

高电压技术

第一章 • 气体放电的基本物理过程

1. 定义与公式

带电粒子运动方式：热运动、电场方向定向漂移、扩散；

电离能：使基态原子/分子中结合最松弛的电子电离的最小能量；

电离方式：1. 光电离 $h\nu \geq W_i$

2. 热电离

3. 碰撞电离 $E q_e x \geq W_i$

4. 电极表面的电离

阴极表面电离形式：1. 正离子撞击阴极表面

2. 光电子发射（光子能量大于逸出功）

3. 热电场发射

4. 强场发射

带电粒子消失：1. 形成外电路电流

2. 复合

3. 逸出放电空间

电子碰撞电离系数：一个电子沿电场方向运动 1cm 行程中完成碰撞电离次数平均值

$$I = I_0 e^{\alpha d}$$

饱和电流： n_0 ：外界电离因子每秒使阴极表面发射的初始电子数

$$I_0 = n_0 q_e$$

自持放电：

条件：

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1/\gamma \left(e^{\int_0^d \alpha(x) dx} - 1 \right) = 1$$

电流：

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

正离子表面电离系数 γ ：一个正离子撞击到阴极表面发射的初始电子数

汤逊理论：低气压、短气隙条件下，电子崩与阴极上的 γ 过程为自持放电的决定性因素

$$U_0 = f(pd)$$

气温非恒定条件下修正的巴申曲线：

$$U_b = F(\delta d)$$

$$\delta = 2.9 \frac{p}{T}$$

流注理论：

(1) 空间电荷对原电场的影响：电子崩中部场强减小，电子与正离子浓度大，产生强烈复合并辐射光子；

(2) 空间光电离：初始电子崩产生的二次电子崩与电离使气体持续电离。 $\alpha d = \text{const}$ 时，流注出现。

电场不均匀系数：

$$f = \frac{E_{\max}}{E_{\text{av}}}$$

f=1：均匀电场；<2：稍不均匀电场；>4：极不均匀电场；

皮克公式：电晕起始场强

$$E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}} \right)$$

棒-板气隙极性效应：

正棒放电发展顺利，负棒击穿电压高，击穿时间；

气隙击穿条件：

- (1) 足够大场强或足够高电压；
- (2) 气隙中存在能引起电子崩并导致流注和主放电的有效电子；
- (3) 需要一定时间让放电发展；

沿面放电：沿固体介质表面发展的气体放电；

2. 课后题

1-1 解释下列术语：

- (1) 气体中的自持放电；
- (2) 电负性气体；
- (3) 放电时延；
- (4) 50%冲击放电电压；
- (5) 爬电比距。

解：气体中的自持放电：外加电场足够强时，在外加激励源撤去后，两电极仍能维持放电状态的现象；

电负性气体：电子与某些气体分子碰撞时易产生负离子，这样的气体分子组成的气体；

放电时延：电极两端有外加电压，在放电前需要时间形成电子崩产生的时延；

50%冲击放电电压：电极间有 50%概率放电时，对应的冲击电压；

爬电比距：两电极间的沿面最短距离与所加电压的比值。

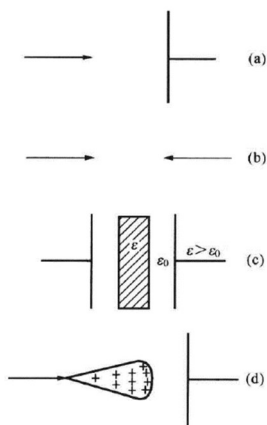
1-2 汤逊理论与流注理论对气体放电过程和自持放电条件的观点有何不同？这两种理论各适用于何种场合？

解：汤逊理论：电子碰撞电离是气体放电的主要原因，二次电子来源于正离子撞击阴极使阴极表面逸出电子，逸出电子是维持气体放电的必要条件。所逸出的电子能否接替起始电子的作用是自持放电的判据。

