

660MW超超临界火力发电机组培训教材

DIANQI FENCE

电气分册

望亭发电厂 编 ●



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

660MW超超临界火力发电机组

.....

DIANQI FENCE

电气分册

望亭发电厂 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》对超超临界燃煤发电机组的原理及设备只做简单介绍,着重以岗位运行知识为基础,以提高操作技能为目的,根据电厂生产一线人员在 660MW 超超临界燃煤发电机组调试、运行、维护过程中的经验,详细介绍发电设备及系统的运行维护及故障处理。

本书为此套教材的《电气分册》,共九章,主要介绍超超临界机组发电机、变压器、配电装置、厂用电系统、直流系统及不停电装置、继电保护、自动装置、电气控制系统、电气运行常识等内容。

本书可作为 660MW 超超临界燃煤机组电气设备专业岗位运行、维护和检修人员的上岗培训、在岗培训及继续教育等的培训教材,也可作为超超临界火力发电机组工作的电气设备及其系统生产人员、技术人员、管理干部和大专院校有关师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

660MW 超超临界火力发电机组培训教材. 电气分册/望亭发电厂编. —北京:中国电力出版社,2011.3

ISBN 978-7-5123-1489-4

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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 9 月第一版 2011 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 508 千字

印数 0001—3000 册 定价 48.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》

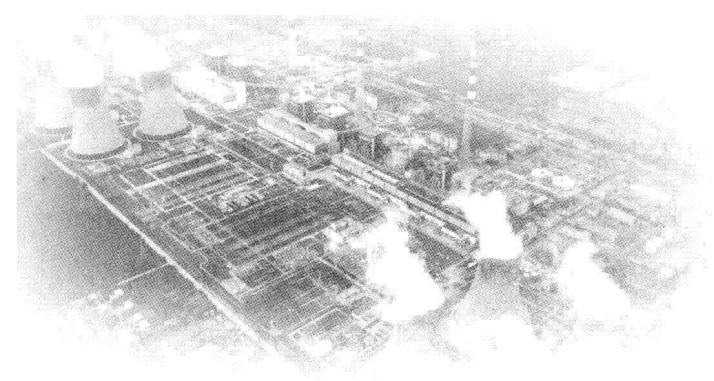
编 委 会

主任委员 陈海斌

副主任委员 齐崇勇 杨惠新

丛书主编 林 伟

编	委	朱卫风	林 伟	陈海宁	秦明宝	郭海军
		胡龙弟	徐国飏	包献忠	朱建平	王建中
		高 炜	陆 烨	陆建棋	李浩侃	曹 萍
		瞿才良	罗志浩			



序

自 1882 年中国有了商品电以来，中国电力工业的历史车轮已然驶过了三个世纪。斗转星移，大浪淘沙，在今天知识爆炸的时代，新一代的电力工作者需要怎样的知识来传承光荣，成就梦想？需要怎样的书籍来实现自我提升，成为一名真正具有竞争力的电力工作者？人生哲理、科学理论、生活常识，这些都很重要。阅读它们可以使人明智、静心、修身、达理，不断走向完美。但要成为一名优秀的电力运行工作者，除了这些之外，更为重要的是一定要有过硬的专业素质，以及坚定而执着的专业精神，这就需要有一套专业对口、学践结合、操作性强、通俗易懂的职业学习丛书，这就是我们出版《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》丛书的主要宗旨。

当前，加快转变经济发展方式已成为影响我国经济社会领域各个层面的一场深刻变革。在火电行业，大容量、高参数的火电机组因为其较低的能耗和排放成为了行业发展的主流。随着单机百万容量机组的投产发电，标志着我国的电力工业已经步入百万级时代。但是，就目前情况而言，600MW 级的机组仍是我国电网供电的中坚力量。因此，加强对 600MW 级机组基础理论的研究，深入开展 600MW 级机组的管理创新和技术创新，不断提高 600MW 级机组运行技术水平，对于促进中国电力工业更加健康快速地发展，确保国民经济稳定运行具有重要的现实意义。

2009 年 6 月，望亭发电厂通过科学论证、大胆规划、辛苦建设，在国内率先成功投运了由上海电气集团制造的 660MW 超超临界燃煤机组。投运至今，各项性能指标在同类型机组中处于先进行列，并成为中国华电集团 600MW 级标杆机组。“追求卓越，勇于创新”的企业精神造就了今天望亭发电厂的再度辉煌，有

着崇尚科学、不断精益求精传统的“望电人”紧紧依托自身日积月累、扎实深厚的技术底蕴，立足 660MW 级超超临界燃煤机组基建生产运行所掌握的第一手宝贵经验，加紧研究、认真总结、不断提炼，迅速建立起一套体系完善、环节精益、过程闭环、统筹兼顾的运营管控理论模式，锻炼出一支业务精、作风硬、素质强的职工队伍，为更好地发挥机组运营潜效、不断提升内生效益奠定了理论和技术基础，为实现超超临界机组在中国更好地发展和运营做出了自己应有的贡献。

