

电力工程质量监督专业资格考试教材

汽轮机 分册

电力工程质量监督总站 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力工程质量监督专业资格考试教材

汽轮机分册

常州大学图书馆
藏书章

电力工程质量监督总站 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为全面提升电力工程质量,提升电力工程质量监督人员的岗位胜任能力,电力工程质量监督总站组织相关专业技术人员编写了《电力工程质量监督专业资格考试教材》,由十三个分册组成。本套教材全面系统、实用性强。

本书为《汽轮机分册》,包括概述、汽轮发电机组的安装工程实体质量监督、辅机设备、附属机械及管道安装工程实体质量监督、调整试运质量监督、主要质量管理资料监督检查和典型质量问题及分析。

本套教材作为电力工程质量监督专业资格考试教材,也可供相关专业及管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力工程质量监督专业资格考试教材. 汽轮机分册/电力工程质量监督总站主编. —北京:中国电力出版社,2014.8
ISBN 978-7-5123-6245-1

I. ①电… II. ①电… III. ①电力工程—工程质量监督—资格考试—教材②火电厂—蒸汽透平—工程质量监督—资格考试—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 168811 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

*

2014 年 8 月第一版 2014 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 259 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 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

本书编委会

主 编 孙玉才

执行主编 张天文

副 主 编 丁瑞明 白洪海

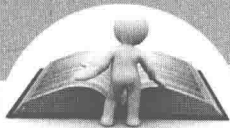
编写人员 夏 军 乔建潮 朱品德 李传玉

李德林 潘艳龙 孔德丰 李 明

张小光

审 核 张盛勇 范景元 李柱根 李 真

郝志刚 汪建玉 高 明



前言

工程质量监督是工程建设质量管理的基本制度，也是政府主管部门依法维护电力工程规范建设、保障工程质量安全的重要手段。随着我国电力工业的快速发展，电力技术水平不断提高，电力建设主体越来越多元化，为加强和规范电力工程质量监督工作，国家能源局分别于2012年9月和2014年5月印发了《电力工程质量监督管理体系调整方案》（国能电力〔2012〕306号文）和《关于加强电力工程质量监督工作的通知》（国能安全〔2014〕206号文），对于电力工程质量监督机构明确了“总站—中心站—项目站”的三级管理体系，对于电力工程质量监督工作确定了“国家能源局归口管理、派出机构属地监管、质监机构独立监督、电力企业积极支持”的工作机制。目前，在国家能源局的统一领导和大力支持下，电力工程质量监督各项规章制度正在逐步完善，各项工作正在逐渐步入正轨，为有效保证建设工程质量奠定了基础。

要做好电力工程质量监督工作，队伍建设和人才培养是关键。电力工程质量监督总站（以下简称总站）在认真总结多年来电力行业和全国各行业工程质量监督专业人员管理经验的基础上，确定了电力工程质量监督专业人员实行“高级专家—质量监督师—质量监督员”三级管理的工作模式，其中，高级专家实行评聘制，由总站主导，以技术委员会平台进行动态管理；质量监督师、质量监督员实行统一认证考试制度。在专业人员的工作职责方面，要求各质监机构在进行现场检查时，检查组组长必须持有高级专家证，检查组的专业负责人必须是质量监督师，一般检查人员必须持有质量监督员及以上资格证书。在企业内部的质量管理体系中将继续贯彻实施质量检查员持证上岗制度，允许质量检查员考取和持有质量监督师或质量监督员证书。为落实以上管理原则，进一步加强质量监督师、质量监督员的资格认证管理，总站于2014年3月印发了《电力工程质量监督人员资格认证和从业管理办法》，明确了资格认证实行向社会开放和教考分离的工作原则，同时详细划分了考试专业，确定了考试方式和考试科目。为理顺电力工程质量监督专业知识体系，构建针对性强、层次清晰、内容全面的认证考试平台，总站组织编制了本系列《电力工程质量监督专业资格考试教材》。

本系列教材包括建筑、锅炉、汽轮机、电气、热工控制、金属与焊接、水处理与制氢、核能动力、水工结构、水力机电、金属结构、输电线路和工程管理十三个专业分册。本系列教材以专业资格认证考试为立足点，重点强调了专业知识的系列性、完整性和实用性。各专业分册在章节划分和内容设置上基本保持一致；在知识点设置上强调了工程质量行为监督、专业基础理论、标准体系、设备材料、施工技术、工程实体质量监督等要点；在知识内容和

范围上重点从工程质量监督的角度出发，全面细致地讲解了工程勘察、设计、施工、验收、运行维护及管理等活动的技术要求和所遵守的技术依据和准则，同时还就各专业在工程质量控制方面存在的一些通病和重点质量问题进行了总结和分析；各专业知识点丰富，重点突出。本系列教材不仅可以作为专业资格认证培训用书，也可以作为大家日常工作中随时查阅专业知识的工具书。

