



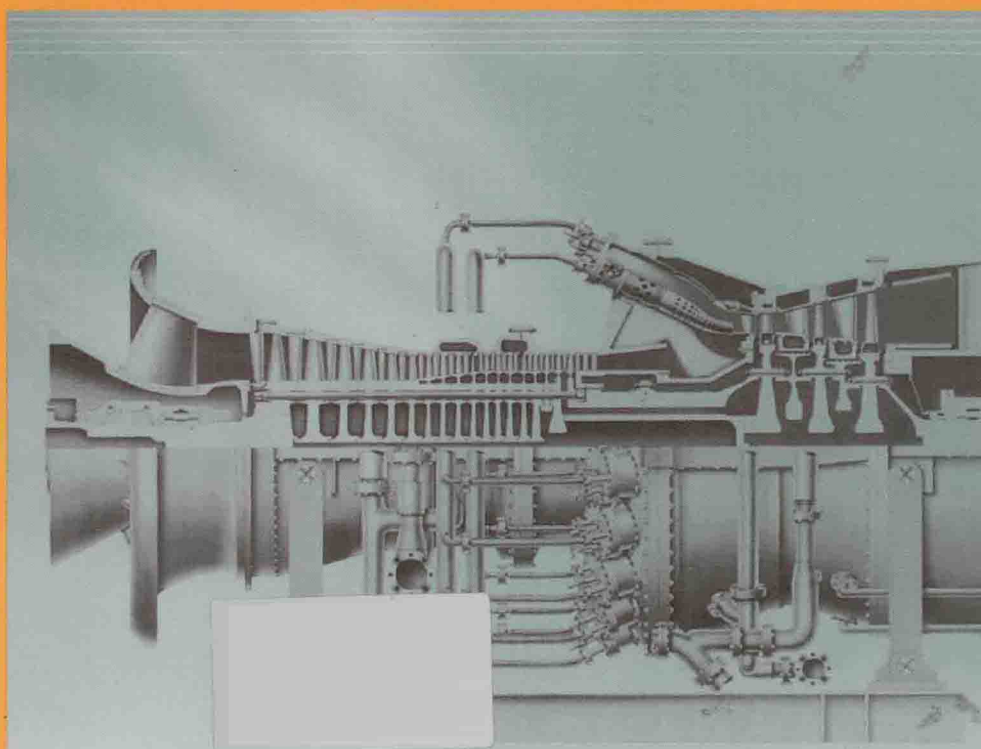
燃气轮机运行值班员

职业技能培训与鉴定推荐用书

燃气轮机运行值班员 培训教材

上海闸电燃气轮机发电有限公司 编著

燃气轮机发电现场生产运行人员
学习提高首选读物



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

燃气轮机运行值班员 培训教材

上海闸电燃气轮机发电有限公司 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本教材是根据《中华人民共和国职业技能鉴定规范·电力行业》对火力发电职业技能鉴定培训要求编写的。教材以实际操作技能为主线，将相关专业理论与生产实践紧密结合，反映了当前我国燃气轮机发电技术发展的水平，体现了面向生产实际的原则。

本教材按《燃气轮机运行值班员国家职业标准》要求进行编写。以美国 GE 公司 9E 型燃气轮机组为主要介绍对象，以燃气轮机运行为重点，适当介绍汽轮机及余热锅炉运行知识，共分七个章节进行叙述。主要内容有综述、设备巡检与系统调整、机组启动、机组运行调整、机组停运、事故处理、电厂运行管理和运行培训等。

本教材可作为燃气轮机运行值班员职业技能鉴定培训教材和燃气轮机发电现场生产技术培训教材，也可供燃气轮机发电类技术人员和技术学校教学使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气轮机运行值班员培训教材 / 上海闸电燃气轮机发电有限公司编著. —北京: 中国电力出版社, 2012. 11
ISBN 978 - 7 - 5123 - 3688 - 9

I. ①燃… II. ①上… III. ①燃气轮机 - 技术培训 - 教材 IV. ①TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 260432 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 2 月第一版 2013 年 2 月北京第一次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 14 印张 339 千字
印数 0001—4000 册 定价 42.00 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

《燃气轮机运行值班员培训教材》

编委会

主	任	朱朝军							
委	员	韩刚	王玉珠	屠伟	陈侃	黄英			
		刘俊	王金元	吴勇	许斐				
审	核	傅聚荣	陆汉生						



前 言



随着人们生活水平及对环保要求的不断提高,为适应电网调峰的需要,近年来,燃气轮机及其联合循环发电机组在我国得到了广泛应用。为满足燃气轮机运行值班员新工种鉴定的需要,做好职业技能培训,上海闸电燃气轮机发电有限公司与中国电力出版社共同组织编写了这套《燃气轮机运行值班员培训教材》,并邀请一批具有丰富运行经验和专业业务技能的专家进行审稿把关。本教材吸取了以往教材编写的成功经验,按照《燃气轮机运行值班员国家职业标准》对职业技能鉴定培训的要求精心编写。教材以实际操作技能为主线,突出理论和实践相结合,将相关的专业理论知识与实际操作技能有机地融为一体,主要具有以下突出特点:

