

高等学校教材

高 电 压 技 术

南京工学院 周泽存 主编

中国电力出版社

前 言

本书是根据高电压技术教材编审小组所制订的“电力系统及其自动化”专业“高电压技术”课程编写大纲编写的，为了兼顾“电机”、“电器”、“电气绝缘及电缆技术”等电气类专业的教学要求，适当加强了绝缘及绝缘试验技术方面的内容。本书可作为高等院校“电力系统及其自动化”、“电机”、“电器”与“电气绝缘及电缆技术”等专业的“高电压技术”课程教材。也可作为电力工程技术人员的参考书。

本书共两篇：

第一篇绝缘及绝缘试验。共两部分，第一部分自第一章至第四章，为电介质的性能及其放电机理，着重阐明其物理概念和基本规律。第二部分包括第五、六两章，其内容为绝缘试验技术，主要叙述基本测试手段及测试结果的分析与判断。

第二篇电力系统过电压。第七章为线路及绕组中的波过程，侧重于无损耗单导线线路的波过程，物理概念与数学推导并重，本章是本篇的理论基础。第八章至第十二章为大气过电压及内部过电压，着重叙述过电压的成因和限制措施，适当地介绍一些常用的计算方法。第十三章为电力系统的绝缘水平与绝缘配合，主要阐明线路、变电所绝缘水平的相互配合和相互制约的关系。

每章末都附有习题，供学习时参考。

建议各院校各专业可根据各自的特点和要求，增加或删减部分内容、灵活使用。

本书的第一章至第六章由南京工学院沈其工编写，第七章至第十章和第十一章至第十三章是在第一轮高等学校通用教材《高电压技术》（重庆大学、南京工学院合编）的基础上分别由南京工学院周泽存和重庆大学杨葆初编写而成。全书由周泽存修改并担任主编。

本书由上海交通大学雷新陶教授担任主审，各有关院校参加审稿。在编写过程中得到了一些兄弟院校和设计、研究单位的支持，南京工学院王大忠同志参加了部分工作，在此表示衷心感谢。

由于编者的水平有限，不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1987年2月

目 录

前言

绪论..... 1

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..... 3	3
第一节 电介质的极化..... 3	3
第二节 电介质的介电常数..... 6	6
第三节 电介质的电导..... 7	7
第四节 电介质中的损耗..... 10	10
习 题..... 13	13
第二章 气体放电的物理过程..... 15	15
第一节 气体中带电质点的产生和消失..... 15	15
第二节 气体放电过程的一般描述..... 18	18
第三节 均匀电场气隙的击穿..... 19	19
第四节 不均匀电场气隙的击穿..... 26	26
习 题..... 36	36
第三章 气隙的击穿特性..... 38	38
第一节 气隙的击穿时间..... 38	38
第二节 气隙的伏秒特性..... 38	38
第三节 气隙的击穿电压..... 44	44
第四节 提高气隙击穿电压的方法..... 50	50
第五节 SF ₆ 气体的特性..... 52	52
第六节 气体电介质中的沿面放电..... 54	54
习 题..... 64	64
第四章 固体电介质和液体电介质的击穿特性..... 66	66
第一节 固体电介质击穿的机理..... 66	66
第二节 影响固体电介质击穿电压的因素..... 67	67
第三节 提高固体电介质击穿电压的方法..... 68	68
第四节 固体电介质的老化..... 68	68
第五节 液体电介质的击穿机理..... 75	75
第六节 影响液体电介质击穿电压的因素..... 76	76
第七节 提高液体电介质击穿电压的方法..... 80	80
第八节 液体电介质的老化..... 82	82
第九节 组合绝缘的击穿特性..... 84	84

第十节 对电介质性能的全面要求	96
习 题	93
第五章 电气设备绝缘试验(一)	94
第一节 测定绝缘电阻	94
第二节 测定泄漏电流	97
第三节 测定介质损失角正切($\text{tg}\delta$)	98
第四节 局部放电的测试	103
第五节 绝缘油中溶解气体的色谱分析	105
习 题	107
第六章 电气设备绝缘试验(二)	108
第一节 工频高压试验	108
第二节 直流高压试验	113
第三节 冲击高压试验	118
第四节 关于耐压试验的讨论	136
习 题	138

