



电气化铁道

# 高电压绝缘与试验技术

刘明光 编著

西南交通大学出版社

6

电气化铁道

# 高电压绝缘与试验技术

刘明光 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

-----  
图书在版编目 (C I P) 数据

电气化铁道高电压绝缘与试验技术/刘明光编著.  
成都: 西南交通大学出版社, 2001.6  
ISBN 7-81057-397-7

I. 电... II. 刘... III. 电气化铁道-电气设备, 高  
电压-高电压绝缘技术 IV. U223.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 19022 号  
-----

电气化铁道  
高电压绝缘与试验技术

刘明光 编著

\*

出版人 宋绍南

责任编辑 唐 晴

封面设计 肖 勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610000 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 22.5

字数: 535 千字 印数: 1~3000 册

2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-397-7/U·037

定价: 30.00 元

图书如有印装质量问题, 本社负责调换。

## 内 容 提 要

本书分析电介质的物理特性,论述气体、SF<sub>6</sub>、液体、固体及组合绝缘的各种绝缘特性、击穿机理、提高绝缘抗电强度的方法,介绍电气化铁道系统中常见高压电气设备的绝缘结构、高压试验设备、绝缘测试仪表及原理,研究高压电气设备绝缘试验技术、在线监测方法。

本书既强调理论又注重实用,内容反映了最新的有关标准、规程、科研成果,以及现场试验的经验。可作为电气工程与自动化大类专业铁道电气化方向、电力工程方向的教材,或者相关专业的参考教材,也可供从事铁道电气化工程、运营管理、设计和科研的工程技术人员参考。

# High Voltage Insulation and Test Techniques

Ming-guang Liu

## ABSTRACT

In this book the insulation characteristics of dielectrics for high voltage equipment are discussed, discharge theory is expounded, and fundamental methods for enhancing electrical intensity of high voltage equipment are introduced. All kinds of insulation structures of high voltage equipment are described. The test equipment, insulation test and on-line monitoring techniques are systematically elaborated.

The book not only focuses on formulation of theories, but also covers their applications. The new achievements of scientific research and new national codes are reflected in its substantial content, and therefore the book may be used as a textbook for both undergraduates and postgraduates majoring in electrical engineering, and as a reference for electrical engineers in their practice.

**Index:** high voltage, dielectric, insulation, test, on-line monitoring

# 前 言

本书获得了四川省学术和技术带头人基金的资助，获得了西南交通大学出版基金的资助，在西南交通大学多次试用的讲义基础上编著。

铁道电气化的深入，特别是重载、高速列车的发展，对牵引供电系统及高压电气设备的可靠性提出了更高的要求。设计、安装、维护和处理高压电气设备绝缘及试验检测，是铁道电气化工程和运营实践中必然面对的问题，本书正是研究电气化铁道系统中高压电气设备的绝缘及其试验技术。全书共 12 章，第 1~6 章阐述各种电介质的物理特性、击穿机理、提高绝缘抗电强度的基本方法，第 7 章介绍电气化铁道系统中常用高压电气设备的绝缘结构，第 8~11 章讲述高压试验设备、绝缘测试仪表的原理和绝缘试验方法，第 12 章讲述高压电气设备绝缘在线监测技术。

本书引用了最新的有关标准、规程和大量的参考文献，对这些文献的作者以及给本书提供帮助的同仁在此表示感谢。由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2001 年 1 月

# 目 录

绪 论 .....	1
<b>第 1 章 电介质物理特性</b>	
1.1 电介质概念 .....	3
1.2 电介质极化 .....	4
1.3 电介质电导 .....	8
1.4 电介质能量损耗 .....	11
1.5 电介质老化及绝缘寿命 .....	14
复习思考题 .....	20
<b>第 2 章 气体绝缘特性</b>	
2.1 气体放电基础知识 .....	21
2.2 气体放电机理 .....	25
2.3 气隙冲击击穿特性 .....	42
2.4 气隙击穿电压 .....	45
2.5 大气状态对外绝缘放电电压的影响 .....	49
2.6 提高气隙击穿电压的措施 .....	52
复习思考题 .....	56
<b>第 3 章 气体中的沿面放电</b>	
3.1 清洁状态的沿面放电 .....	59
3.2 淋雨、覆冰和覆雪状态的沿面放电 .....	63
3.3 污秽状态的沿面放电 .....	68
3.4 提高沿面放电电压的方法 .....	77
复习思考题 .....	81
<b>第 4 章 六氟化硫气体绝缘</b>	
4.1 SF <sub>6</sub> 气体基本特性 .....	83
4.2 SF <sub>6</sub> 气体电气特性 .....	85
4.3 SF <sub>6</sub> 高压电气设备 .....	94
4.4 SF <sub>6</sub> 分解产物、水分及其管理 .....	99
复习思考题 .....	103
<b>第 5 章 液体绝缘特性</b>	
5.1 绝缘液体及作用 .....	104

