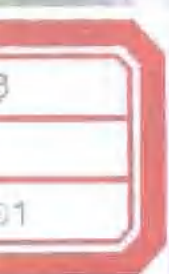


600MW 火电机组运行技术丛书

600MW HUO DIAN JI ZU YUN XING JI SHU CONG SHU

电气分册

中国华东电力集团公司科学技术委员会 编著



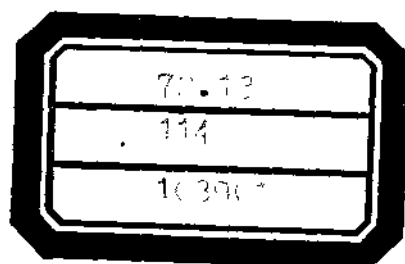
中国电力出版社

www.cepp.com.cn

600MW 火电机组运行技术丛书

电气分册

中国华东电力集团公司科学技术委员会 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《600MW 火电机组运行技术丛书》之一,着重阐述运行技术。书中除较详尽地介绍与分析 600MW 机组投入运行以来出现过的异常情况和改进措施外,还对其突出的几个问题进行了分析和论述。例如:发电机定子绕组端部的防振、氢气湿度问题;特殊性能考核试验问题;大机组和大电网协调运行中进相运行、不对称运行、快速励磁、轴系扭振和确保厂用电供电可靠性等问题。

本书可作为从事 600MW 发电机组电气安装、运行、调试和维修人员的培训教材,也可作为从事 300~600MW 火力发电机组工作的电气人员、电力工程技术人员、管理干部和大专院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气分册/中国华东电力集团公司科学技术委员会
编著. —北京:中国电力出版社, 1999. 11

(600MW 火电机组运行技术丛书)

ISBN 7-5083-0135-8

I. 发… II. 中… III. 气轮发电机-机组-电气设备 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 43838 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>)

北京梨园印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 6 月第一版 2000 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 248 千字

印数 0001—5160 册 定价 21.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《600MW 火电机组运行技术丛书》

编 审 委 员 会

主 任	刘维烈		
副 主 任	许国新	张 谦	吴大卫
委 员	(按姓氏笔画排列)		
	王忠庆	王惠挺	邓国柱
	叶新福	乐长义	冯亚民
	朱建跃	刘崇和	杨新村
	李一新	邵关兴	沈佩华
	张立人	罗光华	金留根
	周新雅	赵 津	赵永源
	赵耀钟	茹 欣	施韵和
	徐惠兴	唐伯仁	程黎明

分 册 主 编 人 员

锅 炉 分 册	乐长义	周新雅
汽轮机分册	唐伯仁	邵关兴
电 气 分 册	施韵和	杨新村
仪 控 分 册	赵 津	冯亚民

序

20 世纪 80 年代,我国改革开放步伐加快,集资办电政策出台,华东电网发展面临新机遇,建设 6 台 600MW 火电机组,正此一时期之产物。1989 年 11 月,平圩电厂首台 600MW 机组投产,此后三年,北仑电厂、石洞口二厂和平圩电厂 4 台 600MW 机组相继投入运行,约占同期华东电网新增发电容量之四成,三省一市用电获益匪浅。1994 年 10 月,北仑电厂 2 号机组投产。至此,华东电网拥有 600MW 火电机组 6 台,为当时国内电网所罕见。

上述 600MW 火电机组中,装于安徽淮南平圩电厂之两台机组系哈尔滨三大动力设备厂引进美国 CE 公司和西屋公司技术制造;位于浙江宁波之北仑电厂 1 号机组由美国 CE 公司和日本东芝公司提供锅炉和汽轮发电机,2 号机组则由加拿大 B&W 公司和法国 ALSTHOM 公司供货;上海华能石洞口第二发电厂两台超临界机组之锅炉由 CE-SULZER 联合制造,汽轮发电机系瑞士 ABB 公司生产。总体而言,平圩电厂引进型机组技术相当国外 70 年代水平;北仑电厂进口机组相当国外 80 年代初水平;石洞口二厂进口超临界机组相当国外 80 年代中期水平。此类机组投产,使我国火电机组运行技术水平步入新境界。

600MW 火电机组加盟,推动华东电网 500kV 主网架之建设和发展,并对 500kV 电网安全稳定运行,起举足轻重之作用。600MW 机组之良好调峰性能和效率指标,更为华东电网优质经济运行,注入有利因素。因此,各方对其寄予厚望,不时倾心关注。600MW 机组投产初期,设备不够稳定,缺陷故障频发,三电厂进行大量工作,先后完成 110 项技术改进措施。华东电力集团公司 1993 年 9 月专门召开 600MW 机组技术研讨会,交流经验,提出对策,确立 38 项技术攻关课题。通过电厂和有关单位共同努力,机组状况有所改善,逐步达到稳发满发。上述 600MW 机组等效可用系数逐年上升,最高者如石洞口二厂 2 号机组近 3 年平均值已达 94%;强迫停运率逐年下降,半数机组近 3 年平均值皆小于 1%。在此期间,吾人克服重重困难,逐步积累 600MW 火电机组有关运行经验。毋庸讳言,某些事故教训亦予深刻汲取。

20 世纪 90 年代,我国经济飞速发展,电力建设步伐明显加快,电网装机容量迅猛扩大,600MW 火电机组已成跨省电网新建电厂之首选机型,华北、东北和山东电网先后开工建设 600MW 级火电机组。为加速其安装和调试进程,1995 年电力工业部领导曾要求华东电网遴选专家协同作战。鉴于电力建设已推行业主负责制,设备通过招标选定,监理根据合同进驻。华东专家对前期工作一无所知,唐突介入,不得要领,冒昧陈言,难以奏效。闻讯不胜惶恐,遂恳请免于成行,代之以书面总结华东 600MW 火电机组运行经验教训,供兄弟网省电力公司参考,或能起“协同作战”之类似作用。此议获部领导理解并首肯。《600MW 火电机组运行技术丛书》得以问世,其源盖出于此。

