

电气设备的绝缘 及预防性试验

陈明鏢 编著



210.6

科学技术文献出版社

内 容 简 介

本书介绍了电气设备中常用的绝缘材料的基本性能及其重要作用；电气设备通用的绝缘预防性试验的原理和方法；试验结果的分析处理及示例；几种主要电气设备的绝缘结构特点等。可作为大专院校有关专业的选修课教材或主要参考书，也可供各类厂、矿、企业的工程技术人员、工人等参考使用。

电气设备的绝缘及预防性试验

陈明鏖 编著

科学技术文献出版社出版发行

西安矿业学院印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 5印张 108千字

1989年6月北京第一版第一次印刷

印数：1—2000册

ISBN 7-5023-0918-7/TM·2

定价：2.00元



前 言

随着科学技术进步,工农业生产飞速发展,电气设备的应用日益广泛。作为电气设备的重要材料之一的绝缘材料,其理论研究水平及实际应用也有很大的提高和发展。但绝缘知识的普及工作却很少有人问津,电气设备运行部门的技术、维修、操作人员很缺乏绝缘方面的基本知识,造成设备损坏严重、修理的效果不好。因而使一些企业、厂、矿的管理混乱、被动、经济效益不高。为此,我认为推广、普及绝缘方面的基本知识及预防性试验是很有必要的,所以我着手做这方面的工作,将自已所学的专业知识及经历过的实际结合起来,给电气自动化专业的学生开了选修课,并编写了教材,经过几届使用、修改,编成了此书。希望能起一些积极的作用。

掌握了此书介绍的绝缘基本知识和主要电气设备的预防性试验原理及方法,并适当地应用,就可以使电气设备的技术管理、使用操作和维护修理等工作有目的性和针对性,形成一个主动的局面,促进厂、矿、企业的生产稳步发展。

笔者抱着一个良好的愿望编写此书,但由于水平所限,书中不妥之处一定不少,恳请绝缘行业的老师们及朋友们批评指正,也欢迎本书的读者提出宝贵意见共同探讨。

编 者

1989年4月

目 录

第一章	绪论	(1)
第一节	电工材料分类.....	(1)
第二节	绝缘材料及其应用.....	(3)
第三节	了解绝缘结构特点及进行绝缘预防性 试验的意义.....	(9)
第二章	电介质的基本性能	(13)
第一节	电介质的极化与介电系数.....	(14)
第二节	电介质的电导与绝缘电阻.....	(25)
第三节	电介质的损耗与介质损耗角正切 $\text{tg}\delta$	(31)
第四节	电介质的击穿和绝缘强度.....	(42)
第三章	常用的绝缘预防性试验及设备	(53)
第一节	绝缘电阻和吸收比试验.....	(54)
第二节	泄漏电流和直流耐压试验.....	(61)
第三节	介质损耗角正切 ($\text{tg}\delta$) 的测量.....	(70)
第四节	交流耐压试验.....	(84)
第四章	电气设备绝缘结构的特点及预防性试 验	(93)
第一节	概述.....	(93)
第二节	变压器的绝缘结构及预防性试验.....	(95)
第三节	电机的绝缘结构及预防性试验.....	(138)
第四节	电力电容器的绝缘结构.....	(113)
第五节	电力电缆的绝缘结构及预防性试验.....	(147)

第一章 绪 论

第一节 电工材料分类

当今世上电行业所涉及的范围之广、分门别类之多是其它任何行业都无法比拟的。但在电行业中无论是尖端科研、工业生产或是科普应用都离不开最基本的东西——电工材料。新型的性能优异的电工材料是促使电行业的科学技术进步、工农业生产发展的重要环节,因而现代国内外在研究试制新型电工材料、特别是新型绝缘材料的工作中,投入了大量的人力、物力和财力。

电工材料可分为两大类,即电性材料和磁性材料。

电性材料按其导电性能又可区分为三类,即导体、半导体和绝缘体。

通俗地讲,导体是容易导电的物体,在人们的印象中是指金属类的物体;绝缘体是不易导电的物体,一般来说,人们对它比较陌生。半导体是介于导体和绝缘体之间的物体,一般人对它的印象是可以做收音机的材料。

