

14950

T1835
0295

高等学校教材



电气设备绝缘试验

湖南大学 刘炳尧 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书较全面系统地阐述了电气设备绝缘及其试验的基本理论和方法。深入浅出地介绍了电介质在电场作用下呈现的极化、电导、损耗性能以及沿面放电、局部放电和绝缘老化等过程；扼要地说明了绝缘电阻、介质损耗角正切、电压分布和泄漏电流的测量，直流耐压试验及工频耐压试验，以及对测试结果的分析判断；着重介绍了新的测试技术，包括局部放电测量、油中溶解气体分析、倍频感应耐压、操作波感应耐压以及带电测试技术等。

本书系高等学校电力系统及其自动化专业的教材，也可供高压技术专业师生及高压电气设备制造、运行部门的工程技术人员参考。

高 等 学 校 教 材
电 气 设 备 绝 缘 试 验
湖南大学 刘炳尧 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8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 16开本 9印张 201千字

1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷

印数 0001—4500 册

ISBN 7-120-01758-6/TM·467

定价2.45元

前 言

本书是根据高等学校电力工程类专业教学委员会高电压技术教学组1989年4月讨论通过的《电气设备绝缘试验》教材编写大纲撰写的,是在“高电压技术”教材的基础上,拓宽加深了有关电气设备绝缘及其试验技术的基本理论和测试方法的内容,作为电力系统及其自动化专业的选修课教材。

本书前六章着重阐明电介质在电场作用下的基本理论、绝缘性能及其变化规律。后八章扼要地介绍绝缘电阻、介质损耗角正切、电压分布和泄漏电流的测量,直流耐压试验及工频耐压试验,以及对测试结果的分析判断;较详细地介绍局部放电测量、油中溶解气体分析、倍频感应耐压试验、操作波感应耐压试验以及带电测试等新技术。每章均有提要,并附有概念性和实践性较强的思考题或计算题,书末还附有习题答案。

本书第九章和第十四章由上海交通大学朱子述编写,其余各章由湖南大学刘炳尧编写。全书由刘炳尧主编。

本书由浙江大学赵智大教授主审,对本书稿提出了很多宝贵意见。在编写过程中除参考兄弟院校的有关教材、公开出版的书刊和国家标准外,湖南省电力试验研究所还为我们提供了宝贵资料。谨在此向他们表示衷心地感谢。

由于水平有限,不妥和错误之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者

1991年5月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 电介质的极化	3
第一节 极化和相对介电常数	3
第二节 极化种类	4
第三节 绝缘材料的介电常数	8
习题	9
第二章 电介质的电导	10
第一节 电介质电导的定义及特性	10
第二节 气体、液体及固体电介质的电导	12
第三节 吸收现象和电导在工程上的实际意义	14
习题	15
第三章 电介质的损耗	16
第一节 直流、交流电场下的损耗	16
第二节 电介质的损耗率	19
第三节 综合 $\tan\delta$	20
第四节 $\tan\delta$ 的影响因素	21
第五节 液体、固体电介质的损耗	22
习题	24
第四章 沿面放电	26
第一节 概述	26
第二节 SF_6 中的沿面放电	26
第三节 油中的沿面放电	31
习题	34
第五章 局部放电	35
第一节 概述	35
第二节 单气隙的放电过程	36
第三节 表征局部放电的参数	38
第四节 交、直流电场下局部放电的差别	41
第五节 高压电机绝缘的局部放电和电晕	42
习题	44
第六章 绝缘的老化	46
第一节 概述	46
第二节 绝缘油的老化	47
第三节 固体电介质的热老化	48

