

600MW火电机组系列培训教材
第二分册（下）



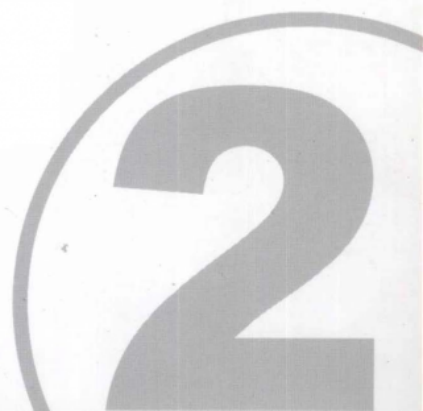
单元机组设备运行

电气设备与运行

中国大唐集团公司 | 组编
长沙理工大学



中国电力出版社
www.cepp.com.cn





600MW火电机組系列培训教材

- 第一分册 单元机组集控运行
- 第二分册（上）单元机组设备运行 锅炉设备与运行
- 第二分册（中）单元机组设备运行 汽轮机设备与运行
- **第二分册（下）单元机组设备运行 电气设备与运行**
- 第三分册 辅控集控设备及运行
- 第四分册 点检定修管理
- 第五分册 汽轮机设备检修
- 第六分册 电气设备检修
- 第七分册 锅炉设备检修
- 第八分册 热工控制系统及设备

ISBN 978-7-5083-9569-2



9 787508 395692 >

定价:121.00元(上、中、下册)

上架建议: 电力工程/火力发电

600MW火电机组系列培训教材
第二分册（下）

单元机组设备运行

电气设备与运行

中国大唐集团公司 组编
长沙理工大学
汪淑奇 文炼红 杨继明 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为确保 600MW 火电机组的安全、稳定、经济运行,提高 600MW 火电机组的生产运行人员、检修人员和技术管理人员的技术素质和管理水平,适应员工岗位培训工作的需要,中国大唐集团公司和长沙理工大学组织编写了《600MW 火电机组系列培训教材》。

本书是《600MW 火电机组系列培训教材》中的第二分册(下)《单元机组设备运行 电气设备与运行》。全书共十章,内容包括 600MW 机组同步发电机本体结构,600MW 同步发电机的励磁系统,600MW 同步发电机的运行,电力变压器与运行维护,600MW 机组电气主接线,600MW 机组厂用电系统与设备,500kV 系统电气设备,发电厂控制、信号与测量,直流系统和事故保安电源,600MW 电气主设备继电保护。

本套教材适用于 600MW 及其他大型火电机组的岗位培训和继续教育,也可供从事 600MW 及其他大型火电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员和管理人员阅读,并可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

单元机组设备运行. 下 / 中国大唐集团公司, 长沙理工大学组编. —北京: 中国电力出版社, 2009.12

(600MW 火电机组系列培训教材: 2)

ISBN 978-7-5083-9569-2

I. 单… II. ①中…②长… III. 火电厂—单元机组—电力系统运行—技术培训—教材 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 191350 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 12 月第一版 2009 年 12 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 58.625 印张 1435 千字
印数 0001—5000 册 上、中、下三册定价共 121.00 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

《600MW 火发电机组系列培训教材》 编 委 会

主 任 翟若愚

副 主 任 刘顺达 钟 俊 杨 庆 王 琳 蔡哲夫
邹嘉华 胡绳木 熊 皓 吴 静 金耀华

常 务 委 员 武洪举 高智溥 洪源渤

委 员 杨俊平 阮大伟 侯国力 雷 鸣 赵丕友
黄竹青 张 健 王彤音 张成虎

总 编 邹嘉华
副 总 编 武洪举 杨俊平
执行副总编 雷 鸣

编写工作组：

组 长 雷 鸣
副 组 长 张成虎 陈 荐
成 员 赵晓旻 刘 军 赵士杰 孙希瑾 戴曙光

前言

近年来,为进一步深入贯彻落实科学发展观以及适应国家节能减排及环保的需求,大容量、高参数、高自动化的大型火力发电机组在我国日益普及。600MW 火电机组因其具有大容量、高参数、低能耗、低污染、高可靠性等优点,现已成为我国火力发电厂的主力机型。为确保 600MW 火电机组的安全、可靠、经济及环保运行,600MW 火电机组从业人员的岗位培训显得十分重要。

