

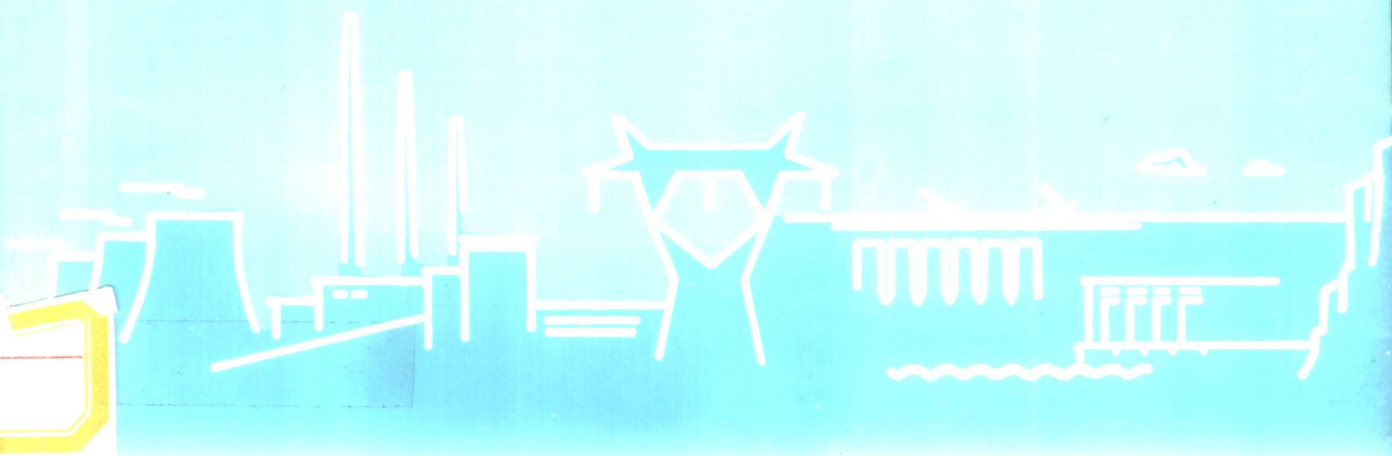


普通高等学校电力工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

电绝缘诊断技术

清华大学 朱德恒 谈克雄 主编



中国电力出版社

普通高等学校电力工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

电 绝 缘 诊 断 技 术

清华大学 朱德恒 谈克雄 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书介绍电气设备绝缘诊断技术的原理。主要叙述了绝缘的老化,设备的可靠性与寿命评估,诊断技术中的信号处理与模式识别以及诊断方法等。

本书系高等学校“高电压及绝缘技术”、“电力系统及其自动化”等专业本科生或研究生的选修课教材,并可供电力部门或其他行业的动力部门从事电力基建、运行、维护及试验人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电绝缘诊断技术/朱德恒,谈克雄主编. - 北京:中国电力出版社, 1998.9

高等学校教材

ISBN 7-80125-876-2

I. 电… II. 朱…, 谈… III. 电气设备-绝缘性能-测量-高等学校-教材 IV. TM855

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 22617 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http://www. cepp. com. cn](http://www.cepp.com.cn))

北京市地矿印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 4 月第一版 1999 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.75 印张 218 千字

印数 0001—3350 册 定价 10.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书根据中国电力企业联合会核定的普通高等学校电力工程、热能工程、水电工程类专业第四轮本科教材出版计划编写。主要介绍了电绝缘诊断技术的原理，与西安交通大学严璋教授编写的《电气绝缘在线检测技术》一书互为补充。

全书共分八章。第一章为绪论；第二章叙述了绝缘的各种老化形式；第三章叙述了设备可靠性与寿命评估的基本原理；第四章叙述了计算机辅助监测与诊断系统的组成部分；第五至七章叙述了诊断技术中的信号处理和各种识别诊断方法；第八章叙述了故障诊断专家系统的基本知识。

本书由朱德恒编写第一章、第二章以及第六章的第一、四节；王昌长编写第三章和第四章；谈克雄编写第五章、第六章的第二、三节和第七章；高宁同志编写第八章。全书由朱德恒和谈克雄共同任主编。