(1) 教材体现了《燃气轮机运行值班员国家职业标准》对培训的要求,以培训大纲中的“职业技能模块”及生产实际的工作程序设章节,每一个技能模块相对独立,均有非常具体的学习目标和学习内容。

(2) 在内容编排上以实际操作技能为主线,知识为掌握技能服务,知识内容以相应的职业必需的专业知识为起点,不再重复已经掌握的理论知识,以达到再培训、再提高的目的,满足技能的需要。

(3) 教材突出了对实际操作技能的要求,不同技能等级的培训可根据大纲要求,从教材中选取相应的章节内容。每一章后,均有关于各技能等级应掌握的相应内容的提示。


(4) 教材不仅满足了《燃气轮机运行值班员国家职业标准》对职业技能鉴定培训的要求,同时还融入了对理解能力、分析能力和学习方法的培养,从而可提高学员的自学能力。

(5) 教材图文并茂,便于理解,便于记忆,适用于企业培训,也可供广大工程技术人员参考,还可用于职业技术教学。

《燃气轮机运行值班员培训教材》的出版,将会进一步推进燃气轮机发电厂运行人员的培训工作,为增强培训效果发挥积极作用。希望读者在使用过程中对教材提出宝贵建议,以使不断改进,日臻完善。

在此,谨向为编审本教材作出贡献的各位专家和支持这项工作的领导们深表谢意。

编委会



编 者 的 话



为适应燃气轮机运行值班员职业技能培训和技能鉴定工作的需要，全面提高运行人员和技术人员的技术素质和管理水平，适应现场岗位培训的需要，特组织编写《燃气轮机运行值班员培训教材》一书。

本书以《燃气轮机运行值班员国家职业标准》为依据，以实用为本、应用为主，结合近年来燃气轮机发展的新技术，本着紧密联系电厂生产实际的原则编写而成。本书按照模块—学习单元模式进行编写，重点介绍以重油为燃料的美国 GE 公司 9E 型燃气轮机组，兼顾天然气机组的内容，尽量反映新技术、新设备、新工艺、新材料、新经验和新方法。全书内容以操作技能为主、基本训练为重点，着重强调了基本操作技能的通用性和规范化。

本书为燃气轮机运行值班员进行职业技能鉴定的辅导与培训用书，也是燃气轮机运行人员的必备读物，涵盖了燃气轮机运行值班员技能鉴定考核的全部内容，内容丰富、覆盖面广，文字通俗易懂，是一本针对性较强的技术培训参考书。

限于时间和编著者水平，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2012 年 9 月



目 录



前言

编者的话

第一章 综述	1
第一节 燃气轮机在电网中的特点和应用	1
第二节 燃气轮机的结构和工作原理	4
第三节 燃气—蒸汽轮机联合循环	6
第二章 设备巡检与系统调整	7
第一节 基础知识	7
第二节 热力系统及其附属设施巡检和操作	28
第三节 电气系统及附属设施的巡检和操作	59
第三章 机组启动	68
第一节 启动前的准备	68
第二节 启动过程	98
第三节 发电机并网	112
第四节 燃料切换	115
第四章 机组运行调整	119
第一节 燃气轮机运行调整	119
第二节 联合循环机组汽轮机、锅炉运行调整	129
第三节 发电机—变压器组运行调整	136
第四节 燃气轮机辅助系统的运行调整	146
第五章 机组停运	149
第一节 燃气轮机停机操作	149
第二节 燃气轮机停盘车	155
第三节 停机后的维护	157

第六章 事故处理	169
第一节 概述	169
第二节 燃气轮机重大事故处理	170
第三节 燃气轮机常见事故处理	182
第四节 燃气轮机辅机故障处理	193
第五节 联合循环机组事故处理	195
第六节 电气事故处理	197
第七章 电厂运行管理和运行培训	201
第一节 运行管理	201
第二节 运行培训	208

第一章 综 述

第一节 燃气轮机在电网中的特点和应用

一、概述

众所周知，一个国家的经济实力和水平与其能源利用情况密切相关。长期以来，我国的能源结构以燃煤为主，但从环保的角度来看，煤电的 SO_2 、 NO_x 等物质的排放已成为影响环境污染的主要问题。随着人们生活水平的不断提高，人们对环保质量的要求也越来越高，因此采取有效措施用优质的清洁燃料代替部分燃煤，减少各类污染排放，成为调整我国能源结构、实现电力工业可持续发展的必然趋势。目前除了对燃煤电厂应用新型的环保设施外，发展燃气轮机及其联合循环发电机组，特别是发展燃用天然气为燃料的联合循环发电机组，可以极大地提高能源的利用效率并改善环境污染。