为适应这一形势发展的需要,中国大唐集团公司与长沙理工大学组织人员编写了《600MW 火电机组系列培训教材》。本系列教材目前包括《单元机组集控运行》、《单元机组设备运行》、《辅控集控设备及运行》、《点检定修管理》、《汽轮机设备检修》、《电气设备检修》、《锅炉设备检修》、《热工控制系统及设备》共八册。今后还将根据电力技术发展情况,不断地充实完善。

本系列教材适用于具有大中专及以上文化程度的 600MW 及其他大型火电机组生产人员和技术管理人员的岗位培训和继续教育,也可供从事 600MW 及其他大型火电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员和管理人员阅读,以及高等院校相关专业师生参考。

《单元机组设备运行》是本系列培训教材中的第二分册。全书由锅炉设备与运行、汽轮机设备与运行和电气设备与运行三部分组成,详细介绍了大型电厂锅炉、汽轮机与发电机组及电气系统中的主要与辅助系统和设备的组成与工作原理、运行与操作方法,运行与操作中容易出现的问题及预防事故的措施,运行分析与故障分析方法,优化运行的方法。注重理论与实际的结合,由浅入深。并简要介绍大型电厂锅炉、汽轮机与发电机组及电气系统技术发展趋势、在线诊断、寿命管理等问题。

《单元机组设备运行 电气设备与运行》重点介绍了 600MW 汽轮发电机和大型变压器的结构、运行分析和常见故障处理,发电厂典型电气主结线及发电厂中性点接地方式,厂用电系统和 500kV 系统主要电气设备的原理与运行,600MW 汽轮发电机励磁控制系统及发电厂自动控制与测量,直流系统和保安电源,发电厂主要电气设备的继电保护配置和原理介绍。编写时遵循理论与实际相结合的原则,突出 600MW 汽轮发电机组及相关设备的特点,注重新设备、新技术的应用。

本书由长沙理工大学汪淑奇、文炼红、杨继明主编。《单元机组设备运行 电气设备与运行》第一、三章由王旭红编写,第二、八章由向秋风编写,第四章及第七章第四节由欧阳明编写,第五、六、七章由陈元新编写,第九、十章由文炼红编写。

本书由霍卢波、张家荣、常小卷、龙冠湘、张成虎担任编审。他们对本书进行了认真的审阅,提出了很多宝贵的意见与建议,在此谨表诚挚的谢意。

本书在编写过程中得到了大唐三门峡发电有限责任公司、浙江大唐国际乌沙山发电有限责任公司、大唐洛阳热电厂、大唐华银金竹山火力发电分公司、大唐国际发电股份有限公司下花园发电厂、大唐湘潭发电有限责任公司等单位的大力支持，并参阅了相关电厂、制造厂、设计院、安装单位和高等院校的技术资料、说明书、图纸等，在此一并表示感谢。

本系列教材由长沙理工大学陈冬林教授负责统稿。

由于编者水平所限和编写时间紧迫，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2009年7月

目 录

前言

第一章 600MW 机组同步发电机本体结构	1
第一节 同步发电机概述.....	1
第二节 600MW 同步发电机本体结构.....	2
第三节 氢、油、水系统.....	12
第四节 同步发电机温度与工况监测.....	19
第二章 600MW 同步发电机的励磁系统	23
第一节 同步发电机励磁的作用与要求.....	23
第二节 同步发电机励磁系统.....	25
第三节 发电机的调压特性与机组间无功分配.....	28
第四节 励磁系统对暂态稳定的影响.....	34
第五节 自动励磁调节装置.....	35
第六节 电力系统稳定器.....	37
第七节 600MW 机组励磁系统自动控制与保护.....	39
第八节 发电机低励和失磁的危害.....	41
第三章 600MW 同步发电机的运行	44
第一节 额定参数运行.....	44
第二节 冷却条件、频率和电压变化对运行的影响.....	48
第三节 发电机的稳定性和安全运行极限.....	50
第四节 发电机的励磁调节及进相运行.....	53
第五节 发电机的非正常运行.....	55
第六节 发电机常见故障处理.....	61
第四章 电力变压器与运行维护	67
第一节 变压器原理与运行特点.....	67
第二节 变压器组成与结构.....	71
第三节 变压器的允许温升.....	83
第四节 变压器绝缘老化.....	85

