

农电工人培训教材

电气试验工

黄世英



4
GDIAN GONGREN PEIXUN JIAOCAI

水利电力出版社

农电工人培训教材

电气试验工

黄世英

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7印张 151千字

1987年11月第一版 1987年11月北京第一次印刷

印数00001—66620册 定价 1.25 元

书号 15143·6457

内 容 提 要

本书介绍了电气设备试验的一些基本知识；结合现场和预防性试验规程简要地介绍了绝缘电阻和吸收比、泄漏电流、 $\tan\delta$ 值、工频交流耐压等试验的方法；并联系变压器及其它高压设备的绝缘特点作了分析。另外，对电力变压器、互感器、油断路器、电力电缆等设备的特性试验作了必要的叙述。

本书可供县一级电业部门的电气试验工人作为培训教材，也可做为电气试验专业技术人员的参考书。

前 言

近年来,我国农村电气化事业发展很快,农电工人队伍迅速壮大,为提高农电工人的技术业务素质,做好技术培训工作,农电司和水利电力出版社共同组织编写了这套“农电工人培训教材”,作为全国各农电部门培训农电工人的基本教材。这套书适用于培训具有初中文化水平的农电工人,同时也可作为他们的自学参考书。对于教材的内容要求和编写大纲,是同有关省(市)农电负责同志经过几次会议共同研究确定的。该套教材由几个省的有关同志分工编写,林虔同志任主编。

这套教材共十二种,分别是《电工与电子学基础》、《变电运行工》、《变配电设备检修工》、《外线工》、《内线工》、《电气试验工》、《继电保护工》、《电气仪表工》、《电度表工》、《装表接电工》、《营业管理与营业工》、《农电通讯工》。

各地在使用该教材过程中,可根据学员的文化技术水平作适当的增删,对这套教材有何意见和建议,请及时函告水利电力出版社,以便再版时改正。

水利电力部农电司

一九八六年十一月

目 录

前言	
第一章 电气设备试验的基本知识	1
第一节 电气试验的意义	1
第二节 电气试验的分类	1
第三节 试验的技术和安全措施	3
第二章 绝缘电阻和吸收比试验	7
第一节 基本原理	7
第二节 试验方法	14
第三节 影响绝缘电阻的因素	17
第三章 泄漏电流试验	19
第一节 特点	19
第二节 试验方法	20
第三节 影响泄漏电流的因素	29
第四章 介质损失角正切值 ($\text{tg}\delta$) 试验	32
第一节 基本原理	32
第二节 试验方法	40
第三节 QS_1 型西林电桥的使用	45
第四节 影响 $\text{tg}\delta$ 的因素	55
第五章 耐压试验	59
第一节 基本原理及交直流耐压的区别	59
第二节 工频交流耐压试验的方法	60
第三节 工频耐压中的异常问题	71
第六章 变压器及其它高压设备的绝缘试验特点和分析 判断	74

第一节	电力变压器	74
第二节	互感器	84
第三节	油断路器	86
第四节	电力电缆	90
第五节	电容器	95
第六节	阀型避雷器	99
第七节	套管	101
第八节	绝缘子	104
第九节	隔离开关	105
第十节	安全用具	106
一至六章复习思考题		111
第七章 电力变压器的特性试验		114
第一节	测量绕组的直流电阻	114
第二节	变压比试验	121
第三节	极性和接线组别的试验	127
第四节	空载试验	136
第五节	短路试验	140
第六节	定相试验	145
第八章 互感器的特性试验		150
第一节	测量线圈的直流电阻	150
第二节	极性和接线组别的试验	150
第三节	变比检查和误差测定	151
第四节	励磁特性的试验	155
第九章 油断路器的特性试验		159
第一节	测量导电回路的直流电阻	159
第二节	动作特性的试验	161
第三节	操作机构的检验	169
第十章 电力电缆的其它试验		172
第一节	检查电缆线路的相位	172

