



高电压技术

屠幼萍

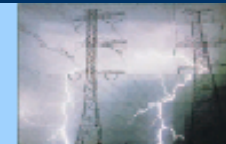
☎ +80795842, 13691145432

✉ typ@ncepu.edu.cn



华北电力大学
North China Electric Power University

高电压与电磁兼容技术研究所
High Voltage & Electromagnetic Compatibility Laboratory





第10讲 电气设备绝缘试验

- 绝缘监测和诊断的基本概念
 - 绝缘电阻和泄漏电流的测量
 - 介质损耗角正切的测量
 - 局部放电的测量
 - 耐压试验
 - 预防性试验方法的特点总结
 - 绝缘的在线监测
-

一、绝缘监测和诊断的基本概念

- 绝缘的监测和诊断技术概念
- 绝缘的监测和诊断技术分类
- 绝缘监测和诊断技术的三个基本环节
- 绝缘诊断规则

一、绝缘监测和诊断的基本概念

■ 绝缘的监测和诊断技术概念

电力设备绝缘在运行中受到电、热、机械、不良环境等各种因素的作用，其性能将逐渐劣化，以致出现缺陷，造成故障，引起供电中断。通过对绝缘的试验和各种特性的测量，了解并评估绝缘在运行过程中的状态，从而能早期发现故障的技术称为绝缘的监测和诊断技术

■ 绝缘的监测和诊断技术分类

按照对设备造成的影响程度分类（两类）

破坏性试验，即耐压试验：以高于设备的正常运行电压来考核设备的电压耐受能力和绝缘水平。耐压试验对绝缘的考验严格，能保证绝缘具有一定的绝缘水平或裕度；缺点可能在试验时给绝缘造成一定的损伤

包含的种类：交流耐压试验、直流耐压试验、雷电冲击耐压试验及操作冲击耐压试验

■ 绝缘的监测和诊断技术分类

按照对设备造成的影响程度分类（两类）

检查性试验（非破坏性试验），亦称绝缘特

性试验：在较低电压下或用其它不会损伤绝缘的方法测量绝缘的各种情况，从而判断绝缘内部的缺陷

包含的种类：绝缘电阻试验、介质损耗角正切试验、局部放电试验、绝缘油的气相色谱分析等

绝缘的监测和诊断技术分类

分 类	优 势	不 足
耐压试验	有效、可信	可能导致绝缘破坏 绝缘缺陷已较严重 不能揭示缺陷的性质和根源
检查性 试验	可采用多种试验揭示揭示绝缘缺陷的不同性质和根源	不能直接得出设备绝缘的耐电强度

互为补充、不能相互代替

应先做检查性试验，且据此确定耐压试验的时间和条件

➤ **按照设备是否带电的方式分类（两类）**

离线：要求被试设备退出运行状态，通常是周期性间断地施行，试验周期由**电力设备预防性试验规程（DL/T 596）**规定

特点：可采用破坏性试验和非破坏性试验两种方式，两种方式是相辅相成的。耐压试验往往是在非破坏性试验之后才进行。缺点是对绝缘耐压水平的判断比较间接，尤其对于周期性的离线试验更不易判断准确

➤ **按照设备是否带电的方式分类（两类）**

在线： 在被试设备处于带电运行的条件下，对设备的绝缘状况进行连续或定时的监测，通常是自动进行的

特点： 只能采用非破坏性试验方式。由于可连续监测，除测定绝缘特性的数值外，还可分析特性随时间的变化趋势，从而显著提高了其判断的准确性

绝缘预防性试验概念： 为了对绝缘状态作出判断，需对绝缘进行各种试验和监测，通称为绝缘预防性试验

一、绝缘监测和诊断的基本概念

■ 绝缘监测和诊断技术的三个基本环节

传感器与测量方法： 正确选用各种传感器及测量手段，检测或监测被试对象的种种特性，采集各种特性参数

数据处理： 对原始的杂乱信息加以分析处理（数据处理），去除干扰，提取反映被试对象运行状态最敏感、有效的特征参数

一、绝缘监测和诊断的基本概念

■ 绝缘监测和诊断技术的三个基本环节

绝缘诊断：根据提取的特征参数和对绝缘老化过程的知识以及运行经验，参照有关规程对绝缘运行状态进行识别、判断，即完成诊断过程。并对绝缘的发展趋势进行预测，从而对故障提供预警，并能为下一步的维修决策提供技术根据

一、绝缘监测和诊断的基本概念

■ 绝缘诊断规则

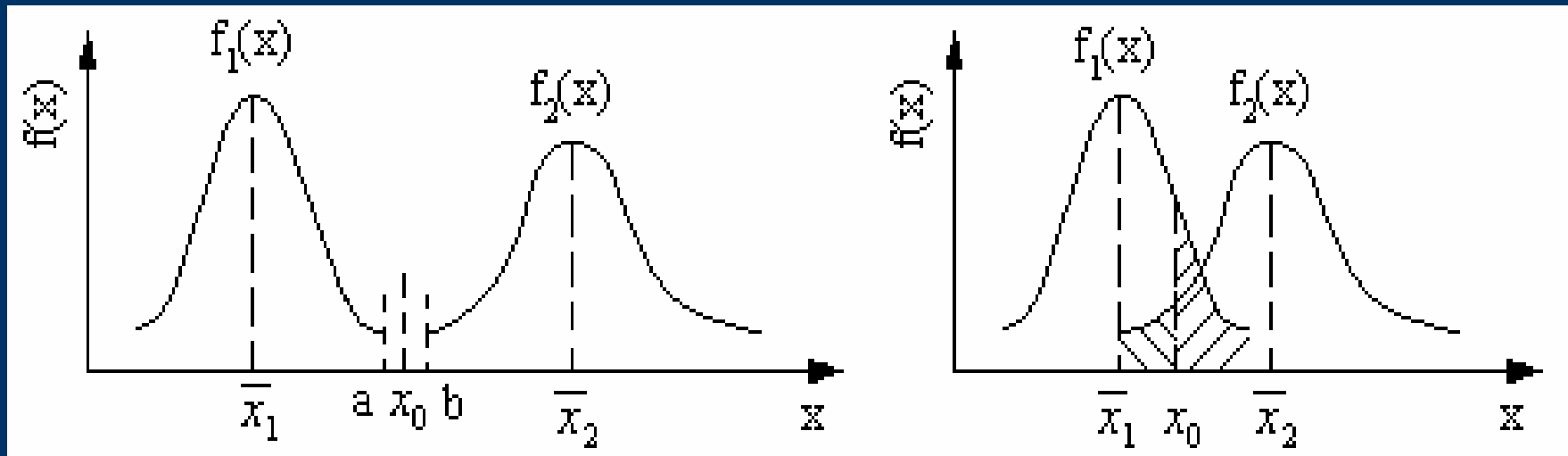
逻辑诊断：逻辑诊断中将特征只归结为“有”和“无”两种（或特征参数大于某给定的阈值则为“有”该特征，否则为“无”），诊断对象的状态同样只归结为“有”和“无”，或“好”和“坏”两种，即特征和状态均采用**二值逻辑量来描述**

逻辑诊断简单明了，应用较广，但把问题过于简化，诊断准确度较低

■ 绝缘诊断规则：

模糊诊断： 考虑到被试对象的特征及状态评价的主观不确定性，即模糊性，许多情况不能简单地用“有”、“无”和“好”、“坏”来评定。模糊诊断中被试对象的特征和状态不用二值逻辑量描述，而用**多值逻辑的特征函数来描述**，如某特征“很强”、“强”、“一般”、“弱”、“很弱”，某故障“严重”、“较严重”、“一般”、“轻微”、“无”等，然后按特征或状态参数的取值量确定归入某一类别。如采用连续变化的特征函数，判断可更加准确

➤ **统计诊断：** 考虑到被试对象特征参数分布的不确定性，即统计性。对于处于同样状态的同类设备，其特征参数并不相同，而按一定的统计规律分布。利用这些规律进行绝缘诊断



(a) 绝缘完好和损坏时
概率密度曲线不重叠

(b) 两者重叠图

某特征参数的概率密度



第8讲 绝缘诊断与绝缘试验

- 绝缘监测和诊断的基本概念
- 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 介质损耗角正切的测量
- 局部放电的测量
- 耐压试验
- 预防性试验方法的特点总结
- 绝缘的在线监测

二、绝缘电阻和泄漏电流的测量

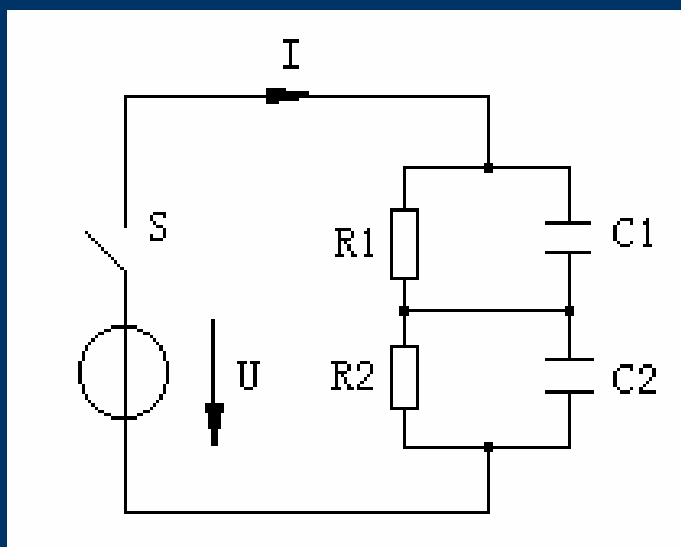
- 测量绝缘电阻与吸收比的工作原理
- 测量绝缘电阻与吸收比的方法
- 泄漏电流的测量