第五节 变压器的过负荷能力	86
第五章 600MW 机组电气主接线	87
第一节 600MW 机组电气主接线基本形式	87
第二节 600MW 机组发电厂的典型电气主接线	93
第三节 发电厂中性点接地方式	95
第六章 600MW 机组厂用电系统与设备	99
第一节 厂用电接线方式和运行	99
第二节 成套高压开关柜	102
第三节 真空断路器	105
第四节 高压限流熔断器—真空接触器 (F-C) 回路	111
第五节 厂用电源快速切换装置	114
第六节 高压电动机变频调速装置	117
第七章 500kV 系统电气设备	122
第一节 六氟化硫 (SF_6) 断路器	122
第二节 隔离开关	136
第三节 氧化锌避雷器	140
第四节 互感器	143
第八章 发电厂控制、信号与测量	157
第一节 发电厂的控制方式	157
第二节 500kV 高压断路器控制	158
第三节 信号与测量	163
第四节 同期与同期装置	167
第五节 自动发电控制与自动电压控制	169
第六节 电力系统稳定及控制措施	171
第九章 直流系统和事故保安电源	177
第一节 直流系统的作用与运行方式	177
第二节 直流系统的运行和维护	179
第三节 厂用事故保安电源和不停电交流电源	189
第十章 600MW 电气主设备继电保护	193
第一节 大型发电机组与高压电网继电保护的特点	193
第二节 发电机保护	195
第三节 变压器保护	204
第四节 发电机—变压器组非电量保护	209

第五节	600MW 发电机—变压器组保护配置举例	212
第六节	输电线路保护	215
参考文献		232

第一章

600MW 机组同步发电机本体结构

第一节 同步发电机概述

一、同步发电机的工作原理

同步发电机是电力系统中生产电能的重要设备，其工作原理是利用电磁感应原理将原动机转轴上的动能通过定子、转子间的磁场耦合，转换到定子绕组变为电能。

按原动机的不同，同步发电机分为水轮发电机、汽轮发电机、柴油发电机等。水轮发电机、柴油发电机转速较低，极数多，多为凸极式转子；汽轮发电机转速很高，采用隐极式转子，见图 1-1。发电机主要有定子和转子两部分，定、转子之间有气隙，工作原理如图 1-2 所示。

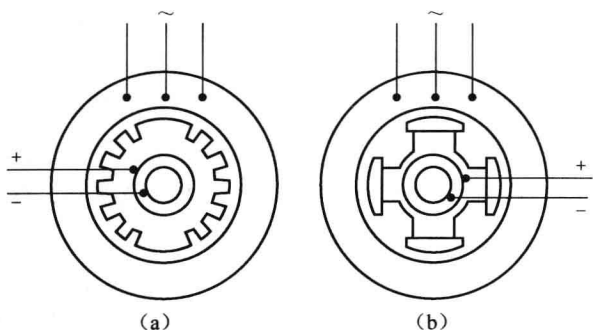


图 1-1 旋转磁极式同步电机示意图

(a) 隐极式；(b) 凸极式

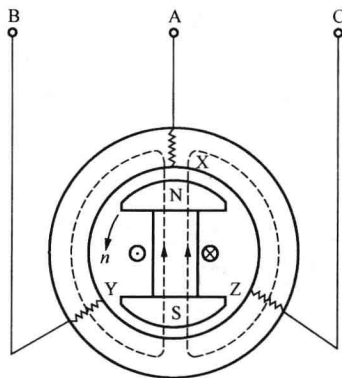


图 1-2 同步发电机的工作原理

定子上有 AX、BY、CZ 三相绕组，它们在空间上彼此相差 120° 电角度，每相绕组的匝数相等。转子磁极（主极）上装有励磁绕组，由直流励磁，磁通方向从转子 N 极出来，经过气隙、定子铁芯、气隙，再进入转子 S 极而构成回路，如图 1-2 中的虚线所示。

