

第一章 电气绝缘基本知识

【学习目标】

- 了解供配电系统中电气绝缘材料（电介质）的作用；
- 了解常用电介质的种类及使用特点；
- 能够理解并分析电介质在电场作用下发生的极化、游离、电导等变化过程；
- 能够区分出电介质电导和金属导体电导的不同；
- 能够对不同形态的电介质进行击穿试验。

【基本知识模块】

第一节 气体电介质的极化、电导和损耗

一、电介质的极化

在标准大气条件下，气体电介质是以中性状态存在的。由原子物理学可知，自然界中组成物质的最基本结构是原子或分子。原子是由内层带正电的原子核和核外绕着原子核飞速旋转的电子组成的，由于电子的质量很轻，正负电荷依靠电荷间的吸引力保持在稳定状态，并相距一定的距离，故原子整体呈电中性。

但是在外加电场作用下，电介质内部的外层电子吸收电源能量后，会发生一系列的结构变化，最终造成电介质击穿，甚至造成电气绝缘由于过热而损坏。那么，电介质为什么会由最初良好的绝缘性能到最后丧失绝缘性能而造成变形、融化甚至击穿呢？我们从电介质在电场作用下发生的一系列的变化过程来了解其击穿的原因。

（一）电介质的极化

正常情况下，任何电介质都是呈电中性的。但在电场作用下，其电荷质点就会沿电场方向产生有限的位移，这种现象称为电介质的极化。

图 1.1 所示为一平行板电容器，极板面积为 A ，距离为 d ，电极间所加电压为直流电压 U_0 。当极板间为真空时，电压 U 对真空电容器充电，极板上出现的电荷为 Q_0 。此时电容器的电容值 C_0 为



图 1.1 介质极化示意图

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

式中， A ——极板面积，cm；

d ——极板距离，cm；

ϵ_0 ——真空的介电常数， $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-14} \text{F/cm}$ 。

然后将一块厚度为与极间距离 d 相同的固体介质放于电极间，施加同样的电压，测得极板上的电荷增加到 $Q = Q_0 + \Delta Q$ ，这就是由电介质极化造成的。因为在外加电压作用下，介质中的正、负电荷产生位移，形成电矩，在极板上另外吸住了一部分电荷 ΔQ ，所以极板上电荷增加了。此时电容值 C 为

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

式中 ϵ ——介质的介电常数。

显然， $C > C_0$ 。

定义：

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

称为相对介电常数。它是充满电荷时的几何电容和真空时的静电电容的比值。各种气体的 ϵ_r 均接近于 1，而常用的液体和固体电介质的 ϵ_r 多在 2~6，根据温度、电源频率的不同而各不相同，并和各种极化形式有关。

(二) 极化的形式

当加上外加直流电压后，电场方向确定。正电荷在电场中受力方向沿着电场方向，电子受力方向是相反方向。因此，两种电荷在相反方向的电场力作用下会发生相对偏移，经过一段时间后，在不同的位置，正负电荷间的距离会伸长或缩短，如图 1.2 所示。在这种情况下，原子内部不再是不带电的中性状态，而是对外显示一定的极性。这种过程叫电介质的极化。根据组成分子的物质结构不同，极化可分为电子式极化、离子式极化、偶极子式极化和空间电荷极化。