■ 测量绝缘电阻与吸收比的工作原理

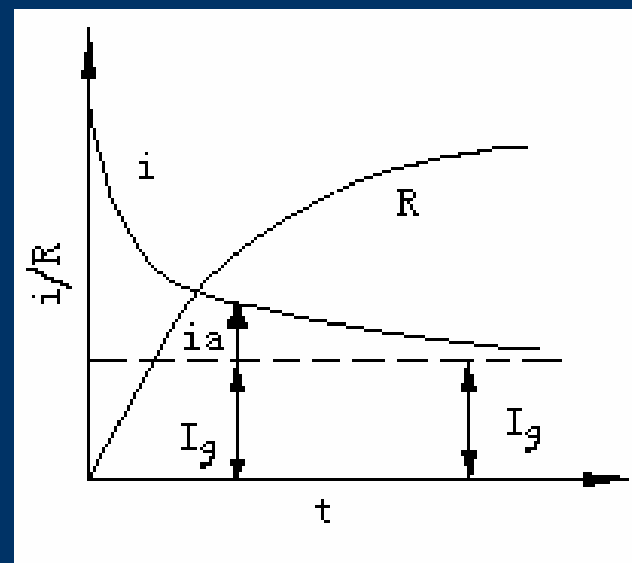
双层介质模型的电流—时间特性

$$i(t) = U / (R_1 + R_2) + [U(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2 / (C_1 + C_2)^2 (R_1 + R_2) R_1 R_2] e^{-t/\tau}$$

$$\tau = (C_1 + C_2) \cdot R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$



双层介质等值电路图



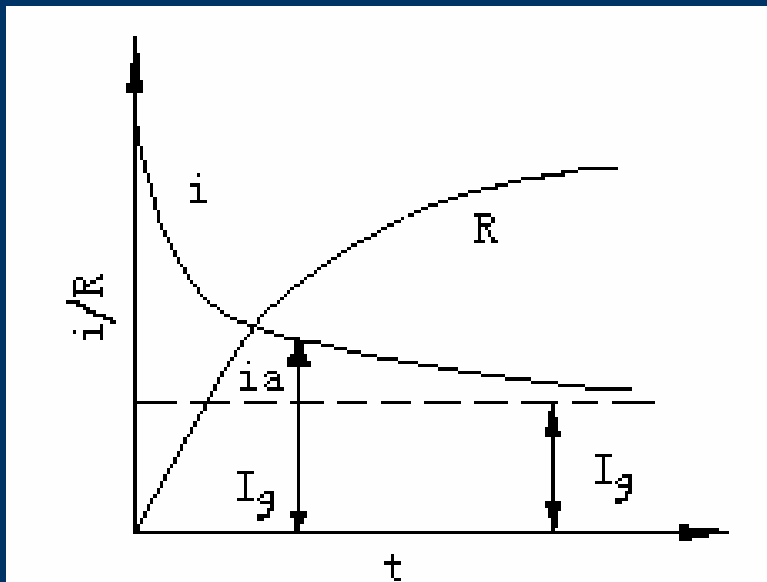
吸收和泄漏电流及
绝缘电阻的变化曲线

$$i(t) = U / (R_1 + R_2) + [U(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2 / (C_1 + C_2)^2 (R_1 + R_2) R_1 R_2] e^{-t/\tau}$$

$$i_a = [U(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2 / (C_1 + C_2)^2 (R_1 + R_2) R_1 R_2] e^{-t/\tau}$$

$$= K e^{-t/\tau}$$

在工程应用上的表达方便，把介质处在吸收过程时的 U/i 也称呼为绝缘电阻 R



吸收和泄漏电流及
绝缘电阻的变化曲线

定义吸收比*K*：加压60秒时的绝缘电阻与15秒时电阻之比值

$$K = R''_{60} / R''_{15}$$

定义极化指数*P*：为加压10分钟时的绝缘电阻与1分钟时电阻之比值

$$P = R''_{10} / R''_1$$

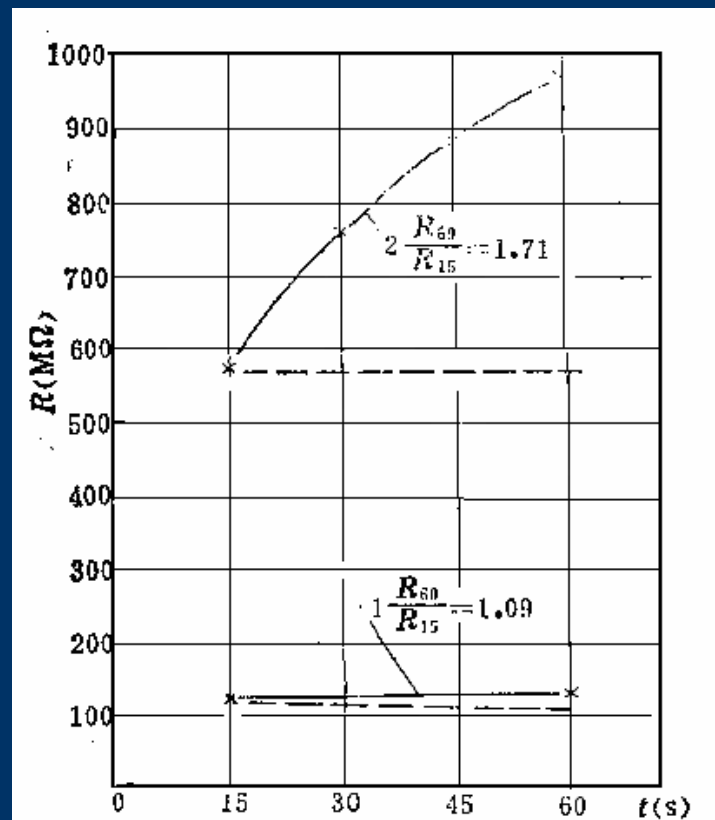
绝缘状态的判定

若绝缘内部有集中性导电通道，或绝缘严重受潮

电阻 R_1 、 R_2 显著降低、
泄漏电流大大增加，
时间常数 τ 大为减小
吸收电流迅速衰减

若绝缘内部部分受潮

R_1 与 R_2 中的一个数值降低
时间常数 τ 也会大为减小
吸收电流仍会迅速衰减



某变压器的绝缘电阻与时间关系曲线
1—受潮时；2—经干燥后

绝缘状态的判定

吸收比 K （及极化指数 P ，下同）的下降。当 $K=1$ 或接近于1，则设备基本丧失绝缘能力

电力设备预防性试验规程等规定：

电力变压器及大型发电机凡采用沥青浸胶及烘卷云母绝缘者： K 值应不小于1.3， P 值应不小于1.5；大型发电机采用环氧粉云母者： K 值应不小于1.6， P 应不小于2.0；发电机容量在200MW及以上，推荐测量