用原动机拖动发电机沿逆时针方向旋转，则磁力线将切割定子绕组的导体，由电磁感应定律可知，在定子绕组中就会感应出交变的电动势，由于发电机定子三相绕组在物理空间布置上相差 120° ，那么转子磁场的磁力线势必将先切割 A 相绕组，再切割 B 相，最后切割 C 相。因此，定子三相感应电动势大小相等，在相位上彼此互差 120° 电角度，如图 1-3 所示。假设相电动势最大值为 E_m ，A 相电动势的初相角为零，则三相电动势的瞬时值为

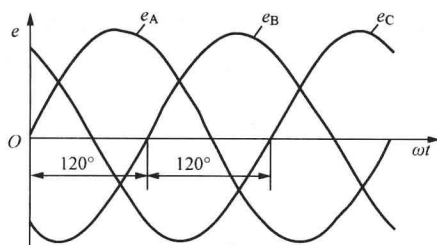


图 1-3 三相电动势曲线

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

同步发电机指发电机的转速为同步转速(恒定值), 设产生定子侧旋转磁场的交流电流的频率为 f , 电机的极对数为 p , 则同步发电机转速 n 与电流频率 f 和极对数 p 的基本关系为

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

我国规定交流电网的标准工作频率(简称工频)为 50Hz, 即同步速与极对数成反比, 最高为 3000r/min, 对应于 $p=1$ 。极对数越多, 转速越低。600MW 同步发电机的转速为 3000r/min。

二、600MW 发电机的特点

近年来, 我国电力系统中发电机容量不断增长, 600MW 及以上的单机已进入大的电力系统, 成为主力机组。单机容量增长的原因是: ①可降低发电机的造价和材料消耗率。例如, 一台 600MW (内冷) 机组比一台 100MW (氢外冷) 机组, 其单位材料消耗率只有 60%。②可降低单位基建安装费用。若 200MW 机组电厂单位安装费用为 100%, 则 500MW 机组的费用只需 85%。③可降低运行费用。如煤耗及单位千瓦的运行人员和厂用电都比单机容量较小的机组低。可见, 单机容量的提高不仅可以提高效率, 还可以降低发电机的造价和耗材, 降低电厂基建安装费和运行费用, 提高经济效益。

QFSN-600-2 型汽轮发电机是哈尔滨电机厂有限责任公司、上海汽轮发电机有限公司、东方电机股份有限公司, 嫁接和引进了国外技术, 在电力部门对引进技术 600MW 发电机机组提出优化和机组创优工程要求的基础上优化设计的, 该型发电机具有容量大、效率高、性能好和高可靠性等特点, 是一个完全达到电力部门优化要求的、科技含量很高、相当于当代国际先进水平的新产品。

QFSN-600-2 型汽轮发电机为汽轮机直接拖动的隐极式、二极、三相同步发电机, 是大型火电站的主要设备和电网的主力机组。其型号所表示的意义为: Q 表示汽轮机; F 表示发电机; S 表示定子绕组水冷; N 表示转子绕组氢内部冷却; 600 表示额定功率 600MW; 2 表示两个磁极。该型发电机容量上满足与 600MW 汽轮机匹配的最大出力要求, 额定电压多为 20kV 和 24kV, 额定功率因数为 0.9, 设计效率高达 98.7% 以上, 短路比不小于 0.5, 定子绕组接法为 Yy 联结, 采用定子绕组水内冷、转子绕组氢内冷、定子铁芯氢冷的水氢氢冷却方式。改进了转子阻尼结构, 提高发电机负序电流承载能力。定子运输质量为 300t 左右, 可采用分段式机座, 方便运输。

