

全国火力发电工人通用培训教材

电气试验

高级工

山西省电力工业局 编

安全第一 预防为主

中国电力出版社

华北水利水电学院图书馆

TM621



S1300-3

全国火力发电厂运行值班员培训教材

208559255

电 气 试 验

高级工

山西省电力工业局 编



中国电力出版社

· · · 855925

内 容 提 要

本书是《全国火力发电工人通用培训教材》之一，主要介绍电气试验高级工应知知识和应会技能。全书共分六章，包括电气设备的特性试验、电气特性参数测量、高压电网的系统试验、电气设备在线监测技术、电气设备的故障分析和试验数据处理。每一章都讲述基本理论知识和试验方法，附有插图和各类复习题，并特别介绍了一些新的电气测试技术。

本书可作为发电、供用电和电力建设等部门从事电气设备的绝缘性能、电气特性和参数测量的高级电气试验工培训教材，也可作为有关工人自学教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气试验：高级工/山西省电力工业局编，-北京：中国电力出版社，(1998 重印)

全国火力发电工人通用培训教材

ISBN 7-80125-216-0

I. 电… II. 山… III. 火电厂-电气设备-试验-技术培训-教材 N. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 01752 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 5 月第一版 1999 年 7 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 11.5 印张 248 千字

印数 8611—11610 册 定价 13.00 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)

努力搞好教材建設
為提高電業職工
素質服務

史大楨
丁巳年春

全国火力发电工人通用培训教材
编 审 委 员 会

名 誉 主 任：卞学海

主 任：刘润来

常务副主任：郭连邦

副 主 任：程忠智 李宝祺 曹德声

贺至刚 张克让 王靖中

金明轩 刘治国 顾希衍

程纪奎 杨定鑫 刘玉柱

刘向东 王文杰

委 员：阎刘生 陈懋龙 贾 诚

王清文 王解新 梁秀生

燕福龙 刘宇平 张建国

王扁桃 曹保林 王 震

周 新 郭林虎 乔文普

马家斌

办 公 室 主 任：杨定鑫（兼）

办 公 室 副 主 任：刘向东 乔文普

马家斌 郭林虎

办 公 室 工 作 人 员：曹 璘 王荣辉

序

《全国火力发电工人通用培训教材》出版、发行了，这是电力职工培训工作的一件大事。

工人技术培训教材建设，是搞好培训、提高人员素质、直接为生产服务的一项重要基础工作。电力工业部领导对电力职工队伍的培训和教材建设非常重视，多次为之做过重要指示。

关于电力工人培训教材建设工作，多年来我部取得了较大的成绩，得到了劳动部的肯定。由原水利电力部组织、山西省电力工业局编写、原水利电力出版社出版的《火电生产类学徒工初级工培训教材》和《火电生产类中级工培训教材》已发行、使用 10 余年，并多次重印，基本上满足了电力行业火力发电工人培训、考核、提高技术水平的需要，有力地促进了培训工作的开展。在 1987 年全国电力普及读物评优中，这两套培训教材荣获了“普及电力科学技术知识特别奖”。

但是，随着我国电力工业技术装备的不断更新和技术水平的不断提高，对电业生产人员的素质相应地提出了更高的要求。此外，由于劳动、培训制度改革的不深化，关于工人培训教育的思想、方法和手段也发生了深刻变化。为适应这一新情况、新需要，进一步加强电力工人培训教材的建设，有必要对原编写的两套培训教材进行修订和增补。为此，决定由山西省电力工业局重新编写《全国火力发电工人通用培训教材》。这套新编的培训教材业经中电联教培部组织审定，

作为全国火力发电工人通用的培训教材，由中国电力出版社出版、发行。

《全国火力发电工人通用培训教材》具有相当的权威性。首先，这套培训教材的编写依据，是电力工业部、劳动部颁发的《中华人民共和国工人技术等级标准·电力工业·火力发电部分》和中电联教培部《关于电力工人培训教材建设的意见》，以及有关电业生产、建设的技术规程、规范。无论是在内容的取舍上，还是在深度的把握上，这套教材都是按以上国家标准和部颁规程、规范的要求来进行的。

其次，这套培训教材从总体设计上来讲，思路是清晰的，指导思想是正确的。教材的编写突破了传统的学校教科书模式，注意按照工人培训的特点和规律，安排教学内容，即强调实用性，并且“以工种立目，以岗位立篇”。与每一个专业工种对应的初、中、高三个分册在内容上是阶梯式递进的，互不重复或不简单重复。这些思路都是超前的、可行的，符合中电联教培部《关于电力工人培训教材建设工作的意见》的精神。