在工程技术上对导体、半导体和绝缘体有科学的区分方法,是利用任何材料都具有的电阻率(工程上用 ρ 表示)的大小,定量地将电性材料分为三类: ρ 在 10^{-6} — $10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$ 之间的材料为导体; ρ 在 10^{-2} — $10^9\Omega\cdot\text{cm}$ 之间的材料为半导

体； ρ 在 10^{10} — $10^{22}\Omega \cdot \text{cm}$ 及以上的材料为绝缘体，也叫电介质（一般在学术、理论论文及教材中，研究绝缘体在电场中的物理现象时常将绝缘材料称为电介质）。在电气工程中使用的绝缘材料，其电阻率 ρ 一般都在 $10^{14}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上。

磁性材料广泛应用于电气工程技术中，它是电气设备不可缺少的重要组成部分。磁性材料的重要作用在于在电气设备中构成磁路，按照电磁感应定律建立电磁场，以实现电能、磁能及其他机械能量的转换。如在各类电机、变压器、继电器和仪表中，磁性材料都是必不可少的。磁性材料比较坚固耐用、不易发生问题。

导电材料在电力工业的各种工程、设备和仪表中都起着十分重要的作用，它是电的通路。电能的生产、传输和使用都离不开导电材料。电气工程中广泛应用的导电材料应具有低的电阻率、良好的机械强度、耐腐蚀和便于加工等性能。含杂质少的铜、铝金属是电气工程中各类电线电缆的导电芯线、电机电器的绕组和母线等的主要原材料。近年来电气工业各部门都十分重视铝导线及铝合金导线的应用，在输电线、变压器、电机电器的制造中逐步推广，这是符合以铝代铜的经济方针的。

一般来说，导电材料的机械强度比较高，能耐比较高的温度而不易损坏，所以导电材料也不是本书讨论的主要对象。

对于绝缘材料，人们朴素的概念是泛指不导电、能将带电体隔开的物体。在实际上它的作用远远超过一般概念中对它的认识。

我们将集中力量讨论绝缘材料。先了解绝缘材料的分类

及用途，然后讨论绝缘材料的基本性能、结构特点，最后讨论绝缘预防性试验的原理及方法、试验结果分析处理等。

第二节 绝缘材料及其应用

在日常生活中，我们经常接触许多种绝缘材料，只是没有系统、深入地去认识它们，所以不太了解。通常可以按自然形态将它们分成三类：

一、气体：空气、氮气、氢气和六氟化硫、二氧化碳等合成气体；

二、液体：蓖麻油、苏伏油、变压器油、甲苯、四氯化碳、漆、蒸馏水，乙醇等；

三、固体：木、纸、布、绸、瓷、云母、松香、虫胶、橡胶、胶木、各种塑料制品等。

对用于电气设备中的绝缘材料的基本要求是：具备比较好的电性能（主要有四个方面，将在第二章详述）；具有较长的使用时间——一般要求寿命为二十年以上；能耐受较高的工作温度。在这三项要求中，工作温度与电性能及寿命是矛盾的，要保证具有一定的电性能并有比较长的使用寿命，就必须限制绝缘材料的使用温度，为此，每种绝缘材料都规定有它的长时工作允许的最高温度——耐热等级。

各种耐热等级的温度及各种绝缘材料所属的耐热等级见表1—1。

表1—1

绝缘材料按耐热等级分类

耐热等级	最高工作温度(°C)	所属的主要绝缘材料
Y	90	未浸渍的棉纱、纸、丝或这类材料组合成的复合绝缘
A	105	油树脂、油漆及其浸渍过的y级材料
E	120	胶纸板、胶布板、环树树脂、聚脂薄膜等
B	135	玻璃漆布、层压玻璃布板、绸底云母带等
F	155	用耐热有机树脂浸渍、粘合的无机物云母、玻璃、丝布等
H	180	耐热硅有机树脂、硅有机漆浸渍或粘合的无机材料、云母、玻璃、丝布等
C	>180	不采用任何有机粘合剂或浸渍剂的云母、陶瓷、玻璃石英、氧化铝等无机物

