



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 High Voltage Test

汲胜昌 祝令瑜

2021年02-05月



Section1 交流高压的产生

1-1 概述

一、交流电压试验的作用

- 考验被试电气设备绝缘在长时的工作电压及瞬时的内过电压作用下是否可靠工作；
- 获得输电线路气体绝缘间隙耐压、绝缘子串闪络电压；
- 研究输电线路电晕损耗和电磁环境特性、带电作业项目安全性。



二、试验设备

1. 工频试验变压器

用途：工频耐压试验（GIS、变压器等等）

2. 超低频交流电压发生器

用途：电缆等

3. 高频高压发生器

用途：变压器绕组（150~400 Hz）

4. 串联谐振试验设备

用途：大容量试品，现场试验



三、交流电压的波形特性参数

- 峰值，频率，正弦波，有效值

- 总波形畸变率 $\text{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1}$

- 波形系数 = $\frac{\text{有效值}}{\text{平均值}}$

- 波顶系数 = $\frac{\text{峰值}}{\text{有效值}}$



1-2 工频高压试验变压器

一、用途

- 绝缘可靠性试验
 - 额定电压、暂时内过电压
- 绝缘试验、放电试验研究
 - 击穿、介损、电晕、污秽等
- 产生长波头操作波
 - 特高压的发展，操作冲击
- 其他高压发生器的“电源”



二、特点

试验变压器

电压：高，达3MV

负荷：小（容性）

工作特点：经常短路放电

过电压：梯度、恢复

工作时间：短

温升：低

安全系数：105~110%

电力变压器

1000kV

很大（感性）

不允许短路

雷电、操作

长期

高

2~3倍

电压高、负荷小、变比大

→绝缘要求高、漏磁通大、短路电抗大



三、结构

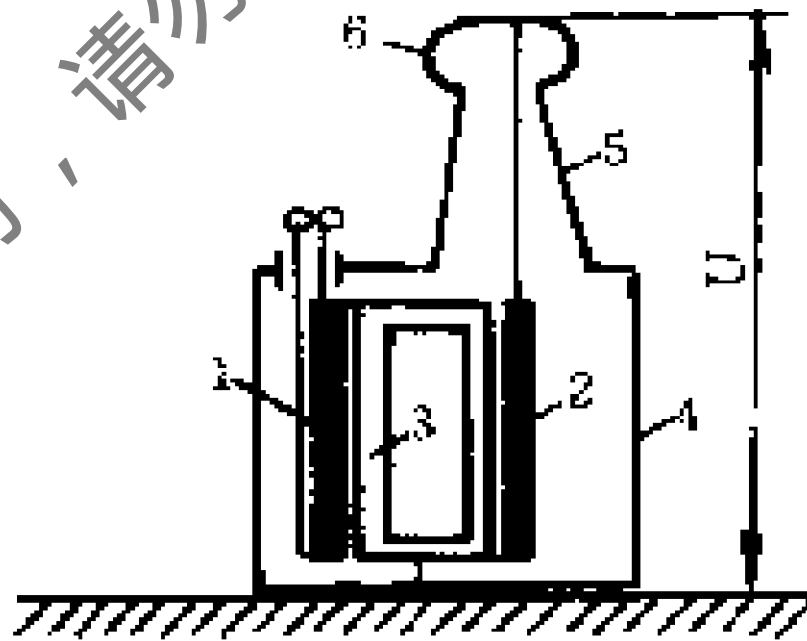
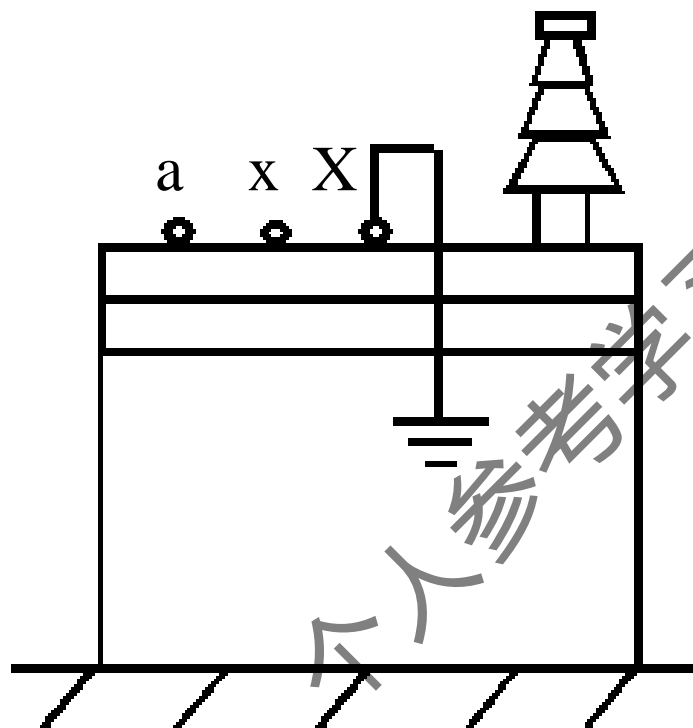
- 油浸式
 - 金属壳
 - 需要套管引出高压
 - 绝缘壳
 - 同时做外绝缘，省去套管；
 - 体积小、重量轻。
- 充气式
- 干式





