
电 气 试 验

初 级 工

山西省电力工业局 编

中 国 电 力 出 版 社

内 容 提 要

本书是《全国火力发电工人通用培训教材》之一，主要介绍电气试验初级工应知知识和应会技能。全书共分八章，包括电气设备绝缘试验基本概念，电气试验常用电工材料、仪器和仪表，交直流电压、电流和功率的测量，直流电阻的测量，绝缘电阻和吸收比的测量，泄漏电流和直流耐压试验，以及工频耐压试验。

本书可作为发电、供用电、电力建设等部门从事各种电气设备的绝缘性能、电气特性和参数测量的初级电气试验工培训及考核教材，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：初级工/山西省电力工业局编. -北京：中国电力出版社，1996

全国火力发电工人通用培训教材

ISBN 7-80125-151-2

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 (96) 第 10798 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)

北京市社科印刷厂印刷

各地新华书店经售

1996 年 12 月第一版 1996 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 5.75 印张 122 千字

印数 0001—5090 册 定价 6.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

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本层单位、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》初级工培训教材，由罗国祥、胡晓岑编写。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 电气设备绝缘试验基本概念	1
第一节 绝缘的预防性试验	1
第二节 电气试验中的测量知识	6
复习题	21
第二章 电气试验常用电工材料	23
第一节 导电材料	23
第二节 绝缘材料	29
第三节 磁性材料	36
复习题	38
第三章 电气试验常用仪器 and 仪表	40
第一节 电测量指示仪表的一般知识	40
第二节 万用表	47
第三节 兆欧表	54
第四节 直流电桥	58
第五节 QS ₁ 型交流电桥	64
第六节 测量用互感器	70
复习题	79
第四章 交直流电压、电流和功率的测量	81
第一节 电流的测量	81
第二节 电压的测量	85
第三节 功率的测量	93
复习题	101
第五章 直流电阻的测量	104

第一节 直流电阻测量的常用方法	105
第二节 电气设备直流电阻的测量	113
复习题	130
第六章 绝缘电阻和吸收比的测量	133
第一节 绝缘电阻的概念	133
第二节 电气设备绝缘电阻测量	136
复习题	142
第七章 泄漏电流和直流耐压试验	145
第一节 基本试验方法	145
第二节 电气设备的泄漏电流试验	149
复习题	160
第八章 工频耐压试验原理	162
复习题	166

第一章 电气设备绝缘

试验基本概念

第一节 绝缘的预防性试验

一、预防性试验的作用

在电力网中，主要的电气设备有发电机、电动机、变压器、断路器、隔离开关、避雷器、电容器、电力电缆和电压互感器、电流互感器等。这些设备都包括以下三大部分。

(1) 传送电流的导电部分，如发电机、变压器的绕组，断路器的触头和导电杆等。

(2) 隔离带电体的绝缘部分，如绕组的对地绝缘和匝间绝缘、断路器的瓷套管以及输电线路的对地绝缘（即绝缘子串）和相间绝缘（即空气）等。

(3) 其他辅助设备，如变压器的冷却装置、断路器的操动机构等。

电气设备绝缘的作用主要是用来使带电导体对地和其他部件隔离开来（对地绝缘），使具有相同电位的不同相带电导体隔离开来（相间绝缘），或者将具有不同电位的带电导体分隔开来（如高低压绕组之间的绝缘）。在运行中，如果电气设备的绝缘遭受破坏，导致击穿，就会造成电网的短路，发生设备的损坏或爆炸，甚至酿成电网大面积停电的严重事故。因此，保证电气设备的绝缘水平，对电力系统的安全可靠运行是至关重要的。

制造厂在生产电工产品时，是按照国家标准的规定进行制造的，能够保证产品具有足够的绝缘强度。但是，在制造过程中，如果要求不严、工艺不良、材质不好，往往可能在设备内部留下局部缺陷。

电气设备在投入电网运行以后，要承受各种工作条件的考验，如过电压、过电流、长期发热、电弧高温、机械力或电动力的作用，雨、雪、潮湿、脏污和化学污染等大气条件的影响。这些因素都可能造成电气设备绝缘内部产生缺陷，或者受潮、劣化，使绝缘的耐电强度降低，最终导致击穿损坏。绝缘的缺陷可以分为以下两大类。

(1) 集中性缺陷。如制造时留在绝缘内部的空气泡，运行中发生的局部受潮、局部过热或局部放电，由于机械力的作用产生的绝缘裂纹等。这类缺陷只影响绝缘的一部分。

(2) 分布性缺陷。如绝缘整体受潮、整体老化、污秽等。这类缺陷往往影响到整个绝缘水平。

如果绝缘内部存在着缺陷，就会和正常的绝缘不一样，也就是说，它的电气特性要发生相应的变化。缺陷的性质不同，电气特性变化也不同。因此，我们就可以采用各种电气试验方法，检测绝缘的电气特性，从试验结果来分析判断设备的绝缘状况，确定绝缘是否存在内部缺陷，是什么性质的缺陷。通过试验检出绝缘缺陷后，就能够对症下药，及时进行检修处理，或者更换新的设备，确保安全运行。

