



复习、作业、预习

复习: 6.3、7.1、7.2, 自学6.4、7.3

作业: 6-9、6-13、6-15、7-1

预习: 7.4-7.6、7.13, 自学7.7-7.12

1



网络教学直播方式: 雨课堂

问题回顾

周远翔

zhou-yx@tsinghua.edu.cn

MB: 13911097570

清华大学电机工程与应用电子技术系



交流耐压试验

●什么是分级绝缘的变压器? 此类变压器外施交流耐压试验按中性点端子规定的试验电压进行

●为什么感应耐压试验需要提高电压频率? 倍频感应耐压试验, 耐压时间 $t=60 \times 100/f$

1000kV变压器: $U_m=1100\text{kV}$, $U_{\text{withstand}}=1100\text{kV}$

500kV 变压器: $U_m=550\text{kV}$, $U_{\text{withstand}}=680\text{kV}$

3



直流耐压: 油纸复合绝缘的交流油浸式设备的直流耐压试验对绝缘考核的有效性问题

●对于大电容设备如电缆等进行的试验, 注意复合绝缘如油纸绝缘, 在交、直流下的电压分布不一样

➢交流电压下, 电压较多作用在油层上, 油的耐电强度低

➢直流电压下, 电压较多作用在纸上, 纸的耐电强度较高

➢所以油纸绝缘电缆能够耐受较高的直流电压

➢油纸绝缘电缆耐压试验5 min

●直流电压下存在空间电荷聚集引起电场畸变, 导致绝缘破坏的风险。出现过直流耐压试验后, 进行带局部放电的工频耐压试验局部放电水平超标的现象。

4



试验变压器容性试品上的电压升高

●试验变压器容性试品上的电压升高

稳态性的电压升高(零升效应)、暂态性的电压升高(调压谐振及闪络暂态效应)

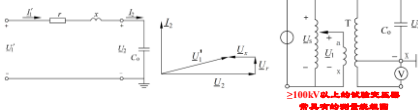
1. 稳态性的电压升高

导致的问题是试品上的电压不能按照试验变压器的变比来得到

➢试验变压器的测量绕组

➢一般 $\geq 100\text{ kV}$ 的试验变压器常有第三个绕组专供测量电压之用

➢匝数是高压绕组匝数的千分之一



$\geq 100\text{ kV}$ 以上的试验变压器
常具有这种测量绕组

5



试验变压器容性试品上的电压升高

2. 瞬态性的电压升高

➢情况1: 串联谐振

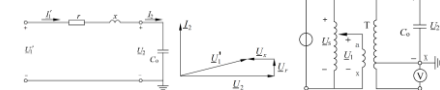
✓调压器的短路电抗与位置有关, 调压过程中可以发生串联谐振。

✓采用故障保护。

➢情况2: 暂态效应

✓容性试品在正半周发生空气中绝缘闪络, 过零恢复, 负半周电压幅值因谐振升高。

✓采用晶闸管短接变压器和继电保护切断电源保护。



6




清华大学
Tsinghua University

网络教学直播方式：雨课堂

高电压工程一

高电压和大电流的产生（续）


周远翔
zhou-yx@tsinghua.edu.cn
MB: 13911097570
清华大学电机工程与应用电子技术系



第6章 高电压和冲击大电流的产生

- 6.1 交流高电压的产生
- 6.2 直流高电压的产生
- 6.3 冲击高电压的产生
- 6.4 冲击大电流的产生（自学）


8



6.3 冲击高电压的产生

- 6.3.1 冲击电压发生器基本原理
- 6.3.2 放电回路的近似计算
- 6.3.3 考虑回路电感的近似计算
- 6.3.4 冲击电压发生器放电回路计算举例


9



6.3.1 冲击电压发生器基本原理

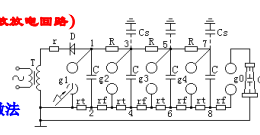
- 冲击电压（两类）
 - 雷电冲击电压：自然界雷击引起的
 - 操作冲击电压：电力系统设备操作引起的
- 冲击电压发生器
 - 概念：冲击电压发生器由一组并联的储能高压电容器，自直流高压源充电几十秒后，通过铜球突然经电阻串联放电，在试品上形成陡峭上升前沿的冲击电压波形。冲击波持续时间以微秒计，电压峰值一般为几十kV至几MV
 - 发明人：产生较高电压的冲击发生器多级回路，首先由德国人E.马克思（E. Marx）提出，为此他于1923年获得专利，被称为马克思回路

10



雷电冲击电压发生器回路（通用的高效放电回路）


- r ：保护电阻，一般为几百千欧
- R ：充电电阻，一般为几十千欧
- r_f ：每级的波前电阻，一般约几十欧
- r_d ：每级的放电电阻，通常约几百欧
- C ：每级的主电容，一般为零点几个微法