本系列教材由电力工程质量监督总站主编，本册为《汽轮机》分册，由安徽省电力建设工程质量监督中心站编写。

在本系列教材的编写过程中得到了有关省（市、区）电力公司及施工、调试、监理、检测等单位的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，教材中难免有疏漏和不当之处，恳请广大读者和专家批评指正。

电力工程质量监督总站

2014年8月



目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 汽机专业简介	2
第二节 汽机专业质量监督	12
第二章 汽轮发电机组的安装工程实体质量监督	15
第一节 汽轮机本体安装	15
第二节 发电机安装	34
第三节 汽轮机调节保安装置和油系统安装	50
第三章 辅机设备、附属机械及管道安装工程实体质量监督	63
第一节 辅助设备安装	63
第二节 附属机械安装	69
第三节 管道安装	76
第四章 调整试运质量监督	84
第一节 分系统调整试运	84
第二节 汽轮机组整套启动试运	117
第三节 燃气轮机启动及空负荷整套试运	124
第五章 主要质量管理资料监督检查	126
第一节 施工管理	126
第二节 调试管理	139
第三节 验收管理	144
第四节 强制性条文执行管理	148

第六章	典型质量问题及分析	159
第一节	汽轮机扣盖前监检典型质量问题及分析	159
第二节	机组整套启动试运前监检典型质量问题及分析	159
第三节	机组商业运行前监检典型质量问题及分析	161
参考文献		164



第一章

概 述

能源是整个世界发展和经济增长的最基本的驱动力,为人类的生产和生活提供各种能力和动力的物质资源,是人类赖以生存和国民经济发展的物质基础,能源的开发和有效利用程度,以及人均消费量是生产技术和生活水平的重要标志。目前,关于能源的定义约有 20 种。例如:《科学技术百科全书》对能源的定义为:“能源是可从其获得热、光和动力之类能量的资源”;《大英百科全书》对能源的定义为:“能源是一个包括着所有燃料、流水、阳光和风的术语,人类用适当的转换手段便可让它为自己提供所需的能量”;《日本大百科全书》对能源的定义为:“在各种生产活动中,我们利用热能、机械能、光能、电能等来做功,可利用来作为这些能量源泉的自然界中的各种载体,称为能源”;我国的《能源百科全书》对能源的定义为:“能源是可以直接或经转换提供人类所需的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源”。可见,能源是一种呈多种形式的,且可以相互转换的能量的源泉,是可产生各种能量(如热量、电能、光能和机械能等)或可做功的物质的统称,是能够直接取得或者通过加工、转换而取得有用能的各种资源,包括煤炭、原油、天然气、煤层气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和电力、热力、成品油等二次能源,以及其他新能源和可再生能源。确切而简单地说,能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。

从 19 世纪 80 年代以来,电力已逐步取代了作为 18 世纪产业革命技术基础的蒸汽机,成为现代社会人类物质文明与精神文明的技术基础。电力工程是指与电能的生产、输送、分配有关的工程,广义上还包括把电力作为动力和能源在多种领域中应用的工程。电能作为能源的一种形式,有易于转换、运输方便、易于控制、便于使用、洁净和经济等许多优点。20 世纪以来,电能的生产主要是火力发电、水力发电和核能发电,新能源发电主要指风力、太阳能、潮汐、地热发电等。

现阶段,我国电能主要来源于火力发电,火力发电是利用燃烧燃料(煤、石油及其制品、天然气等)所得的热能发电。火力发电的发电机组有两种主要形式:①利用锅炉产生高温高压蒸汽推动汽轮机旋转带动发电机发电,称为汽轮发电机组;②燃料进入燃气轮机将热能直接转换为机械能驱动发电机发电,称为燃气轮机发电机组。

汽轮机是将蒸汽的能量转换成为机械能的旋转式动力机械,又称蒸汽透平。主要用作发电的原动机,也可直接驱动各种泵、风机、压缩机和船舶螺旋桨等。还可以利用汽轮机的排汽或中间抽汽满足生产和生活上的供热需要。