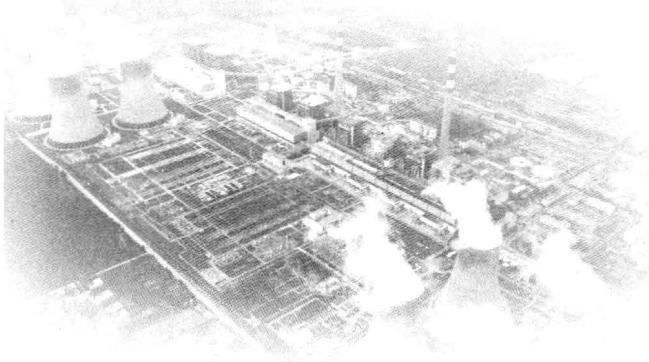
本套丛书编撰历时两年有余。两年来，在望亭发电厂党委和厂部的关心支持下，集聚厂内技术骨干的编撰团队克服了生产任务繁重、技术资料缺乏、编撰经验不足等诸多困难，充分发挥“望电人”严谨求实的工作作风，勤钻研、巧思考、多实践，力求在内容上理论联系实际，在表述上做到通俗易懂。本套丛书包括《汽轮机分册》、《电气分册》、《锅炉分册》、《脱硫脱硝分册》、《化学分册》、《燃料分册》、《热控分册》。针对发电厂工作的特点，本套丛书对 660MW 超超临界燃煤发电机组设备的原理只做简单介绍，着重以岗位运行知识为基础，以提高技能操作能力为目的，根据电厂一线人员在 660MW 超超临界燃煤发电机组调试、运行、维护过程中的经验，介绍发电设备及系统的运行维护及故障处理，有效提升了本书的实用性，使该书成为国内少有的能够全面、系统地反映该类型机组的培训教材。

时代在变，创新的精神和力量是永恒的。我们希望本套丛书的出版，能够成为一个契机和交流的载体，为推动低碳节能的 660MW 超超临界燃煤机组在中国更好更快地发展增添一份力量。

由于编撰人员的理论水平和实践经验有限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。



2011 年 4 月



前言

随着电力工业技术的不断发展,用电量的持续增加和世界范围内环保形势的日趋严峻,大容量、高参数、高效率的超超临界大型发电机组正逐渐成为我国电力系统的主力发电机组。大型超超临界发电机组普遍采用低 NO_x 燃烧以及烟气脱硫脱硝技术,大幅度降低了二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放。低煤耗、高环保的超超临界发电机组目前正成为我国电力行业“上大压小”、“节能减排”的首选机型。

为使广大电力生产岗位工人、技术人员和管理人员熟悉、了解和掌握 660MW 超超临界大型燃煤火力发电机组的性能及特点,中国华电集团公司望亭发电厂在中国电力出版社的大力支持下,组织各级技术人员耗时两年时间,精心编写了《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》。

针对发电厂工作的特点,本套教材对 660MW 超超临界燃煤发电机组设备的原理只做简单介绍,着重以岗位运行知识为基础,以提高操作技能为目的,根据电厂生产一线人员在 660MW 超超临界燃煤发电机组调试、运行、维护过程中的经验,详细介绍发电设备及系统的运行维护及故障处理,力求能以平实的语言及通俗的阐述,更好地满足 660MW 超超临界燃煤机组岗位运行、技能操作和继续教育的需要。本套教材也可供高等院校有关专业的相关师生参考。

本书为《660MW 超超临界火力发电机组培训教材》电气分册,共九章,由陆烨主编,林伟主审,包献忠、俞德民、赵军、陈立民、严晓锋、张继春、沈依军、石亚兵、俞若华、周强、王军、傅心雁、俞岚、苏晨越、柏云龙、许黎、吴健、王孝明等参与本书编写,全书由陆烨负责统稿。

本分册在编写过程中,参阅了部分已正式出版的技术文献及制造厂、设计院、安装单位、调试单位的有关说明书、图纸等技术资料,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,错漏之处在所难免,敬请读者批评指正,并提出宝贵意见。

编者

2011 年 4 月

目 录

序

前言

第一章 发电机	1
第一节 发电机.....	1
第二节 发电机励磁系统	13
第三节 发电机运行	41
第二章 变压器	70
第一节 变压器概述	70
第二节 变压器主要结构部件	73
第三节 变压器冷却方式	80
第四节 变压器允许温升	84
第五节 变压器绝缘老化	85
第六节 变压器试验	86
第七节 变压器过负荷能力	88
第八节 变压器运行	88
第九节 变压器异常运行和故障处理	93
第三章 配电装置	97
第一节 概述	97
第二节 SF ₆ 气体绝缘全封闭组合配电装置 (GIS)	101
第三节 高压开关柜.....	117
第四节 低压配电屏.....	125
第五节 封闭母线.....	127
第六节 避雷器及接地装置.....	131
第七节 配电装置运行维护及故障处理.....	135
第四章 厂用电系统	140
第一节 厂用电和厂用电负荷.....	140
第二节 厂用电电源及其接线形式.....	142