冲击电压发生器放电回路接线

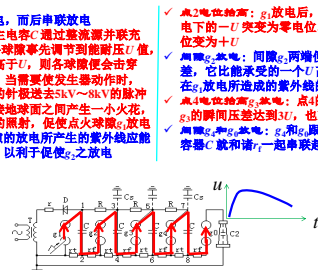
- C_d ：每级相应点的对地杂散电容，一般仅为几个皮法
- C_L ：负荷电容，其值不仅取决于试品，而且与调波相关。一般处于几百皮法至几个纳法间
- 操作冲击电压发生器回路
- 接线图：操作冲击电压发生器回路与雷电冲击电压发生器回路接线图相同
- 与雷电冲击电压发生器回路的区别：当产生操作冲击电压时，回路中各阻值至少要增加两个数量级

11



工作原理

- 电容器并联充电，而后串联放电
- ✓充电单元充电：主电容 C 通过最短路并联充电到电压 U 。各球隙事先调节到能耐压 U 值，若作用电压稍高于 U ，则各球隙便会击穿
- ✓点火球隙点火：当需要使发生器动作时，可向点火球隙的针极送去5kV~9kV的脉冲电压，针极和接地球面之间产生一小火花，由于其紫外线的照射，促使点火球隙 G_1 放电
- ✓点火点： G_1 球隙的放电所产生的紫外线应能照射到 G_2 球隙，以利于促使 G_2 之放电
- ✓点2电位升高： G_1 放电后，使点1从原先在充电下的 $-U$ 突变为零电位，而点2从原零电位变为 $+U$
- ✓间隔 G_2 放电：间隔 G_2 两端便作用了 $2U$ 的电位差，它比能承受的 U 高了一倍，所以 G_2 在 G_1 放电所造成的紫外线的照射下马上放电
- ✓点4电位升高 G_3 放电：点4的电位变为 $+2U$ ， G_3 的瞬间电压达到 $3U$ ，也就立即放电
- ✓间隔 G_3 和 G_4 放电： G_2 和 G_3 跟着放电，各级电容器 C 就和 r_f 一起串联起来了

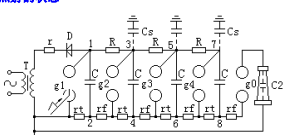


冲击电压发生器放电回路接线

12

冲击电压发生器的工作特点

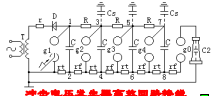
- 充电过程
- 电容串联转换方法：请电容由并联变成串联是靠一组球隙分别处于绝缘和放电来达到
- 电阻 R 的绝缘与隔离作用：在充电时起电路的连接作用；放电时则起隔离作用
- 输出波形的尖锐
- 串联电容的作用：保持各点的电位
- 电位保持时间：因杂散电容 C_d 很小，所以各中间球隙在放电前所作用到的过电压时间非常短促
- 同步放电：为使诸球隙易于同步放电，在采用简单球隙的条件下，它们应排列成相互能够放电（紫外线）照射的状态



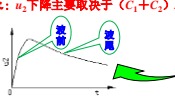
冲击电压发生器典型电路接线

放电时的等效电路

- 等效电路：放电时，发生器的等效电路如图
- C_1 等值的主电容，四个电容 C 的串联值 $C/4$
- R_1 波前电阻 $=4r_1$
- R_2 波后电阻 $=4r_2$
- 名义电压： $U_1=4U$
- 级数为 n 级时上述各参数的4替换为 n
- 冲击电压波形
- 电压波形： g_0 击穿后，作用在试品 C_2 上的电压 u_2 如图所示
- C_2 的充电：为使 C_2 上作用到的电压，接近于 C_1 的原始充电电压（即名义电压），应选 $C_1 \gg C_2$
- 电压上升速度： u_1 上升主要取决于 $R_1 C_1$ 时间常数
- 电压下降速度： u_2 下降主要取决于 $(C_1+C_2) R_2$ 时间常数



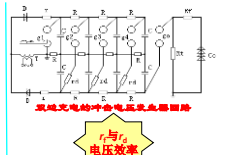
冲击电压发生器放电回路接线



C_2 上电压 u_2 的波形

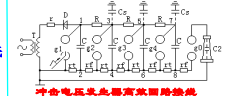
串联充电的冲击电压发生器电路

- 串联充电电路：发生器采用波前电阻和放电电阻集中放置的方式。图示为两个半波整流充电电路
- 阻尼电阻 r_d
- 防止杂散电感和对地分布的杂散电容引起高频振荡，或避免冲击波前不光滑
- 一般每级为 $5\Omega \sim 25\Omega$ ，大小可通过实验决定
- 若级数为 n ，阻尼电阻的串联总值 $n r_d$ 称为 R_d
- R_d 也起调节波前时间的作用
- 在放电时它与 R_1 会造成分压，使输出的电压有所降低