(一) 发电用燃气轮机的发展趋势

发电用燃气轮机是从 20 世纪 50 年代开始逐渐发展起来的，由于当时的单机容量较小，效率相对较低，因而只能用作电网的调峰和应急备用。80 年代以后，燃气轮机的容量和效率有了明显提高，特别是燃气—蒸汽联合循环机组的发展应用，燃气轮机发电不仅用作紧急备用电源和调峰机组，还能携带基本负荷。进入 21 世纪以来，燃气轮机技术发展迅速，其主要趋势为：

(1) 不断向高参数、高性能、大型化方向发展。由于燃气轮机热力循环的固有特点，其热力性能（热效率、比功）随着燃气初温的上升而提高，因此不断提高热力参数以提高其性能一直是燃气轮机技术发展的主要趋势。

(2) 积极采用新技术、新材料、新工艺。发电用燃气轮机制造企业积极应用高温合金、冷却技术、气动热力设计及燃烧技术等科技成果，不断开发新一代高性能产品，是当今燃气轮机技术发展的另一趋势。

(3) 燃料多元化。随着科学技术的发展，除了燃油、天然气以外，高炉煤气、液化天然气也得到了广泛应用。目前，以石油或天然气为燃料的高性能联合循环电站优势明显，日本以液化天然气（LNG）为燃料的联合循环标准单元电站和美国的分阶段建设“三步曲”模式的电站，代表着当今世界火电动力发展新趋势。

(4) 整体煤气化联合循环商业化。整体煤气化联合循环技术把高效的燃气—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，是一种发展前景较好的洁净煤发电技术。因此，随着整体煤气化联合循环技术的不断提高，其有望得到进一步商业化推广应用。

(二) 燃气轮机发电的主要生产过程

燃气轮机是整个燃气轮机发电厂的主要设备，是一种以气体作为工质，变热能为机械功的内燃式连续回转叶轮机械，由压气机、燃烧室、透平三大部件组成。外界空气进入压气机，经压气机增压，在燃烧室内与燃料混合燃烧成为高温燃气，燃气在透平中膨胀做功，推动透平带动压气机和发电机转子一起高速旋转，通常透平做功的 $2/3$ 左右用于驱动压气机，

1/3 左右驱动发电机发电。简单循环燃气轮机排气直接排至大气自然放热，由于排气温度还很高，为了提高发电效率，目前一般电厂均采用燃气—蒸汽联合循环技术进行发电。燃气—蒸汽联合循环发电机组将透平中排出的排气引入余热锅炉，经余热锅炉换热后产生高温、高压的蒸汽驱动汽轮机进行发电，联合循环发电效率比简单循环发电效率提高约 50%，大大提高了能源利用效率。

二、燃气轮机的特点和应用

（一）燃气轮机的特点

与常规火力发电相比，燃气轮机发电具有一些优点：① 供电效率高；② 比投资费用低；③ 建设周期短；④ 占地面积小，用水少；⑤ 自动化程度高，便于每天启停；⑥ 设备可用率高；⑦ 采用清洁能源，污染排放量少；⑧ 便于快速启动或配置为“黑启动”电源点。

（二）燃气轮机的应用

近年来，燃气轮机发电以其启停迅速、便于调峰、分布灵活等一系列优点受到越来越多国家的重视，在许多国家得到了广泛应用。随着西气东送和天然气的开发，以及人们环保意识的不断加强，燃气轮机发电在我国也得到了广泛应用。① 作为电网调峰电厂，提高电能质量。与一般火电机组相比，燃气轮机的显著特点就是启停速度比较快，负荷调整速率大，因此更适用于电网调峰调频，尽量减少电网负荷波动，特别是冲击负荷的影响，提高电能质量。② 用于“黑启动”电源点的配置，提高电网供电可靠性。众所周知，在一些国家都曾发生过电网大停电事故，这就使人们意识到电网中必须配备“黑启动”电源点。由于燃气轮机具有辅机容量小、快速启动的特点，因此适合作为“黑启动”电源点，一旦发生电网大停电，它能使电网在很短的时间内恢复供电。

三、典型燃气轮机简介

（一）燃气轮机分类及型号

燃气轮机在结构形式上可分为重型和轻型两种类型。重型燃气轮机又称为工业型燃气轮机，可分为传统型和快装式燃气轮机，主要用作陆地上固定的发电机组，使用寿命长，能长期安全运行，有较高的效率。轻型燃气轮机，如航机改装型燃气轮机，主要用作交通运输设备的发动机和车载移动发电机组，它的主要特点是结构比工业型燃气轮机轻巧、燃气初温高、机组效率高。

目前，世界上使用较多的燃气轮机主要包括 GE 公司、西门子公司和 ABB 公司生产的发电用燃气轮机。GE 公司生产的发电用燃气轮机主要有 MS9000E、MS9000F、MS9000FA 等系列，西门子公司生产的发电用燃气轮机主要有 V64、V84、V94 等系列，ABB 公司生产的发电用燃气轮机主要有 GT24、GT26 等系列。