油浸式金属壳变压器

- 单套管

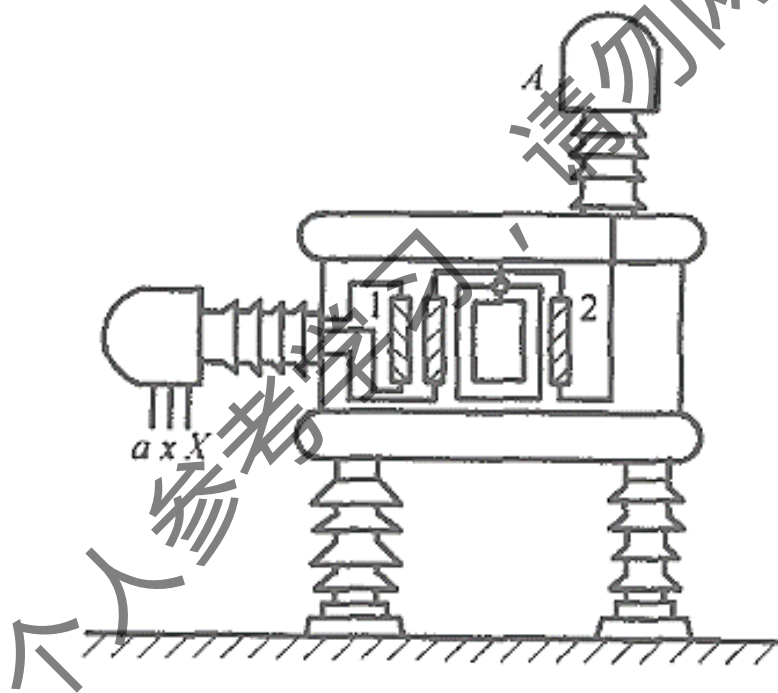




西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

• 双套管

外铁壳需对地绝缘的双套管变压器（金属壳）

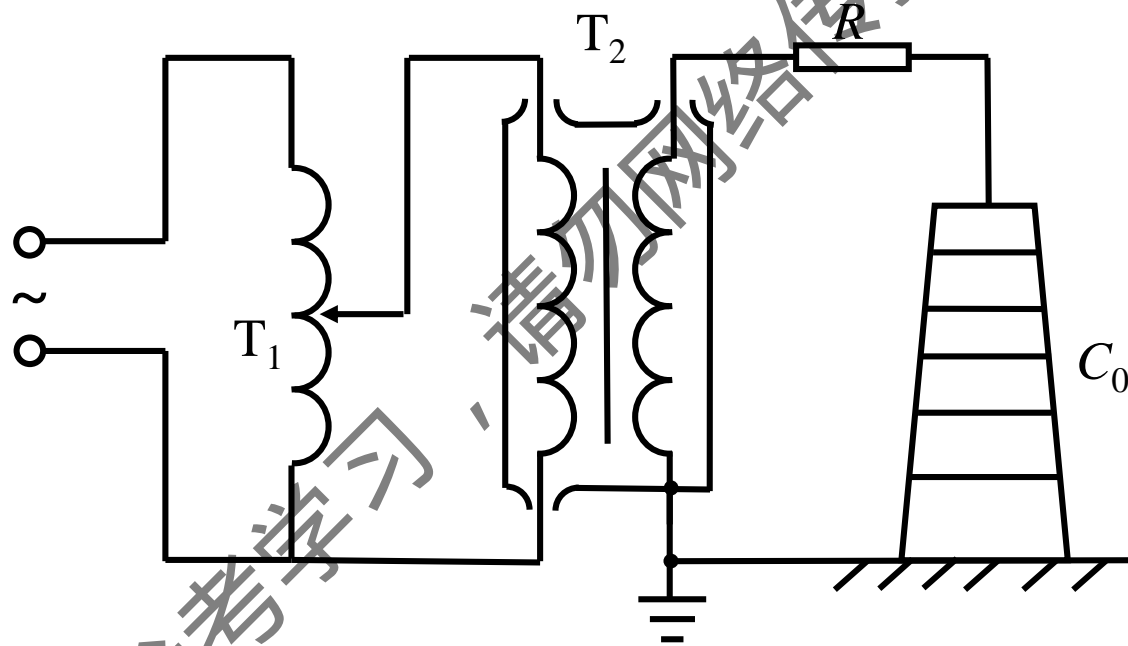






四、试验方法

1. 试验回路



升压：0 V→额定电压

降压：额定→0 V



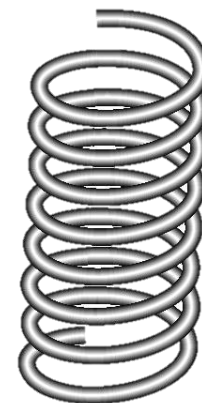
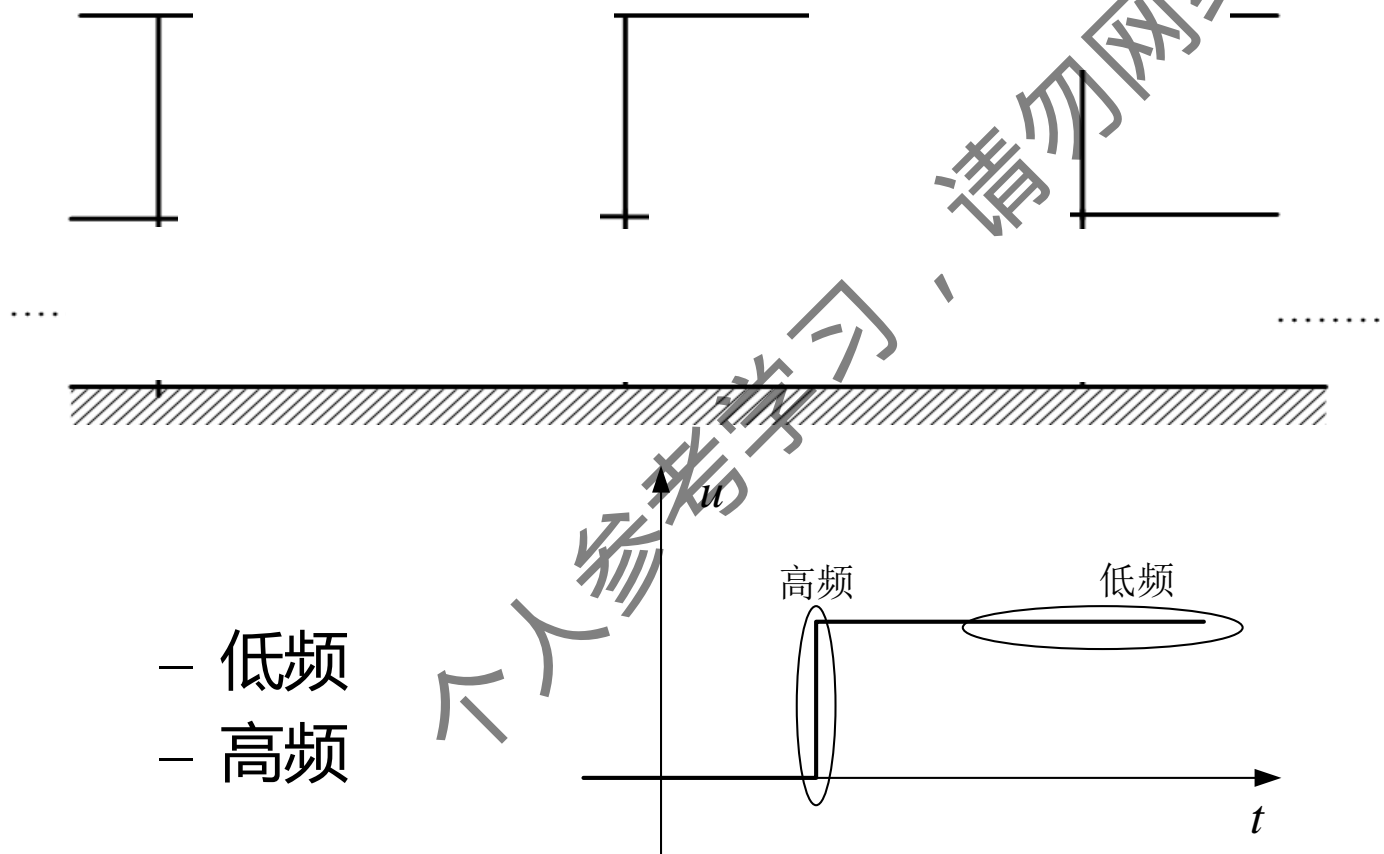
2. 保护电阻

- 作用：
 - 限制**过电流**
 - 试品放电时的短路电流
 - 限制**过电压**
 - 梯度过电压
 - 恢复过电压
- 选取：
 - 材料：线绕（康铜、锰铜、镍铬等合金）或**水电阻**
 - 容量
 - 阻值： $0.1\Omega/V$, $<100\text{ k}\Omega$
 - 长度： $150\sim 200\text{ kV/m}$