第三节	厂用电系统中性点接地方式	146
第四节	厂用变压器的选择	147
第五节	厂用电动机的选择和自启动校验	149
第六节	厂用电快切装置	161
第七节	变频装置	169
第八节	事故保安电源	179
第五章	直流系统及不停电装置	189
第一节	直流系统	189
第二节	UPS 装置	213
第六章	继电保护	223
第一节	继电保护基本情况介绍	223
第二节	发电机—变压器组保护	227
第三节	母线保护和断路器失灵保护	250
第四节	高压线路保护	261
第五节	厂用电系统保护	271
第六节	继电保护的日常运行规定	276
第七章	自动装置	279
第一节	发电机同期装置	279
第二节	发电机—变压器组故障录波装置	283
第三节	自动电压控制装置	287
第四节	发电机局部放电射频监测仪	290
第八章	电气控制系统	297
第一节	概述	297
第二节	网络控制系统	297
第三节	分散控制系统	307
第九章	电气运行常识	319
第一节	电气操作	319
第二节	常用电气操作用具的使用	324
第三节	电气安全常识	326
参考文献		331

第一章

发 电 机

第一节 发 电 机

一、概述

(一) 发电机工作原理

发电机是将其他形式的能源转换成电能的机械设备，它由水轮机、汽轮机、柴油机或其他动力机械驱动。水流、气流、燃料燃烧或原子核裂变产生的能量转化为机械能传给发电机，再由发电机转换为电能。发电机的形式很多，但其工作原理都基于电磁感应定律和电磁力定律，用适当的导磁和导电材料构成互相进行电磁感应的磁路和电路，以产生电磁功率，达到能量转换的目的。根据形式不同，发电机可分为直流发电机和交流发电机，同步发电机和异步发电机，单相发电机与三相发电机。根据发电机的原动机不同，可分为汽轮发电机、燃气轮发电机（一般是卧式的，转子为隐极式）、水轮发电机（一般是立式的，转子为凸极式）、柴油发电机等。原动机拖动同步发电机带对称负荷稳定运行时，原动机输入到发电机的机械功率称为输入功率。扣除发电机的机械损耗、铁耗和附加损耗后，通过电磁感应、定子磁场相互作用，将剩余的机械功率转变为电功率，称为电磁功率。目前大型发电机组一般有：全氢冷方式、定子绕组水冷其余为氢冷方式（水氢氢）、双水内冷方式（水水空）三种冷却方式。对于全氢冷及水氢氢冷却方式由于转子采用氢内冷，不会发生水内冷转子的绝缘引水管漏水而导致的故障，运行安全性较水内冷转子高。发电机通常由定子（包括定子铁芯、绕组、机座以及固定部分）、转子（包括转子铁芯绕组、护环、中心环、滑环、风扇及转轴等部件）、端盖及轴承等部件构成。下文将以 QFSN-660-2 型汽轮发电机为例详细介绍发电机结构。

(二) 发电机型号及代表意义

国产的大功率汽轮发电机根据各厂产品型号、容量、电压、冷却方式的不同，现已形成不同的系列，如 TQN、QFQS、QFSS、QFS 和 SQF 等系列。发电机型号中，第一、第二个字母 TQ 表示同步汽轮发电机，QF 表示汽轮发电机；第三个字母 N 表示氢冷，Q 表示转子氢内冷，S 表示转子水内冷；第四个字母 S 表示定子水内冷。

如发电机型号 QFSN-X-2 所代表的意义是：

QF——汽轮发电机；S——定子水内冷；N——氢内冷；X——兆瓦额定容量；2——2 极。

(三) 同步发电机额定值

额定容量 S_N (VA、kVA、MVA 等) 或额定功率 P_N (W、kW、MW 等)：指发电机输

出功率的保证值。发电机通过额定容量值可以确定电枢电流，通过额定功率可以确定配套原动机的容量。补偿机则用 kvar 表示。

额定电压 U_N ：指额定运行时定子输出端的线电压，V、kV 等。

额定电流 I_N ：指额定运行时定子的线电流，A。

额定功率因数 $\cos\varphi_N$ ：指额定运行时发电机的功率因数。

额定频率 f_N ：指额定运行时电机电枢输出端电能的频率，我国标准工业频率规定为 50Hz。

额定转速 n_N ：指额定运行时发电机的转速，即同步转速。

除上述额定值外，同步发电机铭牌上还常列出一些其他的运行数据，例如额定负荷时的温升 τ_N 、励磁容量 P_N 和励磁电压 U_N 等。QFSN-660-2 型汽轮发电机的主要技术参数见表 1-1。

