

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GAODIANYA JISHU

# 高电压技术

(第三版)

周泽存 沈其工 编  
方 瑜 王大忠



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GAODIANYA JISHU

# 高电压技术

(第三版)

周泽存 沈其工 方 瑜 王大忠 编  
邱毓昌 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书主要包括电介质的极化、电导和损耗,气体放电的物理过程,气隙的电气强度,固体、液体和组合绝缘的电气强度,电气设备的绝缘试验,线路和绕组中的波过程,雷电及防雷装置,输电线路的防雷保护,发电厂和变电所的防雷保护,电力系统暂时过电压,电力系统操作过电压,电力系统绝缘配合,发电厂和变电所信息系统的过电压保护等。

本书可作为普通高等学校电气工程及其自动化专业、自动化专业及相关专业的本科教材,也可作为高职高专教材和工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/周泽存等编. —3版. —北京:中国电力出版社, 2007. 1

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-4998-5

I. 高... II. 周... III. 高电压—技术—高等学校—教材 IV. TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第142777号

中国电力出版社出版、发行  
(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷  
各地新华书店经售

\*

1988年6月第一版  
2007年2月第三版 2007年2月北京第十六次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 24印张 589千字  
印数 118251-123250册 定价 38.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

《高电压技术》一书于1988年6月由中国水利电力出版社出版发行,至2004年1月已重印10次,发行量达9万余册;2004年出版第二版,至今已发行近3万册。现应中国电力教育协会要求,重新予以修订出版,经与有关方面商量,修订后的本书以原书为基础由东南大学周泽存教授、沈其工教授、王大忠教授和武汉大学方瑜教授合编。

十余年来,高电压技术的各个方面皆有很多发展,加之原书部分内容上存在一些问题,在该书的重新修订过程中,编者都予以了修改和补充。例如,增加了第十四章发电厂和变电所信息系统的过电压保护,该章也可作为弱电系统过电压保护的基础。

本书仍分为“高电压绝缘及试验”和“电力系统过电压及保护”两篇,第一~六章由沈其工教授修订,第七~十章由周泽存教授和王大忠教授修订、第十一~十三章由方瑜教授编写、第十四章由王大忠教授编写。

本书可作为高等院校电气类专业的教科书或参考书,亦可作为其他专业选修课程的参考教材,并可作为有关专业工程技术人员的参考书。本书内容较为全面而丰富,各使用单位可根据自身情况予以选择。

全书由西安交通大学邱毓昌教授主审,在此深表谢意。

由于编者水平有限,不妥和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

## 目 录

## 前言

## 第一篇 高电压绝缘及试验

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一章 电介质的极化、电导和损耗 .....        | 1  |
| § 1-1 电介质的极化 .....            | 1  |
| § 1-2 电介质的介电常数 .....          | 3  |
| § 1-3 电介质的电导 .....            | 5  |
| § 1-4 电介质中的能量损耗 .....         | 8  |
| 习题 .....                      | 11 |
| 第二章 气体放电的物理过程 .....           | 12 |
| § 2-1 气体中带质点的产生和消失 .....      | 12 |
| § 2-2 气体放电机理 .....            | 17 |
| § 2-3 电晕放电 .....              | 27 |
| § 2-4 不均匀电场气隙的击穿 .....        | 32 |
| § 2-5 雷电放电 .....              | 38 |
| § 2-6 气隙的沿面放电 .....           | 42 |
| 习题 .....                      | 45 |
| 第三章 气隙的电气强度 .....             | 47 |
| § 3-1 气隙的击穿时间 .....           | 47 |
| § 3-2 气隙的伏秒特性和击穿电压的概率分布 ..... | 48 |
| § 3-3 大气条件对气隙击穿电压的影响 .....    | 52 |
| § 3-4 较均匀电场气隙的击穿电压 .....      | 55 |
| § 3-5 不均匀电场气隙的击穿电压 .....      | 55 |
| § 3-6 提高气隙击穿电压的方法 .....       | 62 |
| § 3-7 影响气隙沿面闪络电压的因素 .....     | 74 |
| § 3-8 提高气隙沿面闪络电压的方法 .....     | 81 |
| 习题 .....                      | 90 |
| 第四章 固体、液体和组合绝缘的电气强度 .....     | 91 |
| § 4-1 固体电介质击穿的机理 .....        | 91 |
| § 4-2 影响固体电介质击穿电压的因素 .....    | 92 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| § 4-3 提高固体电介质击穿电压的方法 .....           | 94  |
| § 4-4 固体电介质的老化 .....                 | 95  |
| § 4-5 液体电介质击穿的机理 .....               | 103 |
| § 4-6 影响液体电介质击穿电压的因素 .....           | 104 |
| § 4-7 提高液体电介质击穿电压的方法 .....           | 109 |
| § 4-8 液体电介质中的沿面放电 .....              | 111 |
| § 4-9 液体电介质的老化 .....                 | 113 |
| § 4-10 组合绝缘 .....                    | 116 |
| § 4-11 对电介质性能的全面要求 .....             | 126 |
| 习题 .....                             | 128 |
| <b>第五章 电气设备绝缘试验(一)</b> .....         | 129 |
| § 5-1 测定绝缘电阻 .....                   | 129 |
| § 5-2 测定泄漏电流 .....                   | 132 |
| § 5-3 测定介质损耗因数( $\tan\delta$ ) ..... | 133 |
| § 5-4 局部放电的测试 .....                  | 137 |
| § 5-5 绝缘油中溶解气体的色谱分析 .....            | 141 |
| 习题 .....                             | 145 |
| <b>第六章 电气设备绝缘试验(二)</b> .....         | 146 |
| § 6-1 工频高压试验 .....                   | 146 |
| § 6-2 直流高压试验 .....                   | 160 |
| § 6-3 冲击高压试验 .....                   | 171 |
| § 6-4 联合电压和合成电压试验 .....              | 199 |
| 习题 .....                             | 201 |