第四节 固体电介质的电老化	50
习题	53
第七章 测量绝缘电阻	54
第一节 概述	54
第二节 直接测量法和兆欧表	55
第三节 用自放电法测大电容试品的绝缘电阻	58
第四节 影响因素和注意事项	59
习题	60
第八章 测量 $\tan \delta$	62
第一节 概述	62
第二节 $+\tan \delta$ 测量时的平衡相量图	63
第三节 分流器的应用	64
第四节 $-\tan \delta$ 测量的几种典型情况	66
第五节 自激法和末端屏蔽法的测量接线	69
第六节 灵敏度及测量误差	71
第七节 影响因素和注意事项	74
习题	75
第九章 测量电压分布	77
第一节 概述	77
第二节 电阻杆法	78
第三节 火花间隙法	79
第四节 零值测量	80
第五节 注意事项	81
习题	82
第十章 绝缘油试验	84
第一节 电气性能试验	84
第二节 溶解气体分析	86
第三节 含水量分析	89
习题	91
第十一章 测量局部放电	92
第一节 测试方法综述	92
第二节 脉冲电流法的测量原理	95
第三节 放电量测量程序	100
第四节 干扰及抗干扰措施	101
习题	102
第十二章 测量泄漏电流及直流耐压试验	104
第一节 概述	104
第二节 试验接线分析	105
第三节 影响因素和测量结果分析	107
第四节 电力电缆的直流耐压试验	108

习题	109
第十三章 交流耐压试验与操作冲击试验	111
第一节 概述	111
第二节 工频耐压试验	112
第三节 工频谐振耐压试验	114
第四节 变压器的工频耐压试验	116
第五节 变压器倍频感应耐压试验	118
第六节 变压器操作波耐压试验	121
习题	125
第十四章 电气设备绝缘的带电测试	127
第一节 概述	127
第二节 避雷器的带电测试	128
第三节 耦合电容器的带电测试	130
第四节 高压少油断路器的带电测试	133
习题	133
习题答案	135
参考文献	138

绪 论

绝缘是电气设备结构的重要组成部分，其作用是将电位不等的导体分隔开，使各自保持其应有电位。电气设备绝缘由各种电介质构成，一般分气体、液体和固体三类，三者及其不同组合都广泛应用于电力系统。例如：架空输电线路相间绝缘以及导线对塔身的绝缘都以大气（空气）作为电介质；导线对横担的绝缘以及电气设备外绝缘则用固体、气体组合绝缘；然而电气设备的内绝缘，或利用固体电介质（如发电机定子绕组和转子绕组的绝缘），或利用液体电介质（如油断路器触头间的绝缘），或为两者的组合（如充油电缆的油纸绝缘，变压器的“油—屏障”绝缘）。这是因为固体、液体介质的电气强度比空气高得多，有利于缩小整体结构尺寸。内绝缘还广泛使用 SF_6 等高电气强度的电负性气体。

随着电气设备工作电压的提高，迫切需要通过改善绝缘结构、采用新型绝缘材料以及改进制造工艺等途径，使电气设备的绝缘质量和电气强度不断提高。

在运行过程中，由于电、热、化学及机械等因素的作用，固体、液体绝缘会逐渐老化，其电气性能与机械性能不断下降。因此，绝缘在电气设备结构中往往是最薄弱的环节，电力系统中的事故不少是由于绝缘故障而造成的。对绝缘进行预防性监测试验，是防患于未然的有效措施。

绝缘故障常由绝缘缺陷引起。电气设备绝缘缺陷的来由：一是制造过程中潜伏下来的，二是运行过程中在外界因素影响下发展起来的。外界作用有工作电压、过电压、大气影响（如潮湿等）、机械力、热、化学等方面，它们对绝缘的影响程度与绝缘材料、绝缘结构以及制造质量有关。目前，还不能做到绝缘在运行中不产生缺陷和不发生明显的劣化。

绝缘缺陷可分为两大类。第一类是集中性缺陷，例如悬式绝缘子的瓷件开裂，发电机绕组绝缘的局部磨损、挤压破裂以及局部放电侵蚀形成的空洞，电缆绝缘中局部受潮、局部机械损伤以及局部放电所引起的浸渍物分解等等；第二类是分布性缺陷，例如电机、变压器、套管等绝缘中的有机材料受潮、老化、变质等等。绝缘产生缺陷后，特性会发生变化，例如电导增加，介质损耗增大，产生可燃气体以及抗电强度下降等等。