流注理论：形成流注的必要条件是电子崩发展到足够的程度后，电子崩中的空间电荷足以使原电场明显畸变，二次电子的主要来源是空间的光电离。

汤逊理论的适用范围是短间隙、低气压气隙的放电；流注理论适用于高气压、长间隙电场气隙放电。

1-4 试绘出题 1-4 图的各种空气间隙的电压与电场强度沿气隙的分布曲线[即 $U=f(x)$, $E=f(x)$]。

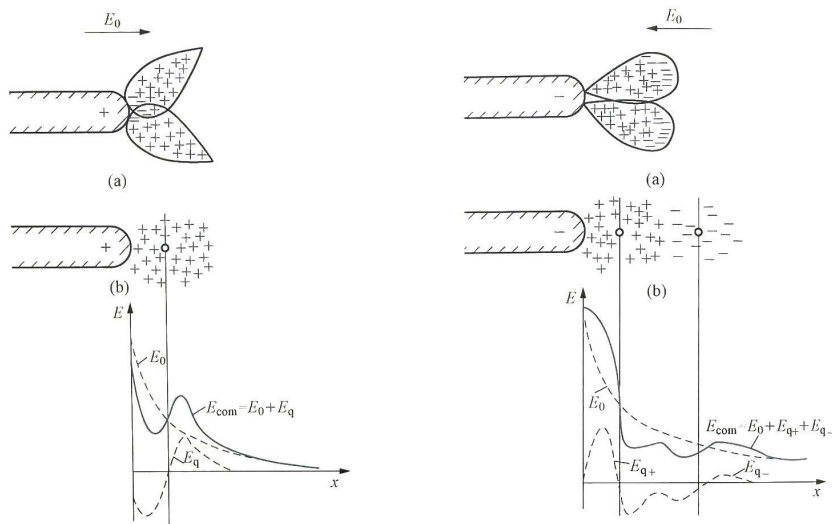


1-5 试述“局部放电”和“电晕放电”两个术语之间的关系和异同。

解：局部放电描述电极局部位置因击穿而发生的放电现象，可发生在电极表面，也可以存在于两极之间的某一空间而不触及任一电极；

电晕放电是局部放电的一种，一定触及一个电极或两个电极。

1-7 气体介质在冲击电压下的击穿有何特点？其冲击电气强度通常用哪些方式来表示？



解：电压不够高时，气隙中电场太弱，不能引起电离过程；也可能是电离过程已出现，但这是所需放电时间较长，超过了外加电压的有效作用时间，来不及完成击穿过程。随着电压进一步提高，放电时延变小，因而已有可能出现击穿现象，但由于放电时延和放电时间均具有统计分散性，因而在多次重复施加电压时，有几次可能导致击穿，而另几次没有发生击穿。随着电压继续提高，其中发生击穿的百分比将越来越大。最后，当电压超过某一数值后，气隙在每次施加电压时都将发生击穿。
常用 50%冲击击穿电压、伏秒特性表示；

1-8 试述 50%冲击击穿电压和 50%伏秒特性两个术语中的“50%”所指的意义有何不同？这两个术语之间有无关系？

解：50%冲击击穿电压中的 50%表示击穿比为 50%；
50%伏秒特性表示不同击穿时间时的 50%冲击击穿电压；
50%伏秒特性是 50%冲击击穿电压按击穿时间的分布；

1-10 试分别用汤逊理论和流注理论说明空气如何在足够强的电场作用下一步步由电介质变成导体。

解：汤逊理论：在外加电场作用下，有电子从电极逸出，受电场力作用进行迁移。迁移过程中，电子与其他原子或分子进行碰撞，产生更多的电子，达到另一电极后，与电极发生碰撞，产生更多电子；
流注理论：在外加强电场作用下，电子在迁移过程中，除使介质发生碰撞电离，还同介质负电荷，形成负离子，发生光电离。

1-12 简述绝缘子污闪的发展机理和防止对策。

解：发展机理：积污、受潮、干区形成、局部电弧的出现和发展；
污闪对策：

- (1) 调整爬距（增大泄露距离）；
- (2) 定期/不定期清扫；
- (3) 涂料；
- (4) 半导体釉绝缘子；
- (5) 新型合成绝缘子；

1-13 试运用所学的气体放电理论，解释下列物理现象：

- (1) 大气的湿度增大时，空气间隙的击穿电压增高，而绝缘子表面的闪络电压下降；
- (2) 压缩气体的电气强度远较常压下的气体为高；
- (3) 沿面闪络电压显著地低于纯气隙的击穿电压。

解：(1) 大气湿度增大时，大气中的水分子增多，自由电子易于被水分子俘获形成负离子，从而使放电过程受到抑制，所以击穿电压增高；而大气湿度增大时，绝缘子表面容易形成水膜，使绝缘子表面积污层受潮，泄漏电流增大，容易造成湿闪或污闪，绝缘子表面闪络电压下降；

(2) 气压很大时电子的自由行程变小，两次碰撞之间从电场获得的动能减小，电子的碰撞电离过程减弱，所以击穿电压升高，气体的电气强度也高；

(3) 沿面闪络电压显著地低于纯气隙的击穿电压是因为沿固体介质表面的电场与纯气隙间的电场相比发生了畸变，造成电场畸变的原因有：

1. 固体介质与电极表面接触不良，存在小缝隙；
2. 固体介质表面由于潮气形成水膜，水膜中的正负离子在电场作用下积聚在沿面靠近电极的两端；
3. 固体介质表面电阻不均匀和表面的粗糙不平。

第二章 • 气体介质的电气强度

1. 定义与公式

冲击系数 β : 50%击穿电压与静态击穿电压的比值;

伏秒特性: 气隙的冲击击穿电压与放电时间的关系;

均匀电场空气间隙击穿电压特性:

$$U_b = 20.55\delta d + 6.66\sqrt{\delta d}$$

大气条件校正:

$$U = K_1 K_2 U_0$$

空气密度校正:

气隙不很长 (小于 1m):

$$U = \delta U_0$$

更长的空气间隙 (m 由电极形状、气隙长度、电压类型、极性决定, 具体查国标):

$$K_1 = \delta^m$$

湿度校正:

极不均匀电场 (w 取决于电极形状、气隙长度、电压类型及极性):

$$K_2 = K^w$$

海拔高度校正:

安装海拔高于 1km, 低于 4km 的电力设施外绝缘, 若在平原地区进行耐压试验, 需进行校正:

$$U = K_a U_p$$
$$K_a = \frac{1}{1.1 - H \times 10^{-4}}$$

球形屏蔽极半径:

$$R = \frac{U_{gmax}}{E_c}$$

提高气体介质电气强度方法:

- (1) 改善电极形状;
- (2) 利用空间电荷改善场强分布;
- (3) 采用屏障;
- (4) 采用高气压/高真空;
- (5) 采用高电气强度气体;

SF6 的主要问题:

- (1) 液化问题;
- (2) 毒性分解物;
- (3) 含水量;

封闭式气体绝缘组合电器优点:

- (1) 大大节省占地面积和空间体积, 额定电压越高, 节省的越多;
- (2) 运行安全可靠;
- (3) 有利于环境保护, 使运行人员不受电场、磁场的影响;
- (4) 安装工作量小, 检修周期长;

2. 课后题

2-5 一家位于平原地区的绝缘子制造厂接受一座位于 4000m 高原地区的变电站订购一批 110kV 支柱绝缘子。这批绝缘子出厂前要进行 1min 工频耐压试验，问应施加多高的试验电压？（各种电压等级的设备在平原地区的标准绝缘水平可从表 10-1 查得）

解：查表 10-1A，系统标称电压 110kV，其额定短时工频耐受电压为 185kV

由于其海拔为 4km，应对其大气条件进行校正。

设试验电压为 U ，额定耐受电压 $U_0 = 185kV$

$$U = K_a U_0$$

$$K_a = \frac{1}{1.1 - H \times 10^{-4}} = \frac{1}{1.1 - 4 \times 10^3 \times 10^{-4}} = 1.43$$

