



“十三五”普通高等教育本科规划教材  
高电压与绝缘技术系列教材

High Voltage Engineering Learning Guide

# 高电压工程学习指导

陶劲松 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“  
教育部规划教材  
高电压与绝缘技术系列教材

# 高电压工程学习指导

陶劲松 编  
方瑜 主审



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。本书主要内容包括电介质的基本电气特性、气体放电的基本理论、气体电介质的击穿特性、固体电介质和液体电介质的击穿特性、电气设备绝缘特性的测试、电气设备绝缘的耐压试验及高电压测量、电气设备绝缘在线监测与诊断系统、线路和绕组的波过程、雷电参数及防雷装置、输电线路的防雷保护、发电厂和变电站的防雷保护、电力系统工频电压升高、谐振过电压、操作过电压和电力系统绝缘配合。本书通过对习题的分析,使读者不仅能掌握教材中的知识点,还能学会科学地分析问题,培养科学的思维方式。

本书可作为普通高等院校电气类专业本科生和研究生的参考教材,也能作为相关科技工作者的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高电压工程学习指导/陶劲松编. —北京:中国电力出版社,  
2016.11

“十三五”普通高等教育本科规划教材 高电压与绝缘技术  
系列教材

ISBN 978-7-5123-9999-0

I. ①高… II. ①陶… III. ①高电压—高等学校—教学参考资料  
IV. ①TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第268410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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016年11月第一版 2016年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.75印张 230千字

定价 24.00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

经过多年的教学实践和教学改革，作者深感目前市面上缺少一种对各类学生和工程技术人员有一定的指导作用的高电压工程的学习指导书。这便是本书的出版目的。理想中本书不同于教材的方面应该是：①把书中完整而分散的结构串联在一起；②清晰地揉入书中省略或者一语带过的知识点；③引申书中相关知识的最新研究方法和结论。

本书的主要脉络以武汉大学关根志老师编写的《高电压工程基础》为蓝本，兼顾目前在全国高校较为普及的高电压工程或高电压技术教材。在此谨向这些参考文献的作者表示诚挚的谢意。

书中每章结构以本章讲述的主要内容为概括，围绕主题展开叙述。问答题首先给出省略答案，然后分析该题的理论、实验结果和工程应用等。计算题则先分析该题的理论依据，数学推导，公式等，然后解题。希望用这种解题方式，帮助学生通过层层推导过程，既使知识点了然于心，又学会科学的分析问题，培养科学的思维方式，而不惟完成课堂学习之目的。

在编写的过程中，感谢武汉大学电气工程学院方瑜教授、关根志教授的悉心指导，感谢武汉大学期刊社张淑娟编审的审阅和提出的宝贵意见，感谢陈宇航、章琰天、韩海虹等学生的文字录入和图形编辑工作。

由于编者时间仓促，书中可能存在疏漏与不妥之处，敬请读者以邮件方式不吝赐教，以便再版时及时更正。邮件地址：[jamson\\_tao@163.com](mailto:jamson_tao@163.com)。作者在此表示衷心感谢。

陶 劲 松  
于珞珈山麓  
2016年9月

## 目 录

## 前言

绪论	1
第一章 电介质的基本电气特性	3
第二章 气体放电的基本理论	12
第三章 气体电介质的击穿特性	25
第四章 固体电介质和液体电介质的击穿特性	36
第五章 电气设备绝缘特性的测试	46
第六章 电气设备绝缘的耐压试验及高电压测量	55
第七章 电气设备绝缘在线监测与诊断系统	65
第八章 线路和绕组的波过程	71
第九章 雷电参数及防雷装置	85
第十章 输电线路的防雷保护	94
第十一章 发电厂和变电站的防雷保护	105
第十二章 电力系统工频电压升高	115
第十三章 谐振过电压	124
第十四章 操作过电压	134
第十五章 电力系统绝缘配合	145
参考文献	147

## 绪 论

### 一、学习要求

- (1) 掌握高电压工程学科产生的原因、定义、高电压工程学科的分支。
- (2) 熟悉国内外高电压等级。
- (3) 了解其他行业或技术的发展对高电压工程的影响以及高电压对其他学科的影响。

### 二、学习要点

#### 1. 高电压技术

高电压技术是 20 世纪初为实现高压输电而形成的一门电力工程的分支学科。它是一门实验性的科学。主要研究高电压输电过程中涉及的绝缘，试验以及过电压等工程技术。

#### 2. 利用高电压输电的原因

能源基地通常远离用电负荷中心，如在中国，用电负荷中心在东南沿海一带，而能源基地在西南和西北地区，因此需要远距离大容量输电。输电线路的传输容量与以下三个因素有关：

- (1) 线损和发热。不同截面的电缆和架空线路都有其最大允许载流量（其比值定义为电流密度），电流过大会使线路能量损耗太大，导致导线温度过高而引发事故。
- (2) 线路电压降。为保证用户侧的电压在合理的运行范围内，对线路电压降必须有所限制。
- (3) 电力系统稳定。交流输电系统中，电力系统稳定是保证系统安全运行的极为重要的问题。