华东电网上述 600MW 火电机组分布于两省一市之三座电厂,投资主体多元、建设条件有别,设备情况各异,运行时间不一,如何“书面总结”,一时颇费踌躇。所幸三电厂领导

深谋远虑，鼎力支持，承诺提供人员资料，促其实现；中国电力出版社领导高瞻远瞩，慧眼独具，慨允丛书纳入重点计划，优先安排出版；华东电力试验研究院领导深明大义，玉成此事，惠许为专家著述提供方便；集团公司科学技术委员会倍感责无旁贷，义无反顾地表态承担组稿、编写和审查重任。六方共襄盛举，“丛书工程”终于启动。

经过充分酝酿，1996年9月，华东电力集团公司科技委在沪召开丛书编写大纲审查会，电厂领导及中国电力出版社编辑与会。考虑篇幅庞大及600MW火电机组特点，决定按锅炉、汽轮机、电气和仪控专业分册出版。会议审查通过丛书各分册编写大纲，落实分册主编及电厂参编人员，并就组建丛书编审委员会取得一致意见。会后编写工作正式开始。1997年5月中旬，汽轮机分册率先脱稿，即进行体例和术语等审校，嗣后电气、仪控和锅炉分册相继于同年6月、7月和8月中旬交稿。俟体例等审校完成，修改形成初稿，9月科技委发文将其送交三电厂初审，11月底收齐反馈意见，分册主编据以修改形成二稿。1998年1~3月，科技委组织集团公司专家二审，并对部分内容进行调整。5月将修改稿寄中国电力出版社征求意见。7月，丛书编审委员会在沪召开，对书稿进行三审，中国电力出版社编辑与会指导。会后分册主编根据二审意见修订润色，精绘图表，以利付梓。1998年10~12月，各分册三审修订稿陆续寄往中国电力出版社。专家笔耕不辍，审阅斧正有方，主编锲而不舍，督办穷催不怠，寒暑两易，书稿乃成。

丛书冠以“运行技术”，特色不言自明。为切实把握主题，各分册篇目设置划一。第一篇介绍设备概况。考虑集团公司技术委员会（科技委前身）1993年7月曾编写出版《华东电网三台600MW机组技术特点比较》技术报告，凡32万字，流传甚广。为免丛书与报告或拟议出版之类似书籍重复，介绍尽量从简，以阐明设备状况为度。读者若感不足，可参阅上述报告。第二篇讲述设备调试和运行，立意出于调试为运行之基础，运行乃调试之验证，两者相辅相成，不可或缺。丛书不以基建生产划线，重在研讨运行技术。第三篇介绍调试和运行中出现之问题及改进措施，其要义为实事求是。暴露运行问题不避其丑，说明改进措施不厌其详，旨在使国内筹建或在建之600MW级机组单位有所借鉴。第四篇统列全过程管理，其精髓有二：一为通过运行实践检验机组建设全过程，为确保质量提高效益之应兴应革；二为立足科技进步，探讨应用新技术提高机组运行水平，其前瞻性论述必将予人以新启迪。

丛书篇幅浩瀚，总字数逾180万字，按专业分册出版，便于阅读。然某些共性专题必须妥善安排，方能避免零散、雷同或遗漏。如化学水处理系统，机电炉均应涉及，为免重复，锅炉分册设章集中说明，其他分册不再赘述。可靠性管理覆盖全部设备，分册叙述，难以获得整体概念。遂决定汽轮机分册专设一章分析，机组可靠性数据全部纳入，俾便专业人员集中查觅。机组乃一整体，设备关联极多，仪控系统尤甚。分册出版，事出有因。读者阅读中，若能相互参照，多作印证，弥缝其阙，融会贯通，定会收举一反三之效。

书稿甫成，阅后思绪起伏，忆及当年往事，感慨良深。择其要者列后，以竭愚夫千虑。

华东600MW火电机组运行初期出现之问题，部分由于缺乏经验所致，然多数应在可以防范之列，症结即强化设备全过程管理。丛书各分册所以设专篇重点论述，寓意即在于此。我国基建自成体系，由于部门分割，生产人员前期较少介入，及至进入生产准备，眼见

“木已成舟”。审查设计者鲜闻承担运行责任，负责运行者难能选择适用设备。推行全过程管理阻力重重，步履维艰，一言难尽！所幸近年建设项目实施业主负责制，权、责、利统一格局之确立，为推行全过程管理奠定基础。可以预期，对设备质量效能在建设全过程中实施严格有序之控制，我国新建 600MW 级火电机组自投产之日起定会稳定运行，并取得良好经济效益。

600MW 火电机组仪控系统日趋完善，对安全经济运行之重要性已不亚于机电炉等本体。丛书设分册专论仪控，即基于此种考虑。华东机组早期发生之若干问题，部分由仪控系统缺陷引起，经过改进和加强管理，仪控系统备受运行人员信赖，巡回抄表重负顿释。孰料竟导致个别电厂一度疏于运行分析，计算机自动打印之报表，成卷束之高阁，无人问津，以致身历险境而不觉，几陷“拼设备”之泥沼。事故警示吾人，“保设备”仍为电厂天职。即使自动化程度提高，选取仪控系统提供之数据，强化各级人员运行分析，依然是机组安全经济运行重要和可靠之保证。

