

电气绝缘测试技术

(第二版)

顾文郁 编著

上海科学技术出版社

DIANQIUEYUANCESHIJISHU

内 容 提 要

本书较系统地介绍了电气绝缘材料及有关电气设备的主要测试方法和测量装置。全书共十二章，主要包含两部分内容。第一部分论述绝缘电气特性的测试方法，介绍运用电气参数去了解绝缘材料或绝缘结构的电特性；第二部分着重论述非破坏性的绝缘测试方法，主要介绍在不破坏试品的原则下，测定绝缘材料或绝缘结构的运行状况，预测判定试品的终点特性、残存使用寿命和试验数据处理方法。

本书主要供从事电气绝缘材料和绝缘结构研究和实际工作的科技工作人员参考，也可供高校有关专业师生阅读。

良

电气绝缘测试技术

(第二版)

顾文郁 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 江苏深水印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 16 插页 1 字数 354,000

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数 1—5,000

统一书号：15119·2498 定价：2.65元

前 言

现代科学技术常要求各学科、各领域互相渗透、互相促进。绝缘材料技术水平的提高有赖于理论研究,材料研究,分析测试技术的研究和材料应用技术研究的互相协作。本书旨在通过对绝缘材料和绝缘结构的测试技术全面系统了解的基础上,使我国电机、电器绝缘结构的设计和绝缘材料的选用提高到一个新的水平。

本书曾于1972年10月由原上海人民出版社出版,根据读者反映,普遍认为对解决应用研究和工程实践中的测量问题有着积极作用。现将原文作了部分修改,力求把测试技术中的理论分析和大量实践问题加以科学综合,使其更具有实用价值。

原书编写曾得到寒松帮助。这次修订稿曾由责任编辑请上海交通大学谢绍惠、谢开俊等同志审阅,在此谨向他们表示衷心感谢。

由于作者水平有限,时间仓促,修改时调查研究不够深入,因此,缺点、错误在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

1985年12月

目 录

前 言

第 1 章	绪论	1
1-1	电气绝缘测试技术的发展过程	1
1-2	绝缘试验分类方法	4
1-3	绝缘试验的要求与应用	4
第 2 章	直流试验方法	6
2-1	概述	6
2-2	电流-时间特性	8
2-3	电导电流-电压特性	10
2-4	电流-温度特性	12
2-5	测试方法	13
2-6	影响试验结果的分析	20
第 3 章	绝缘电阻测量方法	25
3-1	电导现象	25
3-2	测量绝缘电阻用的试品与电极	27
3-3	影响绝缘电阻测量的因素	42
3-4	检测技术	48
第 4 章	介电系数与介质损耗的测量	73
4-1	概述	73
4-2	测量介电系数与介质损耗用的试品与电极	81
4-3	影响介电系数与介质损耗的因素	93
4-4	测量方法	95

4-5	试验方法分析	138
第5章	交流电流试验方法	160
5-1	电流-电压特性	160
5-2	电流波形-电压特性	179
5-3	电流-温度特性	182
5-4	测试方法	183
第6章	电气强度试验	185
6-1	绝缘击穿现象	185
6-2	试品、电极与媒质的选择	186
6-3	耐压试验的条件选择	198
6-4	直流耐压试验	207
6-5	交流耐压试验	210
6-6	冲击电压试验	220
第7章	电晕试验方法	237
7-1	放电现象	237
7-2	绝缘内部游离测量的基本方法和量度	242
7-3	测试方法	265
7-4	耐电晕试验方法	296
第8章	匝间绝缘试验	312
8-1	变压器绕组的匝间绝缘试验	312
8-2	电机定子绕组匝间绝缘试验	317
8-3	汽轮发电机转子绕组匝间绝缘测定	342
第9章	人工气候试验	355
9-1	概述	355
9-2	湿热试验	358
9-3	霉菌试验	376
第10章	绝缘老化的检测	389
10-1	绝缘老化过程理论	389
10-2	套管绝缘老化的检测	411

