

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科系列教材

高电压技术

Gaodianya Jishu

喻剑辉 张元芳 编著

为继续教育（函授）量身定做



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科系列教材

高电压技术

喻剑辉 张元芳 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书作为高等学校函授专科电气工程类各专业《高电压技术》课程的教材。内容包括高电压绝缘基础、高压设备绝缘结构、电气设备试验方法和电力系统过电压等共十四章。全书较全面地介绍了高电压技术所涉及的各个方面,并在各章插入了丰富的例题与习题,可以帮助学生理解和掌握高电压技术的基本概念,学习和了解高电压工程实际的一般分析方法和试验方法。本书也可作为电力工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/喻剑辉,张元芳编.—北京:中国电力出版社,2006

(电气工程及其自动化专业继续教育(函授)专科系列教材)

ISBN 7-5083-4147-3

I. 高... II. ①喻...②张.. III. 高电压-技术-函授大学-教材 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 014805 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

利森达印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

2006 年 6 月第一版 2006 年 6 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 256 千字
印数 0001—3000 册 定价 20.00 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)

编者按语

根据《中国教育改革与发展纲要》中“要大力发展成人高等教育”的精神，由华中科技大学电气与电子工程学院和武汉大学电气工程学院牵头，组织华北电力大学电气工程学院、东北电力学院电力系、三峡大学电气工程学院、上海电力学院电力系、长沙理工大学电力学院、武汉电力职业技术学院等单位，成立了“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）教学工作协作组，于2003年11月在武汉，就国家在新形势下对人才的需求及“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的现状、特点和人才供需状况，对“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的教学计划、课程体系和使用教材现状进行了充分地研讨，制定了“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次的指导性教学计划。在此基础上研究了本专业的教材建设问题，大家一致认为函授教材要遵循自学和面授相结合、理论和实践相结合的原则，体现市场经济和科技发展对继续教育知识更新和理念更新的要求。针对目前“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次尚缺乏系统性教材的现状，决定组织各学院有经验的教授和专家编写这两个层次的教材。我们希望这两套系列教材能为规范本专业的教学内容和提高本专业的教学质量起到积极的推动作用。

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的教材建设，现在只是开头，需不断改进和完善。因此，在使用过程中敬请读者随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）教学工作协作组

“电气工程及其自动化”专业（函授）教材编委会

2005年3月

前言

随着我国第一条 750kV 电压等级的输电线路在西北地区正式开始运营, 1000kV 特高压输电工程也正在积极筹建中, 我国的电力系统已进入蓬勃发展的大好时机。特高压输电具有跨区域、大容量、远距离、低损耗的优势, 可以减少线路回数, 节省线路走廊, 降低单位容量输送价格, 保证电网稳定。而特高压的发展有赖于高电压技术的坚实基础与创新。作为电力系统中应用的高电压技术主要包括两大方面, 即高电压绝缘与试验技术以及电力系统过电压。前者涉及到电绝缘材料、绝缘结构、绝缘放电理论与试验数据、高电压试验方法等; 后者与高电压设备及输电运行的安全稳定密切相关。本书结合上述两大主要方面作了较详细的论述, 其中第一至七章围绕着高电压绝缘中的主要问题展开了讨论, 重点谈到了气体放电特性、高电压设备的绝缘结构和常用绝缘材料以及电气设备绝缘预防性试验的基本方法; 第八至十三章围绕电力系统中各种过电压的起因以及抑制或消除措施进行了讨论, 重点涉及输电线路和发电站的防雷保护、系统内由电磁能量转换引起的操作过电压及谐振过电压分析, 并提出了限制过电压的方法。第十四章论述了电力系统的绝缘配合。

本书第一至七章由喻剑辉教授编写, 第八至十四章由张元芳教授编写, 主审陈慈萱教授。

在科学技术日益发展的今天, 高电压技术在工程物理、军用和民用工业等领域也得到了广泛应用, 如采用高压静电场来静电喷涂、静电除尘, 脉冲电磁场用于电磁发射, 大功率脉冲激光技术, 高电压作用下的“水锤”粉碎技术等。我们有理由相信, 在高电压技术不断发展和完善的过程中, 其应用领域会更加宽广。