## 第二篇 电力系统过电压及保护

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第七章 线路和绕组中的波过程</b> .....   | 203 |
| § 7-1 无损耗单导线线路中的波过程 .....     | 203 |
| § 7-2 行波的折射与反射 .....          | 207 |
| § 7-3 行波通过串联电感和并联电容 .....     | 211 |
| § 7-4 行波的多次折、反射 .....         | 214 |
| § 7-5 无损耗平行多导线系统中的波过程 .....   | 216 |
| § 7-6 冲击电晕对线路波过程的影响 .....     | 219 |
| § 7-7 平行多导线系统的波动方程和相模变换 ..... | 220 |
| § 7-8 贝瑞隆法计算电力系统过电压 .....     | 225 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| § 7-9 单相变压器绕组中的波过程 .....       | 232 |
| § 7-10 三相变压器绕组中的波过程 .....      | 236 |
| § 7-11 冲击电压在绕组间的传递 .....       | 238 |
| § 7-12 旋转电机绕组中的波过程 .....       | 239 |
| 习题 .....                       | 240 |
| <b>第八章 雷电及防雷装置</b> .....       | 242 |
| § 8-1 雷电参数 .....               | 242 |
| § 8-2 避雷针、避雷线的保护范围 .....       | 246 |
| § 8-3 避雷器 .....                | 254 |
| § 8-4 接地装置 .....               | 261 |
| 习题 .....                       | 267 |
| <b>第九章 输电线路的防雷保护</b> .....     | 268 |
| § 9-1 输电线路的感应雷过电压 .....        | 268 |
| § 9-2 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平 .....   | 270 |
| § 9-3 输电线路的雷击跳闸率 .....         | 275 |
| § 9-4 输电线路的防雷措施 .....          | 277 |
| 习题 .....                       | 279 |
| <b>第十章 发电厂和变电所的防雷保护</b> .....  | 280 |
| § 10-1 发电厂、变电所的直击雷保护 .....     | 280 |
| § 10-2 变电所内阀型避雷器的保护作用 .....    | 281 |
| § 10-3 变电所的进线段保护 .....         | 287 |
| § 10-4 三绕组变压器和自耦变压器的防雷保护 ..... | 290 |
| § 10-5 变压器中性点保护 .....          | 291 |
| § 10-6 旋转电机的防雷保护 .....         | 292 |
| 习题 .....                       | 295 |
| <b>第十一章 电力系统暂时过电压</b> .....    | 297 |
| § 11-1 工频过电压 .....             | 297 |
| § 11-2 线性谐振过电压 .....           | 303 |
| § 11-3 非线性谐振过电压 .....          | 310 |
| § 11-4 参数谐振过电压 .....           | 321 |
| 习题 .....                       | 323 |
| <b>第十二章 电力系统操作过电压</b> .....    | 325 |
| § 12-1 间歇电弧接地过电压 .....         | 325 |
| § 12-2 空载变压器分闸过电压 .....        | 328 |
| § 12-3 空载线路分闸过电压 .....         | 330 |
| § 12-4 空载线路合闸过电压 .....         | 333 |
| § 12-5 解列过电压 .....             | 339 |
| 习题 .....                       | 339 |

**第十三章 电力系统绝缘配合** ..... 341

    § 13-1 绝缘配合的概念和原则 ..... 341

    § 13-2 绝缘配合的方法 ..... 343

    § 13-3 电气设备绝缘水平的确定 ..... 344

    § 13-4 架空线路绝缘水平的确定 ..... 346

    习题 ..... 350

**第十四章 发电厂和变电所信息系统的过电压保护**..... 351

    § 14-1 侵入信息系统的过电压和过电压保护器 ..... 351

    § 14-2 信息系统过电压的防护措施 ..... 357

    § 14-3 过电压保护器的选择和配置 ..... 363

    习题 ..... 369

**附录**..... 370

**参考文献**..... 375

# 第一篇 高电压绝缘及试验

## 第一章 电介质的极化、电导和损耗

### §1-1 电介质的极化

根据电介质的物质结构,电介质极化具有以下四种基本类型:电子位移极化;离子位移极化;转向极化;空间电荷极化。现分别加以说明。

#### 一、电子位移极化

一切电介质都是由分子构成的,而分子又是由原子组成的,每个原子都是由带正电荷的原子核和围绕着核的带负电荷的电子云构成。当不存在外电场时,电子云的中心与原子核重合,如图 1-1-1(a)所示,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,带负电的电子云中心向电场反方向位移,但原子核对电子云的引力又使两者倾向于重合,当这两种作用力达到平衡时,感应电矩也达稳定,这个过程称为电子位移极化。当外电场消失时,原子核对电子云的引力又使两者重合,感应电矩也随之消失。