火力发电厂通常是指以汽轮发电机组为主的发电厂,其核心汽轮机、发电机及其附属系统统称为汽机。

第一节 汽机专业简介

1883 年瑞典工程师拉瓦尔设计制造出了第一台单级冲动式汽轮机，随后在 1884 年英国工程师帕森斯设计制造了第一台单级反动式汽轮机，当时的汽轮机与现在所使用的相比结构简单。汽轮机的发明具有重要意义，现被广泛应用在电厂、航海和大型工业中。在上世纪 60 年代，世界工业发达的国家生产的汽轮机已经达到 500~600MW 等级水平。1972 年瑞士 BBC 公司制造的 1300MW 双轴全速汽轮机在美国投入运行；1974 年西德 KWU 公司制造的 1300MW 单轴半速饱和蒸汽参数汽轮机投入运行；1982 年世界上最大的 1200MW 单轴全速汽轮机在前苏联投入运行。由于冶金技术的不断发展，使得汽轮机结构也有了很大改进。目前的大机组普遍采用了高中压合缸的双层结构，高中压转子采用一根转子结构，高、中、低压转子全部采用整锻结构，轴承较多采用可倾瓦结构。目前各国都在进行大容量、高参数机组的开发和设计，如俄罗斯正在开发的 2000MW 汽轮机；日本正在开发一种新的合金材料，将使高、中、低压转子一体化成为可能。我国自 1955 年开始生产出第一台中压 6MW 汽轮机，此后陆续生产出 12、25、50、100、125、135、200、300MW 级汽轮发电机组。80 年代后又先后从不同厂家引进 300MW 和 600MW 机组的整套制造技术，不断吸收、优化、再创新的发展，先后推出了高参数、大容量、高效率、低污染的机组，1000MW 级超超临界大机组也先后投产，实现了从 300MW 和 600MW 亚临界机组向 1000MW 级超超临界大机组的跨越。

目前世界上汽轮机主要制造企业有：美国的通用电气公司（GE）、西屋电气公司（WH）、日本的三菱、东芝和日立公司，欧洲的 ABB 公司，俄罗斯的列宁格勒金属工厂（JIM3）、哈尔科夫透平发动机厂（XTT3）和乌拉尔透平发动机厂（TM3），英国的通用公司（GEC），法国的阿尔斯通-大西洋公司（AA），德国的电站设备联合制造公司（KWU）等。目前，我国生产汽轮机的主要工厂有上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂有限责任公司、东方汽轮机有限公司、北京北重汽轮发电机有限责任公司，以及青岛汽轮机厂和武汉汽轮发电机厂等，南京汽轮发电机厂以生产燃气轮机为主，杭州汽轮机厂以生产工业汽轮机为主。

燃气轮机也称燃气涡轮发动机，是属于热机的一种发动机。燃气轮机可以是一个广泛的称呼，基本原理大同小异，包括涡轮喷射引擎等在内。而一般所指的燃气涡轮引擎，通常是指用于船舶（以军用作战舰艇为主）、车辆（通常是体积庞大可以容纳得下燃气涡轮机的车种，例如坦克、工程车辆等）、发电机组等的。与推进用的涡轮发动机不同之处在于，其涡轮机除了要带动压缩机外，还会另外带动传动轴，传动轴再连上车辆的传动系统、船舶的螺旋桨或发电机等。

发电机，1831 年由法拉第发明，是将机械能转变成电能的电机。通常由汽轮机、水轮机或内燃机驱动。电能是现代社会最主要的能源之一。发电机在工农业生产、国防、科技及日常生活中有广泛的用途。发电机分为直流发电机和交流发电机两大类。后者又可分为同步发电机和异步发电机两种。现代发电站中最常用的是同步发电机。

一、蒸汽轮机

（一）分类

汽轮机是能将蒸汽热能转化为机械能的外燃回转式机械。蒸汽进入汽轮机后，依次经过

一系列环形配置的喷嘴和动叶，将蒸汽的热能转化为汽轮机转子旋转的机械能。蒸汽在汽轮机中以不同方式进行能量转换，便构成了不同工作原理的汽轮机。为了便于区分，常将汽轮机按工作原理、热力特性、蒸汽流向、进汽参数、用途等进行分类。

1. 按工作原理划分

级是汽轮机中最基本的做功单元，是由喷管叶栅和与其相配合的动叶栅组成的。蒸汽在汽轮机级中以不同的方式进行能量转换，形成不同工作原理的汽轮机，即冲动式汽轮机和反动式汽轮机。

(1) 冲动式汽轮机。由冲动级构成的汽轮机称为冲动式汽轮机。在冲动式汽轮机的级中，蒸汽的膨胀主要发生在喷嘴中，蒸汽在动叶通道中的膨胀程度很小。

(2) 反动式汽轮机。由反动级构成的汽轮机称为反动式汽轮机。在反动式汽轮机的级中(调节级除外)，蒸汽在喷嘴和动叶中的膨胀程度近似相等。

2. 按热力特性划分

(1) 凝汽式汽轮机。进入汽轮机做功的蒸汽，除很少一部分漏汽外，全部排入凝汽器，该种汽轮机称为纯凝汽式汽轮机。为提高效率，近代汽轮机都采用回热抽汽，即进入汽轮机的蒸汽，除大部分排入凝汽器外，有少部分蒸汽从汽轮机中分批抽出，用来加热锅炉给水，该种汽轮机称为有回热抽汽的凝汽式汽轮机，简称为凝汽式汽轮机。