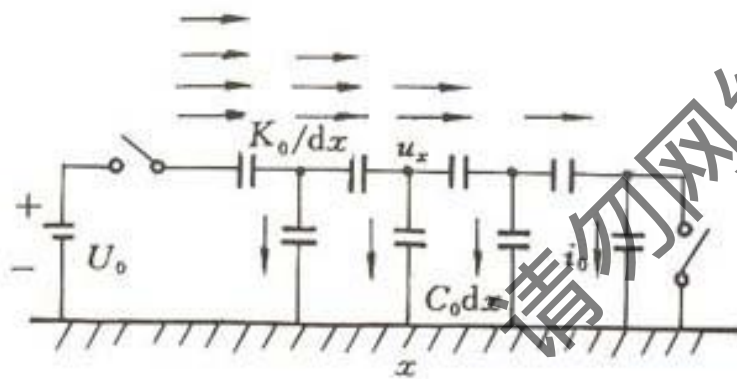




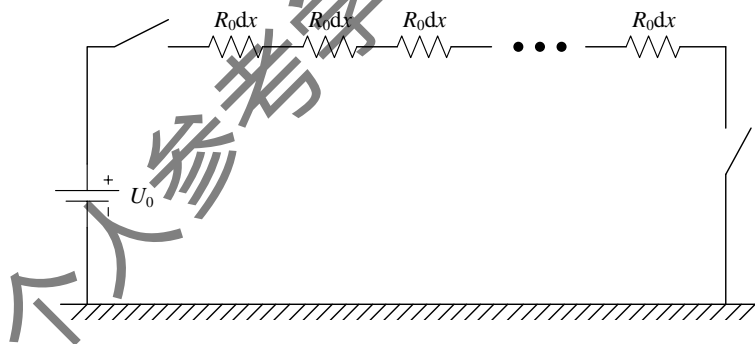
- 梯度过电压



• 初始电位分布



• 稳态电位分布



对于绕组类设备在快速变化的电压作用下：

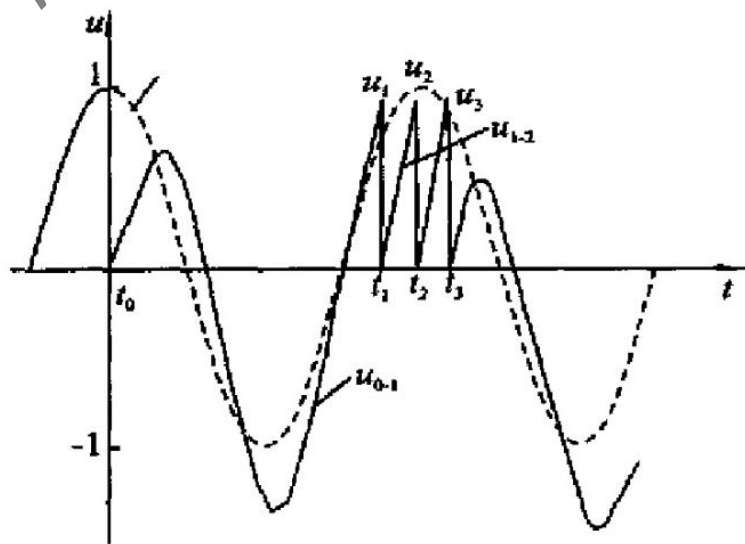
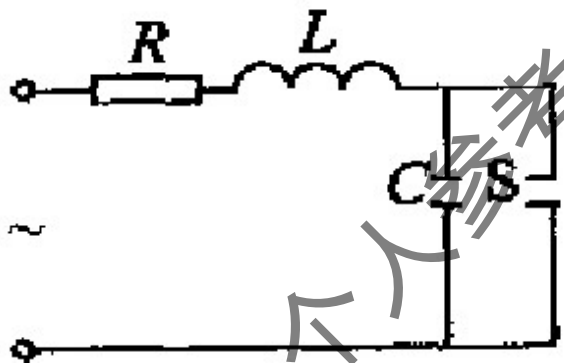
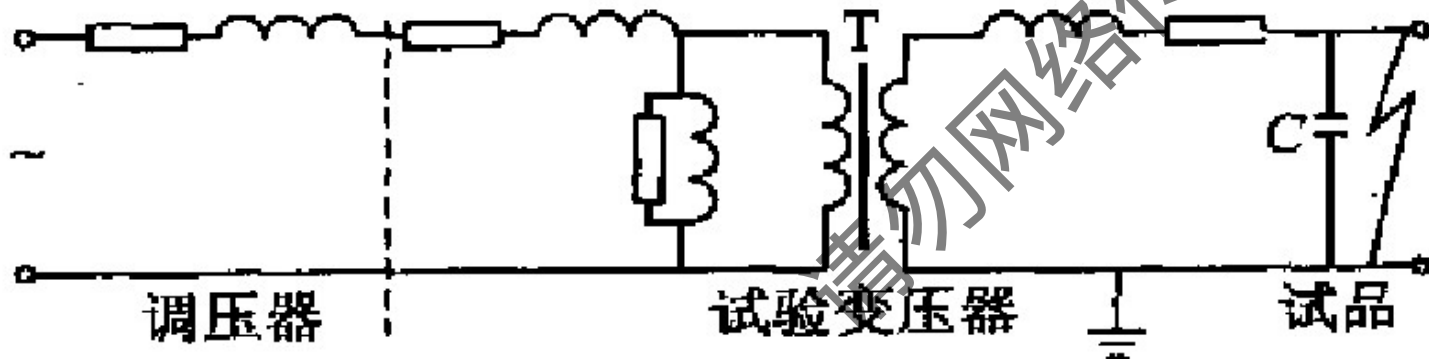
- 匝间绝缘
- 对地绝缘

会承担不同形式过电压

◆ 限制电压变化的陡度可以限制梯度过电压



- 恢复过电压





五、主要参数

电压和容量

单台电压<1000kV
串级最高 3000kV

1. 一般试品

试验电流:

$$I_s = \omega C U \times 10^{-9} (\text{A})$$

变压器容量:

$$P_s = \omega C U^2$$

U : 试验电压, kV (有效值)

C : 试品电容, pF

ω : 电压角频率



- 常见试品电容量

- 线路绝缘子: $< 50 \text{ pF}$
- 高压套管: $50\text{-}600 \text{ pF}$
- 高压断路器, 电流互感器 (CT) ,
电磁式电压互感器 (PT) : $100\text{-}1000 \text{ pF}$
- 电容式电压互感器 (CVT) : $3000\text{-}5000 \text{ pF}$
- 电力变压器: $1000\text{-}15000 \text{ pF}$
- 电力电缆: $150\text{-}400 \text{ pF/m}$



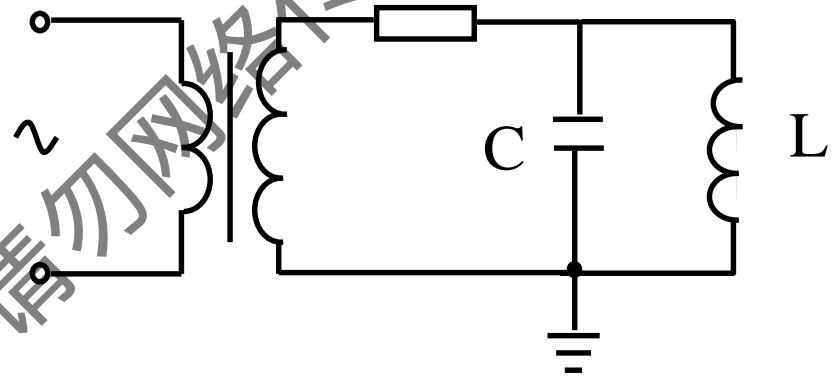
2. 大容量试品

- 串联谐振装置
- 超低频正弦波发生器
- 电感补偿

— 补偿后电源输出容量

$$P_s = \left[\omega C U^2 - \frac{U^2}{\omega L} \right]$$
$$= \left[\omega C U^2 - \frac{U^2}{\omega L} \right]$$