代回上式，得 $U = 264.55kV$ ；

2-7 某 110kV 电气设备的外绝缘应有的工频耐压水平（有效值）为 260kV。如该设备将安装到海拔 3000m 的地方运行，问出厂时（工厂位于平原地区）的试验电压应增大到多少？

解：设备在海拔 3km 处，外绝缘应有的工频耐压水平 $U_p = 260kV$ ，设其在标准状态下试验电压为 U

$$U = K_a U_p$$

其中，

$$K_a = \frac{1}{1.1 - H \times 10^{-4}} = \frac{1}{1.1 - 3000 \times 10^{-4}} = 1.25$$

故 $U = K_a U_p = 1.25 \times 260kV = 325kV$ 。

2-9 为什么 SF₆ 气体具有特别高的电气强度并成为除空气外应用得最广泛的气体介质？试述 GIS 有哪些主要优点。

解：SF₆ 气体有高电气强度的原因：

1. SF₆ 为电负性气体，电子更易与其结合为负离子，阻碍击穿的发展；

SF₆ 气体应用广泛的原因：

1. SF₆ 电气强度优于空气；
2. SF₆ 为无毒惰性气体；
3. SF₆ 制备难度不高；

GIS 主要优点：

1. 节省占地面积、空间体积；
2. 运行安全可靠；
3. 利于环境保护，使运行人员不受电场、磁场影响；
4. 安装工作量小，检修周期长。

第三章·液体和固体介质的电气特性

1. 定义与公式

电介质极化种类、特性、原因：

(1) 电子式极化：任何电介质	无能量损耗	束缚电子运行轨道偏移
(2) 离子式极化：离子式结构电介质	几乎无能量损耗	离子的相对偏移
(3) 偶极子极化：极性电介质	有能量损耗	偶极子的定向排列
(4) 夹层极化：多层截至交界面	有能量损耗	自由电荷的移动

电介质损耗：

$$P = UI \cos \varphi = UI_R = UI_C \tan \delta = U^2 \omega C_p \tan \delta$$

并联模型：

$$\tan \delta = \frac{1}{RC_p \omega}$$

串联模型：

$$\tan \delta = \omega C_s R$$
$$C_s \approx C_p$$

损耗率：中性/弱极性液体介质单位体积的功率损耗：

$$P_0 = \gamma E^2$$

纯净液体介质击穿：

- (1) 电子碰撞电离：外电场较强时，阴极发射的电子碰撞液体分子时引起电离，形成电子崩；
- (2) 气泡击穿：气泡先于液体介质电离，温度上升，体积碰撞，密度减小，使电离进一步发展。带点粒子撞击介质分子，分解出气体，扩大气体通道；

固体介质击穿：

- (1) 电击穿：仅由于电场的作用直接使介质破坏并丧失绝缘性能的现象；
- (2) 热击穿：介质损耗发热大于散热，使温度上升，导致介质分解、熔化、碳化或烧焦，发生击穿；
- (3) 电化学击穿：固体介质在长期工作电压作用下，因介质内部发生局部放电等原因，绝缘劣化，电气强度逐步下降引起的击穿；

均匀电场双层介质模型：

$$E_1 = \frac{U}{\varepsilon_1 \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right)}$$
$$E_2 = \frac{U}{\varepsilon_2 \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right)}$$

分阶绝缘：

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r_0}}$$
$$E_1 = \frac{U}{r \varepsilon_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R}{r_2} \right)}, r_0 < r < r_2$$
$$E_2 = \frac{U}{r \varepsilon_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R}{r_2} \right)}, r_2 < r < R$$

绝缘的利用系数：

$$\eta = \frac{E_{av}}{E_{max}}$$

2. 课后题

3-2 电介质的电导与金属导体的电导有何不同？试比较之。

解：正常情况下，电介质的电导主要为离子电导，金属导体的电导主要依靠自由电子；

3-4 为什么要选择介质损耗角正切 $\tan \delta$ 作为测试、判断电介质的绝缘状态优劣的判据？其他还有什么判据？以 $\tan \delta$ 作为判据较其他判据有何优点和特点？

解： $\tan \delta$ 仅取决于材料损耗特性，与所加电压、试品、电容等外部条件无关；

体积电导率、表面电导率：直流电压作用下，外加电压没有达到引起局部放电的数值，介质中损耗仅由电导引起；

损耗率：单位体积电介质中的功率损耗，适用于中性、弱极性液体介质的极化损耗；

3-5 试比较气体、液体和固体介质击穿过程的异同。

解：气体击穿：高电压产生高场强，作用于气体分子，通过光电离、热电离等方式，发展为电子崩乃至流注；

液体击穿：外电场较强时，阴极电子使液体分子电离，形成电子崩，进而击穿；电场使液体中气泡先发生电离，其产生的带电粒子促进更多气泡的产生；

固体击穿：

电击穿：较高的场强破坏材料的内部结构，形成放电通路；

热击穿：介质损耗发热产生的热量积累，减弱材料的电气强度；

电化学击穿：介质内部因有缺陷发生局部放电，电气强度逐步下降；

3-6 一充油的均匀电场间隙距离为 30mm，极间施加工频电压 300kV。若在极间放置一个屏障，其厚度分别为 3mm 和 10mm，求油中的电场强度各比没有屏障时提高多少倍？（设油的 $\epsilon_{r1} = 2$ ，屏障的 $\epsilon_{r2} = 4$ ）

解：设电场间隙距离为 d ，工频电压为 U ，屏障厚度分别为 $x_1 = 3mm$ ， $x_2 = 10mm$ ，对应场强为 E_1, E_2 。

屏障与间隙分界面处：

$$\begin{aligned} \epsilon_{r1}E_i &= \epsilon_{r2}E'_i \\ U_i &= E_i(d - x_i) + E'_i x_i \end{aligned} \quad i = 1, 2$$