再有，这套培训教材的编写、出版力量都是相当强的。其作者是山西省电力系统中技术上比较权威的专家，有相当丰富的培训工作经验，基本上能够代表全国电力系统的技术力量水平。作为全国首批认定的15家优秀出版社之一的电力出版社，无论在编辑力量和水平上，还是在出版质量上，都是国内一流的。对于这套培训教材，出版社领导亲自挂帅，组织了20余人的编辑班子，精心策划，全面指导，精雕细刻，因此，其质量是高的。

《全国火力发电工人通用培训教材》的另一个特点是实用性较强。一方面，这套培训教材是从生产实际需要和工人实

际水平出发，进行设计、编写的。为了使教材更具有针对性，更加实用，我们做了大量的前期工作，对电力系统的人员结构、整体素质进行过调查和认真分析。这套培训教材不仅适用于具有初中及以上文化程度、没有经过系统专业培训的电力生产人员，而且对于现场的工程技术人员，也是有参考价值的。另一方面，这套培训教材以培养工人实际能力为重点，以提高工人操作技能为主线，教材中所提供的“知识”是为“技能”服务的，因而增强了教材的实用性，使经过培训的工人能较快运用所学的知识 and 掌握的技能，指导或改进所从事的生产实践。

此外，这套培训教材图文并茂，通俗易懂，好学好用，特别适合于工人学习。

当然，《全国火力发电工人通用培训教材》所反映的是普遍适用的主要内容。各单位在使用过程中，只要结合本单位的设备、工艺特点和人员素质的实际情况，在内容上做适当的补充和调整，便可有针对性地对本单位职工开展培训。

《全国火力发电工人通用培训教材》是《全国电力工人公用类培训教材》的延伸，两套培训教材要配合使用。这些培训教材的出版，必将对我国电力职工培训工作的有效开展和“九五”期间电力职工素质的提高，产生积极而深远的影响。

中国电力企业联合会教育培训部

1996 年 12 月

前 言

由原水利电力部组织、山西省电力工业局编写、原水利电力出版社出版的《火电生产类学徒工初级工培训教材》和《火电生产类中级工培训教材》，发行、使用已历时 10 余年。其间，《学徒工初级工》各分册分别重印 5 至 9 次，《中级工》各分册分别重印 4 至 7 次，发行量很大，深受全国电力系统广大读者的欢迎，基本上满足了电力行业火力发电工人培训、考核、提高技术水平的要求，取得了显著的社会效益。为此，这两套培训丛书在全国电力普及读物评优中，荣获了“普及电力科学技术知识特别奖”。

10 余年来，由于改革开放的不断深入发展，我国的电力工业有了很大的发展，现已普遍进入大机组、大电网、高参数、超高参数、高电压、超高电压和高度自动化的发展阶段，对电业生产人员的素质提出了更高的要求。继 1991 年 12 月原能源部颁发的《电力工人技术等级标准》之后，1995 年 9 月电力工业部、劳动部又颁发了《中华人民共和国工人技术等级标准·电力工业·火力发电部分》。因此有必要根据电力生产的新情况和电力工人技术等级标准的新要求，对上述两套培训教材进行修订并增补高级工培训教材。经山西省电力工业局和中国电力出版社通力合作，并在全中国电力工人技术教育研究所的支持下，现编写、出版了这套《全国火力发电工人通用培训教材》。本套丛书的内容覆盖了火力发电 16 个专业对初、中、高级工的技术要求，每个专业分初级工、中级工、高级工三个分册出版，共计 48 个分册；每一分册中又

以各专业的不同岗位工种设“篇”，共覆盖了40余个工种。

在编写本套丛书的过程中，首先根据工人技术等级标准中对每一工种的定义、工作内容、技术等级、适用范围等的规定，紧扣标准提出的知识要求和技能要求，从火电生产实际需要出发拟出初步的编写提纲；经数月重点调查研究、广泛征求意见、认真修订后形成正式的编写提纲；之后，又历时半年余，始成初稿。初稿形成后，在局系统内进行了专家审稿和主编者的修改、统稿工作。因此，定稿后的火力发电工人培训教材，深信是紧扣新的工人技术等级标准的实用性教材。

