

高电压绝缘基础

GAO DIANYA JUE YUAN JI CHU

刘炳尧 编



湖南大学出版社

内 容 提 要

本书深入浅出地介绍了电介质在高电压下的电气物理特性。能使读者清楚地了解电介质的极化、电导、损耗和击穿的基本理论和概念,以及影响这些特性的因素。尤其是对于局部放电(及其表征参数)、电晕问题以及油纸绝缘和电机绝缘的老化问题作了较详尽的阐述。有助于读者更好地进行绝缘的设计、运行、试验和检修。理论联系实际、习题内容丰富、便于读者自学,是本书的一大特色。

本书可作为大专院校有关专业的选修课教材或补充教材;也可作为电力部门绝缘培训班的教材,还可供高压电气设备的制造、运行部门有关工程技术人员参考。

高 电 压 绝 缘 基 础

刘炳尧 编

☆

湖南大学出版社出版

(长沙岳麓山)

湖南省新华书店发行

长沙市华中印刷厂印刷

☆

787×1092毫米 32开本 10.75印张 234千字

1986年7月第一版

1986年7月第一次印刷

印数 0001—8500

统一书号: 15412·8

定价: 2.30元

前 言

编者1982年写的《电介质的理论基础》讲义，曾四次作为湖南大学电力专业《高电压技术》课补充教材，并被兄弟院校采用，曾三次作为湖南省电力部门绝缘培训班教材。根据这几年教学和现场试用的情况及经验，为满足今后需要，在原讲义基础上编写了这本《高电压绝缘基础》。

本书由原来五章增加为现在的九章，有较大的修改和补充，内容更加充实，进一步加强了有关绝缘的基本理论，基本概念以及理论与实际的联系。头三章介绍电介质的极化、电导和损耗；第四、五、六章叙述气体的放电理论、介电强度以及气体中的沿面放电；第七、八、九章谈液体、固体介质的击穿以及液、固体绝缘老化的基本知识。全书给出了182个概念性、实践性较强的思考题或算题，在书末附有习题答案。

本书增添的主要内容包括：输电线电晕及其效应，SF₆断路器的绝缘特点，热击穿电压及其影响因素，局部放电及其表征参数，电机的槽部电晕和槽外电晕，绝缘油、油纸绝缘以及电机绝缘的老化等等。其目的是力图使读者了解更多有关绝缘理论的基础知识，使本书能适应教学和生产发展的需要。

本书可作大专院校有关专业讲授绝缘基本理论的选修课教材或补充教材，可供电气工程技术人员在执行《电气设备

预防性试验规程》时作为学习绝缘理论基础知识的参考书籍，以及电力部门举办绝缘培训班的教材。

在编写过程中，得到了湖南省电力中心试验研究所的大力支持和关怀，高压室主任工程师李自强及其他同志还提出了宝贵的修改意见和建议，并提供了重要资料。编者在此深表感谢。

由于编者各方面水平有限，书中不当之处在所难免，期待读者提出更正和补充意见。

目 录

绪 论

第一章 电介质的极化

1—1	电介质的极性	3
1—2	极化和相对介电常数	9
1—3	极化种类	12
1—4	绝缘材料的介电常数	17
习 题		18

第二章 电介质的电导

2—1	概述	20
2—2	气体电介质的电导	26
2—3	液体电介质的电导	27
2—4	固体电介质的电导	29
2—5	直流电压下不均匀介质的吸收现象	33
习 题		38

第三章 电介质的损耗

3—1	概述	42
3—2	交流电场下的损耗	43
3—3	等值电路及计算公式	47

3—4	影响电介质损耗的因素	55
3—5	液体电介质的损耗	59
3—6	固体电介质的损耗	60
习 题		67

第四章 气体放电理论

4—1	概 述	71
4—2	原子的激励和电离	74
4—3	带电粒子的产生	79
4—4	气体击穿的物理过程 ——电子崩理论和汤逊判据	95
4—5	气体击穿的物理过程——流注理论	113
4—6	极不均匀电场空气间隙的放电特性	125
4—7	长间隙的放电过程	138
4—8	雷电放电	142
习 题		147

第五章 气体的介电强度

5—1	概 述	152
5—2	均匀电场中的工频、直流击穿电压	153
5—3	稍不均匀电场的工频、直流击穿电压	154
5—4	不均匀电场的工频、直流击穿电压	155
5—5	雷电冲击电压下空气间隙的击穿特性	160
5—6	雷电冲击波下间隙的击穿电压	166
5—7	操作波下长间隙50%击穿电压	169
5—8	影响气体击穿电压的因素	176