10-3	变压器绝缘老化的检测	419
10-4	电机绝缘老化的检测	437
第 11 章	绝缘使用寿命预测法	445
11-1	直流击穿电压值的推定	445
11-2	交流击穿电压值的推定	448
11-3	多因素作用下的高压绝缘寿命计算	466
11-4	残存寿命推定法	469
第 12 章	电气绝缘试验数据的处理	477
12-1	数据处理	477
12-2	数值计算	492

第1章 绪 论

1-1 电气绝缘测试技术的发展过程

电气绝缘材料在工业上的应用，最初仅用作将电气设备的带电部分和接地部分隔离开来。那时电气设备的工作电压较低，一般只有几百伏，所以对绝缘材料特性的测试要求也不高，仅以绝缘电阻和电气强度作为考核的标准，并以此作为衡量绝缘材料和电气设备的一项重要性能和质量指标。直读式电阻表 and 手摇发电机式高阻计，就是在当时创制出来的测试工具。现在我们所使用的手摇或电动式兆欧表，就是在这个基础上提高和发展的。随着测试仪器设备的改进，对测试的要求和范围也就逐步扩大，除对电气设备的绝缘电阻作为一般检验外，还规定把电气强度试验与绝缘电阻的测定作为在使用管理上的试验规程。

交变电场中存在着介质损耗的现象引起了人们的重视。经试验表明：绝缘材料性能的好坏和介质损耗的大小有密切关系。交流电桥的出现，为测量绝缘材料的介质损耗角正切值($\text{tg}\delta$)提供了条件。

随后又发现，当在高压电气设备的绝缘结构内部存有气隙时，会产生局部放电现象。它对电气设备上的绝缘体起了加速老化作用，从而降低绝缘体的使用寿命。对此，人们就采用油浸绝缘的方法，使结构内部的气隙被油料所填充，以此来防止局部放电的发生。这个方式使高压绝缘技术得到进一步

的发展。在测试技术方面也有了相应的提高，如对介质损耗的测定方法，即利用所测得的介质损耗角正切值的变化，来判别电气设备的绝缘老化程度；用 $\text{tg } \delta$ -温度特性，判定油浸式变压器的优劣程度。

固体绝缘材料在施加直流电压后，由于电场的作用，使介质产生极化（电荷、离子的位移，偶极子的偏转。如绝缘体由不同介质合成时，则在不同的介质界面上就有电荷移动），介质内部因此而产生的电流，称谓吸收电流。根据上述机理，在发电机线圈上，通过对吸收电流的测定，就可以判断线圈绝缘的老化程度。同样，也有用泄漏电流-电压特性曲线的形状来判定绝缘的老化程度。对发电机线圈的直流击穿电压值，可利用绝缘电阻-电压特性曲线的方法来测定。

在高压电气设备中，经常存在电晕放电现象，由此造成绝缘结构的损坏，对电气绝缘的使用寿命危害很大。因此人们对电晕放电的理论和测量电晕的方法进行了研究，并提出了关于防止电晕发生的理论和措施。如使用耐电晕性好的高压绝缘材料和合理地改进绝缘结构，均能减少或防止由电晕放电所引起的不良后果。

目前，电气绝缘材料多半是有机高分子材料。这些高分子材料和构成电气、电子设备及家用电气设备的其他材料，如金属材料、无机材料和半导体材料等相比，易于老化，成为设备可靠性的主要弱点。绝缘材料的耐老化性能决定设备的寿命和可靠性这一说法并不夸大。最近，随着设备的小型轻量化，性能好，安全可靠和寿命长的要求更加严格，应用电场和使用温度上显示出上升的倾向。

绝缘材料的电老化和热老化日趋重要。运行中电气设备的温升上升，绝缘材料受热老化而引起化学结构的变化，导致

绝缘结构和电气性能及机械强度下降,绝缘层厚度减薄,最后发生绝缘击穿。此外,由于反复加热冷却,引起绝缘层膨胀和收缩,会造成绝缘漆剥落,浇注树脂开裂等物理老化。

因此,评定各种绝缘材料的耐热老化性,了解它们的使用温度极限,进行相应的绝缘设计,能够提高和增加电气设备、家用电气设备的可靠性及寿命。为此,各方面一直在从事绝缘材料长期耐老化性能试验方法的研究。

