



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

GAODIANYA JISHU

高电压技术

苏 群 万军彪 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

GAODIANYA JISHU

高电压技术

主编 苏 群 万军彪
编写 晁培丽 柯 磊 许 颀
陶海英 刘先锋
主审 赵文中



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

本书系统地介绍了高压基础理论和高压试验技术两部分内容，共十六个模块。第一部分介绍了介质极化理论、介质放电理论、波的传输理论、防雷理论、内部过电压理论等多个高压基础理论，为第二部分高压试验技术的学习打下强有力的理论基础。第二部分介绍了高压试验的基本试验和检测方法，详细叙述各类试验的目的和基本原理，提供了大量试验的接线方法和操作步骤，采用了大量的试验实例进行案例分析，并对常用新型试验仪器的使用方法进行了重点介绍。

本书可供高职高专院校电力相关专业的学生使用，也可供电力行业相关岗位职工技能培训使用。

图书在版编目（CIP）数据

高电压技术 / 苏群, 万军彪主编. —北京: 中国电力出版社, 2012.6

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5123-3131-0

I. ①高… II. ①苏… ②万… III. ①高电压—技术—高等职业教育—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 117918 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>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 461 千字

定价 34.00 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

职业教育和技能培训的教学目标是培养具有一定理论基础、动手能力强的应用型技术人才。当前我国电力企业实施状态检修，一般通过高压试验判断电气设备的绝缘状态如何，以便决定是否需要需要对设备进行检修维护，所以对高压试验工的要求应是：既要能准确试验，又要能通过试验数据分析判断设备状态。这就要求我们的教材既要有坚实的理论基础，又要联系当前电力生产实际，因为只有具备一定的理论基础，学员才能在试验相关数据的基础上正确分析判断设备状态，指导设备状态检修，保证电力系统安全稳定运行。

近年来，随着我国经济社会的快速发展，对电力的需求越来越高，特高压输电技术、超临界机组已成为电力系统发展方向。高电压试验与诊断也出现了很多新技术、新方法、新产品。本书力图紧密联系当前电力系统生产实际，对常用的高电压试验进行了详细介绍，并侧重于实际操作和诊断分析。该书通过丰富的实例，深入浅出、通俗易懂地阐述了高电压试验方法、接线、测量及结果分析的全过程，便于读者学习后能在实践中完成从书本原理到试验工作的零接轨。

本书共十六个模块。第一部分高压基础理论共八个模块，其中模块一、模块二由刘先锋编写，模块三、模块七由柯磊编写，模块四由晁培丽编写，模块五、模块六由陶海英编写，模块八由许颀编写；第二部分高压试验技术共八个模块，其中模块九～模块十四、模块十六由苏群编写，模块十五由万军彪编写，模块九～模块十三、模块十六中的试验实例由万军彪提供。该书在编写中采用了江西省电力科学研究院以往的试验案例，对参与试验的相关人员深表谢意。本书由西安电力高等专科学校赵文中主审。

由于作者水平有限，本书还参考和引用了许多前辈的试验数据和研究成果，同时得到了一些知名生产厂家的大力支持和帮助，在此向他们表示衷心的感谢，也欢迎前辈和读者们多提宝贵意见。

编 者

2012年7月

目 录

前言

第一部分 高压基础理论

模块一 电介质的极化、电导和损耗	1
任务一 理解电介质的极化与介电系数	1
任务二 掌握电介质的电导和损耗	4
习题	8
模块二 气体的绝缘特性	9
任务一 了解气体的击穿过程	9
任务二 认识冲击电压下空气的击穿电压	20
任务三 掌握绝缘子沿面放电的机理及特点	27
习题	32
模块三 液体和固体的绝缘特性	33
任务一 认识液体电介质的绝缘特性	33
任务二 认识固体电介质的绝缘特性	37
习题	43
模块四 线路和绕组中的波过程	44
任务一 理解均匀无损耗单导线中的波过程	44
任务二 学习波的折射和反射	49
任务三 分析变压器绕组中的波过程	55
习题	64
模块五 雷电及防雷装置	66
任务一 认识雷电的形成过程及危害	66
任务二 掌握防雷保护装置的保护原理	72
任务三 了解接地的基本概念	84
习题	89
模块六 发电厂及变电所的防雷保护	90
任务一 掌握发电厂及变电所的防雷保护原理	90
任务二 了解发电厂及变电所防雷的几个具体问题	96
习题	103
模块七 输电线路的防雷保护	104
任务一 了解输电线路的感应雷过电压	104
任务二 掌握输电线路的直击雷过电压和耐雷水平	106