串联充电的冲击电压发生器电路

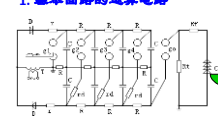
r_d 与 r_1 电压效率



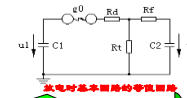
冲击电压发生器典型电路接线

6.3.2 放电回路的近似计算分析

1. 基本回路的运算电路



放电时基本回路的等效电路



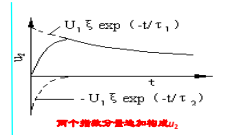
放电时的运算电路

- 初始充电电压：主电容 C_1 上的初始充电电压为 U_1
- 拉氏运算电路：拉氏变换的运算电路
- 输出电压： $U_2(s) = U_1 d / (s^2 + as + b)$

2. 放电回路的近似计算

放电输出电压的近似表达式

- 输出电压的一般表达式：在实际应用中，对雷击冲击波常采用近似法来求回路参数。对于双边放电等值回路，放电回路的输出电压 u_2 的表达式为
- $u_2(t) = U_1 [e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}]$
- 时间常数：用 τ_1 和 τ_2 分别表达 s_1 及 s_2 ，则
- $\tau_1 = -1/s_1$ ， $\tau_2 = -1/s_2$
- 近似表达式：
- $u_2(t) = U_1 [e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}]$
- $u_2(t) \approx U_{2m} [e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}]$
- $1.2/50\mu s$ 的雷电流：
 $|s_2| \gg |s_1|$ ，即 $\tau_2 \gg \tau_1$



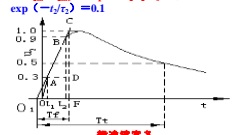
两个指数分量之和 u_2

冲击波的数学物理解释

- $u_2(t)$ 的幅值： $u_2(t)$ 由两个指数分量叠加构成
- 波前时间的确定：波前时间相对于波尾半峰值时间要短得多
- 波后时间：由较小的时间常数 τ_2 决定
- 半峰值时间：由相对大得多的时间常数 τ_1 决定

标准波定义的波前时间和波后时间

- 波 u_1 时： $u_1 = 0.3 U_{2m}$
- 波 u_2 时： $u_2 = 0.9 U_{2m}$
- 在 t 时： $u_2 = 0.5 U_{2m}$
- 波前时间 t_f ：在求波前时间 t_f 与电路参数的关系时，可近似地认为 $\exp(-t/\tau_1)$ 随时间几乎不变，且设其值恒定为1，即
- $0.3 U_{2m} = U_{2m} [1 - \exp(-t_f/\tau_2)]$ ，即
- $\exp(-t_f/\tau_2) = 0.7$
- $0.9 U_{2m} = U_{2m} [1 - \exp(-t_r/\tau_2)]$ ，即
- $\exp(-t_r/\tau_2) = 0.1$



标准波定义

由上两式可得 $t_f = \tau_2 \ln 7$

波后时间：因图中AO, CF与AABD相似，故波前时间

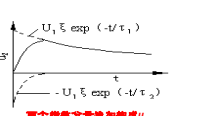
$T_F = (t_f - t_r) / (0.9 - 0.3) = \tau_2 \ln 7 / 0.6 \approx 3.24 \tau_2$

上述 U_1 的近似条件相当于图示等效回路中，放电电阻 $R_d \rightarrow \infty$ ，球隙 g_0 放电后，电压 u_2 上升。 τ_2 相当于充电时间常数，即

$\tau_2 = (R_d + R_1) C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$

于是 $T_F \approx 3.24 (R_d + R_1) C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$

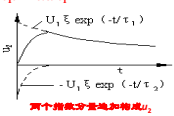
因 $C_1 \gg C_2$ ，故 $T_F \approx 3.24 (R_d + R_1) C_2$



两个指数分量之和 u_2

● **半峰值时间（波尾时间）计算**

- 求半峰值时间与电路参数可考虑 $\tau_1 \gg \tau_2$
- 半峰值时间的 $\exp(-t/\tau_2)$ 已衰减到接近零值
- 确定半峰值时间 T_1 时，考虑到 $T_1 \gg T_2$ ，不计及 T_2 的影响
- $u_d(t) = U_{2m} \exp(-t/\tau_1)$
- 根据波形定义 $U_{2m}/2 = U_{2m} \exp(-T_1/\tau_1)$
- $T_1 = \tau_1 \ln 2 = 0.69 \tau_1$