表 1-1 QFSN-660-2 型汽轮发电机的主要技术参数

发电机型号	QFSN-660-2	发电机型号	QFSN-660-2
额定容量 S_N (MVA)	733	定子额定电流 I_N (A)	21 169
额定功率 P_N (MW)	660	额定频率 f_N (Hz)	50
最大连续输出功率 $P_{\max}$ (MW)	690	额定转速 n_N (r/min)	3000
最大连续输出容量 $S_{\max}$ (MVA)	766.67	额定励磁电压 U_N (V)	441
对应汽轮机 VWO 工况下输出功率(MW)	713.827	额定励磁电流 I_N /空载励磁电流 I_0 (A)	4493/1480
对应汽轮机 VWO 工况下功率因数 $\cos\varphi$	0.9	定子绕组接线方式	YY
对应汽轮机 VWO 工况下氢压(MPa)	0.5	冷却方式	水、氢、氢
额定功率因数 $\cos\varphi_N$	0.9	励磁方式	自并励静止励磁
定子额定电压 U_N (kV)	20	通风方式	气隙取气

（四）电能在当今社会的重要意义

电力是以电能作为动力的能源，发明于 19 世纪 70 年代。电力的发明和应用掀起了第二次工业化高潮，成为 18 世纪以来世界发生的三次科技革命之一，改变了人们的生活。20 世纪出现的大规模电力系统是人类工程科学史上最重要的成就之一，是由发电、输电、变电、配电和用电等环节组成的电力生产与消费系统。它将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电力，再经输电、变电和配电供应到各用户。

电能是现代化建设和人民生活最必需、最重要的一种二次能源。各种能源资源都可用来发电，但现代电力系统中的正弦交流电，主要来自水力发电和火力发电；在一些先进发达国家，原子能发电现在已占相当比重。无论水力发电、火力发电还是原子能发电，都采用同步发电机发电。水轮发电机和汽轮发电机虽然都是同步发电机，但由于它们的原动机不同，转速相差很大，所以在结构、性能和主要参数等方面存在较大差别。大型火力发电厂都采用二极隐极式汽轮发电机，转速为 3000r/min，而原子能电站则采用四极隐极式汽轮发电机，转速为 1500r/min。

（五）发电机的发展史

1832 年，法国青年电学工程师皮克希试制成功了世界上第一台手摇永久磁铁旋转的交

流发电机。在这台发电机中，皮克希装上了一种最初的换向器，使发电机中产生的交流电变为能为当时的工业生产所需要的直流电。1833~1835 年间，萨史斯顿和克拉克等人相继发明了旋转线圈电枢、静止磁铁结构等新装置，这些新装置的引入使发电机的运转部分质量大大减轻，从而提高了发电机的转速。此后，人们对发电机的原动力装置部分也进行了改进。到了 1844 年左右，在法、德、英等国家，就已经有庞大而笨拙的发电机发电，并可以通过最初的电动机给机器提供新的动力了。自从 1888 年第一台旋转电枢交流发电机（4800r/min）问世来，随着理论分析、实验研究的进步和新材料的发展，发电机单机容量越来越大，目前单机容量已达 1333MVA（3000r/min）和 1650MVA（1800r/min），且正在研制 2000~2500MVA 两极或四极的发电机组。大容量、高参数是提高火电机组经济性最为有效的措施。同时由于世界一次能源中煤的储量远远超过石油和天然气、环境保护对减少排放污染提出要求、京都协议书为控制地球温室效应确定减少 CO₂ 排放目标等原因，高效洁净燃煤发电技术将成为今后世界电力工业的主要发展方向之一。1993 年应用新一代 600℃ 高温材料的首台温度 593℃ 的 700MW 机组在日本投运，标志着世界汽轮机技术的发展进入了一个新的“超超临界参数”发展阶段。相对于热力学的超临界概念，超超临界参数是一种商业性称谓，以表示汽轮机组具有更高的压力和温度，有的公司也将超超临界机组称为高效超临界机组。目前世界上各公司对超超临界参数没有统一的定义。发达国家的超超临界火电技术已有较成熟经验，各方面性能及经济效益很好，因此，超超临界火电机组受到了国内用户的欢迎，得到了全面发展的机遇和空间。目前我国超临界、超超临界机组容量都在 600MW 以上，表 1-2 为由不同制造厂商生产的容量 600MW 及以上汽轮发电机的具体参数。

表 1-2 不同制造厂商生产的容量 600MW 及以上汽轮发电机的参数

安装厂名	平圩电厂	北仑电厂	石洞口电厂	望亭电厂
制造厂	哈尔滨（西屋）	日本东芝	ABB	上海电机厂
型号	QFSN-600-2	TAKS	50WT23E-600-2	QFSN-660-2
额定功率（MW）	600	600	644.4	660
功率因数	0.9	0.9	0.9	0.9
额定电压（kV）	20	20	24	20
冷却方式	水氢氢	水氢氢	水氢氢	水氢氢
绝缘等级/转	B/B	B/B	F/F	F/F

