

电力设备 试验方法及诊断技术

史家燕 李伟清 万达 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力设备 试验方法及诊断技术

编写组成员：史家燕 李伟清 董明会
万 达 胥 雷 贾瑞君
刘汉梅 毛建民



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要包括高压电气设备试验方法基础知识、发电机的试验和诊断、其他厂用电机的试验方法和诊断技术、变压器试验方法和故障诊断、高压交流断路器、绝缘油、六氟化硫气体、发电机状态监测故障诊断的新技术——发电机故障诊断专家系统八篇，共四十三章。

本书可供从事电力设备试验的相关工程技术人员使用，也可供大专院校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

电力设备试验方法及诊断技术 / 史家燕，李伟清，万达编
著. —北京：中国电力出版社，2011.12

ISBN 978-7-5123-2576-0

I. ①电… II. ①史… ②李… ③万… III. ①电力设备—试验方法②电力设备—诊断技术 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 282041 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 6 月第一版 2013 年 6 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 503 千字
印数 0001—3000 册 定价 98.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着电力系统的迅速发展，发电机、变压器、高压断路器等超高压、大容量发配电设备对电网的安全可靠运行起着越来越重要的作用，必须加强对这些设备的运行监测、检查、试验、检修等各项工作，早期发现故障、及时处理，做到防患于未然，方能提高电网的安全运行水平。

预防性试验（包括例行试验和诊断性试验）是早期发现电力设备隐患的重要手段之一，依靠正确的试验方法及所取得的精准的试验数据可及时对故障做出诊断并进行处理。为此特邀请业内具有深厚的理论功底和丰富实践经验的专家共同编著本书，系统并有重点的介绍试验方法和诊断技术，供业内相关工程技术人员研究、参考。

本书从电介质基础理论出发，结合工程实际阐述了试验原理、试验方法、诊断判据等高压电器设备试验方法的基础知识，进而分别对各不同的电力设备的试验方法做了详细的介绍。更重要的是，本书根据多年来的事故统计分析结果，从大量的故障实例出发，详细地介绍了故障诊断的分析、处理方法，以期在生产实践中充分利用现有的试验方法，早期发现、及时处理故障。

本书第八篇就发电机状态监测故障诊断的新技术——发电机故障诊断专家系统做了概要介绍。该系统依据包括在线实时、在线非实时和离线数据的多种数据源，采用正反向混合推理的推理机制，以产生式知识规则为主的知识表示方法的集在线实时、在线非实时和离线数据的采集与分析、状态监测、故障诊断、故障处理、故障统计分析于一体的多任务、多客户端、多信息处理的故障诊断专家系统。迄今为止，该项技术仍处国际领先水平、国内首创，继 2000 年率先在上海外高桥发电厂 4 台发电机上投入运行之后，已在核电、火电的 200~1000MW 的汽轮发电机和水电的 700MW 发电机上得到了应用，在提高发电机安全运行水平、实现合理检修、降低发电成本上起到了较大的作用。

本书各篇的作者分别是：第一篇、第八篇三十九章~第四十二章，史家燕；第二篇，李伟清；第三篇，董明会；第四篇，万达；第五篇，胥雷；第六篇，贾瑞君；第七篇，刘汉梅；第八篇第四十三章，毛建民。

本书在编写中遵照了相关标准，参考了历次故障统计分析反事故措施，引用了一些研究成果和试验数据，仅在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，也由于在各种事故调查中诸多因素的影响，疏漏、不妥之处在所难免，恳请读者批评、指正！

编 者

目 录

前言

第一篇 高压电气设备试验方法基础知识	1
第一章 电介质物理基本知识	1
第一节 电介质的极化	1
第二节 电介质的电导	7
第三节 绝缘的吸收现象	9
第四节 电介质的损耗	13
第五节 电介质的击穿	16
第二章 直流试验方法	17
第一节 概述	17
第二节 测量绝缘电阻	20
第三节 直流泄漏电流及直流耐压试验	22
第三章 介质损耗的测量	25
第一节 测量方法	26
第二节 影响测量的因素及结果分析	27
第三节 介质损耗及电容量的在线监测及诊断技术	31
第四章 工频交流耐压试验	35
第一节 概述	35
第二节 试验原理及试验设备	36
第三节 试验注意事项及结果分析	45
第二篇 发电机的试验和诊断	48
第五章 发电机的试验诊断项目及分类	48
第六章 发电机绕组的直流电阻测量	50
第七章 绝缘电阻测量	52
第八章 直流耐压试验及泄漏电流测量	54
第九章 工频交流耐压试验	59
第十章 检查汽轮发电机定子绕组端部绝缘状态的试验方法及判断标准	62
第十一章 定子绕组端部及槽部防晕层的检查及试验	65
第十二章 汽轮发电机定子绕组端部自振频率及整机模态的测量	67
第十三章 检查水路堵塞的定子绕组热水流试验	73

