



高电压技术教研室
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

《高电压技术》

第十章 高电压试验技术

Section 3 稳态电压的测量

汲胜昌 祝令瑜

2021年02-05月





西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Section 3 稳态高压的测量

Part I 交流高压测量 — 8

Part II 直流高压测量 — 7

个人参考学习、请勿网络传播



Part I 交流高压测量

1 概述

测量方法

电力部门: 电压互感器+电压表

实验室内: 测量球隙

静电电压表

峰值电压表

分压器

测量系统: 认可的测量系统: 不确定度 $\pm 3\%$ 以内

标准的测量系统: 不确定度 $\pm 1\%$ 以内



由于测量误差的存在, 对被测量值的不能肯定的程度。

不确定度的值即为各项值距离平均值的最大距离



测量不确定度

- 不确定度

- 由于测量误差的存在，对被测量值不能肯定的程度
- 表明该结果的可信赖程度
- 测量结果质量的指标
 - 不确定度越大，测量结果的质量越低，水平越低，其使用价值也越低。
- 报告物理量测量的结果时，必须给出相应的不确定度
 - 一方面便于使用它的人评定其可靠性，
 - 另一方面也增强了测量结果之间的可比性。



测量不确定度

- **不确定度的作用**

- 误差分析的准确理解和阐述；
- 比测量误差更准确的概念。

- **不确定度的定义**

表征合理地赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系参数

- **不确定度的分类**

- 标准不确定度，扩展不确定度
- A类，B类，合成不确定度等



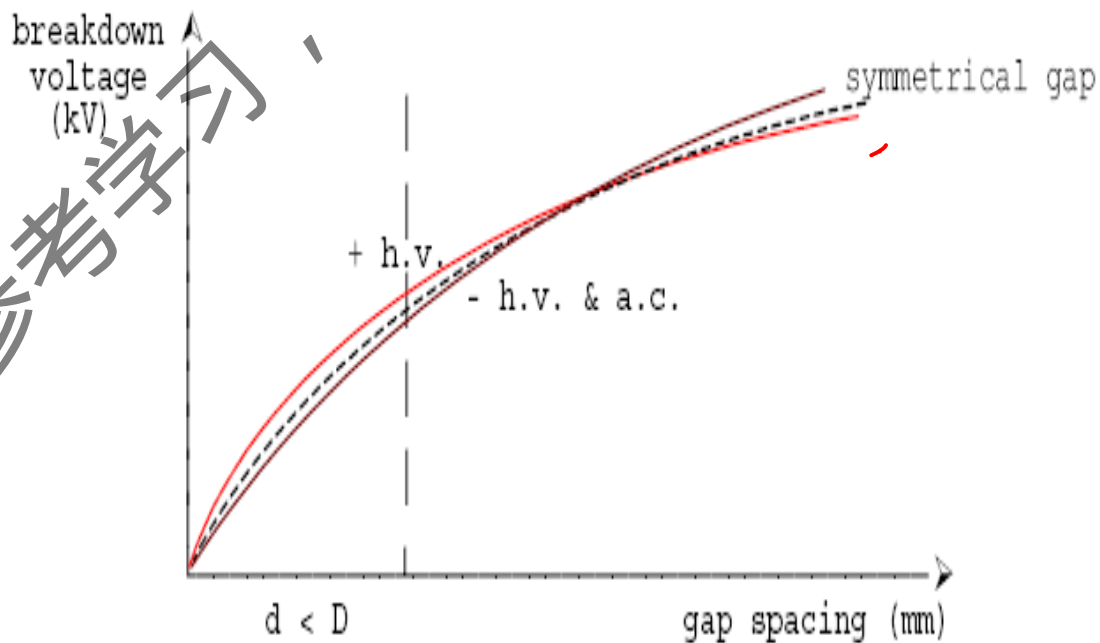
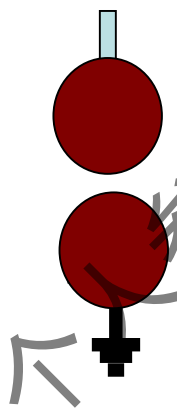
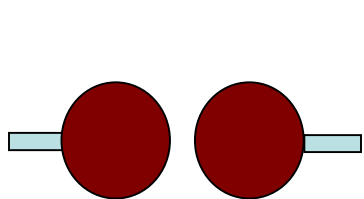
2 测量球隙