本书由西安交通大学严璋教授主审并提出了不少宝贵意见，在此致以深切谢意。

本书不妥和错误之处，恳切希望读者批评指正。

编 者

1998 年 12 月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 绝缘诊断技术的含义	1
第二节 绝缘诊断技术的意义	1
第三节 绝缘在线诊断技术的发展概况	3
第二章 绝缘的老化	4
第一节 概述	4
第二节 电老化	4
第三节 热老化	7
第四节 机械老化	9
第五节 环境老化	9
第三章 可靠性与寿命评估	11
第一节 概述	11
第二节 不可修复设备的可靠性指标	11
第三节 可修复设备的可靠性指标	16
第四节 截尾寿命试验和平均寿命的估计	19
第五节 电力设备的可靠性评估	21
第六节 电力设备的失效分析	32
第四章 计算机辅助监测与诊断系统	46
第一节 系统的组成与要求	46
第二节 传感器	47
第三节 数据采集与信号传输	58
第四节 计算机分级管理系统	61
第五章 诊断技术中的信号和数据处理方法	63
第一节 概述	63
第二节 时域平均法	64
第三节 相关分析	64
第四节 干扰自适应抑制	67
第五节 信号的自回归模型	69
第六节 曲面拟合	70
第七节 频域处理	71
第八节 小波变换	73

第六章 诊断方法	86
第一节 依据规则的诊断分类	86
第二节 依据样板的诊断分类	94
第三节 故障点定位方法	100
第四节 电力设备诊断举例	105
第七章 诊断技术中的模式识别方法	112
第一节 概述	112
第二节 基于距离的模式归类法	115
第三节 基于人工神经网络的模式识别	121
第四节 分形特征法	132
第八章 故障诊断专家系统	136
第一节 概述	136
第二节 知识与知识表达方法	138
第三节 推理诊断方法	142
第四节 故障诊断专家系统的构造过程	147
第五节 诊断专家系统的发展方向	148
参考文献	150

第一章 绪 论

第一节 绝缘诊断技术的含义

“诊断”(Diagnosis)一词原是医学名词,它的含义是“根据症状来识别病人所患何病”。从智能理论的观点来看,诊断是医生收集病人症状(包括医生的感观、病人的主观陈述以及各种化验检测所得的结果),并根据症状进行分析处理,以判断患者的病因、严重程度,从而确定对患者的治疗措施与方案的过程。

电气设备绝缘诊断技术借用了上述概念,其含义是通过对电气绝缘的试验和各种特性的测量,了解及评估设备在运行过程中的状态,从而能早期发现故障的技术。“试验和测量”是“诊”,“识别和评估”是“断”。这是对诊断技术广义的了解。

狭义而言,“诊断”指故障诊断,指特征量收集后的分析判断过程。特征量的收集过程称为“检测”或“监测”(连续或随时进行的检测),例如称之为“状态监测与故障诊断”(Condition Monitoring and Failure Diagnosis)。

本书“诊断”采用的是广义的含义。

第二节 绝缘诊断技术的意义

电气设备由绝缘材料和导电、导磁材料及结构材料构成。绝缘材料大多为有机材料,如矿物油、绝缘纸、各种有机合成材料等。在运行中,由于受到电、热、机械、环境等各种因素的作用,绝缘材料容易逐渐劣化,造成设备故障,引起供电中断。设备的绝缘结构性能的好坏,往往成为决定整个电气设备寿命的关键所在。例如,在对 110kV 及以上的电力变压器的 93 次事故原因进行分析时发现,其中由于匝间绝缘、引线及对地绝缘、套管绝缘所引起的各种事故分别占事故总数的 43%、23%、15%;而因铁芯、分接开关等造成的非绝缘事故仅占 20% 以下。

电力设备特别是大型高压设备发生突发性停电事故,会造成巨大的经济损失和不良的社会影响。要提高电力设备绝缘的可靠性,一种办法是提高设备的质量,选用优质材料及先进工艺,优化设计,合理选择设计裕度,力求设备在工作寿命内,不发生故障。但这种方法将会导致制造成本增加。此外,设备在运行中,总会逐渐老化,而大型设备不可能像一次性工具那样,“用过即丢”。因此另一方面,必须对设备进行必要的检查和维修,这构成了电力运行部门的重要工作内容。

