无私地奉献给了广大读者，相信本套丛书一定会给广大电力工作者和读者带来启发和收益。

希望本套丛书的出版，能推动热工专业运行、维护、检修及管理人员学习专业知识、深入技能培训。进而提升专业技术人员技术水平和解决生产过程实际问题的能力，涌现出更多的热工专业技术人才。为强健我国热工自动化人才队伍，在保证发电机组安全稳定、经济、节能环保运行中发挥作用，为国民经济的增长与繁荣作出贡献。

中国大唐集团公司副总经理
电力行业热工自动化技术委员会主任委员

二〇一二年五月二十日

前 言

随着科学技术的发展、机组容量不断增大，热工技术日新月异，热工自动化系统已覆盖到发电厂的各个角落，其技术应用水平和可靠性决定着机组运行的安全经济性。同时，热工自动化技术及设备的复杂程度不断提高，新工艺、新需求、新型自动化装置系统层出不穷，对热工专业人员掌握测量和控制技术提出了更高要求。新建机组数量的不断增加伴随着对热工人员需求的不断上升，又对热工专业的专业知识和运行维护能力提出了更高层次的要求。因此提高热工自动化系统的技术水平与运行可靠性，以人为本，通过加强热工人员的技术培训，提高热工人员的技术素质，是热工管理工作中急需的，也是一项长期的重要工作。

为了推动热工培训和技能竞赛工作的开展，协助各集团做好热工专业的技术培训工作，提供切合实际的系统培训教材，根据金耀华主任委员的意见，由电力行业热工自动化技术委员会主持、浙江省电力公司电力科学研究所和中国电力企业联合会科技服务发展中心牵头，华北电力科学研究所有限公司、神华国华（北京）电力研究院有限公司、湖南省电力公司电力科学研究所、广东电网公司电力科学研究所、中国华电集团电气热控技术研究中心、大亚湾核电运营管理有限责任公司、浙江省火电建设公司、江苏华电戚墅堰发电有限公司、华电杭州半山发电有限公司、浙江浙能嘉兴发电有限公司、浙江萧山发电厂、浙江浙能金华燃机发电有限责任公司等单位参加，编写了本套丛书，这套丛书主要有以下特点：

(1) 热工自动化系统及设备与热力系统融为一体，便于不同专业人员的学习，加深学习过程中的理解。

(2) 由浅入深，内容全面，包含了燃煤、燃气、核电机组，概括了火力发电厂的整个热力系统、热工过程控制设备与系统、安装调试与检修运行维护、热工监督与管理及故障分析处理技术。

(3) 按主设备的划分进行编写，适合发电厂热工专业因分工不同而开展的培训需要。

本丛书主要从应用的角度进行编写，作者均长期工作在电力建设和电力生产的第一线，不仅总结、提炼和奉献了自己多年来积累的工作经验，还从已发表的大量著作、论文和互联网文献中获得许多宝贵资料和信息进行整理并编入本丛书，从而提升了丛书的科学性、系统性、完整性、实用性和先进性。我们希望丛书的出版，有助于读者专业知

识的系统性提高。

在丛书编写工作的启动与丛书编写过程中，参编单位领导给予了大力支持，众多专家在研讨会与审查会中提出了宝贵的修改意见，使编写组受益良多，在此一并表示衷心感谢。

最后，特别感谢浙江省电力公司电力科学研究院和中国电力联合会科技发展服务中心，没有他们的支持，也就没有本套丛书的成功出版。

《发电厂热工自动化技术丛书》编委会

2013年2月

编者的话

2010年初,电力行业热工自动化技术委员会提出编写《发电厂热工自动化技术丛书》,将《燃气轮机发电机组控制系统》列入其中。

由于燃气轮机相对燃煤发电机组存在较大差别,热机和热力系统自成体系,积木块式紧凑安装,具有其独特的一面。虽然以燃气轮机为主构成的燃气蒸汽联合循环,其余热锅炉和汽轮机的测量控制原理与常规火电站相近,但燃气轮机本体在测量控制方面与燃煤机组存在差异,因此本书编写时,着重于燃气轮机的测量仪表、测量方法、信号处理、控制原理、保护原理等技术,注重了一般与特殊的关系、设备与控制关系、燃气轮机与联合循环的关系,在编写形式上与丛书其他分册有所不同。