5—9	提高气体间隙击穿电压的措施	184
5—10	SF ₆ 的性质、绝缘特点和用途	192
习 题		202

第六章 气体中的沿面放电

6—1	概 述	207
6—2	均匀电场中的沿面放电	209
6—3	极不均匀电场中的沿面放电	210
6—4	悬式绝缘子串的闪络特性	216
6—5	提高沿面闪络电压的措施	222
6—6	绝缘子表面脏污时的沿面放电	224
6—7	SF ₆ 中沿面放电的影响因素	231
习 题		236

第七章 液体电介质的击穿

7—1	概述	238
7—2	液体电介质的击穿理论	240
7—3	变压器油的击穿过程及其特点	241
7—4	影响变压器油击穿电压的主要因素	245
7—5	减少杂质影响变压器油耐电强度的措施	250
7—6	油中沿面放电	254
习 题		256

第八章 固体电介质的击穿

8—1	概述	259
8—2	击穿理论	263

8—3	热击穿电压的近似公式	265
8—4	局部放电	274
8—5	影响击穿电压的主要因素	293
8—6	高压电机绝缘的局部放电和电晕	298
习 题	305

第九章 绝缘的老化

9—1	概述	309
9—2	绝缘油的老化	311
9—3	固体电介质的热老化	318
9—4	固体电介质的电老化	321
习 题	331
	习题答案	332
	参考文献	336

绪 论

一般把不导电的物质或导电率很小的物质称为绝缘物质或电介质。

电介质一般分气体、液体和固体三类，三者都广泛应用于电力系统。例如：架空输电线路相间绝缘以及导线对塔身的绝缘都以大气(空气)作为电介质，导线对横担的绝缘以及电气设备的外绝缘则采用固、气体电介质的组合绝缘；然而电气设备的内绝缘，或利用固体电介质(如发电机定子绕组和转子绕组的绝缘)，或利用液体电介质(如油断路器触头间的绝缘)，或为两者的组合(如电缆的油纸绝缘，变压器的油一屏障绝缘)，这是因为固体和液体电介质的介电强度比空气的介电强度大很多，利于缩小整体结构尺寸。内绝缘还广泛使用SF₆等高击穿强度的电负性气体。

在电场作用下，电介质呈现出极化、电导、损耗和介电强度等电气性能。由于气体分子之间的距离较大，在工作电压下气体的极化、电导和损耗都很微弱，完全无需考虑。故本书头三章只介绍固体和液体电介质的极化、电导和损耗，后续五章分别讨论气体的放电理论、介电强度和沿面放电，以及液体、固体电介质的击穿。学习以上各章内容后，读者可以清楚地了解电介质的四个重要参数——相对介电常数、电导率、介质损耗角正切以及电气强度，对于影响这些参数大小的一些因素也会有所认识。

一个电力工作者或电气设备制造者，应力图使自己比较熟悉地掌握这些内容，因它关系到电气设备的安全运行，同时，对电气设备的绝缘试验和绝缘事故分析来说，它也是基础知识。

电气设备绝缘在运行过程中，由于电、热、化学及机械力等因素的作用，固体、液体绝缘会逐渐老化，使介电性能、机械性能下降。本书最后一章简要讨论了固体和液体绝缘的热老化、电老化以及降低老化速度值得注意的问题。

第一章 电介质的极化

电介质的极化及其它电气性能与其分子结构密切相关，而分子极性大小关系到电介质极化的强弱。故本章从分析物质的微观结构开始，先讨论电介质的极性，这即使是粗略的，但有利于读者理解电介质在电场作用下表现的特性。在这个基础上进一步讨论本章的中心内容——电介质的极化和相对介电常数就比较容易了。

1—1 电介质的极性

1. 1. 1 物质及其组成

物质是构成物体的材料，现在已知的超过一百万种，新的物质还在不断发现。每种物质都有自己的特征，这称为物质的性质。物质没有变化前就可认识的那些性质，例如状态、颜色、气味、比重、沸点、熔点等，称为物质的物理性质；物质的某些性质在发生化学变化时（即在一定条件下变成新的物质时）才表现出来，这类性质称为物质的化学性质。

自然界一切物质，无时无刻不在变化着，对那些非常缓慢的变化，只是人们不易察觉罢了。当物质只是外形或状态发生变化时称物理变化，物质变化生成新的物质时称化学变

化（或化学反应）。

一切物质都由一种极其微小的粒子构成，这种微粒叫分子。分子是能够独立存在并保持原物质性质（化学性质）的最小微粒。物质发物理变化的过程中，构成物质的分子是不变的；只有发生化学变化才会产生新的分子。物质的分子处于永恒的运动状态中。

在物质内部，分子之间是有间隔的，一切气体都具有压缩性，以及许多液体、固体物质具有的“热胀冷缩”性都是很好的例证。并且，一般物质在不同条件下的三态（气态、液态和固态）变化，与分子间间隔大小密切相关。