■ 测量绝缘电阻与吸收比的方法

测量仪表：为了测准吸收比，需用灵敏度足够高的**兆欧表**。

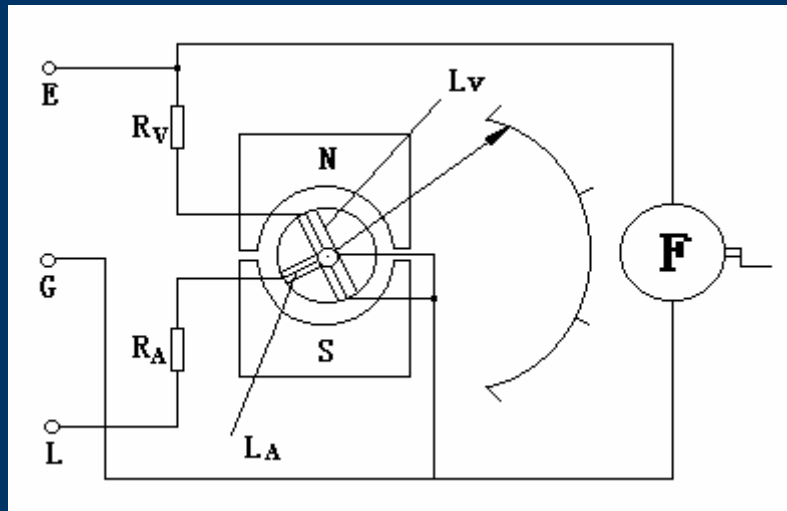
现场仍较多采用带有手摇直流发电机的兆欧表，俗称**摇表**

晶体管兆欧表：采用电池供电，晶体管振荡器产生交变电压，经变压器升压及倍压整流后输出直流电压

兆欧表的电压：500、1000、2500、5000V等

兆欧表选择：根据设备电压等级的不同，选用不同电压的兆欧表。**例：**额定电压1kV及以下者使用1000V兆欧表；1kV以上者使用2500V兆欧表

■ 测量绝缘电阻与吸收比的方法



兆欧表的原理结构图

电压线圈 L_V 、电流线圈 L_A 相互垂直在同一转轴上，处于一永久磁场中

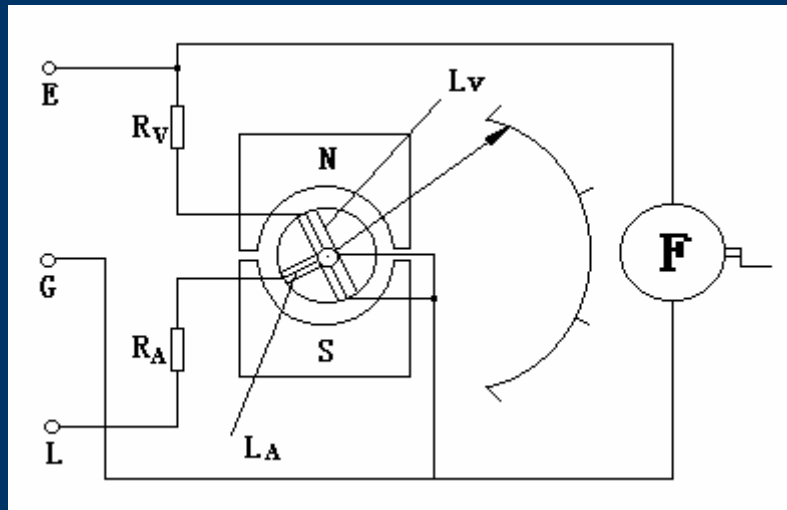
R_V 分压电阻、 R_{V0} 电压线圈固有电阻

R_A 限流电阻、 R_{A0} 电流线圈固有电阻

试品接于L、E两端之间，设试品绝缘电阻为 R_X ，一般有

$$R_X \gg R_A \gg R_{A0}$$

■ 测量绝缘电阻与吸收比的方法



电压线圈 L_V 产生的转动力矩

$$M_V = I_V f_V(\alpha)$$

电流线圈 L_A 产生的转动力矩

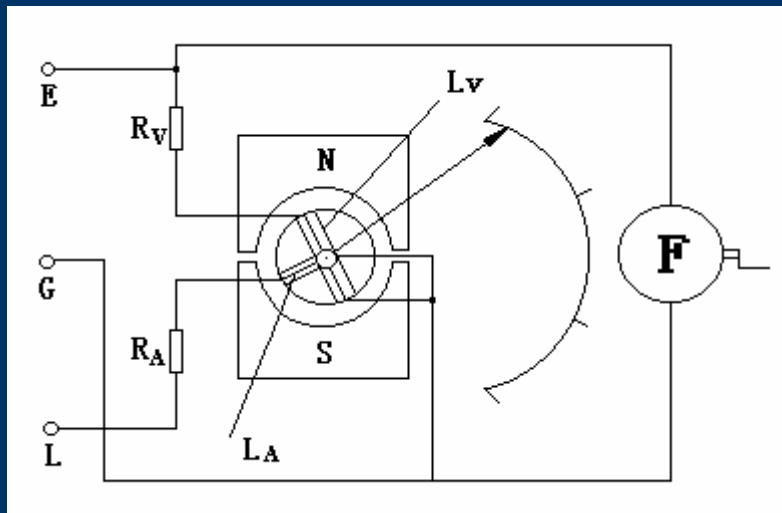
$$M_A = I_A f_A(\alpha)$$

仪表指针固定在转轴上

$M_V = M_A$ ，仪表指针偏转 α 角

$$\frac{I_A}{I_V} = \frac{f_V(\alpha)}{f_A(\alpha)} \longrightarrow \alpha = f\left(\frac{I_A}{I_V}\right)$$

■ 测量绝缘电阻与吸收比的方法



$$I_A = \frac{U}{R_X + R_A + R_{A0}} \quad I_V = \frac{U}{R_V + R_{V0}}$$

$$\frac{I_A}{I_V} = \frac{R_V + R_{V0}}{R_X + R_A + R_{A0}}$$

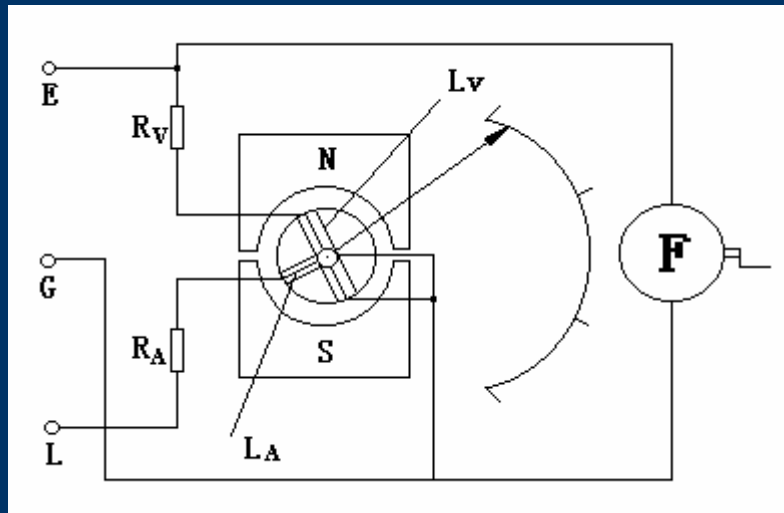
$$\frac{I_A}{I_V} = \frac{f_V(\alpha)}{f_A(\alpha)} \longrightarrow \alpha = f\left(\frac{I_A}{I_V}\right)$$

$$\alpha = f\left(\frac{R_V + R_{V0}}{R_X + R_A + R_{A0}}\right)$$

把偏转角 α 的读数直接标定为被测绝缘电阻 R_X 的值

$$\alpha = f(R_X)$$

■ 测量绝缘电阻与吸收比的方法

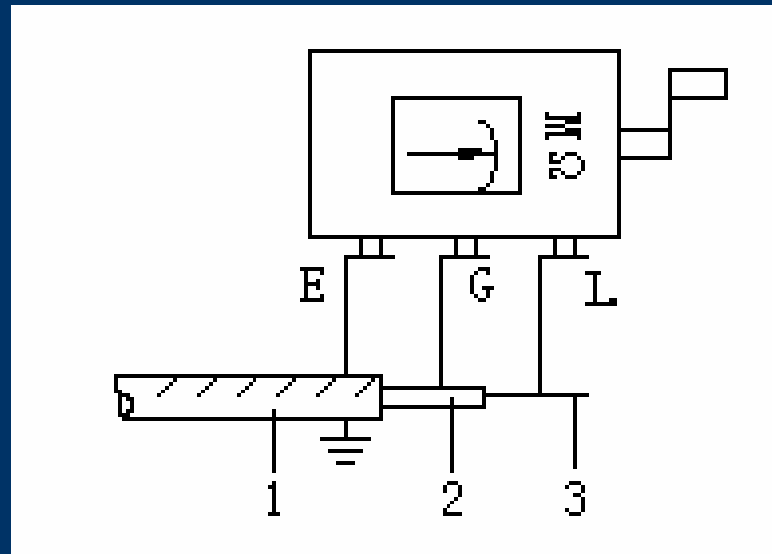


$$\alpha = f(R_X)$$

屏蔽端子的作用

屏蔽试品的表面漏导电流，测量值为体积绝缘电阻，反映绝缘体的内在品质

例：用兆欧表测量电缆绝缘电阻



用兆欧表测电缆绝缘电阻的接线图

1—铅铠外皮 2—绝缘 3—导芯

测量绝缘电阻能有效发现下列缺陷

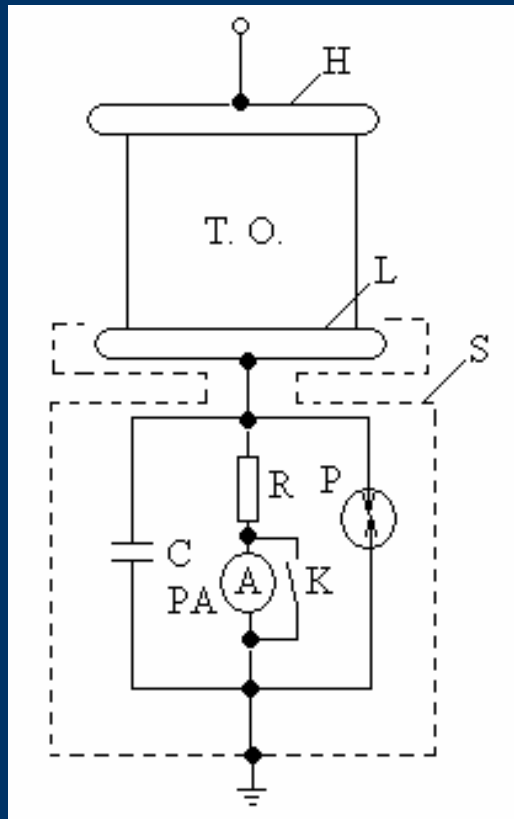
- 总体绝缘质量欠佳
- 绝缘受潮
- 两极间有贯穿性的导电通道
- 绝缘表面情况不良（比较有或无屏蔽极时所测得的值即可知）