编者写于武汉珞珈山

2005.12.1

目 录

编者按语

前言

第一章 绝缘电介质的基本特性	1
第一节 电介质的极化特性	1
第二节 电介质的电导特性	4
第三节 电介质的损耗特性	7
复习思考题	9
第二章 气体放电基础	11
第一节 气体放电形式	11
第二节 带电质点的产生与消失	12
第三节 均匀电场气隙的击穿	14
第四节 不均匀电场气隙的击穿	20
复习思考题	25
第三章 气体放电特性	26
第一节 持续电压作用下的气体放电	26
第二节 冲击电压作用下的气体放电	28
第三节 沿面放电	32
第四节 大气状态对气隙击穿电压的影响	36
第五节 六氟化硫(SF ₆)的绝缘特性	37
第六节 提高气体间隙击穿电压的措施	38
复习思考题	41
第四章 固体和液体电介质的击穿	43
第一节 固体电介质的击穿	43
第二节 固体电介质的老化	46
第三节 液体电介质的击穿	48
第四节 组合绝缘的击穿	51
复习思考题	52
第五章 设备的绝缘材料和绝缘结构	53
第一节 绝缘材料的基本要求与分类	53
第二节 变压器绝缘	55
第三节 电力电容器绝缘	58
第四节 电力电缆绝缘	61
第五节 高压套管及绝缘子	65

复习思考题	68
第六章 电气设备绝缘的检查性试验	69
第一节 绝缘电阻和吸收比测量	69
第二节 直流泄漏电流的测量	75
第三节 介质损耗角正切 ($\tan\delta$) 的测量	76
第四节 局部放电的试验与测量	81
复习思考题	83
第七章 电气设备绝缘的耐压试验	85
第一节 工频交流耐压试验	85
第二节 直流耐压试验	90
第三节 稳态高电压的测量	94
第四节 绝缘在线监测技术	98
复习思考题	100
第八章 雷电过电压	101
第一节 雷电放电及雷电参数	101
第二节 防雷保护装置	103
第三节 接地装置	113
复习思考题	117
第九章 输电线路的波过程	118
第一节 波沿无损单导线线路的传播	118
第二节 波沿平行多导线系统的传播	125
复习思考题	127
第十章 变压器绕组中的波过程	128
第一节 直角波电压作用于单相变压器绕组	128
第二节 变压器绕组的内部保护	131
复习思考题	132
第十一章 输电线路防雷	133
第一节 输电线路的感应雷过电压	133
第二节 输电线路的直击雷过电压	135
第三节 输电线路的防雷措施	139
复习思考题	139
第十二章 发电厂和变电站的防雷保护	141
第一节 发电厂和变电站的直击雷保护	141
第二节 变电站的侵入波保护	143
第三节 变压器中性点和配电变压器的保护	146
第四节 旋转电机的防雷保护	147
第五节 气体绝缘变电站的过电压保护	148
复习思考题	150
第十三章 内部过电压	151
第一节 空载长线路的电容效应引起的工频电压升高	151

第二节 操作过电压	154
第三节 谐振过电压	160
复习思考题	167
第十四章 电力系统绝缘配合	168
第一节 绝缘配合的原则	168
第二节 线路绝缘水平的确定	170
第三节 电气设备绝缘水平的确定	171
复习思考题	172
附录	173
参考文献	175

第一章

绝缘电介质的基本特性

高压电气设备中大量采用了固体、液体和气体等各种形式的绝缘电介质,来隔离不同的电位。各种电介质在电场作用下都会发生极化、导电和损耗等物理现象,在强电场作用下还会发生击穿。电介质的这些基本特性与介质的自身特征有关,也与外加电场、环境以及加工工艺等有关。合理选用和正确应用各种电介质,可以保证设备绝缘的长期电气强度及其合理寿命。

第一节 电介质的极化特性

电介质可分为中性介质和极性介质两类。无论哪一类介质在无外电场作用下,介质本身对外不呈现电性。一旦加入外电场后,中性介质的分子内原为互相束缚的电荷按所受电场力的方向发生弹性位移,即正电荷沿电场方向移动,负电荷逆电场方向移动,电场越强,位移越大。而极性介质的偶极子在电场力的作用下发生转向,顺电场方向作有规则的排列,形成电矩。这样原来对外不显电性的电介质两端出现了等量异号电荷,使电介质呈现电性。这种现象称为电介质的极化。

一、极化的基本形式

电介质的极化形式按其物质结构的不同可分为四类:

1. 电子式极化

原子结构的中性介质在无外电场作用时,原子中的正负电荷作用中心重合,如图 1-1 (a) 所示,此时电矩为零,对外不呈现电性。图 1-1 (b) 是在外电场作用下的原子,此时电子的轨道发生了变形位移,其作用中心与原子核的正电荷不再重合,荷正电的原子核向电场方向位移,荷负电的电子逆电场方向位移,形成电矩。这种由电子位移形成的对外电性称为电子式极化。