1. 1. 2 分子的组成

分子由更小的微粒构成，这个微粒叫做原子。同一种分子都由一定种类和一定数目的原子组成。原子一般不保持原物质的性质，它与分子的性质不同。

原子由原子核和核外电子组成，这些电子绕核迅速运转着。原子核外电子总数正好和核所带正电荷数（即质子总数）相等，因而整个原子不显电性。

原子中电子可以具有不同能量。能量较低者只能在离核较近的地方运转，能量较大者能在离核较远的轨道上运转。故核外电子是分层排布的。

惰性气体氦、氖、氩、氙、氡等的原子，其最外层电子有8个，惰性气体氦原子的第一电子层（即氦原子的最外电子层）有二个电子，它们都是饱和电子层，是一种特别稳定的结构。所以这些原子一般都不参加化学反应，都是单原子分子。

但是，一般元素原子的最外层电子是不饱和的，都有力图成为稳定结构的倾向，因此原子相互结合成分子。

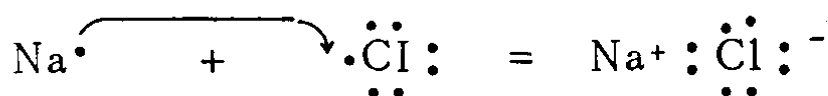
分子中原子之间存在着各种不同的结合关系。在化学上常把相邻原子间的结合叫做化学键，下面的离子键和共价键都是化学键。

1. 离子键

当原子最外层电子数接近饱和层电子数时，该原子和其它原子结合易吸引其它原子的电子，使本身达到稳定结构，于是该原子带负电，并称电负性强的原子；当原子最外层电子数与饱和层电子数相差较大时，与其它原子结合易失去最外层电子而成为稳定结构，于是该原子带正电，并称电负性弱的原子。

大多数金属元素的原子，最外电子层只有1~3个电子，远没有达到饱和状态，且最外层电子与原子核联系较弱，故属电负性小的原子；非金属元素的原子，最外电子层常是4~7个电子，故为电负性强的原子。

因此，金属原子和非金属原子相遇时，前者把最外层电子供给后者，使两者成为最稳定结构。金属原子变成正离子，非金属原子变成负离子。这两个带异性电荷的离子通过静电引力相互吸引，使两者紧密地结合成分子，其间的化学键叫离子键（或电价键）。例如氯化钠分子中的化学键就属离子键，该分子的组合可表示为



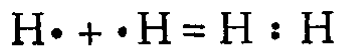
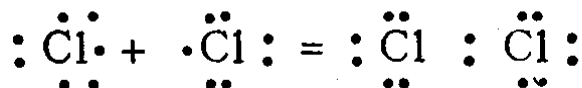
式中黑点表示最外层电子数，箭头表示电子的转移，“+”、“-”号表示离子符号及所带电荷数，Na⁺是带有

1个正电荷的钠离子， Cl^- 是带有1个负电荷的氯离子。

由离子键结合的分子所组成之化合物，称为离子化合物。在绝缘材料中，大多数无机电介质都是离子化合物，例如玻璃、陶瓷和云母，它们都是由硅、硼及多种金属的氧化物（如： SiO_2 、 B_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 BaO 、 PbO 、 K_2O 、 Na_2O ……等）所组成。故其耐热性能高，无显著老化现象，高温下不燃烧、不分解，机械性能表现出硬且脆。

2. 共价键

当两个性质相同或相近的非金属原子结合成分子时，由于它们的原子核对电子的吸引力相等或近似相等，最外层电子不能从一个原子转移到另一个原子，只能通过共用电子形式使双方稳定。因此，通过共用电子对使两个原子结合成分子，其间的共用电子对结合的化学键称为共价键（或原子键）。例如氯气分子、氢气分子中的化学键就是共价键，可写为



在电工材料中，大多数有机绝缘材料分子都由共价键结合而成。有机绝缘材料是一系列碳氢化合物以及由碳氢化合物演变或派生出来的物质。其中有些物质，如天然变压器油、松节油、石蜡以及合成的苏伏油、硅有机油等，都称低分子物质，因它们一个分子所含原子数目少，为几十个，或不超过几百个，其结构比较简单。有些有机物，如天然的松香、橡胶、纤维素、丝以及合成的聚氯乙烯、酚醛树脂、环氧树

