

大型燃气-蒸汽 联合循环发电设备与运行： 电气分册

广东惠州天然气发电有限公司○编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

大型燃气-蒸汽联合循环发电 设备与运行：电气分册

广东惠州天然气发电有限公司 编著



机械工业出版社

本书以日本三菱公司和东方电气集团合作生产的 M701F3 型燃气-蒸汽联合循环发电机组为例,介绍了大型燃气-蒸汽联合循环机组主要电气设备和电气系统,并结合实际的运行经验,对主要电气设备和电气系统的结构及组成、运行操作方法、事故处理和运行经验等方面进行了重点介绍。全书共分 11 章,第一、二、四、五章着重介绍了联合循环发电机组的电气一次主设备的工作原理、性能结构、运行注意事项等方面内容,主要包括发电机、变压器、静态变频器、励磁系统及 220kV 电气主接线系统,第三章和第七章分别介绍了发变组、启备变保护及 220kV 线路及母差保护的构成、保护原理等,第八章和第九章重点介绍 UPS 系统及直流系统的设备组成、原理及操作,第十章主要介绍燃气-蒸汽联合循环发电机组的厂用 6kV 及 380V 系统相关的设备、操作以及配置的保护,第十一章针对电厂节能降耗采取的变频措施,着重介绍凝结水泵和闭冷水泵配置的高、低压变频装置。

本书适用于从事大型燃气轮机及其联合循环电厂中关于设计、调试、运行的技术人员、管理人员,可作为运行人员及相关生产人员培训教材,也可供高等院校电气类专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型燃气-蒸汽联合循环发电设备与运行: 电气分册/
广东惠州天然气发电有限公司编著. —北京: 机械工业出版社, 2013.6

ISBN 978 - 7 - 111 - 42242 - 6

I .①大… II .①广… III .①燃气-蒸汽联合循环发电-电气设备-介绍 IV .①TM611.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 080419 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧 版式设计: 潘蕊

责任校对: 肖琳 封面设计: 陈沛 责任印制: 张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16 印张 · 1 插页 · 398 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 42242 - 6

定价: 49.50 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

大型燃气-蒸汽联合循环发电设备与运行
编 委 会

主 任 范云滩

副 主 任 林书敏 聂 伟 丁建华 蔡青春 李三强

委 员 姜 建 邓小明 黄湛勋 周 科 刘 斌
薛少华

大型燃气-蒸汽联合循环发电设备与运行：电气分册
编写人员

主 编 蔡青春

副主编 刘 斌 牛 勇

参编人员 关国杰 宁 波 王 一 谭 活

《大型燃气-蒸汽联合循环发电设备与运行》

序

燃气-蒸汽联合循环发电技术由于具有热效率高、建设周期短、单位容量投资费用低、占地少、污染物排放量少等优点，自 20 世纪 80 年代以来，在世界很多国家得到了广泛应用。伴随我国天然气“西气东输”工程的建设及外国液化天然气（LNG）的引进，进入 21 世纪，燃气轮机及其联合循环发电也日益成为我国电力系统的重要组成部分。其中，燃气-蒸汽联合循环发电得到了广泛应用。当前，随着世界范围内人们对环保质量要求的提高，以燃烧洁净燃料天然气为主的燃气轮机及其联合循环发电技术将会迎来更大的发展。

广东惠州天然气发电有限公司（即惠州 LNG 电厂）是国家以“市场换技术”政策，通过项目捆绑招标引进日本三菱公司与东方电气集团合作生产的 M701F3 型燃气-蒸汽联合循环机组的设备，首批建成投产运行的 F 级燃气-蒸汽联合循环电厂。自电厂成立以来，荣获诺诚（NOSA）安健环综合管理系统五星级评定、中国电力优质工程奖、国家优质工程银质奖、全国电力行业标准化良好行为 AAAA 级单位、全国电力行业卓越绩效质量奖等众多国家及行业荣誉。

自电厂投产以来，广东惠州天然气发电有限公司就对技术资料进行了广泛、深入地研究，并结合多年积累的安装、调试、运行、检修、维护经验，组织技术骨干编写了大量的培训资料，同时培养了一只优秀的内训师队伍，并承接了包括白俄罗斯明斯克五号电站、中海油莆田燃气电厂等国内外多家电厂的岗前培训任务。同时，经过多年的生产运营，积累了大量的大型联合循环发电机组实际运行经验。在此基础上，鉴于我国目前对大型燃气-蒸汽联合循环电站编写的专业书籍甚少，特别是针对大型燃气-蒸汽联合循环电站运行人员的培训教材尤其缺乏，广东惠州天然气发电有限公司本着总结技术、深入钻研、不断提高的宗旨，践行“行业标杆、育才基地”的企业使命，组织编写了《大型燃气-蒸汽联合循环发电设备与运行》丛书。