#### 3. 我国的输电电压等级

我国电压等级包括：

- (1) 交流（输电线路电压的有效值）。
  - 1) 高压 (HV)：10、35、66（现已少用）、110、220kV。
  - 2) 超高压 (Extra HV)：330、500、750kV。
  - 3) 特高压 (Ultra HV)：1000kV。
- (2) 直流。±500、±800kV。

#### 4. 我国输电各电压等级使用的关键节点

- (1) 首条 220kV 交流输电线路于 1943 年在东北投入运行；
- (2) 首条 330kV 交流输电线路于 1974 年在西北地区建成投入运行；
- (3) 首条 500kV 交流输电线路于 1981 年在华中地区建成；
- (4) 首条 750kV 交流输电线路于 2005 年建成；
- (5) 首条 ±500kV 直流输电线路于 1989 年建成；

- (6) 首条±800kV 直流输电线路于 2009 年建成；
- (7) 首条 1000kV 交流输电线路于 2009 年建成。

### 5. 高电压工程的研究方向

高电压工程主要有三个研究方向：高电压绝缘技术、高电压试验技术和电力系统过电压。

随着输电电压等级的提高，需要生产相应的优质高压电气设备，需要对各类绝缘介质的特性及其放电机理进行深入的研究，其中对气体放电机理的研究是研究其他绝缘材料放电机理的基础。设备额定电压的提高使得绝缘材料和绝缘结构的研究以及对绝缘参数的测试技术成为重要的研究课题。

为了研究各种绝缘材料的电气性能就会用到各种高电压发生装置并采用相应的测试技术，因此高电压试验技术就成为研究高电压工程的重要技术手段。

在高电压输变电过程中，电力系统过电压是危害电力系统安全运行的主要因素之一。随着电压等级的进一步提高，内部过电压成为决定绝缘水平的主要原因。因此研究电力系统中过电压产生的机理及限制措施，研究新型的限制过电压的方法和设备，已成为建设超高压及特高压电力系统面临的重要课题。

### 6. 高电压工程在其他领域的应用

(1) 在新能源中的应用。如果希望受控核聚变、太阳能发电、风力发电以及燃料电池等新能源技术得到飞跃发展，那么属于高电压技术范畴的大能量脉冲电源技术、等离子控制技术等关键技术必须取得突破性进展。

(2) 在环保领域的应用。采用高压窄脉冲电晕放电处理烟气脱硫、脱硝、除尘，汽车尾气处理以及污水处理。通过高压脉冲产生的高浓度臭氧和大量活性自由基，能有效地消毒杀菌。人工模拟的放电过程能在无氧状态下，分解有毒废弃物。

(3) 在生物医学领域的应用。静电场或脉冲电磁场对于促进骨折愈合效果明显。适当的电磁场环境能促进骨细胞生长，一些大型的医疗诊断仪器或治疗仪器上，高电压技术是其核心技术。

(4) 在材料领域的应用。等离子聚合所形成的薄膜具有机械强度高、耐热好、耐化学侵蚀等优点。介电常数非常大的等离子聚合膜可用于集成电路芯片制造，电导率高的等离子聚合膜可作为防静电的绝缘保护膜。通过低温等离子体技术研制新型的半导体材料。

(5) 在军事领域的应用。生产轨道炮等新型武器，舰艇供电系统与电子系统的电磁兼容问题等。

(6) 在交通运输领域的应用。电气化铁路的发展需要高压输电系统的安全稳定运行，同时提出了一些新课题。

# 第一章 电介质的基本电气特性

## 一、学习要求

- (1) 掌握电介质的电气特性，如极化特性、电导特性、损耗特性和击穿特性。
- (2) 熟悉电介质的有损极化和无损极化，吸收现象、吸收比、极化指数，电介质的电导与金属电导的区别，介质损耗因数。
- (3) 了解电介质的极化特性、电导特性，损耗特性和击穿特性在工程实际中的应用和意义。

## 二、学习要点

### 1. 电介质的基本电气特性

电介质的基本电气特性表现为极化特性、电导特性、损耗特性和击穿特性；其相应的物理参数为相对介电常数  $\epsilon_r$ ，电导率  $\gamma$ ，介质损耗因数  $\tan\delta$  和击穿场强  $E_b$ 。

高电压工程中所用的各种电介质通常称为绝缘介质或绝缘材料，其作用是将不同电位的导体以及导体与地之间分隔开来，从而保持各自的电位。无论是气体电介质、液体电介质还是固体电介质或者是这 3 种电介质的任意组合，其绝缘特性的判据均来自于它们本身的基本电气特性或延伸参数，因此高电压绝缘技术和高电压试验技术涵盖的最重要的内容是测量和分析这些物理参数。

### 2. 电介质的极化

在外加电场作用下，电介质中的正负电荷将沿着电场方向作有限的位移或转向，形成电矩，这种现象称为电介质的极化。

### 3. 介电常数

介电常数是表示绝缘特性的系数，是一个在电场强度和电的位移之间存在的比例常量，以字母  $\epsilon$  表示，单位为 F/m（法拉第/米）。因为介电常数的数字比较难记，所以在工程应用中常用相对介电常数这个概念，各电介质的相对介电常数等于其绝对介电常数与真空介电常数  $\epsilon_0$  ( $8.86 \times 10^{-14}$  F/cm) 的比值，即  $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ 。