在电力行业热工自动化技术委员会的组织下,搭建了《燃气轮机发电机组控制系统》编写组。经过斟酌,决定打破常规、取长补短,按照热工专业惯例编排测量、主控、顺控、保护、联合循环、故障分析等章节内容。为了帮助读者更好地理解燃气轮机测点布置、测量方法、控制目的及控制策略,书中第二章和第三章分别简要介绍了GE公司燃气轮机主设备和辅助系统。就燃气轮机主体设备而言,不同制造厂的燃气轮机主设备不同,导致各家的测量和控制方法也有不同。就燃气轮机控制思想本质而言,具有异曲同工的特征,可以举一反三。因此本书以美国GE公司的MARK-VI控制系统为主,按照热工专业技术划分进行介绍,读者可从中了解到GE公司的燃气轮机控制原理和实现方法,以燃气轮机为主构成的联合循环发电厂的测量控制技术,本书仅就差异部分做较详细的介绍。

编写组精心编撰了燃气轮机发电厂控制系统故障分析处理案例,主要涉及国内运营的燃气轮机发电厂控制系统出现的故障内容,部分案例采集于燃气轮机控制专家发表的论文改编而成。虽没有覆盖燃气轮机各种故障的分析与处理方法,但具有一定的代表性,可供读者参考。

本书是在学术造诣精深、经验丰富的两位燃气轮机资深专家吴革新先生和陈福湘先生提供的MARK-VI燃气轮机资料并指导把关下编写而成。章素华女士负责主编,确定全书框架和各章节内容,组织编排、裁剪完善,以及书稿的校核。全书共分十四章,第一章由张建江主编,陈福湘、刘骅、吴书泉、庞军参编;第二章、第三章由陈福湘提供主要资料,刘骅、章真、齐桐悦负责整理和编写;第四章由章真主编,吴书泉参编;第五章由章素华主编,吴革新、刘骅等参编、第六章~第十二章由吴革新提供主要资料,

章素华、章真、齐桐悦负责编写，章禔、张建江、吴书泉、陆红英、丁永君参与整理；第十三章由章禔主编，陆红英参编；第十四章由章禔主编，章素华、孙长生、陆红英、刘骅、庞军参编；吴革新先生负责全书技术内容的平衡把关；孙长生先生负责组织编写单位和参与统筹协调参编任务，主持全书结构框架和书稿的讨论和审查；章禔、孙长生先生对全书进行了校核和文字把关。

本书由吴革新先生主审。

本书编写过程中，得到了各参编单位领导的大力支持，参考了大量的学术论文、研究成果、规程规范和网上资料，电力行业热工自动化技术委员会及丛书审委会的专家们在审查中提出了许多宝贵意见，在此一一表示感谢。