脂、有机玻璃、有机硅聚合物、人造丝等，都是高分子化合物，它们一个分子所含原子的数目，往往超过几千，几万，个别可达几百万，故结构复杂。

当分子由三种及以上不同的原子组成时，其化学键可能既有共价键又有离子键。例如氢氧化钠分子 (NaOH)，氢与氧是共价键结合，钠与氢氧根是离子键结合。

1. 1. 3 电介质的极性

不同电介质的分子结构不同。当分子的正负电荷中心重合时则称中性分子，其组成的电介质为中性电介质；如果正负电荷中心不重合则称极性分子，其组成的电介质称极性电介质。通常把由大小相等、符号相反、彼此距离为 a 的两个电荷所组成的系统称为偶极子，并常用偶极距来表示偶极子的大小和方向，为

$$\vec{m} = q \cdot \vec{a} \quad (1-1)$$

式中： q ——正电荷或负电荷的电量；

\vec{a} ——大小为正负电荷间的距离，方向由负电荷指向正电荷；

\vec{m} ——偶极矩。

举例：设 $q = 1$ 个单位正、负电荷（电子电荷为1个单位，近似为 4.8×10^{-10} 静电电量单位）， $a = 10^{-8}$ 厘米，则偶极矩的大小为

$$m = 4.8 \times 10^{-18} \text{CGSE 静电电量单位} \cdot \text{cm}$$

或简单写成 $m = 4.8$ 德拜 (或D)

由于 $1 \text{ D} = 10^{-18}$ 静库·厘米

$$= 3.33 \times 10^{30} \text{c} \cdot \text{m}$$

$$= 1 \text{ 个单位正 (负) 电荷} \times 0.2 \times 10^{-10} \text{m}$$

故当 1 个单位正、负电荷的间距为 0.2×10^{-10} 米时，其产生的偶极矩为 1 德拜。

用SI单位制表示则有 $1 \text{ D} = 3.33 \times 10^{-30} \text{c} \cdot \text{m}$

化学键的偶极矩称为键矩。离子键的键矩大，故为强极性键。

极性电介质也就是当没有外电场作用时，分子本身就具有偶极矩的电介质。

在静电场中，中性电介质的分子或原子中的电荷将产生相对位移，造成正、负电荷中心不重合，从而形成感应偶极子，其偶极矩同样由式 (1-1) 确定。

具有固有偶极矩极性分子的电介质，在无外电场作用时，由于分子的热运动，偶极矩朝向各个方向的概率相等，故偶极矩相互抵消，从总体来看电介质的偶极矩为零，即不呈现电介质极化。

由离子键结合的电介质称离子式结构电介质。离子键组成离子晶格，它是由位于晶格点阵上的离子相互间的静电作用形成的。

离子晶体电介质，其正、负离子形成一个很大的键矩，故其介电常数相当大。

由共价键构成的分子是否具有极性，决定于共用电子对在两原子间的位置。电负性相同的原子组成分子时，各原子对共用电子对的吸引力相等，于是共用电子对对称分布于两原子间，使其化学键的键矩为零，故为非极性共价键，其组成的分子为非极性分子，例如由两个氯原子组成的氯分子是

非极性分子。电负性不同的原子组成分子时，由于原子结构不同，各原子对共用电子对的吸引力有差别，共用电子对会偏向吸引力大的原子，使该端负电性较强，而离共用电子对较远的原子一端必然正电性较强，于是共价键显示出极性，从而构成极性分子，如氯化氢分子（HCL）、水分子（H₂O）都是极性分子。极性共价键又分强极性键和弱极性键，前者共用电子对偏向程度大，而后者偏向较小。

因此，由共价键分子组成的电介质，可能是非极性电介质或弱极性电介质或强极性电介质。

物质极性的强弱，可据其介电常数的大小来区别。某些电介质的相对介电常数已列在表（1.1）中。

1—2 极化和相对介电常数

电介质在电场作用下其荷电质点相应于电场方向产生有限位移的现象，称为电介质的极化。这时电介质内部电荷的总和仍为零，但产生了一个与外施电场相反方向的电场，如图（1.1—b）所示。

图（1.1）为电介质极化示意图。极板为平行平板，(a)中极板间为真空，(b)中极板间放入一块厚度与极间距离相等的固体电介质。当外施直流电压U后，对(a)中极板间的电容量可表示为

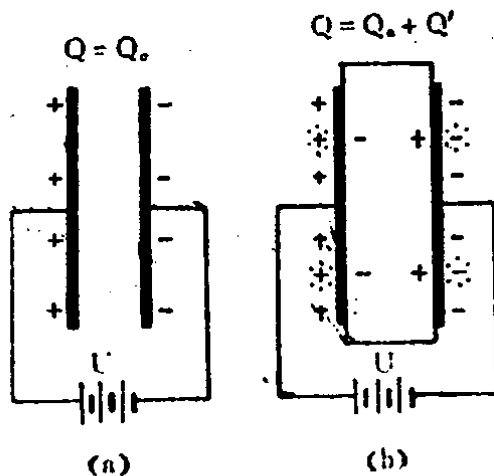


图1.1 电介质的极化

(a)极板间为真空 (b)有电介质