两个指数分量相加构成 u_2

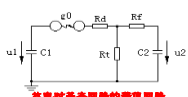
电压 u_2 到达峰值 U_{2m} 后，如等效电路图所示，电容 C_1 和 C_2 一起经过电阻 R_1 等放电

因一般 $C_1 \gg C_2$ ，放电快慢主要决定于 C_1

$\tau_1 \approx (R_d + R_1)(C_1 + C_2) \approx (R_d + R_1) C_1$

半峰值时间 $T_1 \approx 0.69(R_d + R_1)(C_1 + C_2)$

或 $T_1 \approx 0.69(R_d + R_1) C_1$



发电时基本回路的等效电路

19

3. 发生器的电压效率

$$\eta = [C_1 / (C_1 + C_2)] [R_1 / (R_d + R_1)]$$

这意味着输出电压 u_2 的峰值 U_{2m} 低于电容 C_1 上的初始充电电压 U_1 。它是由 C_1 与 C_2 之间的分压和 R_1 与 R_d 之间的分压造成的

4. 发生器的标称值

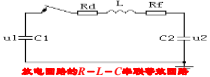
标称电压：即是冲击电压发生器的名义电压 U_{1n} ， $U_{1n} \geq U_1$

标称能量： $W_n = C_1 U_{1n}^2 / 2$

20

6.3.3 考虑回路电感的近似计算

- 在计算波前时间时，仍采用简化条件
- $R_1 \rightarrow \infty$ ，把回路电感 L 考虑进去，则放电回路将变为 $R-L-C$ 串联回路
- 其中 R 为阻尼电阻 R_d 与波前电阻 R_1 之和。为获得非振荡冲击波，应使：

$$R \geq 2 \sqrt{\frac{L}{C_1 C_2 / (C_1 + C_2)}}$$


发电回路的 $R-L-C$ 串联等效电路

● 假定是处于临界阻尼条件。经过简化计算，最终可得到波前时间

$$T_f = 2.33 \tau_2 = 2.33 R C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$$

电感的存在使得波形变陡，波前时间缩短（？）

21

投票 最多可选1项

回路电感对波前时间 T_f 有没有影响？

A 有

B 没有

提交

22

6.3.4 冲击电压发生器放电回路计算举例

设置一台冲击电压发生器，要求它能满足110kV电能产品的雷电冲击放电及耐压试验之用。请选各它的额定电压 U_{1n} 、冲击电容量 C_1 、初步确定负荷电容 C_2 ，计算波前电阻 R_d ，放电电阻 R_1 ，电压效率 η 和额定容量 W_n 等。

解：

GB规定：110kV 电能产品的雷电冲击耐受电压为850kV

放电电压一般小于850kV，实际按900kV考虑

电压效率初步考虑为85%，则标称电压为1060kV

考虑额定放电对寿命的影响及可能的特殊产品试验，选标称电压1200kV

也考虑了满足线路合成绝缘子的1000kV/μs冲击陡波试验

电能产品的电容量小，负荷电容主要是分压器、及发生器本身的杂散电容

选择低阻分压器的电容300pF，其他杂散电容及试品电容为200pF

总负荷电容为500pF

仅从电压效率考虑， C_2 达5nF~10nF即可，为增强效果选取为20nF

采用高效电路，假设每级电压200kV，则共需6级，每级电容 C 的电容量为0.12μF

计算方法：二阶阻容回路计算、放电回路的近似计算

23

6.4 冲击大电流的产生（自学）

6.4.1 冲击电流发生器的功用与电流波形的规定

6.4.2 冲击电流发生器的基本原理

6.4.3 冲击电流发生器的结构

24



6.4.1 冲击电流发生器的功用与电流波形的规定

- 冲击电流发生器的功用：模拟雷击电流、发生脉冲功率
- 冲击电流波形：电力工程规定两类波形
 - 第一类 T_1/T_2 波：1 μ s/20 μ s, 4 μ s/10 μ s, 8 μ s/20 μ s, 30 μ s/80 μ s
 - 第二类近似方波
- ✓峰值持续时间 T_d ：500 μ s, 1000 μ s, 2000 μ s, 或者2000 μ s与3200 μ s
- ✓规定的允许偏差及 T_d 和 T_f 的定义请见中国国家标准GB/T 16927.1

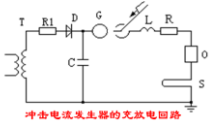
25



6.4.2 冲击电流发生器的基本原理

大电容器储能产生冲击电流

工作原理基本上与冲击电压发生器相似。由一组高压大电容量的电容器，先通过直流高压并联充电，充电时间为几十秒到几分钟，然后通过触发球隙的击穿，并联地对试品放电，从而在试品上流过冲击大电流



