

全国火力发电工人通用培训

电 气 试 验

中 级 工

山西省电力工业局 编

中 国 电 力 出 版 社

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、培训制度改革不断深化，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和掌握的技能，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率。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》中级工培训教材，由山西省电力试验研究所罗国祥、胡晓岑编写，罗国祥任主编，并由山西

省电力试验研究所王道绵主审。

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、顾兆正高级工程师，天津大港发电厂姜作发审定，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 电介质的基本知识	1
第一节 电介质的电导	3
第二节 电介质的极化	11
第三节 电介质的损耗	18
第四节 电介质的击穿	27
复习题	60
第二章 高压电气设备的绝缘	64
第一节 概述	64
第二节 汽轮发电机的绝缘结构	72
第三节 变压器的绝缘结构	83
第四节 断路器的结构与绝缘	94
复习题	101
第三章 电气设备的绝缘试验	104
第一节 概述	104
第二节 介质损耗因数的试验	110
第三节 交流耐压试验	132
复习题	155
第四章 电气设备的特性试验	158
第一节 发电机的特性与参数试验	158
第二节 变压器的检查和特性试验	217
第三节 断路器的特性试验	262

复习题	275
第五章 绝缘油的试验	279
第一节 概述	279
第二节 电气性能试验	286
第三节 气相色谱分析法	290
复习题	305
第六章 过电压和绝缘配合知识	307
第一节 概述	307
第二节 过电压保护装置	310
第三节 电力系统绝缘配合知识	341
复习题	357
后 记	李振生

•

第一章 电介质的基本知识

为了保证电气设备的安全可靠运行，定期进行设备绝缘的预防性试验是十分必要的。通过测量绝缘电阻、泄漏电流、介质损耗因数等非破坏性试验，以及必要时的交流耐压试验，能够及时发现和检查出设备绝缘的缺陷，进行检修处理，防止事故的发生。因此，我们需要了解电气设备绝缘（电介质）的极化、电导、损耗和击穿等特性，以便提高试验水平，保证试验质量。

图 1-1 为直流电压下电介质中电流随时间变化规律。由图可见，当直流电压加于电介质两端时，电路中的电流将随着时间的增长而衰减，最后趋于一个稳定的数值。

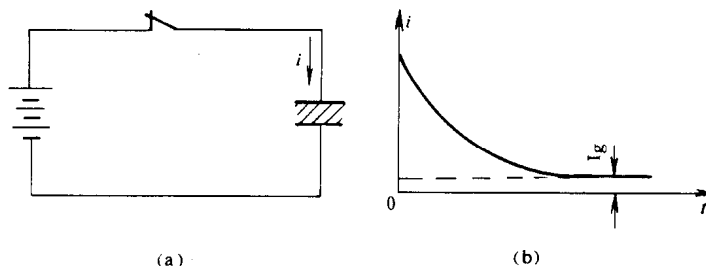


图 1-1 直流电压下电介质中电流随时间变化规律

(a) 实际电路；(b) 电流随时间的衰减曲线

我们可以用图 1-2 所示的电介质等值电路来代替图 1-1 的实际电路。在图 1-2 中，电介质用三个并联的支路表示，即反映电介质绝缘电阻的 R 支路，反映电介质几何电容的 C 。

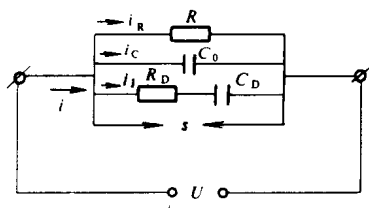


图 1-2 电介质的等值电路

个支路电流是电容电流 i_C 、吸收电流 i_j 和泄漏（电导）电流 i_R ，则

$$i = i_C + i_j + i_R$$

在直流电压作用下，三个支路电流随时间变化的规律是不一样的，其变化曲线见图 1-3。

电容电流 i_C 是由于电介质的几何尺寸等因素所引起的，也称为充电电流。由于充电过程很短，电容电流很快衰减到零。

吸收电流 i_j 是由于缓慢的极化过程所引起的。由于极化过程时间较长，吸收电流衰减得较电容电流慢。

泄漏电流（电导电流） i_R 是由电介质中少数束缚很弱的电子和离子在电场作用下，做有规律的定向运动引起的。泄漏电流的大小只决定于电介质的电导率 γ ，而与加压时间无关，为一个恒定不变的值。

支路，反映电介质吸收特性的 R_D-C_D 支路。另外，还有反映电介质击穿特性的 s 支路。

当加上直流电压以后，电路的总电流 i 为三个支路电流的总和。这三个

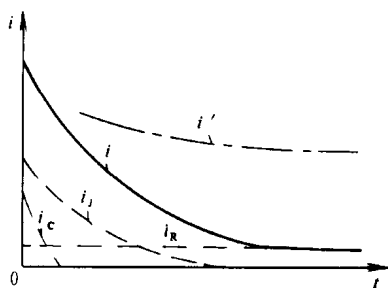


图 1-3 直流电压下电介质中各支路电流变化曲线

当电气设备绝缘没有受潮，且表面又很清洁时，泄漏电流 i_R 很小，吸收电流 i_j 衰减较慢，总电流为图中曲线 i 所示。如果电介质受潮、脏污，有局部缺陷或变质劣化，那么泄漏电流 i_R 将会显著增大，吸收电流 i_j 加速衰减，使电路总电流 i' 变化平缓，如图 1-3 中曲线 i' 所示。利用电介质的这些特性，可以采用合适的试验方法来判断绝缘状况。