第二节 600MW 同步发电机本体结构

汽轮发电机主要由定子、转子、端盖和轴承等部件组成。图 1-4 所示为 QFSN-600-2 水氢氢冷汽轮发电机结构与外形。

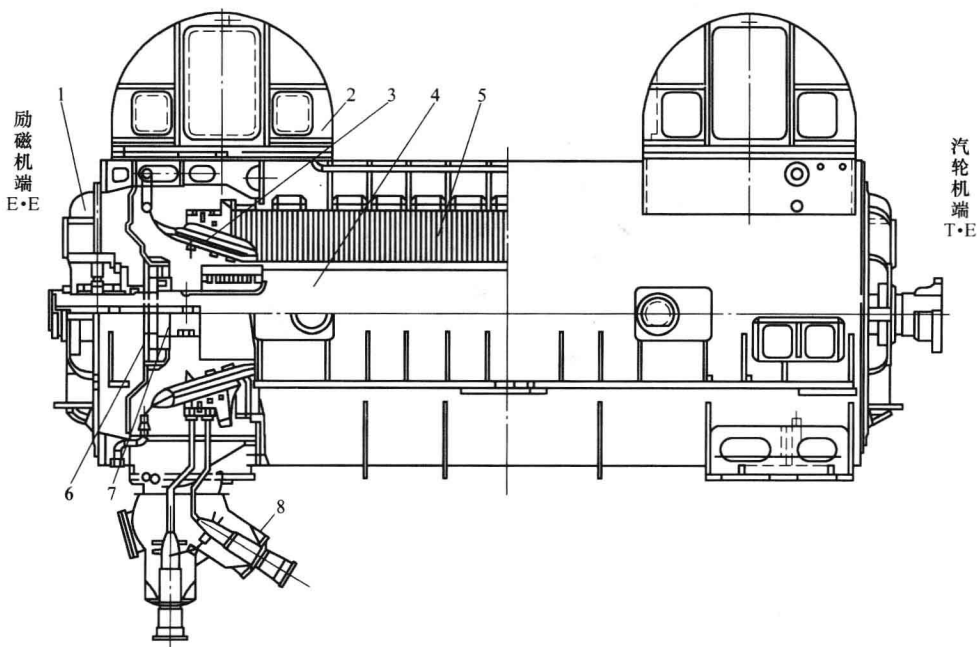


图 1-4 QFSN-600-2 水氢氢冷汽轮发电机结构与外形

1—轴承、油封、端盖；2—冷却器；3—定子绕组；4—转子；
5—定子铁芯；6—导风环及内端盖；7—风扇；8—引出导线

一、定子

定子主要由机座、铁芯、绕组、隔振结构、端盖和进出水汇流管等部件组成。

(一) 机座、端盖与隔振结构

机座和端盖既是发电机机械上的主要支撑，又是风路系统的主要组成部分。机座是用高强度优质钢板焊成的壳体结构，具有足够的强度和刚度，其作用是支承定子铁芯和定子绕组，并构成特定的冷却气体流道。机座要通过端盖支承转子质量，氢冷发电机的氢气冷却器直放或卧放在机座内，对 600MW 发电机，机壳内的额定氢气压力为 $0.4 \sim 0.5 \text{ MPa}$ ，整个机座既要满足防爆和密封的要求，能承受氢气爆炸时的压力，还要满足强度和振动的要求。

为解决铁路运输问题，机座设计成三段，即一个中段和两个端罩。中段（含铁芯和绕组）是发电机最重最大的部件，其尺寸和质量均在铁路运输极限内，可以通过铁路隧道运往电厂。

端盖由钢板焊接或铝合金铸造而成，具有足够的强度和刚度，以支撑转子，同时承受机内氢气压力甚至氢爆产生的压力。端盖既是发电机外壳的一部分，又是轴承座，为便于安装、检修和拆装方便，一般端盖沿水平方向分为上下两半。端盖分内端盖、外端盖和挡风圈，内端盖和导风环与外端盖间构成风扇前或风扇后的风路。