解得 $E_1 = 1.053 \times 10^7 V/m$ ， $E_2 = 1.2 \times 10^7 V/m$

无屏障时的场强

$$E_0 = \frac{U}{d} = 10^7 V/m$$

$$\frac{E_1 - E_0}{E_0} = 0.053, \quad \frac{E_2 - E_0}{E_0} = 0.2$$

故油中的电场强度分别提高了 0.053 倍与 0.2 倍。

3-7 一根 220kV 交流单芯电力电缆的芯线外半径 $r_0 = 20.5mm$ ，油纸绝缘层厚度 $d=18mm$ ，分阶成两层，分阶半径 $r_2 = 30mm$ 内层的介电常数 $\epsilon_1 = 4.3$ ，外层的 $\epsilon_{r1} = 2$ ，试求在额定相电压的作用下：

（1）内层绝缘的最大工作场强和利用系数；

（2）外层绝缘的最大工作场强和利用系数。

解：绝缘层内距离 O 点 r 处的场强：

$$E = \begin{cases} \frac{U}{r\epsilon_1(\frac{1}{\epsilon_1}\ln\frac{r_2}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2}\ln\frac{r_0+d}{r_2})}, & r_0 < r < r_2 \\ \frac{U}{r\epsilon_2(\frac{1}{\epsilon_1}\ln\frac{r_2}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2}\ln\frac{r_0+d}{r_2})}, & r_2 < r < r_0 + d \end{cases}$$

内层绝缘最大工作场强在 $r = r_0$ 处，

外层绝缘最大工作场强在 $r = r_2$ 处。

平均场强:

$$E_{av} = \frac{U}{d}$$

最大场强:

$$E_{max} = \frac{U}{r_0 \varepsilon_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_0 + d}{r_2} \right)} = 15.62 \times 10^6 V/m$$

$$E_{max2} = \frac{U}{r_2 \varepsilon_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_0 + d}{r_2} \right)} = 13.11 \times 10^6 V/m$$

利用系数:

$$\eta_1 = \frac{E_{av}}{E_{max1}} = 0.78$$

$$\eta_2 = \frac{E_{av}}{E_{max2}} = 0.93$$

3-8 随着额定电压的提高,在各种高压电气设备或部件中,对绝缘技术要求特别高,绝缘难度最大者是哪些设备或部件?为什么?

解:

第四章 • 电气设备绝缘预防性试验

1. 定义与公式

2. 课后题

4-1 测量绝缘电阻能发现哪些绝缘缺陷？试比较它与测量泄漏电流试验项目的异同。

解：测量绝缘电阻能有效地发现下列缺陷：绝缘总体状态不佳；绝缘整体受潮或局部严重受潮；两极间有贯穿性的缺陷等。

测量绝缘电阻和测量泄露电流试验项目的相同点：两者的原理和适用范围相同，不同的是测量泄漏电流可使用较高的电压（10kV 及以上），并且可观察泄漏电流随时间的变化情况，因此能比测量绝缘电阻更有效地发现一些尚未完全贯通的集中性缺陷。

4-2 简述西林电桥的工作原理。为什么桥臂中的一个要采用标准电容器？这一试验项目的测量准确度受到哪些因素的影响？

解：西林电桥通过等电位点两边桥臂参数之比相同，计算设备的等效电阻与电容。桥臂上的元件参数部分可变，以达到电桥平衡。

用标准电容器：计算被试品的电容需多个值来确定。若定下桥臂的电容值，在计算出 $\tan \delta$ 的情况下，仅调节电阻值就可确定被试品电容大小；

影响： （1）处于电磁场作用范围的电磁干扰；

 （2）温度；

 （3）试验电压；

 （4）试品电容量；

 （5）试品表面泄露影响；

4-3 综合比较本章中介绍的各种非破坏性试验项目的效能和优缺点。（能够发现和不易发现的绝缘缺陷种类、检测灵敏度、抗干扰能力、局限性等）

解：

试验项目	绝缘缺陷种类	检测灵敏度	抗干扰能力	局限性
绝缘电阻试验	总体绝缘质量欠佳	灵敏度一般	抗干扰较强	不能发现如非贯穿性的局部损伤、含气泡、分层脱开、绝缘老化等
	绝缘受潮			
	两极间有贯穿性导电通道			
	绝缘表面情况不良			
介质损耗角试验	绝缘受潮	较灵敏	外界磁场	不能发现非穿透性的局部损坏
	穿透性导电通道		温度	很小部分绝缘的老化、劣化
	绝缘内含气泡游离		试验电压	个别绝缘弱点
	绝缘分层和脱壳		试品电容量	
局部放电试验	绝缘有脏物或劣化	非电方法不灵敏 电方法灵敏	试品表面泄露电流	
	绝缘中存在的局部缺陷		非电方法抗干扰强	外界噪声影响大
绝缘油液相色谱	充油设备中局部性缺陷（过热、放电）	较灵敏	较强	对某些突发性故障，如匝间短路，在故障潜伏期不易发现

4-4 根据绝缘预防性试验的结果来判断电气设备绝缘状态时，除了要重视每一项试验的结果外，为什么还要进行综合分析判断？当其中个别试验项目不合格，达不到规程的有关要求时，应如何处理。

解：各种试验项目用于不同设备时效果不同。

达不到有关要求时，用“三比较”方法处理：

- （1）与同类型设备作比较；
- （2）在同一设备的三相试验结果之间进行比较，若有一相结果相差达 50%以上时，该相很可能存在缺陷；
- （3）与该设备技术档案中的历年试验所得数据作比较，若性能指标有明显下降的情况，即应警惕出现新缺陷的可能性。