一、测量原理

气体放电：均匀场或稍不均匀场中间隙的放电电压与间隙距离成一定关系 $U_d \sim d$

Round-Robin Test

结构：一对直径相同的球，水平或垂直布置





西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



www.jd1618.com
武汉智达精密仪器有限公司



个人参考学习 请勿网络传播



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



现场实验

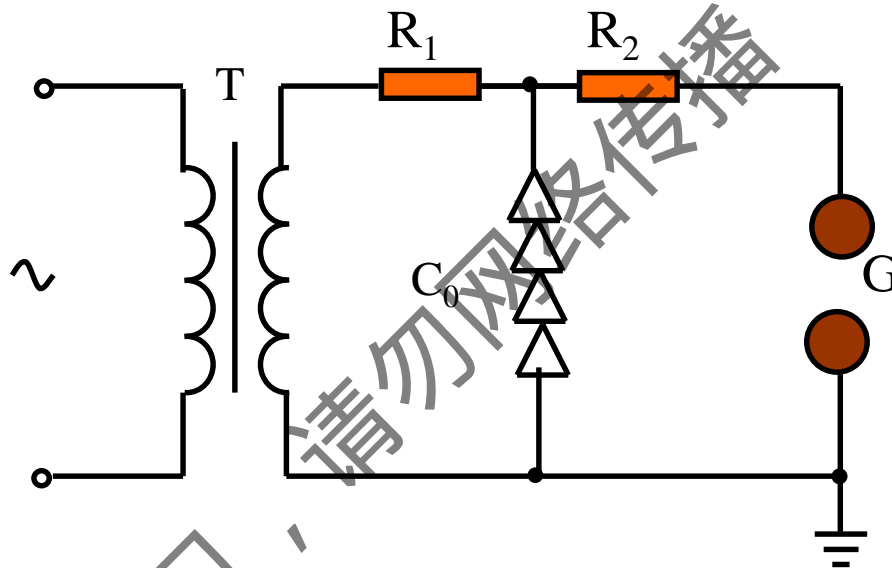


西安交通大学

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

二、测量回路

➤ 测量回路



R_2 : 保护电阻

$100\text{k}\Omega \sim 1\text{M}\Omega$

作用: 限流

阻尼高频振荡

➤ 要求

保证间隙为稍不均匀场

保证一定净空距



三、测量方法

1. 直接测量：连续3次的平均值，偏差<3%

大气条件修正：温度 气压

标准大气条件： $t_0=20^{\circ}\text{C}$, $h_0=11\text{g/cm}^3$, $p_0=0.103\text{MPa}$

实际大气条件： t, h, p

电压校正： $V = \delta \cdot k \cdot V_s$

大气密度修正系数：
$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

湿度修正系数：
$$k = 1 + 0.002(h/\delta - 11)$$

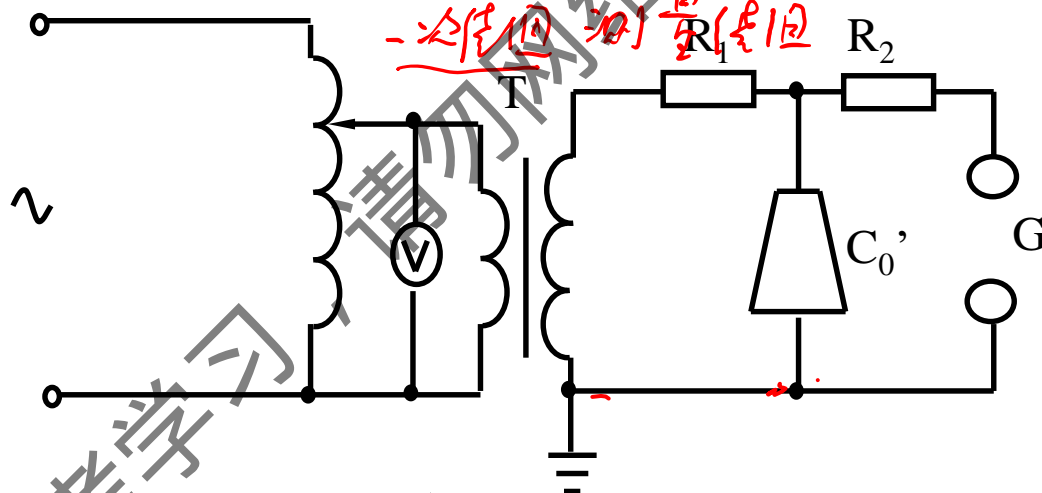
V : 测量电压; V_s : 标准大气下放电电压



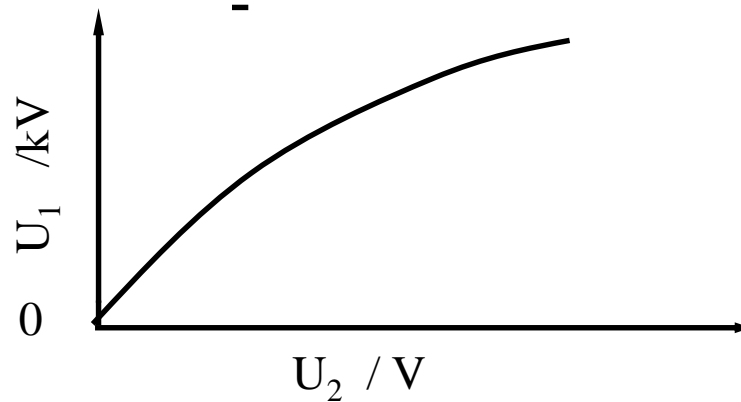
2. 作校正曲线

高压侧电压值与试验变压器低压侧的仪表读数间的比例关系

试验回路



校正曲线



一定负载下试验变压器的高、低压之间的关系



关于使用球隙测量交流高压，下列说法不正确的是

- ☒ A 球隙放电测量的是电压有效值
- ☐ B 测量准确性随球隙距离增大而降低
- ☐ C 测量球隙需要串接一个保护电阻
- ☐ D 在取得有效数据以前，需进行多次预放电

提交



四、优缺点

优点：直接测量高电压 (AC, DC, Impulse)

结构简单，不易损坏

有一定的准确度

$d < 0.5D$ 时

不确定度 $\pm 3\%$

$0.5D < d < 0.75D$ 时

不确定度 $\pm 5\%$

$d > 0.75D$ \times

缺点：需要放电 → 引起过电压

有分散性，受大气条件和周围环境的影响

$U \uparrow \rightarrow D \uparrow$ (目前用到直径为3m的铜球)