(2) 背压式汽轮机。进入汽轮机做功后的蒸汽在高于大气压力下排出，供工业或生活使用，该种汽轮机称为背压式汽轮机。若排汽供给其他中、低压汽轮机使用，则称为前置式汽轮机，该种汽轮机常在改造旧电厂时使用。

(3) 调整抽汽式汽轮机。在该种汽轮机中，部分蒸汽在一种或两种给定压力下抽出，供给工业或生活使用，其余蒸汽在汽轮机内做功后仍排入凝汽器。

(4) 中间再热式汽轮机。新蒸汽在汽轮机前面若干级做功后，全部引至锅炉内再次加热到某一温度，然后回到汽轮机中继续做功，该种汽轮机称为中间再热式汽轮机。

3. 按蒸汽的流动方向划分

(1) 轴流式汽轮机。蒸汽在汽轮机内部的流动方向与主轴基本平行的汽轮机。目前电厂所采用的汽轮机都是该种汽轮机。

(2) 辐流式汽轮机。蒸汽在汽轮机内部沿着径向流动的汽轮机。

4. 按进汽参数的高低划分

(1) 低压汽轮机。新蒸汽压力小于 1.5MPa 的汽轮机。

(2) 中压汽轮机。新蒸汽压力为 3.4MPa 的汽轮机。

(3) 高压汽轮机。新蒸汽压力为 9MPa 的汽轮机。

(4) 超高压汽轮机。新蒸汽压力为 12~14MPa 的汽轮机。

(5) 亚临界压力汽轮机。新蒸汽压力为 16~22.1MPa 的汽轮机。

(6) 超临界压力汽轮机。新蒸汽压力为 24~28MPa 的汽轮机。

(7) 超超临界压力汽轮机。新蒸汽压力超过 28MPa 的汽轮机。

5. 按用途划分

(1) 电厂汽轮机。在火力发电厂中用以驱动发电机的汽轮机称为电厂汽轮机。

(2) 工业汽轮机。用于工业企业中的汽轮机统称为工业汽轮机。

(3) 船用汽轮机。用于船舶驱动螺旋桨并发点供船舶使用的汽轮机。

除以上分类外，汽轮机还有一些分类方法，例如按汽缸的数目分为单缸、双缸和多缸的汽轮机；按结构分有单级汽轮机和多级汽轮机；按排列方式为单轴汽轮机和双轴汽轮机等。

（二）汽轮机本体

汽轮机本体由转动部分（转子）和静止部分（静体或静子）两部分组成。转动部分包括动叶片、叶轮（反动式汽轮机为转鼓）、主轴和联轴器及紧固件等旋转部件；静止部分包括汽缸、蒸汽室、喷嘴室、喷嘴、隔板、隔板套（反动式汽轮机为静叶持环）、汽封、轴承、轴承座、机座、滑销系统，以及有关紧固零件等。转子的作用是汇集各级动叶片上的旋转机械能，并将其传递给发电机。

1. 动叶片

动叶片安装在转子叶轮（冲动式汽轮机）或转鼓（反动式汽轮机）上，接受喷嘴叶栅射出的高速气流，把蒸汽的动能转换成机械能，使转子旋转。

动叶片的工作条件很复杂，除因高速旋转和气流作用承受较高的静应力和动应力以外，还因其工作于过热蒸汽区、两相过渡区（指从过热蒸汽区过渡到湿蒸汽区）和湿蒸汽区内而承受高温、高压、腐蚀和冲蚀作用，因此动叶片结构不但应保证流体具有良好的流动特性，还要保证自身有足够的强度。因此，各个汽轮机制造厂对叶片的设计、制造均十分重视。

2. 转子

汽轮机转子可分为轮式转子和鼓式转子两种基本类型。轮式转子装有安装动叶片的叶轮；鼓式转子没有叶轮（或有叶轮但其径向尺寸很小），动叶片直接装在转鼓上。通常冲动式汽轮机采用轮式转子；反动式汽轮机为了减小转子上的轴向推力，采用鼓式转子。

3. 联轴器

联轴器也称为靠背轮，用来连接汽轮机的各个转子及发电机转子，并将汽轮机的扭矩传给发电机。在多缸汽轮机中，如果几个转子合用一个推力轴承，则联轴器还将传递轴向推力；如果每个转子都有自己的推力轴承，则联轴器应保证各转子的轴向位移互不干扰，即不允许传递轴向推力。

4. 盘车装置

汽轮机启动前和停机后，由于汽缸的上部与下部存在温差，如果转子静止不动，便会因为自身的温差而向上弯曲。对于大型汽轮机，这种热弯曲可以达到很大的数值，并且需要经过几十个小时才能逐渐消失。在热弯曲减小到规定数值以前，不允许重新启动汽轮机。另外在汽轮机启动过程中，为了迅速提高真空，常需要在冲动转子前向轴封送汽，但由于热蒸汽大部滞留在缸内上部，还是会造成转子的热弯曲，妨碍启动工作的正常进行，甚至引起动静部分的摩擦。