任务三	掌握输电线路的雷击跳闸率	111
任务四	学习输电线路的防雷措施	113
习题		114
模块八	内部过电压	116
任务一	了解内部过电压和工频过电压	116
任务二	理解操作过电压	118
任务三	理解切除空载线路过电压	119
任务四	理解空载线路合闸过电压	122
任务五	理解切空载变压器过电压	124
任务六	理解谐振过电压	126
习题		129

第二部分 高压试验技术

模块九	绝缘电阻的测量	130
任务一	理解绝缘电阻的概念、认识测量绝缘电阻的意义	130
任务二	掌握试验接线及试验步骤	132
任务三	变压器、电容器试验实例演练	134
任务四	绝缘电阻试验案例分析	138
任务五	学习使用新型测试仪器——XD2905型绝缘电阻测试仪	140
模块十	泄漏电流的测量	147
任务一	理解泄漏电流的概念、认识测量泄漏电流的意义	147
任务二	掌握试验接线及试验步骤	148
任务三	变压器、电力电缆试验实例演练	151
任务四	泄漏电流试验案例分析	155
任务五	学习使用新型泄漏电流试验相关试验设备	158
模块十一	介质损耗的测量	160
任务一	理解介质损耗的概念、认识测量介质损耗的意义	160
任务二	掌握介质损耗角正切值试验的接线及试验步骤	163
任务三	变压器、电流互感器介质损耗试验实例演练	167
任务四	介质损耗测量试验案例分析	173
任务五	学习使用新型介质损耗测试仪	176
模块十二	交、直流耐压试验	178
任务一	认识交、直流耐压试验的目的和意义	178
任务二	掌握交流耐压试验接线及试验步骤	180
任务三	掌握直流耐压试验接线及注意事项	183
任务四	变压器、绝缘油、电缆试验实例演练	187
任务五	耐压试验案例分析	197
任务六	学习使用新型交、直流耐压试验相关试验设备	200

模块十三 局部放电的测量	207
任务一 了解局部放电的类型	207
任务二 了解局部放电的参数及其受影响因素	211
任务三 掌握局部放电测量	213
任务四 互感器、变压器、电缆局部放电试验放电位置测定实例演练	218
任务五 了解抗干扰技术	225
任务六 局部放电试验案例分析	228
任务七 学习使用新型局部放电测试仪	232
模块十四 绝缘的在线监测	236
任务一 认识绝缘在线监测的必要性	236
任务二 掌握运行及绝缘参数的在线监测	237
任务三 掌握不同电气设备的在线监测	242
模块十五 电气设备的红外检测	256
任务一 了解红外检测技术的起源及发展	256
任务二 掌握红外诊断技术对电气设备各种故障的诊断	263
任务三 掌握电气设备红外现场测量方法及标准	267
任务四 学习使用典型红外热成像仪	271
任务五 隔离开关、变压器等电气设备红外测量及故障诊断实例演练	277
模块十六 接地电阻的测量	280
任务一 认识接地及接地的必要性	280
任务二 接地电阻的测量	285
任务三 学习测量土壤电阻率的方法	288
任务四 学习测量接触电压、电位分布和跨步电压	290
任务五 接地网试验案例分析	292
任务六 学习使用新型接地电阻测试仪	294
参考文献	295

第一部分 高压基础理论

模块一 电介质的极化、电导和损耗

电介质的电气特性，主要表现为电介质在电场作用下的导电性能、介电性能和电气强度，它们分别以四个主要参数来表示，即电导率 γ 、介电常数 ε 、介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 和击穿电场强度 E_b 。

一切电介质在电场的作用下都会出现极化、电导和损耗等电气物理现象。通常气体介质的极化、电导和损耗都很微弱，一般可忽略不计。所以，真正需要注意的只有液体和固体介质在这些方面的特性。

任务一 理解电介质的极化与介电系数



任务描述

本任务介绍电介质极化的概念、极化的种类和电介质的相对介电常数的相关知识。



本任务要点

了解电介质极化的知识及其在工程上的意义。

一、电介质极化的概念

电气设备的绝缘对保证设备及整个电力系统的安全运行起着至关重要的作用。绝缘的作用是将不同电位的导体分隔开，使导体间没有电气连接，从而可以保持不同的电位。具有绝缘作用的材料称为电介质。

电介质在电场作用下所发生的束缚电荷的弹性位移和极性分子的转向现象，称为电介质的极化。通俗的理解就是：在电场的作用下，电介质由中性转化为对外显现电性的过程。极化的结果是：在电介质沿电场方向的两端出现等量异号电荷形成电矩。与正极板相对的一端出现负电荷，与负极板相对的一端出现正电荷。