如图 1-1 中 (a) 所示的平行板电容器，当两极板为真空时，在极板间施加直流电压  $U$ ，于是两极板上分别充有正负电荷，其电荷量为  $Q_0 = C_0 U$ ，式中  $C_0$  为真空电容器的电容量。如果在此极板间填充其他电介质，这时在外加的直流电场作用下，电介质的正负电荷将沿电场方向做有限的位移或转向，从而使电介质表面出现与极板电荷相反极性的束缚电荷，即电介质发生了极化。由于外施的直流电压  $U$  不变，所以为保持极板间的电场强度不变，这时必须在从电源吸取一部分电荷  $Q'$  到极板上，以抵消束缚电荷的作用。由此可见，由于极板间电介质的加入，这时极板上的电荷量从  $Q_0$  增加到  $Q$ ，即  $Q = Q_0 + Q' = CU$ 。式中， $C$  为加入电介质后两极板间的电容量。显然这时的电容量  $C$  比两极板间为真空时的电容  $C_0$  增大了。



$C$  与  $C_0$  的比值称为该电介质的相对介电常数  $\epsilon_r$ 。

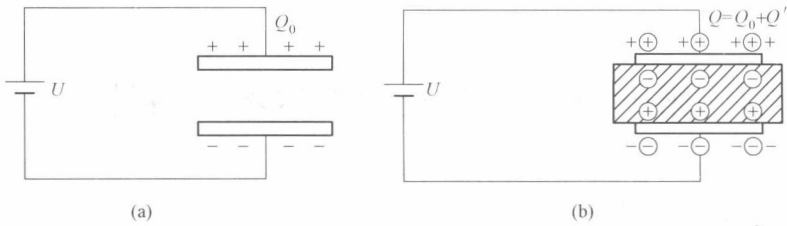


图 1-1 电介质的极化

(a) 极间为真空；(b) 极间放入介质

介电常数在工程实际中的意义：

(1) 在制造电容器时，应选择适当的电介质。为了使一定体积的电容器具有较大的电容量，应选择  $\epsilon_r$  较大的电介质。

(2) 在设计某些绝缘结构时，为了减小通过绝缘的电容电流及由极化引起的发热损耗，这时则不宜选择  $\epsilon_r$  太大的电介质。

(3) 在交流及冲击电压的作用下，由于多层串联电介质中的电场分布与  $\epsilon_r$  成反比，所以可以利用不同  $\epsilon_r$  的电介质组合来改善绝缘中的电场分布，使之尽可能趋于均匀，以充分利用电介质的绝缘强度，优化绝缘结构。比如，在电缆绝缘中，由于电场沿径向分布不均匀，靠近电缆芯线处的电场最强，远离芯线处的电场较弱。因此，利用不同介电常数的电介质作为电缆绝缘，应使内层绝缘的  $\epsilon_r$  大于外层绝缘的  $\epsilon_r$ ，这样就可以使电缆芯线周围绝缘中的电场分布趋于均匀。

(4) 电介质受潮或脏污后，其  $\epsilon_r$  将会变大， $\epsilon_r$  对温度及频率的变化会呈现一定的规律，工程上常利用这些规律来判断材料的受潮或脏污程度，从而决定设备能否投运。

#### 4. 电介质极化的基本类型

电介质极化的基本类型包括：电子位移极化、离子位移极化、转向极化（偶极子极化）以及空间电荷极化。

(1) 电子位移极化。电介质是由分子构成的，而分子又是由原子组成。每个原子都是由带正电的原子核和围绕着原子核的带负电荷的电子云构成。当不存在外加电场时，电子云的中心和原子核重合，此时感应电矩为零。当外加一电场，电场力将使带正电的原子核向电场方向位移，而带负电的电子云中心向电场反方向位移。

(2) 离子位移极化。在离子式结构的电介质中，不存在外加电场时，正负离子杂乱无章地排列，正负电荷作用相互抵消，对外不呈现电极性；当有外加电场时，除了促使各个离子内部产生电子式极化外，还将产生正负离子的相对位移，使正负离子按照电场的方向进行有序排列，这种极化称为离子式极化。

(3) 转向极化（偶极子极化）。在极性分子结构的电介质中，不存在外加电场时，由于分子中正负电荷的作用中心不重合，就其单个分子而言，已经具有偶极矩，但由于分子不规则的热运动，使各极性分子偶极矩的排列没有秩序，从宏观而言，对外并不呈现电极性；当有外加电场时，偶极子受到电场力的作用而转向电场的方向，因此这种极化称为偶极子极化或转向极化。

(4) 空间电荷极化。由于电介质中多少存在一些可迁徙的电子或离子, 在电场作用下将发生这些带电质点的移动, 并聚积在电极附近的介质界面上, 形成宏观的空间电荷, 这种极化称为空间电荷极化。