5.2	变压器油电气特性 .....	106
5.3	变压器油质量标准 .....	111
5.4	变压器油劣化与监控 .....	113
5.5	变压器油维护与再生 .....	115
	复习思考题 .....	117
<b>第 6 章 固体绝缘及组合绝缘特性</b>		
6.1	固体绝缘及作用 .....	118
6.2	固体绝缘的电气特性 .....	119
6.3	组合绝缘及电气特性 .....	124
	复习思考题 .....	135
<b>第 7 章 高压电气设备绝缘结构</b>		
7.1	绝缘子、套管及避雷器绝缘 .....	136
7.2	断路器与隔离开关绝缘 .....	143
7.3	电容器与电抗器绝缘 .....	147
7.4	电力电缆绝缘 .....	150
7.5	互感器绝缘 .....	156
7.6	电力牵引变压器绝缘 .....	159
7.7	电力牵引电机绝缘 .....	167
	复习思考题 .....	169
<b>第 8 章 高压试验电源装置</b>		
8.1	交流试验电源装置 .....	170
8.2	直流试验电源装置 .....	175
8.3	冲击试验电源装置 .....	181
	复习思考题 .....	192
<b>第 9 章 高电压及绝缘测试设备</b>		
9.1	静电电压表 .....	194
9.2	球间隙与峰值电压表 .....	196
9.3	分压器与分流器 .....	200
9.4	高压示波器 .....	209
9.5	高压交流电桥 .....	210
9.6	局部放电测试仪 .....	220
9.7	兆欧表 .....	223
	复习思考题 .....	225
<b>第 10 章 绝缘试验技术</b>		
10.1	基本概念 .....	227
10.2	绝缘电阻与吸收比测试 .....	229

10.3	介质损失角正切值测试	231
10.4	局部放电测试	238
10.5	电压分布测试	246
10.6	直流试验	247
10.7	交流耐压、冲击耐压试验与绝缘耐受能力	249
	复习思考题	256
<b>第 11 章 电气设备交接及预防性绝缘试验</b>		
11.1	预备知识	257
11.2	变压器绝缘试验	260
11.3	电机绝缘试验	271
11.4	互感器绝缘试验	275
11.5	断路器、套管、绝缘子试验	281
11.6	电容器、电抗器、避雷器试验	284
11.7	电力电缆绝缘试验	289
11.8	绝缘油电气特性试验	295
11.9	绝缘油气相色谱分析和微水含量测试	301
11.10	SF <sub>6</sub> 气体泄漏及含水量检测	313
11.11	污秽等值盐密测试	316
11.12	绝缘工具试验	319
	复习思考题	320
<b>第 12 章 高压电气设备绝缘在线监测</b>		
12.1	绝缘在线监测概念	322
12.2	接触网绝缘在线监测	327
12.3	变压器绝缘在线监测	328
12.4	电机绝缘在线监测	331
12.5	断路器绝缘在线监测	332
12.6	避雷器绝缘在线监测	334
12.7	互感器绝缘在线监测	337
12.8	电力电缆绝缘在线监测	338
12.9	电容型设备绝缘在线监测	339
12.10	SF <sub>6</sub> 设备绝缘在线监测	342
	复习思考题	343
附录 1	标准球隙放电电压表	344
附录 2	tg $\delta$ 温度换算系数	346
附录 3	高压电气设备交流耐压标准	348
	参考文献	349