第十四章	转子绕组接地故障检查及试验诊断	76
第十五章	检查转子绕组匝间短路的试验	80
第十六章	定子铁芯试验	90
第一节	交流励磁损耗法	90
第二节	ELCID 试验检查方法	94
第十七章	发电机温升试验	98
第十八章	发电机参数试验	105
第一节	同步电机参数试验方法及分类	105
第二节	发电机的参数试验方法	107

第三篇 其他厂用电机的试验方法和诊断技术 128

第十九章	中频发电机的试验	128
第二十章	异步电动机试验	130
第一节	测量定子绕组直流电阻	130
第二节	绝缘试验	132
第三节	定子绕组的极性检查试验	133
第四节	空载试验	134
第五节	短路试验	135

第四篇 变压器试验方法和故障诊断 139

第二十一章	变压器（电抗器）的性能、原理和结构	139
第一节	变压器（电抗器）的基本性能	139
第二节	变压器的原理和结构	141
第三节	油浸高压并联电抗器（带抽能绕组）的原理和结构	147
第四节	变压器的组部件	150
第五节	影响变压器（电抗器）性能的几个重要问题	156
第二十二章	变压器（电抗器）的状态评估	174
第一节	概述	174
第二节	设备的巡视检查	175
第三节	设备的定期检测技术	175
第四节	在线（带电）检测技术	199
第二十三章	变压器（电抗器）的故障诊断	200
第一节	变压器（电抗器）的故障诊断方法	200
第二节	变压器故障统计	206
第三节	变压器（电抗器）故障诊断的实例	208
第二十四章	评估变压器（电抗器）状态的几个重要问题	227
第一节	变压器油流放电故障的机理和诊断	227

第二节	直流偏磁引起的变压器噪声和振动增加·····	234
第三节	变压器剩磁对局部放电试验的影响·····	239
第四节	变压器绝缘受潮和介质损耗因数·····	244
第五篇	高压交流断路器 ·····	249
第二十五章	高压交流断路器的额定值和使用条件·····	249
第二十六章	高压断路器的检修、试验方法·····	251
第一节	高压断路器的检修·····	251
第二节	高压断路器的试验·····	252
第二十七章	故障分析·····	255
第六篇	绝缘油 ·····	257
第二十八章	绝缘油的性能及试验方法·····	257
第二十九章	油中溶解气体分析及应用·····	259
第三十章	绝缘油的质量标准及监督·····	268
第三十一章	变压器油检测发展方向·····	274
第七篇	六氟化硫气体 ·····	276
第三十二章	六氟化硫气体的主要性能·····	276
第一节	六氟化硫气体的主要物理和化学性能·····	276
第二节	六氟化硫气体主要电气性能·····	277
第三十三章	六氟化硫气体质量监督的相关标准·····	278
第三十四章	杂质的来源、种类及其影响·····	280
第三十五章	六氟化硫气体的检测项目、周期与标准·····	281
第三十六章	六氟化硫电气设备内部状态的检测·····	283
第三十七章	六氟化硫气体分解产物的检测·····	284
第一节	六氟化硫分解产物的检测方法·····	284
第二节	相关检测方法简介·····	285
第三十八章	气体绝缘设备中六氟化硫气体分解产物与设备内部 运行状态关系的探讨·····	290
第一节	气体绝缘设备中六氟化硫气体的分解·····	290
第二节	气体绝缘设备内部故障的分类·····	294
第三节	部分六氟化硫气体绝缘设备缺陷、事故统计·····	295
第四节	气体绝缘设备气体分解产物与设备运行状态关系的探讨·····	299
第八篇	发电机状态监测故障诊断的新技术——发电机故障诊断专家系统 ·····	302
第三十九章	概述·····	302
第四十章	发电机故障诊断专家系统诊断模型及其实现·····	303

第一节 发电机故障的特点	303
第二节 诊断模型的实现	304
第四十一章 发电机故障诊断系统框架结构及软件功能	305
第一节 框架结构	305
第二节 软件功能	306
第四十二章 指纹技术在发电机故障诊断中的应用	308
第一节 概述	308
第二节 发电机定子绕组温度指纹计算模型和早期预警	308
第三节 发电机定子铁芯及端部结构件温度指纹计算	311
第四节 发电机转子电流指纹计算及其在转子匝间短路故障诊断中的应用	312
第五节 指纹技术在发电机故障诊断专家系统中的应用	313
第四十三章 应用实例	314
第一节 故障的发现和经过	314
第二节 故障原因分析	317
第三节 反事故措施	317
第四节 经验总结	318
参考文献	319