二、电介质极化的种类

根据电介质的物质结构，极化有以下四种基本形式。

（一）电子式极化

在外电场的作用下，物质原子中的电子轨道相对于原子核发生位移，从而产生感应电矩的过程称为电子式极化。

电子式极化存在于一切电介质中，其特点是极化过程所需的时间极短，为 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{s}$ ，极化程度取决于电场强度，与电源频率无关，温度对电子式极化的影响不大。另外，电子式

极化属弹性极化，去掉外电场，正、负电荷间的吸引力使得正、负电荷作用中心重合，所以这种极化没有能量损耗。

(二) 离子式极化

离子式结构的电介质在无外电场作用时，每个分子的正、负离子的作用中心是重合的。在外电场的作用下，电场力使得正、负离子发生相对位移，整个分子呈现极性。这种极化形式称为离子式极化。

离子式极化存在于离子结构的电介质中，其特点是极化过程所需的时间极短，为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s，故极化程度与电源频率无关。离子式极化也属弹性极化，无能量损耗。随着温度的升高，离子间的结合力降低，离子式极化的程度略有增加。

(三) 偶极子式极化

极性电介质是由偶极分子组成的。偶极子是一种特殊的分子，其正、负电荷的作用中心不重合，形成永久性的偶极矩，即单个偶极子呈现极性。在无外电场作用时，偶极子处于杂乱无章的热运动状态，整个电介质对外并不呈现极性。在外电场作用下，原来混乱分布的偶极子转向电场方向定向排列，呈现出极性。这种极化方式称为偶极子式极化。

偶极子式极化存在于极性电介质中，其特点是极化过程所需时间较长，为 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ s，所以极化程度与电源频率有关，频率较高时偶极子来不及转动，因而极化率减小。由于偶极子在转向时需要克服分子间的作用力，即需要消耗电场能量，消耗的能量在复原时不能收回，所以偶极子式极化属非弹性极化。

温度对偶极子式极化的影响较大。当温度升高时，分子间的联系力减弱，极化程度加强；但当温度达到一定值时，由于分子的热运动加剧，妨碍偶极子沿电场方向转向，使极化程度减弱。所以，随着温度的升高极化程度先加强后减弱。

上述三种极化是由带电质点的弹性位移或转向形成的，均发生在单一电介质中，是电介质极化的基本形式。

(四) 夹层式极化

实际电气设备的绝缘通常采用多层电介质的绝缘结构，因而在不同介质的交界面处会发生由带电质点的移动所形成的夹层式极化。

下面以最简单的双层电介质为例分析夹层式极化的物理过程。

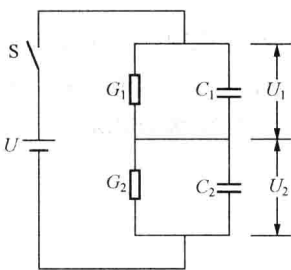


图 1-1 双层电介质极化模型

如图 1-1 所示， C_1 、 C_2 为各层介质的电容， G_1 、 G_2 为各层介质的电导， U_1 、 U_2 为各层介质上的电压。在开关 S 刚合闸的瞬间，介质上的电压按电容分配，即 $t=0$ 时， $U_1/U_2=C_1/C_2$ ；到达稳态时，介质上的电压按电导分配，即 $t \rightarrow \infty$ 时， $U_1/U_2=G_1/G_2$ 。由于两层电介质的特性不同，一般情况下 $C_2/C_1 \neq G_2/G_1$ ，所以初始电压分布与稳态电压分布通常不相同，即合闸后两层介质上的电荷需要重新分配。

假设 $C_1 > C_2$ 、 $G_1 < G_2$ ，则 $t \rightarrow 0$ 时， $U_1 < U_2$ ； $t \rightarrow \infty$ 时， $U_1 > U_2$ 。因 $U_1 + U_2 = U$ ，则在过渡过程中 C_1 要通过 G_2 从电源再多充一部分电荷（称为吸收电荷），而 C_2 要通过 G_2 放掉一部分电荷，于是在分界面处将积聚起一些电荷。这种使夹层电介质的交界面处积聚电荷的过程，称为夹层式极化。电荷积聚过程所形成的电流称为吸收电流。由于夹层极化中有吸收电荷，故夹层式极化相当于增大了整个电

介质的等值电容。

夹层式极化存在于不均匀夹层介质中。这种极化因涉及电荷的移动和积聚，所以必然伴随有能量损耗。由于电荷的积聚是通过介质的电导进行的，而介质的电导一般很小，所以极化过程较慢，一般需要数秒到数分钟，所以这种极化只有在直流和低频交流电压下才能表现出来。