# CONTENTS

Chapter 0	Introduction .....	1
Chapter 1	Physical Characteristics of Dielectrics.....	3
Chapter 2	Insulation Characteristics of Air .....	21
Chapter 3	Discharge on The Dielectric Surface .....	59
Chapter 4	Insulation Characteristics of SF <sub>6</sub> .....	83
Chapter 5	Insulation Characteristics of Liquid Dielectric .....	104
Chapter 6	Insulation Characteristics of Solid and Combination Materials .....	118
Chapter 7	Insulation Structures of High Voltage Equipment.....	136
Chapter 8	Equipment for High Voltage Tests .....	170
Chapter 9	Measuring Instruments for High Voltage and Insulation Tests .....	194
Chapter 10	High Voltage and Insulation Test Techniques.....	227
Chapter 11	Handover and Preventive Insulation Tests for High Voltage Equipment .....	257
Chapter 12	Insulation On-line Monitoring for High Voltage Equipment .....	322

间虽然很短，但幅值大大超过正常工作电压，容易造成高压电气设备绝缘损坏。即使在正常的工作电压之下，高压电气设备也可能受到外界机械负荷、电动力、机械振动等作用。例如：接触网导线的悬式、支持绝缘子长期受到导线拉力作用；隔离开关的支柱绝缘子在分合闸时承受扭转力矩作用；在牵引供电系统发生短路时，牵引电力变压器线圈承受电动力作用。高压电气设备还要受到日晒夜露、风吹雨打；冰雪覆盖、骤冷骤热；化工气体、烟雾、尘埃等污染。这些都会导致高压电气设备在工作电压下绝缘性能逐渐发生劣化，失去原有的绝缘特性，在一定条件下发生闪络、击穿，造成停电事故。工作电压常常是决定高压电气设备绝缘使用寿命的主要条件，过电压往往是高压电气设备发生绝缘事故的诱发因素。牵引供电系统及高压电气设备能否安全运行，取决于作用在电气设备绝缘上的电压高低和绝缘本身耐受电压的能力。

考核高压电气设备绝缘耐受电压的能力，最简单最有效的方法是对高压电气设备进行绝缘试验，即：在低于或接近额定电压下测试设备的绝缘特性参数及其变化情况，在施加等值模拟运行中可能遇到的过电压来判断设备绝缘耐受电压的能力。各种电压等级的高压电气设备的最高工作电压、各种类型的试验电压，以及试验周期、试验方法，在国际电工委员会（以下简称 IEC）的有关出版物和国家标准（以下简称国标）中已有明确规定，例如：IEC Standard, High-voltage Test Techniques, Publication 52, 60, 270；国标 GB 311.1—1997《高压输变电设备的绝缘配合》、国标 GB 50150—91《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》、电力行业标准 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》、铁道部《牵引变电所运行检修规程》、《接触网运行检修规程》等。高压电气设备的型式试验、出厂试验和交接试验的电压及波形，是设计其绝缘结构的主要依据之一；运行中的预防性试验是监督高压电气设备的绝缘状况，确定被试设备是否可以继续投入运行，或者需要维修的重要依据。

应当指出，为了维护电气化铁道的安全运营，分析和解决电气化铁道中高压绝缘闪络事故，除了了解有关高压电气设备的绝缘结构及特性，还应知道系统中过电压发生机理、分布情况、保护措施。过电压知识将在相关课程中讲述，本课程着重研究电气化铁道中的高电压绝缘与试验技术问题。

学习本课程的目的和要求就是了解电气化铁道中高压电气设备的各种电介质物理特性、击穿机理、牵引电力设备的绝缘结构、绝缘试验设备及测试仪表的原理、绝缘故障诊断技术，掌握维护和提高电气设备绝缘抗电强度的方法、绝缘试验的方法，监督和判断高压电气设备绝缘状态的基本方法和原则。绝缘试验技术涉及到许多仪表和设备，涉及到具体的试验接线、现场环境处理和现场条件的利用，涉及到有关试验标准的具体应用、试验结果分析和绝缘故障诊断。所以，本课程内容的理论性和实践性都很强，在学习时应注意掌握基本理论、基本方法，理论联系实际，重点是学会分析问题、解决问题的能力。