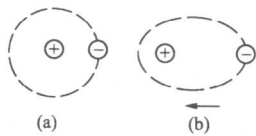


图 1-1 电子式极化
(a) $E=0$; (b) $E \neq 0$

电子式极化属于弹性极化,当外电场去掉以后,由于正、负电荷的相互吸引力会自动回复到原来的中性状态,因而这种极化是没有能量损耗的。此外由于电子的质量很小,极化完成的时间极短,约为 $10^{-15} \sim 10^{-14}\text{s}$,因而在各种频率的外电场作用下都能产生电子式极化。

温度对极化存在两种不同的影响,当温度升高时,电子与原子核的结合力减弱,极化略有加强;但温度升高时,介质膨胀,单位体积内质点数减少又使极化减弱。在这两种相

反的作用中，后者略占优势，所以温度升高时极化程度略有下降。

电子式极化存在于所有气体、液体和固体电介质中。

2. 离子式极化

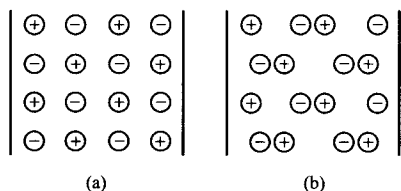


图 1-2 离子式极化

(a) $E = 0$; (b) $E \neq 0$

固体无机化合物多属于离子式结构，如云母、陶瓷材料等。当无外电场作用时，每个正、负离子的作用中心互相重合，故不呈现电性，如图 1-2 (a) 所示。在外电场作用下，正、负离子随电场方向发生相对位移，作用中心不再重合，形成极化，如图 1-2 (b) 所示。这种极化称为离子式极化。

离子式极化基本上也是一种弹性极化，故不引起损耗。因为这种极化的过程极短，约为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$

s，所以极化不随外电场的频率而变化。

温度对离子式极化存在两种不同的影响，温度升高时，离子间的结合力减弱使极化程度增加；而离子的密度随温度的升高则减小，又使极化程度降低。但前者的影响较大，所以这种极化是随温度的升高而增大的。

3. 偶极子极化

对于极性电介质如蓖麻油、松香、橡胶、胶木等，由于分子中正负电荷的作用中心不重合，单个分子已具有偶极矩，但由于不停的热运动，使各分子偶极矩方向排列混乱，对外不呈现电性，如图 1-3 (a) 所示。当外电场作用时，偶极子发生转向，并顺电场方向作有规则的排列，如图 1-3 (b) 所示，对外显现出电性。这种极化叫偶极子极化。

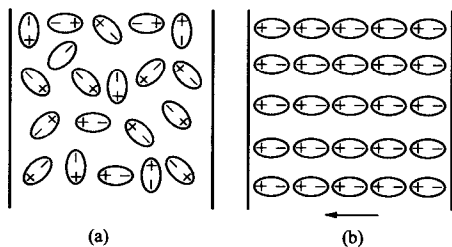


图 1-3 偶极子极化

(a) $E = 0$; (b) $E \neq 0$

极性分子在转向时要从电场中吸取能量，克服分子间的吸引力和摩擦力，所以偶极子极化是有损耗的。此外这种极化建立的时间较长，约为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ s，甚至更长，故与电场频率有较大的关系。频率很高时，偶极子来不及跟随外电场转动而使极化减弱。

温度对偶极子极化的影响较大，温度升高时，分子的热运动妨碍偶极子沿电场取向，使极化减弱；但温度很低时，由于分子间的结合力较大，偶极子转向困难，极化也减弱。

4. 夹层式极化

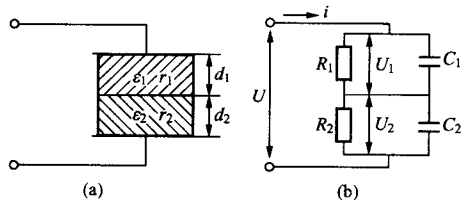


图 1-4 双层介质平板电容器及其等值电路

上面所述的极化形式都是由正负电荷的弹性位移或转向形成的，而夹层式极化是由带电质点的移动造成的。在高压电气设备的绝缘介质中，往往由几种不同特性的介质所组成，或介质本身是不均匀的，在这种情况下会产生夹层式界面极化现象，称为夹层式极化。