绝缘材料的耐热老化性能试验,主要以热固性树脂、聚缩醛、尼龙、聚乙烯、聚碳酸酯及其他各种热塑性树脂为对象。

目前,热老化试验是采用将适当形状的试品放在比实际使用温度高得多的温度下进行长时间加热来测定性能变化的加速老化试验法。这种方法历史长,数据累积丰富,可靠性也高。但是需要很长的试验时间,试验费用高,所以迫切期待代替它的快速耐热寿命试验方法。目前,利用热分析仪与加速老化试验相关的某一种快速耐热寿命试验方法已逐步接近实际应用。

在电工产品用绝缘材料方面,云母、玻璃等无机材料尚未确立热老化试验方法。与有机绝缘材料相比,它们具有高过数倍的耐热老化性能,故难以进行评定。此外,复合绝缘材料将会更向纵深发展,因此,必需尽快研究出相应的测试方法。

从绝缘材料的使用情况看,老化由电场或热作用的单一老化因素引起的情况很少,而通常是由热-电场,热-机械应力,热-放射线,热-冷媒质等复合老化因素导致的。在这种情况下,老化现象十分复杂,故进行评定也是相当困难的,然而,为提高材料的耐久性和可靠性,就必须作为一项重要的研究课题提出来。如今由单一绝缘材料构成的绝缘结构的耐热老

化性能试验已受到人们的注意。由于今后绝缘材料将进一步发展,所以确立能迅速、简单且重复性好的试验方法和研究新材料一样是不可缺少的。

1-2 绝缘试验分类方法

各种绝缘材料的试验,根据其使用要求,大致可分为:

1. 电气特性试验

绝缘的电气强度、电阻系数、介质损耗和介电系数等被认为是绝缘材料的基本电气性能。对这些性能的试验方法,已经作为电气特性试验方法的基础而被列为国家试验标准。

2. 非破坏性试验

非破坏性试验,是指对被试验绝缘体的损伤、受潮、气隙等含有程度、电晕放电能量、有无局部缺陷等绝缘状况和绝缘老化程度的判定以及对击穿电压值的推定等试验方法。

3. 其他有关的试验

对于电气绝缘材料,还需要根据其在加工时所遇到的各种情况以及在实际使用中的条件,进行耐弧性、耐热性和机械强度(拉伸、压缩、弯曲、硬度、剪切、钻孔等)试验。此外,还有膨胀系数、耐燃性、耐水性、耐化学性和透湿性等各项试验。关于以上的这些试验方法,均已列入国家试验规程,故本书不再赘述。

1-3 绝缘试验的要求与应用

绝缘试验的目的,不仅要求准确无误地反映出绝缘材料的实际性能指标和电气设备的工作状况,而且要求能发掘先期性的隐患和潜伏的故障,进而达到预防的目的。

任何一种试验方法,试验时应尽可能简单易行,而且能够

直接与使用中所要求的特性进行比较。在实际使用条件下,绝缘材料往往要受到热、氧化、潮湿、振动、离心力、机械应力,和由温度的周期变化而引起的热胀冷缩以及在高电场作用下发生电晕放电等各种因素的影响。所以不能单纯认为只要在电气性能上不发生绝缘击穿就可满足要求,因此,在进行试验时,就要考虑到上述各种条件的影响,尽可能做到符合实际使用情况,有的就用人工模拟方法(如:人工气候试验和热、电老化试验等)来达到这个目的。

一般说来,电气设备的使用寿命往往取决于绝缘材料的使用寿命,而在电气设备上发生的大部分主要故障,往往是由绝缘损坏所引起。造成绝缘破坏的原因很多,但通常是与绝缘结构设计不合理,材料选用不当,制造工艺不合理,自然老化、设备不安全(无保护装置)、保养不妥以及其他事故的波及(如:雷击、风、水等灾害)有关。迄今为止,除对自然性的风、水等灾害事故难以采取有效措施外,在一般情况下,多能通过预防性的非破坏性试验来达到预先防止或减少事故的发生。