为了避免转子的热弯曲，就需要一种设备，使得转子在汽轮机冲转前和停机后以一定的转速连续转动，以保证转子的均匀受热和冷却，该设备称为盘车装置。盘车装置是在汽轮机不进汽时拖动汽轮机转动的机构。

5. 汽缸

汽缸是汽轮机的外壳，其作用是将汽轮机的通流部分与大气隔开，形成封闭的汽室，保证蒸汽在汽轮机内部完成能量转换过程。汽缸内安装有喷嘴室、隔板、隔板套等零部件；汽缸外连接着进汽、排汽、抽汽等管道。

汽缸质量大、形状复杂且工作在高温高压环境下，除承受内外压差及汽缸本身和装在其

中的各零部件的重力等静载荷外，还需要承受隔板和喷嘴作用在汽缸上的力，以及进汽管道作用在汽缸上的力和由于沿汽缸轴向、径向温度分布不均匀（尤其在启动、停机和变工况时）而引起的热应力。汽缸运行中的热应力对高参数、大功率汽轮机的影响更为突出。

因此，在考虑汽缸结构时，除了要保证足够的强度、刚度和各部分受热时自由膨胀，以及通流部分有较好的流动性能外，还应考虑在满足强度和刚度的要求下，尽量减薄汽缸壁和连接法兰的厚度，并力求使汽缸形状简单、对称，以减小热应力。为了节省高级耐热合金钢，应使高温高压部分闲置在尽可能小的范围内。同时还要保持静止部分同转动部分处于同心状态，并保持合理的间隙。另外，在汽轮机运行时，必须合理控制汽缸温度的变化速度和温差，以避免汽缸产生过大的热应力和热变形，由此而引起的汽缸结合面不严密或汽缸裂纹。

6. 汽缸的支承及滑销系统

汽缸的支承要平稳，因其自重而产生的挠度应与转子的挠度近似相等，同时要保证汽缸受热后能自由膨胀，而其动、静部分同心状态不变或变动很小。

汽缸的支承定位包括外缸在轴承座和基础台板（座架、机架等）上的支承定位，内缸在外缸中的支承定位，以及滑销系统的布置等。

汽缸支承在基础台板上，基础台板又用底角螺栓固定在基础上。汽缸的支撑方法一般有两种：一种是汽缸通过猫爪支撑在轴承座上，通过轴承座放置在台板上；另一种是用外伸的撑角螺栓直接放置在台板上。

滑销系统通常由横销、纵销、立销、角销等组成。在汽缸与基础台板间和汽缸与轴承座之间应装上有相应的滑销，并使固定汽缸的螺栓预留出适当的间隙，既保证汽缸自由膨胀，又能保持机组中心不变。

7. 喷嘴组及隔板

现代汽轮机大多采用喷嘴调节配汽方式，因此，汽轮机的第一级喷嘴通常都根据调节阀的个数成组布置。成组布置的喷嘴称为喷嘴组，一般由两种结构形式：一种是中参数汽轮机上采用的由单个铣制的喷嘴叶片焊接而成的喷嘴组；另一种是高参数汽轮机上采用的整体铣制焊接而成或精密烧铸而成的喷嘴组。

隔板的作用是固定静叶片（喷嘴叶片），并将汽缸内间隔成若干个汽室。

8. 汽封

汽轮机运转时，转子高速旋转，汽缸、隔板、（或静叶持环）等静体固定不动，因此转子和静体之间需预留有适当的间隙（也就是常说的动静间隙），从而保证不互相碰磨。然而间隙的存在就要导致漏汽（气），不仅会降低机组效率，还会影响机组安全运行。为了减少蒸汽泄漏和防止空气漏入，需要有密封装置，通常称为汽封。汽封按其安装位置的不同，可分为通流部分汽封、隔板（或静叶持环）汽封、轴端汽封，反动式汽轮机还装有高、中压平衡活塞汽封和低压平衡活塞汽封。

9. 轴承

轴承是汽轮机的一个重要组成部件，分为径向支持轴承和推力轴承两种类型，用来承受转子的全部重力并且确定转子在汽缸中的正确位置。径向支持轴承用来承担转子的重力和旋转的不平衡力，并确定转子的径向位置，以保持转子旋转中心与汽缸中心一致，从而保证转子与汽缸、汽封、隔板等静止部分的径向间隙正确。推力轴承承受蒸汽作用在转子上的轴向推力，并确定转子的轴向位置，以保证通流部分动静间正确的轴向间隙。因此推力轴承被看

成转子的定位点，或称汽轮机转子对静子的相对死点。

由于每个轴承都要承受较高的载荷，且工作转速很高，因此汽轮机的轴承都采用以液体摩擦为理论基础的滑动式轴承，借助具有一定压力的润滑油在轴颈和轴瓦之间形成油膜，建立液体摩擦，使汽轮机安全稳定的工作。