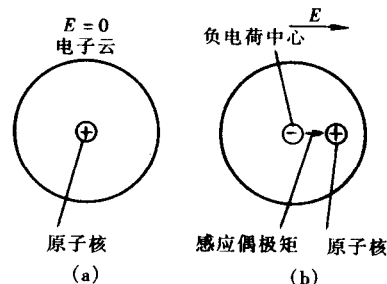


图 1-1-1 电子位移极化

(a) 极化前; (b) 极化后

电场中的所有电介质内都存在电子位移极化,它是弹性的,并不引起能量损耗,完成极化所需时间极短,约为  $10^{-14} \sim 10^{-15}$  s,该时间已与可见光的周期相近。这就是说,即使所加外电场的交变频率达到光频,电子位移极化也来得及完成。

单元粒子的电子位移极化电矩与温度无关,温度的变化,只是通过介质密度的变化(即介质单位体积中粒子数的变化)才使介质的电子位移极化率发生变化。

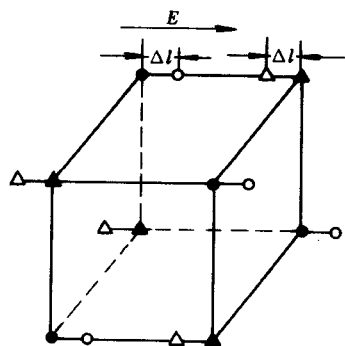


图 1-1-2 氯化钠晶体的离子位移极化

●、○—钠离子( $\text{Na}^+$ ) 在极化前后的位置;  
▲、△—氯离子( $\text{Cl}^-$ ) 在极化前后的位置

#### 二、离子位移极化

在由离子结合成的介质内,外电场的作用除了促使各个离子内部产生电子位移极化外,还产生正、负离子相对位移而形成的极化,称为离子位移极化。图 1-1-2 示出了氯化钠晶体的离子位移极化。

当没有外电场时,各正负离子对构成的偶极矩彼此相消,合成电矩为零;加上外电场后,所有的钠离子沿电场方向位移,而氯离子则沿电场反方向位移。结果,正负离子对构成的偶极矩不再完全相消,形成一定的合成电矩。

完成离子位移极化所需的时间约为  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  s。因此,只要交变电场的频率低于红外光频率,离子位移极化便可完成。

在大多数情况下, 离子位移极化有极微量的能量损耗。

电介质的离子位移极化率随温度的升高而略有增大。这是由于温度升高时, 电介质体积膨胀, 离子间的距离增大, 离子间相互作用的弹性力减弱的结果。

### 三、转向极化

在极性电介质中, 即使没有外加电场, 由于分子中正、负电荷的作用中心不重合, 就单个分子而言, 就已具有偶极矩, 称为固有偶极矩。但由于分子的不规则热运动, 使各分子偶极矩方向的排列无序, 因此, 宏观上对外并不呈现合成电矩。当有外电场时, 每个分子的固有偶极矩就有转向电场方向的趋势, 顺电场方向作定向排列。但是由于受分子热运动的干扰, 这种转向定向的排列, 只能达到某种程度, 而不能完全。随场强和温度的不同, 这种转向排列在不同的程度上达到平衡, 对外呈现出宏观电矩, 这就是极性分子的转向极化。外电场愈强, 极性分子的转向定向就愈充分, 转向极化就愈强。外电场消失后, 分子的不规则热运动重又使分子的排列回复到无序状态, 宏观的转向极化也就随之消失。

转向极化的建立需要较长的时间, 约为  $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{s}$ , 甚至更长。所以, 当电场交变频率提高时, 转向极化的建立就可能跟不上电场的变化, 从而使极化率减小。

转向极化伴有能量损耗。

### 四、空间电荷极化

上述的三种极化都是由带电质点的弹性位移或转向形成的, 而空间电荷极化的机理则与上述不同, 它是由带电质点(电子或正、负离子)的移动形成的。

在大多数绝缘结构中, 电介质往往呈层状结构(宏观或微观的), 电介质中也可能存在某些晶格缺陷。在电场的作用下, 带电质点在电介质中移动时, 可能被晶格缺陷捕获, 或在两层介质的界面上堆积, 造成电荷在介质空间中新的分布, 从而产生电矩。这种极化称为空间电荷极化。

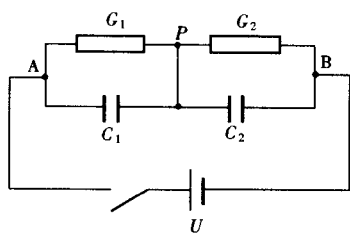


图 1-1-3 双层介质极化模型

设  $C_1 = 1$ ,  $C_2 = 2$ ,  $G_1 = 2$ ,  $G_2 = 1$ ,  $U = 3$ 。当  $U$  加在 A、B 两端极的初瞬, 电容上的电荷和电位分布如图 1-1-4 (a) 所示。整个介质的等值电容为  $C_{eq} = \frac{Q}{U} =$