— 缺点：波形畸变





3. 电导性负载

如湿闪、污闪试验

- 存在问题：

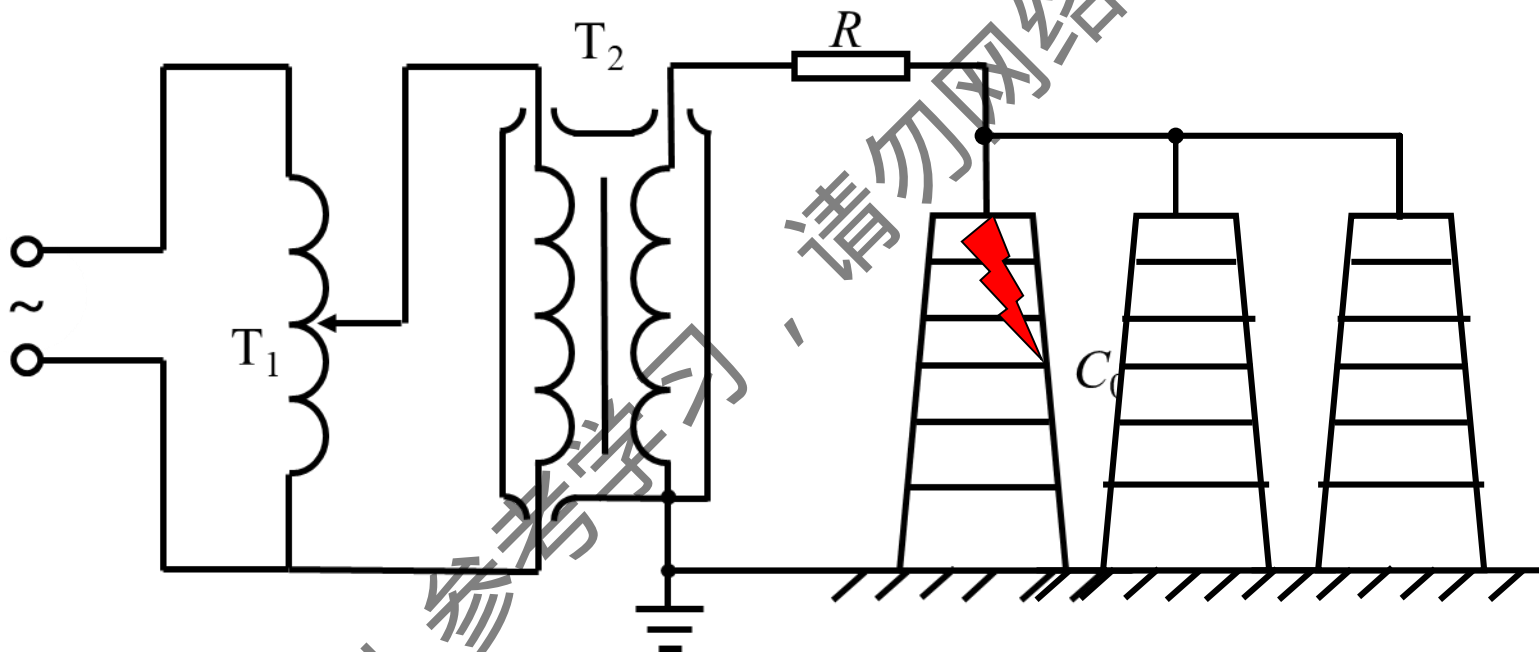
- 电弧放电：要能驱动形成电弧
- 容量较小、阻抗较大，无法判断何时发生闪络

- 要求：

- 小样品干试验(<100 kV)：额定电流 > 0.1 A，短路阻抗 $< 20\%$
- 自恢复外绝缘干试验：同上
- 湿闪：额定电流 > 1 A
- 污闪：额定电流 > 15 A