进口机组落户中国，烧国产设计煤种，用当地合格水源，正常运行，应无大碍。岂料部分机组竟会“水土不服”，当初并未领悟，以致付出不小代价。我国长期处于短缺经济环境，煤炭历来供应紧张，饥不择食，烧“百家煤”已成我国电站锅炉无可奈何之陋习。600MW 机组投产初期未能免俗，煤种依然多变，造成不少严重后果，甚至成为事故诱因。痛定思痛，严格燃用设计煤种，掺烧需经试验论证，已列为事故重要反措。水汽品质长期不受重视，为抢进度，每置之于不顾，且基于中小机组建立之化学技术监督标准偏低，600MW 机组初期因此蒙受一定损失。华东电力集团公司有鉴于此，1993 年紧急制订若干规定，方才扭转颓势。此中教训，足为后来者戒！

600MW 进口机组合同基本引用国际或外国先进技术标准，理应据此安装、调试和运行。建设初期，对此尚有争论。吾人惯用国标、崇尚规程，发现问题，难与外方取得一致。通过长期磨合，逐步形成共识。掌握外国标准，联系中国实际，方能立于不败之地。诚然，引用先进技术标准，难能一蹴而就，既有一认识过程，亦要创造外部条件。如 600MW 机组检修，初仍沿用国内规程，每年 2 次小修，3 年一大修为循环。后经石洞口二厂试行按国外检修模式分 A、B、C、D 四级，延长检修间隔，经济效益显著。集团公司认为条件具备，1994 年开始向华东电网全部 600MW 机组推广，现已达 6 年一循环，使国际先进标准终于植根华夏大地。

进口国外发电设备，既要引进先进技术，更要引进现代化管理，否则将影响机组运行水平之提高。600MW 火电机组采用计算机集中控制，每台设机电炉合一之全能值班员 1 人，与目前国内大机组机电炉分设 3 人之“控制集中”模式大相径庭。解决办法应为强化专业培训，提高人员素质，适应全能上岗要求，断非退而求其次，误入歧途，徒增干扰。往昔对引进现代化管理认识不足，谬以为沿用老办法亦能“管好”600MW 机组，实践证明此路不通。其结果不外安全水平低下，经济效益不高，事倍而功半。1992 年能源部“新厂新办法”政策出台，引起各级领导警觉。此前所作所为，已经难于挽回。华东 600MW 机组电厂，由于建厂时间不同，受历史条件限制，引进现代化管理程度迥异，早期厂人员数倍于后建厂，即为明证。正在建厂者，可不慎欤？

综上所述,600MW 火电机组的问世,决非机组容量之简单增大,实隐含量变引起质变之某种飞跃。面对新生事物,症结依然为认识和观念之转变。倘能用全新理念,高屋建瓴地思考和处理问题,机组运行水平定将提高,并日臻完美境地。丛书虽以论述运行技术为本,然字里行间无不蕴涵“取人之长,为我所用”之基本思路,切盼读者理解其实质而发扬光大。

丛书编写过程中,平圩、北仑和石洞口二厂领导给予大力支持,电厂参编人员提供宝贵素材或撰写部分章节;分册主编抽暇辛勤笔耕,不遗余力,使丛书得以如期问世;审阅人员一丝不苟,直陈所见,使丛书内容增色不少;中国电力出版社编辑不辞辛苦,两次南下,指导编审工作有序进行;华东电力试验研究院领导关注丛书进程,为编印出人出力,使书稿终成正果。在此,谨向他们表示衷心之感谢!丛书倘能为我国正在筹建、建设和运行之 600MW 级火电机组有关人士提供实用信息,全体编审人员将不胜欣慰。由于时间仓促,经验不足,地域局限,丛书谬误欠妥之处在所难免,尚祈读者不吝指教。

中国华东电力集团公司
科学技术委员会主任

刘雍烈

1998 年 12 月于上海

电气分册前言

自平圩电厂 1989 年 11 月投产第一台国产引进型 600MW 机组以来,北仑电厂与华能石洞口二厂相继投产了几台 600MW 机组,到 1994 年 10 月为止,华东电力系统共有六台 600MW 机组运行,分为四种类型。这四种发电机在铁芯、绕组结构、紧固隔振、通风冷却、密封方式、励磁方式以及氢、油、水系统,监测系统等方面,都反映了国际上主要先进工业国家的技术类型与特点。三个电厂投运的主变压器、高压配电装置以及厂用电系统也大致代表了国际上技术发展的主流方向。

本分册着重于“运行技术”的阐述,对华东电网前阶段投产的六台 600MW 机组进行了机组特性和运行经验方面的总结,希望能对今后建设的大型电站专业人员起抛砖引玉的作用。为此,除较详尽地介绍与分析 600MW 机组投入运行以来出现过的异常情况和改进措施外,还对其突出的几个问题进行了分析和论述,例如发电机定子绕组端部的防振、氢气湿度问题、特殊的性能考核试验以及大机组和大电网协调运行中进相运行、不对称运行、快速励磁、轴系扭振和确保厂用电供电可靠性等问题。

本书由施韵和、杨新村主编。北仑电厂章慧娟、姚子麟,平圩电厂董功俊、陆明智、叶宪华,石洞口二厂张立人、浦美林等同志为本书提供详尽资料并参与部分章节编写工作。本书第一、五、八章,第十章第四节,第十一章一、三节,由施韵和编写;第三章第一节,第四章,第六章一~五节,第十章一、二节,由董功俊、陆明智和叶宪华编写;第二章三、四节,第六章六、七节,第七章第一节和第十章第三节,由张立人、浦美林编写;第九章三、四节,由杨新村编写。本书的水氢油系统和系统扰动与发电机轴系扭振两节由倪安华同志供稿。全书由施韵和、杨新村统稿。本书初稿经罗光华同志和三个电厂电气专业工程师审阅并提出宝贵意见,谨此表示感谢。