第五章 • 绝缘的高压电试验

1. 定义与公式

试验变压器高压侧额定电流、容量：

$$I = UC\omega 10^{-3}(A)$$
$$P = \omega CU^2 10^{-3}(kVA)$$

试验变压器串级装置利用率：

$$\eta = \frac{2}{n+1}$$

额定整流电流：室温、自然对流冷却下容许的通过整流器的正向电流在一个周期内的平均值。

额定反峰电压：整流器阻断时，其两端容许出现的最高反向电压峰值。

额定平均输出电压：

$$U_{av} = \frac{1}{2}(U_{max} + U_{min})$$

电压脉动系数：

$$S = \frac{\delta U}{U_{av}}$$
$$\delta U = \frac{1}{2}(U_{max} - U_{min})$$

2. 课后题

5-3 为什么有些高压交流电气设备要用直流高压来做耐压试验？

解：被试品的电容量很大的场合中，用工频交流高电压进行绝缘试验时，会出现很大的电容电流，要求工频高压试验装置有很大的容量。

5-5 试比较绝缘的非破坏性试验和耐压试验的效能和特点。

解：非破坏性试验：

效能：在低电压或其他不会损坏绝缘的办法，测量绝缘的各种特性，判断内部有无缺陷；

特点：无破坏性，需综合分析，可全面检查缺陷的性质；

耐压试验：

效能：模仿设备绝缘运行中可能出现的各种电压，对绝缘施加与之相等价或更为严峻的电压，考验绝缘的耐受能力；

特点：有效，具有破坏性；

5-6 试列表比较各种高电压测量装置的特点，包括能够测量的电压类型、所测得的是何种电压值、能够测量的最高电压、缺点或局限性等。

解：

高电压测量装置		测量电压种类	可测最高电压	缺点/局限性
静电电压表	交流电压有效值		600kV	内阻抗大，几乎不消耗能量 能测量相当高交流、直流电压 量程有限 不能测量一切冲击电压
峰值电压表	交流/冲击电压峰值		与高压分压器配合	与球测相比，大大简化测量过程 被测电压的波形必须是平滑上升，否则产生误差
球隙测压器	交流、直流、冲击电压峰值		数兆伏	可测量高电压峰值 影响因素多，可能产生误差 对球面的光滑、曲率要求严格

5-7 为什么选用球隙而不是其他形状的间隙（特别是消除了边缘效应的平板电极）来测量高电压？

解：

- （1）击穿时延小，伏秒特性在 1 微秒左右即已变平，放电电压的分散性小，具有较稳定的放电电压值和较高测量精度；
- （2）稍不均匀电场的冲击系数 $\beta = 1$ ，其 50%冲击放电电压与静态放电电压的幅值几乎相等，可用一张放电电压表格；
- （3）温度对稍不均匀电场的放电电压影响较小，采用球隙测量电压可不必对温度进行校正；

第六章 • 输电线路和绕组的波过程

1. 定义与公式

电力系统过电压

1. 内部过电压

- (1) 操作过电压
- (2) 暂时过电压
 - a. 工频电压升高
 - b. 谐振过电压

2. 雷电过电压

- (1) 直接雷击过电压
- (2) 感应雷击过电压

波速：行波在均匀无损单导线上传播的速度；

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

电压折射系数

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

电压反射系数

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

特殊情况波过程

末端开路： $\alpha = 2, \beta = 1$

末端短路： $\alpha = 0, \beta = -1$

$R = Z_1$ 电阻： $\alpha = 1, \beta = 0$

彼得逊法则

电压源集中参数等值电路：

$$u'_2 = 2u'_1 - Ei'_2$$

电流源集中参数等值电路：

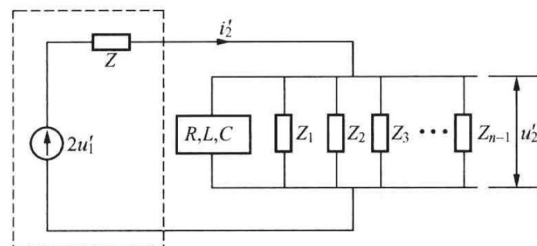
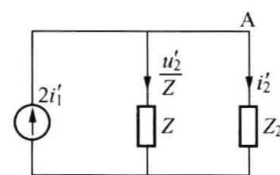
$$2i'_1 = \frac{u'_2}{Z} + i'_2$$

串联电感/并联电容的作用

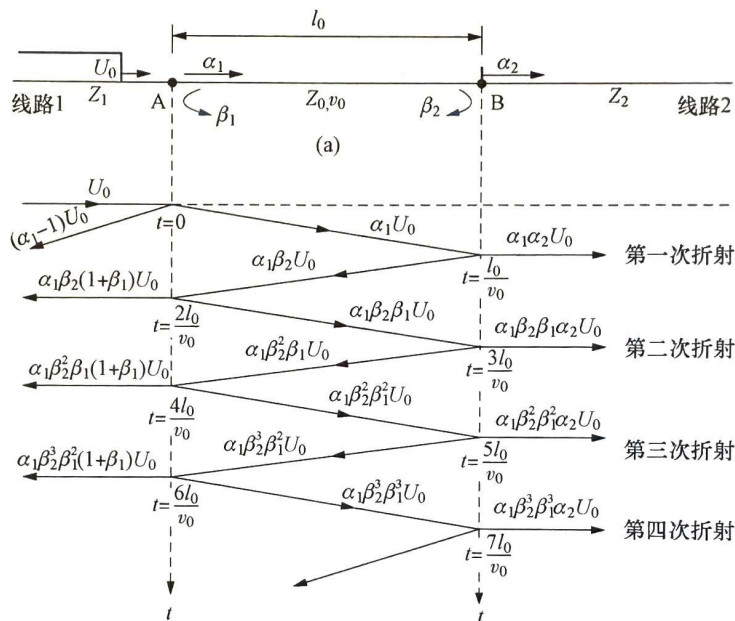
- (1) 行波穿过电感/旁过电容时，波前陡度减小；
- (2) 无限长直角波情况下，对电压最终稳态值无影响；
- (3) 电感上出现电压全反射，电流负全反射；电容上出现电流全反射，电压负全反射；