在绝缘材料的实际应用中，往往不是某一种形态的某一种材料单独使用，而是不同形态的若干种材料的组合。几种材料组合的绝缘叫复合绝缘，其耐热等级按参与复合的材料中耐热等级最低的一种材料确定。

在所有的电气设备中，绝缘材料都是极为重要的材料，略举一些实例，就可以了解它占有何等重要的地位。如：

一台30万瓩双水内冷发电机所需的绝缘材料有绝缘漆10吨，云母制品8吨，层压板5吨，漆布、薄膜类1吨；

一台3200仟伏安的变压器所需的绝缘材料重量占其总重量的百分之三十四；

一台10仟伏级的高压断路器，所用的绝缘材料占其总重量的百分之十八。

还可以列举出许多类似的例子。那么，绝缘材料在电气设备的中及在电气工程上究竟起怎样的作用呢？要想了解绝缘材料起的作用，离不开对电及其性能的了解，因为它们相互矛盾的对立统一体。

在正常情况下，“电”本身是无影无踪的，只有借助于仪器才能检查到它的存在与否。长时期的理论研究和实践经验使人们了解到电的某些基本性质与人最熟悉的水很相似，可以形象地用水来比拟，以使人们便于记忆和理解。例如：水贮在容器中或在水库中、湖泊中都有一定的水位，电的存在能呈现出一定的电位；不同的水位之间有水位差，不同电位之间有电位差；有水位差的两点之间若用水管连通，则因水位不同的两点之间的压力不同，从高水位向低水位有水流动，有电位差的两点之间若用导体连通，则因两点之间有电压而产生电流。

要想按照人的意愿使水朝一定的方向流动或贮存起来，除了水位、水压要满足条件外，还需要用土、沙、石头、水泥等原料，构成水渠、水管、水池、水闸、堤坝、水库等才能实现。同样，要想让电听人的使唤，朝一定的方向流动或贮存起来，除了在电位、电压方面满足条件且有导电体存在之外，还需要不导电的材料构成电的“堤坝”、电的“管道”“渠道”、电“闸”、电的“库”、电的“池”等才能实现。这种不导电的材料就是绝缘材料。绝缘材料不是绝对的不导电，这与土、沙、石等构成的水渠不是绝对地不漏水的道理相同。

长长的电缆就是电的“渠道”、“管道”，短短的套管也是电的“管道”，各种开关就是电的“闸门”，各种电容器就是贮存电的“池”和“库”。

绝缘材料在大自然中分布极广，种类和数量很多，加之人利用这些天然原料加工制造、合成许多新的绝缘材料，就更加丰富了。如我们时刻离不开的空气就是一种良好的广泛

应用的绝缘材料。因为有了空气，才使高电压远距离输电成为比较容易做到的事，只需用绝缘子串、铁塔（或各种木杆、水泥杆）将输电线悬挂起来就行了。数十公里、数百公里的高压线路的相与相之间、相对地之间都靠空气绝缘，将不同电位隔离开来。否则，数百公里的导电线路外面都要按电压要求包上厚厚的绝缘层（如高压电缆），造价将昂贵得不堪设想。

气体绝缘材料还可以用改变压力的办法提高其耐电强度，用在电气设备中可以缩短间隙距离，减小设备的尺寸。如压缩空气（利用高压作用）可用作高电压空气断路器、标准电容器的内绝缘；应用真空度较高的间隙（减小气体的压力）的击穿电压提高的特点可以做成体积很小的真空断路器。

应当进一步指出的是，气体介质在许多电器开关中，不仅起到主绝缘的作用，而且还起到另一项很重要的作用，这就是灭弧作用。在开关电器中，熄灭正常工作时的开断电流电弧和故障状态下的短路电流电弧的能力，是衡量开关电器性能的重要指标。高耐电强度气体的应用（如六氟化硫 SF_6 ）减少了高压和高真空在工艺上的困难同时提高了设备的工作性能，是今后发展的方向。