第二篇 电力系统过电压及保护

第七章 线路和绕组中的波过程	141
第一节 无损耗单导线线路中的波过程	141
第二节 行波的折射与反射	146
第三节 行波通过串联电感和并联电容	150
第四节 行波的多次折、反射	153
第五节 无损耗平行多导线系统中的波过程	155
第六节 冲击电晕对线路波过程的影响	159
第七节 平行多导线系统的波动方程和相模变换	160
第八节 贝瑞隆法计算电力系统过电压	166
第九节 单相变压器绕组中的波过程	173
第十节 三相变压器绕组中的波过程	179
第十一节 冲击电压在绕组间的传递	180
第十二节 旋转电机绕组中的波过程	181
习 题	183
第八章 雷电及防雷设备	185
第一节 雷电参数	185
第二节 避雷针、避雷线的保护范围	188
第三节 避雷器	191
第四节 接地装置	198
习 题	203
第九章 输电线路的防雷保护	205
第一节 输电线路的感应雷过电压	205
第二节 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平	207

第三节	输电线路的雷击跳闸率	213
第四节	输电线路的防雷措施	215
习题		216
第十章	发电厂和变电所的防雷保护	218
第一节	发电厂、变电所的直击雷保护	218
第二节	变电所内阀型避雷器的保护作用	219
第三节	变电所的进线段保护	226
第四节	三绕组变压器和自耦变压器的防雷保护	229
第五节	变压器中性点保护	230
第六节	旋转电机的防雷保护	231
习题		235
第十一章	电力系统的操作过电压	237
第一节	电力系统的短时过电压	238
第二节	切除空载线路时的过电压	241
第三节	空载线路的合闸过电压	245
第四节	电弧接地过电压	248
第五节	切除空载变压器引起的过电压	255
习题		257
第十二章	电力系统的谐振过电压	258
第一节	线性谐振过电压	258
第二节	非线性(铁磁)谐振过电压	260
第三节	参数谐振过电压	264
第四节	常见谐振过电压实例	266
习题		274
第十三章	电力系统的绝缘配合	275
第一节	绝缘配合的定义和方法	275
第二节	输电线路绝缘和变电所外绝缘的绝缘配合	280
第三节	电气设备试验电压的确定	283
习题		288
附录		289
参考资料		296

绪 论

高电压技术是一门新兴的学科，它随着电力系统输电电压的提高和近代物理的进展而得到发展。高电压技术包含下列主要内容：气体、液体和固体电介质的放电机理及规律；高压电气设备的绝缘性能、结构及绝缘测试技术；高电压的产生及测量技术；电力系统过电压的成因及其限制措施；电力系统的绝缘水平与绝缘配合等。

当前，世界上的交、直流输电电压已高达750kV和±500kV，并且正在考虑建设1000kV及以上的特高压输电系统，我国的500kV交流输电系统已投入运行，±500kV直流输电系统也已开始建设。

随着输电电压的提高，需要生产相应的高压电气设备，这就需要对各类绝缘电介质的特性及其放电机理进行研究，而其中对气体放电机理的研究是研究其他材料放电机理的基础。设备额定电压的提高使绝缘材料和绝缘结构的研究成为很重要的问题，当前，各种高抗电强度气体如SF₆和各类有机高分子合成材料等新型绝缘材料的出现为制造高压电气设备提供了广阔的前途。

除设备问题外，建设高压输电系统还面临着很多高电压技术课题，诸如高压输电线路的电晕；不对称故障及输电线路电晕对通讯的干扰；高压电磁场对周围环境和人体的影响；电力系统的过电压等。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，系统的过电压来自两个方面，其一是由雷电和雷击电力系统所引起，称为大气过电压，研究大气过电压的成因及其限制措施是本学科的主要内容之一，虽然人们对雷电的研究已有几十年历史，但到目前为止，对雷电的成因、机理及其参数的认识还远未达到完善的境界。系统的另一类过电压是由系统内部的电磁能量的转换所引起，例如切合空载线路和系统参数配合不当而引起的谐振等，称为内部过电压，其幅值随输电电压的提高而上升，一般约为2.0~4.5倍相电压，因此，随着输电电压的提高，内部过电压已逐渐成为具有决定意义的因素，对超高压电力系统尤为突出。研究内过电压的成因及限制内过电压的措施，研究新型的能够限制内过电压的避雷器（例如氧化锌避雷器）已成为建设超高压电力系统中面临的主要课题。

为了保证电力系统安全运行的另一方面，是对电气设备绝缘在过电压作用下的性能的研究，以及各类绝缘试验（包括耐压试验）技术的研究。过电压和绝缘是矛盾的两个方面，需要用技术经济的综合观点来处理好这个矛盾，这就是电力系统的绝缘水平与绝缘配合问题，它是建设超高压电力系统中的非常重要的课题。