通过定期的预防性监测试验，可把隐藏的绝缘缺陷及时地检测出来。这种试验包括绝缘参数测量和施加试验用高电压，通过这两类试验都能取得有关绝缘性能的信息。

第一类试验又称非破坏性试验，是在较低电压下或用其他不损伤绝缘的办法来测量绝缘特性，例如测量绝缘电阻、泄漏电流、介质损耗和局部放电，对油中溶解气体或含水量进行分析，以及用 x 射线和超声波探测绝缘缺陷等等。各种方法所反映的绝缘缺陷的性质各不相同，对不同绝缘材料和结构型式，这些方法的有效性也存在差别。故往往要用多种方法来试验，并对试验结果进行综合分析比较后才能作出正确的判断。对绝缘状态的评定需将试验结果和规程规定以及以往数据作比较后方能得出，规程规定的数值在一定程度上

反映了被监测参数和事故概率之间的联系，因而揭示了绝缘的可靠程度。但从绝缘运行可靠性的观点来看，大多数情况还不能确定参数劣化的允许程度。现有预防性参数监测的主要任务是确定绝缘状态劣化的程度，把隐藏的绝缘缺陷检测出来。

第二类试验又称破坏性试验，可能导致绝缘的损伤或破坏。它是模拟设备绝缘在运行中受到的过电压应力而施加与之等价的高电压来进行试验，从而考验绝缘的电气强度，保证必要的绝缘水平或裕度。这类试验对绝缘的检验最严格，是最有效的方法，特别是能揭露绝缘中危险性较大的集中性缺陷。它往往在非破坏性试验通过之后进行。

一般来说，上述两类试验方法之间没有确切的定量关系，即不能根据第一类的测试数据直接判断出绝缘的击穿电压。但对于某些设备，例如对云母片和溶剂性热固性树脂绝缘的3kV感应电动机，人们正在探索用介质损耗角正切增量 ($\Delta \tan \delta$)、交流电流试验 $U-I$ 曲线的第二拐点电压以及局部放电起始电压等来推测绕组中绝缘最差线圈的击穿电压。

本课程的研究对象是：

(1) 电介质在电场作用下的电气物理特性——极化、电导、损耗和电气强度，但对电介质的具体击穿过程从略。

(2) 绝缘的主要试验方法。

绝缘预防性监测方法是不断发展和改进的。例如具有油浸绝缘的设备，随着绝缘结构和制造工艺的改进，其受潮的可能性显著下降，而导致绝缘缺陷发展的一些其它因素（如局部过热、电场强度过大等等）变得突出了，于是监测绝缘受潮的方法，其重要性将相对地降低。因此，必须研究新的方法去监测现有方法所不能发现的那些缺陷。

近年来，各种非破坏性的带电试验法、非电量测试法等有较大的发展，这对于综合判断绝缘状态以及提高预防性监测试验的有效性极为有利，不停电连续监测还有助于积累评定设备绝缘可靠性所需的大量数据。

第一章 电介质的极化

电介质中的荷电质点在电场作用下相应于电场方向产生有限位移的现象，称为电介质的极化，它是电介质在电场中的固有现象。不同电介质的分子结构不同，产生位移的荷电质点不同，据此极化可区分为几种类型。

具有极性分子的电介质称极性电介质，由中性分子构成时为中性电介质，前者是没有外电场作用时分子本身就具有偶极矩的电介质。偶极矩指出了偶极子的大小和方向，表示出分子极性的大小以及电介质极性的强弱。

电介质极化的强弱与分子极性的大小相关，但还受温度、频率的影响。电介质极化的强弱由介电常数的大小来表示。极化和极性影响电介质的电气性能。

第一节 极化和相对介电常数

电介质在电场作用下产生极化现象时，其内部电荷的总和仍为零，但产生一个与外施电场相反方向的电场，如图1-1(b)所示。

因此，极化使电介质以感应方式（非传导方式）传导电。

图1-1中的金属极板为平行平板，图(a)极板间为真空，图(b)极板间放入一块厚度与极间距离相等的固体电介质或极板间充以均匀的液体电介质。图(a)的极板间电容为

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{a} \quad (1-1)$$

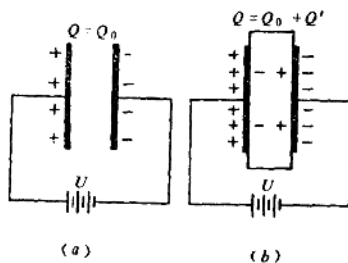


图 1-1 电介质的极化
(a)极板间为真空；(b)极板间有电介质

对图(b)而言，极化结果在与电场方向垂直的电介质表面上出现与极板上电荷异号的极化电荷，这会使金属极板上积聚的自由电荷量增加，于是极板间电容为

$$C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = \frac{\epsilon A}{a} \quad (1-2)$$