在空间窄小的情况下，如在煤矿井下的巷道中，城市的地下沟道中，建筑的墙壁和天花板中……就需用绝缘层包着导体构成电的通道，绝缘层将导体的高电位与大地的零电位隔离开来。绝缘层包着导体构成长长的电的通道，这就是电缆。根据构造不同、用途不同有许多多种电缆。

架空导体在穿越建筑物时，为了使建筑物不开很大的空

洞，就需使用由绝缘材料包着导电芯子构成的套管；在开关、变压器等设备中，外壳都与大地接通，它们内部具有很高电位的导体要与外部线路连接，必须穿越外壳，这也需要套管。

对发电、变配电及用电设备，为了使设备的体积小，重量轻，便于安装运输，就采用了价格比较高的经过多道工序加工制造的固体、液体绝缘材料。制成特殊的结构，以满足电性能的要求。

如在变压器中，其导电的绕组（线圈）要用电缆纸带包绕多层，然后烘干（真空干燥）浸绝缘漆，再烘焙后装配入油箱，最后进行干燥和浸油，构成性能比较完善的绝缘。这些绝缘物起到了匝间绝缘、层间绝缘、相间绝缘和对地绝缘的作用，也起到增加线圈的机械强度、导热性和耐热性的作用。

又如在电动机中，每个线圈有数十匝或数百匝组成，匝与匝之间的绝缘在低压电机中是靠绕线圈时采用事先上好漆的漆包线或纱包线实现，层间绝缘（双层绕组）用黄腊布、聚酯薄膜与青壳纸的复合制品，对地绝缘用事先下在电机槽中的槽绝缘（也用聚酯薄膜与青壳纸的复合制品）实现，各相绕组在槽外的端部用一定形状用纸衬垫隔开（相间绝缘），各相绕组的头尾穿上黄腊编织管引到接线端子盒中。每台电机下好线后，还要经过烘焙、浸漆等绝缘处理三至六遍才算成型。高压电机如6kV，10kV等电压等级的电机，其匝间、层间、相间、对地绝缘就更为复杂。高压电机绕组现代较多采用连续式沥青云母带浸胶绝缘结构，嵌线之后进行一系列严格的工艺处理才能成型。电机的绝缘工艺过程中任

何一项工艺不合格或者其中某一种绝缘的某一处有缺陷，都将使电机不能正常运行。

在各种开关中，绝缘制品如层压板、绝缘瓷瓶等经常是开关触头的支架，但更重要的是起到了对地绝缘和相间绝缘的作用。当然，开关的各相触头暴露在空气中的部分是以空气作为绝缘物起到相与相之间的绝缘作用的。

各类电容器都是利用夹在两个电极之间的绝缘材料构成的。如高压试验中的标准电容器就是做成圆筒的二个金属电极之间充以经过处理的纯净空气或氮气构成的；为了提高电容量，减小体积，常选用电容率比较高的绝缘材料作电容器两极间的介质，如无线电工业中常用的云母电容器，陶瓷电容器等；工业企业广泛使用的余弦电容器在补偿、提高功率因数，节省发电机装机容量、减少线路电能损耗等方面起着十分重要的作用，它就是利用电容器纸作为介质，夹在铝箔之间，卷成电容元件再浸以矿物油或联苯制成的。

还可以举出许许多多例子，说明绝缘材料的用途十分广泛，可以说任何电气设备都离不开绝缘材料。

由上述几种电气设备的绝缘可见，绝缘材料在使用中往往是多品种、多形态的组合，这样的绝缘叫复合绝缘。如变压器中是纸、油漆和变压器油的复合绝缘；各种电机中是固体—固体—气体的复合绝缘；胶纸套管中则是胶—纸—气体的复合绝缘等等。这些复合绝缘，有的是按人的要求制成的，可以提高绝缘的耐电强度，如变压器中的油纸复合绝缘；有的是在制造工艺过程中自然形成、难以避免的，如在电机绝缘和胶纸套管中，几种固体复合在一起时，不可避免地有气隙夹在层中，这种复合是不利的，应当设法尽量