早期电力设备采取的是事后维修的方式,即使用设备直到它发生故障后进行维修,因此,对于大型设备,发生突发性事故将造成巨大损失。

其后,发展为对电力设备进行定期试验和维修,即预防性维修。现在,定期预防性试

验和维修已在电力部门形成制度，对减少和防止事故的发生起到了很好的作用。但预防性试验是离线进行的，有很多不足之处：

(1) 需停电进行试验，而不少重要电力设备，轻易不能停止运行。

(2) 停电后设备状态（如作用电压、温度等）和运行中状态不一致，影响判断准确性。

(3) 由于是周期性定期检查，而不是连续地随时监测，绝缘仍可能在试验间隔期内发生故障。

(4) 由于是定期检查和维修，设备状态即使良好时，按计划也需进行试验和维修，造成人力物力浪费，甚至可能因拆卸组装过多而造成对设备的损坏，即过度维修。

因此，目前兴起以状态监测（通常是在线监测）和故障诊断为基础的状态维修。其基本原理可简述如下：绝缘的劣化、缺陷的发展虽然具有统计性，发展的速度也有快慢，但大多具有一定的发展期。在这期间，会有各种前期征兆，表现为其电气、物理、化学等特性有少量渐进的变化。随着电子技术、计算机技术、光电技术、信号处理技术和各种传感技术的发展，可以对电力设备进行在线的状态监测，及时取得各种即使是很微弱的信息。对这些信息进行处理和综合分析后，根据其数值的大小及变化趋势，可对绝缘的可靠性随时作出判断和对绝缘的剩余寿命作出预测，从而能及早发现潜伏的故障，必要时可提供预警或规定的操作。状态监测（在线监测）与故障诊断技术的特点是可以对电力设备在运行状态下进行连续或随时监测与判断，因此可避免上述预防性试验的缺点。

在线试验和离线试验并非对立，而是相辅相成的。如在线监测中发现事故隐患后，必要时可在离线状态下进行更为彻底的全面检查，电气设备诊断过程流程图如图 1-1 所示。

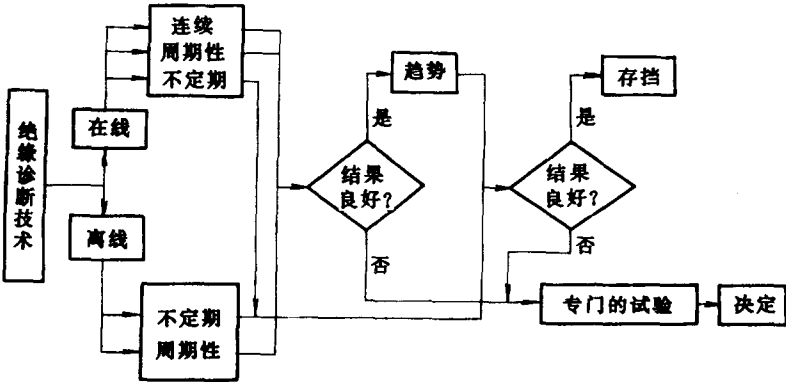


图 1-1 电气设备诊断过程流程图示意图

采取状态监测与故障诊断技术后，可以使预防性维修向预知性维修即状态维修过渡，从“到期必修”过渡到“该修则修”。

绝缘在线诊断技术有很大的难度。绝缘潜伏性故障前期征兆的信号通常极为微弱，而运行条件下现场又存在强烈的电磁干扰。因此，抑制各种干扰，提高信噪比是在线监测中首先需要解决的难题。此外，监测的各种特征量和绝缘的状态通常也不是一一对应的，他

们具有错综复杂的关系。如果说对离线的预防性试验结果的分析,已经积累了大量经验,据此可以制订出相应的规程推广施行,那么对于在线诊断,现在仍还处于研究、试运行、积累经验的阶段。发展绝缘在线诊断技术,既需对绝缘结构及其老化机理有深入的了解,也需应用传感、微电子等高新技术。它是具有交叉学科性质的一门新兴技术,有重大的学术意义,也有显著的经济价值。

第三节 绝缘在线诊断技术的发展概况

国外对绝缘在线监测技术的研究始于 60 年代,但直到 70~80 年代,随着传感、计算机、光纤等高新技术的发展与引用,绝缘在线诊断技术才真正得到迅速发展。加拿大、日本、前苏联等国陆续研制了油中溶解气体,变压器、发电机、气体绝缘封闭组合电器(GIS)等的局部放电,电容型绝缘的介质损耗因数等特性,交链聚乙烯电缆的泄漏电流等在线监测系统。其中少数已发展成为正式产品。国际大电网会议于 1990 年发表了关于电气设备绝缘诊断技术的综述性论文,对截止 80 年代末在这一领域的研究成果作了系统的总结。