（六）发展大容量机组的必要性

大容量火电技术，发达国家已有较成熟经验，1000MW 级机组也不断出现，而国内装备制造这几年发展迅速。对于二极隐极式汽轮发电机而言，发展大容量机组在制造、基建和运行的经济性方面具有下列优点。

（1）可降低发电机造价和材料消耗率。根据国外资料，一台 800MW 机组比一台 500MW 机组单位成本降低 17%，一台 1200MW 机组比一台 800MW 机组单位成本降低 15%~20%，材料消耗率亦随单机容量的增大而降低，见表 1-3。

表 1-3

100~600MW 汽轮发电机材料消耗率

单机容量 (MW)	100	200	500
材料消耗率	1.0~1.5	0.85~1.0	0.6

(2) 可降低电厂基建安装费用。一个电厂单位造价随着单机容量的增大而降低。以 200MW 机组电厂单位造价为 100%，500MW 机组电厂单位造价可降低 15%，1000MW 机组电厂单位造价可降低 30%。

(3) 可降低运行费用，减少煤耗及单位千瓦运行人员和厂用电率。

(4) 可减少电厂布点，有益于环境保护，减少污染。

近几十年来，世界各国汽轮发电机的单机容量都不断增大，发展速度都很快。在 20 世纪 50 年代，单机容量为 100~200MW；60 年代，单机容量就发展到 300、500MW 和 600MW；70 年代，单机容量又发展到 800MW 和 1200MW 级水平。近年来，由于出现能源危机现象，核技术和核动力又得到发展。据报道，世界上核燃料资源要比矿物燃料资源多 28 倍，所以，今后原子能发电是有发展前途的，目前世界上核电站中已投运的最大发电机组，有美国的 1100MW 四极汽轮发电机和西德的 1310MW 双水内冷、四极汽轮发电机。

二、发电机的结构

发电机结构如图 1-1 所示，以下对各部分一一加以介绍。

(一) 静止部分

1. 定子机座及隔振结构

机座的主要作用是支持和固定定子铁芯和定子绕组，如用端盖轴承，它还要承受转子重力。同时在结构上满足发电机的通风和密封要求。国产机组应用较多的是压入式径向通风系统，因它是轴向分段通风，故又称为多流式压气通风系统。其结构是用钢板做横隔板，将机壳和铁芯背部之间的空间沿轴分成若干段，每段形成一个环形小风室，各小风室相互交替地分为进风区和出风区。各进风区之间和各出风区之间分别用圆形或椭圆形钢管连通。进风区和出风区总数随发电机容量增大而增多，有 5 段、7 段、9 段、11 段之分，其中偶数段为进风区，奇数段为出风区。进风孔设在风扇内侧的高压风区，出风孔与风扇外侧的低压风区相连并通向冷却器。空冷发电机的冷却器布置在机座的下部。氢冷发电机为了减小通风阻力和缩短风道，气体冷却器常安放在机座内的矩形孔内，有水平布置（卧式）和垂直布置（立式）两种，应用较多的是垂直布置。水平布置的优点是可将 4 组或 6 组体积较长的冷却器分散安放在机座内圆和铁芯背部之间的圆周内，使机座保持简单的圆柱体结构；缺点是安装拆卸困难。垂直布置则相反，冷却器立放在机座两端或机座中部的两侧位置，机座的结构形状虽较复杂，但拆卸安装却较方便，可以用吊车将整个冷却器吊出或吊入机座。

机座是静止部分中最重的一个部件。根据加工、搬运和运输条件不同，可分为整体机座和可拆卸机座两种。后者一般是沿轴向将机座分为三段，故又称为分段机座。防震结构机座都采用双机座，即内机座（含有铁芯）和外机座。有的机组外机座还分为上、下两瓣。内、外机座和外机座的上、下两瓣均可分别运输到现场，在现场再装配成一整体机壳及横隔板（亦称内隔板）。钢板厚度与冷却介质有关。空冷发电机内气压低，密封要求低，钢板较薄；