为了便于分析，现以平行平板电极间的双

层介质为例，如图 1-4 (a) 所示。图中两层介质在电场作用下都产生了极化，由于介质特性不相同（或者不均匀），它们的极化程度也不同，在两层介质的交界面处积聚的电荷量不相等，夹层中出现了电荷堆积。如图 1-4 (b) 所示，设 $C_1 = 1$ 、 $C_2 = 2$ 分别为介质 1 和 2 的电容， $R_1 = 1$ 、 $R_2 = 2$ 分别为介质 1 和 2 的电阻， U_1 、 U_2 分别为介质 1 和 2 上的直流电压。当对介质加上直流电压 $U = 3$ 的瞬间（ $t = 0$ 时），介质上的电压由零很快上升到 U ，介质 1 和 2 上的电压分别按电容反比分配，即

$$U_1 \Big|_{t=0} = 2, U_2 \Big|_{t=0} = 1 \quad (1-1)$$

C_1 和 C_2 中的电荷量均为 $Q_1 = Q_2 = Q = 2$ ，介质的等值电容为 $C'_{eq} = \frac{Q}{U} = \frac{2}{3}$ 。当介质充电稳定后，各介质上的电压按电阻正比分配，即

$$U_1 \Big|_{t=\infty} = 1, U_2 \Big|_{t=\infty} = 2 \quad (1-2)$$

此时 C_1 和 C_2 中的电荷量不等，并分别为 $Q_1 = C_1 U_1 = 1$ ， $Q_2 = C_2 U_2 = 4$ 。两介质分界面上出现了剩余电荷 $Q = 4 - 1 = 3$ ，介质的等值电容增大为 $C''_{eq} = \frac{Q_2}{U} = \frac{4}{3}$ 。由此可见夹层的存在使得两介质夹层界面上出现了电荷的堆积和介质等值电容的增大，这就是夹层式极化效应。

两层介质从起始电压分布过渡到稳态电压分布，是通过介质的等值绝缘电阻 R_1 来完成的。 C_1 在初瞬开始通过电阻 R_1 放掉部分电荷，降低介质 1 上的电压；而 C_2 将从电源再吸收一部分电荷。这样在介质交界面处必然发生电荷的移动。由于绝缘介质的等值电阻通常很大，充放电过程极其缓慢，即吸收过程很长，所需完成时间从几十分之一秒到几分钟，甚至更长。由于电阻的存在，极化过程伴有能量损耗。

二、相对介电系数

设真空中的平行平板电容器作用有直流电压 U ，这时极板上有正负电荷，其电荷量为 Q_0 ，电容量为

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1-3)$$

式中 A ——极板面积， cm^2 ；

d ——极间距离， cm ；

ϵ_0 ——真空的介电系数， $8.86 \times 10^{-14} \text{F/cm}$ 。

如图 1-5 (a) 所示。然后在两极板之间插入一块固体介质（厚度与极间距离相等），施加同样的电压 U ，由于介质极化的结果，极板上的电荷量增加到 $(Q_0 + Q')$ ，如图 1-5 (b) 所示。

其中 Q' 为在外加电压的作用下，介质中原来作用中心重合的正负电荷产生位移，形成电矩，使介质表面出现了束缚电荷，此时的电容量为

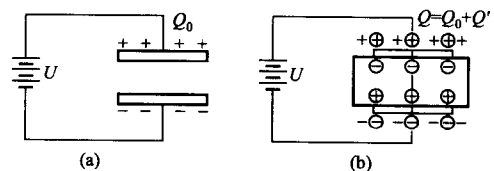


图 1-5 极化现象

(a) 极间为真空；(b) 极间放入介质

$$C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1-4)$$

式中 ϵ ——介质的介电系数；

$$\text{令} \quad \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0}$$

ϵ_r 称为介质的相对介电系数。各种气体的 ϵ_r 均接近于 1，常用的液体和固体介质的 ϵ_r 则各不相同，大多数在 2~6 之间。几种常用电介质的相对介电系数如表 1-1 所示。

表 1-1 几种电介质的相对介电系数

材料类别		名称	相对介电系数 ϵ_r (工频, 20℃)
气体介质 (标准大气条件)		空气	1.00058
液体介质	弱极性	变压器油	2.2~2.5
		硅有机液体	2.2~2.8
	极性	蓖麻油	4.5
		氯化联苯	4.6~5.2
	强极性	丙酮	22
		酒精	33
		水	81
固体介质	中性或弱极性	石蜡	2.0~2.5
		聚苯乙烯	2.5~2.6
		聚四氟乙烯	2.0~2.2
		松香	2.5~2.6
		沥青	2.6~2.7
	极性	纤维素	6.5
		胶木	4.5
		聚氯乙烯	3.0~3.5
	离子性	云母	5~7
		电瓷	5.5~6.5