26



6.4.3 冲击电流发生器的结构

- 回路总电感由电容器的残余电感、连线电感、球隙电感和试品电感组成
- 为了获得尽可能大的冲击电流，回路电感应尽可能小
 - 首选低电感的脉冲电容器
 - 连线尽可能短，用大铝板做连线，连接电极的两块铝板几乎紧贴；或采用同轴电缆
 - 缩小放电火花的长度以减小球隙放电时的电感
- 要避免单个电容器故障引起的电容器爆炸
- 避免电流流经接地系统引起电位升高，冲击电流发生器的电流应通过良好的金属回路流归电容器的下电极
- 放电回路单点接地

27



高电压工程— 之高电压的测量

第6讲 高电压的测量

28



第7章 高电压的测量

- 7.1 高电压测量的基本概念
- 7.2 球隙放电法测量高电压
- 7.3 高压静电电压表
- 7.4 分压器
- 7.5 高压电阻分压器
- 7.6 高压电容分压器
- 7.7 阻尼式电容分压器
- 7.8 微分积分测量系统
- 7.9 对冲击电压测量系统响应特性的要求*
- 7.10 测量冲击高电压的示波器*
- 7.11 利用光电技术测量高电压*
- 7.12 高电压电场测量*
- 7.13 高电压测量系统中测试仪器的抗干扰措施

*注：自学

29



7.1 高电压测量基本概念

- 7.1.1 概论
- 7.1.2 高电压测量系统
- 7.1.3 交直流高电压的测量
- 7.1.4 冲击高电压的测量



30



7.1.1 概论

高电压测量的难点：

- 安全可靠
- 泄漏电流、电晕影响
- 交流和冲击下杂散参数的影响
- 冲击下良好的阶跃响应特性
- 电压高达数兆难度更大

31

投票 最多可选1项

设置

是否可以用球-球间隙来测量交直流和冲击高电压？

- A 可以
- B 不可以
- C 不一定

提交

32



测量对象 \ 测量方法	直接测量	间接测量				
	球隙电压表	用分压器组成测量系统	用电容分压器组成测量系统	用标准电容器组成测量系统	集中式电容分压器	微分电容分压器
稳态交流电压	○	○	○	○	○	△
一定频率的高频电压	△	○	○	○	○	△
直流电压	△	○	×	×	×	×
脉动成分很大的直流电压	△	△	○	×	×	×
雷电冲击电压	○	×	○	△	○	○
操作冲击电压	△	×	○	○	○	△
陡波前冲击电压	△	×	○	△	○	○
极快速暂态电压	△	×	○	△	○	○
振荡电压	△	×	×	○	○	△

33



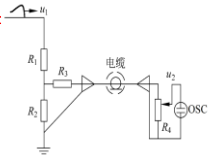
7.1.2 高电压测量系统

高电压测量系统

测量系统的定义：有关高电压试验技术的国际标准IEC 60060—2和国标GB/T 16927.2中，把用来进行高电压或冲击电流测量的整套装置称为测量系统

测量系统构成（4个组件）

- 转换装置：将被测的量转变成指示仪表或记录仪器所能指示或记录的量的装置
- 引线：转换装置接到试品或电流回路的引线
- 连接系统：转换装置的输出端接到指示或记录仪器的连接系统，其中包括了所附有的衰减、终端和匹配阻抗或网络、指示或记录仪器及其接到电源的连线
- 接地系统



34



测量系统的分类及测量的不确定度

测量系统的分类

- IEC 60060—2和国家标准GB/T 16927.2都把测量系统分为两类
- 标准测量系统（reference measuring system）：标准测量系统具有较高的测量准确度
- 认可测量系统（approved measuring system）：实验室中一般使用的系统为认可的测量系统，可用标准测量系统进行比对并加以校准

测量的不确定度

- 在高电压试验中，测量的不确定度用扩展不确定度来描述
- 扩展不确定度：是确定测量结果区间的量，被测量之值分布的大部分可望包含于此区间中，它的覆盖率小于100%


35



7.1.3 交直流高电压的测量

- 标准测量系统：在测量交流电压峰值或有效值，或直流电压的算术平均值时，扩展不确定度均应不超过±1%的范围
- 认可交流测量系统：在额定频率下测量试验电压峰值或有效值的扩展不确定度应在±3%范围内
- 认可直流测量系统：
 - 一般要求试验电压算术平均值的测量扩展不确定度应不超过±3%
 - 测量直流电压的纹波幅值时，其扩展不确定度不超过±10%的纹波幅值或±1%的直流电压平均值