高电压技术是一门实践性很强的学科，因此各种类别例如冲击（包括雷电冲击和内过电压冲击）、直流和工频交流等的高电压、大电流发生装置的研究和其测试技术是本学科的基本内容之一，当前，我国已拥有北京、西安和武汉等高电压试验研究中心。

近年来，在原子物理、等离子体物理、受控热核反应、大功率激光技术、电磁激波

管、强流电子束以及高压静电场等工业应用和研究领域内，高电压及冲击大电流技术得到了广泛的应用，其远景是十分宽阔的。

随着计算机、微电子、材料科学等新兴学科的出现，高电压技术这门学科的内容也正日新月异地得到改造和更新。当前，数据采集和处理，光电转换和新型传感技术、计算机和微处理机等已大量应用于高电压测试技术；数字及模拟计算机的仿真技术，随机信号处理和概率统计理论等也已进入系统过电压、绝缘和绝缘水平与配合的领域，这些新兴理论和技术的应用将极大地推进高电压技术学科的发展。

高电压技术这门学科是从生产实践中发展起来的，因此在研究和学习理论的同时，更应该强调实践的重要性，当前，在高电压技术学科各个领域内大部分理论的研究还不很成熟，需要依靠实践结果的积累、提高和总结，以推进高电压技术学科的发展。

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

第一节 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

组成一切电介质的粒子不外是原子、分子或离子，而它们又都是由带正电的原子核和围绕核的电子云构成。当不存在外电场时，原子中电子云的中心与原子核重合，如图1-1(a)所示，此时，电矩为零。当外加一电场，电场力的作用将使荷正电的原子核向电场方向位移，荷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二者倾向于重合，当它们的相互作用达到平衡时，原子中出现了感应电矩。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二者恢复到重合，感应电矩也随之消失。

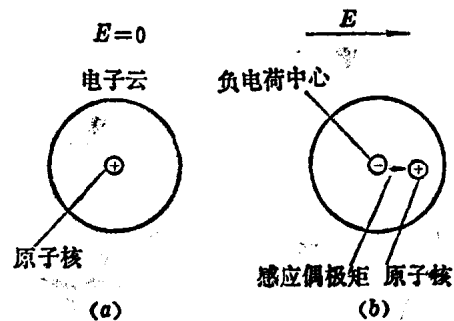


图 1-1 电子位移极化

(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。它完全是弹性的，并不引起能量损耗。它完成时间极快，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高达光频，电子位移极化也已来得及完成。

单元粒子的电子位移极化电矩与温度无关，因为温度只影响粒子热运动的动能，而不改变粒子的半径。温度的变化，只是通过介质密度的变化（即介质单位体积的粒子数的变化）才使介质的电子位移极化率随之变化。

二、离子位移极化

在由离子结合成的电介质内，外电场的作用，除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1-2表示氯化钠晶

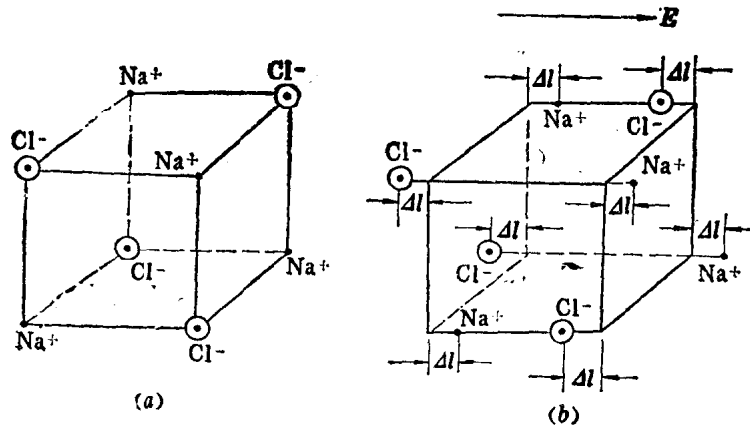


图 1-2 离子型电介质的离子位移图
(a)未加电场；(b)加电场后

体的离子位移极化。

没有外电场时，各正负离子对构成的偶极矩彼此相消，极化强度为零；加电场后，所有的钠离子沿电场方向移动，而所有的氯离子沿电场反方向移动。结果，正负离子对构成的偶极矩不再完全相消，形成一定的极化强度。

离子位移极化完成的时间约为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s，因此，只要交变电场的频率低于红外线光频率，离子位移极化便来得及完成。