测量绝缘电阻不能发现下列缺陷

- 绝缘中的局部缺陷（如非贯穿性的局部损伤、含有气泡、分层脱开等）
- 绝缘的老化

■ 泄漏电流的测量

微安表直读法（两种接法）



T.O. 被试品

H 高电位电极

L 低电位电极

PA 直流微安表

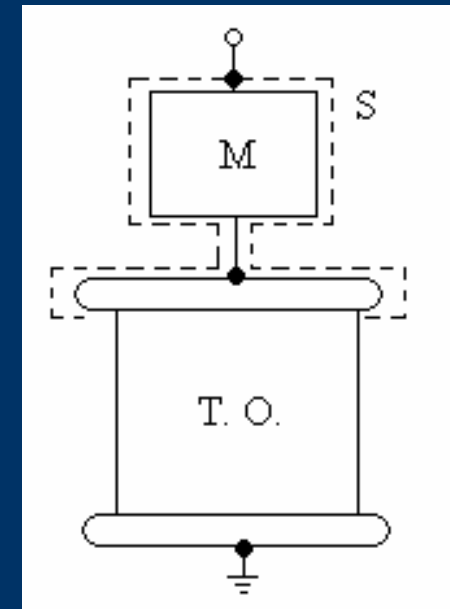
R 保护电阻

P 放电管

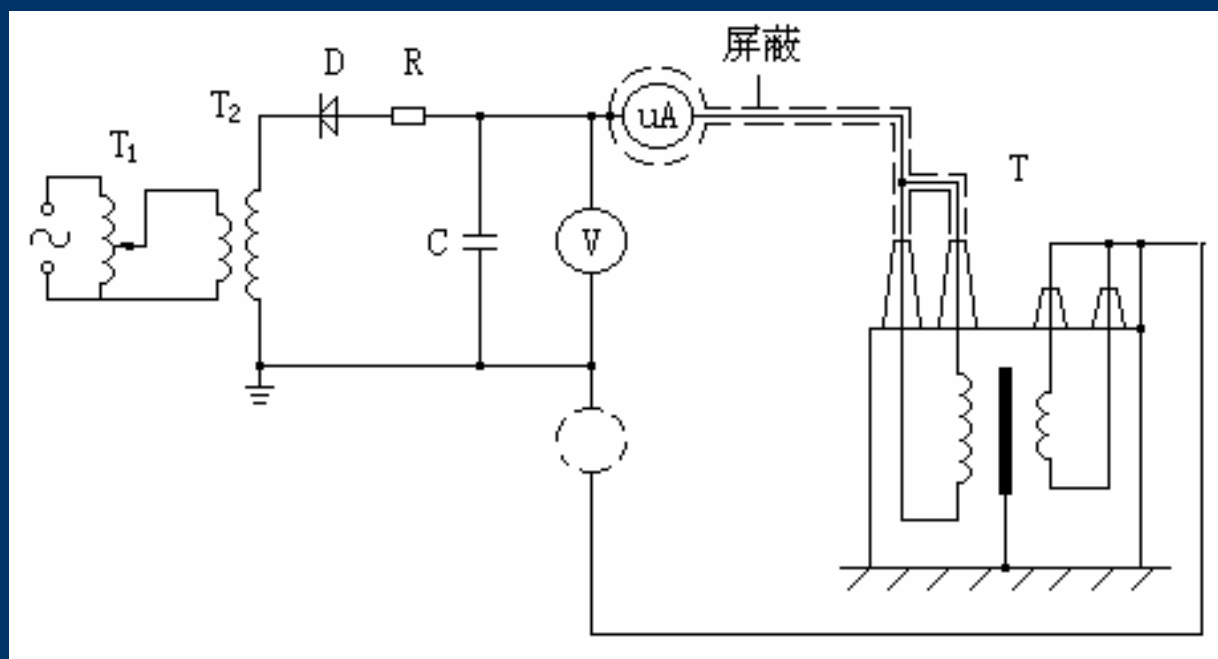
C 缓冲电容

K 旁路开关

S 屏蔽系统



■ 泄漏电流的测量



测量电力变压器主绝缘泄漏电流的接线

T_1 : 调压器; T_2 : 高压试验变压器; D : 高压硅堆
 R : 保护电阻; C : 滤波电容; T : 被试变压器

■ 泄漏电流的测量

泄漏电流测量试验特点

- 所加直流电压较高，能揭示兆欧表不能发现的某些缺陷
- 在升压过程中，从所测得电流与电压关系的线性度，可以指示绝缘情况



第8讲 绝缘诊断与绝缘试验

- 绝缘监测和诊断的基本概念
- 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 介质损耗角正切的测量
- 局部放电的测量
- 耐压试验
- 预防性试验方法的特点总结
- 绝缘的在线监测

三、介质损耗角正切的测量

- 电桥的基本原理
- 存在外界电磁场干扰时的测量
- 电流比较式电桥

测试无线电材料：常采用高频施压法，所加的电压不高

在电工界：测量 $tg \delta$ 的仪器和方法有多种，西林电桥测法和电流比较式电桥测法

在线监测：采用微计算机对 $tg \delta$ 的测量

电桥原理图

电桥的平衡条件：

$$Z_1 / Z_3 = Z_2 / Z_4$$

$$\begin{cases} |Z_1| \times |Z_4| = |Z_2| \times |Z_3| \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases}$$

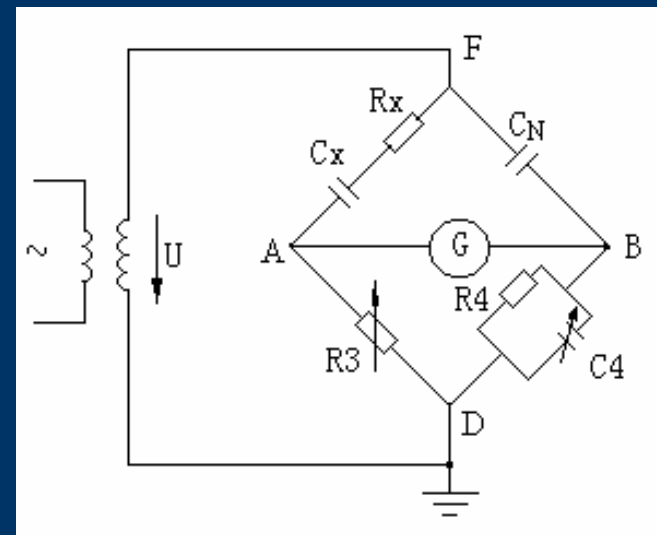
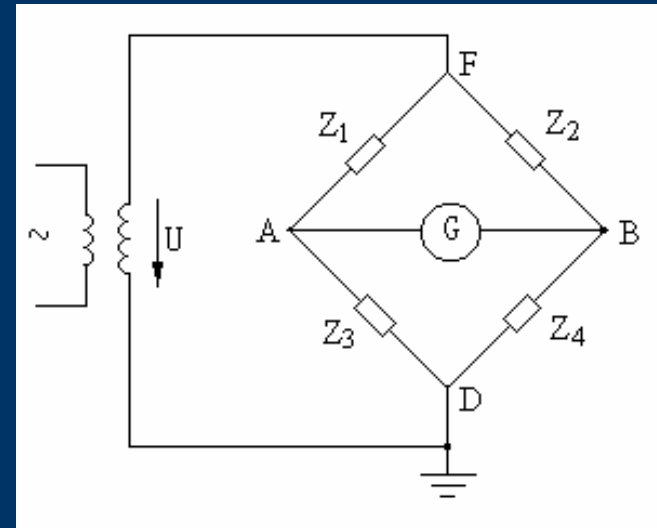
令 $\varphi_2 + \varphi_3 = -\frac{\pi}{2}$

Z_2 为纯电容

Z_3 为纯电阻

Z_1 为被测绝缘的等效阻抗

Z_2 为阻容并联



西林电桥的基本回路

➤ 西林电桥的基本原理

高压臂：代表试品(C_x 、 R_x) 的 Z_1 ；无损耗的标准电容 C_N ，它以阻抗 Z_2 作为代表

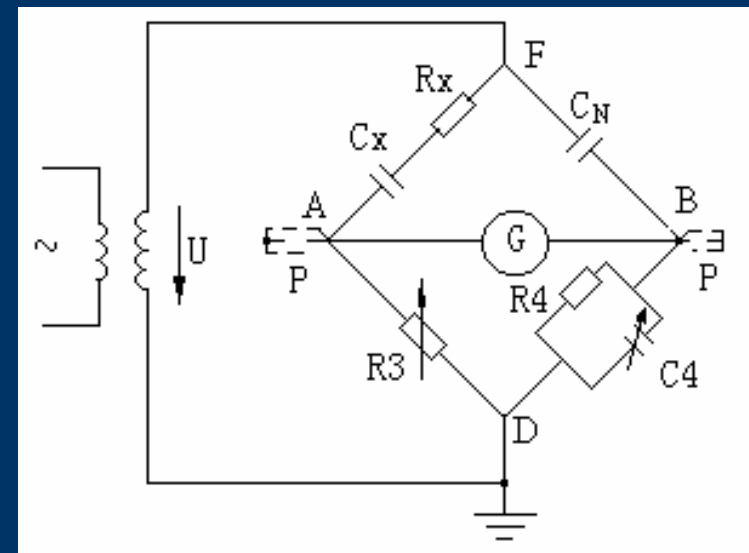
低压臂：处在桥箱体内的可调无感电阻 R_3 ，以 Z_3 来代表；无感电阻 R_4 和可调电容 C_4 的并联，以 Z_4 来代表

保护：放电管 P

电桥平衡：检流计 G 检零

屏蔽：消除杂散电容的影响

西林电桥的基本回路



串联等值回路

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4$$

$$C_x = R_4 C_N / R_3$$

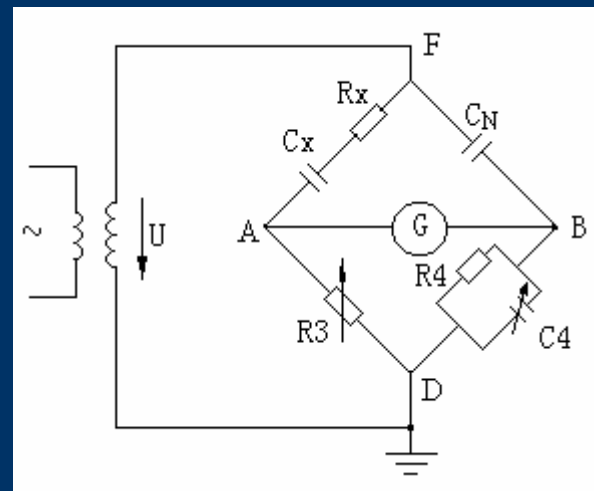
并联等值回路

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4$$

$$C_x = \frac{R_4 C_N}{R_3 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}$$