减少。

第三节 了解绝缘结构特点及进行绝缘预防性试验的意义

一、了解绝缘结构特点的意义

当人们对电气设备的绝缘的重要用途有了认识之后，如果能进一步对各种电气设备的绝缘结构特点及性能有个概括的基本了解，那么对电气设备的使用将会起到“合理化”的作用，电气设备的绝缘寿命将会达到应有的时间甚至适当的延长。“合理化”将体现在以下几方面：

(一) 为电气设备选择适当的环境，包括工作环境和贮藏环境，这环境应该满足温度、湿度、粉尘及化学腐蚀气体含量的要求；

(二) 制订适当的操作规程，使电气设备的绝缘不要受到长时间过热损伤，例如电动机的起动次数和时间、起动负载等都可以作出规定；

(三) 安装适当的保护，防止电气设备超载运行，在故障时很快切断电源，防止过电流和过电压造成绝缘损坏；

(四) 管理人员定期安排维护保养及性能检查试验（预防性试验），对设备的状况作到心中有数。

二、进行绝缘预防性试验的意义

电气设备中的绝缘材料和绝缘结构对设备的安全性、可靠性和使用持久性（寿命）都起着决定性的作用。

各种类型的工程电气设备，如电机（包括发电机，电动

机，变压器)，各种类型的开关、电缆等，其导电、导磁部分及大部分外壳都是用金属做成的：如以铜或铝做成导电部分，硅钢片做成导磁部分，以铸铁、钢板，钢带做成设备的外壳及外皮。而设备的绝缘部分用各种天然或人造的绝缘材料做成。由物质的固有机性能决定，导电、导磁及外壳所用的金属材料有较高的机械强度，比较坚固耐用，损坏的机会较少。而绝缘材料本身都是非金属材料，机械强度较低，并且在设备中绝缘材料总是包绕在导体之外，很难做成坚固的整体结构，加之绝缘在设备运行中，要承受电压的作用，电流电动力的作用，热的作用及化学作用等，所以绝缘材料及绝缘结构比导电导磁部分的材料损坏的机会要多得多。

举二个统计数字很能说明问题。

其一，调查统计全国1300多台正在运行的主变压器，从1955年至1972年间共发生事故三百多次，其中二百六十多次都直接与变压器绝缘损坏或水平降低有关。

其二、对3439次电气设备（各种电机、变压器、开关）的损坏事件进行分析，其中2917次是绝缘破坏引起的。

另外，我们打开一台烧毁的电动机，有时会看到铜线烧熔，甚至有铜融化成的小铜豆，实际上电动机的烧毁绝不是因为铜线过载烧熔造成的，而烧毁的根本原因在于某处绝缘损坏引起短路（相间或对地），短路电流将铜线烧熔，同时也烧毁了更多的绝缘材料。

由上述情况可知，决定现代电气设备性能优劣、寿命长短的关键是所采用的绝缘材料与绝缘结构。为此，作为一个电气工程的技术人员，了解电气设备的绝缘结构并随时掌握电气设备绝缘的状况是十分必要的。

电力系统中的大型设备一旦发生故障，会造成大面积停电，经济损失很大。即使一个煤矿、一个工厂主变压器或进线开关发生了故障，全矿全厂停电待修，影响也是很大的。所以，作为一个电气技术人员，就应当学会当电气设备的“医生”，既会治病，又能防病，能诊断电气设备的“病情”，能为电气设备作“体检”，在初发病时就能及时发现，加以控制、“治疗”，不要酿成大患。作这种诊断的有效手段就是对电气设备进行恰当的绝缘预防性试验。

预防性试验大致可分为两类：非破坏性试验与破坏性试验。

非破坏性试验之对于设备相当于对人作体格检查。电气设备的绝缘经过一定时间的运行之后，对其基本性能作一次全面检查，将测得的试验数据与其出厂技术数据或以前每次检查的数据作比较，进行分析，判断它的绝缘是否受到了损伤、受潮或老化，是否需要工艺处理，并在作完全部非破坏性试验且进行了适当的工艺处理之后，确定是否需要在重新投入运行前作进一步的严酷的破坏性试验。属于非破坏性试验的有绝缘电阻和吸收比试验；泄漏电流和直流耐压试验；介质损耗和局部放电等试验。这些试验所加的电压与电气设备的工作电压相比都较低，试验过程中不会造成显著的绝缘损伤。