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增大，但增大不多，这是由于温度升高时，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。但由于分子不规则的热运动，使各分子偶极矩方向的排列没有秩序，因此，从宏观而言，对外并不呈现电矩。当有外电场时，受电场力的作用，每个分子的固有偶极矩就有转向与外电场平行的趋势，其排列呈现有一定的秩序。但是，受分子热运动的干扰，这种转向有秩序的排列，只能达到某种程度，而不能完全彻底。随电场和温度的不同，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，极性分子的转向排列就愈整齐，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回复到无秩序状态，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 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ s，甚至更长。所以，在频率不高、甚至是工频的交变电场中，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

上述三种完全不同，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，电介质往往是层式结构（宏观或微观的），电介质中也可能存在某些晶格缺陷。电场的作用使带电质点在电介质中移动，可能被晶格缺陷捕获，或在两层电介质的界面上堆积，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。

最明显的空间电荷极化是夹层极化。在实际的电气设备中，有不少多层电介质的例子，如电缆、电容器、旋转电机、变压器、互感器、电抗器的绕组绝缘等，都是由多层电介质组成的。

现以最简单的双层电介质模型来分析其中的物理过程。

如图1-3所示，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。

设 $C_1=1$ ， $C_2=2$ ， $G_1=2$ ， $G_2=1$ ， $U=3$ 。

当 U 作用在 AB 两端极板上时，其初瞬时电容上的电荷和电位分布，如图1-4(a)所示。整个介质的等值电容为 $C'_{\epsilon} = \frac{Q'}{U} = \frac{2}{3}$ 。到达稳态时，电容上的电荷和电位分布如图1-4(b)所示。整个介质的等值电容为 $C''_{\epsilon} = \frac{Q''}{U} = \frac{4}{3}$ 。 C_1 和 C_2 分界面上堆积的电荷量为 $+4-1=+3$ 。

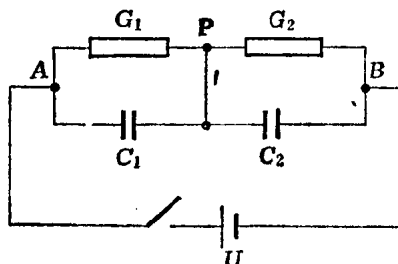


图 1-3 双层介质极化

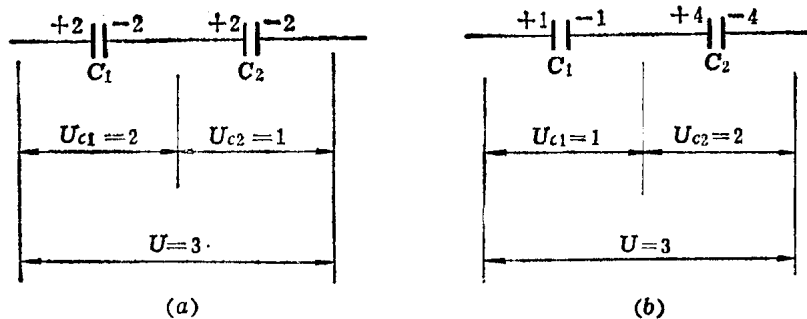


图 1-4 双层介质中电荷和电位分布
(a)初瞬时；(b)稳态时

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。

还应注意，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，这种极化过程将是很缓慢的。它的形成时间从几十分之一秒到几分钟，甚至有长达几小时的。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。

第二节 电介质的介电常数

一、气体电介质的介电常数

气体物质分子间的距离很大，它的密度很小，因此，气体的极化率很小，一切气体的介电常数都接近于1。表1-1列出了某些气体的介电常数。

表 1-1 某些气体的介电常数

气体种类	氮	氢	氧	氦	甲烷	二氧化碳	乙烯	空气
介电常数 ϵ (20°C, 1atm时)	1.000072	1.00027	1.00055	1.00060	1.00095	1.00096	1.00138	1.00059

任何气体的介电常数均随温度的升高而减小，随压力的增大而增大，但影响都很小。

二、液体电介质的介电常数

1. 中性液体电介质 中性液体电介质的介电常数不大，其值在1.8~2.8范围内。介电常数与温度的关系是与单位体积中分子数与温度的关系接近一致。

石油、苯、四氯化碳、硅油等均为中性液体介质。

2. 极性液体电介质 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。但这类电介质通常都伴随着一个缺点，就是在交变电场中的介质损耗较大，故高压绝缘中很少应用，只有蓖麻油和几种合成液体介质在某些场合有应用的。