我国对在线诊断技术的重要性也早有认识,早在 60 年代就提出过不少带电试验的方法,但由于操作复杂,测量结果分散性大,没有得到推广。80 年代以来,随着高新技术的发展与引用,我国的绝缘在线诊断技术也得到了迅猛发展。由于我国工业发展迅速,用电一直紧张,加之部分电力设备故障率较高,因此对于推行在线诊断技术以提高电力系统的运行可靠性,显得更为迫切。我国电力部门的很多科研院所和高等学校的不少有关专业都相继开展了这方面的研究。自 1985 年以来,由原电力部主持,先后三次(分别在安徽、湖北、广东三省)召开了“全国电力设备绝缘带电测试、诊断技术交流会”,不仅进行了学术交流,而且就如何发展和推广在线诊断技术开展了讨论。可以认为,我国绝缘在线诊断技术的研究和国际上是同步发展的,处于几乎相当的水平。

由于在线诊断技术的难度,无论是国内,还是国外,除个别项目以外,大多还不很成熟,仍处于研究发展阶段。但由于客观的需要,相信绝缘在线诊断技术一定能迅速发展成长,从而对提高电力系统的运行水平发挥巨大的作用。

第二章 绝缘的老化

第一节 概 述

电气设备的绝缘在运行中会受到各种因素如电场、热、机械应力、环境因素等的作用，其内部将发生复杂的化学与物理变化，导致性能逐渐劣化，这种现象称为老化。在设备正常运行的条件下，老化是渐进的、长期的过程。

绝缘材料的老化以有机绝缘材料的老化问题最为突出。液体有机绝缘材料老化时表现上发生混浊、变色等；高分子有机绝缘材料老化时表现上发生变色、粉化、起泡、发粘、脆化、出现裂纹或裂缝、变形等。多数情况下，绝缘材料的老化是由于其化学结构发生了变化，即由于降解、氧化、交联等化学反应，改变了其组成和化学结构；但是有的老化仅仅是由于其物理结构发生了变化所致，例如绝缘材料中的增塑剂不断挥发或其中球晶不断长大，这些都会使材料变硬、变脆而失去使用价值。通常绝缘材料性能的劣化是不可逆的，其最终将会引起击穿，直接影响电力设备和电力系统的运行可靠性。

绝缘劣化过程的发展需要一定能量，亦即依赖于外界因素的作用，如电场、热、机械应力、环境因素等。运行情况下常常是多种因素同时作用，互相影响，过程复杂。单一作用因素下的老化规律研究较多，而对于多种因素同时作用时的老化规律目前还未得到充分研究。

绝缘劣化程度要根据其性能的变化而评定。当绝缘的性能指标达到某些极限值时，实践证明，绝缘已不能使用，其寿命已达极限。这些性能指标的限值称为阈值或判据。绝缘的劣化可以用三维图象描述，三个座标轴分别表示时间、外界作用因素和性能。通常三维图象可分解成二个平面图形：不同强度的作用因素下性能和时间变化关系以及在给定绝缘损坏的性能阈值下作用因素强度和时间的关系。

绝缘劣化的特征量有直接和间接之分。前者直接指明了运行中所必须具有的性能，如耐电强度、机械强度等；后者和这些必须具有的性能只是有着某种联系，但并无直接的、确定的关系，如绝缘电阻、介质损耗因数等。直接特征量的确定通常采用破坏性试验方法；而间接的特征量则可以通过非破坏性试验方法加以确定。因此间接的特征量对于绝缘在线诊断有着极其重要的意义。

第二节 电 老 化

在电场长期作用下绝缘中发生的老化称为电老化。对于高电压设备的绝缘，电老化是不容忽视的。

放电电老化是由于绝缘内部或表面发生局部放电而造成的。特殊情况下也可能发生无

放电的电老化,如因局部电流过大发生热不平衡而引起的老化和因电化学反应使金属导体被腐蚀,其残留物在电介质中或表面形成导电痕迹使绝缘性能劣化甚至丧失而造成的老化。但放电电老化是电老化的主要形式,通常把放电电老化简称为电老化。

一、电老化机理

电老化很复杂,它包括局部放电所引起的一系列物理效应和化学效应。

(1) 带电质点的轰击。局部放电过程产生的带电质点(电子和正、负离子)在电场作用下具有的能量可达 10eV 以上,而一般高聚物的键能只是几个电子伏。因此,当这些带电质点撞击到气隙壁上时,就可能打断绝缘的化学键,产生裂解,破坏其分子结构。