二、绝缘试验的方法

电气设备绝缘试验方法分为非破坏性试验和破坏性试验两类。

(一) 非破坏性试验

各种电气设备通常是在额定电压、额定电流、额定容量

以及正常环境条件下运行的。绝缘的非破坏性试验，则是对设备施加一个比工作电压低得多的试验电压，或者是用其他不会损坏绝缘的办法，来检测绝缘的各种特性，从而推断绝缘性能的好坏。这类试验方法包括测量绝缘电阻、泄漏电流试验、介质损失角正切（又称介质损耗因数） $\text{tg}\delta$ 值测量等。它的最大好处是试验本身不会造成绝缘的损伤。但是，由于所加的试验电压较低，试验结果并不能直接反映整个设备绝缘的电气性能，只能从大量的试验数据，进行综合分析，统计地说明绝缘的电气特性的变化情况和变化规律。例如，当绝缘受潮后，试验测得的 $\text{tg}\delta$ 值如果增大得很多，就可以认为绝缘有可能发生热击穿。

非破坏性试验很简便，且不会损坏绝缘，实践经验证明，它对绝缘状态的监督是行之有效的。目前正在研究和发展的电气设备绝缘的带电监测，是在设备正常运行电压下直接进行的，比传统的非破坏性试验所加的电压高，更符合实际，而且可以实现连续带电监测和微机控制与数据处理。

（二）破坏性试验

破坏性试验是指耐压试验，对设备所施加的试验电压比正常工作电压要高得多。例如，110kV 变压器，最大工作相电压有效值为 73kV，制造厂进行工频交流耐压试验时，所加的试验电压有效值为 200kV；若在现场进行工频交流耐压试验，则应加试验电压有效值为 180kV。可见，这类试验对电气设备绝缘的考验是非常严格的，它可以考核绝缘承受过电压的能力，保证设备具有一定的绝缘水平。

破坏性试验可以发现比较严重的集中性缺陷。但是，由于所加的试验电压高，有时会在试验过程中造成绝缘的击穿、损坏。因此，应对设备进行非破坏性试验合格后，最后进行

破坏性试验，若非破坏性试验已检出缺陷，必须先进行处理，以避免造成不必要的绝缘破坏。同时，破坏性试验比较复杂，尤其对电压等级较高的电气设备所需要的试验设备要求很高。因此，国家标准规定，对于 110kV 及以上的电气设备，不具备试验条件时，可以不做工频耐压试验。

三、试验标准

在制造厂，对于新产品或改进后的产品，必须进行型式试验。型式试验应按照国家标准 GB311-83《高压电气设备绝缘试验电压和试验方法》，以及该产品的有关国家标准和技术条件规定的项目、方法及标准进行。此外对每一台产品需进行出厂试验。

电气设备在安装前或过程中，除了应配合安装进行分部测试外，安装完工、投产带电之前，应进行电气设备绝缘的交接试验，各项试验合格后，才允许充电投运。交接试验通常由安装单位负责进行，运行部门验收。

为了保证电气设备投入运行以后的安全，应定期进行绝缘预防性试验，及时检出绝缘缺陷，加强设备绝缘状况的监督，防患于未然。绝缘的预防性试验通常安排在每年雷雨季节前，或者结合设备检修进行。这样，可以保证电气设备在雷雨、炎热季节安全可靠运行。此外，在每年的高峰负荷期之前，还应该对重点设备和发现有缺陷尚在监督运行的设备进行复试，掌握设备绝缘状况的变化。

电气设备绝缘的交接和预防性试验的项目、周期和标准，分别在国家标准 GB50150-91《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》和原水利电力部标准《电气设备预防性试验规程》中都作了详尽而明确的规定。试验人员应当认真学习、熟悉掌握这些标准，并严格贯彻执行。

由于各个单位的设备型式、规格及运行情况不尽相同,因此,通常可以结合具体情况,按照国家标准的要求,制定本单位电气设备绝缘试验的现场规程,经总工程师批准后执行。

四、高压电气试验的安全要求

为了保证试验质量,提高试验效率,安全地进行电气试验,必须在试验前做好一系列准备工作。应按照《电力工业技术管理法规》和《电气设备绝缘预防性试验规程》以及有关文件、指示,并根据本单位的具体设备情况,编制现场试验规程,明确试验项目、标准和周期。每年年底,编制出下年度全厂电气设备绝缘预防性试验计划,经总工程师批准后执行。试验开始前,应组织试验人员学习和讨论现场试验规程和其它有关规定、试验计划,做到心中明了。对试验所需的测试设备,应提前准备好,必要时应做核对性校验或检修。