冲击电晕的影响

- (1) 导线波阻抗减小
- (2) 波速减小；
- (3) 耦合系数增大；
- (4) 引起波的衰减与变形；

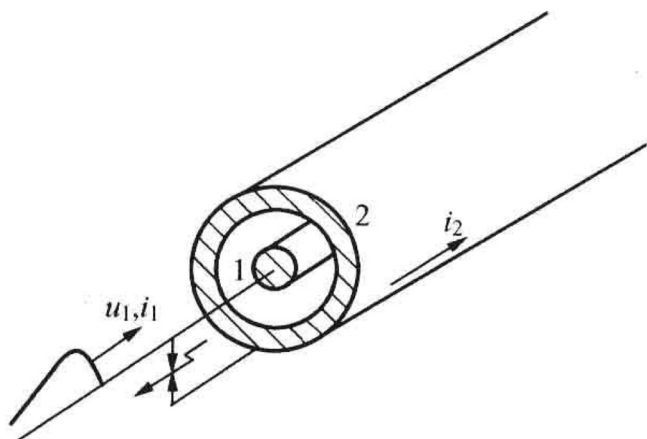


行波多次折射、反射模型：



2. 课后题

【例 6-5】 试分析电缆芯与电缆皮之间的耦合关系。



因为 $Z_{22} = Z_{12}$ ，故

$$Z_{11}i_1 = Z_{12}i_2$$

由于 $Z_{11} > Z_{21}$ ，只有在 $i_1 = 0$ 时，上式才能成立，即电流不经缆芯流动，全部电流都被挤到缆皮中。其物理解释为：当电流在缆皮中流动时，缆芯上会感应出与缆皮电压相等，方向相反的电动势，阻止电流流进缆芯，这与导线中的集肤效应类似。

解：当行波电压 u 到达电缆的始端时，可能引起接在此处的保护间隙或管式避雷器的动作，这就使缆芯和缆皮在始端连在一起，变成两条并联支路，如图 6-29 所示，故

$$u_1 = u_2$$

由于 i_2 所产生的磁通全部与缆芯相交链，缆皮的自波阻抗 Z_{22} 等于缆芯与缆皮间的互波阻抗 Z_{12} ，即

$$Z_{22} = Z_{12}$$

而缆芯电流 i_1 所产生的磁通中只有一部分与缆皮相交链，所以缆芯的自波阻抗 Z_{11} 大于缆芯与缆皮间的互波阻抗，即 $Z_{11} > Z_{12}$ 。

设 $u_1 = u_2 = u$ ，即可得以下方程

$$u = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2$$

第七章 • 雷电放电及防雷保护装置

1. 定义与公式

雷暴日 T_d : 一年中发生雷电的次数;

雷暴小时 T_h : 一年中发生雷电放电的小时数;

地面落雷密度 γ : 每平方公里地面在一个雷暴日受到的平均雷击次数;

雷道波阻抗 Z_0 : 雷电通道等效分布参数线路的波阻抗;

雷电流: 雷击于低接地电阻的物体时流过雷击点的电流

$$\lg P = -\frac{1}{88}I$$

感应雷击过电压与感应电压区别

- (1) 感应雷击过电压极性与雷云相反, 相邻导线间感应电压的极性与感应源相同;
- (2) 雷击感应过电压需在雷云及其先导通道中的电荷被中和后才能出现, 相邻导线间感应电压与感应源同生共灭;
- (3) 感应雷击过电压波前平缓, 波长较长;
- (4) 感应雷击过电压在三相导线上同时出现, 数值基本相等, 不会出现相间电位差、相间闪络;

保护间隙的缺点

- (1) 保护间隙的电场大多属于极不均匀电场, 其伏秒特性很陡, 难以与被保护绝缘的伏秒特性取得很好配合;
- (2) 保护间隙无专门的灭弧装置, 灭弧能力有限;
- (3) 保护间隙动作后, 会产生幅值截波, 对变压器类设备绝缘不利;

接地种类:

- (1) 工作接地:
 1. 根据电力系统正常运行的需要设置的接地;
 2. 三相系统的中性点接地;
 3. 双极直流输电系统的中性点接地
- (2) 保护接地: 为人身安全, 将电气设备金属外壳等接地, 仅在故障条件下发挥作用;
- (3) 防雷接地: 将雷电流顺利泄入地下, 减小其引起的过电压;

高度修正系数:

$$P = \begin{cases} 1, h \leq 30m \\ \sqrt{\frac{30}{h}}, 30m < h \leq 120m \end{cases}$$

保护半径:

单支避雷针:

$$r_x = \begin{cases} P(h - h_x), h_x \geq h/2 \\ P(1.5h - 2h_x), h_x < h/2 \end{cases}$$

两支等高避雷针

$$\begin{aligned} h_0 &= h - \frac{D}{7P} \\ 2b_x &= 3(h_0 - h_x) \end{aligned}$$

单根避雷线:

$$r_x = \begin{cases} 0.47P(h - h_x), h_x \geq h/2 \\ P(h - 1.53h_x), h_x < h/2 \end{cases}$$

两根等高避雷线:

$$h_0 = h - \frac{D}{4P}$$

2. 课后题

7-1 为了保护烟囱及附近的构筑物，在一高 73m 的烟囱上装设一根长 2m 的避雷针，烟囱附近构筑物的高度和相对位置如题 7-1 图所示，试计算各构筑物是否处于该避雷针的保护范围之内。