# 第1章 电介质物理特性

## 1.1 电介质概念

任何一个高压电气设备，甚至供电系统，都包括着导体和绝缘体。导体的作用是提供电流路径、完成电能分配。从电气角度看，对导体的基本要求之一是具备良好的导电性能，即对电流的阻碍和损耗作用越小越好。显然，超导是最理想的导体。绝缘体的作用是将电位不等的导体分隔开，以保持不同电位，并阻止电流向不需要的地方流动。绝缘体是高压电气设备、供电系统结构的重要组成部分。用作绝缘的物质，称为电介质，或绝缘介质。在导体间的电场作用下，绝对不导电的电介质材料是没有的，但当电介质的电阻率高达  $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$  时，通过其中的泄漏电流极小，工程上可以忽略不计，从而起到绝缘作用。常用的电介质是：空气（包括真空）、 $\text{SF}_6$  气体，变压器油、电容器油、电缆油、电工陶瓷、玻璃、云母、电工纸、橡胶、环氧树脂、交联聚乙烯和聚氯乙烯塑料，等等。用于高压电气设备的电介质材料按其物理状态可分为：气体绝缘、液体绝缘、固体绝缘、组合绝缘；按其化学结构可分为：有机绝缘、无机绝缘；按其耐热等级可分为：O、A、E、B、F、H、C 七级绝缘（参见表 1.3）；按所属设备可分为：电容器绝缘、电缆绝缘、互感器绝缘、断路器绝缘、变压器绝缘、电机绝缘，等等。

任何电介质在实际使用中将受到电、力、热三个方面的作用，因此，反映电介质的基本性能相应表现在三个方面。① 介电性能，包括：极化、损耗、绝缘电阻、绝缘强度，所表现的四个参数为介电系数、介质损失角正切值、电导率（或电阻率）、击穿场强。② 力学性能，包括：应变（拉伸应变、均匀压缩应变、剪切应变）、模量（弹性模量、动态模量、损耗模量）及强度。③ 热学性能，包括：热容量、比热容、热导率、热膨胀。本书只讨论介电性能。

高压电气设备的绝缘结构常常由几种电介质组合而成，长期运行在较高的工作电压之下，而且，还可能受到幅值比额定工作电压高得多的短时过电压作用。电介质的性能影响到高压电气设备的绝缘工作状态，以及绝缘故障诊断。当交流及冲击电压作用时，串联组合电介质中电压分布与各层电介质的相对介电常数成反比；当直流电压作用时，串联组合电介质中电压分布与各层电介质的电导成反比。电介质中泄漏的电导电流是电介质在电场作用下发生能量损耗的原因之一，它将引起高压电气设备进一步发热，使得必须减少导电部分的工作电流或磁路中的磁感应强度，以限制设备中的总功率损耗和各元件的工作温度。电介质的损耗还与其极化类型有关，在一定条件下，电介质损耗是影响绝缘劣化、导致发生热击穿的一个重要因素。在高压电气设备的绝缘预防性试验中，测量被试品的绝缘电阻、泄漏电流、介质损失角的正切值是有效判断绝缘是否受潮或有其

他劣化现象的常规试验项目。另外，在某些场合下并不总是希望电介质的绝缘电阻很高，相反，为了达到一定的目的还要设法将绝缘电阻减少。例如，在高压套管法兰附近涂半导体釉，在高压电机定子绕组出槽口部分涂半导体漆，就是为了改善这些局部区域的电场分布，消除电晕。

总之，电介质的性能涉及到如何保证和提高高压电气设备的绝缘强度；在组合绝缘设备中如何合理使用电介质；对运行中的高压电气设备如何减少介质损耗，防止绝缘老化；在试验中怎样准确地判断高压电气设备的绝缘特性，等等。这些直接关系到高压电气设备的质量、运行可靠性和寿命。所以，必须研究电介质的极化，电导和损耗等与电介质击穿或损坏密切相关的物理特性。

## 1.2 电介质极化

电介质的分子由原子组成，正常情况下原子核带的正电荷与电子带的负电荷总量相等，电子绕原子核旋转，原子对外呈中性状态。在外施电场作用下，电介质中原来彼此中和的正负电荷产生了位移，两极分化形成电矩（对偶极子而言指正负电荷平均中心之间的距离与其电荷量的乘积），使电介质表面出现了束缚电荷的现象，称为电介质的极化。电介质极化可用图 1.1 来说明。将图 1.1 (a) 所示极板面积为  $A$ ，极间相距为  $d$  的平行平板电容器放在抽为真空的密闭容器内，并在极板上施加直流电压  $U$ ，可测出极板上积聚的电荷量为  $Q_0$ 。