第一篇

高压电气设备试验方法基础知识

第一章

电介质物理基本知识

为了更好地理解、掌握有关高压电气设备绝缘的试验方法和诊断技术，首先对电介质（或称绝缘介质）的物理基本知识做一个简要的介绍。

电介质在电场作用下的物理现象主要有极化、电导、损耗和击穿。在工程上所用的电介质分为气体、液体和固体三大类。由于液体和固体介质的分子构造比较复杂、比较不均匀并具有较大的密度，所以在受到外电场作用时的物理现象比较复杂。因此，目前对这些电介质物理过程的阐述以气介质为多，液体和固体介质仅有一些基本理论。在有不少问题难以给出定量分析的情况下，很大程度上要依靠长期的工程实践和大量的试验结果来进行解释、分析和判断。

第一节 电介质的极化

一、电偶极子

在研究电场对电介质的作用前，先介绍一下所谓“电偶极子”，它就是相距极近的两个相等而相反的电荷，或称为两个相反的极。偶极子是用它的电矩 $\vec{p}$ 来表示的，电矩的大小等于极的电荷 q 与极间距离 h 的乘积，其方向则是由负极到正极，见图 1-1。

$$\vec{p} = qh \quad (1-1)$$

二、电介质极化的基本概念

虽然介质不导电，但在电场作用下仍将

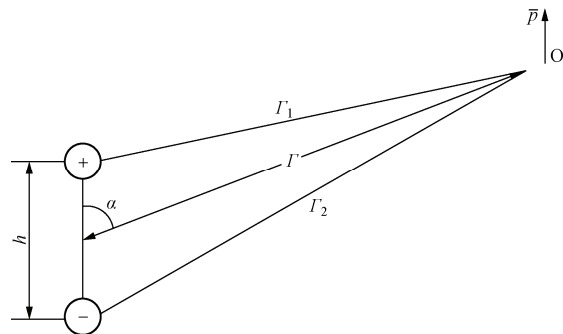


图 1-1 电偶极子示意图



发生一些变化。

电介质中的分子一般可以分成无极分子和有极分子两类。

(1) 在无极分子内当没有外电场作用时，核的正电荷作用中心与绕核旋转的电子的负电荷作用中心相重合。因此对周围介质而言，其正、负电荷可被看做是位于同一点之上，作用互相抵消，如图 1-2 (a) 所示。当外电场作用到这样的分子上时，其正电荷与负电荷，更

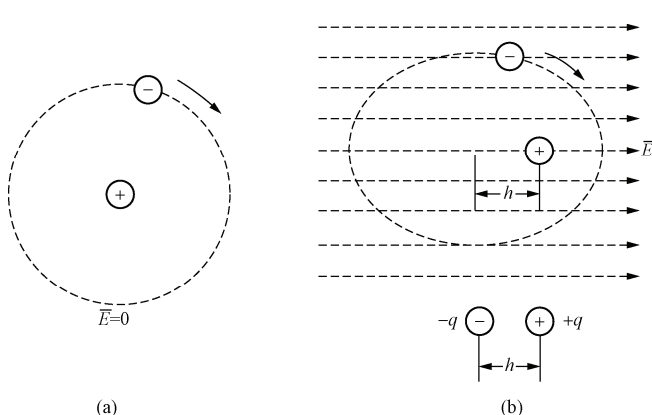


图 1-2 电偶极子的形成

(a) 无外电场作用时；(b) 有外电场作用时

确切地说，它们的作用中心将相对的移动形成偶极子，如图 1-2 (b) 所示。正电荷在其相对的位移中是依电场的方向而移动，而负电荷则向相反的方向移动，电场强度愈大，每个分子中相当的位移也愈大。电场消失时，作用到电荷上的外力也随之消失，由于内力的作用，电荷重新返回到原先的位置，分子重新变为中性。我们称这种物理现象为“位移极化”。

由于分子中正、负电荷之间是紧密联系着的，所以在外电场的作用下所产生的位移很小，且可视为与电场的方向一致，因而在外电场中，分子所得到的电矩可视为与电场强度 E 成正比例

$$\bar{p} = qh = a\bar{E} \quad (1-2)$$

式中： $q(+q$ 或 $-q)$ 是所形成的偶极子上极的电荷； h 为其臂； a 为分子的极化系数。

若单位容积内有 n 个分子，则单位容积内的电矩可表示如下

$$p = \frac{\sum \bar{p}}{\Delta V} = n\bar{p} = na\bar{E} = x\bar{E} \quad (1-3)$$