$\operatorname{tg}^2 \delta$ 极小，两种等值
电路的 C_x 相等

西林电桥的基本回路



取 $R_4 = 10^4 / \pi \Omega$, $\omega = 100\pi$

$$\operatorname{tg} \delta = 100\pi \times \frac{10^4}{\pi} \times C_4 = 10^6 C_4$$

如 C_4 以 μF 计，则在数值上

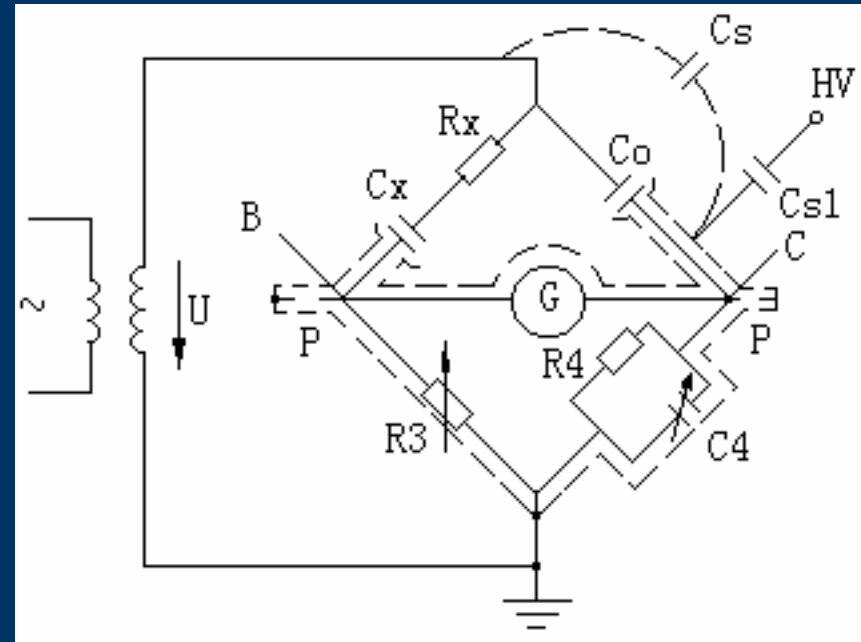
$$\operatorname{tg} \delta = C_4$$

➤ 影响电桥准确度的因数

高压电源对桥体杂散电容的影响

高压引线与低压臂之间有电场的影响，可以看作其间有杂散电容 C_s

C_x 和 C_N 值很小，如 C_N 一般只有50~100pF，杂散电容 C_s 的引入，会产生测量误差



西林电桥的基本回路

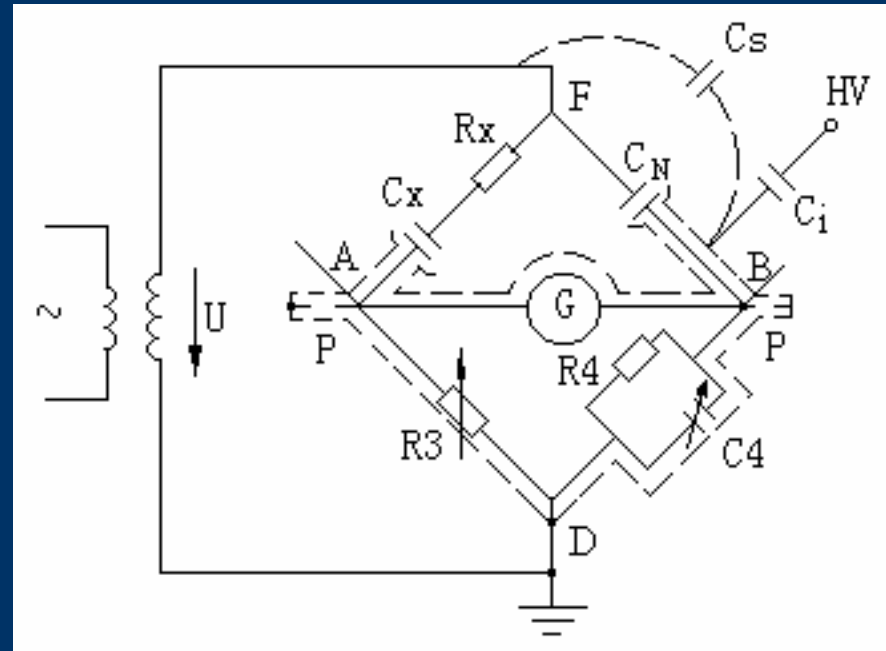
➤ 影响电桥准确度的因数

外界电场的干扰

其间的杂散电容 C_i 会引入干扰电流，造成测量误差

外界磁场干扰

电桥处在交变磁场中，将在桥体感应出一干扰电势



屏蔽：将电桥的低压部分，包括被试品和标准电容器的低压电极在内，用接地的金属网屏蔽起来

➤ 存在外界电磁场干扰时的测量

现场的试品：难以实现屏蔽，故干扰较严重

两次测量法：倒换试验变压器原边电源线的两头

第一次测得 $tg\delta_1$ 和 C_x'

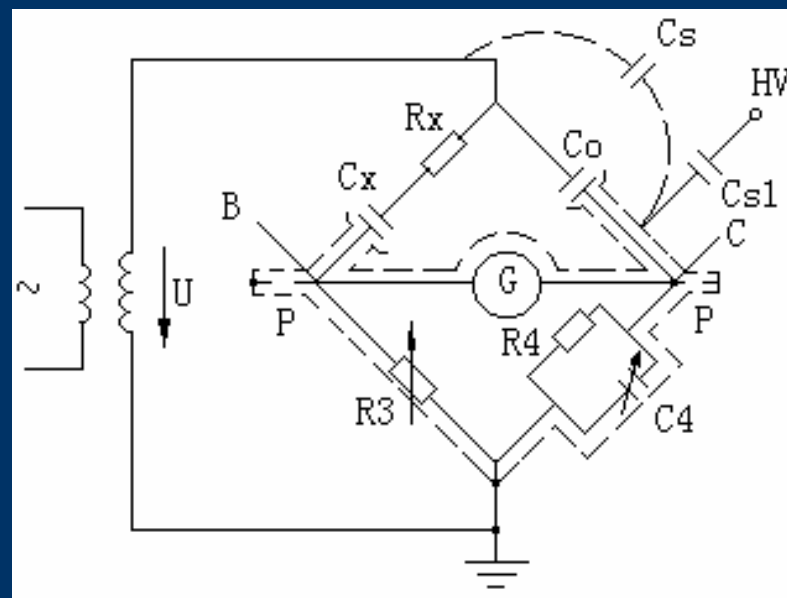
第二次测得 $tg\delta_2$ 和 C_x''

准确的 $tg\delta$ 和 C_x 值计算公式：

$$tg\delta = (C_x' tg\delta_1 + C_x'' tg\delta_2) / (C_x' + C_x'')$$

$$C_x = (C_x' + C_x'') / 2$$

西林电桥的基本回路



检流计正反接抗磁场干扰： 设无磁干扰时，两个测量臂的数值分别为 R_3 和 C_4 ； 设存在磁干扰时，两个测量臂的数值分别为 $(R_3+\Delta R_3)$ 和 $(C_4+\Delta C_4)$ ； 把检流计和电桥两臂相接的两端倒换一下，两个测量臂的数值将分别为 $(R_3-\Delta R_3)$ 和 $(C_4-\Delta C_4)$

当检流计正接时测得：

$$tg \delta_1 = \omega(C_4 + \Delta C_4)R_4$$
$$C_{x1} = C_0 R_4 / (R_3 + \Delta R_3)$$

当检流计反接时测得：

$$tg \delta_2 = \omega(C_4 - \Delta C_4)R_4$$
$$C_{x2} = C_0 R_4 / (R_3 - \Delta R_3)$$

因无磁场干扰时：

$$tg \delta = \omega C_4 R_4$$
$$C_x = C_0 R_4 / R_3$$

故可得：

$$tg \delta = (tg \delta_1 + tg \delta_2) / 2$$
$$C_x = 2C_{x1}C_{x2} / (C_{x1} + C_{x2})$$



第8讲 绝缘诊断与绝缘试验

- 绝缘监测和诊断的基本概念
- 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 介质损耗角正切的测量
- **局部放电的测量**
- 耐压试验
- 预防性试验方法的特点总结
- 绝缘的在线监测

四、局部放电的测量

- 测量局部放电的几种方法
- 局部放电的脉冲电流测量法
- 脉冲电流法测PD的基本回路和检测阻抗
- 脉冲电流法的测量仪器及其校正

局部放电的概念：

简称为PD-Partial Discharge，指由于电气设备内部绝缘里面存在的弱点，在一定外施电压下发生的局部的重复击穿和熄灭现象

局部放电的危害：

局部放电发生在一个或几个绝缘内部的气隙或气泡之中，在这个很小的空间内电场强度很大。它的放电能量很小，所以它的存在并不影响电气设备的短时绝缘强度。但如一个电气设备在运行电压下长期存在局部放电现象，这些微弱的放电能量和由此产生的一些不良效应，如不良化合物的产生，就可以慢慢地损坏绝缘，日积月累，最后可导致整个绝缘被击穿，发生电气设备的突发性故障