随着机械制造业的发展,对电气设备的要求也就越来越高。在提高单机容量,电气设备的小型化和高性能化,都是电气设备发展的趋势。在绝缘漆消除公害对策指导下发展的不饱和聚酯,聚丁二烯等无溶剂漆及水溶性漆包线,环氧树脂、聚四氟乙烯和与节省能源有关的紫外线固化的涂料都已开始应用。另一方面,除耐热性外,与绝缘材料有关的原子反应堆电缆的耐放射线材料的研制。在超高温、超低温或水下等严酷条件下仍能保持充分特性的新型绝缘结构的探索也正不断深入。这样,就对电气绝缘试验方法提出了新的任务和要求,而电气绝缘测试技术的发展,又为绝缘材料的研究和应用提供了必要的技术条件。

第2章 直流试验方法

2-1 概 述

绝缘材料在直流电压作用下,会呈现电流-时间特性;电导电流-电压特性等各有关参数。根据这些特性用以判别材料在直流电压作用下的绝缘性能称为直流试验法。同样,对于某些高压电气设备(如:大型电机、变压器和电缆等),也可以通过直流试验方法来确定它们是否能够继续使用。在一般情况下,试品电容量相当大,而且测量设备都有一定的内阻,当加上试验电压后,其作用相当于通过一个串联电阻对电容充电。因此,回路中的电流需要经过一段时间后才能达到稳定值,而这个时间的变化提供了被试绝缘体的有关性能指标。分析研究这个稳定过程,主要内容有:

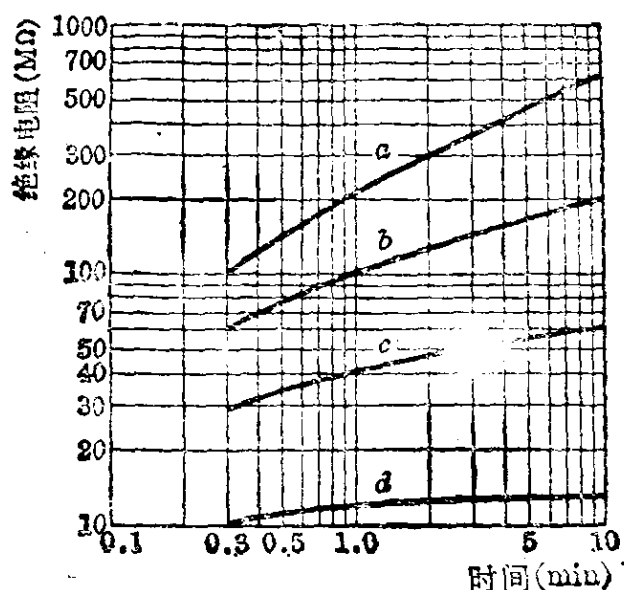
(1) 充电电流 它取决于被试绝缘体的几何尺寸、形状和材料的性质。这部分电流在开始阶段变化很大,但在很短时间内即可下降到忽略不计的程度。

(2) 吸收电流 系指通过绝缘体中随着时间增加而逐渐减少的电流。

(3) 电导电流 它包括两部分,即沿着绝缘表面的泄漏电流和通过绝缘体内部的离子电流。

由于总电流随着时间增加而逐渐衰减,因此,试品的视在绝缘电阻随着时间增加而逐渐上升,并趋向稳定。在试品的绝缘性能良好时,需要好几分钟才能达到稳定值;反之,如果

绝缘性能较差,则很快就会达到稳定值,如图 2-1 所示。试验过程中,一般不必绘出整条曲线,而只需读取 1 分钟及 10 分钟的数值即可。以 10 分钟时的绝缘电阻值与 1 分钟时的绝缘电阻值之比称为“极化指数”。曲线斜率愈大则极化指数愈大。反之,较平坦的特性曲线,其极化指数就小。在一般情况下,当温度为 20°C 时的 A 级绝缘材料,其极化指数应不小于 1.5; B 级绝缘材料的极化指数不得小于 2。这是确定某绝缘材料能否继续安全使用的依据。



- a—极化指数 3(干净与干燥的绝缘);
- b—极化指数 2;
- c—极化指数 1.5;
- d—极化指数 1.1(脏污潮湿的绝缘)