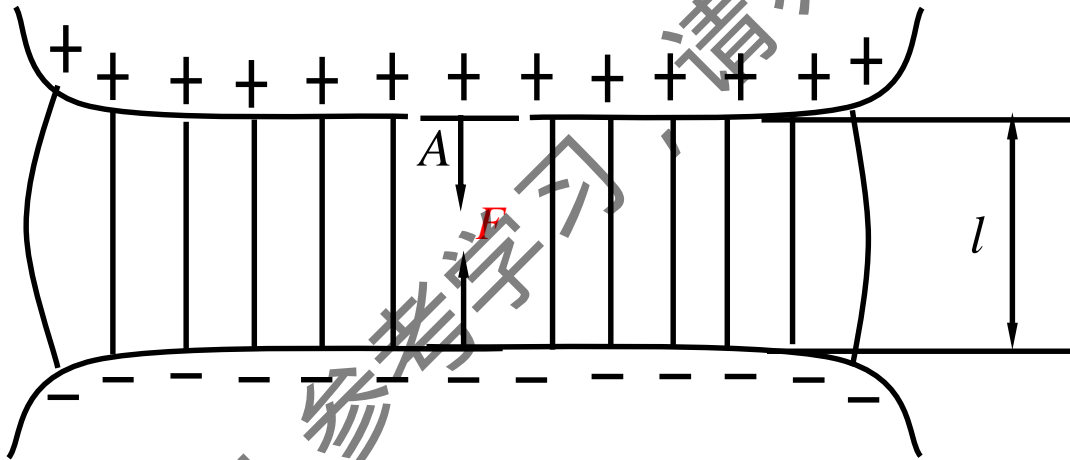


3 静电电压表

一、工作原理

带**正**、**负**电荷的导体间存在着静电吸引力

静电吸引力~电荷量有关~导体间电位差有关



$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{2} \cdot \frac{U^2}{l^2} \Rightarrow U = l \sqrt{2F / \epsilon_0 \epsilon_r A}$$

F : 一周期内的**平均值** U : 交流电压的**有效值**



二、类型与使用方法

1. 类型

绝对仪

准确、贵

非绝对仪

便宜、工程上使用较多

2. 使用方法

1) 平衡 2) 防振动、灰尘和风动

请勿网络传播
个人参考学习



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



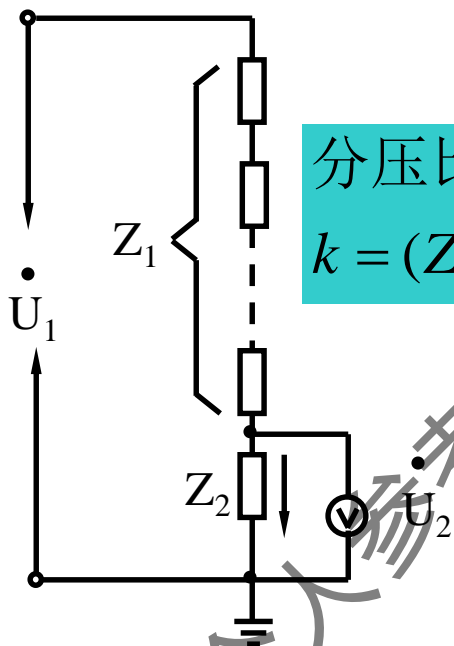


西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

4 交流高压分压器

原理：将高电压转换成低电压

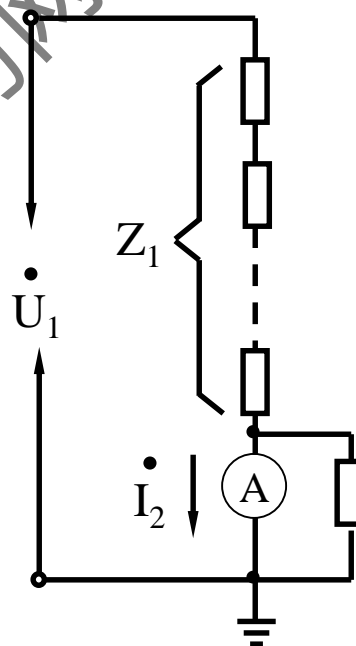
构成：高压臂和低压臂



分压比

$$k = (Z_1 + Z_2) / Z_2$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$$



$$\dot{U}_1 = \dot{I}_2 Z_1$$



要求：

- ❖ 不影响被测电压的幅值和波形，低压臂所测电压波形与原波形相同
- ❖ 耗能小，分压比稳定，分压比与频率、幅值无关
- ❖ 分压比与大气条件无关
- ❖ 分压器应无电晕和绝缘泄漏电流
- ❖ 不受周围环境影响

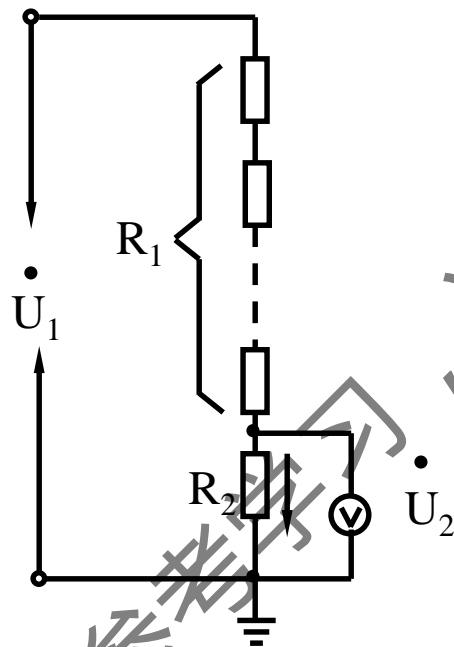
分压器的试验：

- ❖ 分压比的测定
- ❖ 线性度的测定
- ❖ 稳定性试验
- ❖ 幅—频特性试验





一、电阻分压器



分压比

$$k = (R_1 + R_2) / R_2$$

用于100kV以下

WHY?

