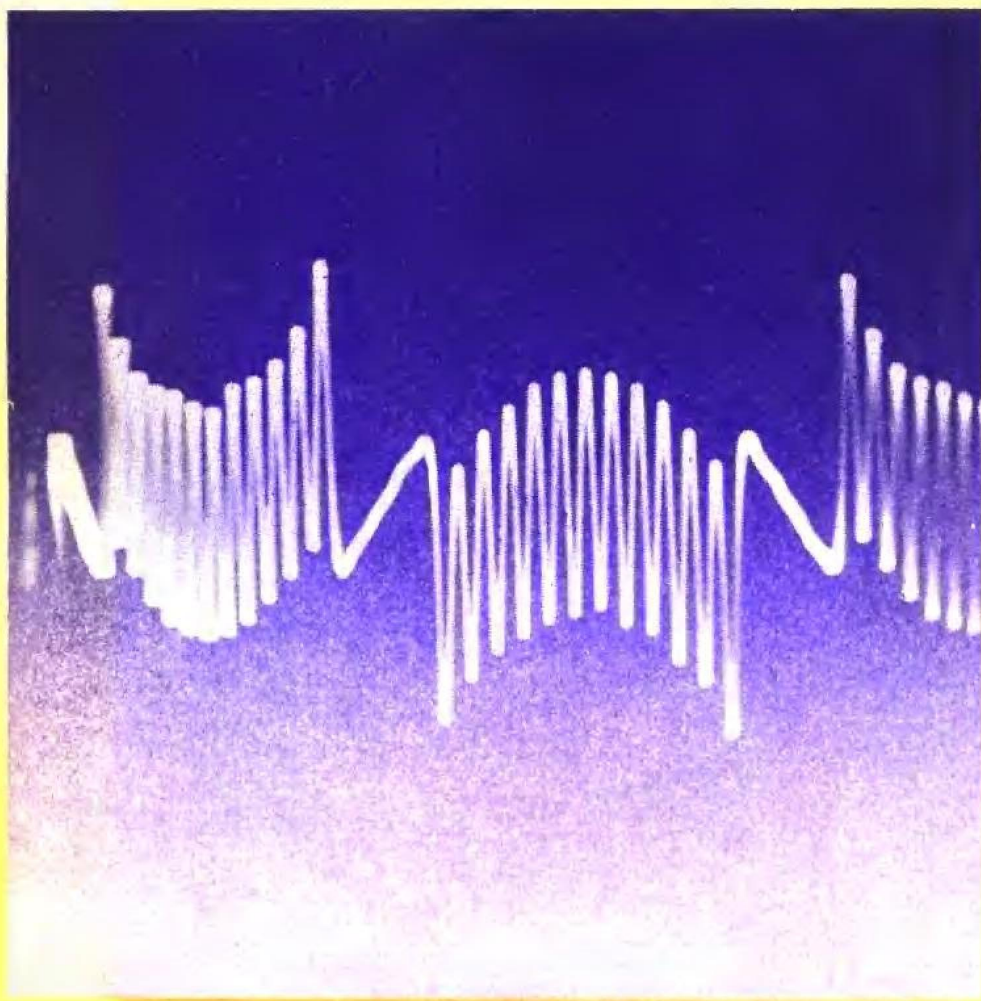


高压电气设备试验方法

西南电业管理局试验研究所



水利电力出版社

内 容 提 要

本书较全面地阐述了高压电气设备的试验方法。书中所介绍的绝大部分试验项目，除叙述其原理、接线和试验方法外，还论述了影响试验的因素和实测结果的分析与判断。

全书分为两篇共三十四章。第一篇介绍变压器、互感器、断路器、绝缘子、套管、电力电缆、电容器、避雷器、输电线路参数、接地装置、消弧线圈和测量系统电容电流等试验方法。第二篇介绍发电机绝缘、特性、参数、温升、进相及异步运行，励磁机（包括静止半导体励磁）的特性及炭刷冒火的消除，电动机的特性、温升及匝间绝缘等试验调整方法。

本书注意吸收了我国近年来高压电气试验方面富有成效的新方法，大部分插图是依据现场试验接线和结果绘制的，因此具有实用参考价值。

本书可供发、供电部门高压电气设备试验人员使用，也可供高校、中专有关专业教学参考。

高压电气设备试验方法

西南电业管理局试验研究所

*

水利电力出版社出版

（北京三里河路6号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 31.25印张 710千字

1984年6月第一版 1984年6月北京第一次印刷

印数 00001—13610册 定价 3.20元

书号 15143·5344

前 言

我所组织有关人员，在原四川省电力局中心试验所编《高压电气设备试验方法》资料的基础上，吸收了各有关单位的试验经验，结合编者在电气试验实践中的一些体会编写了《高压电气设备试验方法》一书，供从事高压电气试验人员参考。

全书共分两篇三十四章。第一篇为高压电气设备试验，包括第一章至二十三章；第二篇为旋转电机试验，包括第二十四章至三十四章。

第十三、二十四（第一至七节）、第二十五章（第三节）和三十二章由张葆昌同志编写；第二、七、十二、二十、二十一、二十四（第八、九节）、二十五章（第一、二节）、二十六章和二十七章由周德贵同志编写；第三、五、八、十、十五、十七和二十八章由程地莲同志编写；第四、九、十一、十六和三十四章由李绍求同志编写；第一、六章为章子君同志编写；第十四章为孙翊国同志编写；第十八章和二十二章为孙万忠同志编写；第十九、二十三章为曾国富同志编写；第二十九、三十章为陈仪仲同志编写；第三十一章和三十三章为马宗禄同志编写。