（二）主要发电用燃气轮机产品介绍

1. GE 公司发电用燃气轮机特点

（1）整体式快装结构，主机（压气机、燃烧室、透平）在一个底盘上，辅机、发电机在另外的底盘上，整体运输，快速安装。

（2）MS6001B、MS9001E 等机型采用热端（透平端）负载，优点是减小压气机转子转动转矩的负载；缺点是发电机端热膨胀大，不利于与余热锅炉直接连接。MS6001FA、MS9001FA 机组改为由冷端（压气机端）输出，避免了以上这些缺点。

(3) MS9001E 由于临界转速采用了三支点支撑设计, 中间支点包在燃烧室高温区, 因此维护检修较为困难。其他产品均是双轴承支撑形式。

(4) 压气机气缸采用水平中分面式结构, 气缸沿轴向分为 2~3 段。压气机装有进口可转导叶 (IGV), 并在气缸每段结合处布置一圈环状的防喘放气口, 使气流沿圆周方向均匀地流出, 防止发生压气机喘振。压气机转子由轮盘、轴和动叶等组成, 各级轮盘通过多根拉紧螺栓彼此压紧而连成一体, 使转子具有很好的刚性和强度。

(5) 燃烧室采用逆流式分管结构形式, 能缩短机组轴向长度, 有利于改善转子整体刚性。

(6) 除 G、H 级燃气轮机外, GE 公司生产的燃气轮机透平都采用三级形式, 透平初温为 1000~1300℃。

2. 西门子公司发电用燃气轮机特点

(1) 整体式快装结构, 有共同的底盘。

(2) 采用冷端驱动, 有效避免了燃气轮机热胀对发电机的影响, 可以有效地保证机组的可用率。

(3) 通过 3S 联轴器与蒸汽轮机连接, 可以同时实现单机运行与联合循环运行的双重目的, 为燃气轮机调峰提供便利。

(4) 转子采用两个轴承, 叶轮之间通过中心拉杆轴向紧固, 各级轮盘间通过端面齿对中, 可以单独自由膨胀, 转动平稳。

(5) 压气机采用三段抽气防喘, 叶片安装时直接轴向滑入叶根槽, 轮盘的内环与静叶顶部对应部位加工出蜂窝型密封结构。

(6) 燃烧室采用高效率的环型燃烧室, 可燃烧多种燃料, 无论是气体还是液体燃料, 燃烧器均能保证灵活、稳定燃烧。

(7) 透平由四级叶片组成, 有较好的气动性能, 比 GE 公司的三级透平有略高的效率。除第四级动叶片不用冷却外, 其余的动静叶片均采用空气冷却。

3. ABB 公司发电用燃气轮机特点

与 GE 公司和西门子公司生产的燃气轮机相比, ABB 公司生产的燃气轮机偏向于重型结构形式, 虽然比较笨重, 但耐用性较好, 主要具有以下一些特点:

(1) 采用整体式结构形式。

(2) 压气机冷端输出功率, 透平采用轴向排气。

(3) 转子双轴承支撑, 采用盘鼓式结构, 由多个大型盘鼓锻压件用焊接方法组合成一体, 刚性和稳定性好, 但转子质量大, 焊接工艺要求高。

(4) 根据燃料性质的不同, 可以采用三种结构形式的燃烧室, 分别是标准的圆筒型燃烧室、装设 EV 型燃烧器的圆筒型燃烧室和装设 EV 型燃烧器的环型燃烧室。

(5) 透平的级数因功率的大小而异。GT8C 采用三级透平, GT11N2 有四级透平, GT13D、GT13E2 和 GT26 由五级透平组成。增加透平级数, 有利于改善等熵膨胀效率, 但机组结构较笨重。

(6) 机组的绝对死点置于压气机进气侧功率输出端的前轴承上。

(7) ABB 公司燃气轮机大多选用变频器, 使发电机作为变速的同步电动机来启动燃气轮机。一台变频器可用来启动多台燃气轮机, 可靠性高。

第二节 燃气轮机的结构和工作原理

一、燃气轮机的结构

(一) 压气机

压气机是燃气轮机的三大部件之一，其作用是向燃烧室连续不断地供应高压空气。压气机主要有轴流式和离心式两种类型。轴流式压气机内气体沿轴向流动，主要优点是流量大、效率高，缺点是级的增压能力低。离心式压气机内气体沿径向流动，优点是级的增压能力高，缺点是流量小、效率低。一般中小功率的燃气轮机主要采用离心式压气机，而大功率的燃气轮机则主要采用轴流式压气机。

压气机由转子和静子两大部分构成。转子部分由沿周向按照一定间隔排列的动叶片（或称工作叶片、动叶）、叶轮或转鼓、主轴等组成。静子部分由沿周向按照一定间隔排列的静叶片（或称导流叶片、静叶）、气缸等组成。压气机通常做成多级的。级是压气机的基本工作单元，每一级由一系列动叶栅和其后的一系列静叶栅构成。多数情况下，首级前面还有一系列附加的静叶栅，称为进口导叶。