式中 ϵ 为固体或液体电介质的介电常数， A 为金属极板的面积， a 为极间距离。

为考虑电介质极化对电容的影响，定义 C 与 C_0 的比值为 ϵ_r ，即

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1-3)$$

ϵ_r 称为相对介电常数，由电介质材料所决定，是综合反映电介质极化行为的物理量，其物

理意义表示金属极板间放入电介质后极间电容（或金属极板上电荷）比真空时的极间电容（或金属极板上电荷）增大的倍数。

气体分子间的距离很大，密度很小，因此各种气体的 ϵ_r 均接近于1。常用的液体、固体电介质， ϵ_r 大多在2~6之间，各种电介质的 ϵ_r 随温度、电源频率的变化规律，一般是不同的。在工频电压下20℃时，某些典型电介质的 ϵ_r 值如表1-1所示。

表 1-1 几种典型电介质的 ϵ_r

材 料 类 别	名 称	ϵ_r (工频, 20℃)
气体介质(标准大气条件)	中 性	氮 气 氧 气 空 气
		1.00060 1.00025 1.00058
	极 性	二氧化硫
		1.009
液 体 介 质	弱 极 性	变压器油 硅有机液体
		2.2 2.2~2.8
	极 性	蓖 麻 油 氯化联苯
		4.5 4.6~5.2
	强 极 性	酒 精 水
		33 81
固 体 介 质	中性或弱极性	石 蜡
		聚苯乙烯
		聚四氟乙烯
		松 香
		2.0~2.5 2.5~2.6 2.0~2.2 2.5~2.6
	极 性	纤 维 素
		胶 木
		聚氯乙稀
		酚 青
		6.5 4.5 3.0~3.5 2.6~2.7
	离 子 性	云 母 电 瓷
		5~7 5.5~6.5

用于电容器的绝缘材料，除应注意电气强度外，还希望 ϵ_r 大，这可使电容器单位电容的体积减小和重量减轻。用于电缆和套管中的绝缘材料，希望 ϵ_r 小，这不仅减小绝缘的介质损耗，还使电缆工作时的充电电流减小，套管的滑闪放电电压提高。通常的电气设备都希望用 ϵ_r 较小的绝缘材料，因大的 ϵ_r 往往和大的导电率联系在一起，而介质损耗是绝缘劣化和热击穿的重要因素。在高电压设备中，常将数种绝缘材料组合在一起使用，这时要注意各种材料 ϵ_r 值的配合，因为在交流和冲击电压下，串联介质中电场强度的分布与 ϵ_r 成反比。

第二节 极 化 种 类

电介质极化使材料的内部电荷偏移产生偶极矩。这种电荷的偏移大都是在原子或分子

范围内的空间作微观位移, 有的则是电子和空穴或可移动离子等载流子漂移产生的宏观位移。电介质极化主要有以下几种基本形式。

一、电子式极化

一切电介质都由原子、离子或分子组成, 它们都是由带正电的原子核和围绕核的电子云构成。在外电场作用下, 电子云相对原子核发生弹性位移, 正、负电荷作用中心不重合而产生感应偶极矩, 称为电子位移极化。图1-2给出了原子的电子极化模型, 原子中电子云在半径为 R 的球体内均匀分布, 设外电场作用下电子云分布不变, 但电子云中心 O' 相对原子核中心 O 移动一个微小距离 l , 于是偶极矩为

$$\vec{m} = q \vec{l} \quad (1-4)$$

式中 q 表示正电荷或负电荷的电量; $\vec{l}$ 的量值等于正、负电荷作用中心间的距离, 方向由负电荷指向正电荷; $\vec{m}$ 表示偶极子的特性。图中虚线球体为外电场消失时电子云的分布, 这时正、负电荷作用中心又重合, 为可逆性位移极化。