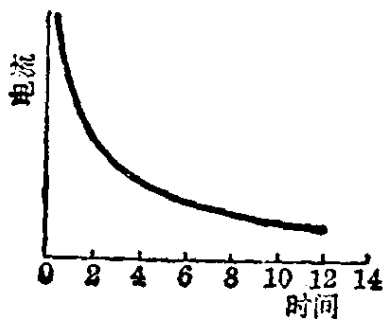
图 2-1 视在绝缘电阻随时间变化的典型曲线

在采用直流试验方法检查绝缘材料时,能够发现一些用其他方法所不能发现的局部缺陷。如在电机绕组端部的绝缘受到损伤时,用工频试验方法测得其受损部分的绝缘强度可能是足够的,以致难以找出故障隐患,但在电机运行时,如绕

组端部受到污损后，就有可能在该损伤处发生绝缘击穿或出现闪络放电。如果对电机绕组事先进行直流试验，就有可能检查出绕组端部受到污损或者绝缘内部存有缺陷之类的问题。这说明直流试验方法对确定电机能否继续运行具有非常重要的作用。

2-2 电流-时间特性

当直流试验电压施加在被试品的电极端时，由试品的吸



收现象所呈现出的电流-时间特性曲线如图 2-2 所示。通常吸收电流随着时间的增加而逐渐减少，只有在经过相当长时间后，才能逐渐趋于稳定。试品电流 $I_o(t)$ 可表示为：

$$I_o(t) = I_c(t) + I_a(t) + I \quad (2-1)$$

图 2-2 吸收电流特性

式中： $I_c(t)$ 为充电电流； $I_a(t)$ 为吸收电流； I 为电导电流。

充电电流 $I_c(t)$ 虽然在开始时很大，但在经过很短时间后，就可下降到可以略去不计的程度。因此，试品电流 $I_o(t)$ 可表示为：

$$I_o(t) = I_a(t) + I \quad (2-2)$$

实验证明，吸收电流在一般情况下，可表示为：

$$I_o(t) = BCV\varphi(t) \quad (2-3)$$

式中： B 取决于绝缘材料的性质、状态以及温度条件等因素， C 由绝缘体的几何尺寸所决定的电容量； V 为直流试验电压； $\varphi(t)$ 为吸收电流随时间而衰减的函数，即：

$$\varphi(t) = e^{-t/\tau} \quad (2-4)$$

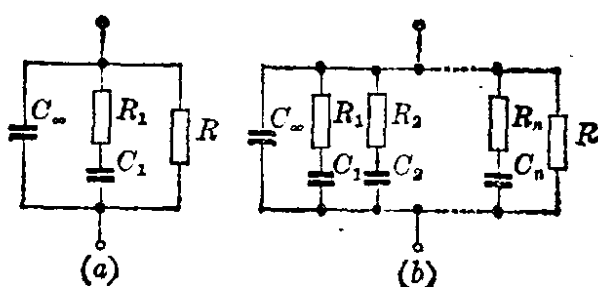


图 2-3 说明吸收现象的等值电路

试验时的等值电路如图 2-3(a)所示, C_∞ 为式(2-1)中与充电电流 $I_a(t)$ 相对应的因子, R 是与电导电流 I 相对应的因子, C_1 、 R_1 系与吸收现象相对应的因子。而图 2-3 (b)则表示在有多多个与吸收现象相对应的因子作用下的等值电路。这时 $\varphi(t)$ 可表示为:

$$\varphi(t) = t^{-n} \quad (2-5)$$

式中 n 的值为大于 0 而小于 1 ($0 < n < 1$), 它与介质的吸收特性有关。因为吸收电流是时间的函数, 所以 n 是电流对时间的关系绘在对数坐标纸上的曲线斜率。