空间电荷极化中有一种特殊的极化称为夹层极化, 它是在多层电介质组成的复合绝缘中产生的一种特殊的空间电荷极化, 它的产生是由于各层电介质的介电常数不同, 其电导率也不同, 当加上电压后各层间的电场分布将会出现从加压初瞬时按介电常数成反比分布, 逐渐过渡到稳态时的按电导率成反比分布, 由此在各层电介质中出现了一个电压重新分布的过程, 最终导致在各层介质的交界面上出现宏观的空间电荷堆积, 即形成所谓的夹层极化。

**【例 1-1】** 试比较电介质中各种极化的性质和特点。

解: 电子式极化。

- (1) 极化所需时间极短, 约  $10^{-15}$  s。
- (2) 极化具有弹性, 且为无损极化。
- (3) 相对介电常数  $\epsilon_r$  不随频率变化, 且温度对其影响也极小。
- (4) 存在于所有电介质中。

离子式极化。

- (1) 极化所需时间极短, 约  $10^{-13}$  s。
- (2) 极化具有弹性, 几乎无损耗, 为无损极化。
- (3) 相对介电常数  $\epsilon_r$  不随频率变化, 但是会随着温度升高而增加。
- (4) 多存在于固态无机化合物中。

偶极子式极化 (也称转向极化)。

- (1) 极化时间较长, 约  $10^{-6} \sim 10^{-2}$  s。
- (2) 极化具有弹性, 且为有损极化。
- (3) 频率和温度均对相对介电常数  $\epsilon_r$  有影响。
- (4) 存在于偶极分子的电介质中。

空间电荷极化 (包含夹层极化)。

- (1) 极化过程缓慢, 从几十分之一秒到几分钟甚至更长。
- (2) 极化不具有弹性, 有较大的能量损耗, 为有损极化。
- (3) 极化仅在低频下有意义。
- (4) 存在于层式结构的电介质中。

**【例 1-2】** 为什么一些电容量较大的设备如电容器、电力电缆等经过直流高压实验后, 要用接地棒将其两极间短路放电长达 5~10min?

解: 这些设备是多层介质结构, 在高压实验时, 由于夹层极化, 各层电介质交界处出现宏观上的空间电荷堆积, 高压实验结束后, 堆积的电荷并不会消失, 如不进行放电, 将会产生很高的电压, 对人身和设备的安全造成危害。

## 5. 电介质的电导

电导是电阻的倒数, 对于导体来说, 电阻较小, 可用电阻值作为其参数, 而电介质的电阻较大, 不易反映电介质的特性, 所以用电导作为其参数。

## 6. 吸收现象、吸收比及极化指数

- (1) 如图 1-2 (a) 所示, 当开关 S2 处于断开状态, 合上 S1, 直流电压  $U$  加在固体电介

质时，通过介质中的电流将随时间而衰减，最终达到某一稳定值，其电流随时间的变化曲线如图 1-2 (b) 所示，这种现象就是吸收现象。图 (b) 中的一  $i$  段曲线是断开 S1，除去外加电压，并将 S2 合上，使电介质两侧的极板短路得到的，它与吸收电流变化规律相同，但方向相反。

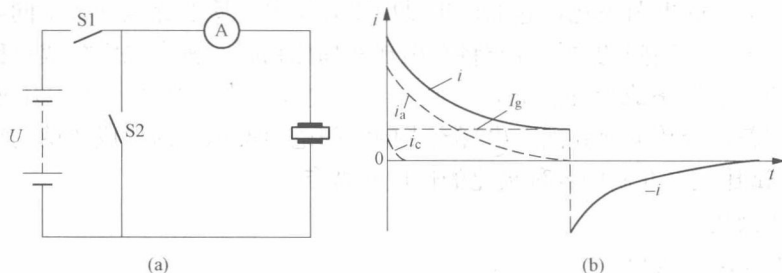


图 1-2 直流电压下流过电介质的电流

(a) 实验电路；(b) 电流随时间变化曲线

(2) 工程上通过测量加上直流电压后  $t=15\text{s}$  和  $t=60\text{s}$  时流过介质的电流比来反映吸收现象的强弱，此比值即为介质的吸收比  $K$ 。

(3) 极化指数是指对电介质加上直流电压后  $t=1\text{min}$  和  $t=10\text{min}$  时流过介质的电流比。

**分析：**吸收现象的产生是由电介质的极化所引起的，无损极化产生电流  $i_c$ ，有损极化产生电流  $i_a$ 。无损极化迅速完成， $i_c$  即刻衰减到 0；而有损极化完成的时间较长，所以  $i_a$  较为缓慢的衰减到零，这部分电流称为吸收电流，而不随时间变化的稳定电流  $I_g$  称为电介质的电导电流或泄漏电流。因此通过电介质的电流由 3 部分组成，即  $I = i_c + i_a + I_g$ ，图 1-3 即为电介质的三支路法并联等值电路。

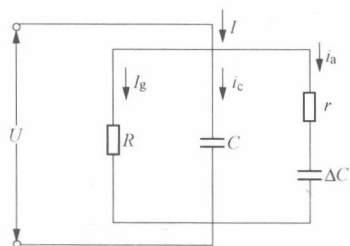


图 1-3 电介质并联等值电路——三支路法

吸收现象在绝缘实验中对判断绝缘是否受潮很有用。当绝缘受潮时，其电导大大增加，电导电流也大大增加，而吸收电流的变化相对较小，且通过电导很快衰减。对良好的绝缘，一般  $K \geq 1.3$ ，当绝缘受潮或劣化时  $K$  值变小。此外在对吸收现象较显著的绝缘实验中，如电缆、电容器等设备，要特别注意由吸收电流聚积起来的所谓“吸收电荷”对人身和设备安全的威胁。