本丛书内容深入浅出，主要内容涵盖大型燃气-蒸汽联合循环电站设备及运行的方方面面，对电厂机务和电气的主设备和分系统方面的知识进行详细地阐述，并侧重于大型联合循环机组的实际运行经验、典型事故处理等方面内容的经验积累和总结。丛书凝结了广东惠州天然气发电有限公司技术骨干和专业技术人员的心血和智慧，希望能为大型燃气-蒸汽联合循环电厂运行人员及相关生产人员提供一套集基本理论知识、系统设备、机组实际操作、典型事故处理及培训为一体的实用性较强的教材；同时也希望能够为我国大型燃气轮机的设计制造、应用能力的提高，贡献一份力量。

中国工程院院士

前 言

随着燃气轮机技术的日益成熟、天然气资源的进一步开发和应用，以及人们对环境保护的重视，大型燃气轮机及其联合循环发电近年来在我国得到了蓬勃发展，已经逐渐成为我国电力工业的一个重要组成部分。

为适应 F 级燃气-蒸汽联合循环电站建设及技术快速发展的需要，同时鉴于我国目前针对大型燃气-蒸汽联合循环电站运行人员培训的专业书籍甚少，广东惠州天然气发电有限公司组织技术力量，编写了丛书《大型燃气-蒸汽联合循环发电设备与运行》，分《机务分册》和《电气分册》。本书为其中的《电气分册》。

本书为电气分册，内容着重于对燃气-蒸汽联合循环发电的各电气设备和系统进行阐述。书中以三菱公司与东方电气集团合作生产的 M701F3 燃气-蒸汽联合循环发电机组电气设备为例，介绍了整个联合循环电厂主要电气设备和电气系统，并结合实际的运行经验，对主要电气设备和电气系统的结构及组成、运行操作方法、事故处理和运行经验等方面进行了重点介绍。全书共分 11 章，第一、二、四、五、六章着重介绍了联合循环发电机组的电气一次主设备的工作原理、性能结构、运行注意事项等方面内容，主要包括发电机、变压器、静态变频器、励磁系统及 220kV 电气主接线系统，第三章和第七章分别介绍了发变组、启备变保护及 220kV 线路及母差保护的构成、保护原理等，第八、九章重点介绍 UPS 系统及直流系统的设备组成、原理及操作，第十章主要介绍燃气-蒸汽联合循环发电机组的厂用 6kV 及 380V 系统相关的设备、操作以及配置的保护，第十一章针对电厂节能降耗采取的变频措施，着重介绍凝结水泵和闭冷水泵配置的高、低压变频装置。

本书由广东惠州天然气发电有限公司负责编写，本册主编为蔡青春同志，副主编为刘斌和牛勇同志，由牛勇同志负责本书的总体协调和汇总，由姜建、牛勇同志负责审稿工作。参与编写的人员有：牛勇、关国杰、宁波、王一和谭活等。

在本书编写的过程中，作者参阅了大量国内外相关的学术著作、论文和工作报告，参考了许多相关专业图书和资料，甚至引用或介绍了其中部分论述和观点，在此特致感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不少错误和不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者
2013 年 4 月

目 录

序

前言

第一章 发电机	1
第一节 发电机系统介绍	1
一、发电机的基本原理	1
二、发电机的分类和特点	1
三、发电机的结构组成	2
四、发电机的监测系统	8
第二节 发电机的运行与维护	9
一、发电机的正常运行方式	9
二、发电机投运前的准备和检查	11
三、发电机的同期并列	12
四、发电机运行中的检查监视	13
第三节 发电机出口断路器	14
一、发电机出口断路器概述	14
二、GCB 的构成	14
第四节 自动发电量控制及一次调频	18
一、概述	18
二、AGC 系统	18
三、一次调频系统	19
四、调频过程分析	21
五、一次调频的投退规定	22
第五节 运行经验分享	23
一、轴承测点异常	23
二、发电机漏氢事件	23
三、发电机端部振动模态试验不合格	24
四、发电机出口断路器油泵起动的频繁	24
五、谐波干扰造成发电机出口 PT 烧毁或一次熔丝熔断	25
六、发电机直阻变大处理	26
七、GCB 冷却风扇工作异常	26
八、一次调频动作不合格事件	26
第二章 变压器	28
第一节 电力变压器概述	28
一、变压器的工作原理与结构	28
二、干式变压器	35
三、惠州 LNG 电厂配置的主要变压器及其技术规范	36
第二节 变压器的运行与维护	37
一、变压器中性点运行方式及规定	37
二、变压器的绝缘规定	38
三、220kV 变压器有载调压分接开关操作的有关规定	38
四、变压器无载调压抽头有关规定	39
五、油浸式变压器早期故障在线监测仪有关规定	39
六、主变冷却器的运行方式和规定	39
七、变压器正常运行中的监视与维护	40
八、变压器投入运行前的准备	41
第三节 变压器的倒闸操作	42
一、变压器的操作与并列运行的一般规定	42
二、变压器停送电倒闸操作的一般规定	43
三、主变和厂高变停电的典型操作	44
四、主变和厂高变受电的典型操作	45
第四节 变压器异常运行及事故处理	46
一、变压器应立刻停止运行的几种情况	46
二、变压器常见异常和故障处理	46
第五节 运行经验分享	50
一、两班制联合循环电厂主变冷却器的控制系统 PLC 节能改造经验	50
二、强油循环风冷变压器冷却器故障处理	51
三、电网直流偏磁导致主变运行声音异常	51
四、利用红外热成像仪发现主变引线接头松动	52
第三章 发变组保护及启备变保护	53
第一节 概述	53
一、发电机及变压器故障类型及保护简介	53
二、发变组保护装置介绍	55
三、启备变保护装置介绍	55
第二节 保护配置	55