局部放电的特点：

当介质内部发生局部放电时，伴随着发生许多现象。有些属于电的：如电脉冲的产生，介质损耗的增大和电磁波放射；有些属于非电的：如光、热、噪音、气体压力的变化和化学变化

局部放电的检测：

这些现象都可以用来判断局部放电是否存在，因此检测的方法也可以分为电的和非电的两类

➤ 测量局部放电的几种方法

绝缘油的气相色谱分析法：这项试验是通过检查电气设备油样内所含的气体组成的含量来判断设备内部的隐藏缺陷

超声波探测法：在电气设备外壁放上由压电元件和前置放大器组成的超声波探测器，用以探测局部放电所造成的超声波，从而了解有无局部放电的发生，测其强度和发生的部位

脉冲电流法：测PD所形成的脉冲电流大小以判断绝缘PD的强弱程度，这种方法可以给出定量的结果，目前规程中已规定了定量的指标

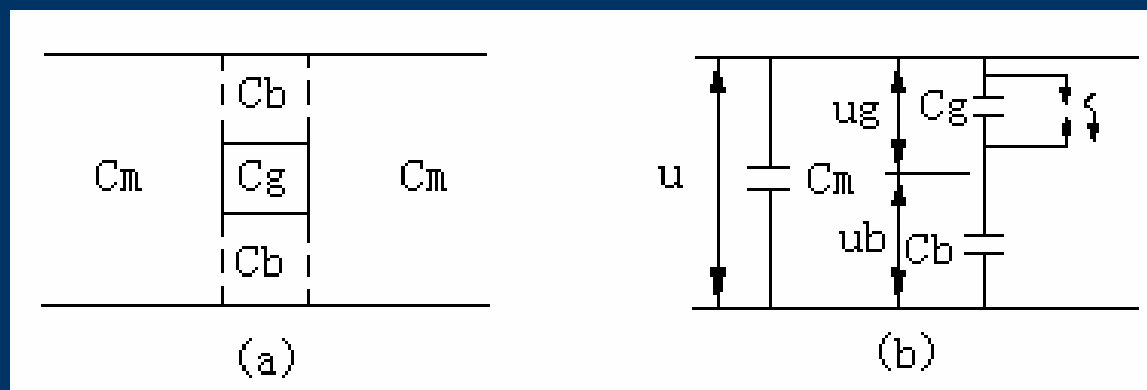
➤ 局部放电的脉冲电流测量法

局部放电的三电容模型：以三个电容来表征介质内部存在缺陷时的局部放电的机理

C_g ：气泡的电容

C_b ：和 C_g 相串联部分的介质电容

C_m ：其余大部分绝缘的电容

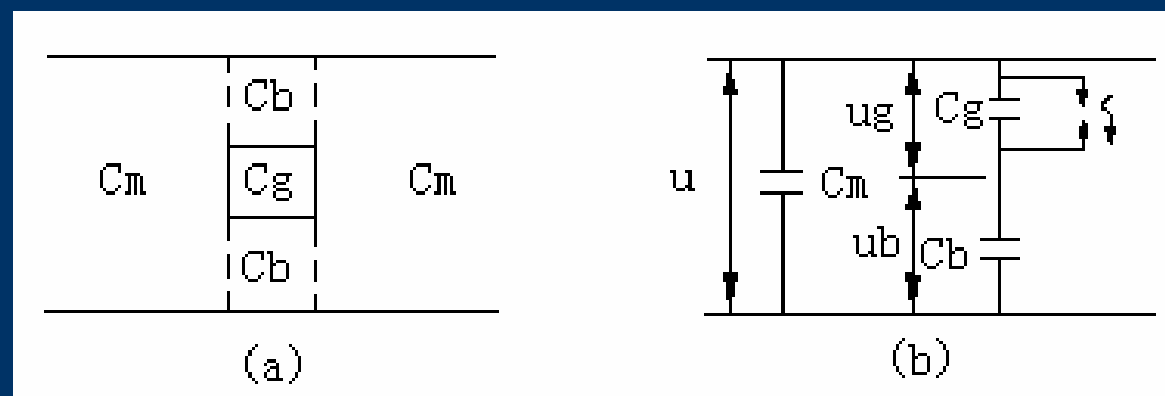


介质内部气隙放电的三电容模型
(a)具有气泡的介质剖面 (b)等值电路

气泡很小， C_g 比 C_b 大， C_m 比 C_g 大很多

电极间加上交流电压 u ，则 C_g 上的电压为 u_g ，

$$u_g = uC_b / (C_g + C_b)$$



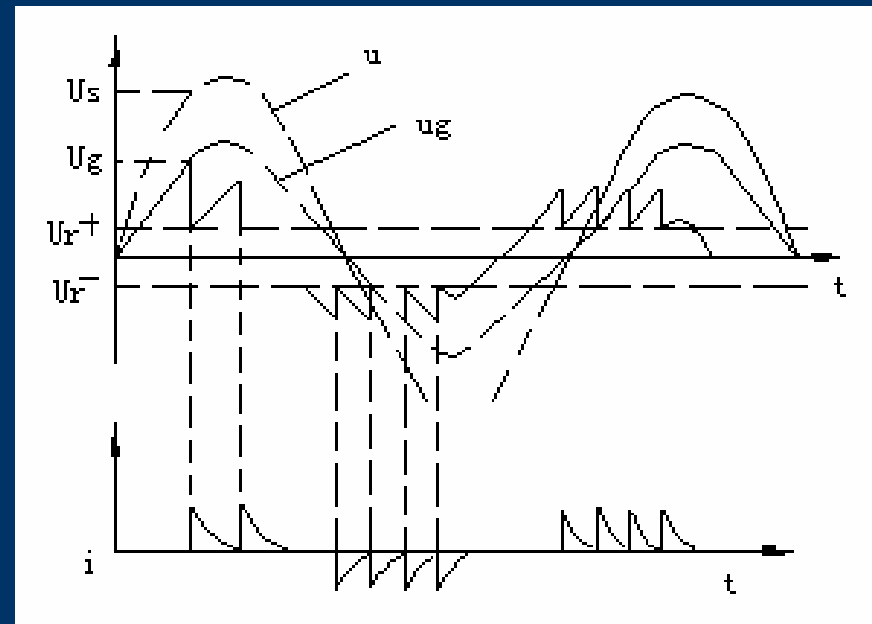
介质内部气隙放电的三电容模型
(a)具有气泡的介质剖面 (b)等值电路

局部放电机理

$$u_g = uC_b / (C_g + C_b)$$

u_g 随外加电压 u 升高，当 u 上升到 U_s 瞬时值， u_g 到达 C_g 的放电电压 U_g 时， C_g 气隙放电。于是 C_g 上的电压一下子从 U_g 下降到 U_r ，然后放电熄灭

U_r 叫做残余电压，它可以接近为零值，也可以为小于 U_g （均绝对值）的其它值

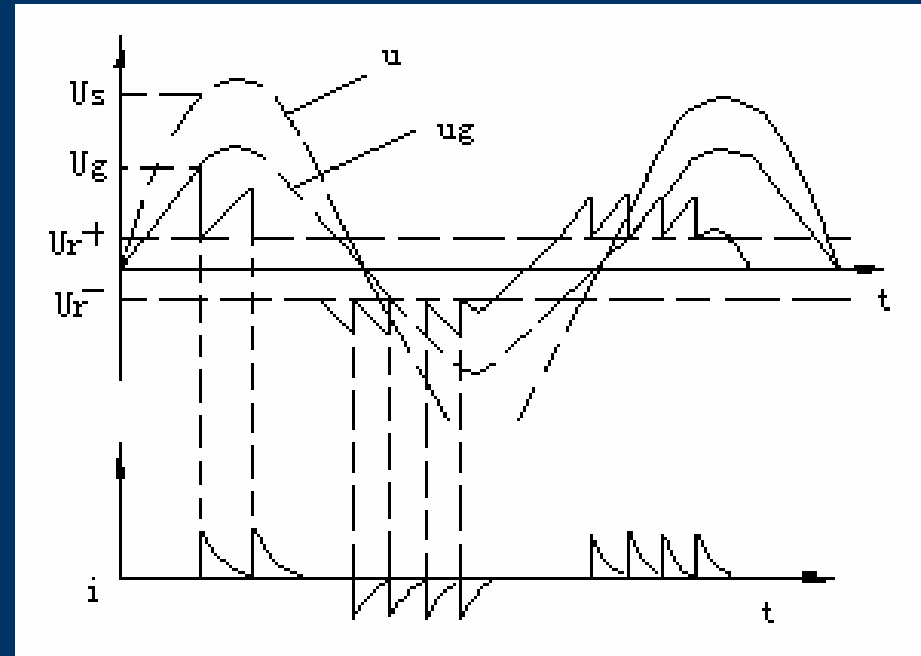


局部放电时气隙中的电压和电流的变化

$$u_g = uC_b / (C_g + C_b)$$

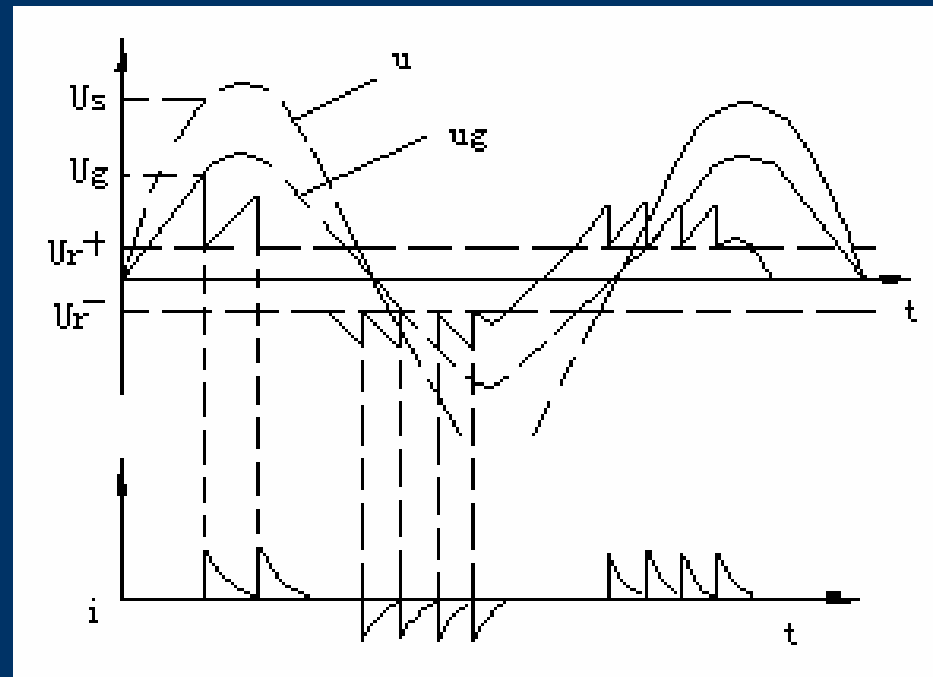
放电火花熄灭，C_g上的电压将再次上升，此时C_g及C_b已经有了一个**初始的直流电压**，此后的u_g值与上式表达的值在绝对值上要小一个（U_g-U_r）值