## 7. 电介质电导与金属电导的区别

(1) 电介质的电导主要是离子式电导，金属的电导是金属导体中自由电子在电场作用下的定向流动所造成，所以是电子式电导。

(2) 电介质的电导随温度的升高近似于指数规律增加，即其电阻率随温度的上升而下降，这恰恰与金属导电的情况相反。这是因为，当温度升高时，电介质中导电的离子数将因热解离而增加；同时，温度升高，分子间的相互作用力减小及离子的热运动改变了原有束缚的状态，从而有利于离子的迁移，所以使电介质的电导率增加。而对于金属，当温度上升时，自由电子运动受到的阻力增大，因此参加导电的自由电子数减少，金属的电导率也随之减少。

(3) 介质电导率的大小与所加电压的大小有关, 当外加电压越高使场强越接近于击穿场强时, 电导率  $\gamma$  的值越急剧增大。

### 8. 绝缘电阻与泄漏电流的测量

由于吸收现象, 在外加直流电压  $U$  作用下, 介质中流过的电流  $i$  是随时间而衰减的, 因此介质的电阻  $R=U/I$  随时间而增加, 最后达到某一稳定值, 此时的电流  $I$  称为介质的泄漏电流, 电阻  $R$  称为介质的绝缘电阻。两者的原理和适用范围是一样的。不同的是测量泄漏电流需使用比测量绝缘电阻更高的电压, 如测量绝缘电阻的兆欧表最高电压为 5kV, 而测量泄漏电流的电压不低于 10kV, 故能发现兆欧表所不能发现的某些缺陷。一般兆欧表能发现贯通的集中性缺陷和受潮, 而测量泄漏电流能发现一些尚未完全贯通的集中性缺陷, 如瓷套开裂、绝缘纸筒沿面碳化、变压器油劣化以及内部受潮等缺陷。

### 9. 电介质电导的工程意义

(1) 在绝缘预防性试验中, 通过测量绝缘电阻和泄漏电流来反映绝缘的电导特性, 以判断绝缘是否受潮或存在其他劣化现象。在测试过程中应消除或减小表面电导对测量结果的影响, 同时还要注意测量时的温度。

(2) 对于串联多层电介质的绝缘结构, 在直流电压下的稳态电压分布与各层介质的电导成反比。因此设计用于直流的设备绝缘时要注意所用电介质的电导率的搭配, 一般尽可能使材料得到合理使用, 同时电介质的电导随着温度的升高而增加, 这对正确使用和分析绝缘状况有指导意义。

(3) 表面电阻对绝缘电阻的影响使人们注意到如何合理的利用表面电阻。当为了减小表面泄漏电流时, 应设法提高表面电阻, 如对表面进行清洁、干燥处理或涂敷憎水性涂料等。当为了减小某部分的电场强度时, 则需要减小这部分的表面电阻, 如在高压套管法兰附近涂半导体釉, 高压电机定子绕组露出槽口的部分涂半导体漆等, 都是为了减小该处的电场强度, 以消除电晕。

**【例 1-3】** 一双层介质绝缘结构的电缆, 第一层(内层)和第二层(外层)介质的电容和电阻分别为:  $C_1=4000\text{pF}$ 、 $R_1=1500\text{M}\Omega$ ;  $C_2=3000\text{pF}$ 、 $R_2=1000\text{M}\Omega$ 。当加 50kV 直流电压时, 试求:

(1) 当  $t=0$  合闸初瞬,  $C_1$ ,  $C_2$  上各有多少电荷?

(2) 当  $t=\infty$  时, 流过绝缘的电导电流各为多少? 这时  $C_1$ ,  $C_2$  上各有多少电荷?

解:

(1) 当  $t=0$  合闸初瞬, 电容相当于短路, 而电导相当于开路。这时电压按电容成反比分布, 即  $\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow 0} = \frac{C_2}{C_1}$ , 而  $Q = CU$ 。

$$\text{故 } Q_1 = Q_2 = C_1 U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U C_1 = \frac{3}{7} \times 50 \times 10^3 \times 4000 \times 10^{-12} = 8.571 \times 10^{-5} \text{ (C)}$$

即两个电容上的电荷均为  $8.571 \times 10^{-5} \text{ C}$ 。

(2) 当  $t=\infty$  时, 电容相当于开路, 电流全部从电导流过。这时电压按电导成反比, 电阻成正比分布, 即  $\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{t \rightarrow \infty} = \frac{R_1}{R_2}$ , 故  $U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 50 \times \frac{3}{5} = 30\text{kV}$ ,  $U_2 = U_1 \frac{R_2}{R_1} =$