一、发变组保护配置	55	第五节 运行经验分享	104
二、启备变保护配置	59	一、多次选择、复归#1 SFC 时发生	
第三节 保护原理及判据	60	故障	104
一、发电机保护	60	二、SFC 逻辑设置缺陷导致机组选择	
二、变压器保护	71	失败	106
三、发变组其他保护	76	三、转子位置传感器引起 SFC 故障	107
第四节 保护装置运行与维护	78	四、励磁变低压侧开关拒动导致 SFC 选择不成	
一、发变组保护装置运行与维护	78	功	109
二、启备变保护装置运行与维护	79	第五章 励磁系统	110
第五节 压板投退清单	80	第一节 励磁系统概述	110
一、发变组保护装置压板投退清单	80	一、励磁的主要作用	110
二、启备变保护装置压板投退清单	83	二、励磁方式的分类	110
三、压板投入前的规定	85	三、励磁系统的组成	110
第六节 运行经验分享	85	四、励磁系统的软件功能	112
一、转子两点接地保护动作	85	第二节 励磁系统的运行与维护	114
二、#1 厂高变压力释放保护动作导致#1		一、励磁系统的操作	114
主变、#1 厂高变跳闸	86	二、励磁系统的控制模式	116
三、发电机-变压器保护的部分非电气量		三、励磁系统运行中的监视和维护	117
保护装置出口由跳闸和发信改为只		第三节 AVC	118
发信	86	一、概述	118
四、#1 主变受电过程中保护动作跳开其		二、工作原理	118
高压侧开关	87	第四节 励磁系统事故处理	120
五、增加主变高压侧开关失灵保护联跳厂		一、发电机励磁系统不能正常升压	120
高变低压侧开关及发电机出口开关的		二、发电机组失磁	120
保护	87	第五节 运行经验分享	121
第四章 静态变频器 (SFC) 系统	88	一、励磁系统功率柜风扇电源切换继电器	
第一节 SFC 系统介绍	88	异常, 造成励磁系统故障	121
一、SFC 系统作用	88	二、励磁变三相绕组温度偏差大	121
二、SFC 系统结构	88	三、系统电压异常导致机组无法并网	121
三、SFC 启动发电机接线图	89	四、AVC 误调节引起 SFC 故障	122
四、SFC 系统主要参数	89	第六章 220kV 电气主接线系统	123
五、SFC 系统工作原理	90	第一节 220kV 电气主接线介绍	123
六、SFC 运行时需要投入的保护	96	一、概述	123
第二节 SFC 系统运行方式	97	二、惠州 LNG 电厂电气主接线的接线	
一、SFC 启动过程	97	方式	123
二、SFC 控制方式	98	第二节 惠州 LNG 电厂 220kV GIS 的基本	
第三节 SFC 系统运行监视	98	参数和结构原理	125
一、SFC 系统启动	98	一、220kV GIS 的基本参数	125
二、SFC 系统运行监视	100	二、220kV GIS 的结构原理	127
三、SFC 系统停运	101	第三节 SF ₆ 气体特性	141
第四节 SFC 系统事故处理	101	一、概述	141
一、SFC 故障处理原则	101	二、成分指标	141
二、SFC 常见故障处理	103	三、技术参数	141