相对介电系数在实际工程应用中具有重要意义。在选择高压电气设备的绝缘材料时，通常要有目的地选择电介质的 ϵ_r 值。例如：选择电容器的绝缘材料，一方面要注意电气强度，另一方面希望电介质的 ϵ_r 值要大，这样可以提高电容器单位容量的比电容值；但也有希望电介质的 ϵ_r 值要小一些的场所，例如减小电缆绝缘的 ϵ_r 可使电缆工作时的充电电流减小。

对于串联介质而言，交流电压作用下各介质的电场强度是按介电系数成反比分布的，即 $\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$ 。这种情况下必须注意各种介质的 ϵ_r 值的配合，在充分满足介质的抗电强度条件下，尽可能使各介质中的电场分布趋于合理。

第二节 电介质的电导特性

电介质并不是理想的绝缘体，在电场的作用下仍然会有一定的电流流过，这就叫做电介质的电导。不过电介质的导电能力比导体的小得多。表征电介质电导大小的物理量是电导率 γ 。

气体电介质的电导是由电离出来的自由电子、正离子和负离子等在电场作用下移动而

造成的。液体和固体电介质的电导是由化学分解或热分解形成的带电质点造成的，是离子式电导，而金属电导则是电子式电导。

一、气体电介质的电导

当气体中无电场存在时，由于大气中高能光子的辐射作用，在每一立方厘米气体中每秒钟大约产生一对离子。在不断产生离子对的同时，也存在离子对的不断复合，平衡状态时的离子浓度约为 $500 \sim 1000$ 对/cm³。当有电场作用后，这些离子会沿电场方向运动形成电流。电流密度 j_s 随电场强度 E 的大小而变化。当 E 很小时， j_s 大致随 E 的增加而成正比增加，如图 1-6 中 I 区所示。当 E 进一步增加，辐射作用产生的离子全部参与导电时， j_s 趋于饱和，如图 1-6 中 II 区所示。在这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 值后，气体电介质将发生碰撞电离，使电流密度迅速增大，最后使气隙击穿，如图 1-6 中 III 区所示。

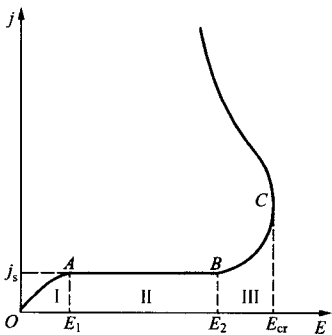


图 1-6 气体电介质的
电流密度与场强的关系

二、液体电介质的电导

液体电介质中构成电导的因素主要有两种：一种是液体本身的分子和杂质分子离解为离子，构成离子电导，另一种是液体中的胶体质点吸附电荷后形成的荷电粒子，构成电泳电导。

中性液体的离子电导，主要是由杂质离子所构成。极性液体除杂质离子外，还有液体本身分子所形成的离子，所以电导率较高。水和酒精等强极性液体，本身电导已很大，不能作为绝缘。几种液体介质的电导率如表 1-2 所示。

表 1-2 几种液体介质的电导率

液体名称	结构特性	20℃时的电导率 γ (S/cm)
变压器油 硅有机液体	中性或弱极性	$10^{-15} \sim 10^{-12}$ $10^{-15} \sim 10^{-14}$
蓖麻油 氯化联苯	极性	$10^{-13} \sim 10^{-12}$ $10^{-12} \sim 10^{-10}$
丙酮 酒精 蒸馏水	强极性	$10^{-7} \sim 10^{-6}$ $10^{-7} \sim 10^{-6}$ $10^{-6} \sim 10^{-5}$

纯净液体在较低的电场作用下，其导电粒子主要是微量杂质所解离的离子、自然界的各种射线对液体产生的电离作用以及液体分子在接触电极时所形成的带电离子，这些带电离子在电场作用下作迁移运动形成电流，其大小是由离子的浓度和迁移率来决定的。此时的液体介质具有一定的较低的体积电导率，作用电场和流过介质的电流密度满足欧姆定律。通常所说的液体介质电导率都是按这个范围来定义的。当外加电场急剧增

加后介质进入高电场电导区，此时由于高电场的作用，液体分子或杂质分子的解离度随外加电场急剧增加；电极在高电场下逸出电子；液体中的电子在高电场作用下被加速而发生碰撞电离；如外加电场达到强电场时，还会发生液体分子的碰撞电离。以上各种离子的产生形式将导致介质中的电导剧增，介质中的电流剧增，直至介质被破坏。