20kV。

$$\text{故流过绝缘的电导电流为 } I_1 = I_2 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{0.03}{1500} = 20\mu\text{A}。$$

$$C_1 \text{ 和 } C_2 \text{ 上的电荷分别为 } Q_1 = C_1 U_1 = 4000 \times 10^{-12} \times 30 \times 10^3 = 1.2 \times 10^{-4} (\text{C})；$$

$$Q_2 = C_2 U_2 = 3000 \times 10^{-12} \times 20 \times 10^3 = 6 \times 10^{-5} (\text{C})。$$

## 10. 电介质的损耗

任何电介质在电压作用下都会有能量损耗，一种是由电导引起的电导损耗；另一种是由某种极化引起的极化损耗。电介质的能量损耗简称为介质损耗。

## 11. 直流损耗与交流损耗

直流损耗仅包含电导引起的损耗，而交流损耗则包括电导损耗和极化损耗。因此绝缘在交流电压下的损耗远远大于在直流电压下的损耗。

**分析：**在直流电压下，由于介质中没有周期性的极化过程，而一次性极化所消耗的能量可以忽略不计，所以电介质中的损耗只有电导引起的损耗；在交流电压下，除了电导损耗外还存在由于周期性反复进行的极化而引起的不可忽略的极化损耗。

## 12. 介质损耗因数概念

对于图 1-3 的三并联等值电路而言，在交流电压的作用下，介质等值电路中的电流可以归并为有功和无功两个分量，因此可以简化为电容和电阻两个元件并联或串联的等值电路。如图 1-4 和 1-5 所示。

向量图中的  $\delta$  称为介质损耗角，其正切值即为介质损耗因数。

**分析：**对于并联等值电路  $\tan\delta =$

$$\frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R_P}{\omega U C_P} = \frac{1}{\omega C_P R_P}。$$

电路中的功率损耗为  $P = UI_R = UI_C \tan\delta = U^2 \omega C_P \tan\delta。$

对于串联等值电路  $\tan\delta = \frac{U_r}{U_C} = \frac{I r_s}{I/\omega C_s} = \omega C_s r_s。$

$$\begin{aligned} \text{电路中的功率损耗为 } P &= I^2 r_s = \left(\frac{U}{Z}\right)^2 r_s = \\ &= \frac{U^2}{r_s^2 + \left(\frac{1}{\omega C_s}\right)^2} r_s = \frac{U^2 \omega^2 C_s^2 r_s}{1 + (\omega C_s r_s)^2} = \frac{U^2 \omega C_s \tan\delta}{1 + \tan^2 \delta}。 \end{aligned}$$

由于上述两种等值电路描述的是同一介质，不同连接方式的等值电路，故其功率损耗应相等。两个功率损耗公式相比较得  $C_P = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta}$ 。由于  $\tan\delta$  一般都很小，即  $1 + \tan^2 \delta \approx 1$ ，故  $C_P \approx C_s$ ，这时损耗在两种等值电

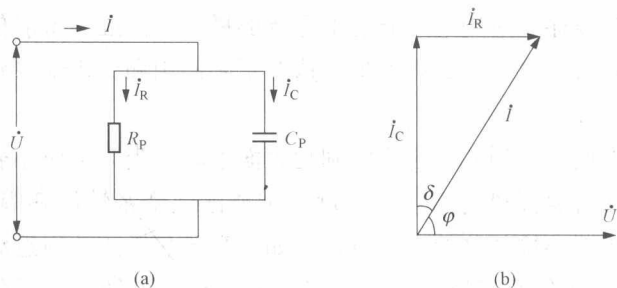


图 1-4 电介质并联等值电路

(a) 示意图；(b) 相量图

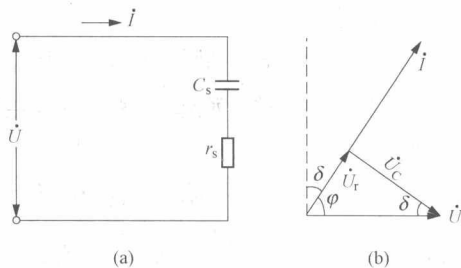


图 1-5 电介质串联等值电路

(a) 电路图；(b) 相量图

路中就可同一公式表示为  $P = U^2 \omega C \tan \delta$ 。而对于电气设备而言, 额定工作电压以及电源频率均为定值, 由于绝缘结构一定,  $C$  也一定, 因此  $P$  最后取决于  $\tan \delta$ , 即  $P$  与  $\tan \delta$  成正比, 所以  $\tan \delta$  的大小将直接反映介质损耗功率的大小, 所以在高电压工程中常把  $\tan \delta$  作为衡量电介质损耗特性的一个物理参数, 称之为介质损耗因数。介质损耗因数是一个无量纲量, 所以具有比较不同形状和大小的同种材料的绝缘特性的优点。