材料:

碳膜、金属膜电阻、线绕电阻

阻值:

流过电阻的电流为几十~上百mA



低感



误差的原因

对地杂散电容



电压分布不均

容性电流流过



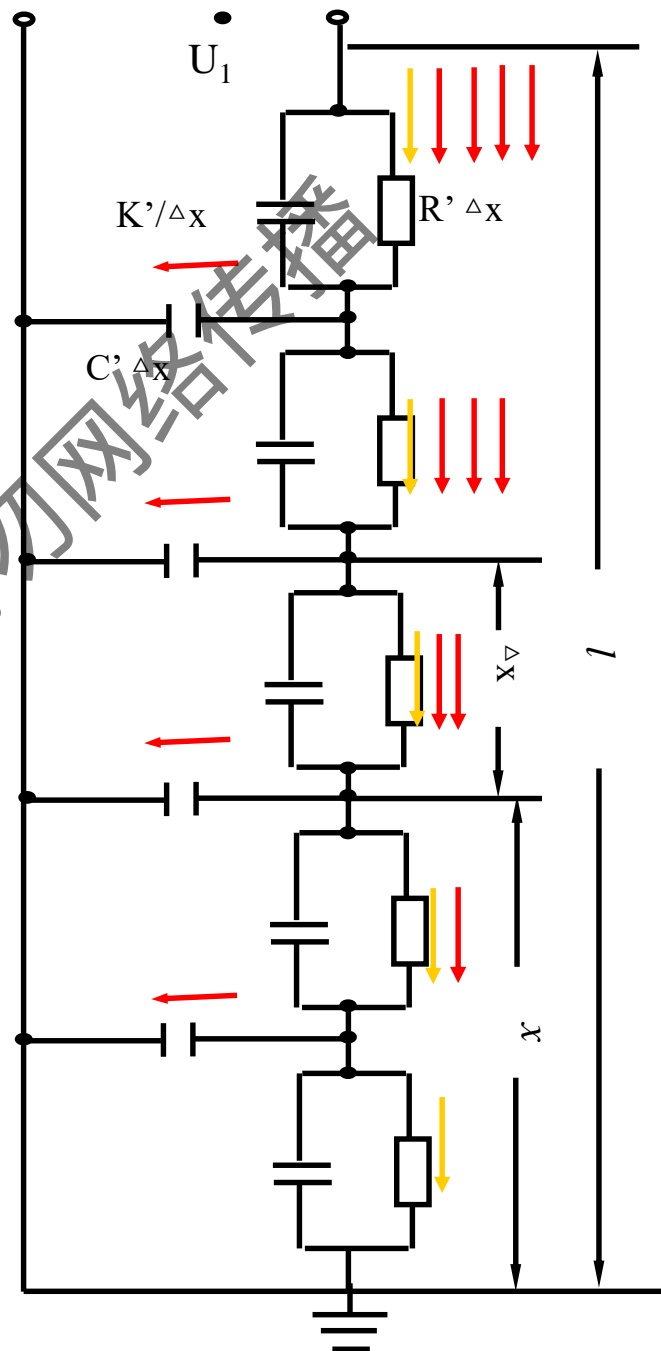
幅值误差

相角误差

$$Z = R(1 + \frac{j\omega RC}{6} + \dots)$$

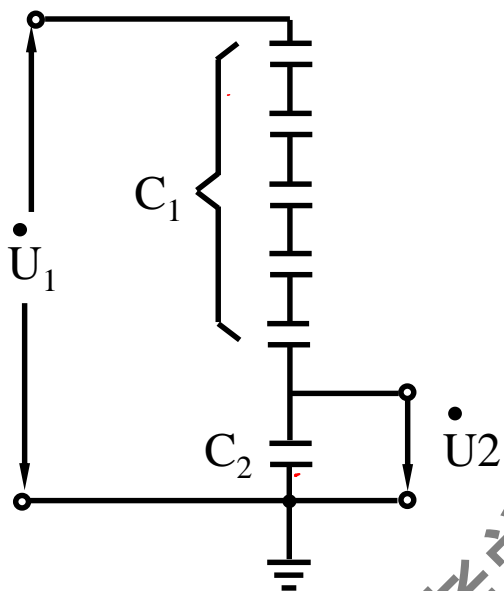
$$\approx \underline{R(1 + \frac{\omega^2 R^2 C^2}{180})} \angle \underline{\theta}$$