式中： p 为介质的极化强度， x 为介质极化系数。

从式 (1-3) 可以看出，含无极分子的电介质的极化强度与电场强度成正比例，也与单位容积内分子的个数即压力成比例，但不受温度的影响，而且从理论上说，可随电场强度的增加而无限的增加。

形成偶极子必从电场方向消耗能量，亦即电场要做功。例如：在均匀电场亦即电场强度 E 为常数的电场中，形成偶极子时（见图 1-2）。设 φ 为偶极子中心处电场的电位， φ_1 、 φ_2 分别为形成偶极子后偶极子正负电荷所在点的电位，则

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi + \frac{\partial \varphi}{\partial h} \cdot \frac{h}{2} = \varphi - E \cdot \frac{h}{2} \\ \varphi_2 &= \varphi + E \cdot \frac{h}{2} \end{aligned}$$

将正电荷由 φ 至 φ_1 时，电场所做的功为

$$(\varphi - \varphi_1) \cdot (+q) = E \cdot q \cdot \frac{h}{2}$$



将负电荷由 φ 至 φ_2 时, 电场所做的功为

$$(\varphi - \varphi_2) \cdot (-q) = E \cdot q \cdot \frac{h}{2}$$

因此由于形成偶极子, 即由于将极的正、负电荷移动了 $\frac{h}{2}$ 时, 从电场方面消耗的功为

$$qE \cdot h = \bar{p}E$$

(2) 第二类分子是有极分子, 与无极分子的不同之处在于它们本身就是永久偶极子, 当无外电场作用时, 在热运动的作用下它们具有位于各个方向的同样的或然率, 因此在周围的介质中不呈现任何电的作用 [如图 1-3 (a) 所示]。当受到外电场作用时, 这些偶极子将顺电场方向扭转或顺电场排列, 直到达成新的平衡状态为止。此时, 整个电介质形成了带正电和带负电的两极 [见图 1-3 (b)]。我们称这种物理现象为转向极化。

在均匀电场内, 偶极子从电场方面受到的机械转矩可表示为

$$M = qEh \sin \alpha = kE \sin \alpha$$

式中: α 为偶极子的轴与电场强度方向的夹角 (见图 1-4)。

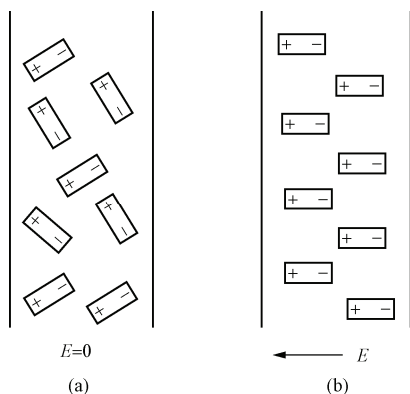


图 1-3 转向极化

(a) 无外电场作用时; (b) 有外电场作用时

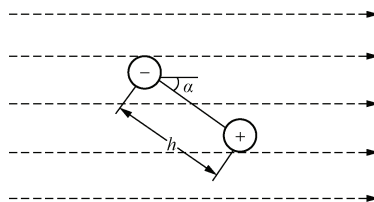


图 1-4 偶极子轴与电场强度方向的夹角

在含有有极分子的介质中, 极化强度 P 可表示为

$$P = \frac{np^2}{3kT} E \quad (1-4)$$

式中: n 为单位容积内分子的数目; k 为波兹曼常数; T 为绝对温度。

显然式 (1-4) 也可用 $P = \bar{x}E$ 的形式表示之。

从式 (1-4) 中可以看出, 含有永久偶极子的电介质, 其极化强度与单位容积内分子的数目即压力成正比, 但却随着温度的升高而减小, 它虽然与电场强度成比例, 但随着外电场强度的增加, 而趋向于一个极大值, $\bar{P} = n\bar{p}$, 也就是说此时所有各个偶极子都已和电场的方向一致了 (见图 1-5)。

以上仅就电介质极化的基本概念作了简要的介绍。需要指出的是, 实际上, 电介质极化过程十分复杂。例如, 在液体和固体介质中, 由于它们分子的构造比较复杂, 比较不均匀, 分子间的平均距离较小, 因此, 当受到外电场作用时, 分子间的相互作用对极化呈现较大的影响。又如, 在具有永久偶极子的非各向同性的介质里, 极化强度将随着偶极子在空间里取