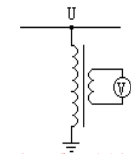
36



●电力系统与实验室的高电压测量


➢电力系统

电力运行部门测量交流高电压，是通过电压互感器和电压表来实现的



用电压互感器测交流电压

37



➢实验室的高电压测量

✓互感器在高电压实验室中用得不多

• 因为：（1）高电压实验室中所要测的电压值常常比现有电压互感器的额定电压高许多，特制一个超高压的电压互感器是比较昂贵的；（2）而且很高电压的互感器比较笨重

• 采用别的方法来测量交流高电压

✓实验室交流、直流高电压的测量方法


• 利用气体放电测量交流、直流高电压，如测量球隙

• 利用静电力测量交流、直流高电压，如静电电压表

• 利用整流电容电流测量交流高电压，如峰值电压表


• 利用整流充电电压测量交流高电压，如峰值电压表

• 用高欧姆电阻串联直流毫安表可以测量直流电压的平均值，是一种比较方便而又常用的测量系统



测量静电电压表的测量方法

38

投票 最多可选1项 

是否可以用静电电压表测量冲击高电压？


☐ A 是

☐ B 否

☐ C 不一定

提交


39



➢扩大量程的方法：各种测量仪表的量程是有限度的，常常通过分压器来扩大仪表的量程。即：使被测电压的大部分降落在分压器的高压臂上，测量仪表测得的仅是低压臂上的电压降，再乘上分压比，即可得被测电压

➢光电测量技术：光纤技术在电工领域中的应用日益广泛。光纤本身是绝缘材料，因此光纤技术应用于高电压测量时，无杂散和电磁干扰的影响，具有很大的优越性。在稳态电压测量时，无频率特性的要求，只要注意选用温度特性良好的光电元件，比较容易满足测量准确度的要求。光电测量高电压需要用其它测量方法加以校正

40

单选题 1分 

以下关于测量电压频率与测量方法的论述哪些是正确的？

☐ A 标准操作冲击电压波形的等效频率低于工频


☒ B 标准雷电冲击电压波形的等效频率高于工频

☐ C 能够测量工频电压的测量系统可以用来测量操作冲击电压

☐ D 能够用来测量测量雷电冲击电压的测量系统可以用来测量操作冲击电压

提交

41



7.1.4 冲击高电压的测量

●冲击电压的特点

➢无论是雷电冲击电压或操作冲击电压，均为快速变化或较快速变化的一种电压

●冲击测量系统的特点

➢测量冲击电压的整个测量系统包括其中的电压转换装置和指示、记录及测量仪器必须具有良好的瞬态响应特性

➢一些适宜于测量稳态或慢过程(如直流和交流电压)的测量系统不一定适宜于或根本不可能测量冲击电压

➢冲击电压的测量包括峰值测量和波形记录两个方面

42



●测量系统的扩展不确定度

- 对认可的测量系统
- ✓测量冲击全波峰值的扩展不确定度为 $\pm 3\%$ 范围内
- ✓测量冲击截波的总不确定度取决于截断时间 T_c
- 当 $0.5\mu s \leq T_c < 2\mu s$ 时，总不确定度为 $\pm 5\%$ 范围内
- 当 $T_c \geq 2\mu s$ 时，总不确定度为 $\pm 3\%$ 范围内
- ✓测量冲击波形时间参数（如波前时间、半峰值时间、截断时间等）的总不确定度为 $\pm 10\%$ 范围内

43



●实验室中冲击高电压的测量

- ✓球隙法：是直接测量高电压峰值的一种方法
- ✓分压器——峰值电压表：只测峰值，不测波形。事先应验证波形合乎标准，或同时用示波器观测波形
- ✓分压器——示波器（或数字记录仪）：可同时测出峰值及波形。在采用数字式示波器或数字记录仪时，可立即获得峰值和时间参数值，并可打印
- ✓光电测量法：采用光纤技术的测量法。有的仍需与分压器配合，有的则不需要分压器，测量系统中具有专门的传感器或电容探头