为了减小由于转子磁通对定子铁芯的磁拉力引起的双频振动，以及短路等其他因素引起的定子铁芯振动对机座和基础的影响，在定子铁芯和机座之间多采用弹性隔振结构，如图 1-5 所示。不同制造厂采用了各种不同的隔振装置，一般把铁芯、机座及基础当成通过弹簧板和底脚连接起来的具有刚度和阻尼的隔振装置，用得最多的是立式和卧式两种。从理论上说，立式弹簧板式隔振装置的效果最为理想，其支撑点设在 $4/3$ 倍中性半径处，在理论上隔振弹簧不受任何振动应力。卧式结构的隔振型式因其较简单而应用普遍。在定位筋的背部装弹簧

板, 弹簧板通过垫块, 用螺栓固定在定位筋的背部, 弹簧板中部与机座内的隔板相连, 构成弹性隔振结构。

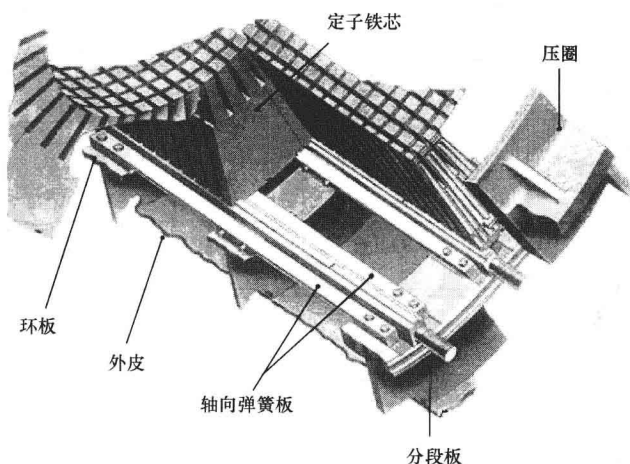


图 1-5 机座弹性隔振结构

（二）定子铁芯

定子铁芯是用相互绝缘的扇形片叠装压紧制成的, 构成发电机的磁路并固定定子绕组, 为减少磁滞和涡流损耗, 扇形片采用高导磁、低损耗、厚度为 $0.35\sim 0.5\text{mm}$ 的冷轧硅钢片冲制而成。扇形片两面刷涂加有无机填料的热固性绝缘漆。

扇形片冲有嵌放定子绕组的下线槽和放置槽楔用的鸽尾槽, 叠压时利用定子定位筋定位, 迭装过程中经多次施压, 两端采用低磁性的球墨铸铁压圈将铁芯夹紧成一个刚性圆柱体。铁芯齿部是靠压圈内侧的非磁性压指来压紧的。边段铁芯涂有黏结漆, 在铁芯装压后加热使其黏结成一个牢固的整体, 进一步提高铁芯的刚度。

边段铁芯齿设计成阶梯状并在齿中间开窄槽, 同时在压圈上装有整体的全铜屏蔽, 以降低铁芯端部的损耗和温升。

（三）定子绕组

为获得近似正弦波电动势, 消除高次谐波, 定子绕组采用三相双层短距分布绕组。绕组为叠绕组, 每个绕组由两根条形线棒做成半匝后, 在端部线鼻处用对接火并头套焊接成一个整单匝式绕组, 绕组按双层单叠的方式构成绕组的一个带。600MW 发电机定子绕组都采用单匝短距双层叠绕组, 相间接成双星形 (YY)。

定子绕组端部伸出铁芯槽外的部分都向铁芯外圆侧成 $15^\circ\sim 30^\circ$ 倾斜, 成渐开线式展开, 为篮式结构, 并且由连接线连接成规定的相带组, 采用连续式 F 级环氧粉云母绝缘系统, 表面有防晕处理措施。

为抑制集肤效应, 使导体内电流均匀, 减少漏磁通在导体内产生的环流和附加损耗, 线棒由绝缘空心股线和实心股线编织换位组合而成。国产 600MW 发电机一般由一根空心导线和 2~4 根实心绝缘扁线编为一组, 定子线棒空心、实心导线的组合比例为 1:2, 直线部分进行 540° 编织换位。