下面讨论影响极性液体电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1-5所示。低温时，分子间的束缚力强，转向较困难，转向极化对介电常数的贡献较小。当温度升高后，分子间的束缚力减弱，转向就比较容易，转向极化对介电常数的贡献就较大。另一方面，温度升高时，分子的热运动又使极性分子趋于无秩序的排列，阻碍了转向极化，所以当温度进一步升高时，介电常数趋向减小。

2. 介电常数与频率的关系 频率对极性液体的介电常数影响很大。图1-6表示了它们

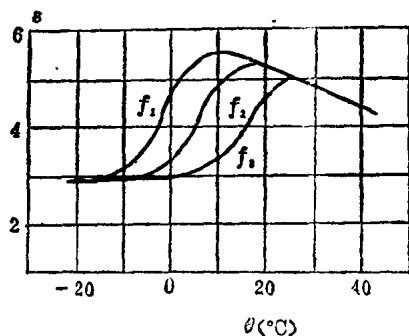


图 1-5 氯化联苯的介电常数与温度的关系
频率 $f_1 > f_2 > f_3$

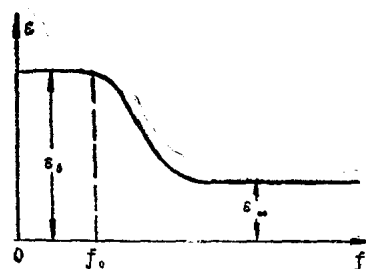


图 1-6 极性液体介质的介电常数与频率的关系

的介电常数与频率的关系。当频率相当低时，偶极分子来得及跟随电场转动，介电常数值很大，并且接近于直流电压下测得的介电常数值 ϵ_0 。当频率大到这种程度，使分子的转向已经来不及跟上电场的变化时，介电常数就减小了，它的最终数值接近于由电子位移极化所引起的介电常数值 ϵ_{∞} 。表1-2列出一部分极性液体介质的介电常数。

三、固体电介质的介电常数

1. 中性固体电介质 由中性分子构成的固体电介质，只具有电子式极化和离子式极化，其介电常数较小。中性固体电介质的介电常数与温度之间的关系也与单位体积内的分子数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. 极性固体电介质 由于分子具有极性，所以这类介质的介电常数都较大，一般为3~6，还有更大的。这类电介质的介电常数与温度的关系类似极性液体所呈现的规律。图1-7表示了硫化天然橡胶的介电常数与温度的关系。

表 1-2 极性液体介质的介电常数

液体名称	介电常数(20℃, 50Hz 时)
蓖麻油	4.2
三氯联苯	5.6
乙醇	26
水	81

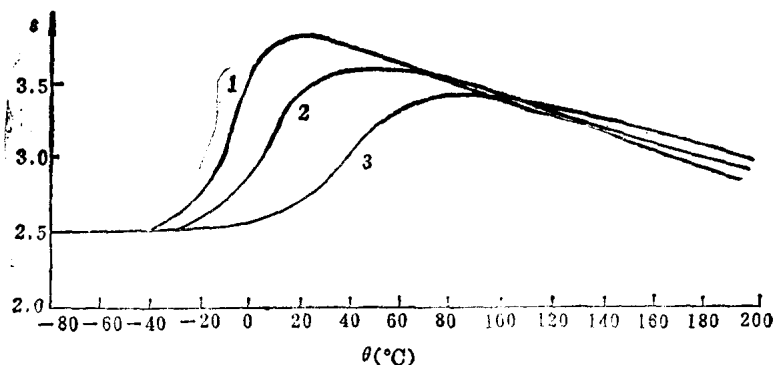


图 1-7 硫化橡胶的介电常数与温度、频率的关系
1—60Hz; 2—3kHz; 3—300kHz

属于极性固体电介质的有：树脂、纤维、橡胶、虫胶、有机玻璃、聚氯乙烯、涤纶等。

第三节 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。

气体电介质的电导是由游离出来的自由电子、正离子和负离子在电场作用下移动而造成的。液体和固体电介质中的电导是由于电介质的基本物质及其中所含杂质分子的化学分解或热离解形成带电质点（电子、正离子、负离子），这些带电质点沿电场方向移动而造成

成的。它是离子式的电导，也就是电解式的电导。

一、气体电介质的电导

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）使每一立方厘米气体介质中每秒钟大约产生一对离子（此处所称离子是广义的，包括电子在内）。在不断产生离子的同时，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/cm³。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 的比例系数 $b = v/E$ ，称为离子的迁移率。电场强度很小时， b 接近为常数，即电流密度与电场强度成正比例，如图1-8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，电流密度即趋于饱和，如图1-8中II区所示。在该两区内气体的电导是极微小的。对标准状态下的空气来说，图中 E_1 和 E_2 值分别为 $E_1 \approx 5 \times 10^{-3}$ V/cm， $E_2 \approx 10^4$ V/cm。当场强超过 E_2 值时，气体电介质中将发生撞击游离，从而使电流密度迅速增大，最后使气