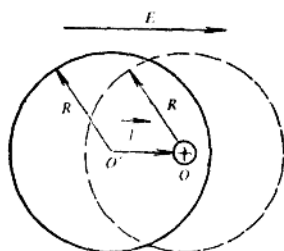


图 1-2 电子式极化

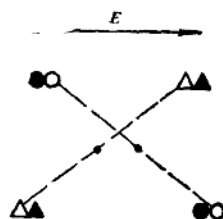


图 1-3 离子式极化

●、▲分别为极化前正负离子位置;
○、△分别为极化后正负离子位置

电子位移极化的特点是: ①完成极化的时间极短(因电子质量极小), 约 $10^{-11} \sim 10^{-13}$ s, 可看作瞬时完成, 在各种频率电场下均能产生; ②极化具有弹性, 即当外界电场消失后, 电子又返回原来轨道; ③不消耗能量, 不使介质发热。

二、离子式极化

离子结构的固体电介质, 例如云母、陶瓷等固体无机化合物, 通常每个分子的正、负离子作用中心是重合的, 偶极矩为零。在电场作用下, 正、负离子在有限范围内相对位移而产生感应偶极矩(如图1-3所示), 称为离子位移极化。其极化过程的时间比电子位移极化要长, 但仍然很短, 它落后电场的时间不超过 $10^{-13} \sim 10^{-11}$ s, 可认为是瞬时建立的, 在任何电工频率范围都会发生。它也是完全弹性的可逆性位移极化, 几乎不消耗能量。

温度对离子式极化有两方面影响: 一方面温度升高离子间结合力下降, 使极化程度增加; 另一方面温度升高离子密度减小, 使极化程度降低。一般前一因素影响较大。

三、偶极子极化

如果极化前电介质分子的正、负电荷作用中心不重合, 这种分子称极性分子。它有固

有偶极矩，故又称偶极分子或固有偶极子。在无外电场时，极性分子因热运动分布杂乱，如图1-4 (a) 所示，整个电介质对外不呈现极性；有电场作用时，杂乱分布的极性分子受到转矩的作用顺电场方向转向，作较有规则地排列，这时单位体积电矩（即偶极矩）不再为零，形成偶极子极化，如图 (b) 所示。

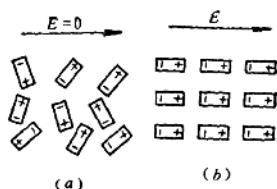


图 1-4 偶极子极化示意图
(a) 偶极子杂乱分布；(b) 偶极子有规则地排列

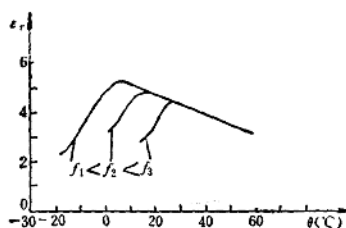


图 1-5 氯化联苯（主要成分为五氯联苯）的 ϵ_r 与温度的关系

偶极子极化也称转向极化。在交变电场中，偶极子反复转向，电介质内部将出现摩擦损耗，消耗电场能量，故为非弹性极化。极化时间较长，约需 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{s}$ 。

具有极性分子的电介质是极性电介质，纤维素、胶木、橡胶、氯化联苯和蓖麻油等都是常用的极性绝缘材料。

在某些频率的电场作用下，偶极子极化可能来不及完全建立，于是极性电介质的介电常数与电场频率有关，频率高时介电常数减小。例如，温度 θ 在 20°C 范围以内时，氯化联苯的 ϵ_r 随电场频率的增加而减小，如图1-5所示。

极性电介质的介电常数与温度的关系较复杂，温度升高时质点间联系力削弱，极化加强；但与此同时质点热运动加剧，妨碍质点作有规律的运动，使极化减弱。如前者占优势，则介电常数随温度的增加而增大，反之则降低。对极性气体介质，分子间联系较弱，主要是后者起作用。液体、固体电介质的分子联系紧密，温度过低时分子难以转向，于是在某温度范围时前者起主要作用；当温度上升到后者起主要作用时，温度增加，极化减弱。从图1-5可看出这点。

四、夹层极化

高压电气设备的绝缘常由几种分层材料组成，且往往具有不同的介电常数和电导率。在外电场作用下，分层电介质的起始电压分布和稳态电压分布分别受介电常数和电导率的影响，导致分界面聚集电荷。这种现象称夹层介质界面极化，常简称夹层极化。