第一节 电介质的电导

实际的绝缘材料不可能绝对不导电。在外电场作用下，电介质中总是有一些带电质点（主要是离子）沿着电场方向运动而形成电流，这就是泄漏电流。因此，电介质的绝缘电阻与泄漏电流的关系是

$$R = U/I_R \quad (1-1)$$

式中 U ——外加电压；

I_R ——泄漏电流。

绝缘材料中，气体电介质（如空气、 SF_6 等）和液体电介质（如变压器油、电容器油等）的电导不是主要问题，本节只对固体电介质（如云母、电瓷、纸等）的电导进行介绍。

一、体积电导与表面电导

固体电介质在外加电场作用下，除了有通过绝缘体本身（内部）的泄漏电流以外，还有沿着绝缘表面的泄漏电流流过。所以，任何固体绝缘体都有一定的电导，可分为体积电导和表面电导两种。电导的大小可以用电导率 γ 或电阻率 ρ 表示，它们互为倒数关系，即 $\rho = 1/\gamma$ 。

1. 体积电阻和表面电阻的计算

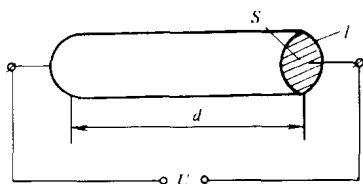


图 1-1 计算电导用圆柱绝缘体

如图 1-4 所示的一个圆柱形绝缘体，其周长为 l ，截面积为 S ，长为 d 。现在分别计算它的体积电阻和表面电阻。

体积电阻 R_v 与绝缘体的尺寸有关，计算公式

$$R_v = \rho_v d / S \quad (1-2)$$

式中： ρ_v 为体积电阻率。对各种不同的绝缘介质， ρ_v 的大小不一样。对于相同尺寸的绝缘体，其材料的电阻率愈大，体积电阻就愈大，泄漏电流愈小。

表面电阻 R_s 与绝缘体尺寸的关系是

$$R_s = \rho_s d / l \quad (1-3)$$

沿绝缘体表面的泄漏电流与绝缘体的沿面距离 d 和周长 l 有直接关系。周长愈长，沿面距离愈短，表面泄漏电流愈大，也就是表面电阻愈小。

式 (1-3) 中的表面电阻率 ρ_s 主要取决于绝缘体表面吸附水分的能力和表面水分的分布情况。在中性和弱极性电介质表面上，水滴与介质表面间的附着力小于水分子的内聚力，表面吸附的水分形成分散的水滴，并不构成连续的水膜。这种介质称为憎水性介质，它的表面电阻受潮气、水分的影响较小。正因为这样，电瓷表面要上釉；为防止污闪，绝缘子表面可以涂上硅油、石蜡。极性介质表面与水的附着力大于水滴本身的内聚力，吸附的水分能湿润整个绝缘体的表面，这

种介质为亲水性介质。它的表面易形成连续的水膜，再加上脏污和盐类物质，可使表面电阻显著下降。因此，用纸、布纤维制成的绝缘结构都要经过浸油或浸腊处理，并采取密封防潮措施。

2. 体积电阻和表面电阻的测量

体积电阻和表面电阻也可以通过测量求得。图 1-5 为测量电介质体积电阻的原理接线图。图中， R_v 为一个正方体试品，当在它的两个相对面上夹两个电极，加上电压 U 后，可以测出流过 R_v 的电流 I_v ，则

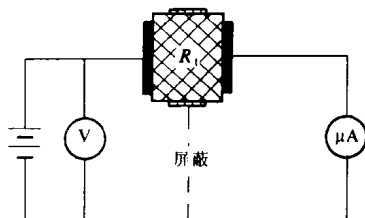


图 1-5 体积电阻测量原理接线图

$$R_v = U / I_v \quad (1-4)$$

式中 R_v ——体积电阻， $M\Omega$ ；

U ——外加试验电压，V；

I_v ——微安表读数， μA 。

体积电阻率为

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{n} \times 10^6 \quad (1-5)$$

式中 ρ_v ——体积电阻率， $\Omega \cdot cm$ ；

S ——电极的截面积， cm^2 ；

n ——试品的厚度，cm。

于是，可得到被试电介质的体积电导率

$$\gamma_v = 1 / \rho_v \quad (1-6)$$

式中 γ_v ——被试电介质的体积电导率， $(\Omega \cdot cm)^{-1}$ 。

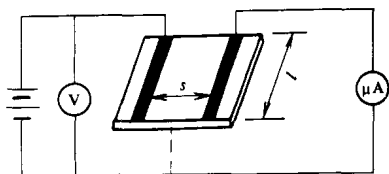


图 1-6 表面电阻测量原理接线图

图 1-6 为测量表面电阻的试验原理接线图。被试电介质表面设置两个平行电极，施加电压 U 后，可求得表面电阻

$$R_s = U/I_s \quad (1-7)$$

式中 R_s ——表面电阻， $M\Omega$ ；
 U ——外加试验电压， V ；
 I_s ——微安表读数， μA 。

则表面电阻率为

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{l}{s} 10^6 \quad (1-8)$$

式中 ρ_s ——试品表面电阻率， Ω ；
 l ——电极的长度， cm ；
 s ——电极间距离， cm 。

由式 (1-8) 可求得被试电介质表面电导率 γ_s [$(\Omega)^{-1}$]

$$\gamma_s = 1/\rho_s$$

二、固体电介质电导的特性

(一) 电导的分类

固体电介质的电导分为离子电导和电子电导两种。在弱电场作用下，绝大多数为离子电导，它是由电介质中所含杂质的离子和电介质本身分子电离所引起的；在强电场或光、射线作用下，固体电介质中的电子才可能被激发，形成电子电导或电子、离子混合电导。

(二) 电导与温度的关系

固体电介质的电导不仅与绝缘体的几何尺寸有关，而且