

电气绝缘测试技术

《电气绝缘测试技术》编写组

上海:人民出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了电气绝缘材料及有关产品的主要测试方法和测量仪器装置。全书分两个部分。第一部分论述绝缘电气特性的测试方法,介绍运用电气参数来了解绝缘的电特性,如测定绝缘的泄漏状况、绝缘电阻、介质损耗、电气强度等;第二部分是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,测定绝缘的运行状况和对试品在遭到破坏或其运行寿命终止时的预测方法。全书注重于基本原理的分析和各种实验对电路的要求,且在各有关章节内还介绍了一些测量时应用的实际电路和测量仪器。

电 气 绝 缘 测 试 技 术

《电气绝缘测试技术》编写组

上海人民广播电台出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所友行 上海新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 16.5 字数 358,000
1972年10月第1版, 1972年10月第1次印刷

书号· 15·4·245 定价: 0.93元

前 言

“革命就是解放生产力，革命就是促进生产力的发展。”无产阶级文化大革命的伟大胜利，推动着我国社会主义革命和社会主义建设事业的迅速发展。工人阶级和贫下中农登上了上层建筑的政治舞台，使上层建筑和各个文化领域发生了深刻的变化。工农业生产呈现出一派前所未有的大好形势。这一切的胜利都是贯彻执行毛主席无产阶级革命路线的胜利，都是毛泽东思想的伟大胜利。

经过无产阶级文化大革命的战斗洗礼，广大工农兵群众认真学习马克思主义、列宁主义、毛泽东思想，以高昂的革命斗志，掀起了一个工农业生产的新高潮。技术革命和技术革新正在不断发展，新技术、新材料、新工艺、新产品成批涌现，在科研战线方面也出现了蓬蓬勃勃的崭新局面。

为了适应社会主义建设事业飞速发展形势的需要，便于广大工农兵阅读有关绝缘测试方面的参考书籍，我们总结了在工作中的一些体会和学习了有关兄弟单位的先进经验，从当前生产实际需要出发，编写了这本《电气绝缘测试技术》。在整个编写过程中，得到了华东电管局中心试验所、常州供电局、常州电子仪器厂、上海电表厂、上海电动工具研究所、上海绝缘测定器厂、上海机修总厂等许多兄弟单位的大力支持，上海交通大学、桂林电器科学研究所、上海电器科学研究所、水利电力部科学研究所等许多兄弟单位在审稿过程中还提出了许多宝贵意见，对本书的编写工作起了重要的指导作用，在此，我们表示感谢。

由于编写组的同志学习马列主义、毛泽东思想不够，业务水平又很低，调查研究也不够深入，因此，在本书中还会存在不少缺点，甚至会有某些错误之处，我们希望读者能对本书提出批评和建议，以便继续修改补充。

《电气绝缘测试技术》编写组

1971.12.

目 录

第一章 绪 论

1.1	电气绝缘测试技术的发展过程	1
1.2	绝缘材料试验的分类	4
1.3	绝缘试验的要求与应用	5

第二章 直流试验方法

2.1	概述	7
2.2	电流-时间特性	9
2.3	电导电流-电压特性	11
2.4	电流-温度特性	13
2.5	绝缘状况对试验结果的影响	14
2.6	测试方法	16
2.6.1	试验线路介绍	16
2.6.2	带电测量方法	20
2.7	影响试验结果的分析	23

第三章 绝缘电阻测量方法

3.1	概述	27
3.2	试品与电极	30
3.3	影响绝缘电阻测量的因素	45
3.4	测量仪器介绍	49
3.4.1	测量方法分析	49
3.4.2	GS6502型直读式 $10^{17}\Omega$ 超高值绝缘电阻测试仪	55
3.4.3	ZC31-1型振动电容式超高阻计	60