三、电介质的相对介电常数

(一) 定义

电介质的相对介电常数 ϵ_r 用来表征电介质在电场作用下极化现象的强弱，其物理意义表示极板间放入电介质后电容量或电荷量比极板间为真空时增大的倍数。 ϵ_r 值由电介质的材料决定，并且随温度、频率而变化。其计算式为

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0}$$

式中 ϵ_0 ——真空的介电常数， $1/36\pi \times 10^{-9} \text{F/m}$ ；

ϵ ——介质的介电常数；

C_0 ——平行平板电容器在真空中的电容量，F；

C ——平行平板电容器极板间插入固体介质后的电容量，F。

(二) 气体电介质的相对介电常数

由于气体电介质的密度很小，所以气体电介质的相对介电常数都很小，在工程应用中一切气体电介质的 ϵ_r 都可看作 1。

(三) 液体电介质的相对介电常数

(1) 中性液体电介质。中性液体电介质（如变压器油、苯、硅有机油等）的相对介电常数 ϵ_r 在 1.8~2.8 范围内。相对介电常数具有不大的负温度系数。

(2) 极性液体电介质。这类电介质的相对介电常数较大，其值在 3~80 之间，用作绝缘介质的 ϵ_r 值一般为 3~6。若用作电容器的浸渍剂，可使电容器的比电容增大。但此类液体电介质在交变电场中的损耗较大，故高压绝缘中很少应用。

极性液体电介质的 ϵ_r 与温度有关， ϵ_r 在温度较低时先随温度的升高而增大，以后当热运动较强烈时， ϵ_r 又随温度上升而减小。

极性液体电介质的 ϵ_r 与电源频率有较大的关系。当频率较低时，偶极分子能够跟随交变电场充分转向， ϵ_r 较大且其值与频率大小无关，当频率很高时，偶极分子转向跟不上电场方向的改变，极化率减小，因而 ϵ_r 减小。

(四) 固体电介质的相对介电常数

(1) 中性和弱极性固体电介质。这类电介质只有电子式极化和离子式极化，相对介电常数较小，一般为 2.0~2.7。相对介电常数随温度的升高略有下降。石蜡、石棉、聚乙烯、聚丙烯、无机玻璃等属于此类电介质。

(2) 极性固体电介质。这类电介质的相对介电常数较大，一般为 3~6。 ϵ_r 与温度、频率的关系和极性液体电介质的相似。树脂、纤维、橡胶、有机玻璃、聚氯乙烯等属于极性固体电介质。

(3) 离子性电介质。固体无机化合物多数属于离子式结构电介质，如云母、陶瓷等， ϵ_r 一般具有正的温度系数，其值为 5~8。

四、电介质极化在工程实际中的意义

(1) 选择绝缘材料。如对电容器应选择 ϵ_r 较大的电介质作为绝缘材料, 这样可以减小电容器单位容量的体积和质量。对于其他电气设备如电缆, 应选择 ϵ_r 较小的电介质, 这样可以减少电缆工作时的电容电流。

(2) 多层介质的合理配合。几种电介质组合使用时, 由于在交流电压及冲击电压作用下, 各层介质中的电场强度分布与 ϵ_r 成反比, 所以要注意选择各介质的 ϵ_r 值, 使各层介质中的电场分布较均匀。

(3) 介质损耗与介质的极化类型有关, 而介质损耗对绝缘老化和热击穿有很大的影响。

(4) 在绝缘预防性试验中, 可用夹层式极化来判断绝缘受潮情况。

任务二 掌握电介质的电导和损耗



任务描述

本任务介绍电介质的电导的基本概念、特点, 以及气体、液体、固体电介质的电导和电介质的损耗及等值电路。



本任务要点

了解电介质电导的知识及其在工程上的意义和电介质的损耗及介质损失角的基本概念, 熟悉电介质的等值电路。

一、电介质的电导与性能

(一) 电介质的电导的基本概念

电介质的内部总有一些自由的带电质点, 在电场的作用下, 带电质点会定向运动形成电流, 即电介质具有一定的导电性。表征电介质的电导大小的物理量是绝缘的电导率 γ (或绝缘的电阻率 ρ , $\rho=1/\gamma$)。

介质的电导与金属导体的电导有着本质的区别。电介质的电导主要是由离子移动造成的, 电导很小, 其电阻率 ρ 在 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。随着温度的升高, 电导增大, 即电介质的电导具有正的温度系数。在外施电压的作用下, 由介质的电导所引起的电流称为泄漏电流, 温度越高, 泄漏电流越大。所以在测量绝缘电阻或泄漏电流时应尽量在同一温度下进行, 以便于对测量结果进行比较。电介质电导的数值与电压也有关系, 通常在电介质接近击穿时电导急剧上升。