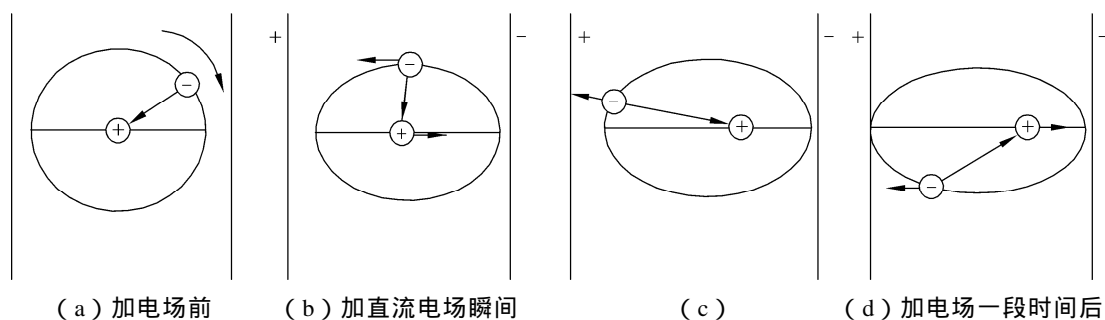


图 1.2 电介质外加电场后正负电荷的运动变化

1. 电子式极化

分子或原子结构的单质，在没有外电场作用时，如前所述，外层电子在内部原子核对其吸引力作用下（由于其质量很小，所以电子的质量可忽略不计），绕着原子核做高速旋转，相当于外层电子做圆周运动，它在任何时刻的轨迹就是沿圆周运动，正电荷的作用中心与负电荷的作用中心重合，原子对外不显极性，如图 1.3 (a) 所示；有外电场作用时，电子运动轨道发生变形，并且与原子核间发生相对位移，正电荷作用中心与负电荷作用中心不再重合，如图 1.3 (b) 所示。这种由电子发生相对位移形成的极化称为电子式极化。

电子式极化存在于一切电介质中。它的特点是：

极化时间极短，约 10^{-15} s。

极化过程中没有能量损耗。外加电场，极化发生；去掉外加电场后，由于正、负电荷之间极强的吸引力（由于电子质量很小，重力可忽略不计）外层电子将自动回到原来的能级轨道上运动，即中性状态，故没有能量损耗。

温度对极化影响很小。

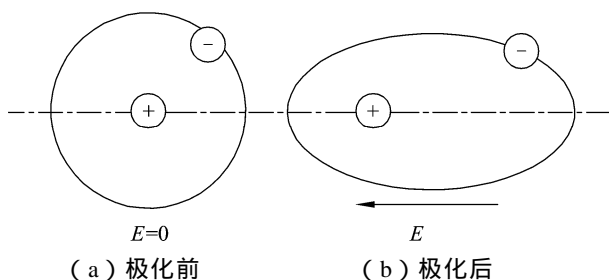


图 1.3 电子式极化

2. 离子式极化

离子式极化发生于离子结构的电介质中。固体无机化合物（如云母、陶瓷、玻璃等）的分子多属于离子结构。在无外电场作用时，电介质内大量离子对在内部做无规则的热运动，偶极矩互相抵消，平均偶极矩为零，电介质对外没有极性。在外加电压作用下，正、负离子沿电力线在各自所受的电场力作用下向相反方向发生位移，正、负电荷的作用中心发生偏移，平均偶极矩不再为零，电介质对外显示极性。这种由离子的位移形成的极化称为离子式极化，如图 1.4 所示。

离子式极化的特点是：

极化所需时间很短，约 10^{-13} s。

极化过程中没有能量损耗。

温度对极化过程有影响。温度升高时，一方面离子间的结合力降低，使极化程度增大；另一方面离子的密度降低，又使极化程度降低。一般前者的影响大于后者，所以这种极化的极化程度随温度的升高而增大。

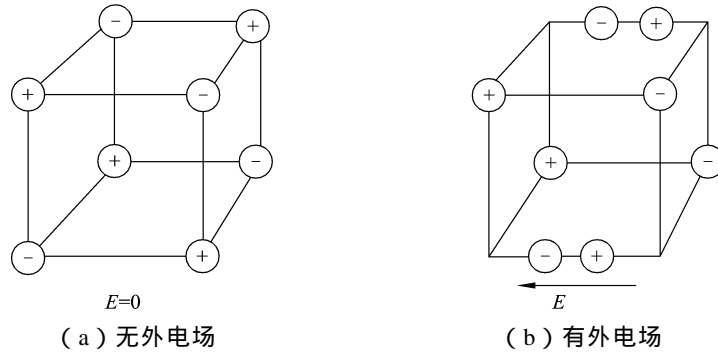


图 1.4 离子式位移极化

3. 偶极子式极化

极性电介质的分子本身就是一个偶极子。在没有外电场作用时，单个的偶极子虽然具有极性，但内部无数的偶极子均处于无规则的热运动中，排列毫无规则，相互作用抵消，整个电介质对外显示电中性。在外加电压作用时，偶极子受电场力作用发生转向，并沿电场方向定向排列，整个电介质的偶极矩不再为零，对外显示出极性。这种由偶极子转向形成的极化称为偶极子式极化，如图 1.5 所示。