向的不同而得到不同的值。对于这些问题，均难以做出准确的定量分析。

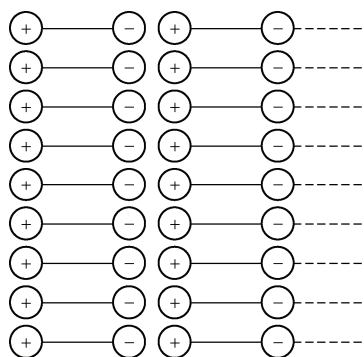


图 1-5 偶极子电场与电场方向一致

最后还需要提到的是，除了上述极化形式外，有些固体介质如玻璃、云母等离子式结构的电介质，在电场作用下，其正、负离子相对移动形成偶极子，与无极分子的极化一样，其正、负离子间产生的位移随电场强度的增强而增大；当电场消失时，它们将很快地回到原来的位置。此外，在介质中，或多或少会含有一些带电质点（如杂质离子），它们与周围的分子联系较弱。无电场作用时，这些带电质点随着分子热运动而混乱的分布着，整个电介质呈现中性。当有电场作用时，它们的热运动趋于一定规则而倾向于顺电场方向在有限范围内位移，造成介质中电荷分布不对称和不均匀而形成偶极化。这些带电质点的位移，受分子热运动的影响较大，温度愈高，热运动愈强，极化就愈困难。因此，建立极化的过程是缓慢的，当电场消失后，复原也是缓慢的。

三、介质所在处的电场及介质常数

介质中所发生的电的极化使介质所在处的电场与介质不存在时比较起来有所改变。

由于介质中的原子和分子所占据的容积只不过是该介质的物体所具有的容积的极小部分，因此，在研究介质所在处的电场的问题时，可以把介质等价的看作是在真空介质中存在一些彼此距离相当大的原子和分子。由于极化的结果，出现一些按一定方式排列的偶极子，并且建立本身的电场，与原有电场迭加后，便是充满介质的空间内实有电场。由于偶极子所建立的电场总是趋向于外加电场的相反方向，因此在相同条件下，介质所在处的电场强度必小于真空中的电场强度。

例如：点电荷 q 在真空中的电场，其电场强度 $\vec{E}$ 可表示为

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

式中： q 为产生电场的电荷； r 为电荷到所讨论的点之间的距离； ϵ_0 为真空的介质常数。

而当点电荷 q 在异于真空的介质的所在处的电场，其电场强度 $\vec{E}_r$ 为

$$\vec{E}_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

系数 ϵ_r 是在真空中与在被研究的电介质中，点电荷所产生的电场强度之比，称为相对介质常数。设

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (1-5)$$

称 ϵ 为介质常数。

由极化的基本概念可知，极化系数 χ 是表征介质电性质的一个量，极化系数 χ 愈大，极化强度 P 也愈大，介质的存在对电场变化的影响也愈大。对于多数的介质可认为 χ 是一个常数，极化强度向量 P 与有效合成电场强度 E 的方向一致，故可认为

$$\epsilon = \epsilon_0 + \chi$$

为便于计算研究，在理论电工基础中引用一个计算向量：电感应强度 $\vec{D}$ ，在真空中，有

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (1-6)$$



在介质中

$$\overline{D} = \epsilon_0 \overline{E} + \overline{P} \quad (1-7)$$

与在真空中电感应强度比较, 它多出因介质极化而得出的一项 $\overline{P}$ (证明从略)。

四、多种介质所在处的电场

不同的介质, 由于介质常数不同, 极化结果不同, 其所在处的电场也不相同。例如: 两块平行金属片间的电场, 如果金属片 (极板) 的面积与片间的距离相比甚大时, 则可认为两极板之间的电场为均匀电场。即, 电场强度 $\overline{E}$ 处处相等, 为一常数, 且

$$E = \frac{U}{d} \quad (1-8)$$

式中: U 为两极板间的电压; d 为两极板间的距离。

当在两极板间充以一种均匀的介质时, 则极板上的电荷 Q (一板为 $+Q$, 一板为 $-Q$) 可由下式表示

$$Q = \frac{\epsilon S}{d} U$$

式中: ϵ 为介质的介质常数; S 为极板的面积。

根据电容的定义, 有

$$C = \frac{Q}{U}$$

则

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

顺便指出, 这就是平行板电容器的基本原理。由此可以看出, 电极尺寸相同的情况下, 所采用的介质的介质常数愈大时, 电容愈大。

如果在两极板之间, 填充介质常数分别为 ϵ_1 和 ϵ_2 的两种不同的理想介质 (电导率 $\nu=0$) 时, 则两极板间的电场将发生变化。

如果两种介质的分界面与极板平行, 如图 1-6 所示, 则该分界面为等位面, 在分界面的两面应聚集有等量的异性电荷, 其大小与极板上的相同, 因此, 我们可以把分界面等价的看做是一个金属片, 两极板间是分别填充了 ϵ_1 和 ϵ_2 不同介质的串联电容器。此两电容器的电容量分别为