导体的电导主要由电子移动造成, 电导极大, 其电阻率 ρ 在 $10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。

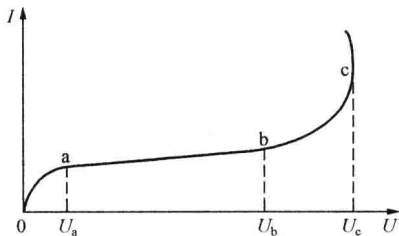


图 1-2 气体电介质中电流与电压的关系

随着温度的升高, 金属的电导减小。

(二) 电介质的电导

1. 气体电介质的电导

外界游离因素在气体中会产生少量带电离子, 在外电场作用下, 这些带电离子定向运动构成气体电介质的电导。气体电介质中电流与电压的关系如图 1-2 所示。

当电场强度很小时 ($U < U_a$), 电流随电压的升高而增加。

当电场强度增大时 ($U_a < U < U_b$), 电流趋于饱和, 这是因为外界游离因素产生的离子接近全部落入电极形成电流, 电流的大小取决于外界游离因素的强度。此时 ab 段内气体的电导很小, 气体仍处于绝缘状态。当电场强度继续增大时 ($U > U_b$), 气体电介质中将发生碰撞游离, 使电导迅速增大。当电压达 U_c 时, 气隙被击穿。

2. 液体电介质的电导

液体电介质的电导主要由离子电导和电泳电导构成。离子电导是由液体本身和所含杂质的分子离解出的离子造成的。电泳电导是由液体中的胶体质点吸附电荷带电造成的。

中性液体电介质本身分子不易离解, 其电导主要是杂质分子离解出的离子; 极性液体电介质的电导由杂质分子和电介质本身分子离解出的离子共同形成。所以当其他条件相同时, 极性液体电介质的电导大于中性液体电介质的电导。强极性液体电介质如水、酒精等, 其电导率已很大, 所以不能作为绝缘材料使用。

液体电介质的电导与分子的极性、电场强度、温度及液体的纯净度有关。离子电导随温度的升高而增大。电场强度较小时, 电导接近为一个常数; 电场强度较大时 (超过某一定值), 离解出来的离子数迅速增加, 电导也就迅速增大。杂质对液体电介质的电导影响很大, 尤其是中性液体电介质, 当液体电介质中的杂质含量增大时, 其电导明显增大。

3. 固体电介质的电导

固体电介质的电导分为体积电导和表面电导两种。

体积电导由固体电介质本身的离子和杂质离子构成, 影响体积电导的因素主要有电场强度、温度和杂质。由电场强度较低时, 固体介质的电导与电场强度关系很小, 场强较高时, 固体电介质的电导随场强增大而迅速增大。温度升高, 固体电介质的电导增大。固体电介质中常含有杂质, 杂质使电介质内部导电粒子的数目增加, 其电导增大。

表面电导主要由电介质表面吸附的水分和污物引起。固体电介质表面干燥清洁时, 其表面电导很小; 当电介质表面吸附潮气或沉积污物时, 其表面电导显著增大。表面电导的大小还与固体电介质本身的性质有关。憎水性电介质表面不易形成连续的水膜, 表面电导比亲水性电介质的小。采取使介质表面洁净、烘干或涂以石蜡、有机硅、绝缘漆等措施, 可以降低电介质的表面电导。

在测量固体电介质的泄漏电流 (绝缘电阻) 时, 应采取措施消除电介质表面状况对测量值的影响。

(三) 介质电导在工程实际中的意义

(1) 电介质电导是绝缘预防性试验的理论依据。通过测量绝缘电阻、泄漏电流可以判断电气设备的绝缘状况。

(2) 多层电介质在直流电压作用下的稳态电压分布与各层电介质的电导成反比, 选择合适的电导率可使各层电介质之间的电压分布较合理。

(3) 注意环境条件对介质电导的影响, 如湿度对固体电介质表面电导的影响, 对亲水性材料应进行防水处理; 测量电气设备的绝缘电阻和泄漏电流时应注意湿度对测量值的影响。

二、电介质的损耗及等值电路

(一) 电介质损耗的基本概念

从电介质的极化和电导的概念可以看出, 电介质在电压作用下有能量损耗, 称为介质损耗, 简称介损。介质损耗由下列三部分组成。

(1) 电导损耗。它是由电导电流（泄漏电流）流过电介质产生。电导损耗在交流电压和直流电压作用下均存在。

(2) 极化损耗。它是由极性电介质中的偶极子式极化和多层电介质的夹层极化引起的损耗。极化损耗只在交流电压作用下才存在。

(3) 游离损耗。它是由液体及固体介质中的局部放电引起的损耗。游离损耗只在外施电压超过一定值时才会出现，并且随电压升高而急剧增加。游离损耗在交流电压和直流电压作用下均会出现。