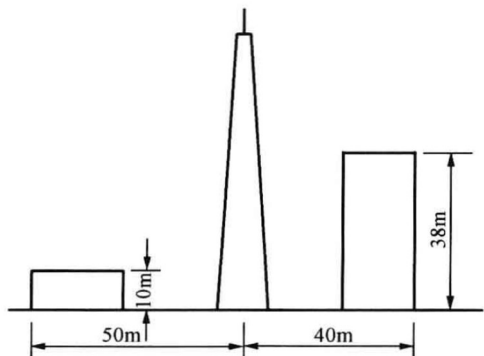
解：避雷针高度 $h = (73 + 2)m = 75m$

高度修正系数：

$$P = \frac{5.5}{\sqrt{75}} = 0.635$$

避雷针的保护半径：

$$r_x = \begin{cases} P(h - h_x), h_x \geq \frac{h}{2} \\ P(1.5h - 2h_x), h_x < \frac{h}{2} \end{cases} = \begin{cases} 47.635 - 0.635h_x, h_x \geq 37.5m \\ 71.4375 - 1.27h_x, h_x < 37.5m \end{cases}$$



左侧建筑物保护半径：

$$r_x(10) = 58.7375m > 50m$$

右侧建筑物保护半径：

$$r_x(38) = 23.505m < 40m$$

故左侧构筑物在保护范围内，右侧构筑物不在保护范围内。

7-4 在学习过避雷针、避雷线、避雷器的结构、工作原理和保护功能以后，你认为这三个名词术语定得是否妥当？有什么问题？你认为有更合适的名称吗？

解：避雷针、避雷线通过使雷电击向自身来发挥其保护作用，故从原理上来说不妥当。称为“导闪针/线”或“接闪针/线”更合适。避雷器的作用原理与避雷针、避雷线完全不同。按原理来说，“避雷器”定名为“自恢复限压器”更加贴切。

7-6 说明阀式避雷器的残压、灭弧电压、保护水平、切断比、保护比、荷电率等术语的定义和表示避雷器在哪些方面的电气特性？

解：残压：冲击电流通过避雷器时，在工作电阻上产生的电压峰值；

灭弧电压：该避雷器尚能可靠地熄灭续流电弧的最大工频作用电压；

保护水平：该避雷器上可能出现的最大冲击电压峰值；

切断比：避雷器工频放电电压的下限与灭弧电压之比；

保护比：避雷器残压与灭弧电压之比；

荷电率：容许最大持续运行电压的幅值与起始动作电压之比。

7-7 如果要求一阀式避雷器既能对雷电过电压，又能对操作过电压实施绝缘保护，它在性能、结构上应有什么特殊的有别于普通阀式避雷器的地方？

解：火花间隙放电电压应较低，使工频续流的灭弧条件恶化；同时，阀片数量应减少，使续流变大，避雷器的残压相应地加以降低，但灭弧更加困难，故应大大提高火花间隙的灭弧能力；

7-8 在 ZnO 避雷器中为何可省去串联火花间隙？这会带来哪些好处？

解：在相电压下，ZnO 阀片流过的电流数量级小，无需串联火花间隙；

好处：

- (1) 省去串联火花间隙，结构大大简化，体积可缩小很多，适合于大规模自动化生产，降低造价；
- (2) 流通能力不受串联间隙被灼伤的制约，流通容量大；
- (3) 耐污性能好，可避免因瓷套表面不均匀染污使串联火花间隙放电电压不稳定的问题；

第八章·电力系统防雷保护

1. 定义与公式

2. 课后题

8-1 解释下列术语，并写出它们的常用计量单位：

- (1) 输电线路耐雷水平；
- (2) 输电线路雷击跳闸率；
- (3) 输电线路避雷线保护角；
- (4) 线路绝缘的建弧率。

解：

- (1) 输电线路耐雷水平：雷击时，其绝缘尚不至于发生闪络的最大雷电流幅值/能引起绝缘闪络的最小雷击电流幅值；
- (2) 输电线路雷击跳闸率：雷暴日数 $T_d = 40$ 的情况下，100km 的线路每年因雷击而引起的跳闸次数；
- (3) 输电线路避雷线保护角：避雷线和边相导线的连线与经过避雷线的铅垂线之间的夹角；
- (4) 线路绝缘的建弧率：由冲击闪络转变为稳定工频电弧的概率。

8-3 全面分析避雷线在提高线路耐雷性能中的作用。

解：

- (1) 避免雷电直接击中导线产生极高雷电过电压；
- (2) 提高线路耐雷水平；

第九章·内部过电压

1. 定义与公式

2. 课后题

9-5 试述消除断续电弧接地过电压的途径。

解：（1）采用中性点有效接地方式；
（2）采用中性点经消弧线圈接地方式；

9-6 铁磁谐振过电压是怎样产生的？它与线性谐振过电压有什么不同？

解：产生原因：电感元件带有铁芯时，一般会出现饱和现象，电感随着电流或磁通的变化而变化；

不同：线性谐振过电压的原因是电力系统的交流电源频率接近回路的自振频率时，回路感抗、容抗因相等或相近而相互抵消，回路电流达到很大的数值，串联谐振在电感元件和电容元件上产生远超电源电压的过电压。而铁磁谐振过电压产生的根本原因是铁磁元件的非线性，在同一电源电动势作用下，回路可能有不止一种稳定工作状态。外界激发下，回路可能从非谐振工作状态跃变到谐振工作状态。

第十章·电力系统绝缘配合

1. 定义与公式

2. 课后题

10-1 解释下列术语：

- (1) 绝缘的爬电（泄漏）比距；
- (2) 统计绝缘耐压；
- (3) 统计过电压。

解：

- (1) 绝缘的爬电（泄漏）比距：外绝缘“相一地”之间的爬电距离与系统最高工作电压之比；
- (2) 统计绝缘耐压：绝缘电气强度按参考耐受概率为 90%取得的值；
- (3) 统计过电压：过电压按参考累积概率取 2%取得的值；