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 S}{d_1}$$

及

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 S}{d_2}$$

两极板间的总电容则由下式决定

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right) \cdot \frac{1}{S}$$

因此

$$C = \frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}}$$

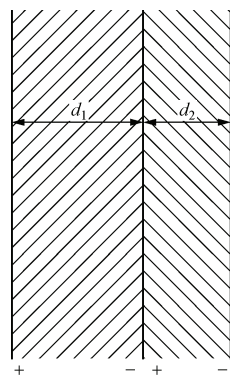


图 1-6 两种介质的分界面与极板平行



因为，当电容串联时，各电容间电压的分配与电容成反比，所以

$$U_1 = U \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\varepsilon_2 d_2}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2} \cdot U$$

$$U_2 = U \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{\varepsilon_1 d_1}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2} \cdot U$$

故在两种介质中的电场强度分别为

$$E_1 = \frac{U \varepsilon_2}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}$$

及

$$E_2 = \frac{U \varepsilon_1}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2} \quad (1-9)$$

由此可以看出，两种介质中的电场强度与介质常数成反比，即

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (1-10)$$

在两种介质分界面处，电场强度所发生的跃变，是由于两种介质不同的极化结果所引起的。

例 1：在一平行板电器中填充击穿电场强度 $E = 200\text{kV/cm}$ 的介质，其介质常数 $\varepsilon_1 = 4$ ，极板间的距离 $d = 0.5\text{cm}$ ，由此可知该电容器两极间所能承受的极限电压为 100kV 。但如果极板间的介质没有填满而留有 0.02 的气隙时，则相当于在电容器的极板中填充了两种介质，第一种 $\varepsilon_1 = 4$ ，介质厚度 $d_1 = 0.48\text{cm}$ ，第二种是空气隙 $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = 1$ ，厚度为 0.02cm ，由于空气的击穿电场强度为 30kV/cm ，根据式 (1-9) 可以算出，在这种情况下，电容器所能承受的极限电压为

$$U = \frac{E_2 (\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2)}{\varepsilon_1} = \frac{30 \times (1 \times 0.48 + 4 \times 0.02)}{4} = 4.2(\text{kV})$$

由此可以看出，当电容器中的绝缘介质没有填满而留有空气隙时，其所能承受的极限电压降低了 23.8 倍。

例 2：在一电场强度 $E = E_0$ 的均匀电场作用下的均匀介质 ($\varepsilon = \varepsilon_1$) 中，有一个球形空气穴 ($\varepsilon = \varepsilon_2 = \varepsilon_0$)，则穴内的电场强度 E_1 为

$$E_1 = \frac{3\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \cdot E_0 \quad (\text{此式推导从略})$$

如果此介质的介质常数 $\varepsilon_1 = 4$ ，则在空气穴中的电场强度

$$E_1 = \frac{3 \times 4}{1 + 2 \times 4} \cdot E_0 = 1.33E_0$$

穴内电场强度是外电场强度的 1.33 倍，因此很容易由此导致绝缘击穿。

如果在均匀介质中的不是空气穴而是一个金属小球时，由于金属的介质常数 ε_1 等于无限大，在小球面上的电场强度 E_2 为

$$E_2 = \left[1 + \frac{3(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \right] E_0 \cos \alpha = 3E_0 \cos \alpha$$

在沿通过球心的电场线上 $\alpha = 0$ ，所以金属小球上的电场强度将为外电场强度的 3 倍。

通过例 1、例 2 可知，在电气设备的绝缘中，不允许有气泡或金属异物杂质落入，否则



将使其耐压水平大幅度降低。

第二节 电介质的电导

电工理论基础中定义, 电流密度 δ 与电场强度 E 之比为电导率(导电系数), 即

$$\gamma = \frac{\delta}{E}$$

电流密度则是指单位时间内在与电流方向垂直的无限小的截面上所通过的电荷数量。从理论上讲, 由于理想的电介质是不含带电质点的, 更没有自由电子, 因此它们是不导电的。但实际工程上所用的电介质, 或多或少总含有一些带电质点(主要是杂质离子), 这时离子与电介质的分子联系较弱, 甚至成自由状态, 或者有些电介质在电场或外界因素的影响下, 本身会离解成正、负离子, 它们在电场的作用下沿电场方向移动, 形成电导电流, 这就是电介质的离子电导。另外, 在高电场的作用下, 离子与电介质分子互相碰撞, 激发、游离出自由电子, 这些电子在电场的作用下移动, 形成电子电导电流, 这就是电介质的电子电导。不过, 当电介质中出现电子电导电流时, 就表明电介质已被击穿, 而不能再作为绝缘体使用。因此, 一般说电介质电导均指离子性电导。