为了简便，以图1-6平行平板电极间的双层电介质来讨论， ϵ_1 、 C_1 和 g_1 分别表示第一层电介质的介电常数、等值电容和电导，而 ϵ_2 、 C_2 和 g_2 表示第二层的， U 为外施直流电压。

时间 $t = 0$ 为合K瞬间，电压由零很快上升到 U ，相当于高频电压，电流主要流过电容，两层电介质电压分配为

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t=0} = \frac{C_2}{C_1}$$

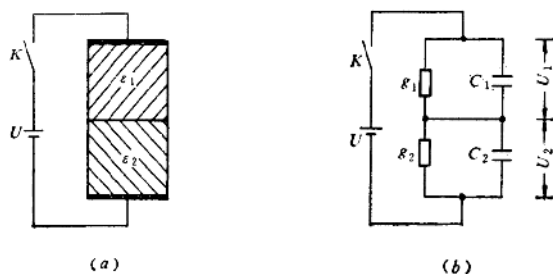


图 1-6 直流电压作用于双层电介质
(a)示意图; (b)等值电路

到达稳态时 (认为 $t \rightarrow \infty$), 电流全部经电导支路, 于是

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty} = \frac{g_2}{g_1}$$

通常, $C_2/C_1 \approx g_2/g_1$, 故

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} \approx \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty} \quad (1-5)$$

所以两层电介质有一个电压重新分配过程, 即 C_1 、 C_2 上的电荷要重新分配。设 $C_1 < C_2$, $g_2 < g_1$, 于是

$$t \rightarrow 0 \text{ 时, } U_1 > U_2$$

$$t \rightarrow \infty \text{ 时, } U_1 < U_2$$

这样, 在 $t > 0$ 后, 随着 t 的增大, U_1 逐渐下降, U_2 逐渐上升。因而 C_1 上的电荷要通过 g_1 放掉一部分, C_2 要从电源经 g_2 再补充部分电荷, 故在两层电介质的分界面上积聚自由电荷。如果 $Q_{1\infty}$ 、 $Q_{2\infty}$ 为稳态时两层电介质上的电荷, 则交界面积聚的电荷为

$$Q = Q_{2\infty} - Q_{1\infty} = \frac{C_2 g_1 - C_1 g_2}{g_1 + g_2} U \quad (1-6)$$

此电荷为吸收电荷, 由电源供给。伴随电荷积累过程形成的电流称吸收电流, 积累电荷的充电现象称吸收现象。从电路上看, 吸收电流是经电阻向电容充电的充电电流, 按指数曲线衰减, 其持续时间与电容、电导的大小有关, 可持续几分之一秒, 几十秒, 几分钟甚至几十分钟或更长。

夹层极化的效应是: 夹层界面堆积自由电荷, 整个电介质的等值电容增大, 伴随有能量损耗。这种极化只在直流及低频下方能呈现出来。

当外施电压去掉后, 电介质内部吸收的电荷会释放, 但比较缓慢。因此, 对使用过的大电容设备, 应将两极短接彻底放电, 以免危及人身安全。

五、高压式极化

不均匀的或含有杂质的电介质，可等价于夹层电介质看待，它在外电场作用下的极化也称夹层极化。由于电介质极化过程内部产生大量容积电荷，并形成与外施电压反向的很高极化电势，故又常称高压式极化。

第三节 绝缘材料的介电常数

一、中性及弱极性绝缘材料

H_2 、 N_2 、 CO_2 和 O_2 等气体电介质，工程上常用的变压器油、桐油、亚麻仁油、苯、甲苯、二甲苯和硅有机等液体电介质，以及石蜡、聚乙烯等固体电介质都是中性及弱极性绝缘材料，它们的介电常数与电场强度及频率无关，但与材料本身的密度有关。

气体介质的 ϵ_r 随其密度的增加而略有增大，当温度增加或压力减小时， ϵ_r 略有降低。无论是中性还是极性气体，均密度很小、 ϵ_r 很小，工程上取 $\epsilon_r \approx 1$ （略大于1）。