二、发电机

（一）发电机的分类

汽轮发电机按冷却方式分为四种。空冷发电机定子绕组和转子绕组全部为空气冷却；氢冷发电机定子绕组和转子绕组全部为氢气冷却；双水内冷发电机定子绕组和转子绕组为全部水内冷；水-氢-氢冷发电机定子绕组为水内冷，转子绕组、定子铁芯和结构件为氢气表面冷却。

目前对于大型汽轮发电机组，多采用双水内冷却系统和水-氢-氢冷却系统。其中 600~1000MW 大型汽轮发电机组多采用水-氢-氢冷却系统，包括：氢气控制系统、密封供油系统和氢冷发电机冷却水系统。

（二）发电机系统

1. 发电机氢气控制系统

氢气控制系统主要是由气体控制站、氢气干燥器、液位信号器、仪表盘、抽真空管路及与定子水系统连接管路组成的。氢气的置换通常采用中间介质置换法和抽真空置换法两种。采用中间介质置换法时，先将中间气体二氧化碳 CO_2 （或氮气 N_2 ）从发电机壳下部管路引入，以排出机壳及气体管路内的空气，当机壳内 CO_2 含量达到规定要求时，即可充入氢气排出中间气体，最后置换成氢气。抽真空置换法应在发电机静止停运的条件下进行，首先将机内空气抽出，当机内真空度达到 90%~95% 时，可以开始充入氢气；然后取样分析，当氢气纯度不合格时，可以再次抽成真空，再一次充氢气，直到纯度合格为止。

氢气控制系统的主要维护工作：发电机检修后要进行风压试验，检查发电机氢气系统的严密性合格后才可充氢；运行人员应注意经常检查充氢发电机的内部氢压，发现氢压下降时及时补充，以保持正常氢压。发电机内氢气压力任何时候都不应低于大气压力，以免空气漏入氢气系统；若发现氢压过高时，应查明原因，采取相应措施并排氢降压。运行人员应监视和记录发电机内氢气纯度，当氢气纯度低于 96%，含氧量大于 2% 时，应进行排污；氢气系统的备用 CO_2 和压缩空气气源要经常保持充足完好，以备事故情况下排氢或倒换冷却方式使用。运行中对氢气系统的操作应动作轻缓，避免猛烈碰撞，运行人员不得穿带钉子的鞋和能产生强静电的服装，以免产生火花造成氢气爆炸。运行中还需要经常检查发电机油水继电器，若发现水量较大时，要查明原因及时排水，同时还应检查氢气系统周围不得有明火作业，若须动用明火要办理动火工作票，并做好防爆措施。

2. 氢冷发电机密封油控制系统

（1）密封油系统的工作要求和特点。为了防止发电机氢气向外泄漏或空气漏入，发电机氢冷系统应保持密封，特别是发电机两端大轴穿出机壳处，必须采用可靠的轴密封装置。

（2）密封油系统分为单回路和双回路供油系统。

1）单回路供油系统。即向密封瓦单路供油，系统一般设置交流密封油泵、直流密封油泵、射油泵，有些系统还设有高位阻尼油箱。

2) 双回路供油系统。即向密封瓦双路供油, 在密封瓦内形成双环流供油形式, 即空侧和氢侧有分别独立的两路油。

(3) 密封油系统的运行维护。为保证氢冷发电机内氢气不致大量泄漏, 在机内开始充氢前就必须向密封瓦不间断地供油, 且密封油压要高于发电机内部氢气压 0.05MPa 左右, 短时间最低也应维持 0.02MPa 的压差。若压差过小会使密封瓦间隙的油流出现断续现象, 造成油膜破坏, 氢气将从油流的中断处漏出, 不仅漏氢处易着火, 而且氢气漏入空侧回油管路容易发生爆炸。此外, 若氢压降至零后, 室内空气将可能漏入发电机, 威胁发电机安全。密封油系统启动前应按运行规程的要求做好准备工作, 使密封油箱保持适当的油位, 且交流密封油泵和直流密封油泵试运正常。在运行中还应加强对密封油调节系统的检查维护, 以确保平衡阀、差压阀等调节部件的正常跟踪。

3. 氢冷发电机冷却水系统

氢冷发电机的冷却水系统主要是用来向发电机的定子线圈和引出线不间断地供水, 此系统常简称为定子冷却水系统。发电机的定子绕组采用水内冷却方式, 水冷的效果是氢冷的 50 倍。

定子冷却水必须具有很高的工作可靠性, 能确保长期稳定运行。冷却水不仅不能含有机杂质, 而且对其电导率及硬度等都有严格要求, 一般要求电导率不大于 $2\mu\text{S}/\text{cm}$, pH 值为 $7\sim 8$, 硬度不大于 $2\mu\text{S}/\text{L}$, 水中含氧量应尽可能少, 否则将会影响发电机的安全运行。