电介质的电导率 γ 为其电阻率 ρ 的倒数, 即 $\gamma = \frac{1}{\rho}$ 。固

体介质除了通过介质内部的电导电流 I_v 外, 还有沿介质表面流过的电导电流 I_s 。相应的有体积电阻 R_v 和表面电阻 R_s , 其电阻率分别是 ρ_v 和 ρ_s 。气体和液体介质则只有体积电阻。

体积电阻率就是在边长1cm的正方体的介质中所测得的其两相对面上的电阻。如图1-7所示。

设在正极1和负极2之间的电介质的厚度为 $d(\text{cm})$, 电极截面 $S(\text{cm}^2)$, 如果测得电介质的体积电阻为 $R_v(\Omega)$, 则体积电阻率为

$$\rho_v = R_v \frac{S}{d} (\Omega \cdot \text{cm})$$

体积电导率就是体积电阻率的倒数

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v} = \frac{1}{R_v} \cdot \frac{d}{S} [1/(\Omega \cdot \text{cm})]$$

顺便指出, 图1-7中3为屏蔽电极, 利用它可屏蔽表面电流, 以便准确测量电介质内部电导电流 I_v 。

表面电阻率就是在每边长1cm的正方形面积上, 其两相对边之间量得的电阻。如图1-8所示, 设电介质表面两电极间的距离为 $d(\text{cm})$, 电极的长度为 $l(\text{cm})$, 测量的表面电阻为 $R_s(\Omega)$, 则表面电阻率为

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{l}{d} (\Omega \cdot \text{cm})$$

表面电导率为表面电阻率的倒数

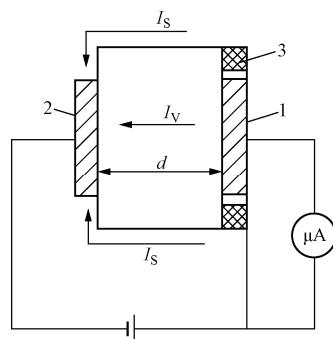


图 1-7 测量体积电阻的原理接线图

1—正极; 2—负极; 3—屏蔽电极

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{d}{l}$$

一、气体介质中的电导

据电流密度的定义可知，气体电介质只有在有离子存在时才能产生电流。在诸如紫外线照射、高温加热或强电场作用等外界因素的影响下，可使气体分子电离，或带电质点与分子碰撞，使分子离解。所形成的离子，在外电场作用下，各自向着与其极性相反的电极移动而形成电流。这就是说，在一定的条件下，气体也能具有导电性。

气体介质中的电导电流就是在外电场作用下气体内离子的移动，正离子沿电场方向移动，负离子向相反的方向移动，当离子抵达电极时，即将所带的电荷交与电极而重新成为中性的分子；同时在移动过程中，正、负离子也会相撞而复合成中性分子。因此，只有将气体不断的游离，使形成的离子对数等于复合而成的分子总数再加上移交其电荷于电极的正、负离子总数的一半时，才能保持气体中的离子浓度，从而维持稳定的电流密度。在电场强度不高、电导电流较小时，在外界因素的作用下，气体中的离子浓度可基本不变，所以电流密度与电场强度成正比，基本上符合欧姆定律，如图 1-9 中 I 段所示。当电场强度增高到一定程度时，气体中的离子运动速度加大，正、负离子愈来愈快的向电极移动，其相碰的机会也愈来愈少，直到所形成的离子来不及相碰而全部移向电极。在此情况下，进一步提高电场强度（在相当范围内）已不能使电流密度再行增加，故得所谓饱和电流。显然，饱和电流等于单位时间内在电极之间的全部容积中所产生的离子所带的电荷。饱和阶段气体介质电流密度与电场强度的关系曲线如图 1-9 中 II 段所示。在饱和段之后，电场强度再继续增高时，气体中将发生碰撞游离，电流密度开始大增，直至击穿，如图 1-9 中 III 段所示。