当外加电压低于发生局部放电所需的电压时，在直流电压作用下，介质中没有周期性的极化过程，介质中只有电导损耗；在交流电压作用下，介质损耗包括电导损耗以及周期性极化引起的能量损耗。

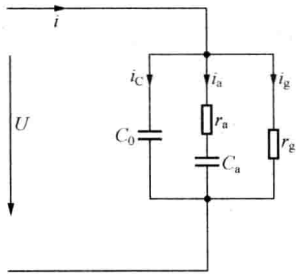


图 1-3 电介质的等值电路

(二) 电介质的等值电路

电介质的等值电路如图 1-3 所示，该等值电路适用于直流电压和交流电压。电路中 C_0 支路表示介质无能量损耗的极化，支路中流过的电流 i_c 称为电容电流； r_g 支路表示电导引起的损耗，支路中流过的电流 i_g 称为电导电流或泄漏电流； r_a-C_a 支路表示有能量损耗的极化，支路中流过的电流 i_a 称为吸收电流。并联等值电路如图 1-4 (a) 所示，串联等值电路如图 1-5 (a) 所示。

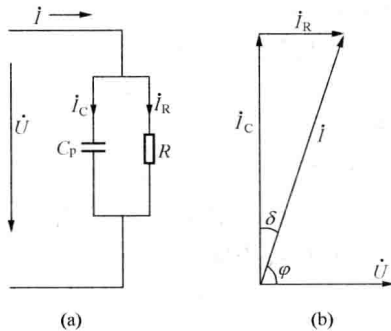


图 1-4 并联等值电路及相量图

(a) 等值电路；(b) 相量图

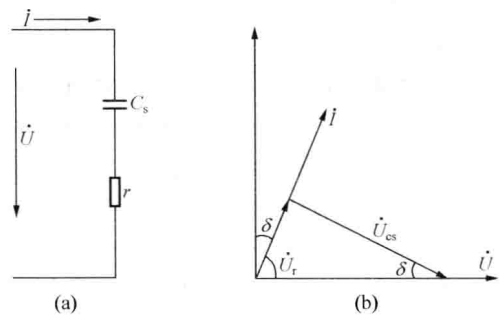


图 1-5 串联等值电路及相量图

(a) 等值电路；(b) 相量图

需要指出的是，等值电路只有计算上的意义，并不反映介质损耗的物理意义。

1. 介质损耗角正切值 $\tan\delta$

以并联等值电路为例。当给电介质两端施加交流电压时，流过介质的电流包含有功分量 i_R 和无功分量 i_C 。把功率因数角 φ 的余角 δ 称为介质损失角，则 $\tan\delta = I_R/I_C = 1/\omega CR$ 。介质上所加电压与流过介质电流的相量关系如图 1-4 (b) 所示，则介质损耗为

$$P = UI_R = UI_C \tan\delta = U^2 \omega C_p \tan\delta \quad (1-1)$$

从式 (1-1) 可知， P 值与试验电压、试品电容量及电源频率有关，不同试品间难以比较。如果外施电压和电源频率不变，则介质损耗与介质损失角正切值 $\tan\delta$ 成正比，所以通常用 $\tan\delta$ 来表示介质在交流电压作用下的损耗。 $\tan\delta$ 仅与介质本身的特性有关，与被试品的几何尺寸无关。当绝缘受潮或绝缘中有大量气泡、杂质的情况下， $\tan\delta$ 会增大，故对同类型被试品绝

缘的优劣可以通过 $\tan\delta$ 值的大小来判断。

需要说明的是, 介质损失角正切值 $\tan\delta$ 可反映介质的绝缘状况, 同时介质损耗本身也是导致绝缘老化和损坏的一个原因, 因为介质损耗将引起绝缘内部发热, 温度升高, 从而使泄漏电流增大和有损极化加剧, 导致介质损耗更大。所以, 对于运行中的电气设备, 应监测其介质损耗的变化趋势, 这对判断设备绝缘的品质具有重要意义。

2. 影响介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的因素

影响 $\tan\delta$ 值的因素主要有频率、温度和电压。

(1) 频率对 $\tan\delta$ 的影响很大。在进行试验时, 电源频率变化很微小, 可认为频率对 $\tan\delta$ 没有影响。

(2) 温度对 $\tan\delta$ 的影响与介质结构有关。中性或弱极性电介质的损耗主要是电导损耗, 损耗较小, 当温度升高时, $\tan\delta$ 增大。极性电介质的 $\tan\delta$ 与温度的关系如图 1-6 所示。