三、燃气轮机

燃气轮机是一种以连续流动的气体作为工质、把热能转换为机械能的旋转式动力机械。在空气和燃气的主要流程中, 只有压气机、燃烧室和燃气透平这三大部件组成的燃气轮机循环, 通称为简单循环。大多数燃气轮机均采用简单循环方案。因为其结构最简单, 而且最能体现出燃气轮机所特有的体积小、质量轻、启动快、少用或不用冷却水等优点。

(一) 工作原理

压气机从外界环境吸入空气, 并通过轴流式压气机逐级压缩使空气增压, 同时空气温度也相应提高; 压缩空气被压送到燃烧室与喷入的燃料混合, 燃烧生成高温高压的燃气; 高温高压的燃气进入到透平中膨胀做功, 推动透平带动压气机和外负荷转子一起高速旋转, 使气体或液体燃料的化学能部分转化为机械能, 并输出电功。从透平中排出的乏气排至大气自然放热。上述过程中, 燃气轮机将燃料的化学能转化为热能, 又把部分热能转变成机械能。通常在燃气轮机中, 压气机是由燃气透平膨胀做功带动的, 是透平的负载。在简单循环中, 透平发出的机械功有约 $1/2\sim 2/3$ 用来带动压气机, 其余的 $1/3$ 左右的机械功用来驱动发电机。在燃气轮机启动的时候, 需要外界动力, 一般是启动机带动压气机, 直到燃气透平发出的机械功大于压气机消耗的机械功时, 外界启动机脱扣, 燃气轮机才能独立工作。

综上所述, 燃气轮机的工作过程是, 压气机 (即压缩机) 连续地从大气中吸入空气并将其压缩; 压缩后的空气进入燃烧室, 与喷入的燃料混合后燃烧, 成为高温燃气, 随即流入燃气涡轮中膨胀做功, 推动涡轮叶轮带着压气机叶轮一起旋转; 加热后的高温燃气的做功能力显著提高, 因而燃气涡轮在带动压气机的同时, 尚有余功作为燃气轮机的输出机械功。燃气轮机由静止启动时, 需用启动机带动旋转, 待加速到能独立运行后, 启动机才能脱开。

燃气轮机除简单循环外, 还有回热循环和复杂循环; 燃气轮机的工质来自大气, 最后又

排至大气，称为开式循环；工质被封闭循环使用的称为闭式循环；燃气轮机与其他热机相结合的称为复合循环。

燃气初温和压气机的压缩比是影响燃气轮机效率的两个主要因素。提高燃气初温，并相应提高压缩比，可使燃气轮机效率显著提高。20 世纪 70 年代末，压缩比最高达到 31；工业和船用燃气轮机的燃气初温最高达 1200℃左右，航空燃气轮机的超过 1350℃。

（二）内部结构

燃气轮机的主要部件是：燃烧室和涡轮。燃烧室和涡轮不仅工作在高温环境下，而且还承受着燃气轮机在启动和停机时，因温度剧烈变化引起的热冲击，工作条件恶劣，因此是决定燃气轮机寿命的关键部件。为确保燃气轮机有足够的寿命，这两大部件中工作条件最差的零件如火焰筒和叶片等，须用使用镍基和钴基合金等高温材料制造，同时还须用空气冷却降低工作温度。

对于一台燃气轮机来说，除了主要部件外还必须有完善的调节保安系统，以及配备良好的附属系统和设备，如启动装置、燃料系统、润滑系统、空气滤清器、进气和排气消声器等。

燃气轮机分为重型和轻型两类。重型燃气轮机的零件较为厚重，大修周期长，但寿命可达 10 万 h 以上。轻型燃气轮机结构紧凑轻便，所用材料一般较好，其中以航空燃气轮机的结构为最紧凑，但寿命较短。

与活塞式内燃机和蒸汽动力装置相比较，燃气轮机的主要优点是小而轻。单位功率的质量，重型燃气轮机一般为 2~5kg/kW，而航空燃气轮机一般低于 0.2kg/kW。燃气轮机占地面积小，当用于车、船等运输机械时，既可节省空间，也可装备功率更大的燃气轮机以提高车、船速度。燃气轮机的主要缺点是效率不够高，在部分负荷下效率下降快，空载时的燃料消耗量高。

不同的应用行业，对燃气轮机的要求和使用状况也不相同。功率在 10MW 以上的燃气轮机多数用于发电，而 30~40MW 以上的几乎全部用于发电。燃气轮机发电机组能在无外界电源的情况下迅速启动，机动性好，在电网中用作带动尖峰负荷和作为紧急备用，能较好地保障电网的安全运行。在汽车（或拖车）电站和列车电站等移动电站中，燃气轮机因其轻巧，应用也很广泛。此外，还有不少利用燃气轮机的便携电源，功率最小的在 10kW 以下。