偶极子式极化的特点是：

极化所需时间较长，为 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ s，极化程度与外加电压的频率有较大关系，频率较高时，极化减弱。

极化过程中有能量损耗。

温度对极化过程影响很大。

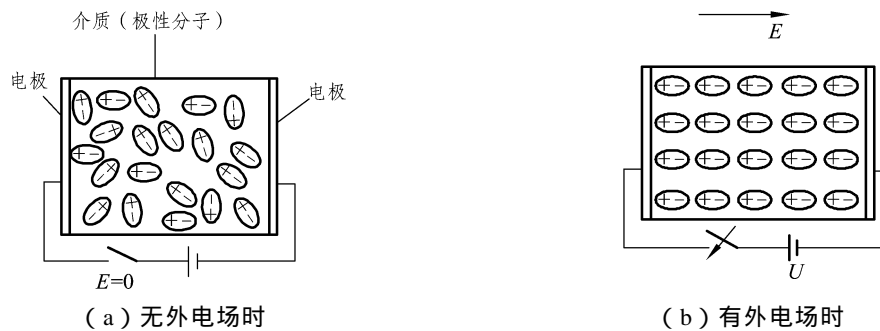


图 1.5 偶极子式极化

4. 空间电荷极化 (夹层式极化)

上述三种极化都是由电介质中束缚电荷的位移或转向形成的, 而空间电荷极化则是由电介质中自由离子的移动形成的。夹层极化是空间电荷极化最常见的一种极化形式。主要表现在不同材料的电介质接触面上, 如交联聚乙烯电缆中塑料、橡胶绝缘层或油纸绝缘分界面上。如图 1.6 所示, 对两层不同材料的电介质 1 和 2, 将直流电压 U 突然加在两平行板电极上, 在开关 K 刚合闸瞬间, 两层介质上的电压分配与各层电容成反比 (突然合闸的瞬间相当于给介质施加很高频率的电压), 即

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} = \frac{C_2}{C_1} \quad (1.4)$$

到达稳态后, 各层电压与电阻成正比, 即与电导成反比。

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=\infty} = \frac{G_2}{G_1} \quad (1.5)$$

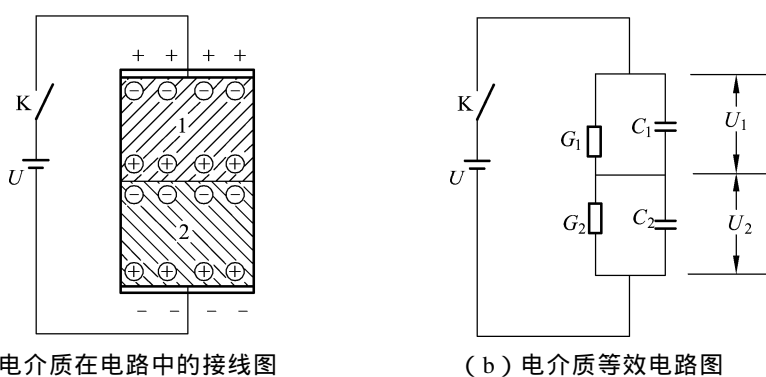


图 1.6 夹层式极化

如介质是单一均匀的, 则 $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2}$, $C_1 = C_2$, $G_1 = G_2$, 则

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=\infty} \quad (1.6)$$

即合闸后, 两层介质之间不会产生电压重新分配过程。

如介质不均匀, 即 $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$, $C_1 \neq C_2$, $G_1 \neq G_2$, 则

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} \neq \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=\infty} \quad (1.7)$$