第二节	电缆故障的寻测	172
第十一章	避雷器的特性试验	180
第一节	工频放电电压的测量	180
第二节	放电记录器的试验	182
第三节	管型避雷器的检查	183
第十二章	接地装置试验	187
第一节	接地电阻的概念	187
第二节	ZC-8型测试仪工作原理	190
第三节	复杂接地体的接地电阻测量	194
七至十二章	复习思考题	196
附录 1	常用高压硅堆技术参数	198
附录 2	QS1型交流电桥可能发生的故障、产生 原因及其检查、消除方法	199
附录 3	一球接地时, 球隙的工频放电电压 (kV, 有效值)	204
附录 4	各种温度下铜导线直流电阻的 K_t 值	206
附录 5	各种温度下铝导线直流电阻的 K_t 值	207
附录 6	35kV及以下常用油断路器的时间、速度 特性和导电回路电阻值(参考值)	208
附录 7	避雷器非线性系数 α	212

第一章 电气设备试验的基本知识

第一节 电气试验的意义

电气试验工是电业大军中的“侦察兵”。电力系统包含着众多的电气设备，个别设备的故障也会威胁系统的安全供电，造成部分甚至全部停电，由此所造成的损失往往超过设备本身的价值。通过试验手段，掌握电气设备的“情报”，从而进行相应的维护、检修、甚至调换，是防患于未然的有效措施。“预防性试验”也就由此而得名。

对于新安装和大修后的电气设备，也要进行试验，称为交接验收试验。其目的是鉴定电气设备本身及其安装和大修的质量。交接试验和预防性试验的目的是完全一致的，故水电部在1985年1月重行颁发了《电气设备预防性试验规程》（简称《规程》）。本书将围绕《规程》中的有关电气试验项目，介绍其主要的试验方法。

第二节 电气试验的分类

按作用和要求不同，电气设备的试验可分为绝缘试验和特性试验两大类。

1. 绝缘试验

电气设备的绝缘缺陷，一种是制造时潜伏的，另一种是外界的作用下发展起来的。外界作用有工作电压、过电压、潮湿、机械力、热、化学、等等。

上述原因所造成的绝缘缺陷，也可分为两大类：

第一类是集中性缺陷：如绝缘子的瓷质开裂；发电机绝缘的局部磨损、挤压破裂；电缆绝缘的气隙在电压作用下发生局部放电而逐步损伤绝缘；以及其它的机械损伤、局部受潮等等。

第二类是分布性缺陷，是指电气设备的整体绝缘性能下降：例如电机、套管等绝缘中的有机材料受潮、老化、变质；等等。

绝缘内部的缺陷存在，降低了电气设备的绝缘水平。我们通过一些试验的方法，可以把隐藏的缺陷检查出来。试验方法一般分为两大类：

第一类是非破坏性试验，是指在较低的电压下或是用其它不会损伤绝缘的办法来测量各种特性，从而判断绝缘内部的缺陷。实践证明，这类方法是有效的，但由于试验的电压较低，有些缺陷不能充分暴露，目前不能只靠它来可靠地判断绝缘水平，还有待我们积极、不断地改进非破坏性试验的方法。

第二类是破坏性试验，或称耐压试验。这类试验对绝缘的考验是严格的，特别是能揭露那些危险性较大的集中性缺陷。通过此类试验，能保证绝缘有一定的水平和裕度。其缺点是可能在试验中给被试设备的绝缘造成一定的损伤，但目前仍然是绝缘试验中的一项主要方法。

为了避免破坏性试验对绝缘的无辜损伤而增加修复难度，破坏性试验往往在非破坏性试验之后才进行。如果非破坏性试验已表明绝缘存在不正常情况，则必须在查明原因并加以消除后再进行破坏性试验。

2. 特性试验

通常把绝缘以外的试验统称为特性试验。这类试验主要是对电气设备的电气或机械方面的某些特性进行测试，如变压器和互感器的变比试验、极性试验、线圈的直流电阻测量；断路器的导电回路电阻、分合闸时间和速度试验、等等。