(2) 热效应。在放电点上,介质发热可达很高温度。温度升高会发生热裂解,或促进氧化裂解。同时温度提高会增大介质的电导和损耗,由此产生恶性循环,加速老化过程。

(3) 活性生成物。在局部放电过程中会生成许多活性生成物,如臭氧、氮氧化物,有水分时产生硝酸、草酸等。这些生成物进一步与绝缘材料发生化学反应,腐蚀绝缘体,导致介电性能劣化。

(4) 辐射效应。局部放电会产生可见光、紫外线等高能辐射,引起高聚物的裂解。对于某些材料,上述射线会促使分子间的交联,从而使材料发脆。

(5) 机械力的效应。断续爆破性的放电和放电时产生的高压气体,都会引起绝缘体开裂,从而形成新的放电点。

以上几种破坏性机理往往是同时存在的。对于不同的材料和在不同的工作条件下,可能以其中某一种为主。工作场强高、气隙大时,带电质点的轰击作用大;工作温度高、材料的介质损耗大、材料的耐热性差,则热效应作用大;对于湿度大或有污染的情况下,放电产生的活性生成物的破坏就更为明显。上述几种效应中,前三种效应是主要的。

二、固体绝缘的电老化

固体绝缘是绝缘结构中不可或缺的组成部分,其具有绝缘和机械支持的双重作用。电瓷、玻璃和云母是常用的无机绝缘材料。交链聚乙烯、硅橡胶、环氧树脂等有机高分子绝缘材料也得到了广泛的采用。与无机绝缘材料相比,有机绝缘材料更容易产生电老化。

固体中的电老化其形成和发展经常呈“树枝”状。由于局部放电而形成的树枝被称为电树枝。在电极尖端电场集中处,首先产生放电,引发树枝状放电痕迹,随着时间推移,树枝的长度增大,直到最后导致击穿。在聚乙烯半透明材料中的试验清楚地揭示了电树枝的发展过程。用一对针形电极埋在聚乙烯材料中,当针尖附近的电场强度足够高时,就会产生树枝状局部放电。当针尖端部存在气隙时,放电树枝成长为刷状,如图 2-1 (a) 所示。当针尖端部没有气隙时,放电树枝成长为丛林状,如图 2-1 (b) 所示。随着电压施加时间增加,树枝逐渐发展,直到贯通间隙,引起击穿,如图 2-2 所示。

引发树枝还有其他方式。交链聚乙烯电缆,由于制造过程中残留了水分,或者由于运行过程中侵入了水分,这些水分会在电场力的作用下,逐渐渗入绝缘层深处,以致形成

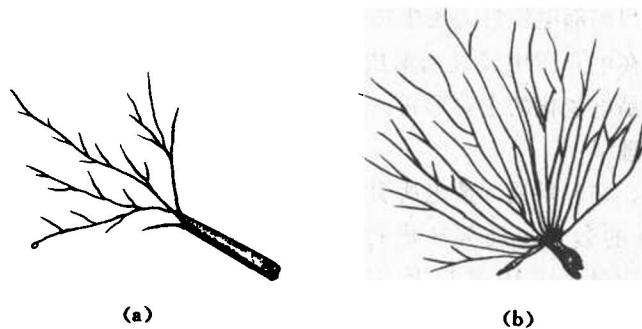


图 2-1 两种树枝放电的模型
(a) 刷状树枝；(b) 丛林状树枝

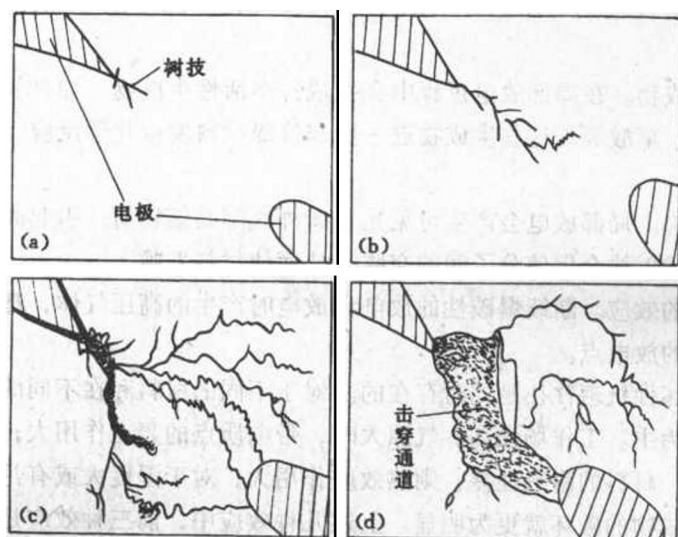


图 2-2 树枝发展过程
(a) 开始；(b) 成长分枝；(c) 到达另一电极；(d) 击穿

所谓水树枝，如图 2-3 所示。水树枝和电树枝的外观特征不同，电树枝具有清晰的分支，树枝管道是连续的；水树枝则常呈绒毛状的一片或多片，有扇状、羽毛状、蝴蝶状等，片与片之间不一定连续。由电化学过程引发的则称为电化学树枝。