当平板电容器极间插入一块面积为  $A$ ，厚度为  $d$  的固体电介质，如图 1.1 (b) 所示，在同样的外施电压  $U$  作用下，可测出极板上积聚的电荷为  $Q_0 + \Delta Q$ 。这就是由于极化作用使电介质表面出现的束缚电荷在极板上另外吸引住了一部分电荷  $\Delta Q$ ，导致平板电容器储存的电荷增加，电容量亦增大。

平行平板电容器在真空中的电容量  $C_0$  为：

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (1.1)$$

式中， $\epsilon_0$  为真空介电系数， $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-14}$  F/cm。

平行平板电容器中插入固体电介质之后，其电容量  $C$  为：

$$C = \frac{Q_0 + \Delta Q}{U} = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad (1.2)$$

式中， $\epsilon$  为电介质的介电系数。

电介质的相对介电系数  $\epsilon_r$  定义为：

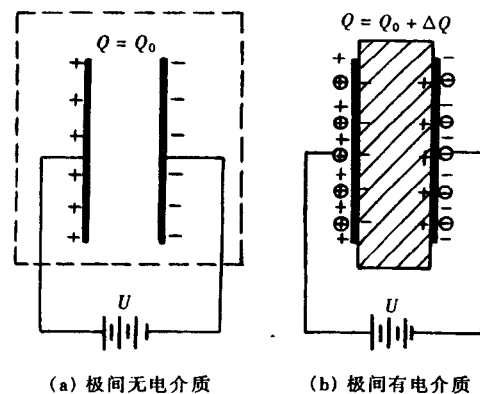


图 1.1 电介质的极化示意图

$$\epsilon_r = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.3)$$

电介质单位体积中感应的偶极矩称为极化强度，其定义为：

$$P = \frac{\Delta Q}{A} = \frac{\Delta Q \cdot d}{A \cdot d} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{V} \quad (1.4)$$

式中， $P$  为极化强度； $M_i$  为偶极矩； $V$  为电介质的体积。

常见电介质的相对介电系数列于表 1.1 中，可见，气体介质的相对介电系数接近 1，其他电介质的相对介电系数在 2~7 之间。

表 1.1 常见电介质的相对介电系数

名 称	相对介电系数 (工频, 20°C)
空气 (标准大气条件)	1.000 58
SF <sub>6</sub> 气体	1.002 (25°C, 0.1 MPa)
石蜡	2.0~2.5
变压器油	2.2~2.5
交联聚乙烯	2.2~4.0
松香	2.5~2.6
橡胶	2.5~4.0
沥青	2.6~2.7
聚氯乙烯	3.0~3.5
胶木	4.5
云母	5~7
电瓷	5.5~6.5
玻璃	6
纤维素	6.5
水*	81

\* 水不会作电介质，但可能浸入电介质之中，这里列出作为对比参考。

除了温度、电源频率的影响，相对介电系数主要取决于电介质的极化形式。电介质在电场中发生极化时，从电场吸取能量，获得一定的电矩。根据电场消失时，电介质是否从极化状态重新回到原来的非极化状态，并将能量释放出来的特征，可将电介质的极化形式分为无损极化和有损极化。无损极化不消耗电源能量，它包括电子位移极化、离子位移极化。有损极化要消耗电源能量，它包括偶极子极化、夹层极化、空间电荷极化。

### 1.2.1 电子位移极化

构成电介质分子的原子在没有外电场作用时，正负电荷中心重合，呈中性状态，如图 1.2 (a) 所示；当外电场  $E$  作用时，原子的电子轨道相对原子核发生变形位移，如图 1.2 (b) 所示，其作用中心与原子核的正电荷不再重合，对外界呈现出一个等效电偶极子状态，这就是电子位移极化。

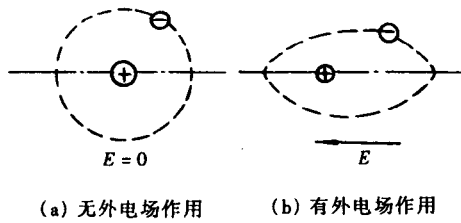


图 1.2 电子位移极化示意图

电子位移极化存在于一切气体、液体和固体电介质中，具有以下特点：当外电场去掉后，正负电荷间的互相吸引力使作用中心又自动回到原来的中性状态。因此，这种极化具有弹性，不消耗能量。由于电子的质量极小，位移极化过程的时间极短（约为  $10^{-14} \sim 10^{-15}$  s，接近光的周期）。所以，在各种频率的外施电压下均可产生，即：相对介电系数不随频率变化。温度升高，电介质体积略有膨胀，单位体积内的分子数减少，相对介电系数略有下降，即：相对介电系数具有较小的负温度系数，工程上可以近视认为与温度无关。