44



7.2 球隙放电法测量高电压

- 7.2.1 测量球隙
- 7.2.2 球隙法测量交流高电压
- 7.2.3 球隙法测量冲击高电压
- 7.2.4 球隙法测量高电压的优缺点

45



7.2.1 测量球隙

1. 球隙法
符合尺寸的球间隙有两种方式，垂直球间隙和水平球间隙；见IEC 60052出版物或国标GB 311.6

- 测量原理
 - 空气在一定电场强度下，才能发生碰撞游离
 - 均匀电场下空气间隙的放电电压与间隙距离具有一定的关系
 - 可利用间隙放电来测量电压，无绝对均匀电场，可做到接近于均匀电场
- 测量球隙：由一对相同直径的金属球构成。加压时，球隙间形成稍不均匀电场。当其余条件相同时，球间隙在大气中的击穿电压决定于球隙的距离
- 球隙法测量电压的特点
 - 由于邻近效应的影响，球间的电场强度和击穿电压很难计算，球隙的放电电压主要是靠试验来决定的
 - 1938年IEC综合各国试验室的试验数据制订出测量球隙放电电压的标准表
 - 到1960年IEC对1938年颁布的标准表又作了修正
 - * 放电电压表：张仁豫等 高电压试验技术 清华大学出版社 北京：1982，p.249



46

投票 最多可选1项



你认为高电压测量用的球-球主要是怎么做的？

- A 手工制作
- B 机器制作

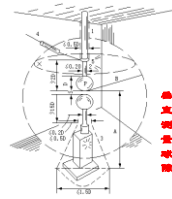
提交

47



2. 球隙结构与测量条件

- 球隙与球间隙距离的确定
 - 对一定球径，间隙中的电场随距离的增长而越来越不均匀
 - 被测电压越高，间隙距离越大，要求球径也越大，才能保持稍不均匀电场
 - 当S与D之比大于0.5时，其放电数值准确性较差
 - 要达到球隙所能达到的测量准确度，其结构和使用条件必须符合IEC或国家标准规定
- 球隙距离：S不大于0.4D
- 标准球径D为：2、5、6.25、10、12.5、15、25、50、75、100、150、200 cm
- 可测的电压峰值：从几kV到近2000kV



垂直测量球隙

48

3. 预放电与预射

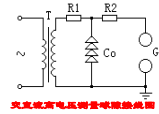
- **放电分散性的影响因素**：球隙测量电压的可靠性，决定于测量结果的分散性，其影响因素有二：
 - 一是球面的尘污：可使放电电压降低，对交、直流和冲击影响一样
 - 二是球隙间空气游离不充分：可使放电电压升高，在冲击下显现出来
- **预放电**：如果空气中有灰尘或纤维物质，则会产生不正常的破坏性放电。因此在取得前后一致的数据以前，必须进行多次预放电。在放电电压值相对稳定后，才正式算数。最后测量应取三次连续数的平均值，其偏差不超过3%。
- **射线照射**：IEC认为在测量峰值50 kV以下的电压以及用直径为12.5 cm或更小的球测量任何电压时，都需要用 γ 射线或紫外线照射

49

7.2.2 球隙法测量交流高压

● 串联保护电阻

- R_1 是变压器保护电阻
- R_2 是阻尼保护电阻：在用球间隙测量交流和直流电压时，经常也需在球间隙上串联一个保护电阻
- **保护电阻 R_2 阻值的选择**
- **选择原则**：为了限流和阻尼，要求 R_2 大一些；但为了避免 R_2 上压降引起测量误差，要求 R_2 小一些



- **交流流的保护电阻**：对于测量交流和工频交流电压时，IEC推荐阻值100 k Ω
- **高频的保护电阻**：对于更高频率的交流电压，由于间隙的电容效应而引起的充电电流可使该电阻上的压降影响变为较大，因此应适当减小此阻值
- **球径的影响**：球直径越大，允许的每伏电压之电阻值越小，这有两个原因：第一，球径大它的面积也大，热容量大而且散热好；第二，球径大，球间电容大，电容电流也大

50

7.2.3 球隙法测量冲击高电压

● 测量冲击与稳态高电压的区别与联系

- **预放电**：冲击和稳态都需要预放电
- **自由电子触发**：放电必须由有效自由电子来触发
- ✓ **交、直流电压**：变化慢，持续时间长，不难在间隙中出现有效自由电子
- ✓ **冲击电压**：变化快，一要即逝，要在这样短暂瞬间正好出现有效自由电子比较困难
- 当测量电压较高，所用球径较大，间隙所占空间较大，出现有效自由电子比较容易
- 当测量电压较低，所用球径较小，间隙所占空间较小，出现有效自由电子比较困难
- **触发自由电子的方法**：国际标准规定，凡所用球径小于12.5 cm或测量电压低于50 kV，都必须用照射，即人工方法使间隙中空气游离