外加电压仍在上升，C_g上的电压也顺势而上升，当它再次升到U_g时，C_g再次放电，电压再次降到U_r，放电再次熄灭



局部放电时气隙中的电压和电流的变化

C_g 上的电压从 U_g 突变为 U_r （均绝对值）的一瞬间，就是局部放电脉冲的形成的时刻，此时通过 C_g 有一脉冲电流，局部放电时气泡中的电压和电流的变化如图所示



局部放电时气隙中的电压和电流的变化

当C_g放电时，放电总电容C_g'：

$$C'_g = C_g + [C_m C_b / (C_m + C_b)]$$

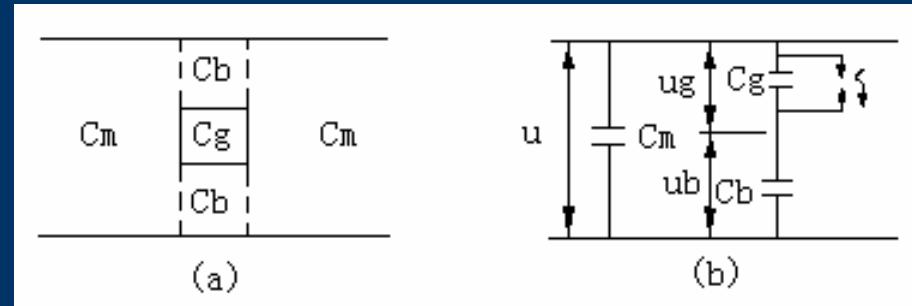
C_g'上的电压变化为(U_g-U_r)，故一次脉冲放出的电荷Δq_r：

$$\Delta q_r = (U_g - U_r)[C_g + C_m C_b / (C_m + C_b)]$$

当C_m >> C_b，C_g > C_b，U_r = 0时，Δq_r ≈ U_gC_g

在实际试验时，式中所表达的各个量，都是无法实测得到的。所以要寻求其它能反映局部放电的量来测量。外施电压是作用在C_m上的，当C_g上的电压变动(U_g-U_r)时，会造成外施电压的变化量ΔU应为

$$\Delta U = C_b (U_g - U_r) / (C_m + C_b)$$



$$\Delta q_r = (U_g - U_r)[C_g + C_m C_b / (C_m + C_b)]$$

$$\Delta U = C_b (U_g - U_r) / (C_m + C_b)$$

由此两式得总电容上的电压变化量 ΔU :

$$\Delta U = C_b \cdot \Delta q_r / (C_g C_m + C_g C_b + C_m C_b)$$

相应的电荷变化量 Δq :

$$\Delta q = \Delta U \{C_m + [C_b C_g / (C_b + C_g)]\}$$

把 ΔU 式代入上式 Δq ，可得

$$\Delta q = \Delta q_r \cdot C_b / (C_g + C_b)$$

$$\Delta q = \Delta U \{C_m + [C_b C_g / (C_b + C_g)]\}$$

$$\Delta q = \Delta q_r \cdot C_b / (C_g + C_b)$$

真实放电量 Δq_r ：是无法测量的

视在放电量 Δq ：其表达式中的量都是可以测得的。它是局部放电试验中的重要参量，国际和国家标准中，对于各类高压设备的视在放电量 Δq 的允许值均有所规定

Δq 比真实放电量 Δq_r 小得多，它以pC作为计量单位

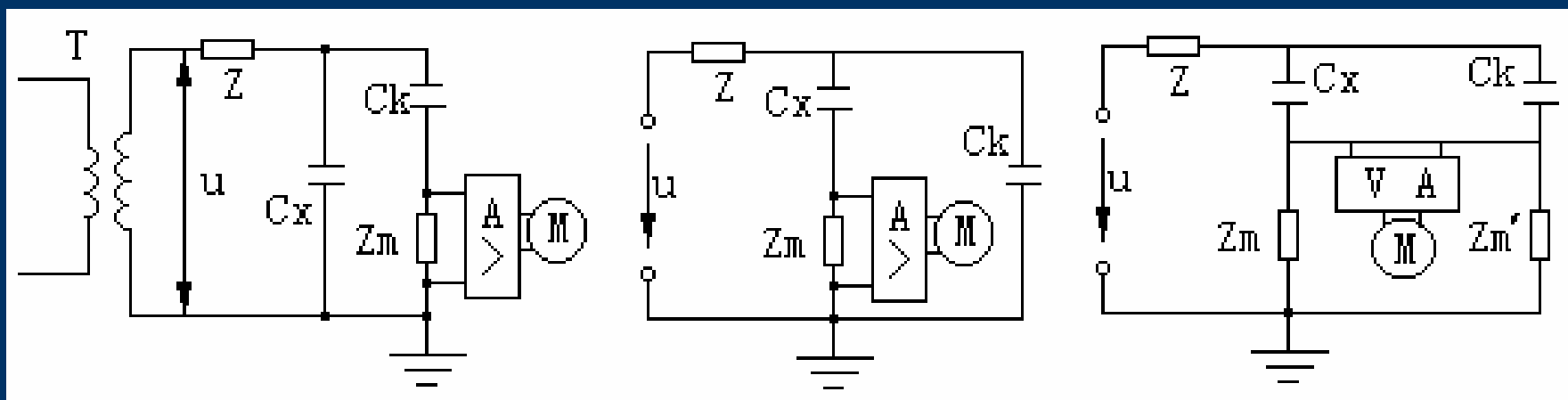
放电能量

放电重复率

影响局部放电特性的多种因素：主要有电压的幅值、电压的波形和频率、电压的作用时间、环境的温度及湿度和气压等

➤ 脉冲电流法测PD的基本回路和检测阻抗

三种基本测量回路



试品通过 C_k 后与
检测阻抗并联的回路

试品与检测阻
抗相串联的回路

电桥平衡回路

➤ 脉冲电流法的测量仪器及其校正

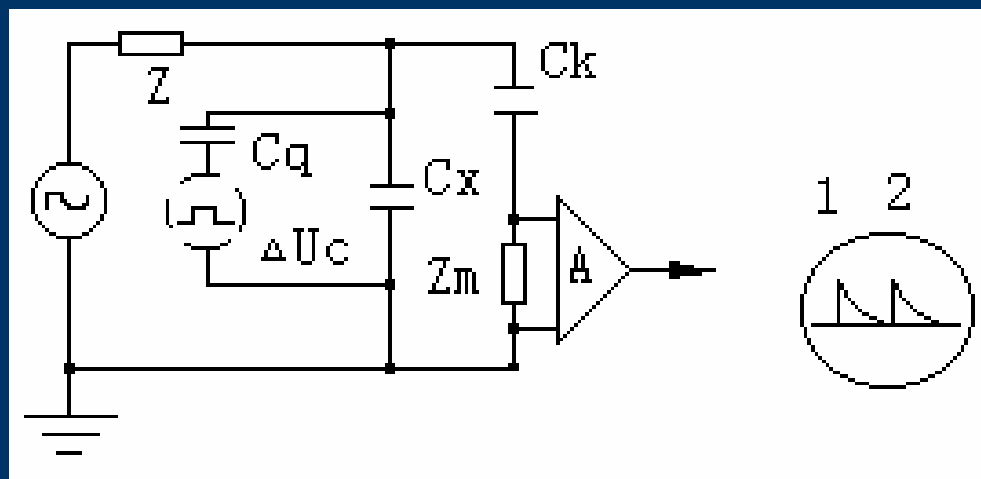
在测量仪器上所测得的局部放电脉冲值是与试验的局部放电视在电荷量 Δq 成比例的，他们之间的具体比例关系与测量回路和放大器等都有关系，要从指示值来计算视在放电电荷 Δq 是有困难的，只能通过试验来确定，亦即PD的测量仪器必须进行实验校正

$$\Delta q \approx \Delta U_c \cdot C_q$$

显示器的视在放电
量刻度系数

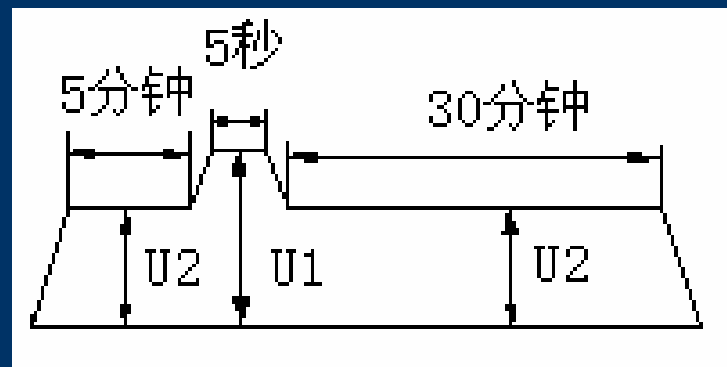
$$k = \Delta U_c \cdot C_q / h$$

单位 (pC/mm)