最后，感谢所有参与本书策划和幕后工作人员。不足之处，恳请广大读者和专家批评指正。

《燃气轮机发电机组控制系统》编写组

2013年3月

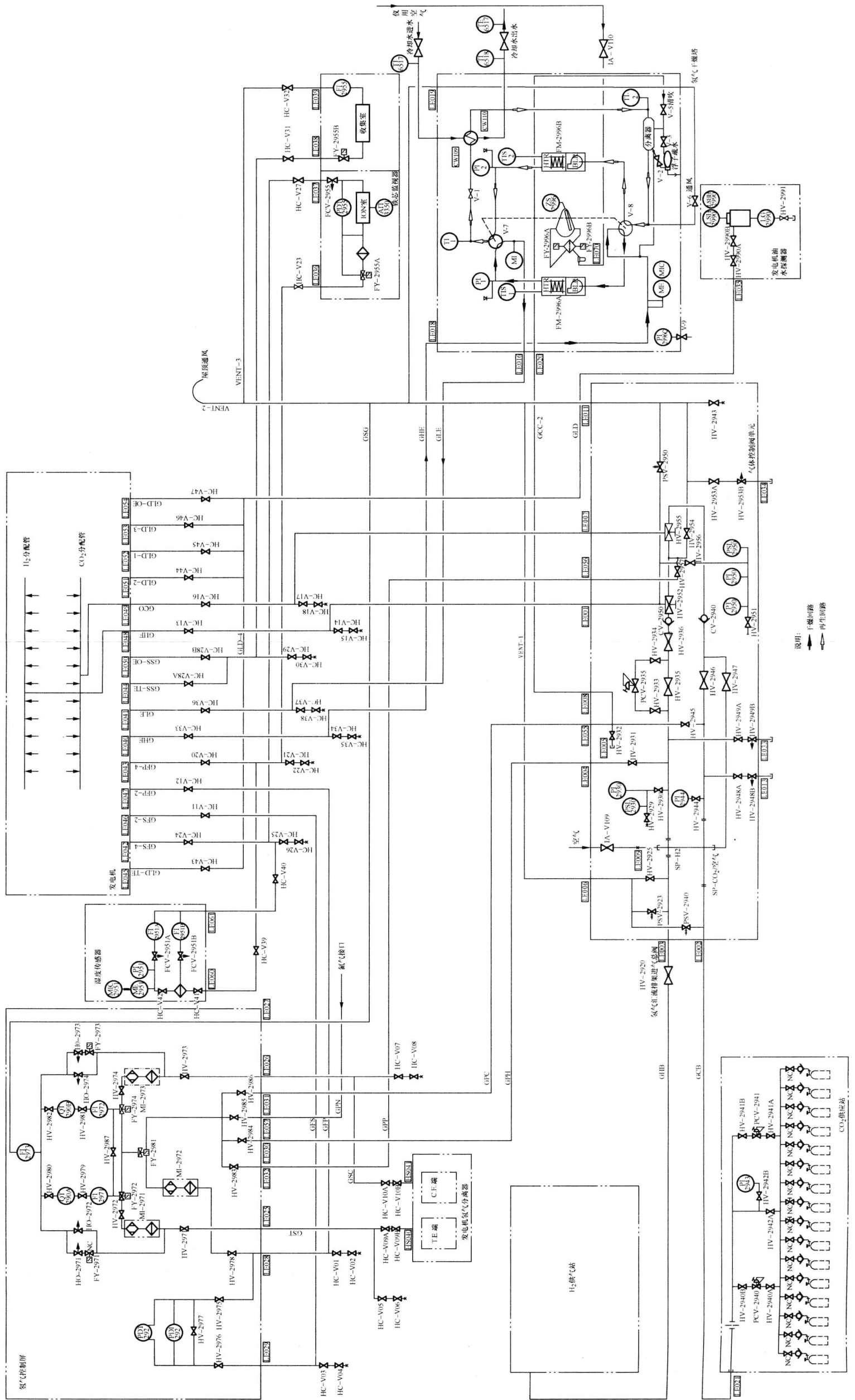


图 4-28 发电机 CO₂ 和 H₂ 系统图

序
前言
编者的话

第一章 燃气轮机和控制系统概述	1
第一节 概述.....	1
第二节 燃气轮机主要机型.....	3
第三节 燃气轮机控制系统.....	8
第四节 燃机功率和频率控制	29
第二章 燃气轮机主设备	33
第一节 压气机	34
第二节 燃烧室	37
第三节 燃气透平	46
第四节 孔窥仪测孔布置	55
第五节 轴承及其支承体系	56
第三章 燃气轮机辅助系统	62
第一节 空气进气系统	62
第二节 压气机进口可转导叶	67
第三节 冷却和密封空气系统	69
第四节 通风和加热系统	73
第五节 润滑油和液压油系统	75
第六节 气体燃料系统	87
第七节 液体燃料系统	94
第八节 启动机与盘车装置	96
第九节 火灾检测与保护	99
第十节 水洗系统.....	102
第十一节 天然气调压站.....	106
第四章 燃机发电机和励磁系统	113
第一节 氢冷发电机结构.....	113

第二节	启动系统·····	121
第三节	发电机 H ₂ /CO ₂ 系统 ·····	133
第四节	发电机密封油系统·····	138
第五节	发电机轴电压监视器·····	145
第六节	EX2100 TM 励磁系统 ·····	147
第五章 燃气轮机测量与驱动技术·····		158
第一节	GE 公司燃气轮机和汽轮机测点布置 ·····	158
第二节	压气机压比测量·····	162
第三节	空气流量测量·····	164
第四节	火焰检测原理·····	167
第五节	转速测量·····	168
第六节	振动测量·····	169
第七节	LVDT 位移测量 ·····	172
第八节	燃料流量测量·····	174
第九节	电液伺服阀·····	177
第十节	输入输出信号及其表决方式·····	179
第十一节	燃烧监测与诊断装置·····	184
第十二节	燃机 TSI 和自动装置配置 ·····	188
第六章 MARK-VI 控制系统 ·····		190
第一节	MARK-VI 主要控制功能 ·····	190
第二节	MARK-VI 控制系统概貌 ·····	193
第三节	MARK-VI 硬件配置 ·····	197
第四节	状态检测·····	200
第五节	可靠性和可利用率·····	202
第六节	可编程功能块·····	204
第七章 MARK-VI 主控系统 ·····		210
第一节	主控系统描述·····	210
第二节	启动控制·····	211
第三节	转速控制·····	213
第四节	加速控制·····	216
第五节	温度控制·····	218
第六节	停机控制·····	225
第七节	压气机排气压力控制·····	227
第八节	输出功率控制·····	228
第九节	手动 FSR 控制 ·····	230
第十节	FSR 最小值选择门 ·····	230