定子绕组的绝缘包括线棒主绝缘、股间绝缘、层间绝缘和换位处的加强绝缘。主绝缘又称为对地绝缘或线棒绝缘, 是最重要的绝缘, 最易受到磨损、碰伤、老化、电腐蚀和化学腐

蚀。大型发电机定子绕组的绝缘材料，多采用以玻璃布为补强材料的环氧树脂为黏合剂或浸渍剂的粉云母带，（含胶量为 35.5%~36.5%），连续式液压或烘压成型，最高允许温度为 130℃。

定子线棒在槽内有良好的固定，如图 1-6 所示，侧面有半导体波纹板，径向还有带斜度的槽楔组合固定。定子绕组端部用浸胶无纬玻璃纤维带绑扎固定在由绝缘支架和绑环组成的端部固定件上，绑扎固定后进行烘焙固化，使整个端部在径向和周合成为一个刚性的整体，确保端部固有频率远离倍频，避免运行时发生共振。轴向可沿支架滑销方向自由移动，减少由于负荷或工况变化而在定子绕组和支撑系统中引起的应力，满足机组调峰运行的要求。

定子线棒是通过空心股线中的水介质来冷却的，发电机内设有进水母管和出水母管。600MW 发电机都采用并联单流水路，即一个绕组二条水路，每半匝线棒为一条水路，又称为半匝水路，如图 1-7 所示。冷却水从励端的汇流管和绝缘引水管并通过线棒端头的水接头进入绕组，冷却绕组后再经过汽轮机端的绝缘引水管和汇流管排入外部水系统。因这种水路的进水和出水母管分别布置在发电机内的励磁侧和汽轮机侧，又称为双边进出方式。这种方式水路短、水压降小、进水压力低、上层和下层线棒内的水流方向相同、进水侧线棒温升较出水侧低，适用于容量大和铁芯长的发电机。

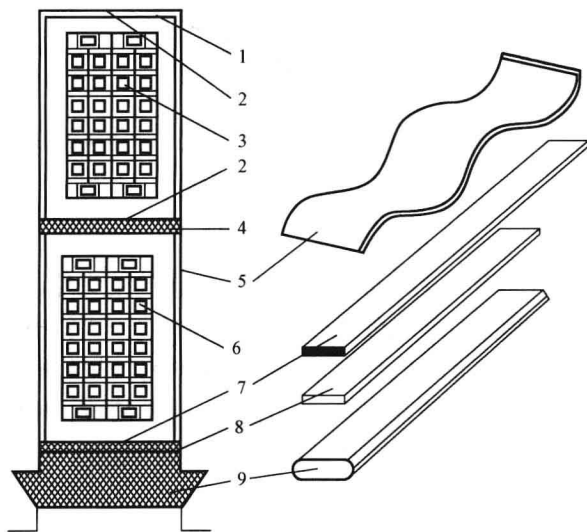


图 1-6 定子线棒

- 1—槽底垫条；2—变形垫条；3—下层线棒；4—层间垫条；
5—侧面弹性波纹板；6—上层线棒；7—楔下垫条及
调节垫条；8—滑动楔块；9—槽楔

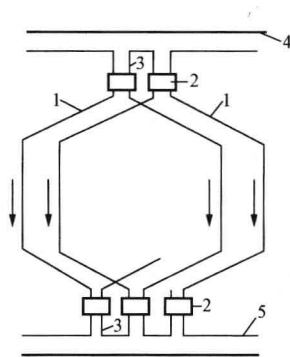


图 1-7 定子绕组内冷并联单流水路

- 1—空心导线；2—水电接头；3—绝缘水管；
4—进水母管；5—出水母管

水电接头是水冷发电机中关键的部件，因为在水内冷的定子绕组中既通电又通水，必须有一个可靠的水电接头，使定子绕组按电路接通，又让水方便地引入和排出。绕组鼻端上下层两线棒间的水电连接必须十分可靠，若发生渗水或漏水，会严重影响发电机安全可靠运行，甚至造成重大事故。