$\frac{2}{3}$ 。到达稳态时, 电容上的电荷和电位分布如图 1-1-4 (b) 所

最明显的空间电荷极化是夹层极化。在常用的电气设备如电缆、电容器、旋转电机、变压器、电抗器等绝缘体, 都是由多层介质组成的。现以最简单的双层介质模型来分析其中的物理过程。

如图 1-1-3 所示的双层介质极化模型, 各层介质的电容分别为  $C_1$  和  $C_2$ ; 各层介质的电导分别为  $G_1$  和  $G_2$ ; 直流电源电压为  $U$ 。为了说明的简便, 全部参数均只标数值, 略去单位。

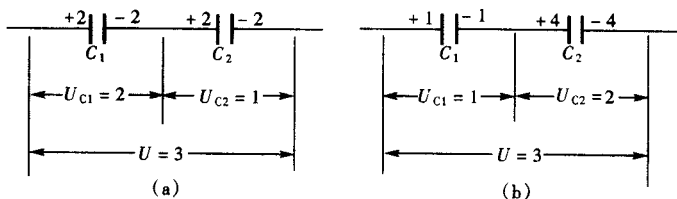


图 1-1-4 双层介质中电荷和电位分布

(a) 初瞬时; (b) 稳态时

示。整个介质的等值电容为  $C''_{eq} = \frac{Q'}{U} = \frac{4}{3}$ 。  $C_1$  与  $C_2$  分界面上堆积的电荷量为  $+4-1=+3$ 。

由此可见，夹层的存在将会造成电荷在夹层界面上的堆积和等值电容的增大，这就是夹层极化效应。

应该注意，夹层界面上电荷的堆积是通过介质电导  $G$  完成的。高压绝缘介质的电导通常都是很小的，所以，这种极化过程是缓慢的，它的完成时间从几十分之一秒到几分钟，甚至更长。因此，这种性质的极化只有在低频时才有意义。

显然，这种极化伴随着能量损耗。

## § 1-2 电介质的介电常数

### 一、介电常数的物理意义

从物理学课程中得知，在真空中，有关系式

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (1-2-1)$$

式中： $\mathbf{E}$  为场强矢量 (V/m)； $\mathbf{D}$  为电位移矢量，即电通量密度矢量 (C/m<sup>2</sup>)。

$\mathbf{D}$  与  $\mathbf{E}$  是同向的，比例常数  $\epsilon_0$  为真空的介电常数，其值为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 8.9880 \times 10^9} \approx \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$$

在介质中，则有关系式

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \quad (1-2-2)$$

$\mathbf{D}$  与  $\mathbf{E}$  仍是同向的，比例常数  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数，它是一个没有量纲和单位的纯数 ( $\epsilon_r > 1$ )。

这是因为：在介质中，由于存在极化，极化电矩产生反向场强，若  $\mathbf{D}$  值不变，则介质中的合成场强  $\mathbf{E}$  值就比真空中小了，反过来说，若欲保持介质中的合成场强  $\mathbf{E}$  值不变，则相应的  $\mathbf{D}$  值（与真空中相比）必须增到原值的  $\epsilon_r$  倍。

通常可将  $\epsilon_0 \epsilon_r$  合写为  $\epsilon$ ，即  $\epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon$ ，称为介质的介电常数，其量纲和单位与  $\epsilon_0$  相同。这就是说，介质的介电常数为真空介电常数的  $\epsilon_r$  倍。

### 二、气体介质的相对介电常数

由于气体物质分子间的距离相对很大，即气体的密度很小，气体的极化率也就很小，故一切气体的相对介电常数都接近于 1。表 1-2-1 列出了某些气体的相对介电常数。

任何气体的相对介电常数均随温度的升高而减小，随压力的增大而增大，但其影响的程度都很小。

表 1-2-1 某些气体的相对介电常数  $\epsilon_r$  (20℃, 101.33kPa)

| 气体名称         | He       | H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 空气      |
|--------------|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|---------|
| $\epsilon_r$ | 1.000072 | 1.00027        | 1.00055        | 1.00060        | 1.00095         | 1.00096         | 1.00138                       | 1.00059 |

### 三、液体介质的相对介电常数

#### 1. 中性液体介质

中性液体介质的相对介电常数不大，其值在 1.8~2.8 范围内。其相对介电常数与温度

的关系是与介质分子密度与温度的关系接近一致。石油、苯、四氯化碳、硅油等均为中性或弱极性液体介质。

## 2. 极性液体介质

这类介质通常都具有较大的介电常数，如果作为电容器的浸渍剂，可使电容器的比电容增大。这类介质的缺点是在交变电场中的介质损较大，故高电压绝缘中很少应用，只有蓖麻油和几种合成液体介质在某些场合时有应用。

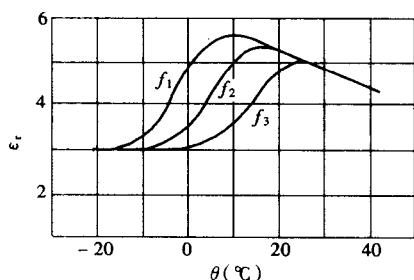


图 1-2-1 氯化联苯的相对介电常数与温度的关系 (频率  $f_3 > f_2 > f_1$ )