张葆昌同志任该书的主编和全书的统稿工作。周德贵、程地莲同志参加了修改定稿工作。

在修编过程中，承蒙华北、西北、湖北、华东、河南等试验研究所以及水利电力部电力科学研究院、东北技术改进局、西安交通大学、东北电力学院、重庆大学、成都科技大学、重庆电力学校、东方电机厂和一些发、供电部门提供了许多宝贵经验，并提出了大量建设性意见，特此一并致谢。

编者都是电力部门的基层高压试验工作者，理论水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

西南电业管理局试验研究所

一九八三年八月二十日

目 录

前 言

第一篇 高压电气设备试验

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 电介质的电导与性能	5
第三节 电介质的损耗及等值电路	9
第四节 电介质的击穿	12
第二章 测量绝缘电阻	14
第一节 绝缘电阻和吸收比	14
第二节 兆欧表的工作原理	16
第三节 测量方法及注意事项	18
第四节 影响绝缘电阻的因素和分析判断	19
第三章 直流泄漏电流及直流耐压试验	20
第一节 试验方法	20
第二节 影响因素和试验结果的分析	26
第四章 介质损失的测量	27
第一节 高压交流平衡电桥	28
第二节 M型介质试验器	42
第三节 低功率因数功率表法	44
第四节 影响 $\text{tg}\delta$ 的因素和结果的分析	45
第五章 工频交流耐压试验	48
第一节 试验方法	49
第二节 试验设备	53
第三节 试验电压的测量	55
第四节 试验分析及注意事项	56
第六章 绝缘油的试验	57
第一节 绝缘油的电气性能试验	57
第二节 油中溶解气体的气相色谱分析	61
第七章 变压器绝缘试验	66
第一节 绝缘特性试验	67
第二节 外施工频交流耐压试验	71
第三节 感应耐压试验	73
第八章 变压器变压比测量	88

第一节	用双电压表法测量变比	89
第二节	变比电桥法	91
第九章	变压器的极性和组别试验	92
第一节	变压器的极性试验	92
第二节	变压器接线组别试验	94
第十章	变压器绕组的直流电阻测量	102
第一节	测量的物理过程	102
第二节	测量的方法	103
第三节	测量中的注意事项及结果判断	107
第十一章	变压器的短路和空载试验	109
第一节	损耗的测量	109
第二节	空载试验	115
第三节	短路试验	120
第四节	变压器的电压变动率和效率	125
第十二章	变压器的温升试验	127
第一节	试验的目的和要求	127
第二节	试验方法	128
第三节	测量温度	132
第四节	试验结果计算	135
第五节	试验实例	138
第十三章	互感器试验	142
第一节	互感器的绝缘试验	142
第二节	电流互感器的特性试验	145
第三节	电压互感器的特性试验	148
第四节	电容式电压互感器的变比较验	151
第十四章	高压断路器试验	152
第一节	断路器的绝缘试验	153
第二节	断路器的机械特性试验	156
第十五章	绝缘子和套管的绝缘试验	163
第一节	绝缘子试验	163
第二节	套管试验	167
第十六章	电力电缆的试验	169
第一节	绝缘试验	169
第二节	故障探测	172
第十七章	电容器的试验	180
第一节	电容器的试验项目及方法	181
第二节	试验实例	183
第十八章	避雷器试验	187
第一节	阀型避雷器的试验	188

第二节	管型避雷器的检查试验	192
第十九章	输电线路工频参数测量	193
第一节	测试方法	194
第二节	有关参数测量中的注意事项	199
第二十章	导线接头试验	200
第二十一章	测量相序和相位	201
第一节	相序和相位及其测量的意义	201
第二节	测量相序的方法	202
第三节	测量相位的方法	206
第二十二章	接地装置试验	208
第一节	概述	208
第二节	测量接地电阻的方法	209
第三节	测量土壤电阻率的方法	218
第四节	测量接触电压、电位分布和跨步电压	220
第二十三章	消弧线圈试验和系统电容电流测量	223
第一节	消弧线圈试验	223
第二节	测量系统中性点不对称电压	228
第三节	测量中性点位移电压	229
第四节	消弧线圈补偿系统的调谐试验	231
第五节	消弧线圈补偿系统电容电流的测量	233

第二篇 高压旋转电机试验

第二十四章	发电机绝缘试验	242
第一节	发电机定子绝缘的性能及其结构	242
第二节	绝缘电阻及吸收比测量	244
第三节	直流泄漏及直流耐压试验	249
第四节	发电机交流耐压试验	254
第五节	水内冷发电机的绝缘试验	260
第六节	检查发电机定子绝缘缺陷的试验	265
第七节	发电机组轴电压的测量	271
第八节	预测发电机定子绕组绝缘击穿电压的试验	273
第九节	应用超低频电压进行大型发电机定子绕组的绝缘试验	284
第二十五章	检查发电机转子绕组故障的试验	291
第一节	检查转子绕组接地故障的试验	291
第二节	检查转子绕组静态匝间短路故障的试验	295
第三节	检查转子绕组动态匝间短路故障的试验	318
第二十六章	发电机的参数试验	327
第一节	试验的目的和基本参数	327
第二节	同步电抗 X_d	328