目前，600MW 发电机的水冷定子绕组的水电接头主要分为三种类型。第一种类型如图 1-8 所示。一个绕组的上层、下层线棒端的鼻部，将两线棒的多股实心导线分别弯曲，用银焊焊在一起，构成两线棒实心导线电的通路。鼻端两线棒的空心导线抽出向同一方向弯曲，各

自焊在一起后,放入各自的水接头盒内封焊,然后将两个水接头通过一段铜管连至三通接头,构成空心导线电的通路,三通接头再经绝缘引水管接至水母管。这类水电连接(水电合一水接头)的特点是,结构简单可靠、易于装配和检修。

第二种类型如图 1-9 所示。绕组上层、下层线棒鼻端通过导电并头套把两线棒的空心与实心导线一起套住,套内线棒间用导电的斜楔楔紧,保持电的良好通路。每根线棒的端头伸出并头套外,伸进各自的水接头盒(导水并头套)进行封焊。两个线棒的水接头各自经绝缘引水管接至进或出水母管。这种水电连接的特点是:水、电完全分家,水接头完全不导电,接头部位的股线不会发生不填实问题,运行中断股的可能性基本不存在。

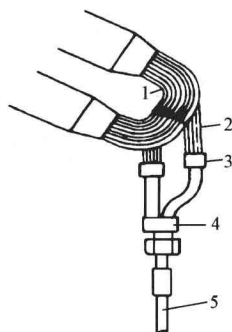


图 1-8 第一种类型定子绕组水电接头图

1—实心导线; 2—空心导线; 3—水接头;
4—三通接头; 5—绝缘引水管

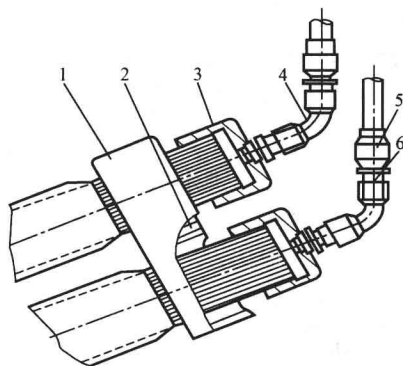


图 1-9 第二种类型定子绕组水电接头图

1—导电并头套; 2—导电楔块; 3—水接头盒;
4、5、6—接头零件

第三种类型如图 1-10 所示。水电并头套(水套)上除焊有与引水管连接的接头外,还焊有一组长短依次排列的导电片。每根线棒空心 and 实心导线分成两排,中间填放一块斜楔,并排放进水电并头套内,楔紧后焊封。焊在水电并头套上的导电片,经弯曲与另一根线棒端的并头套上的导电片逐一焊接成电的通路。这种水电接头具有轴向长度短、焊接简单、嵌线后装配方便等优点。但水接头焊接工艺要求高,加热后用银或锡焊接,严防内孔堵塞。

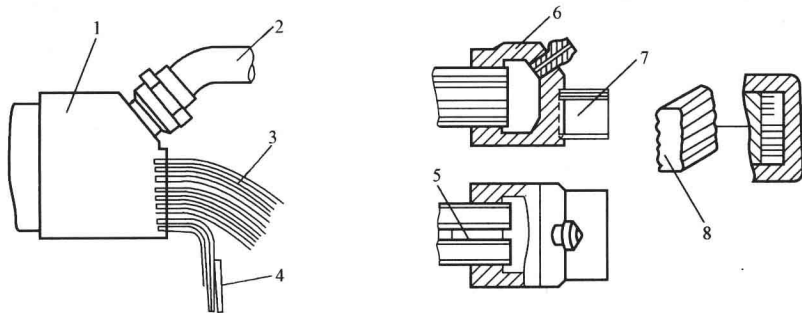


图 1-10 第三种类型定子绕组水电接头图

1—水电并头套(水套); 2—引水管; 3—导电片(钢排);
4—搭焊; 5—斜楔; 6—水套; 7—导电片; 8—斜楔

二、转子

转子主要由转轴、转子绕组、护环、中心环、阻尼绕组等部件组成。