### 1.2.2 离子位移极化

由离子式结构组成的电介质，如云母、陶瓷、玻璃等材料，在无外电场时，正负离子的作用中心互相重合，对外界平均偶极矩为零，呈中性状态，如图 1.3 (a) 所示。在外电场  $E$  作用下，正负离子发生位移，使电介质平均偶极矩不再为零，对外界呈现出极性，如图 1.3 (b) 所示。

离子位移极化的特点：当外电场去掉后，正负离子自动复位，属弹性极化，不引起能量损耗。极化时间很短（约  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  s），相对介电系数不随频率而变化。温度对离子位移极化影响较大。温度升高，一方面由于离子间结合力降低，使极化程度增加；另一方面由于离子密度减小，使极化程度降低，但前一因素是主要作用，所以，相对介电系数具有正温度系数。

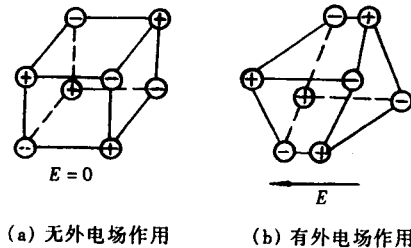


图 1.3 离子位移极化示意图

### 1.2.3 偶极子极化

极性结构的电介质，如胶木、橡胶、纤维素等，本身就是由偶极子构成。偶极子是一种正负电荷作用中心不相重合的特殊分子，一端带正电荷，另一端带负电荷，分子形成一个永久性的偶极矩。在无外电场作用时，单个偶极子虽具有极性，但处于不停的热运动中，分子排列混乱，相互作用抵消，对外界呈现中性，如图 1.4 (a) 所示。在外电场  $E$  作用下，原来混乱的偶极子受电场力作用转向，顺着电场方向排列，对外界呈现出极性，如图 1.4 (b) 所示。

偶极子极化特点：当外电场去掉后，由于偶极子本身的电极性，仍将保持已有的定向排列，属于非弹性极化，极化过程中消耗的电场能量不能释放出来。所以，偶极子极化要引起能量损耗。极化过程中偶极子的转向要克服分子间的吸引力，极化过程较长（约  $10^{-10} \sim 10^{-2}$  s），相对介电系数与外施电压频率有关。频率增加，偶极子的转动次数增加，极化增加；但频率

很高时，偶极子来不及转动，极化又将减弱，相对介电系数也减小。温度升高，分子热运动加剧，妨碍了偶极子在电场作用下定向转动，使极化减弱，相对介电系数减小。所以，极性气体电介质具有负温度系数。但对液体、固体电介质，由于分子间联系紧密（如液体的粘度加大），当温度过低，分子难以转向，相对介电系数也将减小。所以，极性液体、固体电介质的相对介电系数在低温时随温度升高而增加；当温度上升到一定程度，分子热运动较强烈时，相对介电系数又开始下降；在某一温度下相对介电系数出现极大值，如图 1.5 所示。