图 2-3 聚乙烯中的水树枝

各种形式的树枝一经形成，随着其发展，往往就和局部放电分不开了。由于电老化和局部放电紧密相关，故监测局部放电是诊断早期故障的重要方法。

三、液体浸渍绝缘的电老化

工程上很少单独采用液体电介质作为绝缘。液体通常和固体绝缘构成复合（浸渍）绝缘后使用。最常用的液体浸渍绝缘是以矿物油浸渍绝缘纸构成的油浸纸绝缘。近年来电容器中也采用了合成液体（如二芳基乙烷）和合成薄膜（如聚丙烯薄膜）构成的浸渍绝缘。

液体浸渍绝缘需要经过干燥、浸渍及脱气等处理。局部放电可能发生在固体或液体内残留的小气泡中或发生在电极锐边缘电场集中处以及很薄的液体层中。放电过程将使液体分解产生气体，另一方面气体将溶解于液体。所以放电一经激发，以后的发展将取决于液体的产气和吸气过程的竞争。如果产气过程强于吸气过程，气泡将扩大与增多，放电作用将增强；反之，气泡将缩小，而放电作用也将减弱。

油浸纸绝缘中的局部变电，一方面会使油分解而产生各种气体，另一方面又会产生X-蜡沉积在固体绝缘上，在那里形成了更强烈的放电，出现过热点，促使固体绝缘破坏。在损坏的变压器中，经常可以观察到在油浸纸绝缘表面存留树枝状放电痕迹。在油浸纸电缆中，可以看到放电通道从导体表面开始沿着绕包层间发展（在遇到纸的弱点时，也可能穿透纸层），最后导致击穿。

由于局部放电会导致上述产气和吸气过程，因此除了直接监测局部放电以外，分析油中溶解气体的气相色谱的方法也可作为监测诊断的重要手段。

四、绝缘寿命和外施电压的关系

电气设备内部绝缘在工作电压下可能发生电老化，实验表明，当电场强度远低于其短时击穿场强时（ $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{5}$ 或更小），即可能发展起电老化。

随着外施电压的增加，局部放电将加剧，其放电量、放电重复频率、放电功率都会相应增加，因此绝缘的电老化速度加快，寿命缩短。在外施电压较高，寿命较短的条件下（几小时到 $10^3 \sim 10^4$ h），绝缘的平均寿命 $\bar{\tau}$ 和外电压 U 存在着反幂数的关系，即

$$\bar{\tau} = AU^{-n} \quad (2-1)$$

式中 A 、 n ——常数，决定于材料特性和外施电压种类、电场分布特征等试验条件。

式（2-1）在双对数坐标系中为一直线，如图2-4中曲线1所示。

根据式（2-1），即使电压很低甚至为零时，绝缘仍将由于电老化而在寿命终结时损坏，这是不合理的。所以，当电压较低、寿命较长（ 10^4 h以上）时，式（2-1）不适用。此时，绝缘平均寿命 $\bar{\tau}$ 可定性地表达为