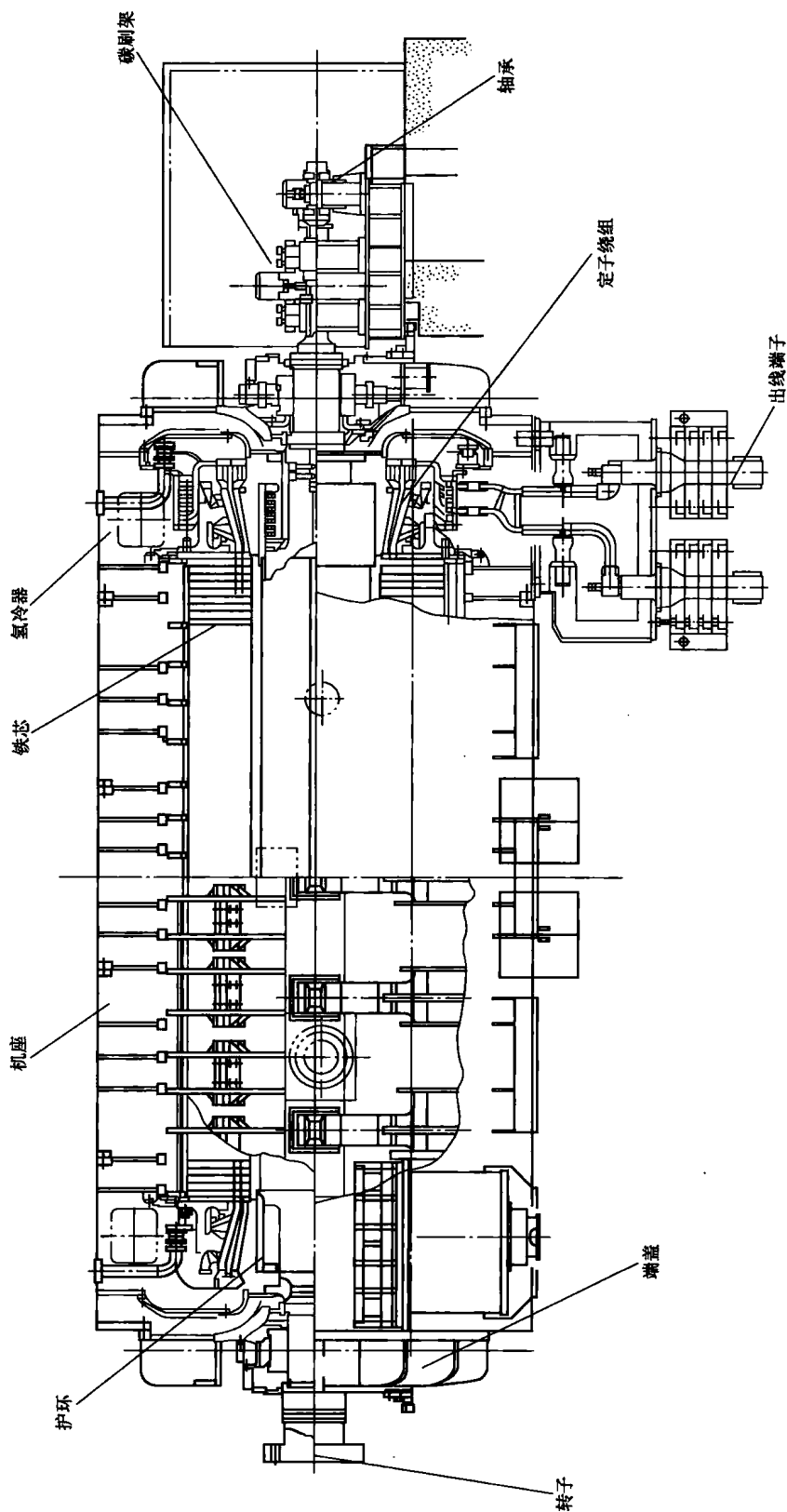


图 1-1 发电机结构图



氢冷发电机内氢压高，防爆和密封要求高，钢板较厚。定位筋均匀分布在机座内圆上，再焊接在沿轴向分布的内隔板上。具有防振结构的电机，采用弹性定位筋，内外机座间装有弹性隔振装置，机座刚性固定在基础上。机座侧面尚有定子绕组和铁芯测温元件的引线接线盒。

2. 端盖及轴承

端盖是保护定子端部绕组的，也是电机密封的一个组成部分。为了安装、检修、拆装方便，一般端盖分为两部分，氢冷电机多水平分开，空冷电机多垂直分开。轴承分有座式轴承和端盖轴承。机座和轴承间的准确同心对发电机的平稳运转是绝对必要的，因此，加工和安装时应特别精细以确保质量。空冷发电机内部气压低，密封要求不高，励侧多用座式轴承。氢冷发电机端盖在防爆和密封性能方面的要求与机座一样，也用钢板焊成，外部焊有加强筋，以提高端盖的径向和轴向刚度。氢冷发电机的轴承常装在强度高的端盖上，称为端盖轴承。