Δ 中分值





二、电容分压器



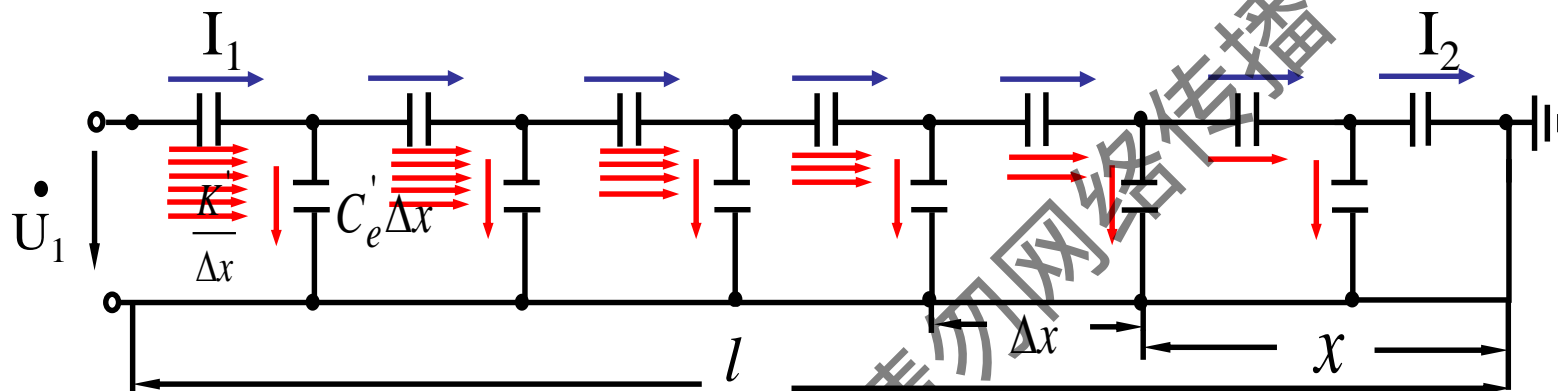
C1: 集中式电容 标准电容器
 分布式电容 多个电容串联

分压比: $k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$





分布式电容分压器的误差原因

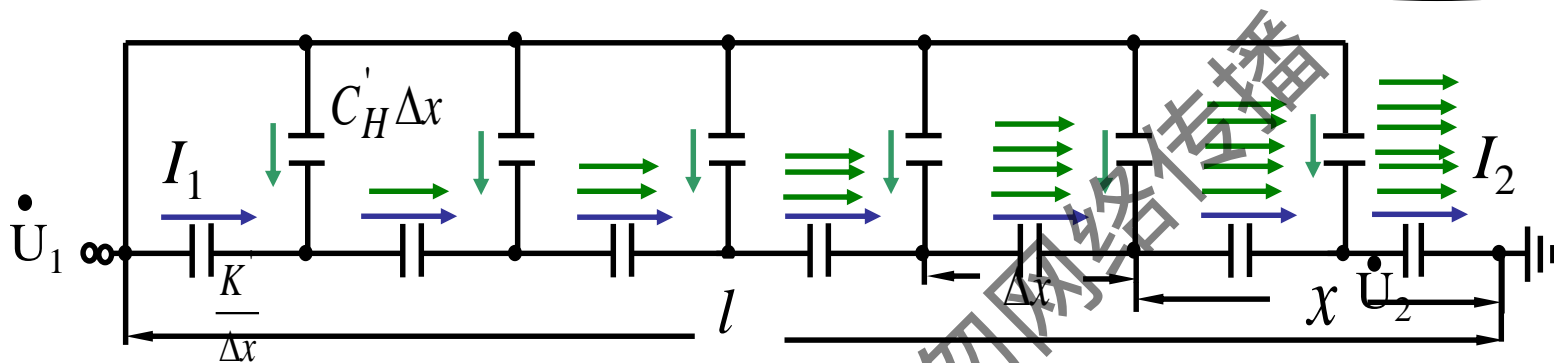


对地杂散电容上流过对地电流 $\Rightarrow I_1 \neq I_2, \quad I_2 < I_1$

$$C_1' \approx C_1 / (1 + C_e / 6C_1) \approx C_1 \left(1 - \frac{1}{6} \frac{C_e}{C_1} \right) \quad k \approx \frac{C_2}{C_1'} \approx \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{C_e}{C_1} \right)$$

$$\dot{U}_1 \approx \dot{U}_2 \frac{C_2}{C_1'} \approx \dot{U}_2 \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{C_e}{C_1} \right)$$

有幅值误差，无相角误差



对高压部分的杂散电容

$$\Rightarrow I_1 \neq I_2, \quad I_1 < I_2$$

$$C_1'' \approx C_1 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{C_H}{C_1} \right)$$

$$k \approx \frac{C_2}{C_1''} \approx \frac{C_2}{C_1} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{C_H}{C_1} \right)$$

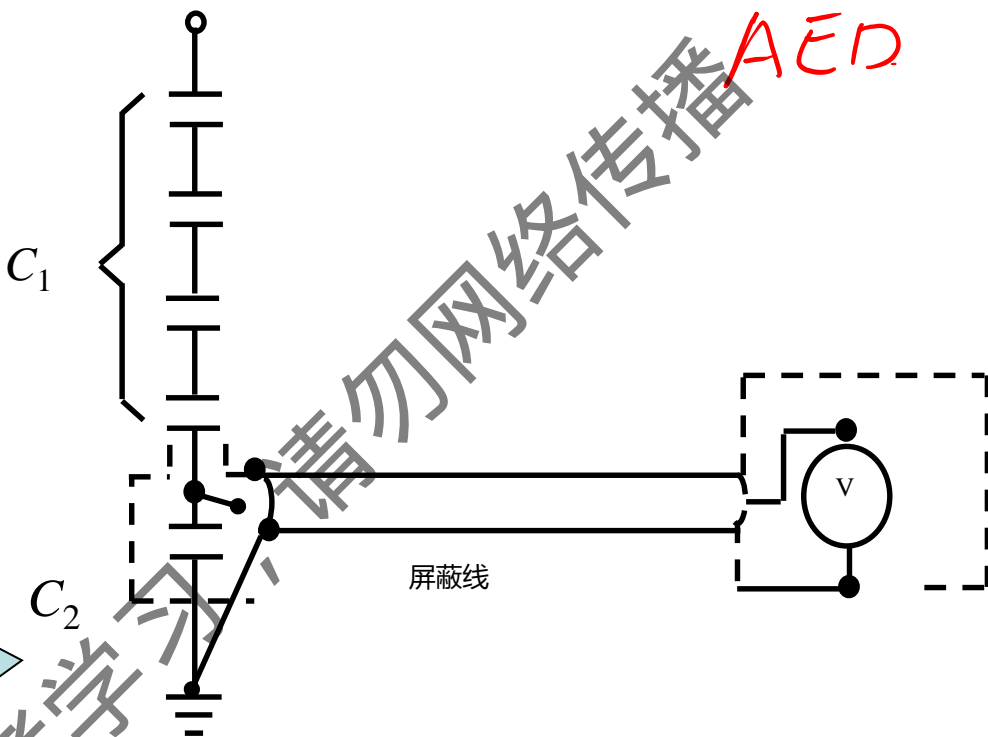
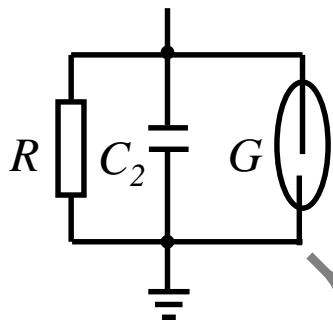
$$\dot{U}_1 \approx \dot{U}_2 \frac{C_2}{C_1''} \approx \dot{U}_2 \frac{C_2}{C_1} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{C_H}{C_1} \right)$$