合闸后, 两层介质之间有一个重新分配电压的过程, 即 C_1 、 C_2 上电荷要重新分配。设 $C_1 > C_2$, $G_1 < G_2$, 则在 $t=0$ 时, $U_1 < U_2$; $t \rightarrow \infty$ 时, $U_1 > U_2$ 。即 $t=0$ 以后, 随时间 t 的增大, U_1 逐渐增大而 U_2 逐渐下降 (因为 $U_1 + U_2 = U$ 是一个常数)。也即 C_2 上一部分电荷要通过 G_2 放掉, 而 C_1 要从电源再吸收一部分电荷, 这一部分电荷称为吸收电荷。由于夹层的存在, 使得在介质分界面上出现吸收电荷, 整个介质的等值电容增大, 这一过程称为吸收过程。吸收过

程完毕，极化过程结束，因而该极化称为夹层式极化。吸收过程要通过 C_1 、 C_2 和 G_1 、 G_2 进行，其放电时间常数为 $\tau = (C_1 + C_2) / (G_1 + G_2)$ 。由于电导 G 的数值很小，因而时间常数 τ 很大，极化过程非常缓慢。当介质受潮、电导增大， τ 将大大降低。假如外加电压频率高，因电荷来不及动作而无极化。同样道理，去掉外加电压之后，介质内部电荷释放也是十分缓慢的。因此，对使用过的大电容量设备，应将两极短接以充分放电，以免过一定时间后吸收电荷陆续释放出来而危及人身安全。

夹层式极化过程中有能量损耗，而且是非弹性极化。

由于电介质长期在电场作用下，因此极化会一直存在。这些极化有些是弹性极化，不消耗电源能量，且电源断开后分子会恢复到中性状态，如第一、二种；有些是非弹性极化，在电压作用时发生极化，使电介质内部分子之间发生相对位移，消耗能量，电源断开后继续保持极化，不会恢复到中性状态。当下一次通电工作后，极化后的正负电荷又会在电场力作用下继续发生相对运动，向纵深发展。如后两种，即偶极子式极化和空间电荷极化，电力工程中使用的高压电气设备绝缘的老化、局部放电、击穿等事故都是由它们引起的。

二、电介质的电导

从电介质的微观结构来看，其内部虽然存在大量的带电质点，但这些带电质点一般是束缚电荷，因为内部原子核有很强的吸引力（分子键）紧紧将外层电子吸引在其周围，外层电子只能紧紧围绕原子核做高速旋转。它们不能在电介质内自由移动，所以不能形成电导电流。但是由于外界游离因素的作用，电介质内常存在部分自由带电质点，正是这些自由带电质点在电场力的作用下做定向运动，使电介质内部有电导电流，使电介质具有一定的导电性。那么，电介质的电导和金属导体的电导过程相同吗？肯定是不同的。电介质导电是依靠电介质内部少量的自由离子，而金属导体导电是依靠金属内部大量的自由电子，因为金属原子分子量大，原子半径大，原子核对外层电子的吸引力小，外层电子吸收能量后很容易逃逸出去形成自由电子，在金属晶格内做无规则热运动。在外电场作用下，这些自由电子沿电场力方向做定向运动，在导体内形成定向电流。因此电介质的电导是离子性电导，金属的电导是电子性电导。

（一）气体电介质的电导

气体电介质的电导主要是气体中少量自由电子在电场力作用下快速定向运动，与更多气体分子发生碰撞，碰撞过程中完成能量交换，使气体分子吸收更多能量后发生游离，游离产生的大量电子在电场力作用下又与起始电子一起向正极板运动，这样气体电介质中就产生电导电流。在外加电压较低时，电荷运动速度慢，电导发展时间长；反之，随着外加电压不断增大，气体分子所受电场力也在不断增大，带电质点快速向正极板运动过程中与越来越多的空气分子发生碰撞，将能量传递给气体分子，最终极板间大量的气体分子发生游离，形成极大的电导电流，气体分子的绝缘性被破坏，导致极板间发生击穿。