四、安全防范措施	142	三、UPS 运行操作	175
第四节 220kV GIS 的典型操作	142	四、UPS 运行规定	177
一、220kV GIS 操作的基本原则	142	第四节 UPS 系统事故处理	178
二、220kV GIS 典型操作	143	一、UPS 系统常见故障	178
三、220kV GIS 操作的注意事项	144	二、UPS 系统故障处理	179
第五节 220kV GIS 的运行与维护	145	第五节 运行经验分享	180
一、220kV 电气主接线系统的日常巡视 检查	145	一、某电厂在给 UPS 恢复送电过程中 UPS 主机无法起动	180
二、220kV GIS 异常情况处理	146	二、UPS 板卡元件故障	181
第六节 运行经验分享	149	三、集控楼并机 UPS 的蓄电池充电时, 两台 UPS 主机故障停电	182
一、线路重合闸频繁动作	149	第九章 直流系统	183
二、线路避雷器泄漏电流值异常超标	149	第一节 直流系统概述	183
三、三工位隔离开关和接地开关 设计	150	一、直流系统的作用和主要设备	183
第七章 220kV 线路保护及母差保护 ..	151	二、惠州 LNG 电厂重要直流系统的接线 方式和主要负载	183
第一节 220kV 线路保护介绍	151	三、蓄电池的结构和工作原理	184
一、220kV 线路保护配置原则及情况	151	四、整流充电设备的工作原理	188
二、220kV 线路保护的相关定义	151	五、直流系统的监控模块和绝缘监测仪、 电池巡检仪	189
三、220kV 线路保护原理简介	151	第二节 直流系统运行方式	191
四、220kV 线路重合闸	152	一、惠州 LNG 电厂直流系统正常运行方式及 运行规定	191
第二节 220kV 母线保护	153	二、直流系统正常运行的检查	193
一、母线保护的配置	153	三、直流系统的倒闸操作	193
二、母线保护原理介绍	154	第三节 直流系统事故处理	194
三、母线保护装置的运行与维护	160	第四节 运行经验分享	196
第三节 220kV 线路保护及母线保护压板 投退清单	163	一、直流系统接地故障	196
一、220kV 线路保护压板投退清单	163	二、直流正极、负极接地运行的危害 实例	196
二、220kV 母线保护压板投退清单	165	第十章 厂用电系统	198
第四节 运行经验分享	167	第一节 厂用电的接线方式和运行方式 概述	198
一、重合闸装置的单重时间和三重时间 必须分开整定	167	一、概述	198
二、沟通三跳压板的功能	167	二、厂用电的接线方式	199
三、关于 220kV 继电保护的一些规定	168	三、厂用电的运行规定	200
第八章 UPS 系统	169	第二节 6kV 厂用电系统	201
第一节 UPS 系统介绍	169	一、6kV 厂用电快切装置	201
一、UPS 系统概述	169	二、VD4 型 6kV 真空小车开关结构和 原理	204
二、UPS 系统主要设备简介	171	三、6kV 母线的保护配置分析	207
第二节 UPS 系统运行方式	172	第三节 380V 常用开关结构原理	209
一、单机运行方式	172	一、380V MT 型空气断路器结构	
二、并机运行方式	172		
第三节 UPS 系统操作与维护	173		
一、主机柜操作	173		
二、旁路柜操作	175		

原理	209	三、电气开关切忌野蛮操作	235
二、塑壳式断路器	210	四、柴油发电机蓄电池老化导致柴油	
第四节 厂用电动机	211	发电机启动失败	235
一、电动机分类	211	第十一章 变频器	236
二、型号及主要参数	214	第一节 变频器介绍	236
三、电动机保护配置	215	一、变频器的工作原理	236
四、电动机测绝缘的标准	219	二、变频器的基本组成	236
第五节 保安电源系统	220	三、变频器的主要类型	236
第六节 厂用机械连锁装置	225	第二节 惠州 LNG 电厂应用的变频器	
一、概述	225	介绍	237
二、6kV/380V 干式变压器接地机械连锁		一、高压变频器的结构组成	238
系统	226	二、变频器的性能特点	239
三、6kV 母线接地机械连锁系统	226	三、冷却方式	239
四、6kV 电动机开关柜机械连锁系统	226	第三节 变频器的运行与维护	240
五、220kV 主变接地机械连锁系统	226	一、变频器的正常运行方式	240
六、220kV 启备变接地机械连锁系统	227	二、变频器正常运行时的监视和检查	
七、发电机机端接地机械连锁系统	227	维护	240
八、备用钥匙和特殊钥匙说明	227	第四节 变频器的常见故障处理	241
第七节 厂用电的事故处理	227	第五节 运行经验分享	243
一、厂用电系统故障处理的一般原则	227	一、功率模块故障造成#1 机凝结水泵 A	
二、常见的厂用电系统故障及其处理		变频装置跳闸	243
方法	228	二、集装箱式变频室冷却系统	243
第八节 运行经验分享	234	三、节能改造设计思路	244
一、6kV 接地故障的处理实例	234	参考文献	245
二、热力配电段失电可能引起热控			
保护动作	235		

第一章 发 电 机

第一节 发电机系统介绍

一、发电机的基本原理

转子绕组通以直流励磁电流，建立励磁磁场，当转子旋转时，磁场随轴一起旋转并顺次切割定子各相绕组，由于定子绕组与励磁磁场之间的相对切割运动，定子绕组中将会感应出大小和方向按周期性变化的三相对称交流电源。