第三节	定子绕组的漏电抗 X_l	334
第四节	零序电抗 X_0	338
第五节	负序电抗 X_2	340
第六节	次暂态电抗 X'_d 和暂态电抗 X''_d	343
第七节	时间常数 T_a 、 T'_d 、 T''_d 和 H	353
第二十七章	发电机的温升试验	355
第一节	温升试验的目的及有关的基本知识	355
第二节	温升试验的基本要求和准备工作	359
第三节	测量定、转子绕组和铁芯温度的方法	361
第四节	直接测量定子绕组铜温的方法	363
第五节	带电测量定子绕组平均温度的方法	365
第六节	温升试验和数据处理实例	375
第七节	损耗试验和综合分析	379
第二十八章	发电机定子铁芯和定子绕组焊接头试验	384
第一节	发电机定子铁芯损耗试验	384
第二节	发电机定子绕组焊接头的检查试验	388
第二十九章	它励式静止半导体励磁一次回路的试验	393
第一节	原理接线	393
第二节	绝缘试验	394
第三节	参数测量	395
第四节	强励倍数和励磁电压上升速度的测量	395
第五节	负荷试验	397
第三十章	直流励磁机试验	397
第一节	直流励磁机的检查试验	397
第二节	绕组直流电阻及交流阻抗的测量	401
第三节	直流励磁机的绝缘试验	402
第四节	直流励磁机的特性试验	403
第五节	励磁机的温升试验	405
第六节	电压上升速度和强行励磁倍数的测量	405
第七节	换向极的检查试验	407
第八节	换向极的调整	409
第三十一章	汽轮发电机的负序温升试验	411
第一节	不平衡负荷对电机和系统的危害	411
第二节	不对称故障(或状态)可能产生的负序电流 I_2 值	412
第三节	限制汽轮发电机不平衡负荷的因素及承受负序电流的能力	414
第四节	不平衡负荷时转子的过热部位	415
第五节	负序温升试验的准备工作	416
第六节	稳态负序温升试验	417
第七节	暂态负序温升试验	424
第三十二章	发电机的异步运行试验	427

第一节	异步运行试验的目的和物理过程	427
第二节	异步运行的试验	431
第三节	试验计算实例	433
第四节	小结	435
第三十三章	发电机的进相运行试验	437
第一节	进相运行的基本概念和限制因素	437
第二节	进相运行的试验方法	440
第三节	进相运行限额图及其调压效果	444
第三十四章	异步电动机试验	449
第一节	定子绕组的极性检查试验	450
第二节	电动机空载试验	451
第三节	电动机短路试验	453
第四节	异步电动机的圆图	455
第五节	电动机定子绕组匝间绝缘试验	458
第六节	鼠笼电动机转子铜(铝)条故障检查	463
第七节	电动机温升试验	464

附 录

附录一	常用高压二极管	466
附录二	介质损失角温度换算系数	466
附录三	一球接地时,球隙的工频交流、负极性直流、负极性冲击放电电压 (千伏,最大值)	468
附录四	常用电力变压器技术数据	470
附录五	断路器的技术数据	474
附录六	避雷器的电气特性	481
附录七	系统电容电流估算	483
附录八	电气绝缘工具的试验	483
附录九	发电机参数测量实例	485
附录十	同步发电机参数(参考值)	487
参考资料		

第一篇 高压电气设备试验

第一章 电介质物理基本知识

电介质（或称绝缘介质）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、液体和固体三类。目前，对这些电介质物理过程的阐述，以气体介质较多，液体和固体介质仅有一些基本理论，还有不少问题难以给出量的分析，这样就在很大程度上要依靠实验结果和工作经验来进行解释和判断。

第一节 电介质的极化

一、极化的含义

电介质的分子结构可分为中性、弱极性和极性的，但从宏观来看都是中性不带电的。当把电介质放在电场中，电介质就要极化，其极化形式大体可分为下述几种。

（一）原子或离子的位移极化

中性分子，当无电场作用时，其正、负电荷作用中心重合，将它放在电场中时，其正、负电荷作用中心就分离，变成带有正、负极性的偶极子，如图 1-1(a)。图 1-1(a)是一个氢原子的电子极化示意图，图中 d 表示原子在极化前后，其正、负两电荷作用中心的距离。

离子式结构的电介质（如玻璃、云母等），在电场作用下，其正负离子被拉开，从而使正、负电荷作用中心分离，也形成偶极子，如图 1-1(b)。图 1-1(b)中 d_i 表示正、负电荷之间的距离。

原子中的电子和原子核之间，或正离子和负离子之间，彼此都是紧密联系的。因此在电场作用下，电子或离子所产生的位移是有限的，且随电场强度增强而增大，电场一消失，它们立即就像弹簧一样很快复原。所以通称弹性极化。

（二）热离子位移极化

电介质或多或少含有一些带电质点（如杂质离子），它们与周围的分子联系较弱。无电场作用时，这些带电质点随分子热运动而混乱分布着，整个电介质宏观地表现为电荷分布均匀而呈中性。当有电场作用时，这些带电质点的热运动趋于一定规则，倾向顺电场方向在有限范围内位移，造成电介质中电荷分布不对称和不均匀，也形成偶极化。这些带电质点的位移，受着分子热运动很大的影响，温度愈高，热运动愈强，极化就愈困难。由于极化受到热运动的阻碍，它的建立是缓慢的，电场消失后，复原也是缓慢的。所以这种极化称为偶极松弛极化，如图 1-1(c)。

（三）转向极化

电介质含有固有的极性分子，它们本来就是带有极性的偶极子。当无电场作用时，它

们的分布是混乱的，宏观地看，电介质不呈现极性。在电场作用下，这些偶极子顺电场方向扭转（分子间联系较紧密的），或顺电场排列（分子间联系较松散的）。整个电介质也形成了带正电和带负电的两极。前者属于弹性的转向极化，后者属于松弛的转向极化，这类极化受分子热运动的影响也很大。有关偶极松弛极化的形式，如图1-1(c)所示。