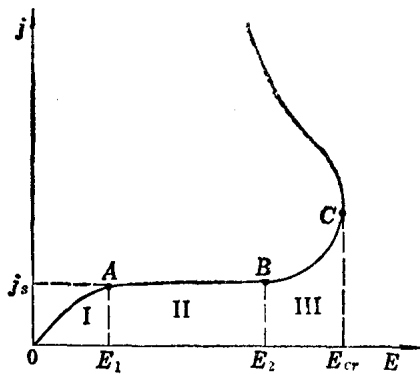


图 1-8 气体电介质中的电流密度与场强的关系

隙击穿，如图1-8中III区所示。这个过程将在下一章中详细讨论。

二、液体电介质的电导

中性液体电介质本身分子的离解是极微小的，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。中性液体电介质处理得十分纯净后，其电导率可低至 10^{-18} S/cm。

极性液体电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。强极性液体电介质（如水、酒精），即使是高度净化了的，其电导率已如此之大，以致不能看作为电介质，而是离子式导电液了。

表1-3中列出了某些液体电介质的电导和介电常数的值。

表 1-3 液体电介质的电导率和介电常数

液体种类	液体名称	温度 θ ($^{\circ}$ C)	介电常数 ϵ	电导率 γ (S/cm)	纯净程度
中 性	变压器油	80	2.2	0.5×10^{-18}	未净化的
	变压器油	80	2.1	2×10^{-18}	净化的
	变压器油	80	2.1	0.5×10^{-18}	两次净化的
	变压器油	80	2.1	10^{-18}	高度净化的
极 性	三氯联苯	80	5.5	10^{-11}	工程上应用
	蓖麻油	20	4.5	10^{-12}	工程上应用
强 极 性	水	20	81	10^{-7}	高度净化的
	乙醇	20	25.7	10^{-8}	净化的

下面我们来讨论影响液体电介质电导的一些因素。

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

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：

$$\gamma = Ae^{-B/T} \quad (1-1)$$

式中 A 、 B 为常数； T 为温度，以绝对温度计； γ 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：

$$\gamma = \gamma_0 e^{a(\theta - \theta_0)} \quad (1-2)$$

式中 a 为常数； θ 为液体介质的温度 ($^{\circ}\text{C}$)； γ_0 为 $\theta = \theta_0$ 时的电导率。图1-9 表示常用液体电介质的电导率与温度的关系。

2. 电场强度 在极纯净的液体电介质中，电导与电场强度的关系与气体介质中相似（类似图1-8），但是，一般工程用纯净的液体介质的电导与电场强度的关系却更接近于图

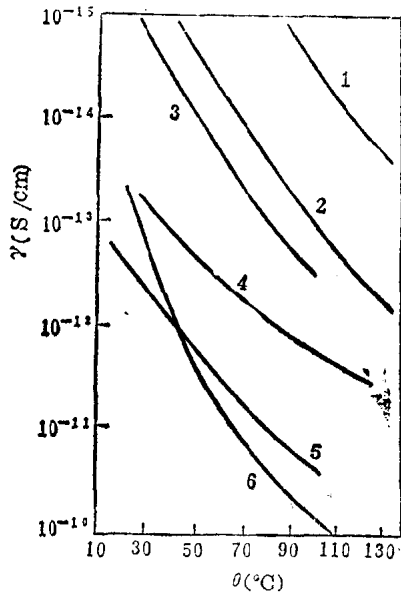


图 1-9 常用液体电介质的电导率与温度的关系
1—变压器油(很纯净)；2—变压器油(纯净)；3—凡士林油；
4—变压器油(工业用)；5—蓖麻子油；6—五氯联苯

1-10。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规律增长。

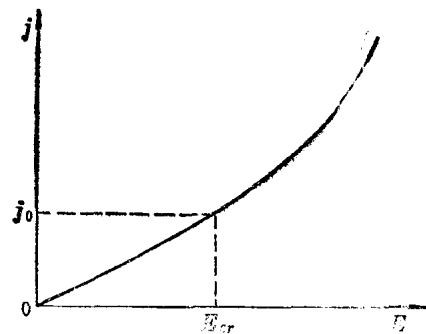


图 1-10 工程用纯净变压器油中电流密度与场强的关系

三、固体电介质的电导

具有中性分子的固体电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。

离子式结构的固体电介质的电导主要是由于离子在热运动影响下脱离晶格而移动的结果。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也就随之加强，达到某温度时，这种振动加强到能使离子脱离原在晶格，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)的移动是无规