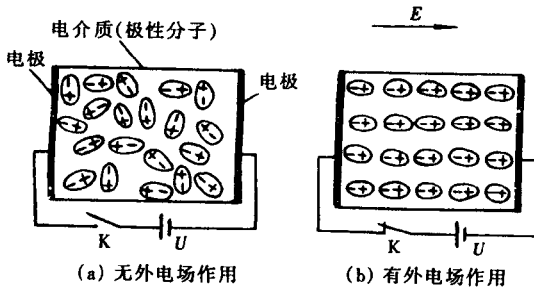


图 1.4 偶极子极化示意图

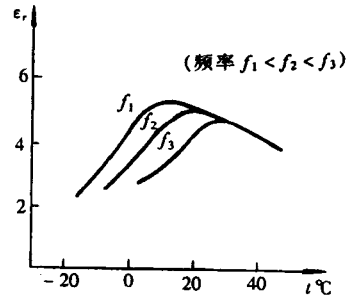


图 1.5 氯化联苯的  $\epsilon_r$  与温度的关系

### 1.2.4 夹层极化

高压电气设备的绝缘结构常常由几种电介质材料组成。如果水分浸入高压电气设备的电介质中或电介质含有气泡、杂质等，将引起高压电气设备的绝缘结构总电介质分布不均匀，这也可等效为多层电介质情况。在电场作用下，这样的电介质将发生极为缓慢的“夹层极化”现象，并伴随着能量损耗。夹层极化可用每层电介质的面积和厚度均相等的双层电介质模型及等值电路（如图 1.6）来分析。当电路刚合闸瞬时（ $t \rightarrow 0^+$ ），相当于高频电源作用，电路中主要流过容性电流，这时两层电介质上的电压分配与各层的电容成反比，即：

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow 0^+} = \frac{C_2}{C_1} \quad (1.5)$$

到达稳态时（ $t \rightarrow \infty$ ），电路中全部流过阻性电流，各层电介质上的电压分配与电导成反比，即：

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{G_2}{G_1} \quad (1.6)$$

一般情况下两层电介质不同或不均匀，介电系数  $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ ，电导率  $\gamma_1 \neq \gamma_2$ 。将平板电容器的电容  $C$  ( $C = \epsilon A/d$ ) 与电导  $G$  ( $G = \gamma A/d$ ) 代入式 (1.5) 和 (1.6)，则有：

$$\frac{C_2}{C_1} \neq \frac{G_2}{G_1} \quad (1.7)$$

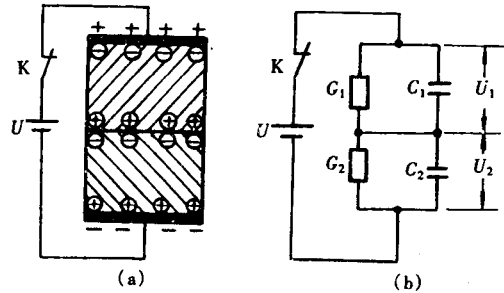


图 1.6 夹层极化现象示意图

$G_1$ 、 $G_2$ —各层电介质的电导  $C_1$ 、 $C_2$ —各层电介质的电容  
 $U_1$ 、 $U_2$ —各层电介质上电压

即：

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow 0^+} \neq \frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty} \quad (1.8)$$

这就是说，两层电介质上电压分配的初始值和稳态值不一致。电路合闸后，多层电介质的分界面上电荷将重新进行分配。例如，在图 1.6 中若  $C_1 > C_2$ ， $G_1 < G_2$ ，当  $t \rightarrow 0^+$  时， $U_1 < U_2$ ，当  $t \rightarrow \infty$  时， $U_1 > U_2$ 。当  $t > 0$  后， $U_1$  将逐渐增加，由于  $U_1 + U_2 = U$  为常数， $U_2$  必然相应下降。要完成这一过程，只能是  $C_2$  上的部分电荷经  $G_2$  放掉，而  $C_1$  经过  $G_2$  从电源再吸收一部分电荷，这部分电荷称为吸收电荷。夹层极化会使整个电介质的等值电容增大，同时，吸收电荷也会引起电介质损耗增大。夹层极化过程的时间常数为：

$$\tau = \frac{C_1 + C_2}{G_1 + G_2} \quad (1.9)$$

由于电介质的电导数值很小，所以，夹层极化时间常数很大，极化过程十分缓慢，需要几小时到几十分钟，甚至更长时间。这表明夹层极化现象只有在低频电压作用时才有意义；也提示人们对使用过的较大电容量的设备应将两极始终短接，防止经过一定时间后，由于吸收电荷陆续释放出来危及人身安全。

### 1.2.5 空间电荷极化

电介质内部的正负自由离子在电场作用下改变原来的分布状况，使电极附近形成空间电荷，称为空间电荷极化。它与夹层极化现象一样，过程缓慢，只能在低频电压作用下才存在，高频电压作用时空间电荷来不及移动，不会发生这种极化现象。