世界各大燃气轮机制造公司在其典型大功率燃气轮机上所采用的压气机的情况如表 1-1 所示。由表 1-1 可见，目前大功率燃气轮机所采用的压气机的级数一般为 14~22 级，压比在 15~30 的范围内。压气机进一步发展的主要方向是提高压比、提高通流量、提高效率。

表 1-1 世界各大燃气轮机制造公司所采用的压气机的情况

制造厂	GE 公司		ABB 公司	西门子公司	三菱重工	
燃气轮机型号 (系列号)	MS9001FA	MS9001G/H	GT26	V94.3A	M701F	M701G
压气机 类型、级数	轴流、18 级	轴流、18 级	轴流、22 级	轴流、15 级	轴流、17 级	轴流、14 级
压比	15.4	23.2	30	17	17	21

(二) 燃烧室

燃烧室是燃气轮机的三大部件之一，其作用是利用压气机送来的一部分空气与燃料燃烧，并将燃烧产物与其余的高压空气混合，形成均匀一致的高温高压燃气后送往透平。由于燃烧室中的燃料燃烧及与空气的掺混是在高速、高温的流动过程中实现的，并且流动参数在工况变化时变化剧烈，所以燃烧室在设计中要力求做到以下几点：

(1) 设计工况和变工况下均能稳定、高效地组织燃烧，不熄火，无脉动，额定工况下的燃烧效率达到 98%~99%，低负荷工况下的燃烧效率不低于 90%。

(2) 出口气流的温度场和速度场均匀，温度不均匀系数 δt 一般小于 5%。

(3) 流动损失小，压损率 ε_B 一般不高于 3%。

(4) 结构紧凑、轻巧，并具有较长的使用寿命。

(5) 便于调试、维护和检修。

(6) 排气中的污染物含量少。

目前使用的燃烧室有圆筒型、分管型、环型和环管型四种类型，各种类型的燃烧室基本

上都由外壳、火焰管（又称火焰筒）、燃料喷嘴（燃烧器）、点火器、过渡段（燃气收集器）等部件组成，但不同类型燃烧室的具体结构有很大差别。

（三）透平

透平是燃气轮机的三大部件之一，其作用是将从燃烧室的燃气中的热能转化为机械功带动发电机发电，同时带动压气机转动。根据燃气在透平中的流动方向，将透平分为轴流式和向心式两种类型。轴流式透平燃气沿轴向流动，这类透平的优点是流量大、效率高，缺点是级的做功能力小。向心式透平燃气在总体上沿径向流动，这类透平的优点是级的做功能力大，缺点是流量小、效率低。

相对于汽轮机而言，燃气轮机透平的特点是：

- （1）工作压力低（一般都在 3MPa 以下），气缸壁薄。
- （2）总膨胀比小，级数少，目前通常为 3~5 级。
- （3）工作温度高达 1300℃，甚至 1500℃，转子、叶片等均需用压缩空气、水或水蒸气进行冷却。
- （4）负荷变化时，通过对燃气初温而不是对流量的调节来改变出力。
- （5）其效率变化对燃气轮机装置效率变化的影响更加显著，一般来说，透平效率每改变 1%（相对变化），机组效率就改变 2%~3%。

为使透平向着提高燃气初温、增加通流能力的方向发展，必须采用更先进的耐高温、耐腐蚀的合金材料，发展更先进的转子、叶片冷却技术等，从而满足燃气轮机向高效率、大功率方向发展的需要。

二、燃气轮机的工作原理

燃气轮机的热力循环主要由四个过程组成，即压气机中的压缩过程、燃烧室中的燃烧加热过程、透平中的膨胀做功过程及排气系统中的自然放热过程。

（1）压气机中的压缩过程。在压气机中，空气被压缩，比体积减小，压力增加，当忽略压气机与外界发生的热量交换时，这一压缩过程就是绝热的。这个过程中，工质从外界吸收一定数量的机械功，实现压缩增压。

（2）燃烧室中的燃烧加热过程。在燃烧室中，从压气机排出的高压空气与燃料喷嘴喷出的燃料混合燃烧，将燃料中的化学能释放出来，转化为热能，使燃气达到很高的温度。在这一燃烧加热过程中，工质只与外界有热量交换，并不对机器做功，空气或燃气在燃烧室中的流动过程伴随着损失，因而工质压力有所下降。但是，这一压力损失很小，燃烧室中的燃烧升温过程可以看作是一个等压燃烧过程。

（3）透平中的膨胀做功过程。从燃烧室出来的高温高压燃气，进入透平后，在透平中膨胀，把储存于高温高压燃气中的能量转化为机械功，对外界输出一定数量的机械功；与此同时，在透平排气端，压力接近于大气压力。在这一过程中，由于燃气流量很大，燃气流过透平所需时间很短，对外界的散热相对很小，因此透平中的膨胀过程可以看作是理想绝热过程。