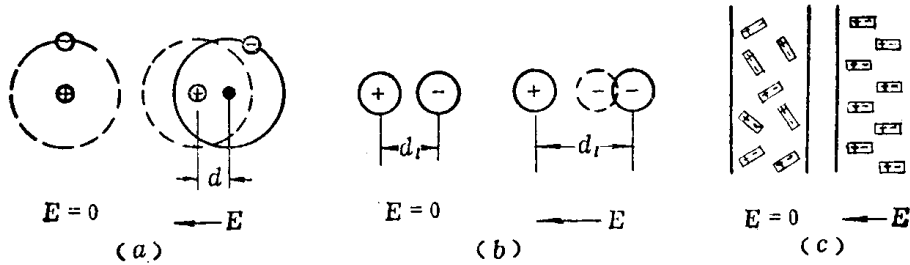


图 1-1 极化基本形式示意图
(a)电子位移极化；(b)离子位移极化；(c)偶极松弛极化

(四) 夹层极化

由两层或多层不同材料组成的不均匀电介质，叫做夹层电介质。由于各层的介电系数和电导系数不同，在电场作用之下，各层中的电位，最初按介电系数分布（即按电容分布），以后逐渐过渡到按电导系数分布（即按电阻分布）。此时，在各层电介质的交界面上的电荷必然移动，以适应电位的重新分布，最后在交界面上积累起电荷。这种电荷移动和积累，就是一个极化过程，如图1-2所示。

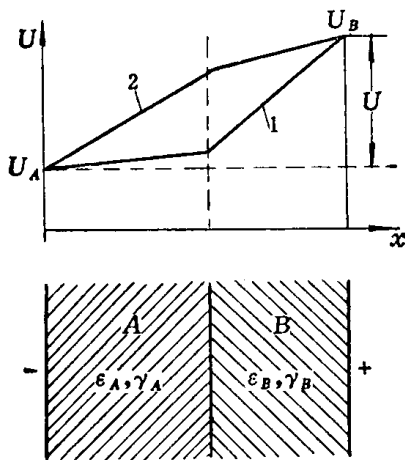


图 1-2 夹层电介质极化的电压分布图
 U —夹层介质上所加的总电压；
 U_A —A层上分布的电压；
 U_B —B层上分布的电压

上的电荷必然移动，以适应电位的重新分布，最后在交界面上积累起电荷。这种电荷移动和积累，就是一个极化过程，如图1-2所示。图中，由电介质A和B组成双层电介质，设A层中的介电系数大于B层中的介电系数，即 $\epsilon_A > \epsilon_B$ ；A层中的电导系数小于B层中的电导系数，即 $\gamma_A < \gamma_B$ 。当加上电压的瞬时，两层中的电压分布如曲线1，稳定时如曲线2。为了最终保持两层中的电导电流相等，必须使交界面上积累正电荷，以加强A层中的电场强度而削弱B层中的电场强度，从而缓慢地形成极化。

上述电介质的四种极化形式，从施加电场开始，到极化完成为止，都需要一定的时间，这个时间有长有短。属于弹性极化的，极化建立所需的时间都很短，不超过 10^{-12} 秒。属于松弛极化的，极化时间都较长，如热离子位移极化在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 秒以上。夹层极化则时间更长，在 10^{-1} 秒以上，甚至以小时计。弹性极化在极化过程中不消耗能量，因此不产生损耗。而松弛极化则要消耗能量，并产生损耗。

二、电介质极化在工程实践中的意义

(一) 增大电容器的电容量

如前所述，在电极间放入电介质后，由于电介质极化，在靠近电极的电介质表面形成

束缚电荷，它将从电源吸引一部分额外电荷来“中和”，使极板上储存的电荷增加，因此加大了极板间的电容量。

所以，在一定的几何尺寸下，为了获得更大的电容量，就要选用介电系数(ϵ)大的电介质。例如，在电力电容器的制造中，以氯化联苯($\epsilon=5$)代替石油制成的电容器油($\epsilon=2$)，这样就可增大电容量或减小电容器的体积和重量。

(二) 绝缘的吸收现象

当在电介质上加直流电压时，初始瞬间电流很大，以后在一定时间内逐渐衰减，最后稳定下来。电流变化的这三个阶段表现了不同的物理现象。初始瞬间电流是由电介质的弹性极化所决定，弹性极化建立的时间很快，电荷移动迅速，所呈现的电流就很大，持续的时间也很短，这一电流称为电容电流(i_c)。接着随时间缓慢衰减的电流，是由电介质的夹层极化和松弛极化所引起的，它们建立的时间愈长，则这一电流衰减也愈慢，直至松弛极化完成。这一过程称为吸收现象，这个电流称为吸收电流(i_a)。最后不随时间变化的稳定电流，是由电介质的电导所决定的，称为电导电流(I_g)，它是电介质直流试验时的泄漏电流(I_x)的同义语。图1-3示出了电介质的吸收电流曲线。吸收现象，在夹层极化中表现的特别明显。如发电机和电缆都是多层绝缘，属于夹层极化，吸收电流衰减的时间均很长。变压器的绝缘结构，比发电机和电缆要简单得多，其吸收现象也要弱些。绝缘子是单一的绝缘结构，松弛极化很弱，所以基本上不表现吸收现象。