影响工程用液体介质电导的因素除了与外加电场有关外，外界影响因素主要是杂质和

温度。由于杂质的离子数较多，使介质内产生带电质点，所以当介质中的杂质增多时，会使介质的电导明显地增加。杂质中以水分的影响为最大，因水分内带电质点很多，本身电导较大，水分还能使介质内的另一些杂质（如盐类、酸类等物质）发生水解，从而大大增加介质的电导。所以电气设备的绝缘在运行前要进行干燥处理，运行中要采取各种措施防潮。当油中杂质太多而不能再用时，也可以进行再生处理，使它恢复绝缘性能。

温度对介质电导的影响很明显。温度升高时，介质本身和介质内所含杂质离解的程度加剧，离子的数目增多，与此同时，温度升高，介质内部黏度减小，在一定电场作用下，带电质点的运动加快，使得介质的电导随温度的升高而增大。实验及理论均已证明，介质的电导率 γ 随温度的变化具有指数规律，即

$$\gamma = Ae^{-\phi/kT} \quad (1-5)$$

式中 A ——常数，与液体性质有关；

T ——绝对温度，K；

ϕ ——电导率的活性化能量，对矿物油、硅油来说， $\phi \approx 0.41$ eV；

k ——波尔兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

这一结果与金属电导的情形正好相反，金属电导随温度上升具有负温度系数，即金属温度上升后的热运动阻碍了自由电子的定向运动，使电导减小；而介质中温度越高，参与导电的离子越多，电导电流越大，所以介质电导具有正的温度系数。这也是离子电导与电子电导的显著不同点。

三、固体电介质的电导

具有中性分子的固体电介质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。由于固体介质本身的离子电导很小，所以一般在温度不是很高的情况下，总是杂质离子电导起主要作用。

固体介质在外加电场的作用下，介质的内部有电流流过，这是固体介质的体积电导。固体介质内形成电导的带电质点包括：在高电场作用下从电极逸出的电子；介质中的杂质和介质本身由于电场和热的作用而离解产生的离子以及传导电子、空穴等。通常认为在低电场范围内（常用介质的工作范围）以离子电导为主，高电场范围内以电子电导为主。低电场电导区里如果离子的浓度和运动速度一定时，其电流密度和电场强度成比例。几种固体介质的电导率如表 1-3 所示。

干燥、清洁的固体介质表面电导是很小的，因为表面电导主要是由附着于介质表面的水分和其他污物引起。介质表面极薄的一层水膜就能造成明显的电导，水膜越厚则电导越大。如果水分之外又有污物，则表面电导将极为显著地增大。虽然表面电导主要决定于外界的因素，但由于各种材料吸附水分的能力不同，所以还是应该将表面电导看作是介质本身的一种性能。

中性和弱极性介质，如石蜡、聚苯乙烯、聚乙烯、硅有机物等，它们吸附水分的能力比较弱，水分只能在它们的表面形成不连续的水珠。这种介质称为憎水性介质，其表面电导很小。

表 1-3 几种固体介质的电导率

固体介质名称	20℃时的电导率 (S/cm)	
	相对湿度 0%	相对湿度 70%
聚乙烯、聚苯乙烯、聚四氟乙烯	$10^{-17} \sim 10^{-18}$	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
纤维板	10^{-14}	$10^{-8} \sim 10^{-9}$
纸	$10^{-16} \sim 10^{-17}$	$10^{-9} \sim 10^{-10}$
白云母	$10^{-15} \sim 10^{-16}$	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
普通玻璃、电瓷	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
硬橡胶	$10^{-16} \sim 10^{-17}$	$10^{-16} \sim 10^{-17}$

电瓷类的介质表面能被水浸润，但如果表面无脏污，即使在潮湿环境仍能保持相当小的电导率。

有的介质部分溶于水，如含碱金属玻璃，介质中的碱金属离子会进入水膜，增加水的电导率，甚至丧失其绝缘性能。

多孔性介质在潮湿环境中，不仅表面电导大，而且体积电导也大（水分浸入内部），如纤维材料就属于这一类。

对于防潮性能较差的绝缘结构，必须采取表面防潮处理措施，这样可有效地降低表面电导。如表面涂覆硅有机物或地蜡的绝缘子，在污秽地区使用已取得良好效果。又如某些脉冲电容器的胶纸外壳受潮后，表面电导急剧增大，无法使用，当刮去表面漆层并刷上环氧漆干燥后，即可继续使用。