（4）排气系统中的自然放热过程。将透平排气所包含的余热经排气管道和烟囱排入大气，在大气中自然放热，使燃气温度降低到环境温度，也就是压气机进口空气的温度。在这一自然放热过程中，压力基本保持不变，因而是一个等压放热过程。

第三节 燃气—蒸汽轮机联合循环

一、燃气—蒸汽联合循环的类型

将两个或两个以上的热力循环结合在一起的循环称为联合循环。燃气—蒸汽联合循环的类型多种多样,按余热锅炉来分,可将它们分为无补燃余热锅炉型联合循环、补燃余热锅炉型联合循环、增压锅炉型联合循环、程氏循环、HAT循环等;按照循环所燃用的燃料不同,可将它们分为常规燃油(气)型联合循环、燃煤型联合循环和核能型联合循环等;按照煤被燃烧利用的方式不同,燃煤型联合循环又分为常压流化床联合循环、增压流化床联合循环、整体煤气化联合循环、外燃式联合循环、直接燃煤(煤粉或水煤浆)的联合循环等;按照用途,可将它们分为单纯发电的联合循环、热电联产的联合循环和冷热电三联供的联合循环等。各种循环都有其各自的特点,分别适用于不同的场合。一般来说,采用无补燃余热锅炉的联合循环效率相对较高,目前,大型联合循环大多采用无补燃的余热锅炉。

二、常规联合循环机组的布置形式

联合循环发电机组通常由燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机组成,根据其组成方式的不同可以组合成多种类型的联合循环机组。常规余热锅炉型燃气—蒸汽联合循环发电系统可以由一台燃气轮机、一台余热锅炉和一台汽轮机组成(称为“一拖一”方案),也可以由多台燃气轮机、相同数目的余热锅炉和一台汽轮机组成(称为“多拖一”方案,常见的是“二拖一”,当然也可以为“三拖一”等)。

对于“一拖一”燃气—蒸汽联合循环发电机组,它可以采用燃气轮机与汽轮机同轴、共同配置一台发电机的单轴方案,也可以采用燃气轮机与汽轮机不同轴、各配置一台发电机的双轴方案。而在“多拖一”方案下,只能采用燃气轮机与汽轮机不同轴、每台燃气轮机和汽轮机都配置一台发电机的多轴方案。在该系统中,每台燃气轮机的排气由烟道进入余热锅炉,各台锅炉产生的蒸汽通过蒸汽母管进入汽轮机。

三、常规联合循环机组的特点

与常规的蒸汽轮机发电和燃气轮机简单循环发电相比,燃气—蒸汽联合循环发电技术有巨大的优越性,主要表现在高效率、低污染、低水耗等方面。在供电效率上,以天然气为燃料的联合循环机组在2000年即已达到55%~58%,比常规机组高出15%~18%;以煤为燃料的增压流化床联合循环(PFBC-CC)和整体煤气化联合循环(IGCC)目前的效率虽只比同等容量的常规燃煤机组高出不多,但潜力很大。在主要有害物质 SO_2 、 NO_x 及粉尘的排放,特别是 SO_2 的排放方面,各种联合循环机组都比常规燃煤机组低很多。由于联合循环机组中的燃气轮机部分不需要大量的冷却水,所以其耗水量一般仅为常规燃煤机组的50%~80%。另外,燃油(气)联合循环机组还具有系统简单、启停速度快、比投资费用低等优点,燃煤的联合循环机组还具有可燃用高硫、高灰分、低热值劣质煤等优点。

本章适用于中级、高级。

第二章 设备巡检与系统调整

第一节 基础知识

一、热力系统基础知识

(一) 燃气轮机热力循环

1. 燃气轮机理想热力循环分析

众所周知,在可逆的理想条件下,燃气轮机的热力循环被称为“布雷顿循环”。它由四个过程组成:①理想绝热压缩过程;②等压燃烧过程;③理想绝热膨胀过程;④等压放热过程。燃气轮机理想热力循环通常是由压气机、燃烧室、透平组成的等压加热简单开式循环。如果把压气机进口处空气的状态表示为“1”,燃烧室进口处工质状态表示为“2”,透平进口处燃气状态表示为“3”,透平排气状态表示为“4”,则这些过程在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上的表示如图2-1所示。

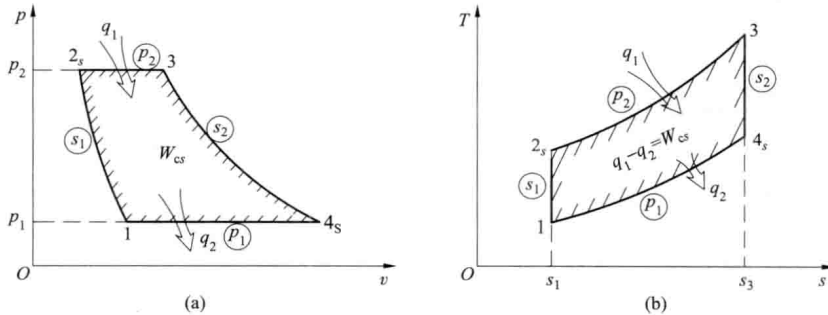


图2-1 在可逆的理想条件下,燃气轮机热力循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图
(a) $p-v$ 图; (b) $T-s$ 图