3.5 带电测量方法.....72

第四章 介电系数与介质损耗的测量

4.1 概述.....77

4.2 测量介电系数与损耗角正切用的试品与电极.....85

4.3 影响介电系数与介质损耗的因素.....97

4.4 测量方法.....99

 4.4.1 电桥法.....99

 4.4.2 谐振回路法105

 4.4.3 带电测量法122

4.5 试验方法分析141

 4.5.1 高压电桥保护电压对测量的影响141

 4.5.2 电桥低压侧对地电容的影响145

 4.5.3 电场干扰下用倒相法测量介质损耗角方法145

 4.5.4 电场干扰的消除方法151

第五章 交流电流试验方法

5.1 概述163

5.2 电流-电压特性.....163

5.3 电流波形-电压特性.....185

5.4 电流-温度特性.....188

5.5 测试方法188

第六章 电气强度试验

6.1 概述191

6.2 试品、电极与媒质的选择.....193

6.3 耐压试验的条件选择204

6.4 直流耐压试验213

6.5	交流耐压试验	217
6.6	脉冲耐压试验	227

第七章 电晕试验方法

7.1	概述	243
7.2	绝缘内部游离测量的基本方法和量度的 主要内容	248
7.3	测试方法的研究	271
7.3.1	测试仪器介绍	271
7.3.2	电缆绝缘内部游离试验	297
7.3.3	变压器绝缘内部游离试验	301
7.3.4	高压电机绝缘内部游离试验	308
7.4	耐电晕试验方法	310
7.5	防晕处理方法	327

第八章 匝间绝缘测试

8.1	概述	339
8.2	发电机定子绕组匝间绝缘试验	340
8.2.1	试验方法的选择	340
8.2.2	直接冲击试验法	342
8.2.3	感应冲击试验法	354
8.3	汽轮发电机转子绕组匝间绝缘测定	368
8.3.1	匝间电压降法	369
8.3.2	交流阻抗与功率损耗法的研究	370
8.3.3	矢量比较法	373
8.4	半导体匝间短路试验器	379
8.5	变压器绕组匝间绝缘试验	382

第九章 人工气候试验

9.1	概述	387
9.2	湿热试验	391
9.2.1	绝缘材料受湿热后的性能变化	392
9.2.2	试验方法	396
9.2.3	湿热试验设备	399
9.3	霉菌试验	403
9.3.1	霉菌试验方法的比较	404
9.3.2	试验菌种的选择	407
9.3.3	霉菌孢子悬液的配制方法	411
9.3.4	培养霉菌用的各种培养基配制方法	412
9.3.5	霉菌的移植、培养与保存	413
9.3.6	试验用器皿与培养基的灭菌方法	414

第十章 绝缘老化的检测

10.1	概述	416
10.2	绝缘油的老化	427
10.2.1	绝缘油的老化现象与原因	427
10.2.2	影响油质的因素	430
10.2.3	绝缘油老化的判定方法	434
10.3	套管绝缘老化的检测	436
10.4	变压器绝缘老化的检测	444
10.4.1	绝缘老化检定的基本方法	449
10.4.2	运行中对绝缘老化的判别方法	455
10.5	电机绝缘老化的检测	459

第十一章 电气绝缘击穿电压值的预测法

11.1	概述	466
------	----------	-----

11.2	电机线圈直流击穿电压值的预测法	467
11.3	电机线圈交流击穿电压值的预测法	470
11.3.1	交流电流试验法的原理	470
11.3.2	P_{42} 与交流短时击穿电压值的关系	472
11.3.3	交流短时击穿电压值的推定法	484

第十二章 电气绝缘使用寿命的推定方法

12.1	概述	489
12.2	快速热老化试验方法	490
12.3	残存寿命推定法	501

第 一 章

绪 论

1.1 电气绝缘测试技术的发展过程

伟大领袖毛主席指出：“人类社会的生产活动，是一步又一步地由低级向高级发展，因此，人们的认识，不论对于自然界方面，对于社会方面，也都是一步一步地由低级向高级发展，即由浅入深，由片面到更多的方面。”电气绝缘测试技术，也是在生产斗争过程中逐步发展起来的。最初，绝缘材料在工业上的应用，是用作将电气设备的带电部分和接地部分隔离开来。由于电气设备的工作电压不高，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。直读式电阻表和手摇发电机式的绝缘电阻表，就是在当时创制出来的测试工具。现在我们所使用的手摇式或电动式兆欧表，是在这个基础上的提高和发展。随着对测试要求的提高和涉及范围的扩大，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。