有幅值误差，无相角误差



三、低压回路

$$R \gg \frac{1}{\omega C_2}$$



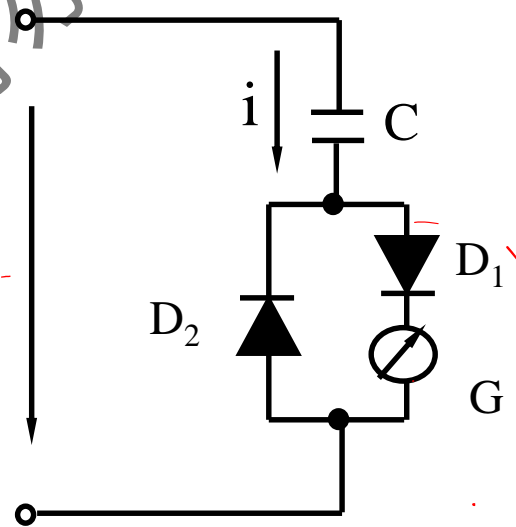
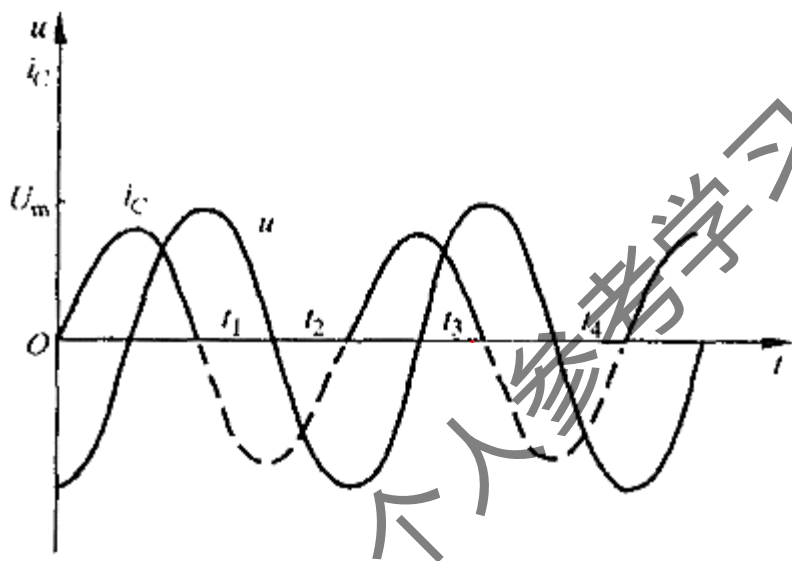
G : 抑制可能的过电压
 R : 释放 C_2 上的残余电荷



5 峰值电压表



一、利用电容电流的整流





$$I_d = \frac{1}{T} \int_0^T i_c dt = \frac{1}{T} \int_0^{+\frac{T}{2}} C \frac{du}{dt} dt = \frac{C}{T} \int_{-U_m}^{+U_m} du$$
$$= 2CU_m/T = 2CU_m f$$

$$\underline{U_m} = \underline{I_d} / (2Cf)$$

C : 高压标准电容器 (容值准确, 精度高)

测量波形要求:

符合标准要求;

谐波分量不大;