由于夹层绝缘的吸收电流随时间变化非常明显，所以在实际测试工作中利用这一特性来判断绝缘的状态。吸收电流随时间变化的规律，一般用下式表示：

$$i_a = UC_x D t^{-n} \quad (1-1)$$

式中 U —— 施加电压；
 C_x —— 被试品电容；
 t —— 时间；

D 、 n —— 均为常数。

这一公式在 t 等于零及 t 趋近于零时都不适用，工程上应用还是恰当的。式(1-1)表明，吸收电流 i_a 是随时间按幂函数衰减的，如将此式两端取对数，则得

$$\lg i_a = \lg UC_x D - n \lg t \quad (1-2)$$

即吸收电流的对数与时间的对数成一下降直线关系， n 为该直线的斜率。如图1-4所示。

由于吸收电流随时间变化，所以在测试绝缘电阻和泄漏电流时都要规定时间。例如在现行电气设备交接和预防性试验的有关标准中，利用60秒及15秒时的绝缘电阻比值(即 R_{60}/R_{15})，一分钟或十分钟的泄漏电流等，作为判断绝缘受潮程度或脏污状况的一个指标。绝缘受潮或脏污后，泄漏电流增加，吸收现象就不明显了。

(三) 电介质的电容电流和介质损耗

前面所述的是电介质在直流电场中的情况。如把电介质放在交变电场中，电介质也要

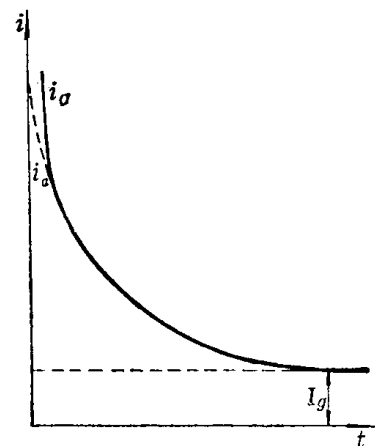


图 1-3 电介质吸收电流曲线

极化，而且随着电场大小和方向的改变，极化也跟着不断改变它的大小和方向。

对于50赫的工频交变电场来说，弹性极化完全能够跟上交变电场的变化。如图1-5(a)所示，当电场从零按正弦规律变到最大值时（图中曲线 u ），极化（即电矩 I ）也从零按

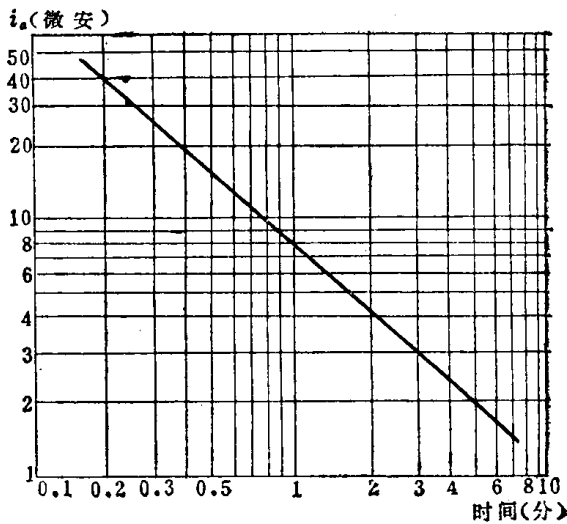


图 1-4 吸收电流 i_a 与时间的关系曲线

这就是电介质中的电容电流。

从图1-5中还可以看出，在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 期间，电荷移动的方向与电场的方向相同，即电场对移动中的电荷做功，或者说电荷获得动能，相当于“加热”。当 $\frac{\pi}{2} \sim \pi$ 期间，电场的方向未变，但电荷移动的方向与电场相反，这时电荷反抗电场做功，丧失自己的动能而“冷却”。在 $0 \sim \pi$ 半周中，“加热”和“冷却”正好相等，因此电介质中没有损耗。这就是说，在交变电场中，弹性极化只引起纯电容电流，而不产生损耗。

松弛极化则要产生损耗，这将在电介质损耗一节中讨论。

正弦规律变到最大，经过半周期后又同样沿负的方向变化。图 1-5(b) 为极化形成的偶极子随电场变化的示意图。既然电矩是按正弦规律变化，那末电流 i_c （因 $i_c = \frac{dI}{dt}$ ）一定按余弦规律变化，如图1-5(a)中的 $\frac{dI}{dt}$ 曲线。由图可见，在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 期间，电矩 I 是增加的， $\frac{dI}{dt}$ 为正，即电流 i_c 为正；在 $\frac{\pi}{2}$ 时 i_c 为零；在 $\frac{\pi}{2} \sim \pi$ 期间 i_c 为负。因此，电流 i_c 超前外施电压 u 为 90° ，