生产斗争的不断发展，要求“人们的认识运动也应跟着推移和发展”。“当着人们已经认识了这种共同的本质以后，就以这种共同的认识为指导，继续地向着尚未研究过的或者尚未深入地研究过的各种具体的事物进行研究，找出其特殊的

本质”。自从发现在交变电场中存在着介质损耗的现象后,就引起人们的重视和研究。经过试验表明:绝缘材料性能的好坏,和介质损耗的大小有密切关系。交流电桥的问世,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,起了加速老化的作用,降低了绝缘体的使用寿命。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满,从而防止了局部放电的发生。这个方式的采用,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($\text{tg } \delta$)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。

在认识了事物的变化规律和表现形式以后,就可以利用它来为生产服务。例如当发现固体绝缘材料在施加直流电压后,由于外电场的作用,使介质产生极化(电荷、离子的位移;偶极子转动。如绝缘体由不同介质合成时,则在不同介质的交界面上就有电荷移动),介质内部因此而产生电流,此种电流称吸收电流。根据这个道理,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,可以用绝缘电阻-电压特性曲线的方法来测定。

在高压电气设备中,经常存有电晕现象,造成绝缘结构的损坏,这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。

“社会的财富是工人、农民和劳动知识分子自己创造的。只要这些人掌握了自己的命运，又有一条马克思列宁主义的路线，不是回避问题，而是用积极的态度去解决问题，任何人间的困难总是可以解决的。”“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”毛主席的伟大教导，鼓舞着我国工人阶级攀登科学技术高峰的斗志。自建国以来，在毛主席和党的英明领导下，我国的科学技术事业日新月异迅速发展，取得了伟大的成绩。但这个发展过程也是充满着两条路线的斗争，它受到叛徒、内奸、工贼刘少奇及其在各地代理人所推行的修正主义路线的干扰。主要表现在：是坚持无产阶级政治挂帅，还是技术挂帅；是相信群众，依靠群众，大搞群众运动，还是脱离群众，脱离实际，走专家路线；是发扬“自力更生，艰苦奋斗”的革命精神，走“独立自主”的道路，还是迷信洋人，搞“洋奴哲学”、“爬行主义”。

我国工人阶级和革命知识分子，坚持毛主席无产阶级革命路线，响应伟大领袖毛主席提出的“破除迷信，解放思想”的伟大号召，树雄心，立壮志，发扬敢想、敢说、敢闯的革命精神，以冲天的革命干劲，创造出无数具有世界先进水平的尖端产品，技术革新犹如烂漫的山花开遍祖国各个角落，在我国工农业生产 and 科学技术的发展史上，写下了光辉灿烂的一页。上海交流仪器厂的工人同志早在1958年，就试制成功了测试设备——高压电桥，填补了我国在介质损耗测量方面的空白。同时也批驳了“科学研究神秘论”，“工人大老粗不能碰”的谬论。在毛泽东思想指引下，许多单位也都先后试制成功了游离测试仪、超高值绝缘电阻测试仪、匝间绝缘试验设备等测试工具，

使我国测试技术水平提高到一个新的阶段。最近几年来,我国又试制成功了能够测量 $10^{19} \Omega$ 的超高阻计和用于带电测量的高压电桥。带电测试方法的成功和发展,不仅能更加如实地反映产品在运行时的实际情况,而且对工农业的生产发展创造了新的条件。毛主席教导我们:“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。”我国人民经过无产阶级文化大革命的战斗洗礼,阶级斗争和路线斗争的觉悟有了很大的提高。文化大革命中所激发出来的精神力量,正在变成巨大的物质力量,一个革命和生产的新高潮正在全国掀起,我们伟大的社会主义祖国建设得更加强大,更加美好。

1.2 绝缘材料试验的分类

各种绝缘材料的试验,根据其使用要求,大致可分为:电气特性试验;非破坏性试验;其他有关的试验三类。

一、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。

二、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、气隙含有程度,电晕放电的程度,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。