3. 定子铁芯

定子铁芯是构成发电机磁回路和固定定子绕组的重要部件。现在大型汽轮发电机定子铁芯的质量约占电机总质量的 30%~35%，铁损约占总损耗 15%~20%，因此降低铁损对提高发电机效率是很有意义的。随着大型发电机的发展特别是百万机组的出现，为了减少铁芯内的磁滞和涡流损耗，一般现在大型发电机的定子铁芯采用 0.5mm 厚扇形高导磁率、低损耗的无取向冷轧硅钢片叠装而成，在硅钢片两侧表面涂有 F 级环氧绝缘漆。定子铁芯轴向用反磁支持筋螺杆和对地绝缘的高强度反磁钢穿心螺杆，通过两端的压指、压圈及分块连接片用螺母拧紧成为整体，经过数次冷态和热态加压并加固螺母而成为一个结实的铁芯整体。在铁芯的两边端齿上开有分隔槽，并用黏胶将边端黏结形成整体。在两端压圈与反磁性分块连接片之间设有用硅钢片叠压并加以黏结起来形成内圆为阶梯形看台式的磁屏蔽，这些措施有效地减少了端部漏磁引起的附加损耗，故端部温升较低，使发电机具有良好的进相运行的能力。

定子铁芯内设有许多径向通风道组成，氢气表面冷却、多路并联通风、对应转子进风和出风相互间隔的十多个风区。还在铁芯内圆上进风和出风区之间、环绕气隙上部 5/6 的圆周上镶嵌风区隔环以减少串风，提高通风散热的效能。

4. 定子绕组及绕组装配

大容量汽轮发电机定子绕组和一般三相交流发电机定子绕组一样，都采用三相双层短距分布绕组，目的是为了改善电动势波形，即消除绕组内的高次谐波电动势，以获得近似的正弦波电动势。发电机定子三相绕组接成星形或多星形，可使线电动势内不出现 3 次和 3 的倍数次谐波电动势；绕组采用短节距，可以消灭或削弱 5、7 和 11 等高次谐波电动势。由于定子绕组中除 3 次谐波电动势外，以 5、7 次谐波电动势为最大，故节距一般缩短 $1/6 \sim 1/5$ ，这样对基波电动势值的影响很小，但可显著削弱 5、7 和 11 等高次谐波电动势并改善电动势波形。

水内冷机组的定子绕组是由实心股线和空心导线交叉组成，均包有玻璃丝绝缘层。上层线棒的导电截面积要比下层的大。槽内股线间进行了 540° 的罗贝尔空换位，也起到减少绕组附加损耗的作用。线棒的空实心股线均用中频加热钎焊在两端的接头水盒内，而钎焊在水盒上的水盒盖则焊有反磁不锈钢水接头，用作冷却水进出线棒内水支路的接口。套在线棒上

或汇流管上水接头的四氟乙烯绝缘引水管，都用卡箍箍紧。采用中频加热钎焊水盒的工艺盒卡箍箍紧水管的结构，进一步提高了定子绕组水路的气密性。定子绕组的空心导线内通过冷却水以冷却铜线，因此绕组温升很低，但定子绕组对地绝缘仍采用 F 级环氧云母带连续绝缘，确保使用寿命。

定子绕组在槽内固定于高强度玻璃布卷包模压槽楔内，示意图如图 1-2 所示。在铁芯两端用割有倒齿的、行之确有实效的关门槽楔就地锁紧，防止运行中因振动而产生的轴向位移。定子绕组的端部全部采用钢—柔绑扎固定结构。它由充胶的层间支撑软管、可调节绑环、径向支撑环、绝缘楔块和绝缘螺杆等结构件以及绑带、适形材料等将伸出铁芯槽口的绕组端部固定在绝缘大锥环内，成为一个牢固的整体。在绕组端部靠近铁芯出槽口的可调节绑环上，汽、励两端各设有一道气隙挡风环（板），用以限制进入气隙的风量。

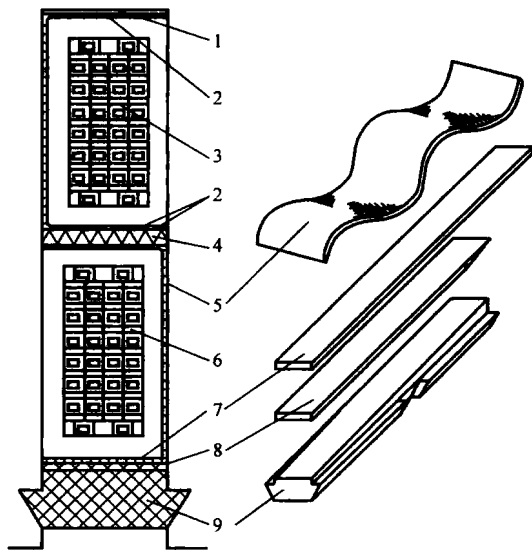


图 1-2 定子绕组槽内固定示意图

- 1—槽底垫条；2—适形垫条；3—下层线棒；
4—层间垫条；5—侧面波纹板；6—上层线棒；
7—楔下垫条及调节垫条；8—斜楔；9—定子槽楔

5. 定子出线

发电机定子出线导电杆是装配在出线磁套管内的，组成了出线瓷套端子。结构设计使定子出线穿过装在出线盒上的绝缘瓷套管，将定子绕组出线端子引出机座外，并保证不漏氢且不漏水。每相绕组由若干个绕组组成，如果每相绕组全部串联，三相接成 Y 形，有 6 根引出线。如果每相绕组并联成两路，三相接成双 Y，有 12 根引出线。如接成 3Y，每相三条并联支路在电机内部连在一起，引出线仍为 6 根。目前大型发电机组出线瓷套端子共有 6 个，其中 3 个主出线端子通过金具引出；另外 3 个斜装的为中性出线端子，由中性点母板及编织铜排连接起来形成中性点；出线瓷套端子和中性点母板均为水内冷。出线瓷套端子对机座和对水路都是气密的。以每个出线瓷套端子为中心，从出线盒向下吊装着若干个同心的电流互感器提供给仪表测量或继电保护用。