二、发电机的分类和特点

(一) 发电机的分类

发电机的分类方法有很多。

1) 按工作原理不同进行分类，可分为同步发电机和异步发电机。异步发电机较少使用，目前被广泛使用的大型发电机都是同步发电机。

2) 按原动机不同进行分类，可分为汽轮发电机、水轮发电机、燃气轮发电机、柴油发电机等。

3) 按冷却介质不同进行分类，可分为空冷发电机、氢冷发电机和水冷发电机。水冷发电机冷却效果最好，但运行要求高。

以惠州 LNG 电厂为例，该厂三台机组均采用了 QFR-400-2-20 型发电机，为全氢冷同步汽轮发电机，额定功率为 400MW。

(二) 全氢冷发电机的特点

用氢气作为冷却介质的氢内冷发电机或常规氢外冷发电机有如下优点：

1) 氢气的密度比空气小，氢冷发电机可降低风摩损耗和通风损耗，这是因为风摩损耗和通风损耗与冷却气体的密度成比例。

2) 氢气有更大的导热系数和表面散热系数，因此氢冷发电机单位体积的有效材料的输出功率比空冷大，发电机的最大有效输出功率也更大。

3) 氢冷发电机定子机座是密封结构，氢气在机内循环，这样避免了灰尘和水汽进入发电机内部，降低了检修和维护费用。

4) 由于与氧气和水汽隔绝，发电机绝缘系统更不容易发生电晕，同时一旦发生电晕，也不会产生臭氧损害绝缘，因此延长了定子线棒的寿命。

5) 氢气密度小，同时采用密闭通风系统，可降低发电机噪声。

6) 氢冷发电机可方便地用于室外布置。

(三) 同步发电机的基本特性

同步发电机的基本特性有五种：空载特性、短路特性、负载运行特性、外特性和调整特

性。其中表征同步发电机性能的主要是空载特性、短路特性和负载运行特性，利用它们可以测定发电机的基本参数，是电机设计、制造的主要技术数据。

1. 空载特性

发电机不接负载时，电枢电流为零，称为空载运行。此时电机定子的三相绕组只有励磁电流 I_f 感生出的空载电动势 E_0 （三相对称），其大小随 I_f 的增大而增大。但是，由于发电机磁路铁心有磁饱和现象，所以两者不成正比。反映空载电动势 E_0 与励磁电流 I_f 关系的曲线称为同步发电机的空载特性曲线，如图 1-1 所示。

利用空载特性曲线可以判断转子绕组有无匝间短路，也可判断定子铁心有无局部短路，如有短路，该处的涡流去磁作用也将使得励磁电流增大。

2. 短路特性

发电机在额定转速下，定子三相稳态短路时，电枢短路电流 I_k 与励磁电流 I_f 之间的关系曲线称为同步发电机的短路特性曲线，如图 1-2 所示。

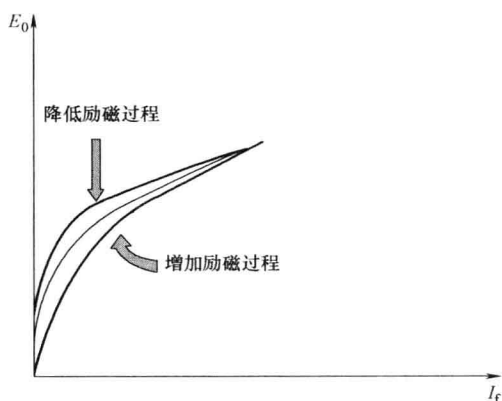


图 1-1 同步发电机的空载特性曲线

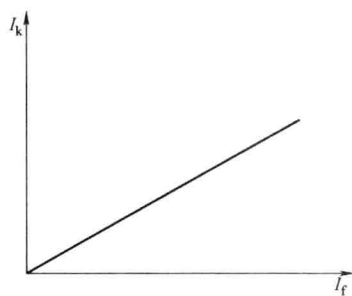


图 1-2 同步发电机的短路特性曲线

如图 1-2 所示短路特性为一条直线，利用它可以判断转子绕组有无匝间短路，若存在短路，由于匝数的减少，短路特性曲线也会降低。此外，发电机的同步电抗、短路比计算都需要利用短路特性。