(3) 电压较低(场强较小)时, $\tan\delta$ 与电压无关。当介质中含有气泡时, 外施电压升高到气泡的起始游离电压后, 将发生局部放电, $\tan\delta$ 值将随电压的升高明显增大。所以在较高电压下测量 $\tan\delta$ 可以检查介质中是否含有气隙, 也可以发现介质老化分层、龟裂等缺陷。

(三) 电介质的损耗

1. 气体电介质中的损耗

当外施电压小于气体发生碰撞游离所需的电压时, 气体中的损耗主要是电导损耗, 损耗极小, 可忽略不计。所以常用气体作为标准电容器的介质。当外施电压超过起始游离电压 U_0 时, 损耗随电压的升高急剧增大, 如图 1-7 所示。

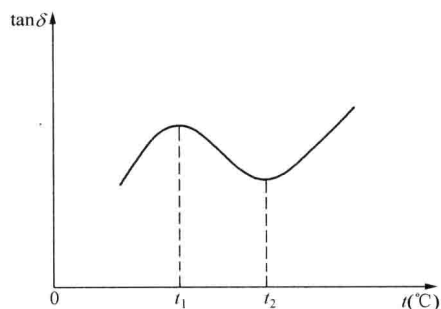


图 1-6 极性电介质的 $\tan\delta$ 与温度的关系

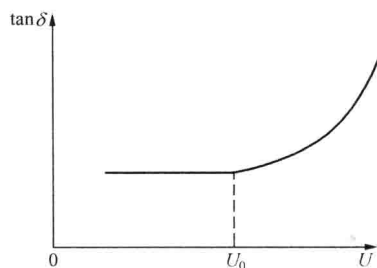


图 1-7 气体电介质中的损耗

2. 液体电介质中的损耗

中性或弱极性液体电介质的损耗主要是电导损耗, 损耗较小, $\tan\delta$ 与温度及电场的关系和电导相似: 温度升高, $\tan\delta$ 增大。电场强度小于某一定值时, $\tan\delta$ 接近为一常数; 电场强度超过某一定值时, $\tan\delta$ 随电场强度的增大而增大。极性液体电介质的 $\tan\delta$ 与温度的关系如图 1-6 所示。

3. 固体电介质中的损耗

固体电介质通常分为分子式结构介质、离子式结构介质、不均匀结构介质。分子式结构中的中性电介质, 如石蜡、聚乙烯等, 以及离子式结构的电介质, 如云母等, 其损耗主要由电导引起, 因其电导很小, 所以介质损耗也很小。分子式结构中的极性电介质, 如纤维、有机玻璃等, 介质损耗较大, 高频下更严重。其值与温度的关系同极性液体介质。

不均匀结构介质，其损耗的大小取决于其中各成分的性能及数量间的比例。

(四) 介质损耗在工程实际中的意义

(1) 选择绝缘材料。 $\tan\delta$ 过大会引起介质严重发热，加速绝缘劣化。

(2) 在电气设备绝缘预防性试验中， $\tan\delta$ 值的测量是基本的试验项目，可根据 $\tan\delta$ 值的变化判断电气设备的绝缘品质。通过测量 $\tan\delta$ 与 U 的关系曲线还可判断绝缘内部是否发生局部放电。

习 题

- 1-1 什么叫电介质的极化？
- 1-2 电介质极化的基本形式有哪几种？
- 1-3 哪几种极化属于无损耗的极化？哪几种极化属于有损耗的极化？
- 1-4 什么是相对介电常数？相对介电常数在工程上有什么意义？
- 1-5 电介质的电导与金属导体的电导有何不同？
- 1-6 固体电介质的电导可分为哪两部分？通常做电气设备试验时测的是哪一部分？
- 1-7 什么是介质损耗？影响介质损耗的因素有哪些？
- 1-8 为什么要以 $\tan\delta$ 来表示电介质的损耗？
- 1-9 介质损耗在工程上有什么意义？

模块二 气体的绝缘特性

气体常作为电力系统和电气设备中的绝缘介质，工程上使用最多的是空气和 SF₆ 气体。例如，架空线路中相与相之间、相与地之间就是利用空气来绝缘的；在 SF₆ 断路器和 SF₆ 全封闭组合电器中，则以 SF₆ 气体来绝缘。正常情况下气体的电导率很小，气体为优良的绝缘体。但当气体间隙中的电场强度达到一定值后，气体间隙会击穿，气体由绝缘状态转变为导电状态。研究气体电介质的击穿特性可合理确定气体的间隙距离，保证电力系统安全运行。