上述试验有它们共同的目的，就是揭露缺陷，但又各具有一定的局限性。试验人员应根据试验结果，结合出厂及历年的数据进行“纵”的比较；并与同类型设备的试验数据及标准进行“横”的比较；经过综合分析来判断缺陷或薄弱环节，为检修和运行提供依据。

第三节 试验的技术和安全措施

电气试验工必须坚持实事求是的科学态度，既不放过隐患，又不能将“敌情”扩大化。为此，必须具备下列三方面的条件：

1. 熟练的技术

电气试验工的技术熟练程度，直接影响着试验的正确性。尽管某些试验的加压时间是以分计算，但大量的准备工作和正确的判断却是日积月累所形成的，必须具备下列条件，才是称职的电气试验工。

(1) 了解常用电气材料的名称、规格、性能及用途。

(2) 了解被试验电气设备（简称试品）的名称、规格、基本结构、工作原理和用途。

(3) 了解发电厂及变电所一次系统的主结线和有关系统的结线。

(4) 熟悉试验设备及仪器、仪表的基本结构、工作原理和使用方法，并能排除一般故障。

(5)能正确完成试验室和现场试验的接线、操作及测量，并熟知外界因素的影响和消除方法。

(6)对试验结果能进行计算、分析，并作出正确的判断。

(7)能采用和创造新的、更有效的试验技术。

2.严谨的工作作风

发电厂、变电所现场的试验工作，多数在高电压、短工期的条件下进行。没有严谨的工作作风就不能圆满地完成试验任务。

(1)周密的准备工作。包括拟订试验程序（简单试验程序应该心中有数）；准备好试验设备、仪器及仪表、电源控制箱、绝缘接地棒、接地线、小线、工具、等等。

(2)合理、整齐地布置试验场地。试验器具应靠近试品；所有带电部分应互相隔开，面向试验人员并处于视线之内。操作者的活动范围和与带电部分的最小允许距离按表 1-1规定。调压、测量装置及电源控制箱应靠近放置，并由一人操作和读数。

表 1-1 操作人员活动范围和与带电设备的最小允许距离（m）

电压等级(kV)	6 ~10	25~35	60~110	220
不设防护栅时	0.7	1.0	1.5	3.0
设防护栅时	0.35	0.6	1.0	2.0

(3)试验接线应清晰明了、无误。

(4)操作顺序应有条不紊、连接恰当。除特殊要求者，均不得突然加压或失压。发生异常现象时，应立即停止

升压，并随手做到降压、断电、放电、接地，再进行检查分析。

(5) 做好试验的善后工作。包括清理现场以防在试品上遗忘物件；妥善放置试验器具，以利再次使用。

(6) 详细记录。包括试验项目、测量数据、试品名称编号、仪器仪表编号、气象条件及试验时间、等等。然后整理好试验报告以便抄报和存档。

3. 试验中的安全措施

交接和预防性试验中的多数试品装设在发、变电所现场；试品的对外引线、外壳（接地）、附近的带电运行设备、人员的嘈杂和堆放的杂物、等等均增加了试验工作的复杂性；加上试验项目中有些要施加高电压；这样就必须具备完善的安全措施才能开展工作。

(1) 现场工作必须执行工作票制度、工作许可制度、工作监护制度、工作间断和转移及终结制度。

(2) 试验现场应装设遮栏或围栏，悬挂“止步，高压危险！”标示牌，并派专人看守；试品两端不在同一地点时，另一端还应派人看守。

(3) 高压试验工作不得少于两人，试验负责人应由有经验的人员担任；开始试验前，负责人应对全体试验人员详细布置试验中的安全事项。

(4) 因试验需要断开电气设备接头时，拆前应做好标记，恢复连接后应进行检查。

(5) 试验器具的金属外壳应可靠接地，高压引线应尽量缩短，必要时用绝缘物支持牢固。为了在试验时确保高电压回路的任何部分不对接地体放电，高电压回路与接地体（如墙壁、金属围栏、接地线、等等）的距离必须留有足够