3. 负载运行特性

当电枢电流 I 及功率因数 $\cos\varphi$ 均为常数时，端电压 U 与励磁电流 I_f 之间的关系曲线称为负载特性曲线。

三、发电机的结构组成

发电机通常由定子、转子、端盖、机座及轴承等部件构成。同步发电机剖面图如图 1-3 所示。

（一）发电机的定子

发电机的定子由机座、定子铁心、定子绕组、端盖等部件组成。

1. 定子通风

定子采用单风区全径向通风。

冷却气体在铁心两端从定子线棒端部和转子护环之间进入气隙，再沿径向经过铁心风道

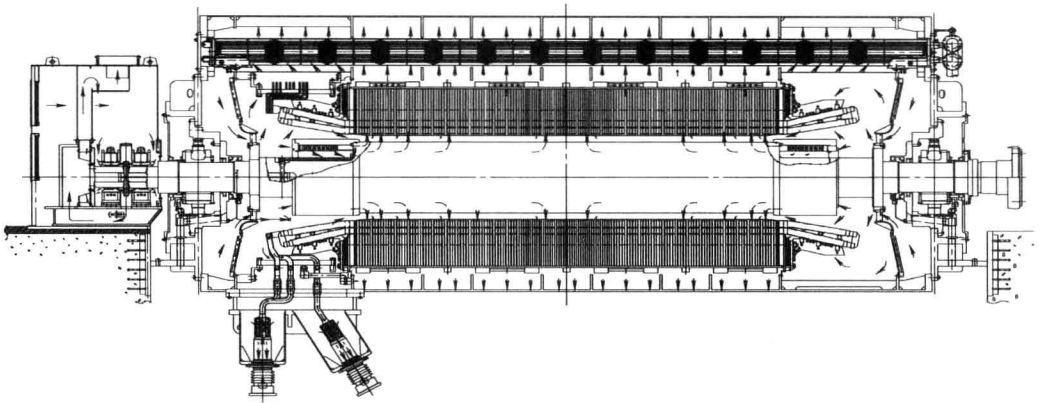


图 1-3 同步发电机剖面图

流入铁心背部。

冷却气体冷却铁心和定子线棒后进入沿轴向布置在机座顶部的冷却器，冷却后由转轴两端的轴流风扇鼓入发电机内部再次循环。

2. 定子机座、隔振结构和端盖

定子机座的主要作用是支撑和固定定子铁心和定子绕组，机座材料采用轧制焊接钢板，机座外皮采用大尺寸的整板下料以减少焊缝，使机座具有良好的气密性同时能够承受氢爆产生的压力，在结构上还要满足发电机的通风和密封要求。

为了防止转子磁极和定子铁心之间的磁拉力所导致的铁心倍频振动传递到机座和基础上，定子铁心和机座间采用弹性隔振结构。

弹性隔振结构在铁心径向具有一定的柔性，在切向可以支撑铁心的重量和承受短路力矩。弹性隔振由 8 块立式弹簧板构成，弹簧板上部与内定子把合，下部与机座焊接，如图 1-4 所示。