并不是所有情况下都要求介质的表面电导小，在某些特殊场合要设法提高其电导。如在高压套管的法兰附近涂上半导体釉，高压电机定子绕组出槽口部分涂上半导体漆等，可起到改善电压分布，消除电晕的作用。

第三节 电介质的损耗特性

由前述电介质的极化和电导特性可以看出，在外加电压作用下，电介质中存在着能量损耗。一种是介质极化时产生的极化损耗，如偶极子极化和夹层极化；另一种是由介质电导产生的电导损耗。电介质的能量损耗简称为介质损耗。

一、电介质的损耗与 $\tan\delta$

在直流电压的作用下，由于介质中没有周期性的极化过程，因此不存在极化损耗，而只有电导损耗。当外施电压较低，不足以引起介质中发生局部放电时，介质的损耗仅由电导决定，此时用介质的体积电导率或表面电导率这两个物理量已能够清晰表达。但在交流电压作用下，还存在由周期性极化而引起的极化损耗，用电导率这样的物理量来表达已经不能满足，需要引入新的物理量来描述。

1. 介质的等值电路

在交流电压作用下，介质的极化损耗和电导损耗都是存在的，可用三个并联支路的等值电路来表示，如图 1-7 (a) 所示。

当取外施电源电压作为参考向量时，各电流的向量分布如图 1-7 (b) 所示。由于存在有损耗的电流，故回路总电流 I 与无损极化电流 I_c 之间存在夹角 δ 。

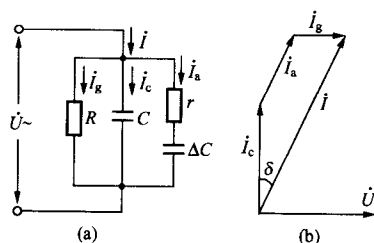
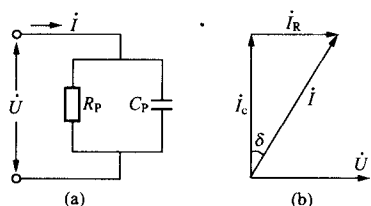


图 1-7 介质在交流电压作用下的等值电路及向量图

$\dot{I}_c$ —无损极化时的电流；
 $\dot{I}_a$ —有损耗极化时的电流；
 $\dot{I}_g$ —电导电流



对上述电路转换处理后可得到图 1-8 (a) 的 RC 并联电路。介质两端施加交流电压 U 时, 由于介质中有损耗, 它的总功率中包括有功和无功两个分量, 即电源供给的视在功率为

$$W = P + jQ = U(I_R + jI_c) = UI_R + jUI_c \quad (1-6)$$

图 1-8 并联等值电路及向量图 式中 I_R ——流过电阻 R_P 的有功电流;

I_c ——流过电容 C_P 的无功电流。

由图 1-8 (b) 的电流三角形可见, 介质的有功功率损耗为

$$P = UI_R = UI_c \tan \delta = U^2 \omega C_P \tan \delta = Q \cdot \tan \delta \quad (1-7)$$

2. 介质损失角正切值 $\tan \delta$

用介质损耗 P 表示介质的好坏是不方便的, 因为它与试验电压、被试品尺寸等因素有关, 不同的被试品难于互相比。由式 (1-7) 可见, 对于一定尺寸结构的设备 (这时 C 为一定值), 当所加电压的频率和大小一定时, 介质损耗 P 的大小与介质损失角的正切值 $\tan \delta$ 成正比, 即 $\tan \delta$ 的大小反映了介质损耗的大小。所以改用介质损失角的正切 $\tan \delta$ 来判断介质的品质, 如同 ϵ_r 一样, 只取决于材料的特性, 而与材料的尺寸无关。

有损介质可以用上述的并联等值电路或图 1-9 所示的串联等值电路来表示。对于并联等值电路来说, 其介质损失角的正切值为

$$\tan \delta = \frac{P}{Q} = \frac{U/R_P}{U\omega C_P} = \frac{1}{\omega C_P R_P} \quad (1-8)$$

有功损耗值为

$$P = \frac{U^2}{R_P} = U^2 \omega C_P \tan \delta \quad (1-9)$$

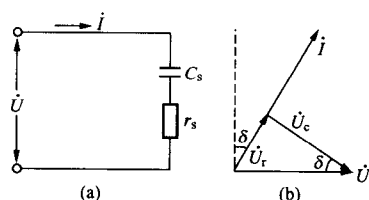


图 1-9 串联等值电路及向量图

对于串联等值电路来说, 其介质损失角的正切值为

$$\tan \delta = \frac{I r_s}{I/\omega C_s} = \omega C_s r_s \quad (1-10)$$

有功损耗值为

$$P = I^2 r_s = \frac{U^2 r_s}{r_s^2 + (1/\omega C_s)^2} = \frac{U^2 \omega^2 C_s^2 r_s}{1 + (\omega C_s r_s)^2} = \frac{U^2 \omega C_s \tan \delta}{1 + \tan^2 \delta} \quad (1-11)$$