的裕度。

(6) 试验装置的电源开关，应使用明显断开的双极闸刀，并保证有两个串联断开点和可靠的过载保护设施。

(7) 加电压前必须认真检查接线、表计量程，确信调压器在零位及仪表的开始状态均正确无误，并通知有关人员离开被试设备，在取得试验负责人许可后，方可加压。加压过程中应有人监护。

试验人员在加压过程中，应精力集中，不得与他人闲谈，随时警惕异常现象发生。操作人员应站在绝缘垫上。

(8) 变更接线或试验结束时，应首先降下电压、断开电源、放电，并将升压装置的高压部分短路接地。

(9) 未装地线的大电容试品，应先放电后试验。进行高压直流试验时，每告一段落或试验结束后，应将试品对地放电数次并短路接地后方可接触。

(10) 试验结束时，试验人员应拆除自装的接地短路线，并对试品进行检查和清理现场。

第二章 绝缘电阻和吸收比试验

第一节 基本原理

电介质通常称为绝缘材料。电气设备需要与电隔绝的部位均填入绝缘材料。但绝缘材料并不是绝对不导电，只是电阻率很大，即 ρ 在 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。

当在电介质上施加直流电压时，开始流过的电流较大，以后电流逐渐减小，到一定时间之后电流趋于稳定。为了解释这种现象，就必须研究在电场作用下电介质中所发生的物理过程——极化和电导现象。

1. 电介质的极化和介电系数

每个原子都是由带正电的原子核和带负电的电子组成。一般地说，正负电荷在分子中都不集中在一点。但是，我们可以将这些负电荷的影响用一个等效的负电荷来代替，这个等效负电荷所在的位置，称为这个分子的负电荷中心。同理，每个分子的全部正电荷也有一个相应的正电荷中心。

从上述观点出发，我们可以把组成电介质的分子分为两类：

一类叫无极分子（或称中性分子），这类分子在外电场不存在时，分子的正负电荷中心是重合的，所以在正常时对外界不显示电性。如：氢、氮、四氯化碳、聚四氟乙烯、等等。

另一类叫极性分子（或称偶极子），这类分子即使在外电场不存在时，分子的正负电荷中心也不重合，而保持一定

的电距离，即电矩（电量 q 乘以正、负电荷间距离）。这类分子虽然从单个看是显示电性的，但从总体来看，因分子排列杂乱，方向时刻改变，整个电介质对外仍不显示电性。如：水蒸汽、蓖麻油、沥青、胶木、等等。

当电介质在外电场的作用下，中性分子内相互束缚的电荷，相应于电场的方向产生弹性位移；极性分子则沿电场方向转动，作有规则的排列，使电介质对外呈现电性，并在外电路产生电流，这种物理现象，称为电介质的极化。

电介质极化的结果，使电介质表面形成了电荷：与正极板相对的面上出现了负电荷；与负极板相对的面上出现了正电荷。如图2-1的平行板电容器，先放在密封的真空容器中，

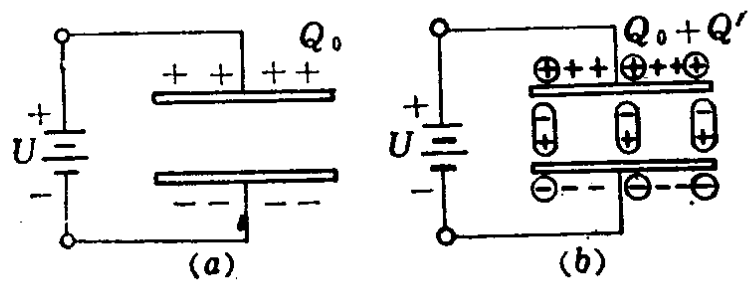


图 2-1 极化现象
(a)极间为真空；(b)极间为电介质

并在极板上施加直流电压 U ，这时极板上分别出现正负电荷，其电量为 Q_0 。然后把一块固体电介质（厚度与极间距离相等）放入极板间，施加同样的电压，就可发现极板上电荷增加到 $Q_0 + Q'$ ，这就是电介质的极化在起作用。即在外电场作用下，电介质中本来彼此中和的正负电荷发生位移或改向，形成电矩，并在极板上吸住电荷 Q' ，所以极板上电荷变化了。可用数学式表示：