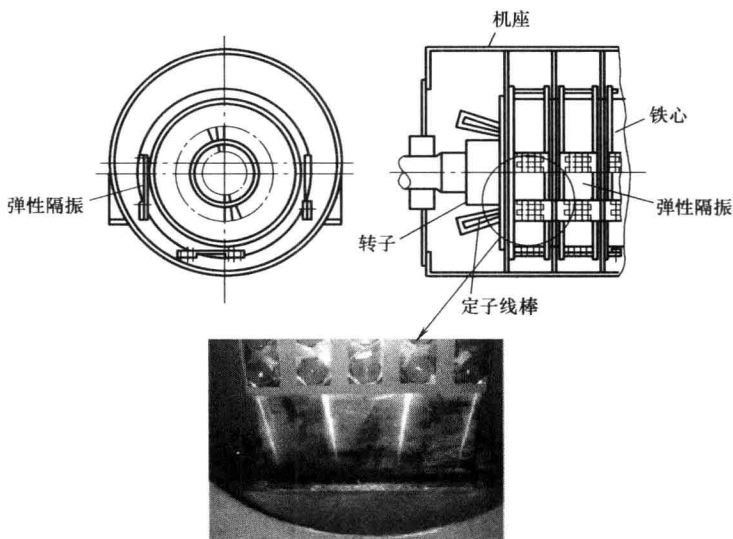


图 1-4 同步发电机弹性隔振结构

3. 定子铁心

定子铁心采用低损耗硅钢片。将扇形片冲制和涂漆后叠压成定子铁心，如图 1-5 所示。定子铁心由外圆的定位筋和铁心中部的穿心螺杆压紧成牢固的整体。

4. 定子线圈

发电机的定子线圈为单匝线圈，为了降低涡流损耗，线棒由多股双玻璃丝包扁铜线构成，股线进行罗贝尔换位，如图 1-6 所示。股线胶化成形后，表面包主绝缘。

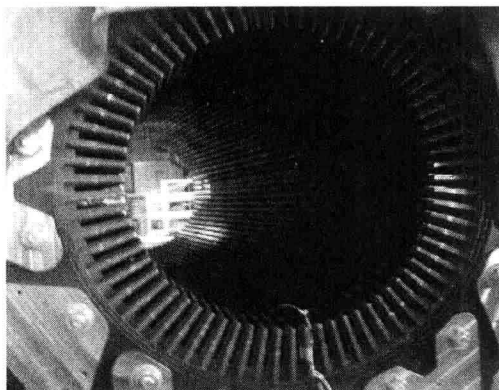


图 1-5 同步发电机定子铁心

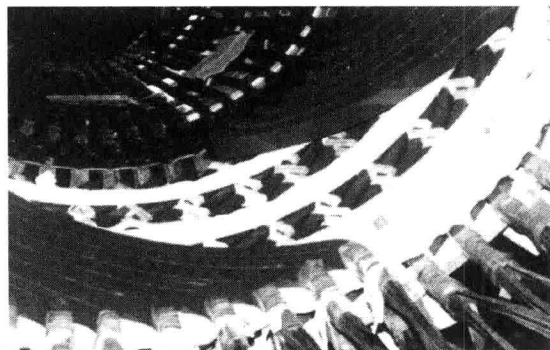


图 1-6 同步发电机定子线圈

5. 出线套管

在机座下方有 6 个出线套管，其中 3 个出线端，3 个中性点。定子电流在发电机集电环侧经定子引线、出线套管、离相封闭母线到变压器。定子出线套管为氢内冷瓷套管。

以每个出线瓷套端子为中心，从出线盒向下吊装着若干组穿心式电流互感器（Current Transformer，简称 CT），分别提量给测量仪和继电保护使用。

（二）发电机的转子

发电机的转子主要由转子铁心、励磁绕组（转子线圈）、护环、风扇等组成。

1. 转子通风

冷却气体从中心环和转轴之间的空隙进入护环下的区域。一部分进入由端部垫块形成的 S 形风道表面冷却转子线圈端部，经大齿甩风槽进入气隙。

转子铜线底部设有轴向风道，气体从转子本体两端进入槽底风道后沿轴向向转子中部流动，经铜线径向风孔冷却铜线后进入气隙，再进入定子铁心径向风道。同步发电机转子通风结构见图 1-7。

2. 转轴

转轴由 Ni-Cr-Mo-V 合金钢整体锻造而成。如图 1-8 所示，在转轴本体大齿中心沿轴向均匀地开了多个横向月形槽，又在励端轴柄的小齿中心线上开有两条均衡槽，以均衡磁极中心线位置的两条磁极引线槽。这些都是为了均匀转轴上正交两轴线的刚度，从而降低倍频振动。在大齿上开有阻尼槽，使发电机在不平衡负载时可以减少在横向槽边缘处的阻尼电流和由此引起的在尖角处的温度急剧升高，有效地提高了发电机承受负序的能力。