气体间隙发生击穿时的最低临界电压称为击穿电压。均匀电场中击穿电压与间隙距离之比称为击穿场强；不均匀电场中击穿电压与间隙距离之比称为平均击穿场强。击穿电压或（平均）击穿场强是表征气体间隙绝缘性能的重要参数。

任务一 了解气体的击穿过程



任务描述

本任务介绍带电质点的产生与消失，气体放电过程，气体放电形式；汤逊理论、巴申定律、流注理论；大气压力下不均匀电场气隙击穿的发展过程。



本任务要点

掌握气体绝缘的自恢复特性，了解电负性气体、电子崩、自持放电的概念；了解自持放电的条件，掌握高气压、高真空在工程中的应用原理；了解不均匀电场气隙的放电特点，掌握电晕放电、极性效应的概念。

一、气隙中带电质点的产生与消失

（一）气体中带电质点的产生

气体原子在外界因素（电场、高温等）的作用下，吸收外界能量使其内部能量增加，这时原子核外的电子从离原子核较近的轨道跳到离原子核较远的轨道上去，此过程称为原子的激发，也称激励。被激发的原子称为激发原子，激发原子内部能量比正常原子大。

中性原子从外界获得足够的能量，使原子中的一个或几个电子完全脱离原子核的束缚而成为自由电子和正离子（即带电质点）的过程称为原子的游离。游离是激发的极限状态，气体分子或原子游离所需要的能量称为游离能。

分子或原子的游离可以一次完成，也可以分级完成，即先经过激发阶段，然后再发生游离，这种游离称为分级游离。分级游离时，一次需要获得的能量较小，但几次获得的总能量应大于或等于其游离能。游离过程如图 2-1 所示。

按照能量来源的不同，游离可分为以下几种形式。

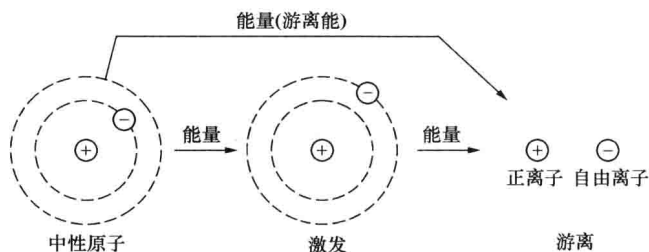


图 2-1 游离过程示意图

1. 碰撞游离

在电场作用下，电子被加速获得动能，如果其动能大于气体质点的游离能，在和气体质点发生碰撞时，就可能使气体质点产生游离，分裂成正离子和自由电子。这种游离称为碰撞游离，是气体中带电质点数目增加的重要原因。因为电子的质量小，在电场作用下容易获得较大的速度，累积起足够的动能。

2. 光游离

由光辐射引起气体原子或分子产生的游离，称为光游离。光辐射的能量以不连续的光子的形式发出。当光子的能量等于或大于气体原子或分子的游离能时，就可能引起光游离。

通常普通的可见光是不能直接产生光游离的，导致气体光游离的光子可以是宇宙射线、 γ 射线、X射线等短波长的高能射线，也可以是气体中的反激发过程或异号带电质点复合成中性质点过程中释放出的光子。

3. 热游离

因气体分子热状态引起的游离，称为热游离。其实质仍是碰撞游离和光游离，只是直接的能量来源不同而已。

在常温下，气体质点热运动所具有的平均动能远低于气体的游离能，不足以引起碰撞游离。而在高温下，如电弧放电时，气体温度可达数千摄氏度，此时气体质点的动能足以引起碰撞游离。此外，高温气体的热辐射光子也能导致气体质点的光游离。

4. 表面游离

放在气体中的金属电极表面游离出自由电子的现象，称为表面游离。使金属释放出电子也需要能量，使电子克服金属表面束缚作用的能量通常称为逸出功。金属表面游离所需能量可以从下述途径获得。

(1) 正离子撞击阴极。正离子在电场中向阴极运动，碰撞阴极时将动能传递给阴极中的电子，可使其从金属中逸出。在逸出的电子中，一部分可能和撞击阴极的正离子结合成为分子，其余的则成为自由电子。只要正离子能从阴极撞击出至少一个自由电子，就可认为发生了阴极表面游离。

(2) 短波光照射。阴极表面受到短波光的照射，也能产生表面游离。

(3) 强场发射。在电极附近加上很强的外电场时，将电子从阴极表面拉出来，称为强场发射或冷发射。由于强场发射所需电场极强，一般气体间隙的击穿达不到如此高的场强，所以不会产生强场发射。而对高真空间隙的击穿，强场发射具有重要意义。

(二) 气体带电质点的消失

气体发生放电时，除了不断形成带电质点的游离过程外，还存在相反的过程，即带电质