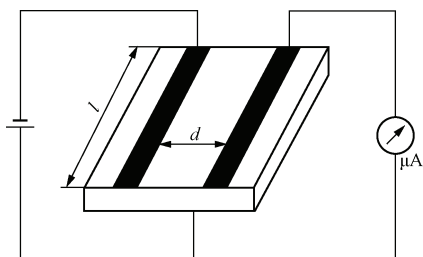


图 1-8 测量表面电阻的原理接线图

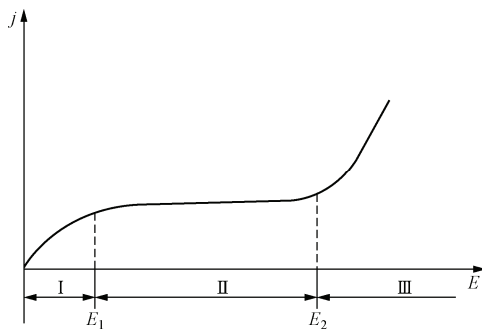


图 1-9 气体电介质的电流密度与电场强度的关系曲线

气体电介质、电流密度与电场强度关系曲线中， $E_1 \sim E_2$ 的饱和段比较宽，并且在工程应用上也多是处于饱和条件之下。而在饱和条件下，气体电介质的电导率是一个不固定的变数。因此，对气体电介质，就不能用电导率来作为判别其电气绝缘特性的指标。又由于气体的电导很小，所以只要气体的工作场强低于游离场强，电导的影响可略去不计。

二、液体电介质的电导

在电介质中，其电子和离子均处于束缚状态，即便可能有自由电子或离子存在时，其数量也非常非常之小。由于液体和固体介质结构较为紧密，分子之间的距离较短，电子和离子的自由路程长度也短，因此，电子和离子就不能从电场中获得足够的动能而将别的分子游离。所以成分和构造均匀的液体和固体介质所具有的电导，要比在一般情况下的气体介质的电导



还小。除醇类等液体（这些材料不能用做绝缘材料）中的离子较多、电导率较大外，工程上常用的液体介质，如变压器油、漆和树脂以及它们的溶剂，均属中性或弱极性介质。这些介质在很纯净的情况下，电导率是非常之小的。但各种杂质、异类质点，所含气泡以及较大的胶体（如绝缘油中的悬浮物）均可离解成为带电质点在电场作用下形成电导电流。在外施电压的作用下，液体介质的电导可能会逐渐变大，这是由于在介质内的离子向电极移动，投身于电极并将杂质（例如，在液体介质内悬浮的细小质点）排出的结果。工程实践表明，即使是极少量的杂质，对介质电导都会产生很大的影响，有时，同一种介质，其电导可相差几十倍之多。

三、固体介质的电导

如前所述，理想的固体介质所具有的电导是非常非常之小的，但成分和结构的不均匀，所含杂质、气泡以及气隙等都能使固体介质的离子电导大大增加。固体介质中，离子电导电流密度 δ_{io} 在电场强度较低时，与电场强度成正比，近似符合欧姆定律，即

$$\delta_{io} = \gamma_{io} E$$

式中： γ_{io} 为离子电导率。

当电场强度较高时，离子电导电流密度与电场强度成指数关系，即

$$j_{io} = \gamma_{io} e^{CE}$$

式中： C 为常数。

当电场强度更高时，由于碰撞游离和阴极发射，大量产生自由电子，电子电导急增，直至击穿为止。图 1-10 为固体介质电导电流与电场强度的关系曲线，I 为低电场强度区，电导电流密度近似同电场强度成正比例，而满足欧姆定律。II 为较高电场强度区，电导电流密度依指数曲线上升。III 为电子电流急增阶段，曲线更陡，预示绝缘已接近击穿的程度。

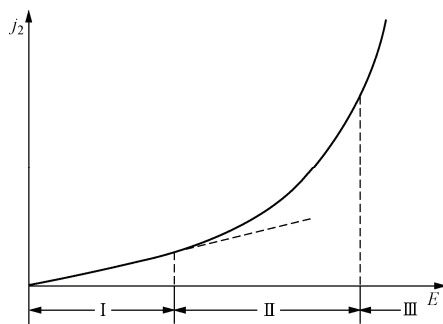


图 1-10 固体介质电流密度与电场强度的关系曲线

前面曾经提到，固体介质除体积电导外，还有表面电导。固体介质的表面电导主要与表面状态及其湿度和污秽程度有关。只要介质表面出现很薄的吸附杂质膜，表面电导就比体积电导大得多。有时甚至混淆了绝缘本身的真实状况。因此在试验时，要注意被试品的表面状况，必要时采用一定的屏蔽措施，对试验结果应结合实际情况进行具体的分析。

第三节 绝缘的吸收现象

当在理想介质上施加直流电压时，初始瞬间电流很大，以后在一定时间内逐渐衰减，最后达到稳定。这一电流共分三部分：即充电电流、吸收电流和电导电流，现就其物理特性分述如下。

一、充电电流

当理想介质 ($\nu = 0$) 上施加直流电压时，最终将在其所在的空间内，建立一个既没有电流也没有磁场的静电场，并达到不变状态。但在建立电场和达到不变状态的过程中，在电场内