下面讨论影响极性液体介质介电常数的主要因素。

(1) 介电常数与温度的关系。举例如图 1-2-1 所示。低温时，分子间的黏附力强，转向较难，转向极化对介电常数的贡献较小；随着温度的升高，分子间的黏附力减弱，转向极化对介电常数的贡献就较大，介电常数随之增大；另一方面，温度升高时，分子的热运动加强，对极性分子定向排列的干扰也随之增强，阻碍转向极化的完成，所以当温度进一步升高时，介电常数反而趋向减小。

(2) 介电常数与电场频率的关系。电场频率对极性液体介电常数的影响很大，一般倾向性关系如图 1-2-2 所示。当频率相当低时，偶极分子来得及跟随电场交变转向，介电常数较大，并且接近于直流电压下测得的介电常数值  $\epsilon_d$ 。当频率超过某一临界值  $f_0$  时，极性分子的转向已经跟不上电场的变化，介电常数就开始减小，随着频率的增高，介电常数最终接近于仅由电子位移极化所引起的介电常数值  $\epsilon_\infty$ 。表 1-2-2 列出了某些极性液体介质在 50Hz 电压下，20℃ 时，的相对介电常数  $\epsilon_r$  值。

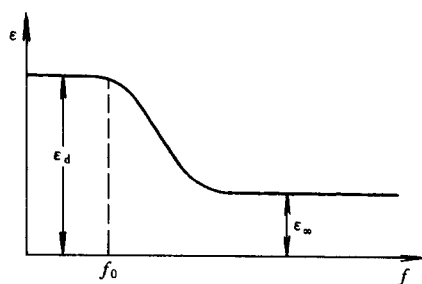


图 1-2-2 极性液体介质的介电常数与频率的关系

表 1-2-2

某些极性液体介质的  $\epsilon_r$  (50Hz, 20℃)

| 液体名称         | 蓖麻油 | 乙醇 | 水  |
|--------------|-----|----|----|
| $\epsilon_r$ | 4.2 | 26 | 81 |

## 四、固体介质的相对介电常数

### 1. 中性或弱极性固体介质

由中性分子构成的固体介质，只具有电子式极化和离子式极化，其介电常数较小。中性固体介质的介电常数与温度之间的关系也与介质密度与温度的关系很接近。

石蜡、硫磺、聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯、聚苯乙烯等都是中性固体介质；云母、石棉等是晶体型离子结构的中性固体介质；无机玻璃则是无定型离子结构的中性固体介质。

### 2. 极性固体介质

由于分子具有极性，所以这类介质的相对介电常数都较大，一般为 3~6，还有更大的。

这类介质的相对介电常数与温度和频率的关系类似极性液体所呈现的规律。图 1-2-3 表示硫化天然橡胶的相对介电常数与温度和电场频率的关系。

树脂、纤维、橡胶、虫胶、有机玻璃、聚氯乙烯、涤纶等均属于极性固体介质。

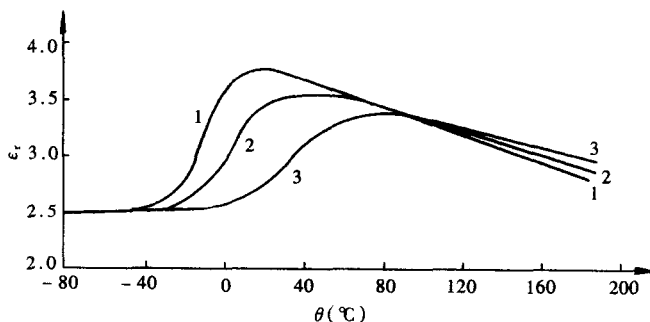


图 1-2-3 硫化天然橡胶的相对介电常数与温度、电场频率的关系  
1—60Hz；2—3kHz；3—300kHz

### §1-3 电介质的电导

电介质的电导与金属的电导有本质上的区别。

气体介质的电导是由电离出来的自由电子、正离子和负离子在电场作用下移动而造成的。液体和固体介质的电导是由于介质的基本物质（及其中所含杂质）分子发生化学分解或热离解形成的带电质点（电子、正离子、负离子）沿电场方向移动而造成的。它是离子式电导，即电解式电导。

#### 一、气体介质的电导

当气体中无电场存在时，外界因素（宇宙线、地面上的放射性辐射、太阳光中的紫外线等）使每  $1\text{cm}^3$  气体介质中每 1s 大约产生一对离子（此处所称离子是广义的，包括电子在内）。在离子不断产生的同时，正负离子又在不断复合，最后达到平衡状态，离子浓度约为  $500\sim 1000$  对/ $\text{cm}^3$ 。当存在电场时，这些离子在电场力的作用下，克服与气体介质分子碰撞的阻力而移动，在电场方向得到速度  $v$ ，它与电场强度  $E$  的比值  $b = v/E$ ，称为离子的迁移率。当电场强度很小时， $b$  接近为常数，即电流密度与电场强度近乎成正比，如图 1-3-1 中 I 区所示。当电场强度进一步增大，外界因素所造成的离子接近全部趋向电极时，电流密度即趋饱和，但其值仍极微小，如图 1-3-1 中 II 区所示。在该两区内气体的电导是极小的。对标准状态下的空气来说，图中  $E_1$  和  $E_2$  值分别约为  $5 \times 10^{-3} \text{V/cm}$  和  $10^4 \text{V/cm}$ 。当场强超过  $E_2$  值时，气体介质中将发生撞击电离，从而使电流密度迅速增大，如图 1-3-1 中 III 区所示。当场强达到  $E_{cr}$  时，气隙就被击穿。这个过程将在下一章中详细讨论。