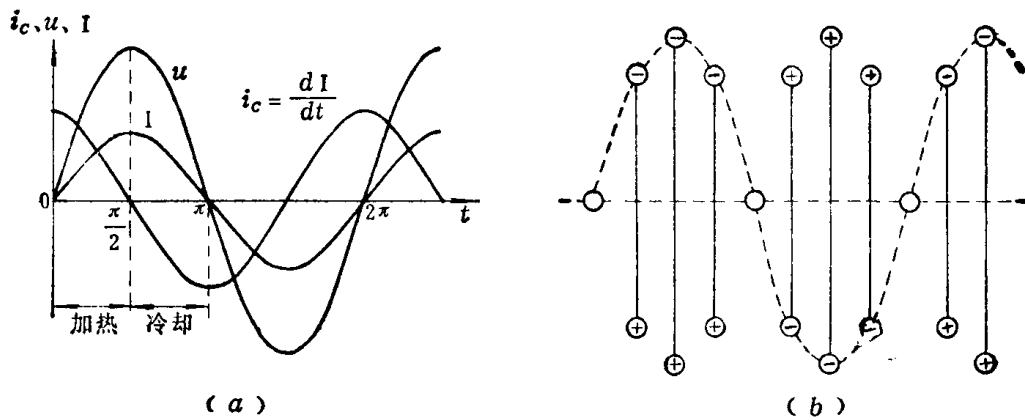


图 1-5 电介质在交变电场中的极化

(a) 电矩 I 的极化变化规律；(b) 偶极子随电场的变化示意图

第二节 电介质的电导与性能

一、电介质的电导

电介质中的电导，可分为离子电导和电子电导。离子电导是以离子为载流体，电子电导是以自由电子为载流体。理想的电介质是不含带电质点的，更没有自由电子。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），这些离子与电介质分子联系非常弱，甚至成自由状态。有些电介质在电场或外界因素影响下（如紫外线辐射），本身就会离解成正负离子。它们在电场作用下，沿电场方向移动，形成了电导电流，这就是离子电导。电介质中的自由电子，则是在高电场作用下，离子与电介质分子碰撞、游离激发出来的。这些电子在电场作用下移动，形成电子电导电流。当电介质中出现电子电导电流时，就表明电介质已经被击穿，因而不能再作绝缘体使用。因此，一般说电介质的电导都是指离子性电导。

二、电介质的性能

（一）电介质的电导率和电阻率

电介质的性能常用电导率 γ 或电阻率 ρ 来表示，电导率为电阻率的倒数，即 $\gamma = \frac{1}{\rho}$ 。

固体电介质除了通过电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 。由电介质内部电导电流所决定的电阻称为体积电阻 R_v ，其电阻率为 ρ_v 。由表面电导电流 I_s 决定的电阻称为表面电阻 R_s ，其电阻率为 ρ_s 。气体和液体电介质只有体积电阻。

体积电阻率，就是在边长一厘米的正方体的电介质中，所测得其两相对面上的电阻。如图1-6，设在正极1和负极2间的电介质的厚度为 d （厘米），电极截面为 S （厘米²）。3为屏蔽电极，利用它可屏去表面电流，以准确测得电介质内部的电流 I_v 。如测得电介质的体积电阻为 R_v （欧姆），则体积电阻率为

$$\rho_v = R_v \frac{S}{d} \quad (\text{欧姆} \cdot \text{厘米}) \quad (1-3)$$

体积电导率就是体积电阻率的倒数：

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v} = \frac{1}{R_v} \cdot \frac{d}{S}$$

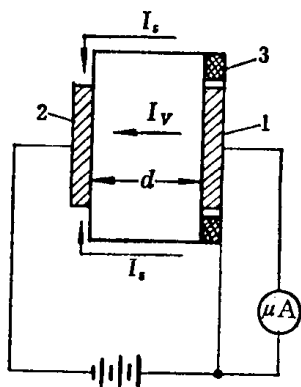


图 1-6 体积电阻的测量图

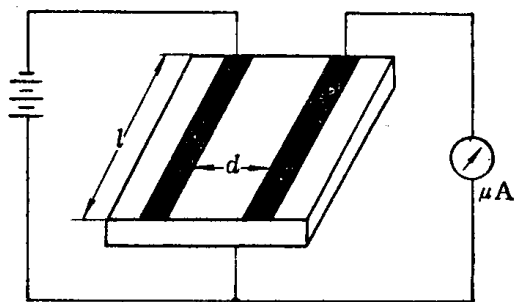


图 1-7 表面电阻的测量图

$$= G_v \frac{d}{S} \quad (\text{欧姆}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-1}) \quad (1-4)$$

式中 G_v ——为体积电导。

表面电阻率就是在每边长一厘米的正方形面积上，其两相对边之间量得的电阻。如图 1-7，设电介质表面两电极间距离为 d （厘米），电极的长度为 l （厘米），测得的表面电阻为 R_s （欧姆），则表面电阻率为

$$\rho_s = R_s \frac{l}{d} \quad (\text{欧姆}) \quad (1-5)$$

表面电导率为表面电阻率的倒数：

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{d}{l} = G_s \frac{d}{l} \quad (\text{欧姆}^{-1}) \quad (1-6)$$

式中 G_s ——为表面电导。

（二）电介质的电导与温度的关系

电介质的电导与温度有关，它和松弛极化中的热粒子极化类似，都是由附着在电介质分子上的带电质点，在电场作用下沿电场方向位移形成的。不同的是热离子极化中带电质点与电介质分子联系较紧，当受电场作用时，它们只在有限范围内有规则地移动一点，仍然是束缚电荷的性质。而离子电导中的带电质点与电介质分子联系较弱，在电场作用下，则顺电场方向移动成为电流。上述两种情况，在没有外加电场时，带电质点在电介质分子周围某平衡位置附近并随分子作不规则的混乱的热运动，温度愈高，带电质点热运动的动能愈大，就更易跳越原来的平衡位置，在电场作用下就更易顺电场方向移动。因此，温度愈高，不论是热离子极化随时间衰减的吸收电流，还是离子电导的恒定电导电流，都要相应地增加，或电介质的绝缘电阻相应地减小。

1. 泄漏电流或绝缘电阻与温度的关系式

泄漏电流（包括吸收电流和电导电流）或绝缘电阻与温度的关系，可用下面几种数学式表达：

泄漏电流	绝缘电阻	
$i_{xt} = i_0 10^{Mt}$	$R_{it} = R_0 10^{-Mt}$	(1-7)

$i_{xt} = i_0 e^{\alpha t}$	$R_{it} = R_0 e^{-\alpha t}$	(1-8)
-----------------------------	------------------------------	-------