火力发电工人培训教材，体现了工人技术培训的特点以及理论联系实际的原则，尽量反映了新技术、新设备、新工艺、新材料、新经验和新方法；教材以300MW机组及其辅机为主，兼顾600MW和200MW机组及其辅机的内容，因而有相当的先进性和普遍适用性，适应于“九五”期间主要机型的技术要求。与每一专业对应的初、中、高级工三个分册，自成一个小的系列，呈阶梯式递进，内容上互不重复。每一分册的具体内容又分为核心内容和复习题两大部分。核心内容主要讲解必备知识以及与技能要求对应的一些专业知识。复习题的形式多种多样，解答习题的目的在于巩固和深化所学知识。有些习题，如操作题、读绘图题、设计试验题等，主要用以培养和巩固必备的技能。鉴于全国电力系统各基层单位、部门培训力量和师资水平并不平衡，学员水平也参差不齐，所以有必要为每一分册编写相应的《教材使用说明和习题解答》，这将在本套丛书出版后陆续推出。

本分册是《电气试验》高级工培训教材，由罗国祥、王道绵、陈国元、楼鸿祥、吕润余、吉晓波、穆广祺编写。全

书由罗国祥主编，王道绵主审。

在中电联教培部为本套培训教材组织的审定会议上，本书由北京供电局郭桂际高级工程师、顾兆正高级工程师和天津大港发电厂姜作发同志审定，并被推荐为全国火力发电工人通用培训教材。

在编写这套《全国火力发电工人通用培训教材》的过程中，得到了电力工业部领导的关怀以及中电联教培部和各有关司局的关心、支持，同时也取得了全国电力系统各有关单位和人员的关注、支持和帮助，他们为本书进行了审定，提供了咨询、技术资料以及许多宝贵的建议，在此一并表示衷心的感谢。

各单位和广大读者在使用本套教材过程中，如发现有不妥之处或需修改的意见，敬请随时函告，以便再版时修改。

山西省电力工业局 中国电力出版社

1996年11月

目 录

序

前 言

第一章 电气设备的特性试验	1
第一节 发电机的特性试验	1
第二节 大型变压器的特殊试验	45
第三节 电容式电压互感器 CVT 的试验	77
第四节 断路器及 GIS 有关试验	80
复习题	90
第二章 电气特性参数测量	98
第一节 接地装置工频电气参数测量	98
第二节 线路参数测量	108
第三节 电压分布及测量	125
第四节 污秽测量	130
第五节 线路故障探测	136
第六节 电容电流测量及消弧线圈的调整	147
第七节 谐波测量	159
复习题	172
第三章 高压电网的系统试验	176
第一节 零起升压试验	178
第二节 投、切空载变压器试验	185
第三节 投、切空载线路试验	196
第四节 投、切电容器组试验	204
第五节 投、切电抗器组试验	213
第六节 人工接地试验	222

第七节 超高压输电系统特殊试验项目简介	228
复习题	233
第四章 电气设备绝缘在线监测技术	238
第一节 绝缘诊断技术的发展	238
第二节 绝缘监测的参数	247
第三节 变电设备的带电试验	254
复习题	281
第五章 电气设备的故障分析	287
第一节 发电机定子绝缘故障分析	287
第二节 大型变压器绝缘事故分析	290
第三节 电容型套管及电流互感器绝缘故障分析	296
第四节 断路器故障分析	301
第五节 电压互感器故障分析	306
第六节 避雷器故障分析	310
复习题	313
第六章 试验数据处理	318
第一节 误差理论	318
第二节 数理统计在试验中的应用	328
第三节 试验数据表示法	340
第四节 试验设计	342
复习题	345
后记	李振生

第一章 电气设备的特性试验

第一节 发电机的特性试验

一、发电机的温升试验

(一) 温升试验的目的及有关基本知识

1. 温升试验的目的

发电机在运行时，本身要消耗一部分能量。这部分能量包括机械损耗、铁芯损耗、铜损耗和附加损耗等。这些损耗基本上都变成热能，使发电机各部分的温度升高。因此，在发电机中均采用冷却系统进行冷却，以使各部分的温度不超过相应部件或材料的容许温度，如果超过容许温度，将使这些部件或绝缘材料老化、损坏，影响发电机的安全运行。所以在发电机带负荷运行时，控制其各部分的温度在允许范围内，是保证发电机长期安全稳定运行的重要条件。