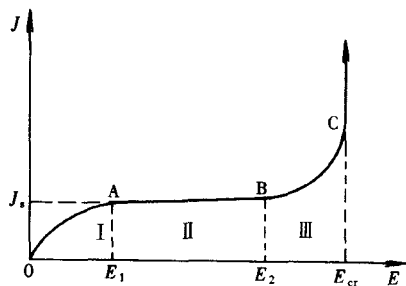


图 1-3-1 气体介质中的  
电流密度与场强的关系

二、液体介质的电导

中性液体介质本身分子的离解是极微弱的，其电导主要由离解性的杂质和悬浮于液体介质中的荷电粒子所引起，所以，其电导对杂质是非常敏感的。中性液体介质处理得十分纯净后，其电导率可低至  $10^{-18}$  S/cm。

极性液体介质的电导不仅由杂质所引起，而且与本身分子的离解度有关。如其他条件相同，则极性液体介质的电导大于中性液体介质。极性液体介质的介电常数愈大，则其电导也愈大。强极性液体介质（如水、酒精等），即使是高度净化了的，其电导率还很大，以致不能把它们看作电介质，而是离子式导电液了。部分液体介质的电导率和相对介电常数如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 部分液体介质的电导率和相对介电常数

| 液体种类 | 液体名称 | 温度 $\theta$ (°C) | 相对介电常数 $\epsilon_r$ | 电导率 $\gamma$ (S/m)    | 纯净程度  |
|------|------|------------------|---------------------|-----------------------|-------|
| 中 性  | 变压器油 | 80               | 2.2                 | $0.5 \times 10^{-10}$ | 未净化的  |
|      | 变压器油 | 80               | 2.1                 | $2 \times 10^{-13}$   | 净化的   |
|      | 变压器油 | 80               | 2.1                 | $0.5 \times 10^{-13}$ | 两次净化的 |
|      | 变压器油 | 80               | 2.1                 | $10^{-16}$            | 高度净化的 |
| 极 性  | 蓖麻油  | 20               | 4.5                 | $10^{-10}$            | 工程上应用 |
| 强极性  | 水    | 20               | 81                  | $10^{-5}$             | 高度净化的 |
|      | 乙 醇  | 20               | 26                  | $10^{-6}$             | 净化的   |

下面讨论影响液体介质电导的因素。

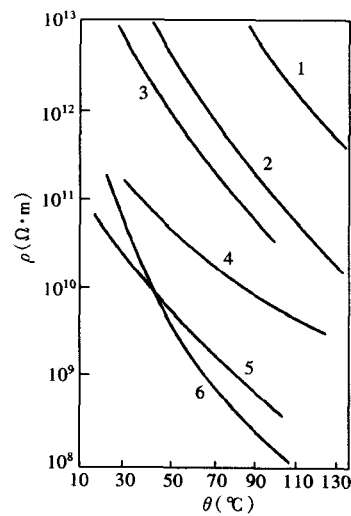


图 1-3-2 某些液体介质的电阻率与温度的关系

1—变压器油（很洁净）；2—变压器油（洁净）；3—凡士林油；4—变压器油（工业用）；5—蓖麻油；6—五氟联苯

1. 温度

主要有两方面的影响：一方面，温度升高时，液体介质的黏度降低，离子受电场力作用而移动时所受的阻力减小，离子的迁移率增大，使电导增大；另一方面，温度升高时，液体介质分子的热离解度增大，也使电导增大。

理论和实验均证明液体介质的电导率与温度的关系可以近似地以下式表示

$$\gamma = A \exp(-B/T) \tag{1-3-1}$$

式中：A、B 为常数；T 为绝对温度； $\gamma$  为电导率。

当温度变化的范围不大时，液体介质的电导与温度的关系也可以写成

$$\gamma = \gamma_0 \exp[a(\theta - \theta_0)] \tag{1-3-2}$$

式中：a 为常数； $\theta$  为液体介质的温度 (°C)； $\gamma_0$  为  $\theta = \theta_0$  时的电导率。

图 1-3-2 表示某些液体介质的电阻率与温度的关系。

2. 电场强度

在极纯净的液体介质中，电导与电场强度的关系与气体介质中相似（类似图 1-3-1）。但是，一般工程用纯净

液体介质的电导与电场强度的关系却更接近于图 1-3-3。饱和电流这一段通常是观察不到的；电场强度小于某定值时，电导接近为一常数；电场强度超过某定值 ( $E_{cr}$ ) 时，电场将使离解出来的离子数量迅速增加，电导也就迅速增加，电流密度随场强呈指数律增长。

### 三、固体介质的电导

具有中性分子的固体介质的电导主要是由杂质离子引起的，只有当温度较高时，中性分子本身才可能发生分解，产生自由离子，形成电导。此外，外界因素（例如高能射线）的作用也可能使中性分子发生离解。