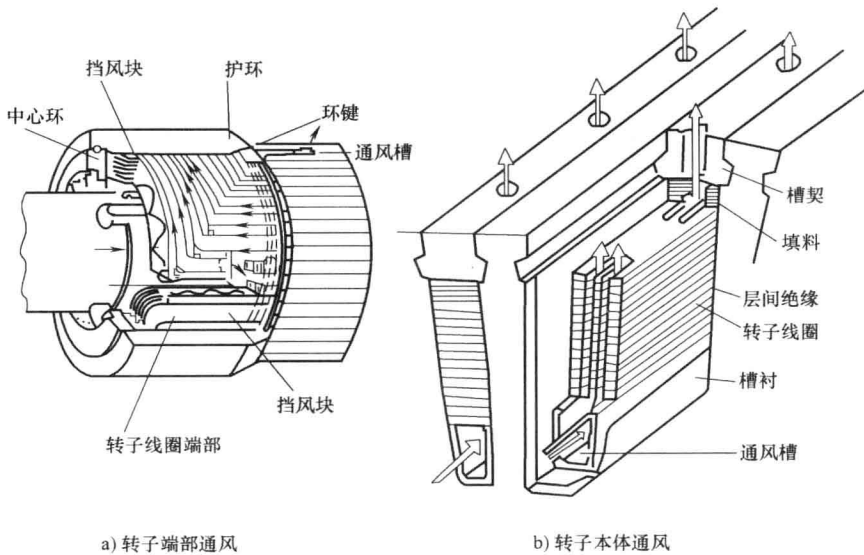


图 1-7 同步发电机转子通风结构图

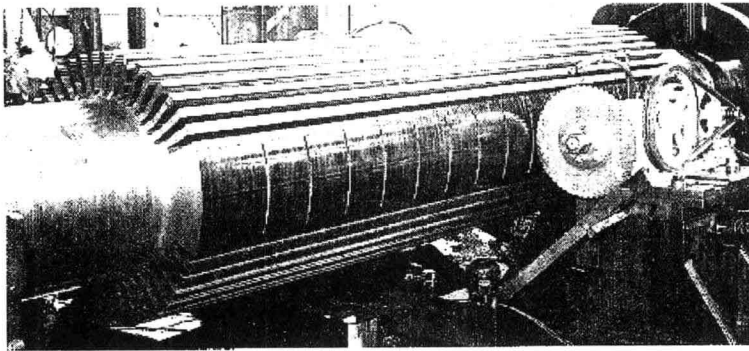


图 1-8 转轴本体

3. 转子绕组

转子绕组采用具有良好机械性能和抗蠕变性能的含银铜线。转子绕组匝间垫条和绕组主绝缘分别采用环氧玻璃布板和玻璃坯布——NOMEX 纸槽衬。转子绕组端部运行时承受很大的离心力，同时负载变化时铜线发生轴向伸缩，护环内壁装有在高温下具有良好机械性能和绝缘性能的绝缘筒，端部绕组匝间垫有高机械强度的绝缘垫条。转子绕组在槽内用高强度的合金钢和铍青铜槽楔固定，见图 1-9。

4. 护环

护环对转子绕组端部起着固定、保护、防止变形的作用，承受着转子的弯曲应力、

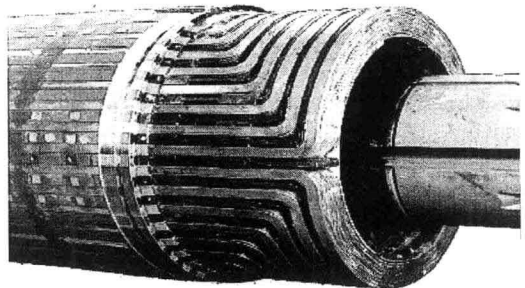


图 1-9 转子绕组

热套应力和绕组端部及本身的巨大离心力。护环如图 1-10 所示。

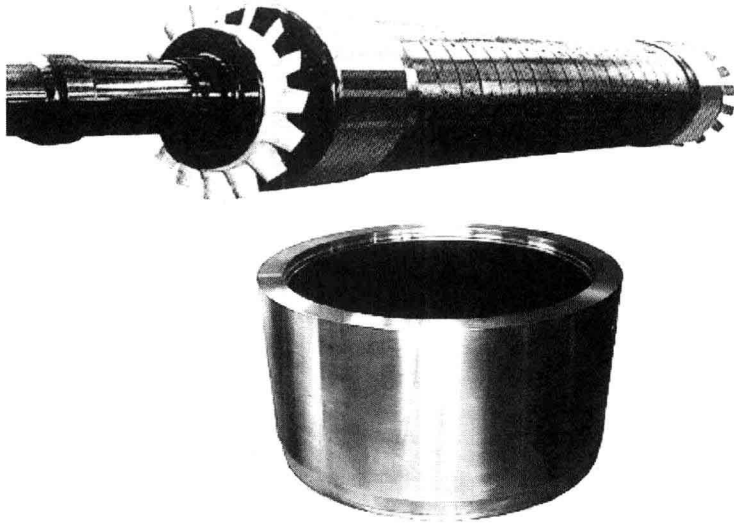


图 1-10 护环

护环热套在转轴上，用环键固定。转子绕组端部被套在护环下，保证运行时绕组端部与直线部分间的径向相对变形最小。

护环绝缘内表面与铜线接触的部分设有滑动层，这种结构允许转子绕组在轴向无约束地热膨胀，避免附加应力。

为了减少转子端部的漏磁损耗，护环采用非磁性材料。

5. 风扇

转轴两端设有两个轴流式风扇。风叶材料为耐腐蚀铝合金，按相关规范对风叶作全部可靠性检测，如 X 光探伤等。风叶固定在风扇座环上，风扇座环材料为 Ni-Cr-Mo 合金钢，热套在转轴上。风扇及风扇座如图 1-11 所示。

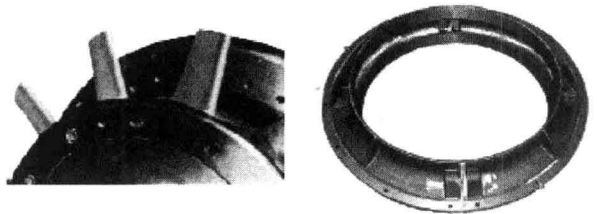


图 1-11 风扇及风扇座

(三) 端盖、轴承、集电环和氢冷器

1. 端盖

端盖采用焊接结构，把合在定子机座上。端盖径向焊有筋板，具有足够的刚性。端盖中装有轴承、挡油盖、油密封等部件。为防止气体泄漏，端盖与机座的把合面上有密封条。端盖如图 1-12 所示。

2. 轴承

发电机采用可倾瓦轴承，保证运行时轴承具有较高的稳定性和较低的瓦温。

轴瓦下半部分由带球面座的下瓦套组成，下瓦套内圆垂线中心线两侧位置有两个可倾斜的瓦块。下瓦套的球面座可使轴承具有自调心功能。