破坏性试验在预防性试验中是指一分钟工频交流耐压试验，试验电压比电气设备的工作电压高得多（具体数值根据设备的电压等级和修理情况确定）。一般是在进行了非破坏性试验后，对设备绝缘状况仍不能确切判断时才进行交流耐压试验。这样作的目的是检查设备绝缘的耐压水平，确定它能

否投入运行。实质上所谓破坏性试验是以短时的比工作电压高得多（一般为二倍或更高）的电压代替长时的额定工作电压来考核电气设备能否胜任所承担的工作，如果安全地通过了破坏性试验，就可以比较放心地投入运行；如果通不过试验，在加压的过程中设备的绝缘将从薄弱处击穿而破坏。对于设备在预防性试验中的破坏，不应感到可惜，不应当认为若不试验还可以凑合着用些时间，一台不合格的设备用到系统中去，若发生事故造成的损失将比一台设备的价值大数十倍、数百倍或者更大。所以“预防性试验”的意义在于使系统安全可靠地运行，减少一般故障的发生次数，避免恶性事故发生；随时掌握电气设备的运行状况及其绝缘的完好情况，积累数据，以便分析比较，作出正确的判断，及时更换该“退休”的设备，做到防患于未然。

上述两类试验同属预防性试验，其功能是相辅相成的。试验的程序往往是先进行非破坏性试验，如果与已往相比未发现异常变化，则不继续作破坏性试验；如果与以前的试验数据相比有明显变化或发现某些问题，则可作相应的修理或工艺处理，之后仍然需先进行非破坏试验，根据非破坏性试验的结果分析，确有必要时，才考虑进行破坏性试验。

在预防性试验中，不是考核各种材料单独存在时的属性，而是考核各种电气设备的绝缘结构的性能。虽然各种设备的绝缘结构形式多样各不相同，但它们存在着共同的特点，即任何设备中的绝缘材料和构成的绝缘结构总是处在一个场中，这个场就是电场，也就是说设备中的绝缘总是处在不同电位之间，承受一定的电压。因而在试验中，将各式各样的绝缘结构抽象为一个试样，并与它承受的电压，构成一个电

路（图1—1），考察绝缘在此电路中的各种性能，这样做是具有实际意义的。

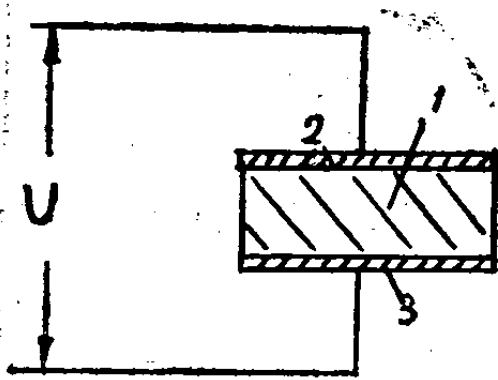


图1—1 电气设备绝缘的抽象电路

1、设备的绝缘 2、设备的带电部分

3、设备外壳

为了根据进行的各项试验中观察到的现象及测得的数据深入细致地分析、判断电气设备的绝缘性能变化状况，得到比较可靠的正确结论，有必要掌握绝缘材料的基本知识，特别是绝缘材料在电场中表现出的基本性能。

第二章 电介质的基本性能

在电气工程及设备中，绝缘材料得到十分广泛的应用。通常研究绝缘材料在电场中的物理现象时，将绝缘材料称为电介质。这个名称，表征了绝缘材料在电气工程及设备中的主要作用：隔离不同电位的带电导体，使电流按一定的方向流动；介于不同电位的导体之间，构成各种电容器。所以电介质这个名称是科学的。

电介质的基本性能最主要的是电性能，这是我们讨论的中心。对于其它性能如耐热性能、机械性能、吸湿性能等都围绕着它们对电性能的影响来进行讨论。

电介质的最基本的电气性能大致可以分为以下四个方