### 13. 影响电介质损耗的因素

影响电介质损耗的因素包括: 物质的结构、温度、频率、场强、湿度。

**分析:** (1) 不同的介质其损耗特性不同, 因为不同的物质结构具有不同的极化特性, 而不同的极化特性自然会影响到介质的损耗特性。

(2) 对于中性或弱极性的电介质, 其介质损耗因数随温度的升高按照指数规律增大。而对于液体极性介质, 介质损耗因数与温度关系如图 1-6 所示, 对于曲线 1, 当温度  $t < t_1$  时, 由于温度较低, 电导损耗和极化损耗都很小。随着温度的升高, 材料的黏滞性减小, 有利于偶极子的转向极化, 使极化损耗显著增大, 同时电导损耗也随温度的升高而有所增大, 所以在这一范围内介质损耗因数随温度的升高而增大。当  $t_1 < t < t_2$  时, 随着温度的升高, 分子的热运动加快, 从而又妨碍了偶极子在电场作用下进行有规则的排列, 因此, 极化损耗随温度升高而减小。由于这一温度范围内极化损耗的减小要比电导损耗的增加更快, 所以介质损耗因数随温度的升高而减小。当  $t > t_2$  时, 由于电导损耗随温度升高而急剧增加, 极化损耗相对来说已不占主要部分, 因此, 介质损耗因数重新又随温度的升高而增大。对于固体极性介质, 其介质损耗因数随温度变化曲线与液体极性介质相似, 且值更大。

(3) 从图 1-6 中也可以看出, 当电源频率增大时介质损耗因数的极大值出现在较高的温度, 这是因为电源频率增大时, 偶极子的转过来不及充分进行, 要使极化进行的充分, 就必须减小黏滞性, 也就是说要升高温度, 所以整个曲线向右移。

(4) 当电场强度较低时, 介质的损耗仅有电导损耗和一定的极化损耗, 处于某一较为稳定的数值。当电场强度达到某一临界值后, 会使介质中产生局部放电, 损耗急剧增加。

(5) 湿度较大的环境下, 电介质吸湿会导致电介质的电导增大, 泄漏电流增加, 从而导致介质损耗的增加。

**【例 1-4】** 已知某高压电气设备的  $\tan \delta = 0.01$ , 电容量为  $3500 \text{ pF}$ , 当对其施加  $50 \text{ kV}$  的交流电压时, 试求:

(1) 该设备绝缘所吸收的无功功率和所消耗的有功功率各为多少?

(2) 分别用串联等值电路和并联等值电路来表示该绝缘时, 等值电路的各元件参数应为何值?

**解:** (1) 消耗的有功功率

$$P = U^2 \omega C \tan \delta = 2\pi \times 50 \times (50 \times 10^3)^2 \times 3500 \times 10^{-12} = \frac{35}{4} \pi \text{ (W)}$$

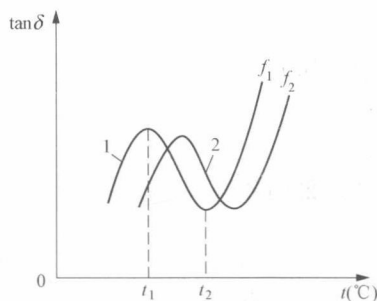


图 1-6 极性介质  $\tan \delta$  与温度和频率的关系

1—对应于频率  $f_1$  的曲线;

2—对应于频率  $f_2$  的曲线 ( $f_1 < f_2$ )

吸收的无功功率  $Q = P/\tan\delta = 875\pi$  (var)

(2) 串、并联等值电路分别如图 1-4 和图 1-5 所示。

对并联等值电路

$$C_S \approx C_P = 3500\text{pF}, \tan\delta = \frac{i_R}{i_C} = \frac{U/R_P}{U\omega C_P} = \frac{1}{R_P\omega C_P}, R_P = \frac{1}{\omega C_P \tan\delta} = \frac{10^{10}}{35\pi}$$

对串联等值电路

$$\tan\delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{IR_S}{I/\omega C_S} = R_S\omega C_S, R_S = \frac{\tan\delta}{\omega C_S} = \frac{10^6}{35\pi}$$

**【例 1-5】** 设双层电介质各部分的特性为  $C_1$ 、 $\tan\delta_1$ 、 $C_2$ 、 $\tan\delta_2$ 。试求双层电介质的  $\tan\delta$ 。

**分析：**分别采用串联等值电路和并联等值电路求解。等值电路如图 1-4 和 1-5 所示，双层电介质的  $\tan\delta$  应为等效电抗的虚部比实部。

$$R_1 = \frac{1}{\omega C_1 \tan\delta_1}, R_2 = \frac{1}{\omega C_2 \tan\delta_2}$$

**解：**(1) 采用串联等值电路。

双层电介质的等效电抗为

$$R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{1}{\omega C_1 \tan\delta_1} + \frac{1}{\omega C_2 \tan\delta_2} + \frac{-j}{\omega C_1} + \frac{-j}{\omega C_2} = \frac{C_2 \tan\delta_2 + C_1 \tan\delta_2 - j \tan\delta_1 \tan\delta_2 (C_1 + C_2)}{\omega C_1 C_2 \tan\delta_1 \tan\delta_2}$$

故双层介质的  $\tan\delta$  为

$$\tan\delta = \frac{\tan\delta_1 \tan\delta_2 (C_1 + C_2)}{C_1 \tan\delta_1 + C_2 \tan\delta_2}$$