进行高压试验,必须做好如下安全措施,以保证人身和设备的安全。

(1) 做每项试验,事先应有充分的思想准备,明确安全注意事项,参加试验的每个工作人员都应了解工作任务、安全措施和试验方法。

(2) 一切高压试验工作人员均应认真学习、严格遵守《电业安全工作规程》和有关高压试验的规定,并经考试合格后方可工作。

(3) 无论在现场或试验室进行高压试验工作,都必须有二名以上试验工参加,不准单人进行高压试验。

(4) 操作时,应严格按照操作程序和操作规程进行,操作时要戴线手套,特殊情况下应戴绝缘手套、穿绝缘鞋,或者站在绝缘台(垫)上。

(5) 试验工作负责人应负责现场一切设备安全和人身安

全，试验工作人员应服从工作负责人的指挥。加压试验时，必须得到工作负责人的命令，方准开始加压操作。

(6) 试验现场与带电设备和人行道之间，必须有足够的安全距离，试验现场周围要用红绳或红塑料带围起来，悬挂专用的安全警告牌。

(7) 试验用的接地线，必须接在固定的地线上，接触必须牢固可靠，不准随便挂在铁丝网或其他物体上。

(8) 试验时，思想应高度集中，时刻注视设备情况和表针指示的变化。如果遇到异常现象，应首先立即切断电源，停止试验，查明原因，正确处理，不准盲目地再次加压试验。

第二节 电气试验中的测量知识

在高压电气试验中，往往要对各种情况下的电气参量进行测量，如电压、电流、功率的测量，电阻、电感、电容的测量，长度、质量、速度的测量，等等。在电气试验的参量测量过程中，总是采用各种仪器仪表，把被测量与标准测量单位进行直接或间接的比较，从而得到我们所需要的测量结果。但是，在测量中，由于各种因素的影响，测量的结果不是绝对准确的，总是会产生不同程度的误差。为了保证测量结果的可信与可靠，就要采取不同的办法，将测量误差减小到所允许的程度。

一、测量的概念

测量是人们对自然界的客观事物取得数量概念的一种认识过程。在这一过程中，借助于专门的测量设备，通过试验方法，可求出以测量单位表示的被测量数值的大小。例如，在图 1-1 中，有一个电阻 R ，接到电源 E 上，我们要想知道流

过电阻 R 中的电流 I 有多大，可以在电流回路中接上一块电流表 A ，合上开关 SA ，就有电流 I 流过电流表，从电流表的读数，就能测量出流过电阻的电流有多少。

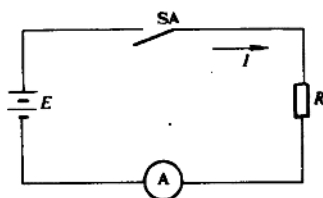


图 1-1 测量电路

测量分为绝对测量和相对测量。在电气试验中的测量都是相对测量，它是通过试验的方法，将被测量与作为单位的量进行比较的过程。通过测量得到的结果，通常是用数字表示的，这个数字就表示被测量为所用测量单位的多少倍。例如，在图 1-1 中，电流表的测量单位如果用安 [培] (A)，电流表的读数是 1.5，那么，被测量（电阻中流过的电流）就是 1.5A。电气试验的测量步骤如下。

(1) 准备阶段：首先要明确被测量的性质及测量所要达到的目的，然后选定测量方式，选择合适的测量方法及相应的测量仪器。例如，后面我们要介绍的发电机泄漏电流试验，这个试验中的被测量是发电机绕组的泄漏电流，测量的目的是要求得泄漏电流的大小，用以判断发电机绕组绝缘是否良好；测量方式是对绕组施加直流电压，直接测量泄漏电流；测量方法选择高压侧接微安表法；测量仪器可用静电电压表和微安表。

(2) 测量阶段：建立测量仪器所必须的测量条件，慎重地进行操作，认真记录测量数据。例如，在发电机泄漏电流试验中，首先需要完成正确的测量接线，按操作步骤要求，慎重地接通电源，升压，监测所加直流电压是否达到规定数值，然后记录下微安表的读数。

(3) 数据处理阶段：根据记录的数据，考虑测量条件的实际情况，求得测量结果和测量误差。例如，通过试验，记录下发电机绕组的泄漏电流，这个电流值是在试验时发电机实测温度下得到的。为了进行比较，对这个数据要进行处理，即温度换算，也就是采用一个温度换算公式，将试验温度下测得的泄漏电流值，换算到所需要的 75℃ 时的数值，然后，才能根据规程规定的标准，对试验结果进行分析、判断。