第十一节 机组自动准同期并网控制.....	234
第八章 MARK-VI 伺服控制	239
第一节 IGV 控制作用	239
第二节 IGV 控制原理	241
第三节 IGV 控制基准的算法	242
第四节 IGV 动作过程	243
第五节 压气机进口抽气加热控制 (IBH)	245
第六节 燃料控制系统.....	248
第七节 液体燃料控制.....	250
第八节 气体燃料控制.....	252
第九章 MARK-VI 顺控系统	267
第一节 顺序控制功能和读图.....	267
第二节 启动顺序控制.....	271
第三节 正常停机顺序控制.....	282
第四节 一键启停和自动启停.....	283
第十章 MARK-VI 保护系统	288
第一节 保护功能.....	288
第二节 遮断油系统.....	291
第三节 超速保护.....	296
第四节 超温保护.....	300
第五节 熄火保护.....	302
第六节 振动保护.....	304
第七节 燃烧监测保护.....	308
第十一章 MARK-VI 监控界面	315
第一节 操作界面.....	315
第二节 主显示页面.....	316
第三节 报警显示和处理.....	319
第四节 监视显示页面.....	323
第五节 DLN 2.0+燃烧系统和其他页面.....	335
第六节 超速和其他试验.....	345
第七节 实时趋势曲线.....	351
第八节 Workbench 工作平台	352
第十二章 MARK-VI 程序修改	355
第一节 查找信号.....	355

第二节	确认、编译和下载方法·····	355
第三节	增加、删除或移动方法·····	356
第四节	信号各种传输方法·····	357
第五节	增加历史数据方法·····	359
第十三章	联合循环和余热锅炉·····	361
第一节	燃气-蒸汽联合循环简介·····	361
第二节	燃气-蒸汽联合循环控制·····	362
第三节	余热锅炉类型·····	368
第四节	福斯特惠勒余热锅炉简介·····	372
第五节	国产余热锅炉简介·····	375
第六节	余热锅炉控制技术·····	378
第十四章	控制系统故障分析处理案例·····	409
第一节	燃机控制系统故障案例·····	409
第二节	现场仪表和传感器故障·····	414
第三节	自动调节品质不佳案例·····	422
第四节	控制系统综合故障案例·····	423
附录	控制系统名词缩写和解释·····	451
参考文献	·····	468

燃气轮机和控制系统概述

第一节 概 述

燃气轮机是近几十年迅速发展起来的热能动力机械，除了广泛应用于航空领域外，还广泛地应用于船舶、拖动和发电领域。是继汽轮机和内燃机问世后，吸取了两种热机之长而设计出来的热能动力机械。

20世纪50年代，燃气轮机出现在航空推进领域，基于燃气轮机技术的航空发动机等，渐渐被广泛用于地面的各个工业领域，作为压缩机和发电设备的动力源，70年代舰用燃气轮机迅速发展，美、英、苏、德、日等国建造的大、中、小型水面舰艇的主动动力，绝大部分采用全燃气轮机动力装置或柴油机-燃气轮机联合动力装置。

1955年燃气轮机装舰总功率仅为20万马力，1965年为240万马力，1978年为2366万马力，1987年为3800万马力，在30年跨度中燃气轮机装舰总功率竟增加了200倍。同期，燃气轮机进入电力工业领域。

20世纪80年代，重型燃气轮机从高温材料、工艺等方面普遍采用了航空发动机的技术，出现了一批大功率、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 $1100\sim 1300^{\circ}\text{C}$ ，简单循环发电效率达 $36\%\sim 38\%$ ，单机功率达200MW等级以上。

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，由单台燃气轮机组成的联合循环最大功率已达530MW，供电效率达60%。

随着燃气轮机及其联合循环技术日臻成熟，世界范围内天然气资源的开发及人类环境保护意识的增强，燃气轮机发电不仅用作紧急备用电源和尖峰负荷，还作为清洁能源、分步式能源和基本负荷向电网输送电力。时至今日，燃气轮机依然在发电领域不断成长和迅猛发展。

一、燃气轮机技术发展趋势

基于世界燃油/天然气资源，燃气轮机及其联合循环具有污染低、供电效率高、负荷范围宽和调整迅速等特点，为满足经济发展战略和国际竞争的需要，许多国家都把先进的燃气轮机技术作为本国科技重点发展领域之一。其中，最有代表性的是美国的先进透平动力系统计划(ATS)和综合先进推进器发展计划(IHPTET)，美国和欧洲合作的先进燃气轮机合作计划(CAGT)，欧共体的EC-ATS计划，日本的“新日光”计划和“煤气化联合循环动力系统”等项目。