(2) 采用并联等值电路。双层电介质的等效电抗为

$$\begin{aligned} \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2} &= \frac{1}{\omega C_1 \tan\delta_1 + j\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2 \tan\delta_2 + j\omega C_2} \\ &= \frac{[(\omega C_2 \tan\delta_2)^2 + (\omega C_2)^2]\omega C_1 \tan\delta_1 + [(\omega C_1 \tan\delta_1)^2 + (\omega C_1)^2]\omega C_2 \tan\delta_2}{(\omega C_2 \tan\delta_2)^2 + (\omega C_2)^2 + (\omega C_1 \tan\delta_1)^2 + (\omega C_1)^2} \\ &\quad + j \frac{[(\omega C_2 \tan\delta_2)^2 + (\omega C_2)^2]\omega C_1 + [(\omega C_1 \tan\delta_1)^2 + (\omega C_1)^2]\omega C_2}{(\omega C_2 \tan\delta_2)^2 + (\omega C_2)^2 + (\omega C_1 \tan\delta_1)^2 + (\omega C_1)^2} \end{aligned}$$

故双层电介质的  $\tan\delta$  为

$$\tan\delta = \frac{[(\omega C_2 \tan\delta_2)^2 + (\omega C_2)^2]\omega C_1 + [(\omega C_1 \tan\delta_1)^2 + (\omega C_1)^2]\omega C_2}{[(\omega C_2 \tan\delta_2)^2 + (\omega C_2)^2]\omega C_1 \tan\delta_1 + [(\omega C_1 \tan\delta_1)^2 + (\omega C_1)^2]\omega C_2 \tan\delta_2}$$

**【例 1-6】** 高压单芯电缆长 20m,  $\tan\delta_2 = 0.005$ ,  $\epsilon_r = 3.8$ , 现其中 1m 发生局部损坏, 该部位的  $\tan\delta$  增至 0.05 记为  $\tan\delta_1$ ,  $\epsilon_r$  基本不变, 此时电缆的  $\tan\delta_2$  应为何值?

**解：**由于电缆损坏前后其相对介电常数没有改变, 所以其电容与长度成正比。取损坏段的电容为  $C_1$ , 则非损坏段的电容为  $19C_1$ 。

采用并联等值电路。

故例 1-5 的结果可简化为 
$$\tan\delta = \frac{19^2(1 + \tan\delta_2^2)\tan\delta_1 + 19(1 + \tan\delta_1^2)\tan\delta_2}{19^2(1 + \tan\delta_2^2) + 19(1 + \tan\delta_1^2)}$$

将  $\tan\delta_1 = 0.05, \tan\delta_2 = 0.005$  代入上式, 可得

$$\tan\delta = 0.048$$

#### 14. 电介质击穿

电介质作为绝缘介质是针对一定电压而言的, 在一定电压下, 当介质呈现出极微弱的导电性能, 其绝缘电阻值很高, 通过介质的泄漏电流极小时, 介质是绝缘的。但是, 随着外加电压的升高, 当电压达到某一临界值后, 电介质的电导则显著增大, 泄漏电流急剧增加, 使电介质丧失原有的绝缘性能, 这种现象称为电介质的击穿。



## 第二章 气体放电的基本理论

### 一、学习要求

(1) 掌握碰撞电离、热电离、光电离、表面电离，带电粒子向电极定向运动并进入电极中和电量、带电粒子的扩散、带电粒子的复合，吸附效应、电子崩、汤逊理论、流注理论、巴申定律、不均匀电场气体放电的极性效应。

(2) 熟悉气体带电粒子的产生和消失原理。

(3) 了解气体中的长间隙放电特性。

### 二、学习要点

#### 1. 气体中带电粒子的产生

气体中产生带电粒子的过程称为电离或者游离，气体分子发生电离所需要的能量称为电离能，当中性气体分子或原子受到外界作用的能量大于其电离能时，电子就能跳出原子的轨道，成为自由电子，使原来的一个中性分子或原子变成一个带正电的离子和一个自由电子，这种现象称为**电离**。气体电离的基本形式有：**碰撞电离、热电离、光电离、表面电离**。

**分析：**(1) **碰撞电离：**由于紫外线、宇宙射线以及来自地球内部的辐射线的作用，通常气体中总会存在一些自由电子或离子。在电场的作用下，这些自由电子或离子被加速而获得动能，当积累的动能达到一定数值后，这些自由电子或离子和中性分子或原子发生碰撞，可能使后者发生电离，这种电离过程称为碰撞电离。

为了气体质点电离，需给予该气体质点以足够的能量，其值不能小于该气体质点的电离能。这个电离能可能是中性质点的电离能即第一电离能，也可能是离子的电离能即第二电离能或第三电离能等，还可能是在被激励了的质点进一步电离所需要的电离能，在碰撞电离中，这个能量应该由撞击的质点的动能给予。

电子或离子在电场作用下加速所获得的动能 $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ 与质点电荷量 $(e)$ 、电场强度 $(E)$ 以及碰撞前的行程 $(x)$ 有关，即

$$\frac{1}{2}mv^2 = eEx$$

高速运动的带电粒子与中性原子或分子碰撞时，如果原子或分子获得的能量等于或大于其电离能 $W_i$ ，则会发生电离，因此发生碰撞电离的条件是

$$eEx \geq W_i$$

或

$$x \geq \frac{U_i}{E}$$

式中  $U_i$  —— 气体分子的电离电位。