本书编写过程中曾参考或引用了哈尔滨电机厂 600MW 机组考核试验资料,华东电网和国内大机组专业会议有关资料,有关电机制造厂和研究室的多种汇编资料、译文以及平圩电厂、北仑电厂、石洞口二厂运行规程与设备说明书有关内容,在此一并表示感谢。

编 者

1999 年 10 月

目 录

序

电气分册前言

第一篇 发电设备概况

第一章 汽轮发电机本体	1
第一节 发电机定子结构	1
第二节 发电机定子绕组	4
第三节 定子测温系统和监测装置	7
第四节 发电机转子结构	9
第五节 发电机冷却系统	10
第六节 密封油系统	19
第二章 发电机励磁系统	23
第一节 对大型发电机励磁系统的要求	23
第二节 600MW 机组励磁系统	24
第三节 自动励磁调节器	29
第四节 电力系统稳定器	37
第三章 变压器及高压配电装置	39
第一节 主变压器的技术特点	39
第二节 500kV 全封闭配电装置	45
第三节 高压断路器	50
第四章 发电机组保安电源系统	55
第一节 UPS 系统的基本构成及在发电厂中的应用	55
第二节 柴油发电机组	60

第二篇 发电厂电气部分的运行和调试

第五章 发电机的运行和调试	63
第一节 发电机的启动与调试	63
第二节 励磁系统及回路调试	70
第三节 发电机运行的 $P-Q$ 曲线	72
第四节 运行参数的变化和控制	74
第六章 变压器及高压配电装置的运行和调试	77
第一节 变压器的并网和调试	77
第二节 变压器的正常运行监视及分接头调整	78
第三节 变压器的并联运行	81
第四节 变压器的油质监测	84
第五节 变压器的试验	86

第七章 电气主接线特点及运行中出现的问题	90
第八章 发电机的特殊运行方式	94
第一节 发电机的进相运行	94
第二节 发电机的不对称运行	100
第三节 发电机的失磁和异步运行	103
第四节 系统扰动与发电机组轴系扭振	106
第三篇 运行中的问题及改进措施	
第九章 发电机及励磁系统运行异常情况	111
第一节 绝缘系统的事故	111
第二节 铁芯损伤事例分析	114
第三节 氢、油、水系统的异常情况	115
第四节 励磁系统及自动励磁调节器的异常情况	123
第十章 电力系统及配电装置的异常事例及分析	127
第一节 变压器的异常现象及处理	127
第二节 厂用变压器常见故障及反事故对策	130
第三节 高压配电装置的故障及其分析	136
第四节 厂用电系统运行异常情况分析 and 反事故对策	138
第四篇 电气设备的全过程管理	
第十一章 开展全过程管理应用新技术	142
第一节 全过程管理的意义	142
第二节 应用诊断新技术提高设备检修水平	143
第三节 建立设备的微机管理数据库	147
附录 设备特性及设备规范	148
附表 1 发电机特性及设备规范	148
附表 2 发电机氢、油、水系统特点比较	150
附表 3 励磁系统特性和设备规范	151
参考文献	154

发电设备概况

第一章 汽轮发电机本体

汽轮发电机主要是由一个不动的定子(包括机座、端盖、发电机绕组、冷却器、运行监测系统)和一个可以转动的转子(包括转子铁芯、绕组、集电环等主要部件)构成的,现分别做一介绍。

第一节 发电机定子结构

一、机座和端盖

汽轮发电机的机座和端盖既是机械上的主要支撑,又是风路系统的主要组成部分,其构件也是整个发电机所有部件中尺寸最大的,机座要通过端盖支承转子质量。氢冷发电机的机座又要能承受氢气爆炸时的压力,要能满足强度和振动的要求。

机座是由钢板焊接而成,机壳和铁芯背部空间是发电机通风系统的一部分,它的结构和气流方向是按通风系统要求设计的。氢冷发电机的氢气冷却器直放或卧放在机座内。整个机座既要满足防爆和密封的要求,还要满足振动的要求。机座的固有振动频率随基础支承刚度的不同而变化。对机座进行设计时,要减少垂直方向的振动、定子铁芯双频振动引起的共振和突然短路时扭矩的影响。按其振动频率,机座可分为刚性机座和柔性机座两种,前者的第一阶固有频率高于运行频率,后者则相反。由于机座和端盖本身是极为复杂的焊接结构件,人为因素多,边界条件也不很明确,因而不同部位的强度和刚度有明显的差异,也就是说不同部位的固有频率有明显差别,如果处理不当会成为振动的主要来源。

例如平圩电厂发电机机座由高强度优质钢板装焊而成,焊后在高温炉内作加热退火处理,消除应力。机座外壳是由4段圆筒焊成,每个圆筒都是由整张钢板滚制而成。焊成后经过2.5倍额定工作氢压的水压试验(约为1.29MPa)。机座内部的骨架由幅向隔板以及钢管构成。

二、定子铁芯、端部结构和隔振装置

1. 定子铁芯

定子铁芯是固定了绕组的部件又是发电机主要磁路的通道,是集机、电、磁于一体的发电机构件。它的质量和损耗在发电机的总质量和总损耗中占有很大比例。一般大型发电机定子铁芯质量为电机总质量的30%,铁耗为总损耗的15%左右。所以发电机铁芯要求由导磁率高、损耗小的优质冷轧硅钢片叠压而成。单张硅钢片冲成扇形,内圆冲有嵌放线圈的槽,沿轴向方向分段叠压。为了满足通风冷却的要求,轴向分成若干档,构成通风孔,在发电机通