$i_{xt} = i_0 K^{0.1t}$	$R_{it} = R_0 K^{-0.1t}$	(1-9)
-------------------------	--------------------------	-------

式中 i_{xt} 、 R_{it} ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的泄漏电流和绝缘电阻；

i_0 、 R_0 ——温度为 0°C 时的泄漏电流和绝缘电阻；

M 、 α 、 K ——为系数。

系数 α 、 M 、 K 是根据不同的设备、材料和结构的试验来确定，对于同一对象，同时要式 (1-7) ~ (1-9) 来表达时，不难推导出三个系数 (α 、 M 、 K) 之间的关系。

$$\frac{i_{xt}}{i_0} = 10^{Mt} = e^{\alpha t} = K^{0.1t} \quad (1-10)$$

分别取对数：

$$Mt = \alpha t \lg e = 0.1 t \lg K$$

$$M = \alpha \lg e = 0.1 \lg K \quad (1-11)$$

将式(1-7)~(1-9)中任一式等号两端取对数, 现以 $i_{Rt} = i_0 10^{Mt}$ 为例:

$$\lg i_{xt} = \lg i_0 + Mt = A + Mt \quad (1-12)$$

式中 A —— 为常数。

即 $\lg i_{xt}$ 与 t 成直线关系, M 为直线的斜率。如图1-8所示, 取直流泄漏电流或绝缘电阻为对数, 取温度为等分刻度, 在这样的半对数坐标中, 泄漏电流为上升直线1, 绝缘电阻为下降直线2。图1-8为一台油浸变压器的泄漏电流和绝缘电阻与温度的关系。

2. 半值温度

“半值温度”是指绝缘电阻下降一半时(或泄漏电流升高一半), 所需的温度升高。如图1-8所示的情况, 半值温度为 17°C 。凡是在半对数坐标上成直线关系的, 都可以定出“半值温度”。用半值温度来表明绝缘与温度的变化关系, 比上列公式计算更为直观。半值温度与系数 M 的关系如下:

$$\frac{i_{xt}}{i_0} = 2 = 10^{M \cdot \Delta t}$$

$$M \cdot \Delta t = \lg 2 = 0.3$$

$$\text{因此半值温度} \quad \Delta t = \frac{0.3}{M} \quad (1-13)$$

$$\text{或} \quad \Delta t = \frac{3}{\lg K} \quad (1-14)$$

3. 温度差的换算系数

由于泄漏电流和绝缘电阻与温度有关, 因此在不同温度下测得的泄漏电流或绝缘电阻, 必须换算到同一温度下进行比较。这是试验中经常遇到的。按电气设备交接和预防性试验有关标准的规定, 油浸变压器绝缘电阻的温度换算系数如表1-1所示。例如, 将温度为 70°C 时测得的绝缘电阻80兆欧, 换算到较低温度 30°C 时, 可由表1-1查得与其温度差 $70 - 30 = 40(^\circ\text{C})$ 值对应的系数5.1, 则 30°C 的绝缘电阻值为 $80 \times 5.1 = 408$ 兆欧。

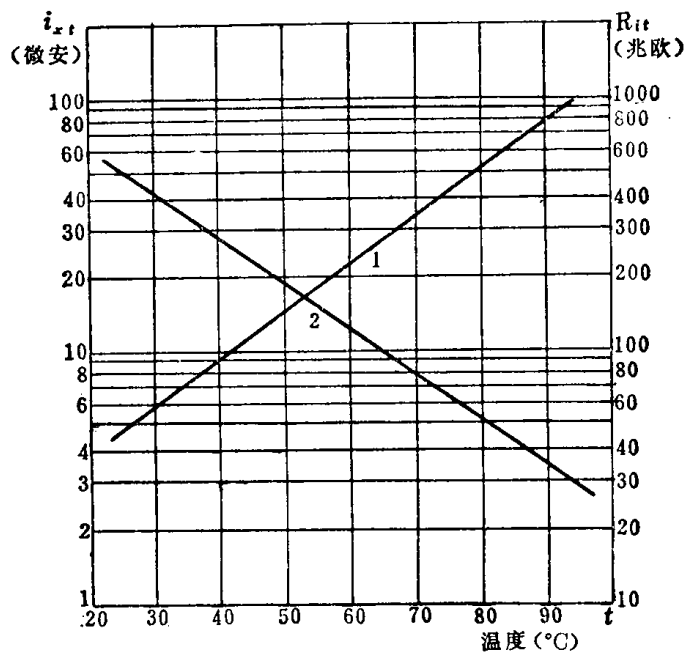


图 1-8 泄漏电流和绝缘电阻与温度的关系

表 1-1 温度差与温度系数换算表

温度差($^\circ\text{C}$)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
换算系数	1.2	1.5	1.8	2.3	2.8	3.4	4.1	5.1	6.2	7.5	9.2	11.2