气体电介质中的击穿电流与外施电压之间的关系如图 1.7 所示。在 $U < U_A$ 时，电流与电压基本符合欧姆定律，即电流基本上随电压的增大而线性增大。在 $U_A \leq U \leq U_B$ 时，电流呈饱和趋势，即电压升高，电流基本保持不变。在 $U_B \leq U < U_0$ 时，电流随电压的升高而迅速增大。当电压达到气隙的临界击穿电压 U_0 后，气体就转变为良导体状态。

上述过程可解释为：气隙在无电压作用时，由于宇宙射线、地层射线等外界游离因素作用，气隙中会含有一定数量的自由带电质点。在气隙上的电压从零开始增大时，带电质点的速度加快，单位时间内进入电极的带电质点的数量增多，故电流也随着增大。在电压增大到 U_A 后，因单位时间内气隙中产生的带电质点在相同的时间内已全部落入电极，所以电压升高，电流基本不变。在电压超过 U_B 后，气隙中出现了新的游离过程，产生了更多的带电质点，故电流随电压的升高而迅速增大。当电压达到 U_0 时，气隙中出现了大量的带电质点，因而气体就转变为良导体。

在电压 $U < U_B$ 时气隙中的场强较弱，称为低电场区或弱场强区，此时气体的电导很小，只有在强电场区，气体中游离态的带电质点具备了放电过程发展的条件时，气体才会有非常明显的电导。

(二) 液体电介质的电导

在纯净液体电介质中放入平行板电极，回路电流 I 与外施电压 U 的关系如图 1.8 所示。与气体类似，该关系曲线也可分为 a 、 b 、 c 三个区域。其中 a 、 b 为低电场区， c 为高电场区。区域 a 中，电压和电流基本服从欧姆定律，液体电介质的电导率就在此范围内定义的。区域 b 中，电流有饱和趋势但是不太明显。造成这种情况的原因是液体的密度远远大于气体，正负离子相遇的机会多，复合的概率大，不可能所有的离子都运动到电极，而电压增高时复合的概率减少，因而电流有所增大。区域 c 中，液体分子发生了游离，电导迅速增大。

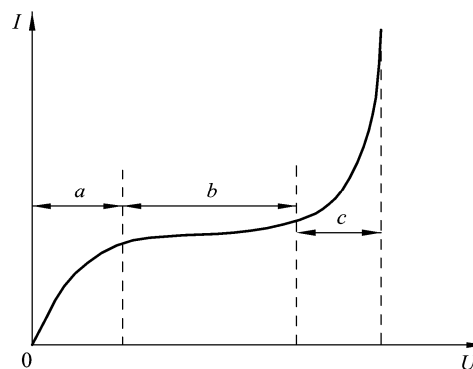
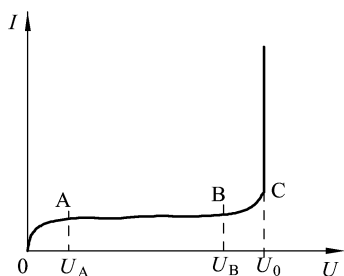


图 1.7 气体电介质中的电流与外施电压的关系 图 1.8 液体电介质中的电流与外施电压的关系曲线

低电场下液体电介质具有一定电导的原因有以下两点：一是液体电介质本身的分子和所含杂质的分子离解为离子，形成离子电导；二是液体中的胶体质点吸附电荷后变为带电质点，形成电泳电导。

中性液体电介质本身的分子不易发生离解，其离子主要来源于杂质分子的离解。极性液

体电介质除杂质外本身的分子也易离解，所以在其他条件相同的情况下，极性液体的电导率比中性液体的要大。

影响液体电介质电导的主要因素除电场强度外还有温度和杂质。温度对液体电介质电导的影响主要表现在两方面：一是温度升高时液体电介质本身的分子和所含杂质的分子的离解程度增大，从而使液体电介质中自由离子的数量增大；二是温度升高时液体电介质的黏度减小，离子在电场力作用下移动时的阻力减小，从而使离子运动的速度加快。由此可见，这两方面的影响都会使液体电介质的电导随温度的升高而增大。杂质是液体电介质中带电质点的重要来源，液体电介质中的杂质含量增大时，将使液体电介质的电导明显增大。