风系统中构成通路。叠装的铁芯两端由两个整体铸造的反磁性压圈加上定位筋螺杆，与穿心螺杆压装成一体。

整体的铁芯要满足一定强度和刚度的要求。铁芯的结构强度通过在加压条件下叠压铁芯冲片以及在所有工况下保持这一压力来获得，这点在铁芯两端尤其显得重要。如果压力不足，交变轴向电磁力作用于齿部，可使松动叠片疲劳断裂，损坏的铁芯碎片又会损坏线棒绝缘或铁芯叠片绝缘；若压力太高，也会损坏铁芯冲片的绝缘层，一般轴向压力取 $0.14 \sim 0.20 \text{MPa}$ 。

为了降低铁芯损耗，要着重考虑减少绕组端部漏磁和铁芯轭部漏磁在构件中产生的环流。环流不仅增加损耗，有时还会由此导致局部过热进而使材质劣化。若不采取措施，600MW 发电机定位筋电流可达 1500A 的数量级，切向筋可达 3500A 的数量级，所以要有可靠的绝缘措施。

华东电力系统几台 600MW 机组铁芯装配分别介绍如下：

(1) 平圩电厂（引进西屋技术）机组定子铁芯由三部分组成：主体铁芯、端部阶梯段和磁屏蔽部分。整个铁芯采用高导磁率、低损耗的 0.45mm 厚的扇形硅钢冲片叠装而成，冲片上涂有耐高温的磷酸铝无机绝缘漆，该漆在高于发电机运行温度几倍时仍能保持良好的绝缘性能。定子铁芯的轴向坚固由定位螺杆 9 及 42 根高强度无磁钢绝缘穿心螺杆 8 以及齿压板 7 和分块铁芯压板 1 来实现。穿心螺杆的紧固，经液压拉伸器拉伸后再紧定螺帽，使铁芯受压均匀，铁芯轴向压力为 0.137MPa 。铁芯的径向紧固通过机座内的夹紧环与整体铁芯上的定位螺杆焊接达到（夹紧环用于加强铁芯的刚度），然后与机座的隔振构件相连。在齿压板外侧设有硅钢片叠成的磁屏蔽 10，其内圆表面为阶梯形多齿表面，可以有效地分导定子端部漏磁通，在磁屏蔽外侧有无磁性钢分块压板，以使端部轴向漏磁通改变为径向磁通，从而大部分进入磁屏蔽而不进入主铁芯。定子铁芯结构如图 1-1 所示。

(2) 北仑电厂 2 号发电机（GEC 阿尔斯通技术）铁芯结构见图 1-2 和图 1-3。与平圩电厂有所区别，例如北仑电厂 2 号发电机铁芯硅钢片通过燕尾槽定位在键棒 4 上，铁芯 1 两端有指压板 7 和压板 6 通过穿心螺杆紧固成一体，铁芯键棒与支撑环焊接，通过纵向弹簧板（图 1-3 中 2）共 32 根、框架腹板 3（图 1-3）固定到机壳，共 22 个固定点，以防止铁芯在正常运行或事故中产生的振动传递到支座系统。

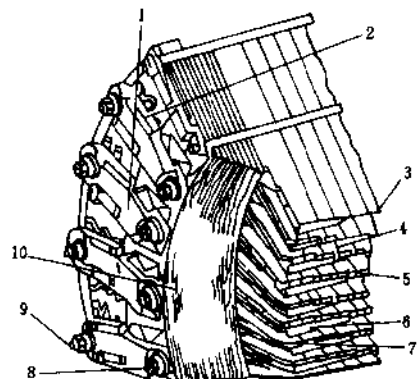


图 1-1 定子铁芯结构（平圩电厂）

1—分块铁芯压板；2—线圈支架安装面；3—齿部；4—通风道；5—定子铁芯冲片；6—线圈槽；7—齿压板；8—穿心螺杆；9—定位螺杆；10—端部磁屏蔽

2. 定子端部结构

端部的发热和损耗在大型发电机中是制约发电机出力的重要因素。当发电机的单机容量提高时，线负荷提高。转子磁场或定、转子合成磁场在端部的漏磁将取道磁阻最小路径，即通过定子压圈、压指和端部最边段铁芯。这个轴向的磁通会在压圈上产生较大的涡流，导致发热。

因此对漏磁场必须加以限制，并使端部发热得到充分的冷却。压板采用无磁性铸钢，在定子铁芯设计有效长度以外，仍然用导磁性能较好的硅钢片粘结压制成分梯形，有意将大部分轴向磁通转变为径向磁通，并分散在整个阶梯段上，这就是磁屏蔽。做成阶梯的目的是扩大端部铁芯内径，增加定转子气隙，加强端部铁芯的冷却，从而减少损耗。有时设置阻止轴向磁通进入端部铁