### 1.2.6 研究电介质极化目的和意义

- ① 设计高压电气设备的绝缘结构时，根据不同情况选择具有不同的相对介电系数的电介质材料。例如：制造电容器时选择相对介电系数较大的绝缘材料，可以增大电容器的单位电容量或减小电容器的单位体积和重量。制造电力电缆时选择相对介电系数较小的绝缘材料，可以减小电缆运行时的充电电流。
- ② 高压电气设备的绝缘结构由多层电介质组合时，在交流及冲击电压作用下，各层电介质上的电场或电压分布与其相对介电系数成反比。因此，在高压电气设备的绝缘结构设计时不但要注意选用的绝缘材料的电气强度，而且还要注意选用的绝缘材料的相对介电系数之间的配合。
- ③ 电介质的损耗（见 1.4 节）及热击穿与电介质的极化类型有关。因此，对高压电气设备绝缘进行维护和管理时，应根据不同的电介质材料，采取不同的措施。
- ④ 利用在高压电气设备的绝缘预防试验中电介质的夹层极化现象来判断绝缘是否受潮。

## 1.3 电介质电导

电介质的电导与金属的电导有本质上的差别。金属导电依靠其自由电子在电位差作用下沿导体流动来形成；气体电介质导电通过电离出的自由电子、正负离子在电场作用下定向移动形成；



液体和固体电介质的导电由电介质本身及杂质的化学分解或热分解形成的电子、正负离子沿电场方向移动形成。带电粒子在电场中的平均漂移速度 $v$ 与电场强度 $E$ （简称场强）成正比，其比值：

$$K = \frac{v}{E} \quad (1.10)$$

称为迁移率，表示该粒子在场强为 $E$ 的电场中漂移的速度。

### 1.3.1 气体电介质的电导

气体中由外界因素产生的电子在电场作用下定向运动，形成电流和电导；当电场的场强很高时，电子在运动过程中积累动能，碰撞中性气体分子，使其电离（电离指中性分子或原子分解为自由电子、带正电或负电的离子）。电离出的自由电子、正负离子在电场作用下继续定向运动，碰撞中性气体分子，并使其电离。这样的过程经多次重复，使气体中的电流密度迅速增大，电导增加，甚至贯通电极，形成放电。详见本书第 2.1、2.2 节。

### 1.3.2 液体电介质的电导

液体电介质中的电导形成，一方面是液体本身的分子在碰撞和热过程中解离出离子，加上工程液体电介质（如变压器油）中不可避免存在的各种杂质分子也会解离出离子，从而构成离子电导；另一方面是液体中尺寸较小（ $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ mm}^3$ ）的永远处于悬浮状态的胶体颗粒吸附电荷后形成带电质点，在没有电场作用时，它们按照布朗方式毫无规则地彼此无关地运动着；在电场作用下定向运动，构成电泳电导。

中性的纯净的工程用变压器油的电导率通常在  $10^{-11} \sim 10^{-14} (1/\Omega \cdot \text{mm})$ ，极性液体的电导率大得多。例如：水的电导率为  $10^{-9} (1/\Omega \cdot \text{mm})$ 。液体电介质的电导率除了本身的物理、化学性能影响外，还主要受以下因素影响。

#### 1. 杂质影响

液体电介质，主要是变压器油，由于生产与净化过程不够完善；充油高压电气设备在制造中由于固体绝缘，如纸板、纱带等纤维脱落在变压器油中；运行中油受热、氧化产生有机酸物、蜡状物；外界潮气的入侵等等，都会在液体电介质中产生杂质。在电场下这些杂质解离为离子，使电导大大增加，其中以纤维素、水分的影响最大。

#### 2. 温度影响

液体电介质的温度升高，一方面使液体电介质的粘度下降，离子在电场作用下移动时所受阻力减小，移动容易，迁移率增大，电导增大；另一方面使液体电介质分子的热解度增加，电导增大。液体电介质的电导率 $\sigma$ 和温度 $t$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）的关系为：

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)} \quad (1.11)$$

式中， $\sigma_0$ 为液体电介质在 $t_0$ 时的电导率； $\alpha$ 为液体电介质的温度系数。变压器油： $\alpha \approx 0.02$ 。同理，液体电介质的电阻率 $\rho$ 可写为：

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (1.12)$$

式中， $\rho_0$ 为液体电介质在 $t_0$ 时的电阻率， $\rho_0 = 1/\sigma_0$ 。

#### 3. 电场强度影响

在弱电场中（ $E < 10^3 \text{ kV/m}$ ），离子运动速度为常数，与场强无关，电导基本上是常数，