律的，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。杂质总是结合得最不紧密的，故当某一温度时，电介质结构中的基本离子尚很少脱离原位时，杂质离子可能已有很多脱离了。

下面我们来讨论影响固体电介质电导的一些因素。

1. 温度 温度对固体电介质电导率的影响与对液体电介质电导率的影响是相似的，因此式(1-1)和式(1-2)所表示的关系也同样适用于固体电介质。

2. 电场强度 与液体电介质的情况相似，在电场强度小于某定值时，固体电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，固体电介质的电导率与电场强度的关系可近似地以下式表之：

$$\gamma = \gamma_0 e^{b(E-E_0)} \quad (1-3)$$

式中 γ_0 ——电导率与电场强度尚无关范围内的电导率；

E_0 ——电导率与电场强度尚无关时的最大电场强度；

b ——由材料特性所决定的常数。

3. 杂质 杂质对电导率的影响也是很大的，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，还存在着表面电导。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小，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、聚苯乙烯等）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、绝缘漆、有机硅等措施，可以降低介质表面电导。

第四节 电介质中的损耗

一、电介质损耗的基本概念

电介质在正弦交变电场作用下的电流密度和场强的矢量图如图1-11所示。图中 J_c 为真空和无损极化所引起的电流密度，为纯电容性的； J_{lk} 为漏导所引起的电流密度，为纯电阻性的； J_p 为有损极化所引起的电流密度，它由无功部分 J_{pc} 和有功部分 J_{pr} 组成。

总电流密度矢量 J 与总电容电流矢量 J_c 之间的夹角为 δ ，称为电介质的损耗角。通常用此损耗角的正切 $\text{tg}\delta$ 来表征介质中比损耗的大小。 $\text{tg}\delta = \frac{J_r}{J_c}$ 为介质中总的有功电流密度与总的无功电流密度之比。

单位体积介质中的损耗功率为：

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

对于含有均匀介质的平板电容器，总损耗功率为：

$$P = pV = E^2 \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta V = U^2 \omega \operatorname{tg} \delta \quad (1-5)$$

式中 V ——电介质体积；

U ——所加电压。

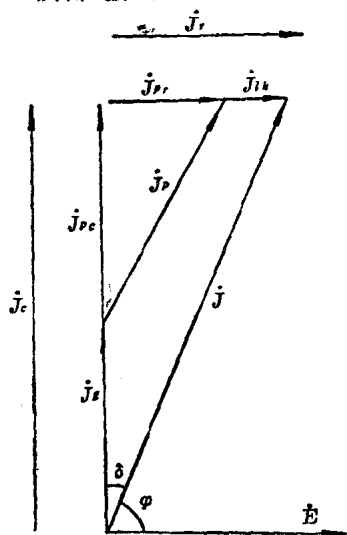


图 1-11 电介质中的电流密度和场强矢量

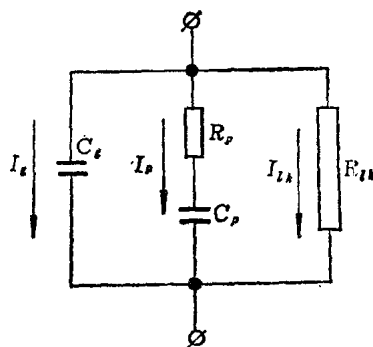


图 1-12 电介质的等效电路

由图1-11可以很容易地画出电介质的等效电路如图1-12所示。图中：

R_{lk} ——泄漏电阻；

I_{lk} ——漏导电流；

C_e ——电介质真空和无损耗极化所形成的电容；

I_e ——流过 C_e 的电流；

C_p ——有损耗极化所形成的电容；

R_p ——有损耗极化所形成的等效电阻；

I_p ——流过 R_p - C_p 支路的电流，可分为有功分量 I_p 及无功分量 $I_{p\cdot}$ 。

二、气体电介质中的损耗

前已指出，气体电介质的极化率是极小的。当电场强度小于使气体分子游离所需的值时，气体介质的电导也是极小的。所以，此时气体介质中的损耗也将是极小的，工程实际中可以略去不计。但当电场强度超过气体分子游离所需的值时，气体介质中产生游离，介质损耗就有很大增加，且随着电压的升高，介质损将增长很快。