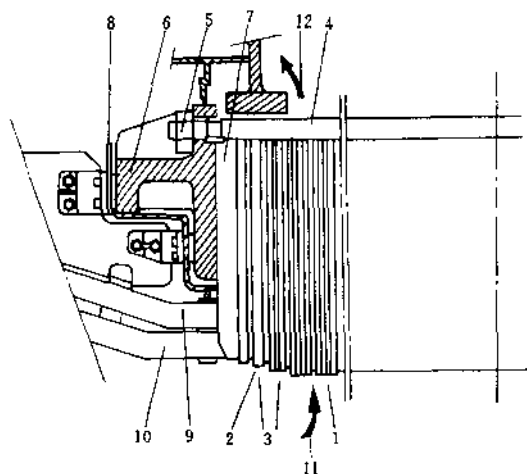


图 1-2 北仑电厂 2 号发电机铁芯结构图 (一)
1—铁芯；2—通风道；3—梯级叠片；4—键棒；5—螺母；
6—压圈；7—指压板；8—电屏蔽；9—下层线棒；
10—上层线棒；11—冷气进口；12—热汽出口

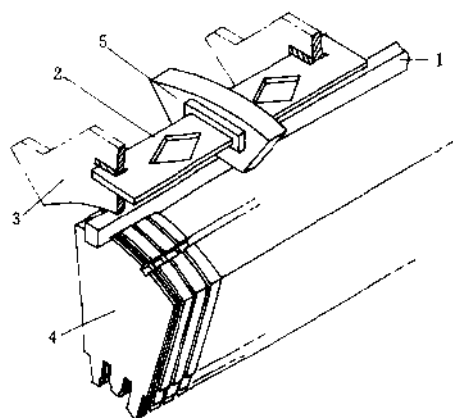


图 1-3 北仑电厂 2 号发电机铁芯结构图 (二)
1—定位键；2—弹簧板；3—框架腹板；
4—铁芯；5—活动腹板

芯的电屏蔽，利用电屏蔽的涡流阻止漏磁分散开，可防止压圈局部出现高温和过热现象。BBC 公司试验表明，这些措施可使大容量发电机叠片压圈温升几乎与本体铁芯温升一样，因此几台 600MW 机组都采取了以上类似措施。

3. 隔振装置

整体的发电机铁芯与机座的连接，既要固定支撑铁芯，又要将电磁力矩（包括事故状态，即突然短路及非同期合闸产生的冲击力矩）传递到机座并有效地隔离铁芯的径向磁振，使得最终传到机座或基础的铁芯振动小于某一规定值，因而也必须具有隔振装置的功能。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。平圩电厂（引进西屋技术型机组）就属于这种结构，定子弹性支撑结构如图 1-4 所示，连接定子铁芯的燕尾定位筋焊在机座内的 8 个夹紧环上，夹紧环和机座之间用 T-1 型钢板（弹簧钢板）装焊在机座隔板上，构成定子铁芯与机座之间弹簧板式隔振装置（定子弹性支撑），见图 1-4。每个夹紧环上装 2 块弹簧板，24 块弹簧板分别布置在夹紧环的两侧和底部，设计隔振系数为 $1/20$ ，可使定子铁芯传到机座和基础的倍频振动减到很小，同时铁芯受到严格的约束可以承受住负荷和短路扭矩。

现今公认最简单的隔振型式乃是卧式结构的，北仑电厂 1 号发电机和石洞口第二电厂（以下简称石洞口二厂）的机组都属此类结构，石洞口二厂的发电机铁芯装配方式如图 1-5 所示。在石洞口二厂发电机组上定子扇形硅钢片通过燕尾定位筋导向叠装，轴向分段压紧，由有预应力的穿心螺杆通过无磁性压圈把铁芯锁紧形成一个整体铁芯；燕尾定位筋是由螺栓 6 固定到铝键 3 上，铝键与机壳腹板焊接固

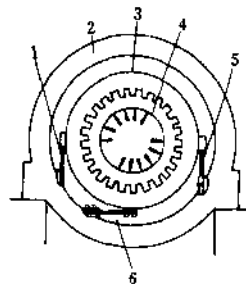


图 1-4 定子弹性支撑结构

1—弹性构件；2—定子机座；
3—定子铁芯；4—转子；
5—弹性构件；6—稳定构件

定，由柔性的铝键吸收振动，降低了传递到机座和基础的振动、噪声。考虑到不让感应电流形成回路，铝键和壳体齐平并与压圈绝缘。这种卧式的隔振装置结构简单，运行效果好。

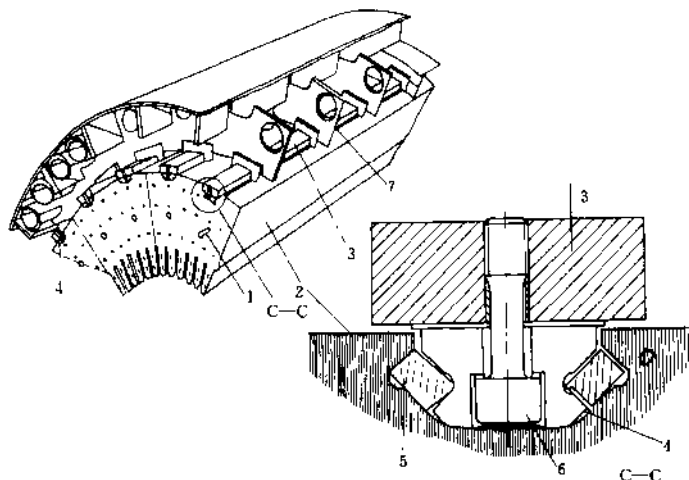


图 1-15 石洞口二厂发电机铁芯装配方式

1—穿心螺杆；2—铁芯；3—铝键；4—燕尾定位筋；5—斜楔；
6—螺栓；7—机壳腹板；C—C—铁芯与铝键固定断面图

第二节 发电机定子绕组

一、定子绕组结构

发电机定子绕组是由许多定子线棒连接而成的，每个线棒用铜线制造成型后包以绝缘。一根线棒分为直线部分和两个端接部分。直线部分放在槽内，它是切割磁力线感应电动势的有效边，端线按绕组接线型式有规律地连接起来。