液体是不可压缩的，其 ϵ_r 与压力无关。中性及弱极性液体介质的 ϵ_r 也较小，在1.8~2.5之间，温度增加时 ϵ_r 略降。

石蜡、聚苯乙烯和聚乙烯的 ϵ_r 在2.0~2.6之间，温度增加时 ϵ_r 逐渐降低。当石蜡接近熔点（约55℃）时， ϵ_r 急剧下降。

二、极性绝缘材料

极性气体大多数是极性和强极性液体的蒸汽，如空气中含水蒸汽，其 ϵ_r 略大于1。当使用空气电容器作精密测量仪器的标准电容时，应防止水汽影响标准电容的数值。

极性液体的 ϵ_r 在3~6之间，如蓖麻油、氯化联苯等。氯化联苯的 ϵ_r 与温度的关系已示于图1-5中， ϵ_r 与频率的关系较复杂：当频率较低极性分子能跟上电场变化而完全转向时， ϵ_r 最大，并接近直流电压下测得的值；当频率增加极化不完全时， ϵ_r 开始减小；当频率很高极性分子转向已不可能时， ϵ_r 最小，并由电子式极化决定。

虫胶、松香、纤维素、有机玻璃、树脂、聚氯乙烯等都是极性固体绝缘材料， ϵ_r 在2.5~7之间， ϵ_r 与温度的关系类似于极性液体呈现的规律。

三、离子性固体绝缘材料

常见的有云母，其 ϵ_r 在5~7之间，由于离子式极化很快，故 ϵ_r 与频率无关。当温度增加时，离子间弹性作用力减弱，极化率增大， ϵ_r 会略增。

四、多种电介质组成的绝缘材料

它可能是双层电介质或两种以上介质粉末组成的混合物，前者如电机、变压器、电容器和电缆等用的绝缘材料，后者如粉云母制品、粉压塑料和高介瓷等。电场作用于这种不均匀结构的绝缘材料时，由于有容积电荷产生，故其 ϵ_r 可能高于组成它的任一种介质的 ϵ_r 。例如：未浸渍电缆纸的 $\epsilon_r = 2.34$ ，油的 $\epsilon_r = 2.33$ ，而油浸纸的 ϵ_r 可达3.87。

习 题

- (1) 所谓电介质的极性指什么？极化又指什么？
- (2) 电介质极化有哪几种形式，各自的主要特征是什么？
- (3) 电介质相对介电常数的物理意义是什么，其大小由什么决定？
- (4) 电介质极性的强弱和极化的强弱各用什么来表示？两者的关系如何？
- (5) 油浸电力变压器、发电机、高压电缆、高压套管以及电力电容器等电气设备，哪些希望电介质的 ϵ_r 小，哪些希望 ϵ_r 大，原因是什么？
- (6) 设双层电介质的电容、电阻分别为 C_1 、 R_1 和 C_2 、 R_2 ，夹层极化时在什么条件下分界面上积聚的空间电荷最多？
- (7) 某空气电容器的电容为50pF，当电极间加入某液体电介质后，电容增大到125pF，试问原因何在？该液体电介质的 ϵ_r 大致为多少？
- (8) 极性液体或固体电介质的 ϵ_r 与温度的关系如何？
- (9) 某平板电容器电极间距离为 2×10^{-4} m，施加10kV电压，试求：
 - 1) 极板间为真空时极板上的电荷面密度为多少？
 - 2) 极间充以 $\epsilon_r=3.5$ 的电介质时，极板上的电荷面密度又为多少？
- (10) 交流电气设备使用弱极性电介质作绝缘材料时，在工作电压下会出现哪几种极化形式？施加直流电压时极化形式又如何？为什么？

第二章 电介质的电导

宇宙间的物质按电阻率 ρ 的大小可分成导体、半导体和电介质三类, ρ 值为 $10^1 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料为电介质。

电介质电导的载流子主要为离子。载流子的种类、密度以及迁移率决定了电介质电导率的大小。电介质温度增加, 定向运动的离子数及其速度都增加, 故电导剧增。

空气的电导率很小。中性液体电介质很纯净时电导率也很小, 而纯净极性液体电介质的电导率较大。

固体电介质的电导可分为表面电导和体积电导, 前者易受环境湿度和表面污秽的影响。有些情况下, 要增大固体电介质表面局部地方的电导率, 以防止这些地方产生电晕。

第一节 电介质电导的定义及特性

由于绝缘体的击穿与电导电流的增加密切相关, 所以理解电介质的电导就显得重要了。

一、电导定义

各种结构及各种物态(气态、液体和固态)下的任一物质, 因都或多或少存在一些带电质点(载流子), 所以均不同程度地具有传导电流的能力。在电场作用下带电质点定向移动形成电流的现象, 即为电导。