表1-1中的数据是按类似图1-8的曲线得出的，测量的绝缘电阻值以时间是60秒时为准。

三、气体电介质中的电导

气体电介质中有离子时才能产生电流。例如紫外线照射、高温加热等，使气体分子电离，或者气体电介质中的带电质点与分子碰撞，而使分子离解，所形成的离子，各向与其

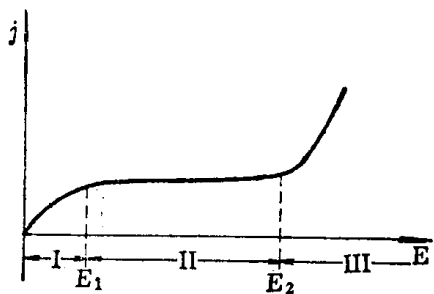


图 1-9 气体电介质的电流密度与电场强度的关系曲线

极性相反的电极移动而形成电流。如离解的作用持续不断，则气体中所产生的离子浓度将不断增大，正负离子相碰的机会也随之增加。正负离子的相碰便复合成中性分子，当复合的离子数等于形成的离子数时，气体中离子浓度就停止增大而达到了稳定状态。在电场强度较小时，气体中电流密度与电场强度成正比，即

$$j = \gamma E \quad (1-15)$$

式中 γ —— 为电导率；
 E —— 电场强度。

此时基本上符合欧姆定律（如图1-9中I段）。当电场强度增高到一定程度时，气体中的离子运动速度增大，正负离子愈来愈快地向电极移动，其相碰的机会也愈来愈少，直到来不及复合就移向电极，所有形成的离子都移向电极，电流达到饱和状态，几乎与电场强度无关（图1-9中II段）。在饱和段之后，电场强度再继续增高，则气体中发生碰撞游离，电流密度又开始大增直至击穿（图1-9中III段）。 $E_1 \sim E_2$ 的饱和段比较宽，气体电介质在工程应用上总是处于饱和条件下。因此，对气体电介质，不能以电导率来作为其电气绝缘特性。因为在饱和电流条件下，电流密度不随电场强度变化，电导率就没有意义。又由于气体的电导很小，故只要气体的工作场强低于游离场强，就不必考虑气体的电导。

四、液体电介质中的电导

液体介质中形成电导电流的带电质点主要有两种，一种是电介质分子或杂质分子离解而成的离子；另一种是较大的胶体（如绝缘油中的悬浮物）带电质点。前者叫做离子电导，后者叫做电泳电导。二者只是带电质点大小上的差别，其性质是一样的。中性和弱极性的液体电介质，其分子的离解度小，其电导率就小。介电系数大的极性和强极性液体电介质的离解作用是很强的，液体中的离子数多，电导率就大。因此，极性和强极性（如水、醇类等）的液体，在一般情况下，不能用作绝缘材料。工程上常用的液体电介质，如变压器油、漆和树脂以及它们的溶剂（如四氯化碳、苯等），都属于中性和弱极性。这些电介质在很纯净的情况下，其电导率是很小的。但工程上通常用的液体电介质难免含有杂质，这样就会增大其电导率。

五、固体介质的电导

固体电介质的电导分为离子电导和电子电导两部分。离子电导在很大程度上决定电介质中所含的杂质离子，特别对于中性及弱极性电介质，杂质离子起主要作用。离子电导的电流密度，在电场强度较低时，它与电场强度成正比，符合欧姆定律，即：

$$j_{i0} = \gamma_{i0} E \quad (1-16)$$

式中 γ_{i0} ——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

$$j_{i0} = \gamma_{i0} e^{CE} \quad (1-17)$$

式中 C ——常数；

E ——电场强度。

当电场更高时，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。电子电导电流密度与电场强度也是成指数关系，即

$$j_e = \gamma_e e^{AE} \quad (1-18)$$

式中 γ_e ——电子电导率；

A ——常数。

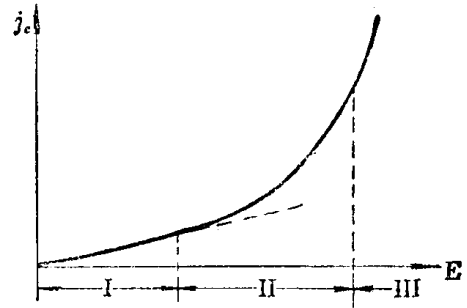


图 1-10 固体电介质的电流密度与电场强度的关系曲线

由于电子电导电流急增，电介质总的电导电流的增长比指数曲线更陡。图1-10为固体电介质电导电流密度与电场强度的关系曲线。曲线分三部分：I部分为欧姆定律阶段；II部分为电场强度高时，电子电流密度成指数曲线上升；III为电子电流急增阶段，曲线更陡，开始出现电子电导电流急增的电压，约在固体电介质击穿电压的80%左右，这就预示绝缘接近击穿的程度。

固体电介质的表面电导，主要决定于它表面吸附导电杂质（如水分和污染物）的能力及其分布状态。只要电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的多。极性电介质的表面与水分子之间的附着力远大于水分子的内聚力（因为水也是极性的），就很容易吸附水分，而且吸附的水分湿润整个表面，形成连续水膜，这叫做亲水性的电介质。这种电介质表面电导就大，如云母、玻璃、纤维材料等。不含极性分子的电介质表面与水分子之间的附着力小于水分子的内聚力，不容易吸附水分，只在表面形成分散孤立的水珠，不构成连续的水膜，这叫做憎水性电介质。其表面电导就小，如石蜡、聚苯乙烯等。还有一些材料能部分溶于水或胀大（如赛璐珞），其表面电导也很大。表面粗糙或多孔的电介质也更容易吸附水分和污染物。在实际测试工作中，有时表面电导远大于体积电导。所以在测量绝缘泄漏电流或绝缘电阻时，要注意屏蔽和具体分析测试结果。

第三节 电介质的损耗及等值电路

在交流或直流电场中，电介质都要消耗电能，通称电介质的损耗。现将电介质损耗的原因及其等值电路分析叙述如下。

一、电介质的损耗

（一）电导损耗

电介质在电场作用下有电导电流流过，这个电流使电介质发热产生损耗。一般情况下电介质的电导损耗是很小的，但当表面电导急剧增大时，这一损耗往往也急剧增加。

（二）游离损耗

电介质中局部电场集中（如固体电介质中的气泡、油隙，气体电介质中电极的尖端