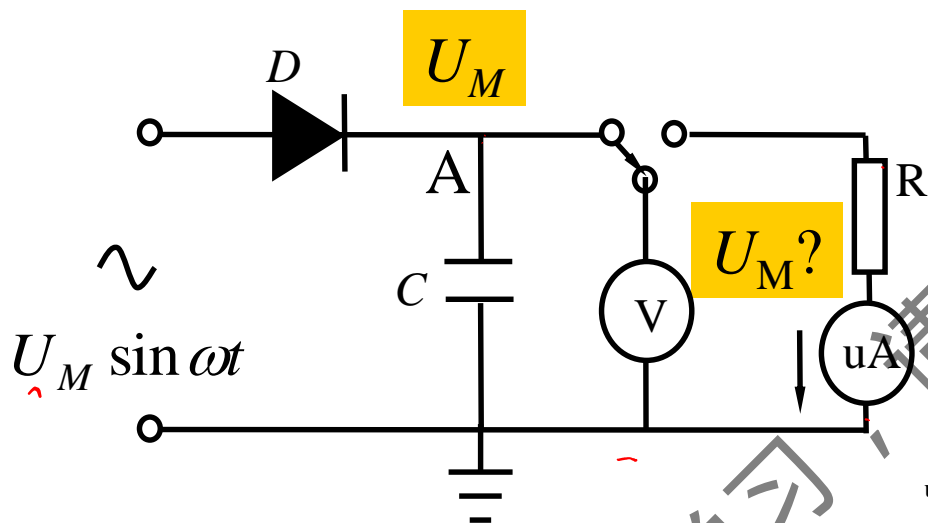
正负半周对称



西安交通大学

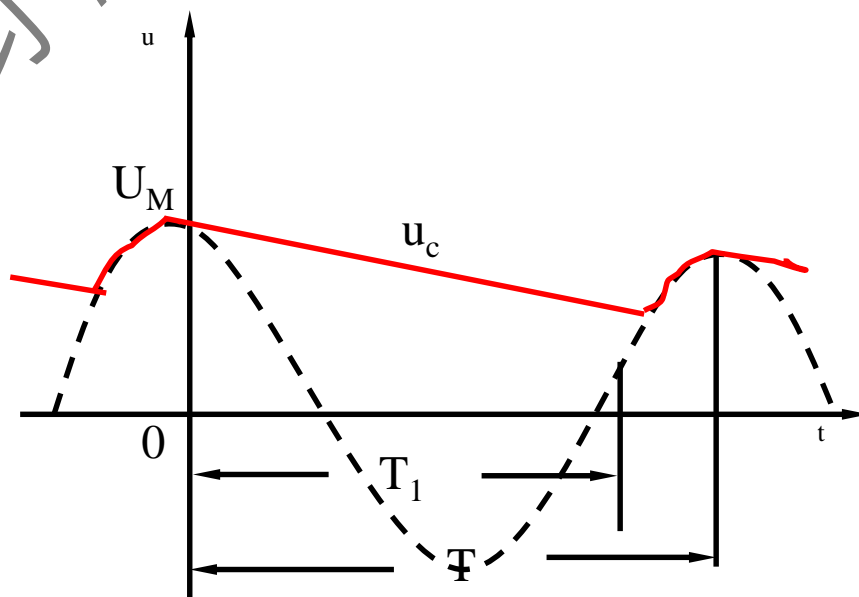
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

二、利用电容器上的整流充电电压



C, V, D 反向均不泄漏,
A点电位长时间保持不变

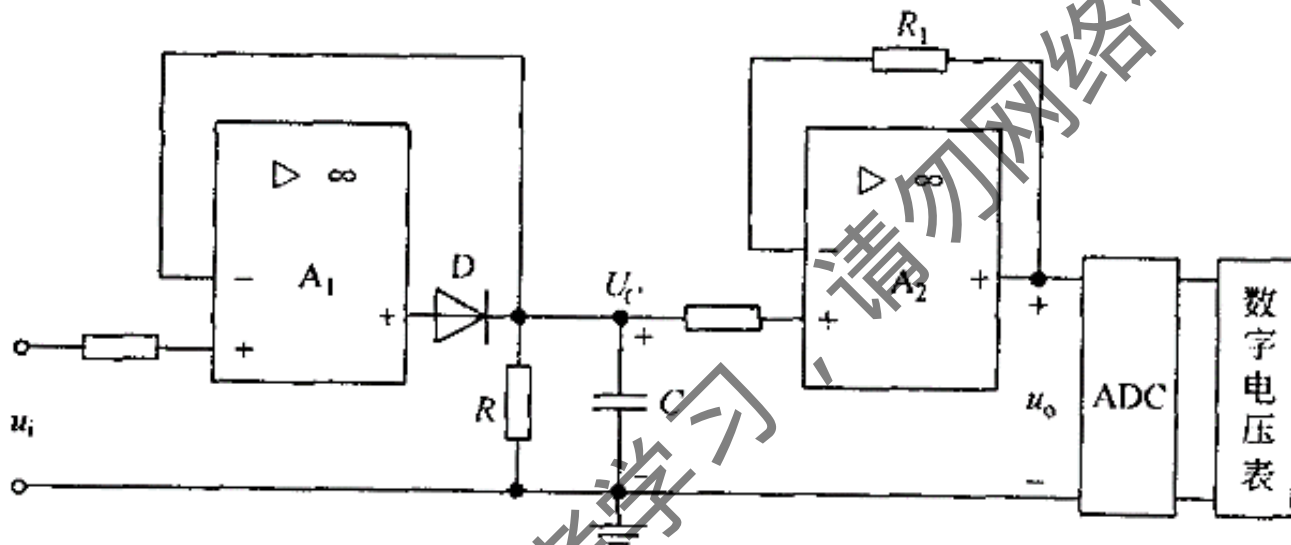
一周内: C 很短时间充电,
较长时间放电





西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

三、有源数字式峰值电压表



A1: 运放 (电压比较器)

A2: 电压跟随器

ADC: 模数转换器



Part II 直流高压测量

1 概述

GB/T16927.2-1997

规定： 平均值的测量，不确定度 $\leq 3\%$
脉动幅值的测量，不确定度 $\leq 10\%$
脉动系数的测量，不确定度 $\leq 1\%$
响应时间 $\leq 0.5s$ ， $\leq 5/f$ ， f 为纹波基频