三、液体和固体电介质中的损耗

中性液体或中性固体电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。介质损与温度、电场强度等因素的关系也就决定于电导与这些因素之间的关系，一般如图1-13和图1-14所示。

极性液体和极性固体介质中的损耗主要包括电导式损耗和电偶式损耗两部分，所以，它与温度、频率等因素有较复杂的关系。

图1-15表示松香油的 $\operatorname{tg} \delta$ 与温度的关系。温度较低时，松香油的粘度大，偶极子的转向较难，故 $\operatorname{tg} \delta$ 较小；温度较高时，松香油的粘度减小，偶极子的转向较易，故 $\operatorname{tg} \delta$ 增

大；温度再高时，松香油的粘度更小，偶极子的转向很易，但偶极子回转时的摩擦损耗却减小很多，故 $\text{tg}\delta$ 反而减小了；温度更高时，虽然由于粘度小，使偶极子回转时的摩擦损耗减小，但电导随温度的增加而迅速增加，使电导式损耗迅速增大，总的损耗及 $\text{tg}\delta$ 也都迅速增大。

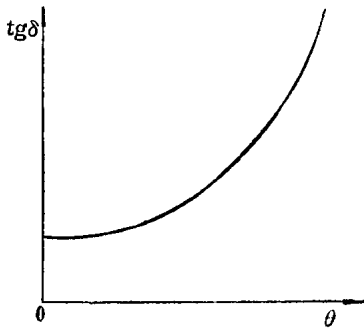


图 1-13 中性液体或中性固体电介质的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系示意图

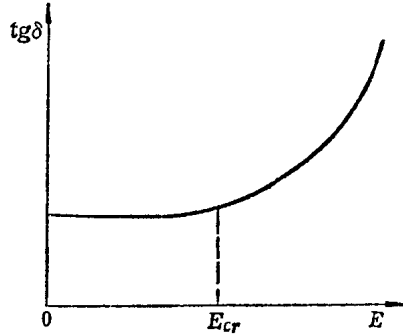


图 1-14 中性液体或中性固体电介质的 $\text{tg}\delta$ 与场强的关系示意图

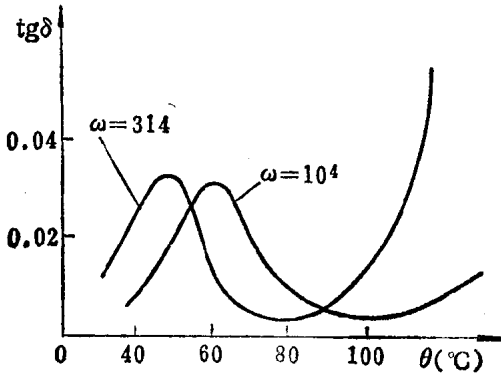


图 1-15 松香油的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系

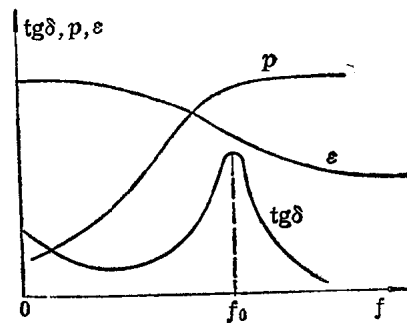


图 1-16 极性液体介质中的损耗与频率的关系

图1-16表示极性液体介质中的损耗与频率的关系。

频率很低时，介质中的损耗主要由电导造成的，偶极式损耗很少，故总的损耗功率小，但因频率很低，电容电流很小，故 $\text{tg}\delta$ 却比较大。电源频率增高时，偶极子回转频率和偶极损耗功率也随之增高；与此同时，随着频率的升高，偶极式极化不充分，使介电常数减小，电容电流不能与频率成正比例增长。以上两种因素的结合，使得在某频率范围内， $\text{tg}\delta$ 随频率而增长。当频率更高时，偶极子的回转已完全跟不上电源频率，损耗功率遂趋于恒定，介电常数也达到较低的稳定值，电容电流则与频率成正比例增长，于是， $\text{tg}\delta$ 近乎与频率成反比地减小。

极性固体介质的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系如图1-17所示。图1-18示出各种玻璃和石英在角频率 $\omega > 10^6$ 范围时， $\text{tg}\delta$ 与 ω 的关系。 $\text{tg}\delta$ 不是与频率成反比减小，反而随频率而增大，即损耗功率的增长比频率的增长更快。不仅是玻璃和石英，其他许多工程绝缘材料也多有此特性。由此可见，已有的极化理论未必能解释高频时固体介质损耗的性质，这说明电介质中可能存在迄今尚不了解的某些过程。