华东电力系统前述三个电厂的 600MW 机组定子绕组为水内冷型，绕组内部直接通水冷却，因此一根线棒，既是电的回路又是水的回路，每根定子线棒的铜线分为两排（或数排），每排又分成若干组，每组由实心铜线与通水空心铜线组成。600MW 机组上下层线棒截面不相等，上层线棒面积大于下层线棒，多一组铜线，以减少线棒内总损耗。例如北仑电厂定子上层线棒电流密度为 $8.38\text{A}/\text{mm}^2$ ，下层为 $10\text{A}/\text{mm}^2$ ，绝缘厚度为 4.6mm ；而平圩电厂上层线棒电流密度为 $8.95\text{A}/\text{mm}^2$ ，下层线棒电流密度为 $11.206\text{A}/\text{mm}^2$ ，绝缘厚度为 6.35mm 。

二、换位

由导体涡流损耗及各股铜线环流损耗组成的绕组附加损耗，可通过正确换位来减少和消除，600MW 机组一般采取 540° 换位或再加空换位，线棒的股线在三段范围内分作 180° 扭转，即总共扭转一圈半，线棒股线从一端到达另一端，其位置就会上、下相反，这样在两侧的端线部分，由横向互感磁场和径向磁场所感生的电动势就全部抵消了。但端部横向自感磁场的作用依然存在，这种换位方式的突出优点是端部股线不需要任何换位，就能部分地削弱端部漏磁场的作用，槽部径向、横向磁场的作用也完全被抵消。

三、定子线棒的槽放电和防晕结构

大型发电机由于电流大、电压高，在电机结构上都采取了一些措施，以防止槽放电。

现今线棒绝缘都是采用“热固性”环氧云母结构，在热态下膨胀系数也很小。由于线棒和槽壁之间的气隙，使涂有防晕层的线棒和槽壁间不能紧密接触，两者之间电位差增大，当场强超过某一数值，就会形成防晕层与槽壁之间的高能量电容性放电，产生高热。空气电离产生的臭氧 O_3 和氮及氮的化合物 (N_2O 、 NO 、 N_2O_2 等) 与气隙内水分起化学作用对绝缘材料形成热、机械、化学损伤。而长期被腐蚀的线棒起晕电压逐渐降低，造成恶性循环，最后绝缘表面被腐蚀，导致绝缘降低，严重时会在运行中发生绝缘击穿事故。

为了防止槽放电，首先线棒要有合理的防晕结构，其次线棒在槽内的固定要采取特别措施。线棒在槽内除了由气隙造成的电容性放电外，运行中的线棒还由于受到每秒钟交变 100 次的径向电磁力作用而发生振动，若上、下层线棒没有压紧，由此发生振动将会引起防晕层磨损，致使线棒表面和槽壁之间失去接触从而加剧槽放电现象。所以线棒在槽内径向方向要压紧，线棒侧面与槽壁要紧密接触减少电位差。为此大型发电机槽内结构也采取各种相应措施；以北仑电厂 2 号机为例（其线棒固定方式如图 1-6 所示），下层线棒靠近槽底部表面设有热固树脂衬垫（半导体），直接成型在线圈底部，以确保线圈和铁芯接触压力均匀，上、下层线棒之间隔有绝缘垫条，槽侧面插入半导体弹性波纹板（以下简称波纹板），其幅度压缩至必要的尺寸，并配以侧面楔作为切向固定，在径向压紧线棒的槽楔取用楔形结构，在关门槽楔下也有弹性波纹板。为允许机组运行中由于冷热膨胀线棒轴向能自由伸缩，大型发电机组温度若达 $70^\circ C$ 时线棒可伸长 2mm，所以在波纹板下还有滑移层。现在还有一种先

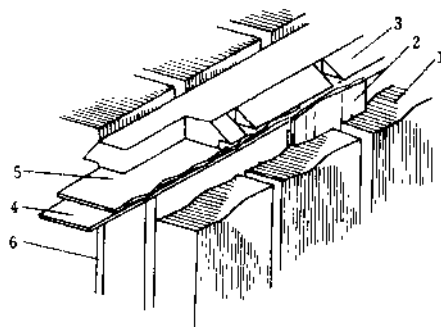


图 1-6 线棒固定方式

1—铁芯；2—侧面楔；3—槽楔；4—楔条；
5—弹性波纹板；6—线棒

进的波纹板三槽楔固定法，特别制造一种半导体弹性波纹板，安装在楔下和侧面。嵌制槽隙有两种做法，一种是每隔 4~5 段铁芯设计一段扩槽（比正常槽宽 3~4mm），以便线棒嵌入后，加入带坡度的双向波纹板；另一种是将 0.5~0.9mm 厚的半导体波形弹簧板打入线棒与槽壁之间的间隙，使波纹板幅度由 5mm 压缩至 0.9~1.5mm，全槽内均安装波纹板。

四、定子绕组端部固定

随着发电机容量的增大，作用在定子绕组端部的电磁力也急剧增强。因此，定子绕组端部固定的强度问题，在突然短路的强大过渡电磁力下和在正常运行时较小的交变电磁振动下都显得更为突出。端部的固定在径向、切向既要具有承受突然短路时电磁力的足够强度，也要防止倍频振动引起共振造成的绝缘磨损。另外，考虑到铁芯和线棒热膨胀系数不一样，所以在轴向要有伸缩的弹性固定结构。大容量发电机绕组端部热胀冷缩之差可达 0.5~1.5mm，如果端头固定死，就会产生 4.00~12.00MPa 的压应力。近年来，在大容量发电机端部绕组固定措施中，主要倾向是尽可能将垫料及紧固件均由高强度绝缘材料压制而成，以避免使用金属材料。早期的发电机端部采用刚性结构，现已发展到用刚柔相结合的结构。华东电力系统几台 600MW 机组的设计就是按此要求配置的。