燃气轮机的未来发展趋势是进一步提高效率、采用高温陶瓷材料、利用核能和发展燃煤技术。提高效率的关键是提高燃气初温，即改进涡轮叶片的冷却技术，研制能耐更高温度的高温材料；其次是提高压缩比，研制级数更少而压缩比更高的压气机；再次是提高各个部件的效率。高温陶瓷材料能在 1360℃以上的高温下工作，用来做涡轮叶片和燃烧室的火焰筒等高温零件时，就能在不用空气冷却的情况下大大提高燃气初温，从而较大地提高燃气轮机效率。适于燃气轮机的高温陶瓷材料有氮化硅和碳化硅等。

（三）润滑系统

燃气轮机润滑油系统是燃气轮机必备的一个重要的辅助系统。作用是在机组启动、正常运行及停机过程中，向正在运行的燃气轮机发电机组的各个轴承、传动装置及其附属设备供应数量充足的、温度和压力合适的、干净的润滑油，以确保机组安全可靠地运行，防止发生轴承烧毁、转子轴颈过热弯曲、高速齿轮法兰变形等事故。此外，部分润滑油可能从系统分流出，成为液压油系统的油源，或经过滤后作为控制油系统的用油。

联合循环发电装置的润滑油系统有几种不同的配置，对于单轴机组，燃气轮机与汽轮机

共用一套润滑油系统；对于多轴机组，燃气轮发电机组与汽轮发电机组可以共用一套润滑油系统，也可以各自单设一套润滑油系统，视机组的总体布置而定，例如由于电厂分期建设的需要，大多数多轴机组采取各自单设一套的方式；还有一种航空衍生型的燃气轮机，由于燃气初温很高，其燃气发生器要求使用品质更高的润滑油，因此燃气发生器单独设一套润滑油系统，而动力涡轮与发电机另设一套。

（四）燃汽轮机的主要应用

1. 简单发电

由燃气轮机和发电机独立组成的循环系统，也称为开式循环。其优点是装机快、起停灵活，多用于电网调峰和交通、工业动力系统。目前的最高效率的开式循环系统是 GE 公司 LM6000PC 轻型燃气轮机，效率为 43%。

2. 发电

由燃气轮机及发电机与余热锅炉共同组成的循环系统，将燃气轮机排出的高温乏气通过余热锅炉回收，转换为蒸汽或热水加以利用，主要用于热电联产。将余热锅炉的蒸汽回注入燃气轮机，以提高燃气轮机出力 and 效率称为前置回注循环系统。目前最高效率的前置回注循环系统是 GE 公司的 LM5000-STIG120 轻型燃气轮机，效率为 43.3%。前置循环热电联产时的总效率一般均超过 80%。为提高供热的灵活性，大多前置循环热电联产机组采用余热锅炉补燃技术，补燃时的总效率超过 90%。

3. 热电联产

燃气轮机及发电机与余热锅炉、蒸汽轮机或供热式蒸汽轮机（抽汽式或背压式）共同组成的循环系统，将燃气轮机排出的高温乏气通过余热锅炉回收转换为蒸汽，再将蒸汽注入蒸汽轮机发电，或将部分发电做功后的乏汽用于供热。形式有燃气轮机、蒸汽轮机同轴推动一台发电机的单轴联合循环，燃气轮机、蒸汽轮机各自推动各自发电机的多轴联合循环。主要用于发电和热电联产，用于发电时最高效率的联合循环系统是 ABB 公司的 GT26-1，效率为 58.5%。

4. 整体化循环

由煤气发生炉、燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机共同组成的循环系统，也称为 IGCC。主要使用低廉的固体化石燃料代替燃气轮机使用气体、液体燃料，提高煤炭利用效率，降低污染物排放。可作为城市煤气、电力、集中供热和集中制冷，以及建材、化工原料综合供应系统。GE 公司使用 MS7001F 技术组成的整体循环系统发电效率可达到 42%。

5. 联合循环

由燃气轮机、余热锅炉和核反应堆、蒸汽轮机共同组成的发电循环系统。通过燃气轮机排出的烟气加热核反应堆输出的蒸汽，主要是提高核反应堆蒸汽的温度、压力，以提高蒸汽轮机效率，降低蒸汽轮机部分的工程造价。目前处于试验阶段。

6. 辅助循环

在以煤、油等为燃料的后置循环发电汽轮机组中，使用小型燃气轮机作为电厂辅助循环系统，为锅炉预热、鼓风，改善燃烧，提高效率，并将动力直接用于驱动给水泵。1947 年美国第一台工业用途燃气轮机就是采用该种方式参与发电循环系统运行的。

四、汽轮发电机组附属系统的构成与作用

汽轮发电机主要由主机、辅机、油系统、调节部分组成。本体主要由：汽缸、隔板、叶