离子式结构的固体介质的电导主要是由离子在热运动影响下脱离晶格而移动产生的。例如在 NaCl 晶体中，温度升高时，离子在其晶格中平衡位置附近的振动就随之加强，当温度达到一定值时，这种振动加强到能使有些离子脱离原所在晶格，而落入新的缺乏该种离子的晶格角上去，这就造成了电荷的移动。当电场不存在时，这种电荷（离子）的移动是无序的，因此，对外不形成电流；当存在电场时，这些电荷就会在电场方向获得某一合成的速度，形成电流。当然，杂质在离子式结构的固体介质中也是造成电导的原因之一，由于杂质与基本物质的结合是不紧密的，故当在某一温度，介质结构中的基本离子尚很少脱离原位时，杂质离子则可能已有较多脱离原位而迁移了。

下面讨论影响固体介质电导的一些因素。

#### 1. 温度

温度对固体介质电导率的影响与对液体介质电导率的影响相似，因此式 (1-3-1) 和式 (1-3-2) 也同样适用于固体介质。

#### 2. 电场强度

与液体介质的情况相似，在电场强度小于某定值时，固体介质的电导率与电场强度几乎无关；当电场强度大于某定值时，固体介质的电导率与电场强度的关系可近似地以下式表示

$$\gamma = \gamma_0 \exp[b(E - E_0)] \quad (1-3-3)$$

式中： $\gamma_0$  为电导率与电场强度尚无关范围内的电导率； $E_0$  为电导率与电场强度尚无关时的最大电场强度； $b$  为常数，由材料特性所决定。

#### 3. 杂质

杂质对电导率的影响是很大的。某些固体介质（如 A 级绝缘物）很容易吸收潮气（水分），这就相当于在固体介质中加入了强极性的杂质。

固体介质除了体积电导以外，还存在表面电导。表面电导是由于介质表面吸附一些水分、尘埃或导电性的化学沉淀物而形成的，其中水分起着特别重要的作用。因此，在相同的工作条件下，亲水性介质（水分子与固体介质分子的附着力很强，如玻璃、陶瓷等）的表面电导要比憎水性介质（水分子与固体介质分子的附着力很弱，水分不易在介质表面形成薄膜，而只能凝聚成小水滴，如石蜡、聚四氟乙烯、硅有机物等）的表面电导大得多。一般中性介质的表面电导最小，极性介质次之，离子性介质最大。采取使介质表面洗净、光洁、烘干或表面涂以石蜡、硅有机物、绝缘漆等措施，可以降低介质表面电导。

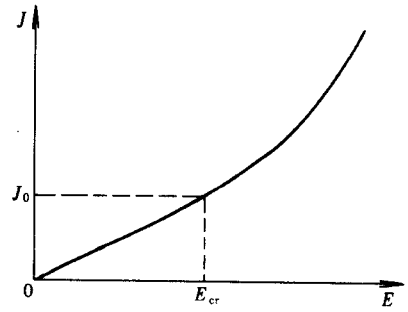


图 1-3-3 工程用纯净变压器油中  
电流密度与场强的关系

## § 1-4 电介质中的能量损耗

### 一、介质损耗的基本概念

前已指出,在电场的作用下,电介质的极化过程需要经过一定时间才能全部完成。对恒稳电场来说,不存在什么困难。在正弦交变电场中,如果电场的交变速度远低于极化建立的速度,则介质的极化强度  $\dot{P}$  与交变电场  $\dot{E}$  几乎同相位,此时,介电常数  $\epsilon^* = \frac{\dot{D}}{\dot{E}} = \frac{\epsilon_0 \dot{E} + \dot{P}}{\dot{E}} = \epsilon_0 + \frac{\dot{P}}{\dot{E}}$  可视为一实数,其值接近于静态介电常数。如果电场的交变速度可以与极化建立的速度相比拟,极化就跟不上电场的变化,电通量密度  $\dot{D}$  就滞后于电场强度  $\dot{E}$  一个相位角  $\theta$ 。此时,介电常数  $\epsilon^* = \dot{D}/\dot{E}$  就将是一个复数,即  $\epsilon^* = \epsilon \exp(-j\theta) = \epsilon' - j\epsilon''$ ,于是介质中的电流密度(不计漏导时)  $\dot{J}_0 = \epsilon^* (\partial \dot{E}/\partial t) = (j\omega\epsilon' + \omega\epsilon'') \dot{E} = \dot{J}' + \dot{J}''$ 。由此可见,由复介电常数的实部  $\epsilon'$  所决定的电流密度  $\dot{J}'$  比场强  $\dot{E}$  超前  $90^\circ$ ,  $\dot{J}'$  是纯电容电流密度,它包括真空的介电常数  $\epsilon_0$  所贡献的电容电流和极化形成的介电常数中的实部所贡献的电容电流。由复介电常数中的虚部  $\epsilon''$  所决定的电流密度  $\dot{J}''$  则与场强  $\dot{E}$  同相位,它是有功电流密度,形成有功功率损耗(介质极化过程中所形成的)。实际上,一般电介质总还存在漏导,在电场作用下,形成与交变电场同相位的漏导电流密度  $\dot{J}_{lk}$ ,它是纯有功损耗电流密度。