六、“容升”效应



变压器输入电压相同，同样试品

单个试品试验：合格

多个并联：出现闪络



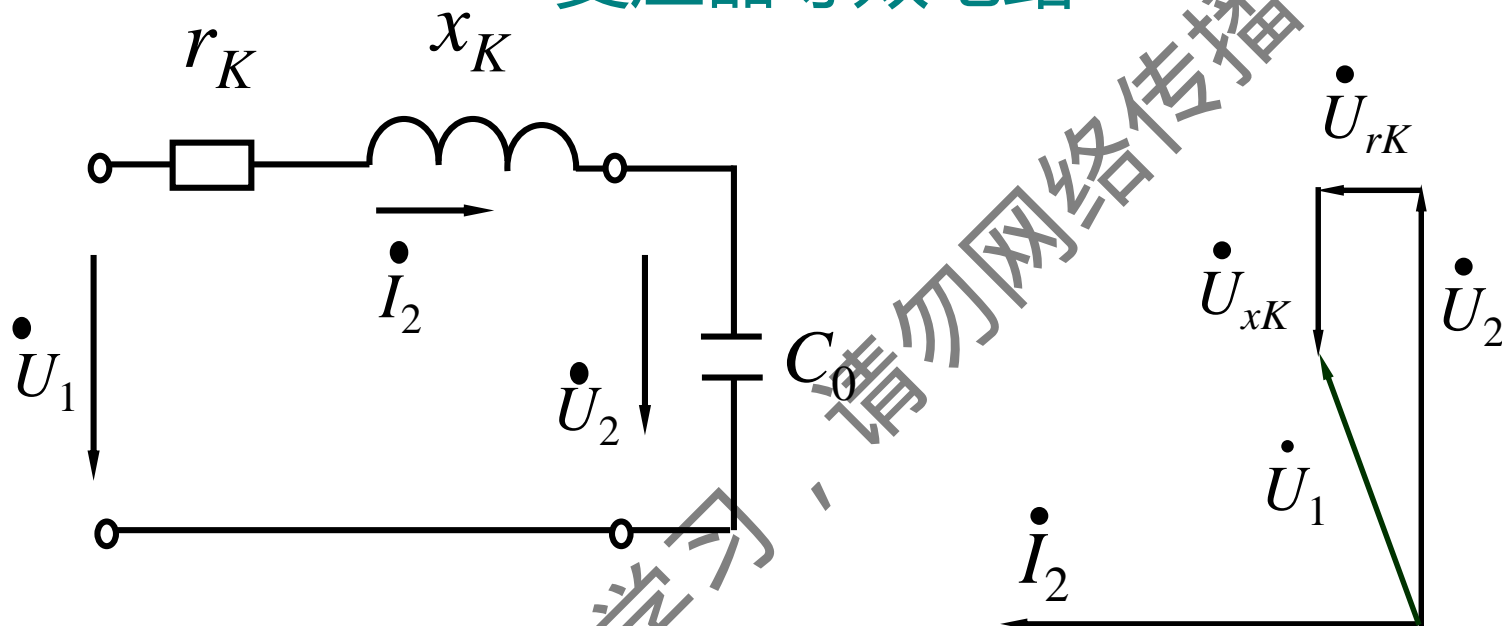
“容升”效应

试验变压器具有较大漏抗时，在容性负载下会出现变压器输出端和被试品上电压升高的现象。

原因：容性试品
变压器和调压器的漏抗



变压器等效电路



U_1 : 由低压侧换算的输出电压

$$\dot{U}_{rK} = \dot{I}_2 r_K$$

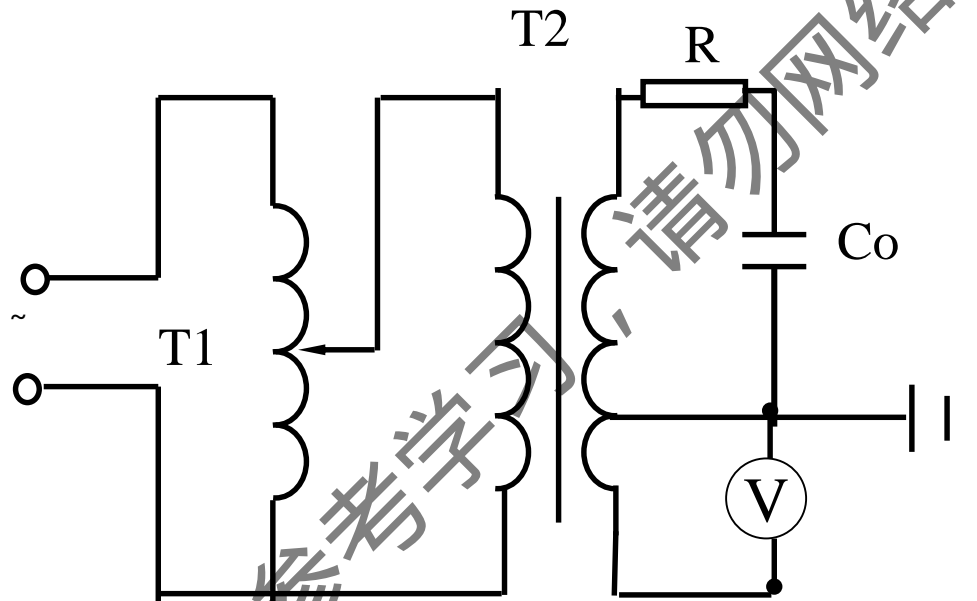
$$\dot{U}_{xK} = \dot{I}_2 x_K$$

$$U_2 > U_1$$



解决方法

- 变压器二次侧增加测量绕组



- 作校正曲线



七、串级高压试验变压器

成本 $\sim U^3$

- 绝缘问题
- 安装、运输等

单个变压器

很少超过750kV

基本原理

多台串接，电压相叠加
自耦式串级变压器

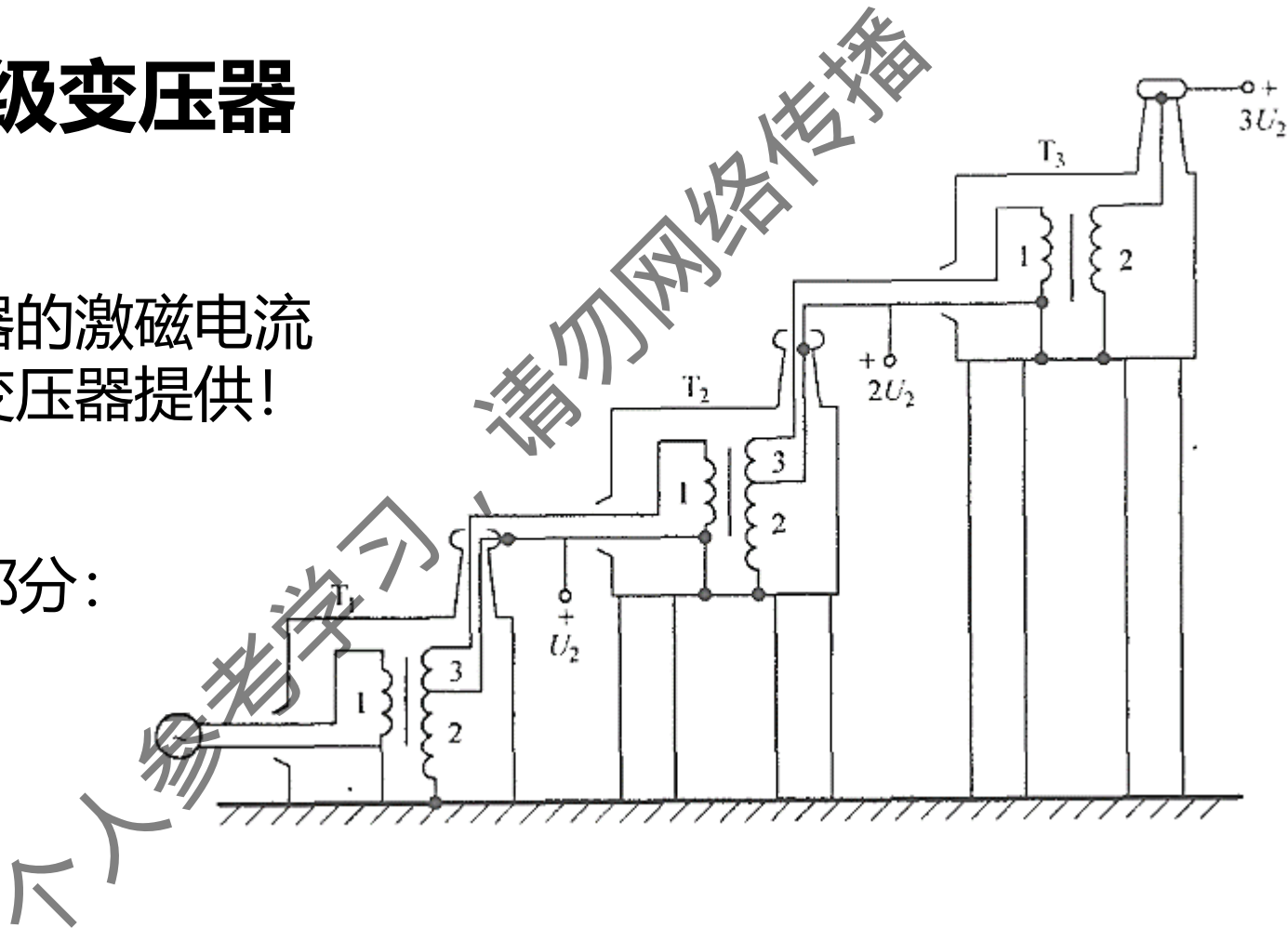


自耦式串级变压器

高一级变压器的激磁电流
由前一级的变压器提供!

二次绕组两部分:

- 提供激磁
- 抬高电位





- 绝缘:

- 副边有2个绕组 (最高一级除外), 外壳与铁心相连, 对地, $(n-1)U_2$ 。
- 双套管可以降低单台绝缘要求。

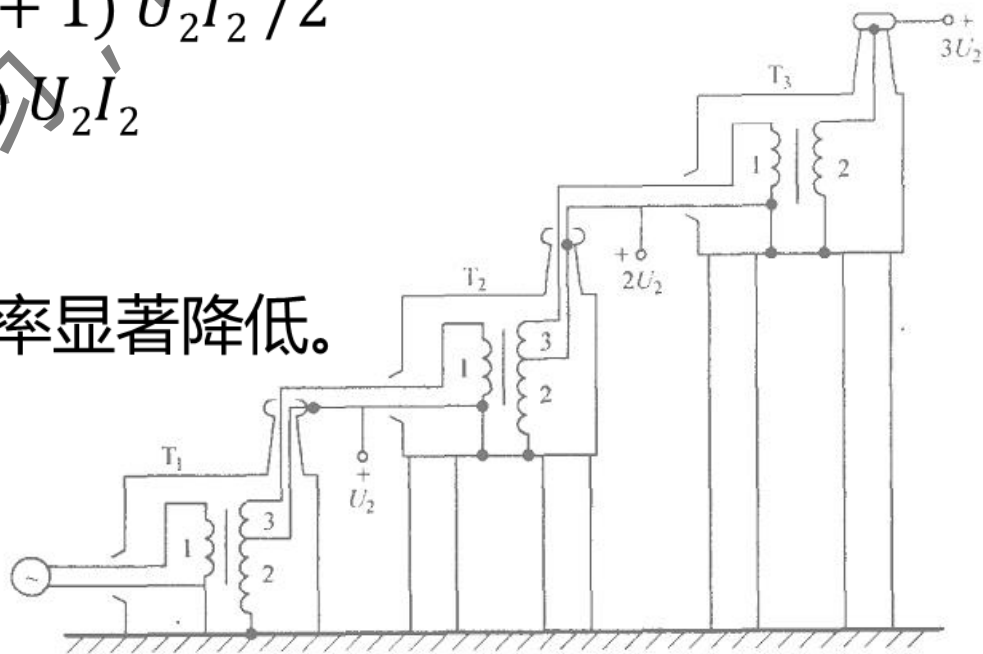
- 每台变压器容量不同: $U_2 I_2, (n-1)U_2 I_2, \dots, U_2 I_2$