$$\bar{\tau} = A_1(U - U_0)^{-n_1} \quad (2-2)$$

式中 A_1 、 n_1 ——常数；

U_0 ——绝缘的局部放电起始电压。

此时的绝缘电老化寿命与外施电压关系如图2-4的曲线2所示。

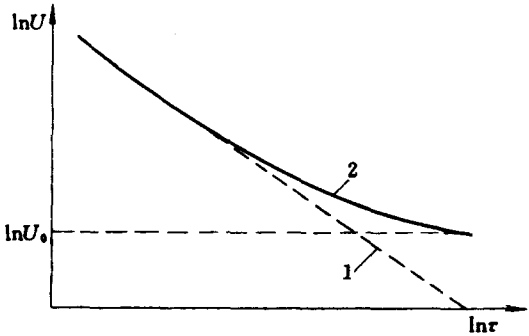


图 2-4 绝缘电老化寿命与外施电压的关系
1—根据式（2-1）得出的关系；2—根据式（2-2）得出的关系

第三节 热 老 化

在热的长期作用下发生的老化称为热老化。室温下设备绝缘的热老化发展速度极为缓

慢。但多数电气设备在运行中会产生热量，工作温度明显高于室温。这种情况下，设备绝缘的热老化往往是决定其寿命的主要因素。

一、热老化机理

有机绝缘材料热老化的主要过程是在热的作用下绝缘发生了热降解。其中包括使主链断链的解聚反应或无规断链反应和使侧基从主链上脱离的消去反应，产生大量低分子挥发物，并引起一系列更为复杂的反应。通常所谓的热老化是指氧化老化，即在热和氧协同长期作用下发生的老化。热氧化老化初期通常会出现过氧化氢物，而它分解产生自然基，然后引发出系列氧化和断链化学反应，使分子量下降，含氧基团浓度增加，并不断挥发出低分子产物，结晶度也随之改变。随着绝缘物质结构的变化，其电气性能和机械性能都逐渐劣化。

二、热老化速度和温度的关系

随着温度上升，绝缘的热老化速度迅速增加。热老化速度决定于化学反应速度，后者遵循 Arrhenius 方程

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \quad (2-3)$$

式中 v ——化学反应速度，即单位时间内发生化学反应的物质的质量；

v_0 ——常数；

k ——玻耳兹曼常数；

W_a ——该种化学反应的活化能；

T ——绝对温度，K。

通常认为，由热老化决定的绝缘寿命与其化学反应速度成反比例关系。由此可得绝缘寿命与其温度的关系。试验表明，对于不同类型的绝缘，温度每升高 $8 \sim 12^\circ\text{C}$ （平均约为 10°C ），其寿命将会缩短一半。

三、矿物油和油浸纸绝缘的热老化

矿物油为一组烃类的混合物。矿物油的热老化属于热氧化老化。裸露的金属往往是促进油氧化的催化剂。矿物油在热老化的过程中，将会产生各种气体（如低分子烃类气体和 CO 、 CO_2 等），有机酸和固体聚合 X-蜡（俗称“油泥”）。有机酸和沉积于绝缘上的 X-蜡将使介质损耗因数上升。X-蜡还将使设备的散热条件恶化，这又将加速热老化过程，形成恶性循环。热老化过程产生的气体可溶解于油中或发展形成气泡，这取决于温度、电场强度和油的吸气产气特性。形成气泡后，如存在强电场则将引发局部放电。后者又将引起电老化。

绝缘纸由植物纤维组成。绝缘纸在热老化过程中也将产生气体如 CO 和 CO_2 等。油和纸在热老化过程中都将分解产生气体，因此油中溶解气体的色谱分析是其故障诊断的重要手段。但分析气体还不能很好的判断究竟是油还是纸发生了热老化。近年来开始采用高性能的液相色谱仪，以分辨绝缘纸在热老化过程中分解的特殊产物如糠醛 $\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_2$ ，取得了故障识别的很好效果。

实验表明，纸纤维的聚合度随着其热老化过程而下降。因此，测定纸纤维的聚合度对

于判断其热老化程度甚为有效。但是这个方法的缺点是需要从设备上剥取纸试样，这在很多情况下是不易实现的。

第四节 机械老化

固体绝缘在运行过程中常受到各种机械负荷的作用，即使此负荷比短时破坏强度低得多，而发生的形变纯属弹性变形时，也将出现缓慢的老化过程。这种老化过程的实质是在机械应力作用下材料中微观缺陷（分子级别）发生规则运动，形成微裂缝及逐渐扩大的过程。当微裂缝的尺寸及数量达到某个临界值时，材料将被破坏。

在静态机械负荷下，随着老化过程的发展，固体材料直到发生破坏的时间即其工作寿命 τ 可用下式表示

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W - \gamma\delta}{kT}\right) \quad (2-4)$$

式中 τ_0 、 W 、 γ ——材料的特性参数；

δ ——由于机械负荷引起的材料中的应力；

k ——玻耳兹曼常数；

T ——绝对温度，K。

机械负荷和其他因素的共同作用会加速绝缘的机械老化。同时有强电场存在时，固体绝缘的机械老化会明显加快，因为在绝缘的微裂缝中会引发局部放电，后者加快了绝缘的机械破坏过程。从式（2-4）可知，温度升高时，绝缘中将更易出现机械老化。复合材料中，由于热膨胀系数不同，高温下会产生额外的机械应力，而这又促进了机械老化。