（三）固体电介质的电导

固体电介质的电导分为体积电导和表面电导，它们分别表示固体电介质的内部和表面在电场中传导电流的能力。

中性或弱极性固体电介质的体积电导主要由杂质离解所引起。只有在温度较高或有外界因素（如有高能射线）作用时，其本身的分子才可能发生离解。极性固体电介质的体积电导除由杂质分子离解引起外，本身的分子离解为自由离子也是引起电导的主要因素。离子式结构的固体电介质的体积电导主要是由内部的离子在热运动影响下脱离晶格后的移动所形成的。

影响固体电介质体积电导的因素主要有电场强度、温度和杂质。电场强度较低时，加在固体电介质上的电压与流过的电流服从欧姆定律；电场强度较高时，电流将随电压的升高而迅速增大。温度越高，固体电介质内分子的热运动加剧，热游离程度增强，因此电导增大，杂质对固体电介质的影响主要是由于杂质不具有绝缘性，使固体电介质内部分子的绝缘强度降低，电场发生畸变，降低了电击穿电质。

固体电介质的表面电导主要由附着于介质表面的水分和其他污物引起的。电介质表面极薄的一层水膜就能造成明显的电导。如果除水分外表面还有尘埃、油污、棉麻污秽物质，则因污秽物中所含的盐类电解质溶于水后形成大量的自由电子，将使表面电导显著增大。

固体电介质的表面电导与介质的特性有关。容易吸收水分的电介质称为亲水性介质，水分可以在其表面形成连续性水膜，如玻璃、陶瓷就属于此类。不易吸收水分的介质称为憎水性介质，水分只能在其表面形成不连续的水珠，不能形成连续水膜，如石蜡、硅有机物就属于此类。很显然，憎水性介质的表面电导往往比亲水性介质的小。

三、电介质的损耗

（一）介质损耗的基本概念

在生活中大家都有这样的体会：电动机通电转动一段时间后，电缆线的外绝缘层就会发热，时间长了就会很烫；家用电器在通电工作一段时间后，外壳或者电线的绝缘层就变得很

热。这说明，电介质在电压作用下有能量损耗，一种是由电导引起的损耗，另一种是由有损极化引起的损耗。在直流电压下，由于无周期性极化过程，因此，当外施电压低于局部放电电压时，介质中损耗仍由电导引起，此时用绝缘电阻就足以表达；而在交流电压作用下，除了电导损耗外，还有由于存在周期性极化引起的能量损耗，因此，引入介质损耗这一新的物理量来表达。在交流电压下，电介质的有功损耗称为介质损耗。