真空中的电容

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

极板间放入电介质后的电容

$$C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = \frac{\epsilon A}{d}$$

式中 A —— 极板面积 (m^2);

d —— 极板距离 (m);

ϵ_0 —— 真空的介电系数 $1/36\pi \times 10^9$ (F/m);

ϵ —— 电介质的介电系数 (F/m)。

由上两式可得

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0}$$

ϵ_r 称为电介质的相对介电系数，是电介质极化现象的表征。各种气体的 ϵ_r 均接近于 1。而常用的液体、固体电介质的 ϵ_r 则各不同，一般在 2~6 之间，且与温度、频率的关系也不一致。

由式 $\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$ 可见， ϵ_r 也可定义为以某介质为绝缘的电容器的电容量与以真空为绝缘的同样大小电容器的电容量之比。因此，整个电介质的极化可以归结为在靠近电极的介质表面上束缚电荷的积累。

2. 电介质的电导和电导率

通常工程上所用的电介质，并非纯粹的绝缘体，里面还有极少数束缚很弱的或自由的离子。当电压作用在介质上时，正负离子就分别向两极移动而形成电流，称为电导电流或泄漏电流，这种现象称为电介质电导，以电导率 γ 或 γ 的倒数电阻率 ρ 表征。

电介质的电导率比金属的小得多，且是离子性的，这和金属的自由电子的电导是不同的。温度愈高，参与电导的离

子（介质本身或杂质的）愈多，电导电流就愈大，所以电介质电阻（通常称绝缘电阻）具有负的温度系数（金属电阻的温度系数是正的）。电介质的电导还与所加电压的高低有关，接近击穿时，电导通常显著增加。

3. 不均匀介质在直流电压下的吸收现象

电气设备的绝缘常常由多种材料组成，即使是同一种介质制成的绝缘，也会在制造和运行中发生电性能的变化，因此在工程上没有绝对均匀的介质。我们以两种电性能不同的材料组成的双层介质来分析不均匀介质极化的一般规律，如图2-2示。

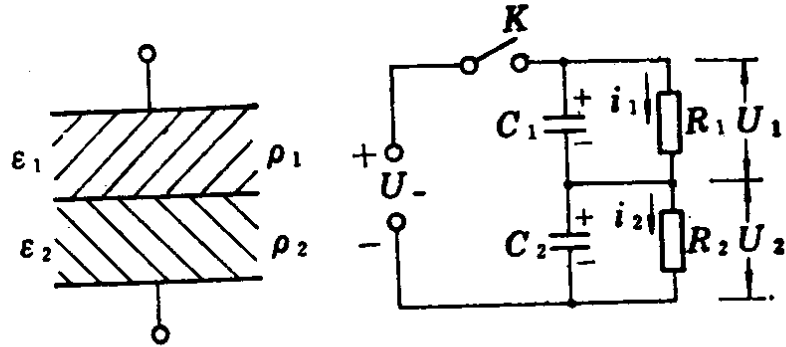


图 2-2 双层电介质极化的等值电路图

设 $\frac{C_1}{C_2} \neq \frac{R_2}{R_1}$, $C_1 < C_2$, $R_1 < R_2$

当开关K闭合时，介质上突然加上一个直流电压。开始瞬间，电压由0很快的变化为U，相当于一个频率很高的电压；此时电容C₁和C₂起主要作用，因为电阻比容抗要大得多，R₁和R₂相当于开路；两层介质中起始的电压分布与电容成反比，即

$$\frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{C_{20}}{C_{10}}$$

此时的U₁₀>U₂₀。在两层介质中流过的电流，最初瞬间的起始值分别为i₁₀和i₂₀。