此时吸收电流 $I_a(t)$ 可表示为:

$$I_a(t) = BCVt^{-n} \quad (2-6)$$

$$= At^{-n} \quad (2-7)$$

式中: $A = BCV$; n 为常数。对发电机线圈而言, 其值如表 2-1 所示。

发电机线圈的 n 值通常取 0.9。

经过充电时间 T 后, 两电极间短路放电电流 $I'_a(t)$ 的变化规律如图 2-4 所示, 其关系式为:

$$I'_a(t) = -I_a(t_1 - T) + I_a(t_1)$$

当充电时间 T 延长到足够长时, $I_a(t_1) \approx 0$, 所以

$$I'_a(t) = -I_a(t_1 - T) = -A(t_1 - T)^{-n} \quad (2-8)$$

表 2-1 线圈绝缘材料的 n 值

用途	绝缘材料	n
粘合	虫胶	0.98
	酚醛树脂	0.72
浸渍	K-31 胶	0.55
	聚酯树脂	0.85
主绝缘	云母	0.88
	虫胶粘合云母	0.8~0.9

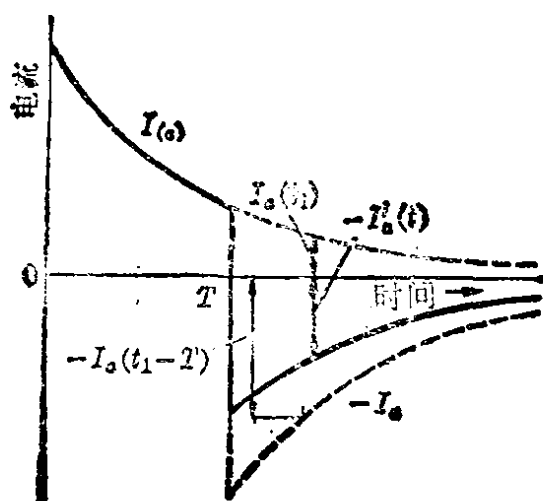


图 2-4 $I_a(t)$ 的变化规律

比较式 2-7 与 2-8 可见，试品充电时的吸收电流与放电时的放电电流是相对应的，且彼此为可逆。

2-3 电导电流-电压特性

常温下，在较低电压范围内，电导电流(I)是与施加电压按比例呈线性增加的，但在超过一定电压值后，随着电场强度的增大，离子活动加剧，此时电流的增长就比电压的增长要快得多。电导电流与电场强度之间的关系如图 2-5 所示。

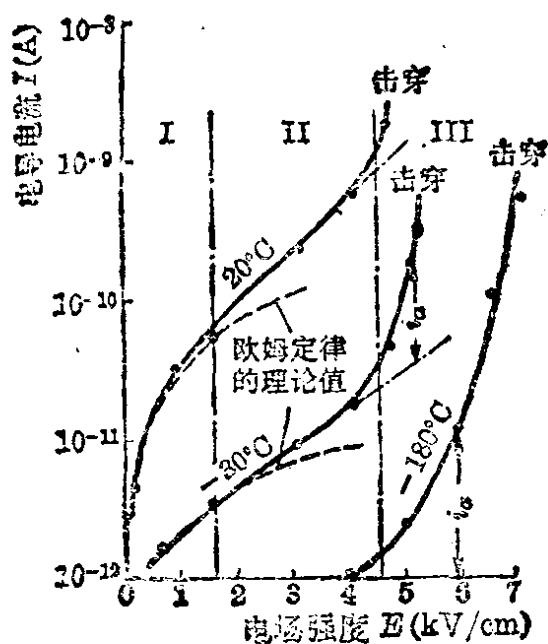


图 2-5 电导电流-电压特性

一般认为：在击穿前，根据变化特征，电导电流可划分为 I, II, III 三个区域。

设 I 为低电场区域，这时离子电流 i_i 、温度 $T(K)$ 、电场强度 E 及反应速度间的关系为：

$$i_i = 2eN\lambda_i\nu \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \sinh \frac{eE\lambda_i}{kT} \quad (2-9)$$

式中： N 为离子密度； ν 为频率； U 为电势； λ_i 为平均自由行程； k 为玻耳兹曼常数。

由于在低电场作用下时， $eE\lambda_i \ll kT$ ，故 i_i 可表示为：

$$i_i \approx \frac{2e^2\lambda_i^2 N\nu}{kT} \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) E \quad (2-10)$$

可见，离子电流近似同电场强度 E 成比例而满足欧姆定律(图 2-5 中区域 I)准则。

II 为较高电场区域，在较高电场的的作用下， $eE\lambda_i \gg kT$ ，这时式(2-9)可表示为：