(二) 电介质的等值电路及相量图

如图 1.9 所示电路中，在电介质两端施加交流电压 \dot{U} ，由于介质中有损耗，电流 i 不是纯电容电流，可分为两个分量：

$$\dot{i} = \dot{i}_r + \dot{i}_c \quad (1.8)$$

式中 \dot{i}_r ——有功电流分量；
 \dot{i}_c ——无功电流分量。

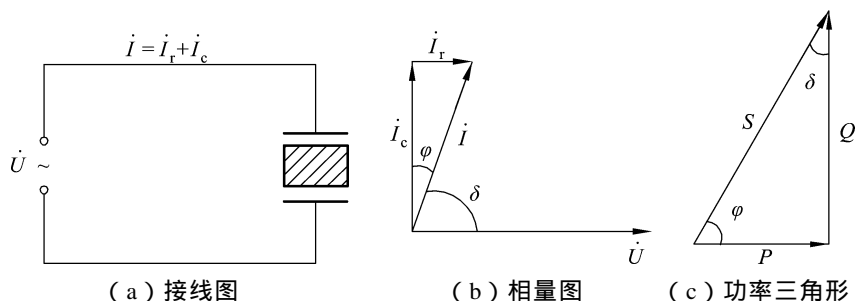


图 1.9 电介质在交流电压作用下的电流相量图及功率三角形

电源提供的视在功率为

$$S = P + jQ = P + jUI_c \quad (1.9)$$

由图 1.9 所示的功率三角形可知，介质损耗为

$$P = Q \tan \delta = U^2 \omega C \tan \delta \quad (1.10)$$

从式 (1.10) 可以看出，介质损耗值与试验电压的平方和电源频率成正比，还与被试品尺寸、放置位置有关，不同试品之间难以进行比较。而当外加电压和频率一定时， P 与介质的物理电容 C 成正比。对一定结构的试品而言，电容 C 是定值， P 与 $\tan \delta$ 成正比，故对同类试品绝缘的优劣，可直接用 $\tan \delta$ 来代替 P 值，对绝缘进行判断。因此，定义 δ 为介质损失角，它是功率因数角 φ 的余角。介质损失角正切值 $\tan \delta$ 取决于材料的特性，而与材料尺寸无关，可以方便地表示电介质的品质。

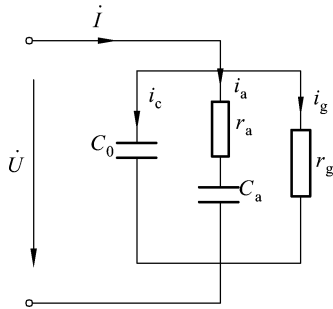


图 1.10 电介质的等值电路

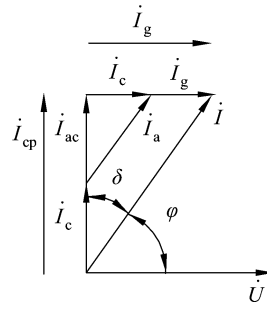
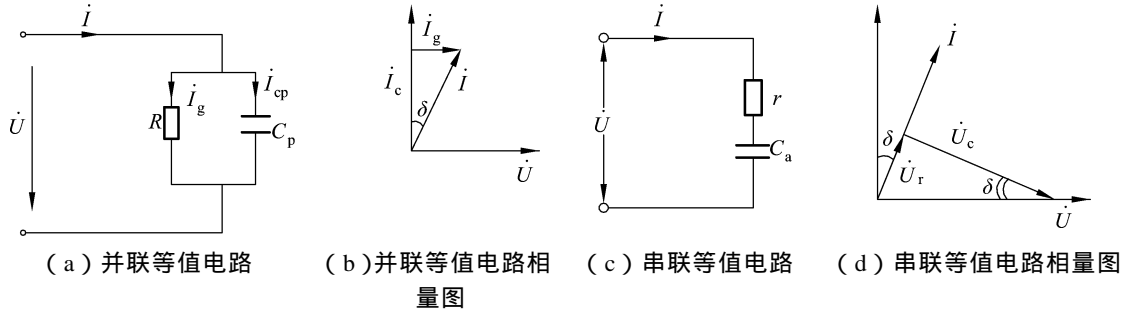


图 1.11 交流电压下电介质的电流相量图



(a) 并联等值电路 (b) 并联等值电路相量图 (c) 串联等值电路 (d) 串联等值电路相量图

图 1.12 有损介质的等值电路和相量图

电介质的等值电路可以用电阻和电容的并联和串联电路来表示。如图 1.12 (a) 所示，可得

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R} \Leftrightarrow R = \frac{1}{\omega C_p \tan \delta} \quad (1.11)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p \tan \delta \quad (1.12)$$

从图 1.12 (c) 中可得

$$\tan \delta = \frac{U_r}{U_c} = \frac{I_r}{I/\omega C_s} = \omega C_s r \quad (1.13)$$

因此 (串联电路中 $I = I_r$)

$$P = I^2 r = \frac{U_2 r}{r^2 + (1/\omega C_s)^2} = \frac{U^2 \omega^2 C_s^2 r}{1 + (\omega C_s r)^2} = \frac{U^2 \omega C_s \tan \delta}{1 + \tan^2 \delta} \quad (1.14)$$

但上述等值电路只有计算上的意义，不能确切地反映介质的物理过程。如果损耗主要是由电导引起的，常使用并联等值电路；如果损耗主要是由介质极化及连接导线引起的，则常采用串联等值电路。但要注意公式 (1.12) 和 (1.14) 中的参数 C_p 、 C_s 意义不同：

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta} \quad (1.15)$$