对于同一介质用不同的等值电路表示时, 其等值电容是不相同的。因上述两电路中的有功损耗值相等, 所以可以计算出

$$C_P = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta} \quad (1-12)$$

一般情况下, 由于绝缘介质的 $\tan \delta$ 都很小, $1 + \tan^2 \delta \approx 1$, 故 $C_P \approx C_s = C$ 。这种情况下, 损耗在两种等值电路中都可以用同一公式表示, 即 $P = U^2 \omega C \tan \delta$ 。

在电工中使用的电介质, 从介质损耗这一角度看, 要求它的 $\tan \delta$ 值越小越好。一些

常用液体和固体电介质在工频电压下 20℃时的 $\tan\delta$ 值如表 1-4 所示。

二、 $\tan\delta$ 与频率、温度及电压的关系

表 1-4 常用液体和固体电介质
在工频电压下 20℃的 $\tan\delta$ 值

电介质	$\tan\delta$ (%)	电介质	$\tan\delta$ (%)
变压器油	0.05 ~ 0.5	聚乙烯	0.01 ~ 0.02
蓖麻油	1 ~ 3	交联聚乙烯	0.02 ~ 0.05
沥青云母带	0.2 ~ 1	聚苯乙烯	0.01 ~ 0.03
电瓷	2 ~ 5	聚四氟乙烯	< 0.02
油浸电缆纸	0.5 ~ 8	聚氯乙烯	5 ~ 10
环氧树脂	0.2 ~ 1	酚醛树脂	1 ~ 10

不同介质的损耗特性是不同的，当不考虑电导电流所引起的损耗时，某一介质的 $\tan\delta$ 在同一温度下与电源频率的关系如图 1-10 所示。频率较低时， $\tan\delta$ 随频率的升高而增大，在某一频率下 $\tan\delta$ 达到最大值。当频率超过该值后， $\tan\delta$ 随频率的升高反而减小。这是因为在一定的频率范围以内，随着频率的升高，介质中偶极子沿电场方向转向的速度加快，极化程度加强，介质损耗增大，而出现最大值。频率再高时，偶极子由于本身的惯性及相互间的摩擦作用，已来不及随电源的变化而转动，极化反而减弱，损耗下降。在电力系统的绝缘试验中，电源频率固定为 50Hz，一般只有微小的变化，应视为对 $\tan\delta$ 没有影响。

介质损耗与温度的关系随介质特性的不同有显著差异。中性或弱极性介质的损耗主要是由电导产生的，所以 $\tan\delta$ 随温度升高而增大。对于极性介质，其损耗包括极化损耗和电导损耗两部分，故 $\tan\delta$ 与温度的关系较复杂，如图 1-11 所示。在温度 t_1 以前，温度低时电导损耗和偶极式极化损耗都较小，随着温度升高两种损耗均增大，到 t_1 时达到最大。之后温度继续升高，由于分子热运动妨碍偶极式极化，极化损耗减小，而且极化损耗减小的程度超过电导损耗随温度上升而增加的程度，所以总的介质损耗反而下降。到 t_2 以后，电导损耗上升为主要因素，故介质损耗又随温度的上升而增加。

当外加电压升高时， $\tan\delta$ 并不发生变化，只有当电压升高到超过气体的起始放电电压值，使介质中的气泡发生电离时，介质中产生了附加的由局部放电产生的电离损耗， $\tan\delta$ 才急剧增加。因此在较高电压下测量 $\tan\delta$ 值，可以检查出介质中夹杂有气隙或龟裂等缺陷来。

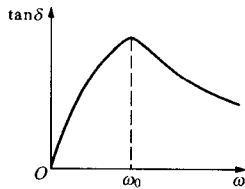


图 1-10 介质在一定温度下， $\tan\delta$ 与角频率的关系

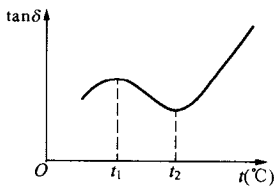


图 1-11 极性介质 $\tan\delta$ 与温度的关系

复习思考题

1. 电介质的极化有哪些基本形式？它们各具有什么特点？