例如平圩电厂发电机组端部结构属刚柔 II 型结构，在径向、切向上刚度很大，而在轴向具有良好的弹性，当温度变化时，端部绕组可沿轴向自由伸缩，有效地减缓绕组绝缘中产生的机械应力，但其结构复杂、工艺质量要求高。平圩电厂发电机定子绕组端部结构如图 1-7 所示。整

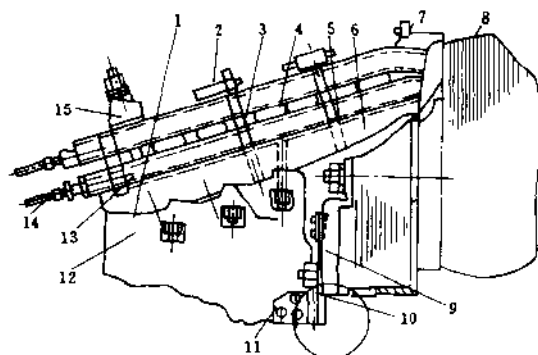


图 1-7 平圩电厂发电机定子绕组端部结构图

1—适形材料；2—调整绑环；3—调整绑环的绑带；4—支撑软管；5—适形材料；6—锥形环；7—气隙隔环；8—绝缘环；9—铁芯分块压板；10—弹簧板；11—支架压板；12—绝缘支架；13—下层线棒；14—引水软管；15—内撑环；

锥形环与小撑环间设有滑移层以减少摩擦阻力，锥形环的外圆周与 21 个幅向均匀分布的绝缘支架固定在一起，而绝缘支架则通过支架压板与反磁弹簧板相连接，弹簧板的另一端则与定子铁芯分块压板固定在一起形成柔性连接结构。这种刚性—柔性连接结构在径、切方向上刚度很大，而在轴向具有良好的弹性，当温度变

个定子绕组端部内侧面两道径向可调节的调整绑环、线棒上下层之间有充胶支撑管，下层线棒靠在环氧玻璃纤维绕制的整体锥形支撑环（以下简称锥形环）上，在下层线棒与锥形环间有适形材料，通过径向螺栓调节收紧，使内撑环、中间充胶支撑环、线棒、外部锥形环形成牢固的整体，保证了径向、切向方向的刚度要求。线棒鼻端则用垫块、支撑块和玻璃布带绑扎成沿圆周呈环状的整体，使径向、切向也具有刚性结构。而锥形环近铁芯侧前端的齿形部分搭接在铁芯端部的小撑环上，锥形环与小撑环间设有滑移层以减少摩擦阻力，锥形环的外圆周与 21 个幅向均匀分布的绝缘支架固定在一起，而绝缘支架则通过支架

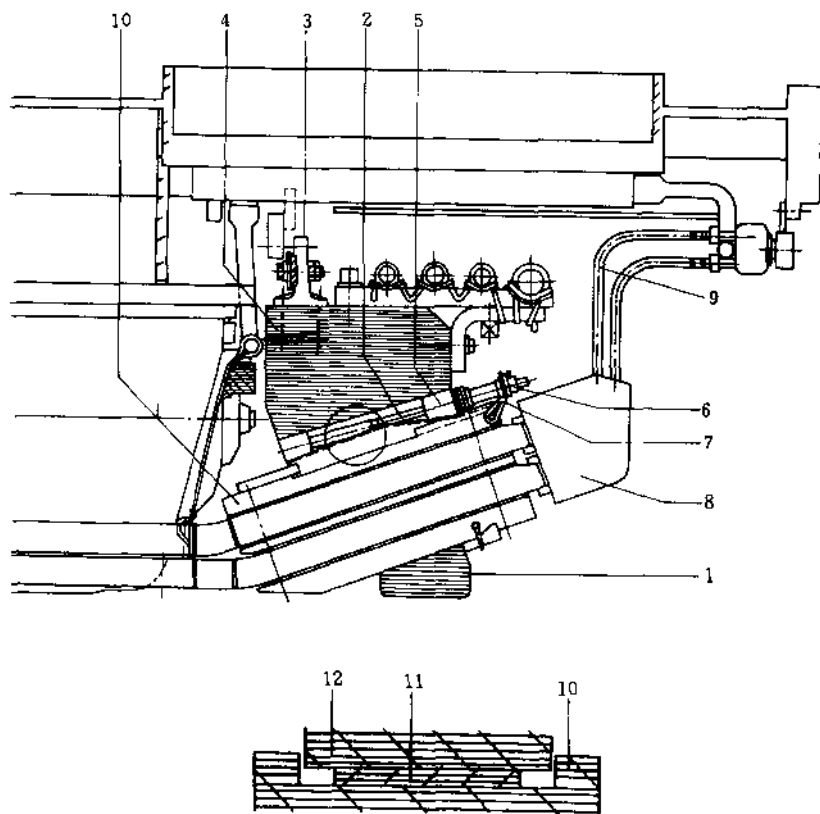


图 1-8 石洞口二厂发电机定子绕组端部结构图

1—内撑环；2—楔块；3—固定环；4—外撑环；5—楔块；6—调节螺杆；7—玻璃绑带；8—护套；9—聚四氟乙烯管子；10—间隔块；11—间隔；12—中心楔