- 变压器总容量: $P_\Sigma = n(n+1)U_2 I_2 / 2$

- 试验功率: $P_T = n(n+1)U_2 I_2$

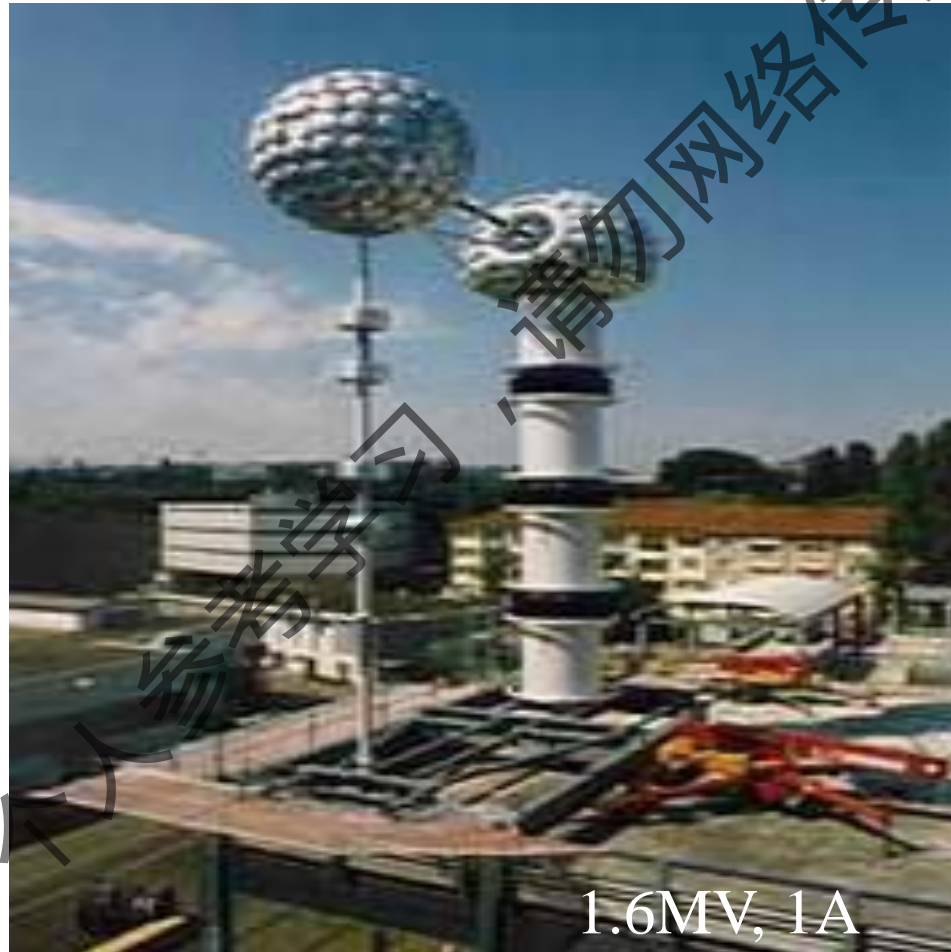
- 利用率: $\eta = \frac{P_T}{P_\Sigma} = \frac{2}{n+1}$

- 随着串级数的增加, 利用率显著降低。





绝缘壳变压器的串接





西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

世界最高电压试验变压器





八、试验变压器的短路电抗

- 变压器短路形成的阻抗。
 - a. 定义：在额定频率和参考温度下，一对绕组中，某一绕组的端子之间的等效串联阻抗。
 - b. 测量：变压器二次绕组短路（稳态），一次绕组流通额定电流而施加的电压，称阻抗电压 U_z 。通常 U_z 以额定电压的百分数表示，称为短路电抗百分比。
 - c. 变压器性能指标中很重要的项目，出厂时的实测值与规定值之间的偏差要求很严。



短路阻抗

- 变压器短路阻抗大小对变压器运行能有什么影响？
- 变压器满载运行时：
 - 短路阻抗小，电压降小；
 - 短路阻抗大，电压降大。
- 变压器负载出现短路时：
 - 短路阻抗小，短路电流大，变压器承受的电动势大；
 - 短路阻抗大，短路电流小，变压器承受的电动势小。



试验变压器的短路电抗

- 要求：尽可能小

- 污闪时试验结果的准确度

提供足够的驱动电流

- 容性试品的容量增加，输出电压增加

容抗减小

- 串级试验变压器短路阻抗随级数显著增大

- 改善措施：平衡绕组，减少漏磁通



九、试验变压器的调压装置

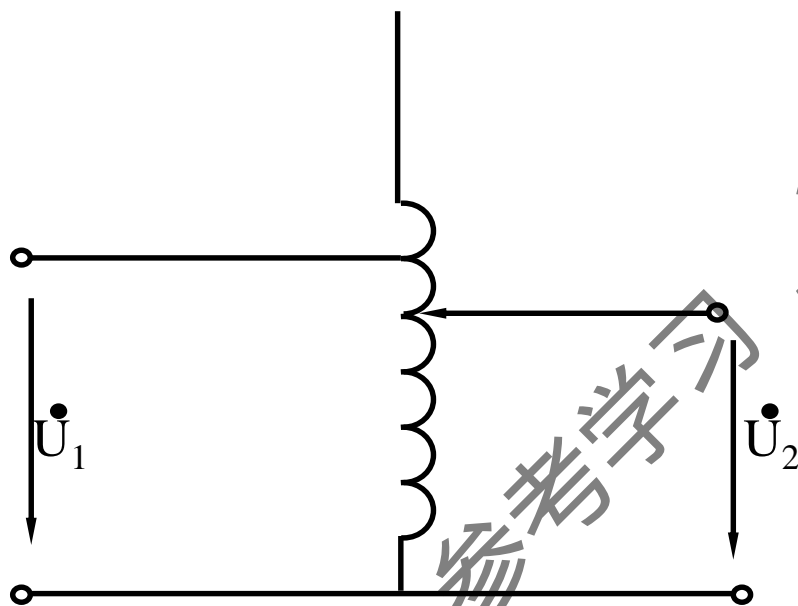
- 要求：
1. 由零开始，均匀平滑
 2. 波形无畸变，阻抗不宜过大
 3. $U \leq 75\% U_0$ ，升压可快些
 $U > 75\% U_0$ ， $2\% U_0 / s$ 的速度升压
 4. 工作稳定

自耦式、感应式、移圈式调压器，电动发电机组



1、自耦调压器

原理：自耦变压器



特点：

价格便宜、携带方便

波形好

漏抗小

分级调压（2%）

容量小

油绝缘：50kVA~几百千伏安



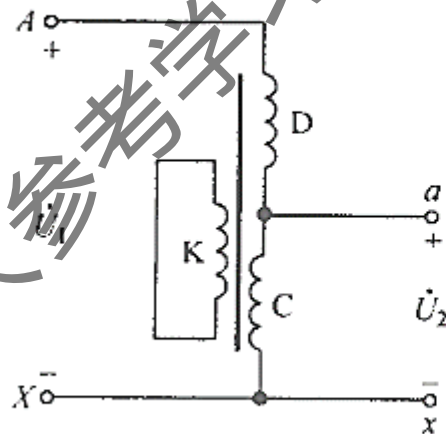
2、移圈式调压器

- K, C, D线圈的匝数相同
- C, D绕向相反，相互串联
- K为短路线圈，套在C, D之外
- K上下移到，调节电压

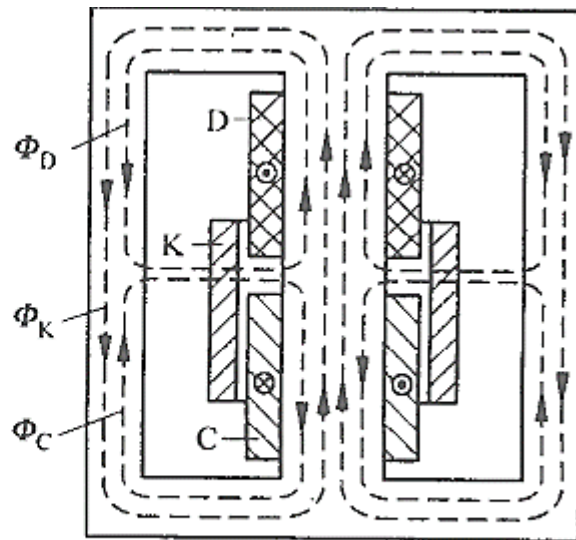
1) 原理:

K不存在

$$U_2 = U_1 / 2$$



(a)