设某电介质在电场 E 作用下定向移动的载流子密度为 n , 迁移速度为 v , 每个载流子电荷量为 e , 则经过横断面 S 的电流和电流密度分别为

$$I = S v n e$$

$$j = I/S = e n v$$

如果令 $\mu = v/E$, 称 μ 为迁移率, 则有

$$j = e n \mu E \quad (2-1)$$

移动的载流子有 m 种时, j 由下式决定

$$j = E \sum_{i=1}^m e_i n_i \mu_i \quad (2-2)$$

表征电介质电导大小的物理量是电导率 γ , 定义如下

$$\gamma = j/E \quad (2-3)$$

或写成

$$\gamma = e n \mu \quad (\text{只有一种载流子时}) \quad (2-4)$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^m e_i n_i \mu_i \quad (\text{有} m \text{种载流子时}) \quad (2-5)$$

电导率的倒数为电阻率 ρ , 即 $\rho = 1/\gamma$ 。

二、电导特性

1. 电导的离子性

电介质电导与金属电导截然不同, 不仅电导率差别很大, 而且前者绝大多数情况是离子性电导, 即导电能力主要由离子决定。

离子的产生靠电介质本身分子和杂质分子的离解。由于中性电介质的分子不会离解, 弱极性分子本身的离解度也很小, 它们的电导主要由杂质离子所构成(称为杂质电导)。所以纯净的非极性电介质的电阻率很高, 可达 $10^{17} \sim 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。极性电介质除了杂质离子外, 还有电介质基本分子离解形成的离子电导(称固有电导)。极性越强, 基本分子离解越多, 固有电导在离子电导中将占主要地位。因此, 一般极性电介质的电阻率都比较小(约为 $10^{10} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$)。

2. 温度影响

电介质的电导随温度增加而剧增, 可用下式表示

$$\gamma = Ae^{-B/T} \quad (2-6)$$

式中 A 、 B 为常数, 与液体或固体电介质的性质有关, 固体比液体电介质的常数 B 大很多; T 为绝对温度 (K)。这是因温度增加时, 离子的热动能增大, 易克服周围异性电荷的束缚, 使电场中定向运动的离子数增加, 速度也增大。

对变压器类设备可用下式进行绝缘电阻的温度换算

$$R_2 = R_1 \times 10^{\alpha(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2-7)$$

式中 θ_1, θ_2 —— 温度, $^{\circ}\text{C}$;

R_1 —— 温度为 $\theta_1 (^{\circ}\text{C})$ 时测得的绝缘电阻, $\text{M}\Omega$;

R_2 —— 换算到温度为 $\theta_2 (^{\circ}\text{C})$ 时的绝缘电阻, $\text{M}\Omega$;

α —— 绝缘电阻温度系数, 与绝缘材料性能有关。油浸式电力变压器的 α 为 $0.0176/^{\circ}\text{C}$, 干式变压器及 A 级绝缘发电机的 α 为 $0.025/^{\circ}\text{C}$ 。

发电机的绝缘电阻常换算到 75°C 时的绝缘电阻, 即

$$R_{75} = \frac{R_{\theta}}{2^{\frac{75 - \theta}{10}}} \quad (2-8)$$

式中 θ —— 温度, $^{\circ}\text{C}$;

R_{θ} —— 温度为 $\theta (^{\circ}\text{C})$ 时测得的绝缘电阻, $\text{M}\Omega$;

R_{75} —— 换算到 75°C 时的绝缘电阻, $\text{M}\Omega$ 。

上述换算方法和 α 值是近似的。 α 值受许多因素影响, 例如与绝缘结构、绝缘工艺、设备新旧、干燥程度以及测温方法等有关。对发电机而言, 最好测取每台的 α 值作换算依据。

3. 电场强度的影响

电场强度较小时, 电导率与电场强度几乎无关; 电场强度较大时, 随着电场强度的增大, 分子离解为离子的数量增加, 电导率增大; 通常在接近电介质击穿时, 有显著的快速