6. 定子水路

总进、出水汇流管分别装在励端和汽端的机座内，对地设有绝缘，运行时需接地。它们的进、出水口及排气管分别放在汇流管上方，这是为了防止绕组在断水情况下失水。但它们的法兰设在机座的上侧面，便于和机座外部总进水管相连。排放水管口分别放在机座两端的下方，具有特殊设计的结构，它对机座是密封的但能适应温度变化而产生的变形，对机座和相连接的外部管道都是可靠绝缘的。在外部总进、出水管上装有测温及报警元件。在用水冷专用绝缘电阻表测量定子绕组绝缘电阻时，要求总进、出水汇流管对地有一定的绝缘电阻。

冷却水从励磁机端或集电环端的总进水汇流管流过连接的聚四氟乙烯绝缘引水管流入定子线棒，再从线棒出水接头通过绝缘引水管流入总出水汇流管。每根上层或下层线棒各自形成一个独立的水支路，另有冷却水从励磁机端或集电环端的总进水汇流管进入，也通过绝缘

引水管流经绕组引线,即绕组端部连接线、主引线及出线瓷套端子或中性点母线后,进入出线盒中的小汇流管,再从外部管道流入汽端总出水汇流管,然后一起引出到外部总出水管,流回定子水箱。

7. 氢冷却器

发电机的氢冷却器卧放在机座顶部的氢冷却器外罩内。在汽、励两端的氢冷却器外罩内各有一组氢冷却器,每组分两个独立的水支路。当停运一个水支路时,冷却器能带 80% 的负荷运行。

(二) 转子部分

转子部分由转轴、转子绕组、转子绕组的电气连接件、护环、中心环、风扇、联轴器和阻尼系统等部件构成。

1. 转轴

转轴通常是由转子和转子本体组合在一起构成的一个整体。发电机转轴由高机械性能和导磁性能良好的合金钢锻件加工而成。在转轴本体大齿中心沿轴向均匀地开了多个横向月形槽,又在励磁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,避免由此引起的尖角处的温度急剧升高,有效地提高了发电机承受负荷的能力。为削弱运行时在近磁极中心的气隙磁通和转子轭部磁通局部饱和,改善磁场波形,在靠近大齿的两个嵌线槽分别采用了不等距分布。转子旋转时,转子中心所受机械应力最大,为了消除对转子有危害的内应力,提高转轴机械强度,防止转轴可能出现裂纹和减少热加工过程可能出现的偏差,必须对转子材料性能进行认真地检验和分析。

2. 转子绕组

转子绕组由冷拉含银无氧铜线加工而成,因此既抗蠕变,又防氢脆。每圈导线由直线、弯角和端部圆弧所组成。转子本体采用气隙取气斜流通风方式。绕组在槽内的直线部分沿轴向分成十多个进、出风区相间的区段,在宽度方向各为两排反方向斜流的径向风孔。在转子绕组的槽楔上加工形成风斗,风斗有两种形式:放在进风区的为吸风风斗,在出风区的为甩风风斗。来自定子铁芯径向风道的氢气,被转子进风区的吸风风斗从气隙吸入转子绕组中两条反向的斜流风道,再从绕组底部进入左右两侧反向的斜流风道,进入出风区,热风则从左右两条对称的斜流风道出来,相遇于一个甩风风斗后被甩出槽楔,排入气隙的转子出风区,再进入定子的径向风道,这样就形成了与定子相对应的进、出风区相间的气隙取气斜流通风系统。发电机通风示意图如图 1-3 所示。

3. 转子槽楔、护环、中心环、风扇环

转子槽楔由铝合金制成,在径向开通风道,并在顶部加工成风斗形,具有气隙取气进、出风斗的作用,槽楔上的风斗结合楔下垫条中特殊风孔型式形成一斗两路,并具有两路流量均匀分配的通风方式。转子绕组顶部由具有良好的耐应力腐蚀能力的整体锻制的高强度反磁合金钢护环来支撑,护环热套在转子本体端部的配合面上,为悬挂式结构。中心环、风扇环均为合金钢锻件,风扇叶片为铝合金锻件。单级螺旋式风扇对称布置在转子两端向定子铁芯背部及转子护环内部送风。