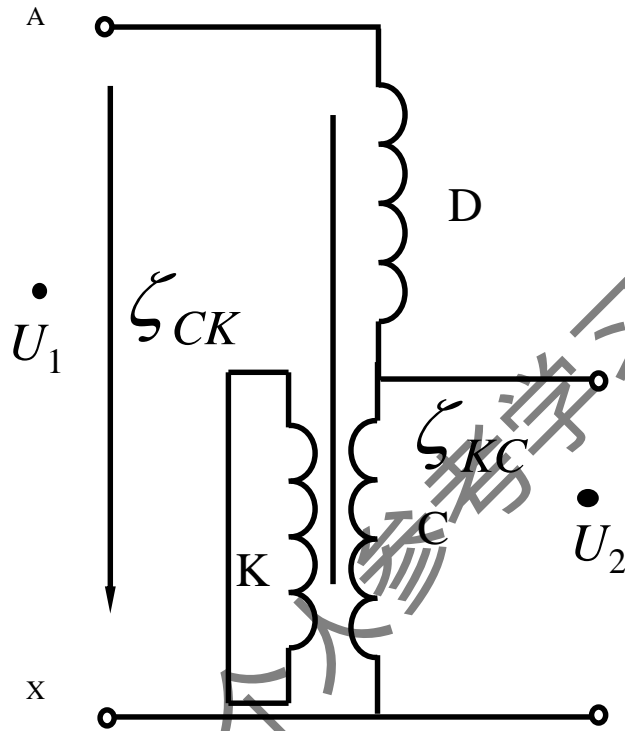


(b)