51

● 保护电阻

- ✓ **测量交流电压时**：球隙必须串有很大阻值的保护电阻来保护球面和防止振荡
- ✓ **测量冲击电压时**
 - 冲击放电时间很短，不需要保护球面，而且放电前经过球隙的电容电流较大，如串联电阻过大，会影响测量结果
 - 但也不能不要串联电阻，因为仍有防止过电压的问题，一般规定串联电阻以不超过500 Ω 为宜
- **冲击比**
 - ✓ **一般间隙**：冲击放电电压高于交流和直流的放电电压，冲击比大于1
 - ✓ **球隙**：是个稍不均匀电场，它的伏-秒特性大体上是条水平线，冲击比等于1
 - ✓ **放电电压**：因为冲击比等于1，所以球隙的冲击放电电压和交流放电电压可以并列一张表中，但表中所列是50%放电电压值，也即是冲击放电电压的平均值

52

● 50%放电电压的测量

- **50%放电电压的概念**：所谓球隙的50%放电电压值，是指在此电压作用下，相应的球间隙距离的放电概率为50%。
- **关于测量方法的 U_{50} 的概念解释**：一种简单的作法，如使某一冲击电压作用到某一球隙距离上，十次中如有五次放电五次不放电，则此冲击电压即为该球隙距离的50%放电电压。但要在十次中正好有五次放、五次不放，实践中有困难，所以有规定认为如十次中能有四次放、六次不放，或六次放、四次不放都可算作50%放电电压
- **放电概率**：本身代表多次事件中出现的频率，次数少了不一定准确。很有可能，即使电压、距离都不变，前十次中的放电概率与后十次中的很不相同，但如次数多了，还是可能得出一准确值的
- **采用50%放电电压的依据**：不仅球隙测量用50%放电电压，所有自恢复绝缘，只要它的放电分散情况符合正态分布规律的，都采用50%放电电压
- **确定50%放电电压的方法**：确定50%放电电压的方法分多级法和升降法等

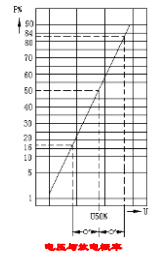
53

● 50%放电电压的测量方法

1. 多级法

- ✓ **概念**：用多级法求某一间隙的50%放电电压时，可向此间隙逐级施加电压 U ，每级电压施加10次，求得在该电压下的放电近似概率 $P\%$ ，然后在正态概率纸上标出相应于 U 的 P 点，如此做4~5点，即可得出一条拟合直线，由此直线可求得相应于 $P=50\%$ 的 U 值，即为50%放电电压 $U_{50}\%$
- ✓ **一般求法**：一般认为在 $P=20\sim 80\%$ 范围内 P 与 U 近似直线关系，在 $P=50\sim 80\%$ 做一点及 $P=20\sim 50\%$ 做一点，联成直线即可求得 $U_{50}\%$
- ✓ **标准偏差**：从正态概率纸上求得 P 为15.85%以及84.15%点所对应的 U 值，它和 $U_{50}\%$ 之差，即标准偏差 σ

2. 升降法



54



7.2.4 球隙法测量高电压的优缺点

●球隙法测量高电压的优点：

- **直接测量超高压的唯一设备**：可以测量稳态高电压和冲击电压的幅值，几乎是直接测量**超高压**的唯一设备
- **结构**：简单，容易自制或购买，不易损坏
- **有一定的准确度**，一般认为测量交流及冲击电压时可达 $\pm 3\%$ 以内

55



●球隙法测量高电压的缺点：

- **放电产生过电压**：测量时必须放电，放电将破坏稳定状态可引起过电压
- **放电具有统计性**，测量费时：气体放电有统计性，数据分散，必须取多次放电数据的平均值，为防止游离气体的影响，每次放电间隔不得小于一分钟
- 在击穿电压后25%电压的升压过程中的升压速度每秒钟不得超过击穿电压的2%，测量较费时间
- **需较细曲线和采用50%放电电压**：实际使用中，测量稳态电压要进行多次放电，测量冲击电压要用50%放电电压法，手续都较麻烦
- **要较严天气条件**
- **影响建筑结构尺寸**：被测电压越高，球径越大，目前已有用到直径为3米的铜球，不仅本身越来越笨重，而且影响建筑尺寸。从发展的角度来看，测量球隙的前途将成问题
- **不宜户外使用**：一般来说测量球隙不宜用于室外，实践证明，由于强气流以及灰尘、砂土、纤维和高湿度的影响，球隙在室外使用时常会产生异常放电

56



●球隙法测量高电压小结

- ✓ **标准测量装置**：尽管测量球隙具有上述缺点，IEC及国家标准都规定它是一种能以规定的准确度来测量高电压的标准测量装置
- ✓ **直流校准**：标准还规定了可采用棒-棒间隙来测量直流高压，并可用它作为标准测量装置来校核未认可的测量装置。在满足一定条件的情况下，它的测量的不确定度估计小于 $\pm 3\%$

57



清华大学
Tsinghua University

高电压工程— 之高电压和大电流的产生、测量

第6讲 The End

谢谢！

58