• 球隙测量

$d < 0.4D$ ，不确定度 $\leq 5\%$

由于吸附灰尘、纤维的影响，不确定度增加

• 静电电压表

实际测量电压 $U = \sqrt{U_d^2 + \delta U^2} / 2$

$S \leq 3\%$ 时， $U \approx U_d$ ，不确定度 $\leq 2.5\%$



• 棒—棒间隙

钢或黄铜制成，端面为正方形，边长：15~25mm

标准大气： $V_s = 2 + 0.534d$

$(250\text{mm} \ll d \ll 2000\text{mm})$

大气修正： $V = \delta \cdot k \cdot V_s$

$k = 1 + 0.014(h/\delta - 11)$ $(1 \text{ g/m}^3 \leq h \leq 13 \text{ g/m}^3)$

不确定度 $\leq 3\%$

用途： 求取直流发生装置低压侧电压表的读数与高压侧产生的电压的关系；
校核未认可的测量系统，或作比对试验



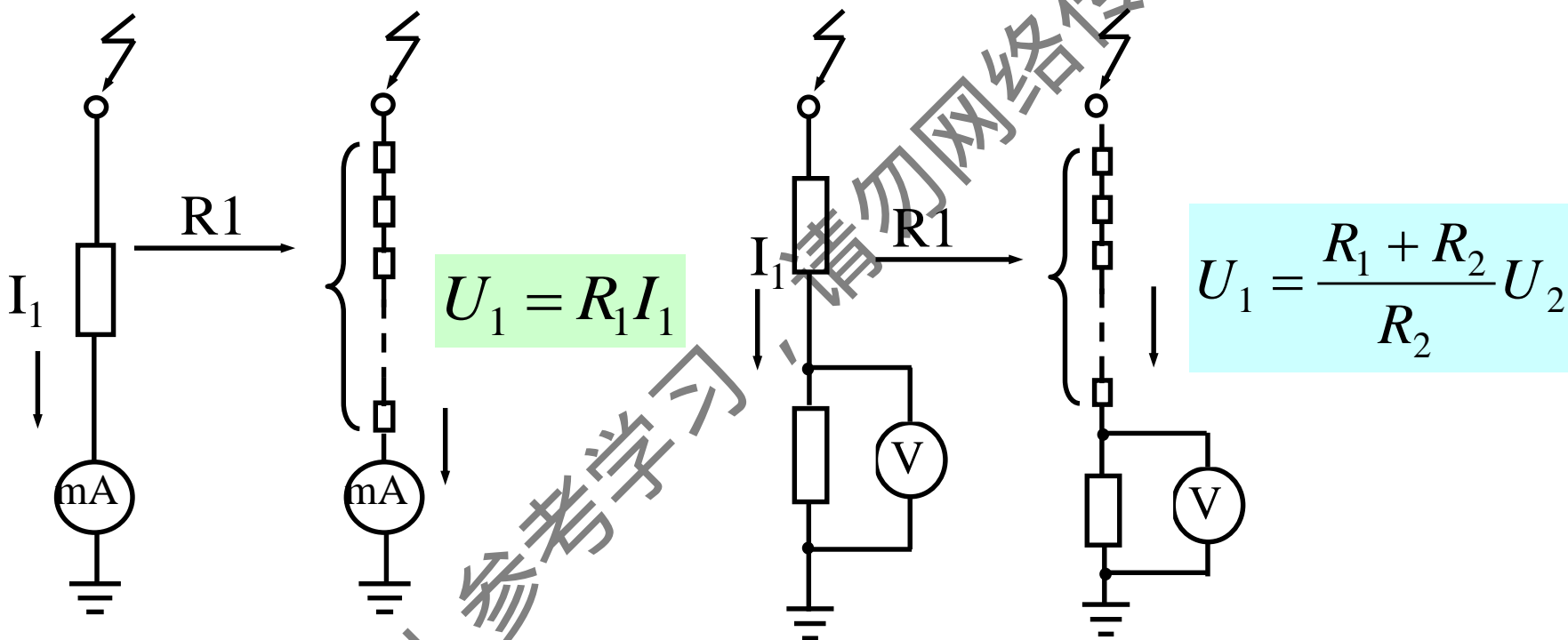
• 电阻分压器

不确定度 $\leq 3\%$ ，线性度和稳定度 $\leq 1\%$



2 电阻分压器

一、分压器的结构与高压臂电阻



高压臂电阻由多个高阻串联

电阻采用温度系数小的金属线绕
电阻、固态电阻或薄膜电阻



R_1 的取值:

- I_1 太大 $\rightarrow R_1$ 发热 $\rightarrow R_1$ 变化, 测量不准确
- I_1 太小 \rightarrow 电晕、泄漏的影响大 \rightarrow 测量误差

IEC规定: $I_1 \geq 0.5\text{mA}$

一般 $0.5 \sim 2\text{mA}$, 常取 1mA

U_d 高 $\rightarrow I_1$ 可大些, 反之, I_1 可小些

$$V_{oc} = 100\text{ kV.}$$

$$\frac{100\text{ m}\Omega}{50\text{ m}\Omega}$$



二、引起误差的原因

1. 电阻本身发热

解决方法：电阻的选择（大容量，利用不同的温度系数）
电阻浸泡在绝缘油中、通以循环的绝缘气体

2. 电晕放电

影响：

$U_1 \sim I_1$ 或 $U_1 \sim U_2$ 的关系；

损坏元件

改进：

加屏蔽罩

R_1 浸泡在绝缘油中、充绝缘气体
等电位屏蔽





3. 绝缘支架的泄漏

R_1 又并联了一个电阻 R'

改进:

绝缘支架的选择

R_1 浸泡在绝缘油中
等电位屏蔽

阻容分压器:

电阻元件并联电容元件。

直流、交流一机两用，节约资金。



为什么不能用电容分压器测量直流高压？若用电容分压器测量直流高压，结果将如何？