■ K在最下面

ϕ_C 与K交链, ϕ_D 与K完全不交链



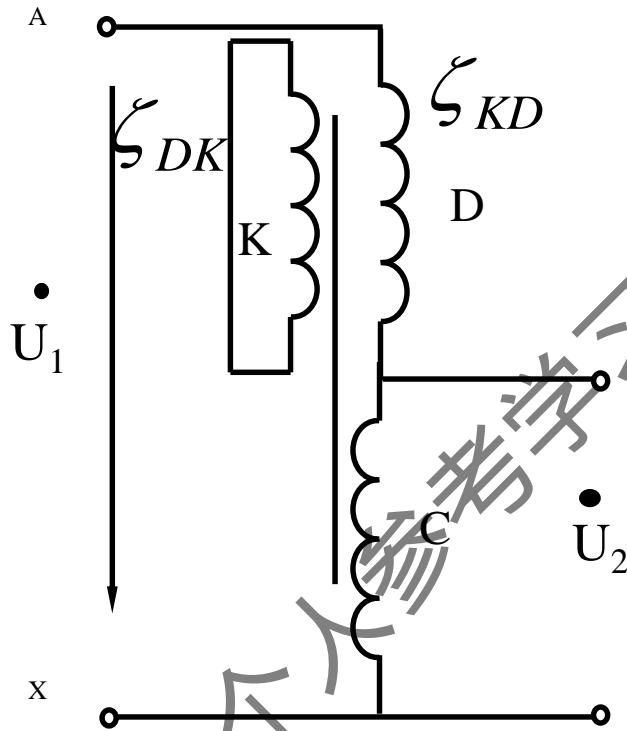
$$\zeta_{KC} = -\zeta_C$$

$$U_2 = 0$$



■ K在最上面

ϕ_D 与K交链, ϕ_C 与K完全不交链



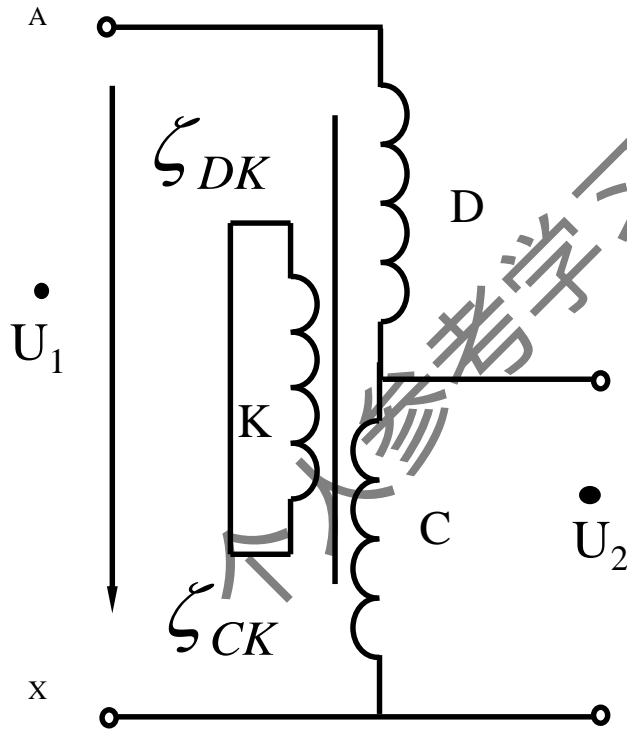
$$\zeta_{KD} = -\zeta_D$$

$$U_2 = U_1$$



■ K在中间

ϕ_D 与K交链, ϕ_C 与K也交链

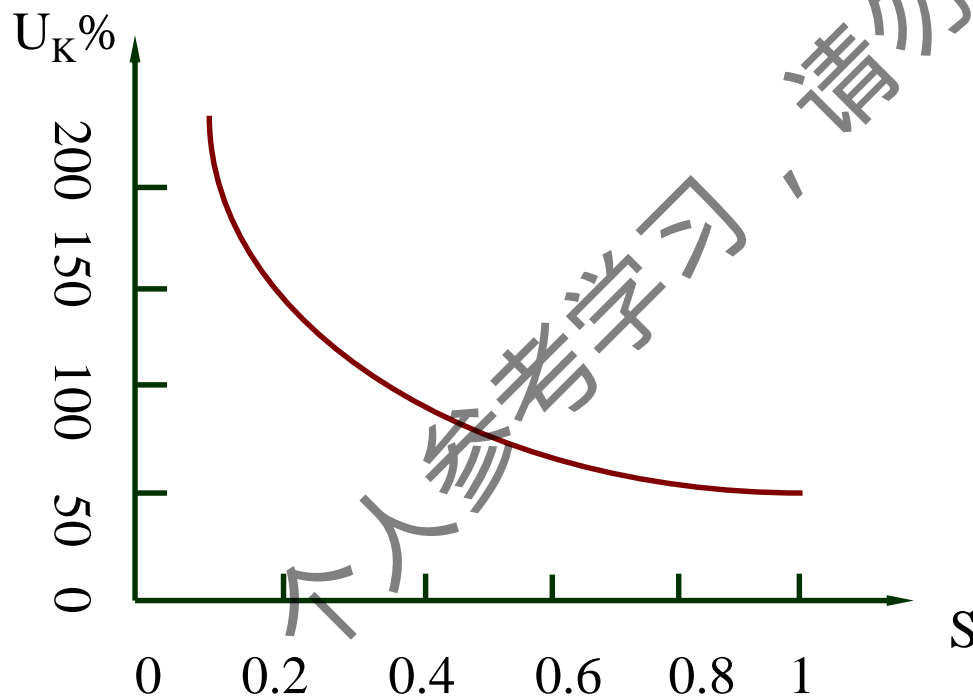


$$U_2 = U_1 / 2$$



2) 特点

- 可平稳调压，容量大
- 短路电抗与K的位置有关，与输出电压有关



S : K的行程, $S=1$
输出电压最大

U_k : 短路电压



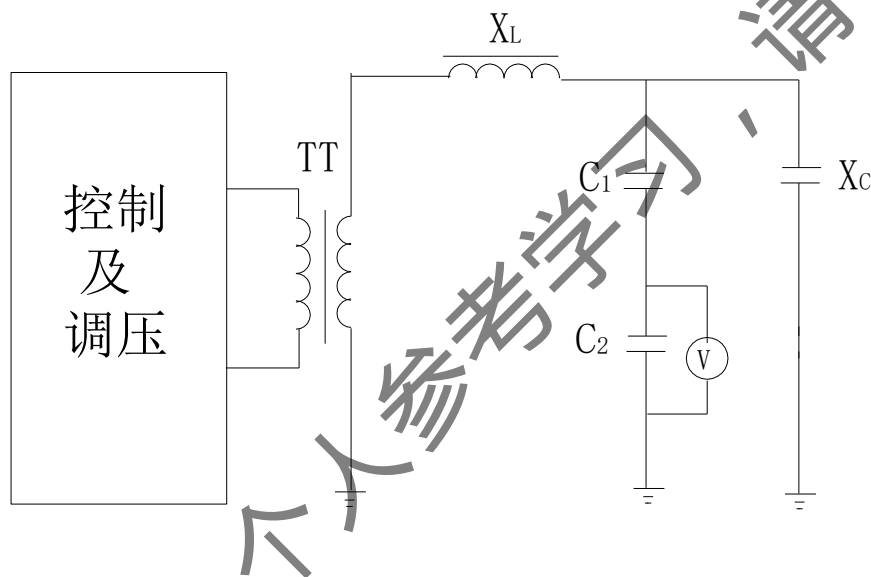
1-3 交流高压串联谐振试验设备

- 大容量试品
电缆、GIS、电容器、大容量发电机
- L-C串联谐振，高电压，容量减小
- 现场使用越来越广泛
- 并联谐振、串联谐振



串联补偿（电压谐振）

- 当试验变压器的额定电压小于所需试验电压，但电流额定量能满足试品试验电流的情况下，可采用串联补偿的方法进行试验。



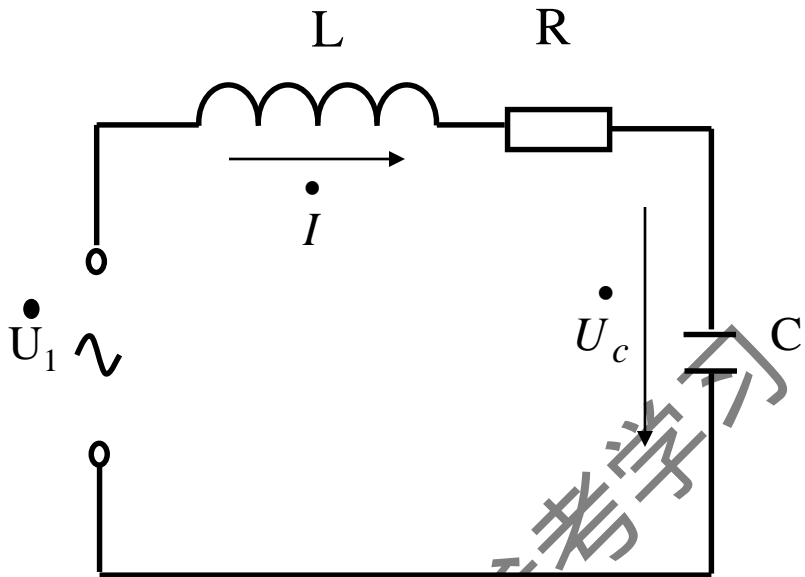
利用串联谐振做耐压试验有两个优点：

①若被试品击穿，则谐振终止，高压消失；

②击穿后电流下降，不致于造成被试品击穿点扩大。



1. 工作原理



$$\begin{aligned}\dot{I} &= \frac{\dot{U}_1}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \\ &= \frac{\dot{U}_1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}\end{aligned}$$

若 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$

则: $I = \frac{U_1}{R} \quad U_c = \frac{U_1}{R} \cdot \frac{1}{\omega C}$



令: $Q = \frac{1}{\omega RC} = \frac{\omega L}{R}$ (品质因素) 若 $Q \gg 1$

$$U_c = QU_1 \gg U_1$$

2. 分类:

- ❖ 调感式
- ❖ 调容式
- ❖ 调频式

3. 优点:

- ❖ 试品上电压高
- ❖ 电源容量小
- ❖ 波形好
- ❖ 短路放电电流小

4. 缺点:

- 容量有限, 不能进行湿闪和污闪试验

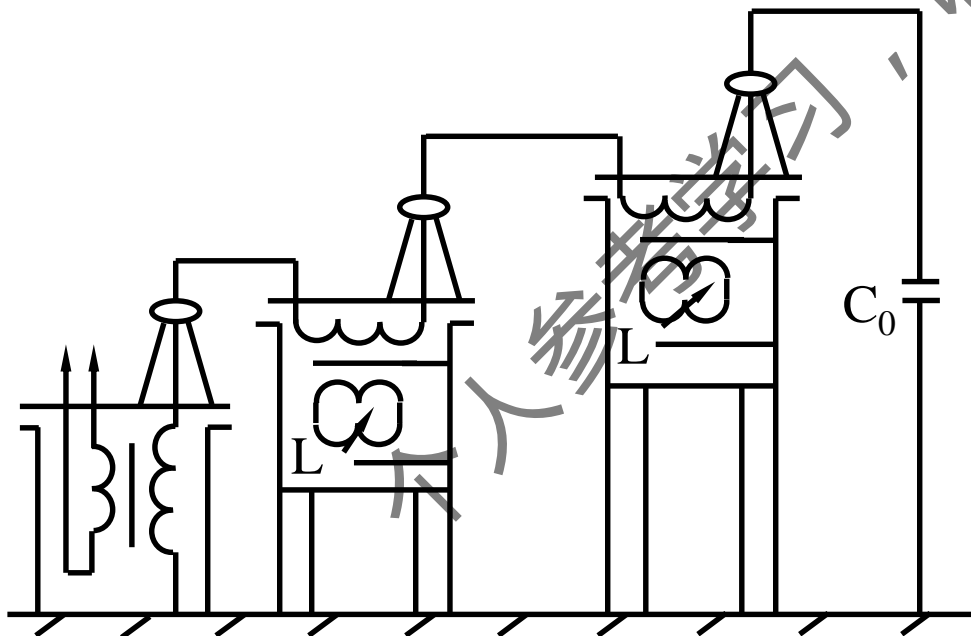


5. 结构

调感式

调谐电感接低压侧:

调谐电感-调谐变压器组合



调频式





西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

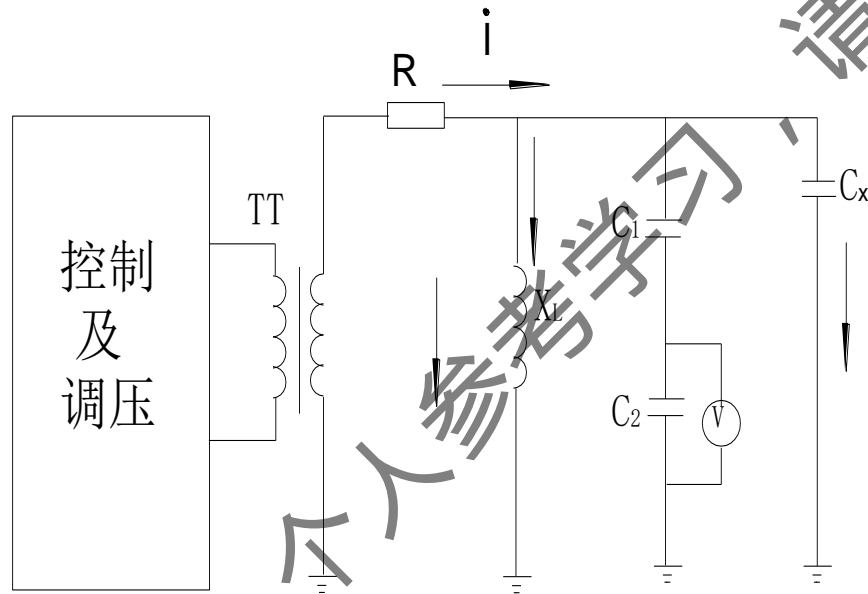
武高所电缆实验室





并联补偿（电流谐振）

当试验变压器的额定电压能满足试验电压的要求，但电流达不到被试品所需的试验电流时，可采用并联谐振对电流加以补偿，以解决容量不足的问题。



当采用可调式电抗器进行补偿时，调节补偿电抗，使补偿电流与试验电流相等，就可使变压器的输出电流很小。