第十一章·特高压交流输电

1. 定义与公式

2. 课后题

11-1 何谓“特高压（UHV）”？它有哪些有别于“超高压（EHV）”的特征？

解：

特高压：以 1000kV 以上的电压作为交流输电电压；

有别于 EHV 的特征：

- （1）空气间隙长度大到一定程度时，它在工频电压和操作过电压下的击穿特性开始呈现“饱和现象”；
- （2）环境影响问题尖锐化；

第十二章·直流输电中的高电压技术

1. 定义与公式

2. 课后题

12-1 解释下列术语：

- (1) 交、直流输电的等价距离；
- (2) 两线一地制双极直流输电系统；
- (3) 离子流；
- (4) 空间电荷的“屏蔽效应”；
- (5) 全电压启动过电压；
- (6) 可更新绝缘

解：

- (1) 交、直流输电的等价距离：建设直流线路与交流线路投资等价的距离；
- (2) 两线一地制双极直流输电系统：有两根极导线，极性一正一负，电压绝对值相同，两端中性点接地；
- (3) 离子流：直流线路导线电晕时，电离形成的离子在电场力的作用下，向反极性导线和地面的运动；
- (4) 空间电荷的“屏蔽效应”：在直流单极电晕的情况下，整个电极空间充斥着符号与导线极性相同的空间电荷，由于导线上电压极性保持不变，所以这些空间电荷将使导线附近的电场变弱，使外区电场增强，使整个电场变得较为均匀的效应；
- (5) 全电压启动过电压：直流线路投入时，全部整流桥在误动作情况下，突然作全电压启动时出现的过电压；
- (6) 可更新绝缘：晶闸管阀的绝缘；

12-3 简述在直流高压作用下，下列物理、化学过程中的“极性效应”（仅需说明有何影响及影响的程度，不必分析原因）：

- (1) “棒—板”气隙的击穿电压；
- (2) 电晕损耗；
- (3) 电晕无线电干扰；
- (4) 电晕可闻噪声；
- (5) 绝缘子表面的污染度；
- (6) 绝缘子串的闪络电压；
- (7) 接地极的电解腐蚀。

- (1) “棒—板”气隙的击穿电压：正极性操作波和正极性直流电压叠加时的气隙击穿电压高于单纯正极性操作波下的击穿电压；
- (2) 电晕损耗：使导线附近电场变弱，外区电场增强，使整个电场变得较为均匀；
- (3) 电晕无线电干扰：正极性导线产生的无线电干扰比负极性导线强得多；
- (4) 电晕可闻噪声：正极性导线上的电晕是直流架空线路可闻噪声的主要来源；
- (5) 绝缘子表面的污染度：正极性导线的绝缘子串比负极性导线的绝缘子串吸附更多污秽；
- (6) 绝缘子串的闪络电压：绝缘子串的负极性直流闪络电压比正极性直流闪络电压低 10%~20%；
- (7) 接地极的电解腐蚀：电流从埋设在土壤中的金属电极流出时，电极会被严重腐蚀；

12-4 直流线路绝缘子与交流线路绝缘子在工作条件、运行特性、结构等方面有何不同？

解：

工作条件：直流线路绝缘子的集尘效应强、污闪电压降低多、老化快、钢脚的电腐蚀严重；

运行特性：在大气严重污秽的地区，除增大泄露距离，还需通过涂硅脂、加强停电清洗或带电清洗、降压运行等方式降低泄露电流；

结构：直流绝缘子的结构型式一般为耐污型，具有较长的表面泄露距离；直流绝缘子具有较好的自洁性能；

12-2 综合比较交、直流输电的优缺点。

解：

直流输电优点：

- (1) 线路造价低、输电的电损耗小以外；
- (2) 直流输电不存在两端交流系统之间同步运行稳定性问题，因而它的输送容量和输送距离均不受同步运行稳定性的限制，对远距离大容量输电十分有利。
- (3) 用直流输电联网，便于分区调度管理，有利于故障时交流系统间的快速紧急支援和限制事故扩大；可不因联网后扩大了容量而需要调换遮断容量不够的交流断路器。
- (4) 直流输电控制系统目前一般主要用计算机元件构成，响应快速，调节精确，操作方便，能实现多目标控制。
- (5) 直流输电线路沿线电压分布平稳，没有电容电流，不需要并联电抗补偿。
- (6) 在需要电缆送电的场合，采用直流输电在技术上还有一些重要优点：
 - ① 电缆绝缘的容许工作电位梯度在直流下要比交流下高很多；
 - ② 由于电缆的对地电容要比架空线路大得多，如果采用交流输电，会产生很大的电容电流，从而降低了芯线输送负荷电流的能力；如采用直流输电，就不会有这方面的问题了；
 - ③ 在直流下介质损耗很小。
- (7) 一条双极直流线路的运行可靠性优于一条三相交流线路，因为一极发生故障时，另一健全极仍可继续运行（利用大地作为回流电路），输送一半或更大的功率。

直流输电的缺点：

- (1) 换流站投资远大于交流变电站；
- (2) 换流器在工作时需要消耗较多的无功功率（一般占直流输送功率的 40%~60%），因此每座换流站均需装设
- (3) 晶闸管的过载能力较低，如需考虑换流器具有较大的过载能力，则必须选用大功率，在长期正常工况下元件得不到充分利用。
- (5) 直流输电会产生谐波，从而需要加装滤波器。
- (6) 直流输电在以大地或海水作回流电路时，会对沿途地下或海水中的金属设施造成腐蚀，必要时尚需采取阴极保护等防护措施；此外，还会对通信和航海磁罗盘产生干扰。
- (7) 直流电流不像交流那样有过零点，因而灭弧比较困难。到目前为止直流断路器的制造问题尚未很好解决，限制了多端直流输电系统的发展，再加上换流站设备的造价昂贵，所以直流输电只能用作点对点的直达传输，中途无法落点；