第五节 环境老化

对于绝缘表面，环境引起其劣化的因素主要为水分、污染、氧气和辐射。在这些因素的作用下，绝缘表面将发生腐蚀。在强电场同时作用下，沿面放电会产生足以引起材料分解的高温，从而成为绝缘表面腐蚀的主要原因。

有机高聚物用于户外时，表面污染放电有很大的危害。发生污染放电的条件是污秽和水分的共同作用。因而绝缘表面的憎水性是其重要的性能指标。憎水性强弱可以用材料表面的湿润角表征。

环境因素对绝缘内部造成的劣化主要是其受潮。绝缘受潮后其绝缘电阻和介质损耗将增大，从而有可能引起热击穿。由于水分是强极性液体，绝缘受潮后其介电常数也将增加。如果材料受潮不均匀，将引起电场分布的变化，从而降低其耐电强度。矿物油只要轻微受潮（每吨油中只需含有几十克水分），浸油绝缘的短时耐电强度就将显著降低。

绝缘受潮后原则上是可逆的，即可以通过干燥而恢复其性能。但为了对大容量设备进行干燥处理，不但需要将设备退出运行，而且要消耗大量人力物力。在很多情况下，从受潮绝缘中重新除去水分非常困难，例如对于电缆、套管、电容器等油浸纸绝缘，一旦受

潮，实际上已不可能通过干燥处理而去除水分。这些情况下，受潮可以看作是一种特殊形式的老化，已是不可逆的了。

为了防止受潮，绝缘应良好密封。应该指出，用有机高聚物浸灌或密封不能完全避免受潮，而只能延缓受潮的速度。水分子仍能通过高聚物而缓慢地渗入绝缘内部。为了良好的密封，可采用金属、玻璃等材料。

根据绝缘的绝缘电阻或介质损耗因数等介电特性，可以判断绝缘是否受潮。对于充油设备，测量绝缘油的微水含量可直接作为判明其受潮程度的依据。

第三章 可靠性与寿命评估

第一节 概 述

任何设备,其质量水平都由规定的技术参数和指标来衡量,例如高压断路器的质量水平由断流容量、开断故障电流、热稳定电流、绝缘水平等多个参数来表征。但是不论哪个设备都有一个共同的质量指标,这就是使用中的可靠性。它不仅可对同类设备作质量比较,也可在不同设备之间作质量对比。设备可靠性的定义为:设备在规定条件下和预定时间内完成规定功能的概率。若设备丧失了规定功能即为失效或故障。由于设备出现失效或故障总有一定的随机性,是一个随机事件,所以可靠性也要用概率来衡量。

电力设备的失效或故障大多数是由于绝缘性能劣化所引起的,所以对其进行可靠性分析和寿命评估在很大程度上是对设备绝缘性能作分析和评估。从可靠性角度可将设备分为两大类:①不可修复设备(或元件)。指该设备一旦损坏,在技术上已无法修复或者能修复但在经济上不合算,那么它从投运到发生故障所经历的时间就是其寿命。电容器等属于不可修复的设备。②可修复设备(或元件),指损坏后经修理又可恢复其功能的设备,如发电机、变压器、断路器等。在分析这类设备的可靠性时又多了一个修复过程。

对设备进行可靠性和寿命评估以及失效分析,同时结合运行中设备在线监测和诊断技术,可以更准确地掌握它的运行状态,以便实现状态维修,保证设备的安全运行并且改善其运行条件。另一方面也可指导制造部门改善产品的质量和提高其可靠性水平。

第二节 不可修复设备的可靠性指标

一、寿命和可靠度

寿命 T 是指从投运到发生失效的时间,是非负随机变量。其概率分布函数为

$$F(t) = P[T \leq t] \quad (3-1)$$

式(3-1)是指寿命时间 T 小于等于 t 的概率,从式(3-1)可以知道 $F(0) = 0, F(\infty) = 1$,从可靠性的角度来看,可称式(3-1)为故障函数或不可靠度。式(3-1)的经验分布函数值为

$$F'(t) = N_F/N \quad (3-2)$$

式中 N ——样本数;

N_F ——时间为 t 时的失效数。

定义可靠度或可靠度函数为

$$R(t) = P[T > t], \quad t \geq 0 \quad (3-3)$$