总之，我们要进行一项电气试验，通常必须考虑好以下几个方面：

- (1) 明确测量对象；
- (2) 选择合适的试验方式和测量方法；
- (3) 采用正确的试验接线；
- (4) 选择必需的测量仪器设备；
- (5) 安全、准确地进行操作和测量；
- (6) 进行必要的数据处理和分析判断。

二、测量中几个常用名词的意义

(1) 准确度。它有两个方面的含义。一是对测试仪器仪表本身而言：指仪器仪表的读数与被测量实际值之间相差的程度。例如，电压表、电流表、仪用互感器、兆欧表等等，都标有准确度级数。通常电气试验中常用的仪器仪表的准确度级数有 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5 级等，这些值是用百分数表示的，0.5 级的仪表表示仪表的读数值与被测量实际值相差约 0.5%。另一方面是指在试验中，实测结果与被测量真实值之间相接近的程度，它是测量结果准确程度的量度。

(2) 精密度。它表示在同一条件下进行重复测量时，所得到的一组测量结果彼此之间相符合的程度。准确度与精密度的含义是不同的，但两者又紧密相关。仪器仪表有什么样

的准确度等级，也就要求有什么样的精密度相适应，精密度低，准确度也不会高。例如，用一块 1.5 级的万用表测量某一电阻值为 $1.4\text{M}\Omega$ ，如果改用 0.2 级的电桥测量，得到的测量值为 1384572Ω ，显然，万用表的精密度（也称精度）只有兆欧 [姆] 后面的一位数字，而电桥的测量精度达到了兆欧后面的六位数字，电桥的精度比万用表高。

(3) 误差。它是指测量结果对被测量的真实值的偏离程度。误差主要有两种表达方式：绝对误差和相对误差。绝对误差是指对被测量的实测值与被测量真实值的偏离程度，即

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真实值}$$

相对误差是指绝对误差相对于真实值的偏离程度，常以百分数表示

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真实值}} \times 100\%$$

误差与准确度的含义是相反的，测量结果的准确度高，它的误差就小。在高压电气试验中，造成误差的原因，既有仪器仪表本身准确度不高的影响，也与测量方法不当有直接关系，如读数不准确，接线不合适等等。为了减小测量误差，一定要注意尽可能选择准确度高的仪器仪表，选择合理的试验接线和测量方法，提高测试技术。

(4) 量程（又称量限）。它是指仪器仪表在规定的准确度下对应于某一测量范围内所能测量的最大值。例如有一块电压表，表面标有它的测量准确度 0.5 级及 $0 \sim 150 \sim 300\text{V}$ 。意思是在 0.5 级的准确度下，这块电压表测量电压时有两档，一档的测量范围为 $0 \sim 150\text{V}$ ，量程 150V ，即最大测量电压为 150V ；另一档测量范围 $0 \sim 300\text{V}$ ，量程 300V ，即最大测量电压为 300V 。在试验之前，我们要根据被测量可能达到的数值，

合理地选择具有适当量程的仪表，如果仪表量程比被试量大得多，测量该数误差会很大；仪表量程太小，试验中会打坏仪表。例如，被测电压在 250V 左右时，应选择 0~300V 的电压表，若错用了 0~150V 的电压表，电压表就可能损坏；反之，如果被测量只有 5V 左右，就不能用量程为 300V 的电压表，应采用 0~7.5~15~30V 的电压表才合适。另外，在测试中，有时估计的被测量数值比实际值要小得多，为了防止选错仪表量程，对于具有多量程的仪表，应先将仪表置于高量程的一档进行试测，试测表明量程太大时，再倒至量程小的一档进行测量。例如被测量估计 5V 左右，可采用 0~7.5~15~30V 的电压表，第一次试验将电压表放在 30V 那一档，若电压表指针指在大约 6V 的位置，即可将电压表调到量程为 7.5V 的一档进行测量；若指针指在 10V 左右，则应调到 15V 一档。为了减小读数误差，通常要求仪表指针指示在量程的 $\frac{2}{3}$ ~1 的范围内较合适。

三、测量方式和测量方法

测量方式有直接测量和间接测量等多种。

(1) 直接测量是将被测量与作为标准的量直接进行比较，或者用已刻度好的仪表进行测量，这样可以直接得到所需要的被测量的数值。例如，用电流表直接测量电流，用电桥直接测量电阻。

(2) 间接测量是先测量出与被测量有一定函数关系的几个量，再按照这种函数关系，通过计算，求得所需的被测量。例如，已经知道某导体的电阻率 $\rho = R \frac{S}{L}$ ，我们就先分别测量出该导体的电阻 R 、导体的截面积 S 和导体的长度 L ，再根据 $\rho = R \frac{S}{L}$ ，计算出该导体的电阻率 ρ 。在电气试验中，大