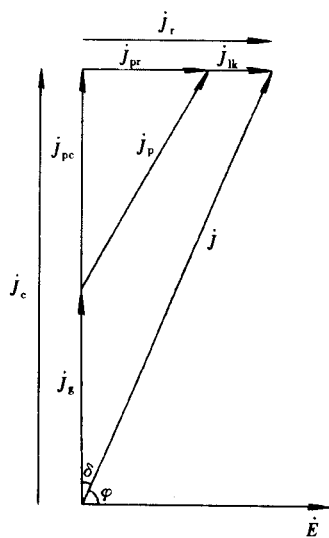


图 1-4-1 电介质中的  
电流密度和场强相量

综上所述,可以画出电介质在正弦交变电场作用下的电流密度和场强相量图,如图1-4-1所示。图中,  $\dot{J}_g$  为真空和无损极化所引起的电流密度,为纯电容性的;  $\dot{J}_{lk}$  为漏导所引起的电流密度,为纯电阻性的;  $\dot{J}_p$  为有损极化所引起的电流密度,它由无功部分  $\dot{J}_{pc}$  和有功部分  $\dot{J}_{pr}$  组成。总电流密度相量  $\dot{J}$  与总电容电流密度相量  $\dot{J}_c$  之间的夹角为  $\delta$ ,称为电介质的损耗角。通常用此损耗角的正切  $\tan \delta$  来表征介质中比损耗的大小。 $\tan \delta = J_r/J_c$  为介质中总的有功电流密度与总的无功电流密度之比。

由图1-4-1可以很容易地画出电介质的等效电路如图1-4-2所示。图中,  $R_{lk}$  为泄漏电阻;  $I_{lk}$  为漏导电流;  $C_g$  为介质真空和无损耗极化所形成的电容;  $I_g$  为流过  $C_g$  的电流;  $C_p$  为有损耗极化所形成的电容;  $R_p$  为有损耗极化所形成的等效电阻;  $I_p$  为流过  $R_p$ - $C_p$  支路的电流,可分为有功分量  $I_{pr}$  及无功分量  $I_{pc}$ 。

图1-4-2是从实际物理概念得出的等效电路图,在具有稳定角频率为  $\omega$  的正弦交变电场作用下,图1-4-2还可进一步简化为图1-4-3。图中

$$G_{eq} = \frac{1}{R_{lk}} + \frac{\omega^2 C_p^2 R_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \quad (1-4-1)$$

$$C_{eq} = C_g + \frac{C_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \quad (1-4-2)$$

在工程中实际测量得的介质电容值正是图 1-4-3 中  $C_{eq}$  的值, 由此推算得的  $\epsilon$  值也就相当于贡献图 1-4-1 中  $J_c$  所对应的  $\epsilon$  值, 所以, 单位体积介质中的损耗功率可用下式表达

$$p = EJ_r = EJ_c \operatorname{tg} \delta = E^2 \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta = E^2 \omega \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta \quad (1-4-3)$$

对于含有均匀介质的平板电容器, 总损耗功率为

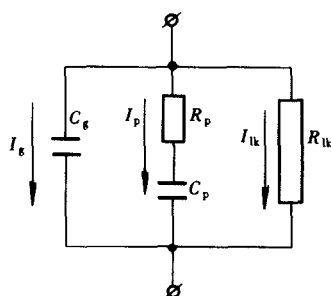


图 1-4-2 电介质的等效电路

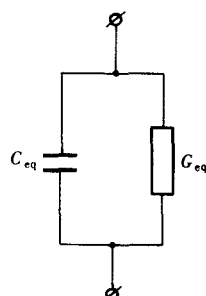


图 1-4-3 电介质的  
计算用等效电路

$$P = pV = E^2 \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta V = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (1-4-4)$$

式中:  $V$  为介质体积;  $U$  为所加电压。

## 二、气体介质中的损耗

我们已知, 气体介质的极化率是很小的, 当场强小于气体分子电离所需的值时, 气体介质的电导也是很小的, 所以, 此时气体介质中的损耗也将是很小的, 工程中可以略去不计。但当场强超过气体分子电离所需的值时, 气体介质将产生电离, 介质损耗大增, 且随着电压的升高, 损耗增长很快。这个过程将在下一章中详细讨论。

## 三、液体和固体介质中的损耗

中性液体或中性固体介质中的极化主要是电子位移极化和离子位移极化, 它们是无损的或几乎是无损的。于是, 这类介质中的损耗便主要由漏导决定, 介质损耗与温度、场强等因素的关系也就决定于电导与这些因素之间的关系, 如图 1-4-4 和图 1-4-5 所示。

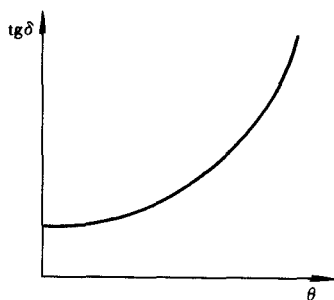


图 1-4-4 中性液体（或固体）  
电介质的  $\operatorname{tg} \delta$  与温度的关系示意

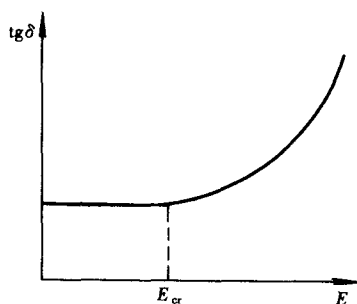


图 1-4-5 中性液体（或固体）  
电介质的  $\operatorname{tg} \delta$  与场强的关系示意