三、其他有关试验

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

毛主席教导我们:“马克思主义的哲学认为十分重要的问题,不在于懂得了客观世界的规律性,因而能够解释世界,而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”进行绝缘试验的目的,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。但是,“世界上的事情是复杂的,是由各方面的因素决定的。”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、因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,“看问题要从各方面去看,不能只从单方面看。”如果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,这就会陷入片面性和盲目性,就不可能解决在实际使用中将会发生的问题。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,有的就用人工模拟的方法(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,又往往是由于绝缘损坏所引起。造成绝缘损坏的原因很多,但通常是与绝缘结构设计不合理、材料选用不当、制造工艺不周、自然

老化、设备不安全(无保护装置)、保养不妥以及其他自然事故(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,一般都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。

一切客观事物都是相互联系、相互影响着的。随着机械制造业的飞速发展,对电气设备的要求就越来越高。在提高电机的单机容量,电器的小型化和高性能化,均是电气设备发展的趋势。这样,就向电气绝缘材料提出了新的任务和要求。由于电气绝缘直接决定电气设备的使用寿命和它的先进性,因此提高绝缘技术水平就能够促进电气设备的进一步改革。高分子材料的发展,为电气绝缘材料的发展开辟了新的途径,而电气绝缘测试技术的发展,又为绝缘技术的研究和应用提供了条件。

直流试验方法

2.1 概 述

当在绝缘材料上施加一定的直流电压后，材料本身就会呈现出绝缘的各种特性。例如：电流-时间特性、电导电流-电压特性等。依据这些特性就可以判定材料的绝缘性能，这就是直流试验方法。同样，对于某些高压电气设备（如大型电机、变压器、电器和电缆等设备），也可以通过直流试验的方法，确定其是否能够继续使用。毛主席说：“成为我们认识事物的基础的东西，则是必须注意它的特殊点，就是说，注意它和其他运动形式的质的区别。只有注意了这一点，才有可能区别事物。”在一般情况下，试品均具有相当大的电容量，而且试验线路和测量设备均有一定的内阻，当加上试验电压后，其作用等于通过一个串联电阻对电容加以充电。因此，回路中的电流需要经过一定的时间才能达到稳定值，而这个时间的变化提供了被试绝缘体的性能指标。

当直流电压加在一个含有电容的回路上时，其电流可以分为三个部分：

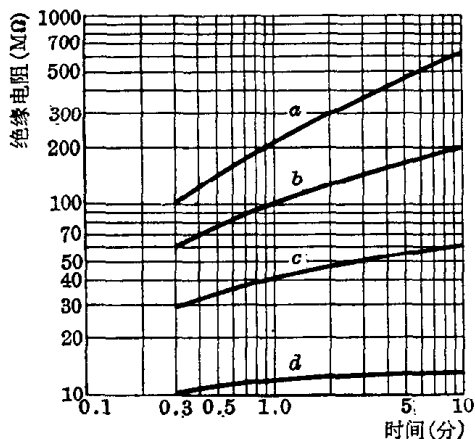
1. 充电电流：它决定于被试绝缘体的几何尺寸、形状和材料的性质。这部分电流在开始时最大，但在很短时间内下降到可以略去的地步。

2. 吸收电流：它流过绝缘体的内部并且随着时间逐渐

减少。

3. 电导电流：它可分为两个部分，即沿着绝缘表面的泄漏电流和通过绝缘内部的电导电流。

由于总的电流是随着时间的增加而逐渐衰减的，因此，试品的视在绝缘电阻随着时间的增加而逐渐上升，并趋向稳定。在开始时上升较快，特别是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，如果绝缘性能不好时，则很快就会达到稳定值，如图 2-1 所示。其电阻随时间变化的曲线斜率则可用来说明绝缘的状态。一般不需要绘出整个曲线，而只要读取 1 分钟及 10 分钟的读数即可。以 10 分钟的绝缘电阻值与 1 分钟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，曲线平坦的则极化指数就小。在一般情况下，当 20°C 时 A 级绝缘的极化指数最小不宜小于 1.5，B 级绝缘的极化指数不宜小于 2。这就为



- 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

我们提供了绝缘是否能够继续安全使用的依据。

在发掘绝缘的局部缺陷方面，用直流试验法效果显著，它能发现其他方法所不能发现的毛病。如对电机绕组端部绝缘，当受到损伤后，在用工频电压试验时，受损部分的绝缘强