从图2-1中可以看出:

(1) 过程线 $1 \rightarrow 2_s$ 为压气机中的理想绝热压缩过程。压缩过程的效果是使空气的压力 p 增高而比体积 v 缩小。在 $p-v$ 图上, $1 \rightarrow 2_s$ 是一条朝着压力逐渐增高而比体积逐渐减小的方向发展的曲线。面积 $12_s p_2 s_1 1$ 就是理想绝热压缩功 W_{ys} 。在理想的绝热压缩过程中,空气的熵值 s 是恒定不变的,所以这个过程又称为等熵压缩过程。在 $T-s$ 图上, $1 \rightarrow 2_s$ 是一条与 T 轴平行的直线。

(2) 过程线 $2_s \rightarrow 3$ 为燃烧室中的等压燃烧过程。在 $p-v$ 图上, $2_s \rightarrow 3$ 是一条与 v 轴平行的直线。燃烧过程的结果是使空气从外界吸入热能 q_1 ,并使燃气的温度升高。在 $T-s$ 图上, $2_s \rightarrow 3$ 是一条朝着温度 T 和熵值 s 同时增长的方向发展的曲线。面积 $2_s 3 s_3 s_1 2_s$ 就是空气在此过程中从外界吸入的热能 q_1 。

(3) 过程线 $3 \rightarrow 4_s$ 为透平中的理想绝热膨胀过程。膨胀过程的效果是使燃气的压力 p 降低而比体积 v 增大。在 $p-v$ 图上, $3 \rightarrow 4_s$ 是一条朝着压力逐渐降低而比体积逐渐增大的方向发展的曲线。面积 $3 4_s p_1 p_2 3$ 就是理想绝热压缩功 W_{ts} 。在理想的绝热膨胀过程中,燃气的熵

值 s 是恒定不变的, 所以这个过程又称为等熵膨胀过程。在 $T-s$ 图上, $3 \rightarrow 4_s$ 是一条与 T 轴平行的直线。

(4) 过程线 $4_s \rightarrow 1$ 为大气中的等压放热过程。在 $p-v$ 图上, $4_s \rightarrow 1$ 是一条与 v 轴平行的直线。放热过程的结果是使燃气对外界放出热能 q_2 , 并使燃气的温度逐渐降低到压气机入口的初始状态, 所以在 $T-s$ 图上, $4_s \rightarrow 1$ 是一条朝着温度 T 和熵值 s 同时减少的方向发展的曲线。面积 $4_s 1 s_1 s_3 4_s$ 就是燃气在此过程中对外界放出的热能 q_2 。

(5) 从 $p-v$ 图上可以看出, 面积 $3 4_s 1 2_s 3$ 就是 1kg 空气在燃气轮机中完成一个循环后能对外界输出的理想循环功 W_{cs} 。

(6) 从 $T-s$ 图上可以看出, 面积 $2_s 3 4_s 1 2_s$ 就是 1kg 空气在燃气轮机中完成一个循环后能够对外界输出的理想循环功 W_{cs} 。这个面积越大, 就表示循环的比功越大。

(7) 在 $T-s$ 图上, 面积 $2_s 3 4_s 1 2_s$ 与面积 $2_s 3 s_3 s_1 2_s$ 的比值就是机组的循环效率 η_{cs} 。当面积 $2_s 3 s_3 s_1 2_s$ 一定时, 面积 $2_s 3 4_s 1 2_s$ 越大, 就表示机组的热效率越高。

2. 燃气轮机实际热力循环分析

在燃气轮机的实际热力循环过程中, 各种不可逆因素的影响导致了机组经济性的下降, 循环热效率和比功都比理想循环过程有所降低。实际循环过程在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上的表示有所不同, 如图 2-2 所示。

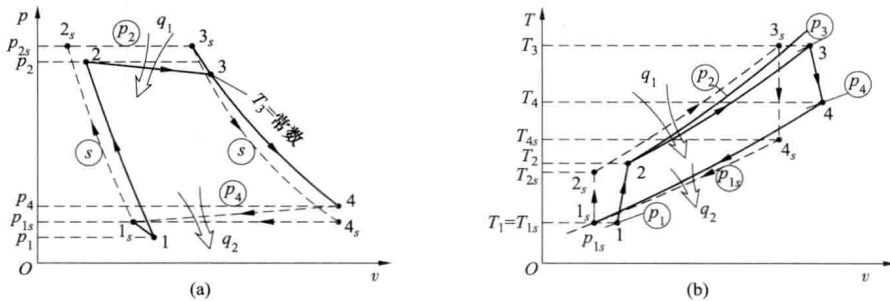


图 2-2 实际情况下, 燃气轮机热力循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图

(a) $p-v$ 图; (b) $T-s$ 图

实线—实际循环示意图; 虚线—理想循环示意图

从图 2-2 中可以看出:

(1) 由于在压气机的入口前, 气流的流动有摩擦阻力损失, 所以压气机的入口总压 $p_1 < p_{1s}$, 而滞止温度 T_1 仍然维持为大气温度 T_{1s} 。当空气经压气机压缩时, 由于不可逆因素的影响, 将使压气机出口处的温度 T_2 比等熵压缩过程所能达到的温度 T_{2s} 高, 相应的出口比体积 v_2 也有所增大。因而, 在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上, 实际压缩过程线 $1 \rightarrow 2$ 都要比等熵压缩过程线 $1_s \rightarrow 2_s$ 向右偏斜一定的距离。在压缩比不变的前提下, 压气机的出口总压 p_2 将有所降低, 但施加给 1kg 空气的实际压缩功 W_y 却有所增加。

(2) 在燃烧过程中, 由于不可逆因素的影响, 燃烧室的出口总压 p_3 一定会比入口总压 p_2 低一些。在燃气初温 T_3 不变的前提下, 燃烧室出口比体积 v_3 也相应有所增大。因而, 在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上, 实际燃烧过程线 $2 \rightarrow 3$ 都要比等压线向右下方偏斜一定的距离。由于 $T_2 > T_{2s}$, 而 T_3 维持不变, 外界加给 1kg 空气的热能 q_1 必然有所减少。

(3) 在燃气透平中, 由于不可逆因素的影响, 膨胀过程的终压 p_4 必然比大气压力 p_{1s}

高。也就是说，透平的实际膨胀比降低了。这将使透平的出口温度 T_4 比按等熵膨胀过程所能达到的温度 T_{4s} 高。因而，在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上，实际膨胀过程线 $3 \rightarrow 4$ 都要比等熵膨胀过程线 $3_s \rightarrow 4_s$ 向右偏斜一定的距离。在燃气初温 T_3 不变的前提下，由于实际膨胀比降低，必然会导致透平的实际膨胀功 W_1 有所减少。

(4) 透平的排气总压 p_4 比大气压力 p_{1s} 要高一些，才能将燃气排至大气中去，因而高温燃气在大气中进行自然放热时，燃气的总压将逐渐有所降低。这使得在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上，实际放热过程线 $4 \rightarrow 1_s$ 都要比等压线 p_4 向左下方偏斜一定的距离。由于 $T_4 > T_{4s}$ ，而 T_{1s} 维持不变，燃气释放给外界的热能 q_2 必然比理想等压放热过程要大。

(5) 在实际循环过程中，透平的膨胀功 W_1 减少了，而压缩机的压缩功 W_y 却增加了，那么当 1kg 空气在完成一个循环后，能够对外界输出的实际循环净功 $W_c = W_1 - W_y$ 必然比理想过程 $W_{cs} = W_{1s} - W_{ys}$ 要小，也就是说，机组的比功减小了。

(6) 在实际循环过程中，1kg 空气从外界吸收的热能 q_1 减少了，而释放给外界的热能 q_2 却增加了，那么相对理想过程来说，机组的循环热效率降低了。

(二) 燃气轮机热力循环性能指标

衡量一台燃气轮机设计好坏的技术指标有很多，如机组的效率、尺寸、寿命、制造和运行费用、启动和带负荷的速度及使用的可靠性等。从热力循环的角度出发，衡量燃气轮机的热力性能指标主要有压缩比、温比、热效率、比功等。

1. 压缩比

压缩比是指压气机出口的气体压力与进口的气体压力之比，代表工质被压缩的程度。压气机的进口压力一般即为大气压力。

2. 温比

温比是指循环最高温度（燃气初温）与最低温度之比。最低温度是压气机进气温度，一般即为大气温度。

3. 热效率

热效率是指当工质完成一个循环时，把外界加给工质的热能 q ，转化成为机械功（电功）的百分数。热效率有以下三种表示形式：

(1) 循环效率。其计算式为

$$\eta_c = \frac{W_c}{q} = \frac{W_1 - W_y}{fQ_{\text{net}, V, \text{ar}}} \quad (2-1)$$

(2) 装置效率（发电效率）。其计算式为

$$\eta_c^g = \eta_c \eta_{\text{mgt}} \eta_{\text{egt}} = \frac{W_s}{fQ_{\text{net}, V, \text{ar}}} \quad (2-2)$$

(3) 净功率（供电效率）。其计算式为

$$\eta_c^n = \eta_c^g (1 - \eta_e) = \frac{W_e}{fQ_{\text{net}, V, \text{ar}}} \quad (2-3)$$

式中 q ——相对于 1kg 空气来说的加给燃气轮机的热能，kJ/kg；

W_c ——相对于 1kg 空气来说的燃气轮机的循环功，kJ/kg；

W_1 ——相对于 1kg 空气来说的燃气透平的膨胀功，kJ/kg；

W_y ——相对于 1kg 空气来说的压气机的压缩功，kJ/kg；