发电机的温升试验，就是在发电机带负荷运行情况下，测量其各种电量和各部分的温升，通过试验达到如下目的。

(1) 发电机在额定状态运行时，确定其额定负荷能力。

(2) 为发电机提供运行限额图。

(3) 测量发电机各部分的温度分布，确定发电机的温度分布特性。

(4) 测量定子绕组的绝缘温降，研究绝缘温降所反映的绝缘老化状况。

(5) 了解发电机定子、转子在不同负荷时的温升情况。

(6) 掌握发电机巡测装置及其它有关仪表的指示数值与带电测量的定子绕组平均铜温的差别。

总之,通过试验要达到对运行机组的温升情况心中有数,以确保其长期安全稳定经济运行。

2. 发电机的允许温度

发电机各部分的允许温度,应以制造厂提供的数据为依据。如无此依据时,可按照发电机的绝缘等级与冷却方式执行我国的国家标准。

发电机额定工况运行时,B级绝缘的允许温度、温升,分别见表1-1、1-2,F级绝缘的允许温升见GB755—81《电机基本技术要求》。

表 1-1 空气冷却或氢气间接冷却发电机的允许温升

发电机的部件	温度测量位置 和测量方法	冷 却 方 法		冷却介质为 40℃时的允 许温升(℃)
定子绕组	槽内上、下层 绕组间埋置检温 计法	空气冷却		80
		氢 气 冷 却 压 力 (Pa)	$1.5 \times 9.8 \times 10^4$ 及以下	80
			$2.0 \times 9.8 \times 10^4$	75
			$3.0 \times 9.8 \times 10^4$	70
			$4.0 \times 9.8 \times 10^4$	65
	电阻法 (包括带电测温)	空气冷却		80
		氢气冷却		80
转子绕组	电阻法	空气冷却		90
		氢气冷却		85

续表

发电机的部件	温度测量位置 和测量方法	冷 却 方 法	冷却介质为 40℃时的允许 温升(℃)
定子铁芯	埋置检温计法		80
集电环	温度计法		80
不与绕组接 触的铁芯及其 它部件	这些部件的允许温升,在任何情况下不应达到使绕组、或 邻近的任何部位的绝缘、或其它材料有损坏的危险		

注 摘自 GB7064—86《汽轮发电机通用技术条件》。

表 1-2 氢气和直接冷却发电机的允许温度

发电机的部件 或冷却介质	温度测量位置 和测量方法	冷 却 方 法		允许温度 (℃)
在直接冷却有 效部分出口处的 冷却介质	检温计法	水冷却		85
		氢气冷却		110
定子绕组	槽内上、下层 绕组间埋置检温 计法			120
定子铁芯	埋置检温计法			120
转子绕组	温度计法 (出口处)	水冷却		85
	电阻法	氢气冷却转子 全长上径向出风 区的数目	1~2	100
			3~4	105
			5~7	110
			8及以上	115
不与绕组接触 的铁芯及其它部 分	这些部件的允许温度,在任何情况下不应达到使绕组、或 邻近的任何部位的绝缘或其它材料有损坏的危险			
集电环	温度计法			120

注 摘自 GB7064—86《汽轮发电机通用技术条件》。

表 1-1 和表 1-2 的允许温度仅适用于额定工况，当发电机的运行点偏离额定电压和频率时，发电机的温升和温度将会逐渐超过规定值。

3. 发电机的温升

发电机各部分的温度与冷却介质的温度及各种损耗有关。一般情况下，各种温升与相应的损耗成正比。当发电机的转速为恒定时，其机械损耗也恒定，而铁芯损耗和铜损耗则分别与电压和电流的平方成正比。因此，定子、转子绕组和定子铁芯的温度可分别如下表示

定子绕组铜温为

$$\begin{aligned}\theta_{sCu} = \theta_0 + \Delta\theta_m + \Delta\theta_{FeN} \left(\frac{U_s}{U_N} \right)^2 \\ + \Delta\theta_{CuN} \left(\frac{I_s}{I_N} \right)^2 + \Delta\theta_{iN} \left(\frac{I_s}{I_N} \right)^2\end{aligned}\quad (1-1)$$

转子绕组铜温为

$$\theta_{iCu} = \theta_0 + \Delta\theta_{iN} \left(\frac{I_1}{I_{iN}} \right)^2 \quad (1-2)$$

定子铁芯温度为

$$\theta_{sFe} = \theta_0 + \Delta\theta_m + \Delta\theta_{FeN} \left(\frac{U_s}{U_N} \right)^2 + \Delta\theta_{CuN} \left(\frac{I_s}{I_N} \right)^2 \quad (1-3)$$

式中 θ_0 ——冷却介质的入口平均温度，℃；

$\Delta\theta_m$ ——额定转速下机械损耗引起的温升，℃；

$\Delta\theta_{FeN}$ ——额定电压下，铁芯损耗在定子铁芯中引起的温升，℃；

$\Delta\theta_{CuN}$ ——额定电流下，铜损耗在定子绕组中引起的温