PD试验的直接校准回路

PD试验： 国标规定对220kV及以上的电力变压器必须做



电力变压器PD测试的加压过程

图中U1为最高额定线电压 U_m

U2: $1.3U_m / \sqrt{3}$ 或 $1.5U_m / \sqrt{3}$

要求在 $1.3U_m / \sqrt{3}$ 的U2值下, $\Delta q \leq 300\text{pC}$

或要求在 $1.5U_m / \sqrt{3}$ 的U2值下, $\Delta q \leq 500\text{pC}$



第8讲 绝缘诊断与绝缘试验

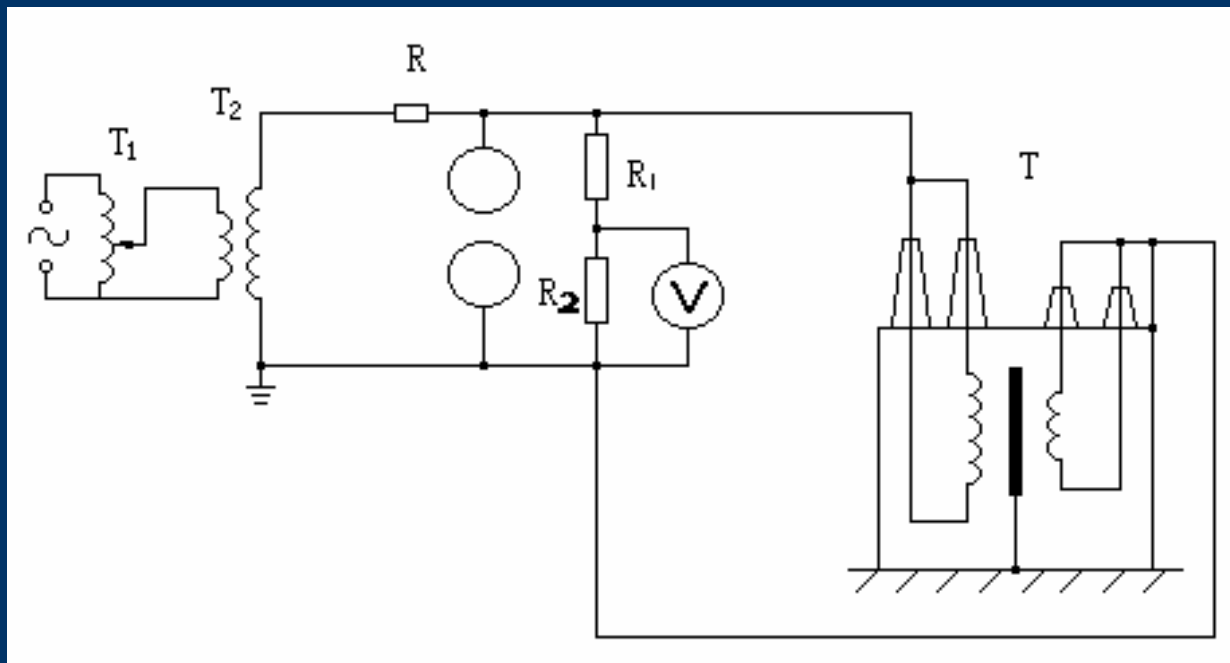
- 绝缘监测和诊断的基本概念
- 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 介质损耗角正切的测量
- 局部放电的测量
- **耐压试验**
- 预防性试验方法的特点总结
- 绝缘的在线监测

五、耐压试验

- 交流耐压
- 直流耐压
- 雷电冲击耐压
- 操作冲击耐压

➤ 交流耐压

交流耐压： 是交流设备的基本耐压方式。以变压器为例如图所示



交流耐压试验实施办法： 电力设备预防性试验规程（DL/T 596）已对各类设备的耐压值作出了规定。以电力变压器为例，当大修而全部更换绕组后，按出厂试验电压值进行试验。在其它情况下，它们的耐压值取出厂试验电压的85%。规程给出了电力变压器的交流工频耐压值如表所示

电力变压器交流试验电压值

括号内数值适用于不固定接地或经小电抗接地系统

额定电压 kV	最高工作电压 kV	线端交流试验电压值 kV		中性点交流试验电压值 kV	
		全部更换	部分更换绕组	全部更换	部分更换绕组
35	40.5	85	72	85	72
66	72.5	140	120	140	120
110	126.0	200	170 (195)	95	80
220	252.0	360	306	85	72
		395	336	(200)	(170)
330	363.0	460	391	85	72
		510	434	(230)	(195)
500	550.0	630	536	85	72
		680	578	140	120

➤ 直流耐压

直流耐压：是直流电力设备的基本耐压方式。对于交流电网中的长电力电缆等，在现场进行交流耐压试验常出现困难，因为长电缆的电容量较大。为了减小试验电源的试验容量，规程规定采用直流耐压来检查电缆绝缘的质量。直流耐压基本上不会对绝缘造成残留性损伤

直流耐压特点：

无局部放电损伤：对于电缆等油纸绝缘，在交、直流电压作用下，在油和纸上的电压分布不一样

交流时电压按**介电常数 ϵ** 分布：电压较多作用在油层上；直流时电压按**电阻系数 ρ** 分布：电压较多作用在纸上。纸的耐压强度较高，所以电缆能耐受较高的直流电压

➤ 直流耐压

为了加强绝缘的考验，电缆的直流耐压值规定得较高。尽管如此，对于使用在交流电网中的电缆，进行直流耐压对绝缘的考验不如交流耐压接近实际

对电力电缆的直流耐压持续时间为5分钟，可同时进行泄漏电流的测量，加压极性为负

对电力变压器绝缘的泄漏电流测试时所施加的直流电压不很高，可以认为是非破坏性试验

对电机绝缘进行直流耐压，也是发现绝缘缺陷的重要方法

➤ 雷电冲击耐压

雷电冲击耐压用作为考验电力设备承受雷电过电压的能力。对电力变压器类试品不仅考验了主绝缘，而且是考验纵绝缘的主要方法

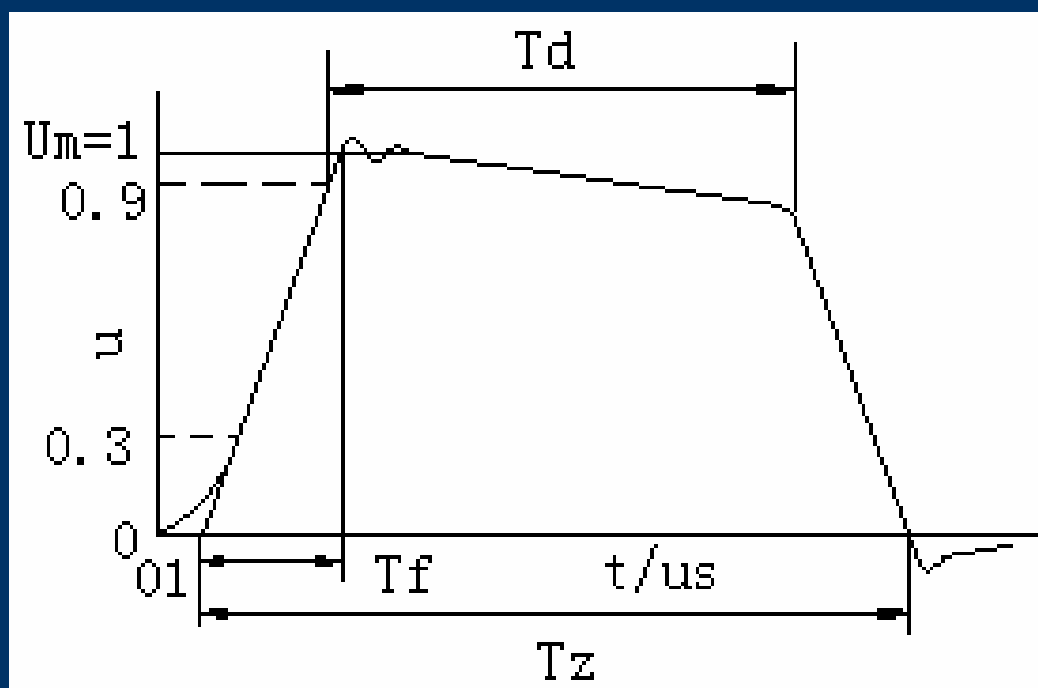
只在制造厂进行本项试验，因为本项试验会造成绝缘的**积累效应**，所以在规定的试验电压下只施加3次冲击。对小变压器是作为型式试验进行的

国家标准规定额定电压 $\geq 220\text{kV}$ ，容量 $\geq 120\text{MVA}$ 的变压器出厂时应进行本项试验。电力系统中的绝缘预防性试验，不进行本项试验。对主绝缘的耐受雷电过电压的能力，由交流耐压试验等值地承担

➤ 操作冲击耐压

高于330kV电力设备的出厂试验应进行本项试验。对变压器进行出厂试验时，大多采用在高压绕组上直接加压法

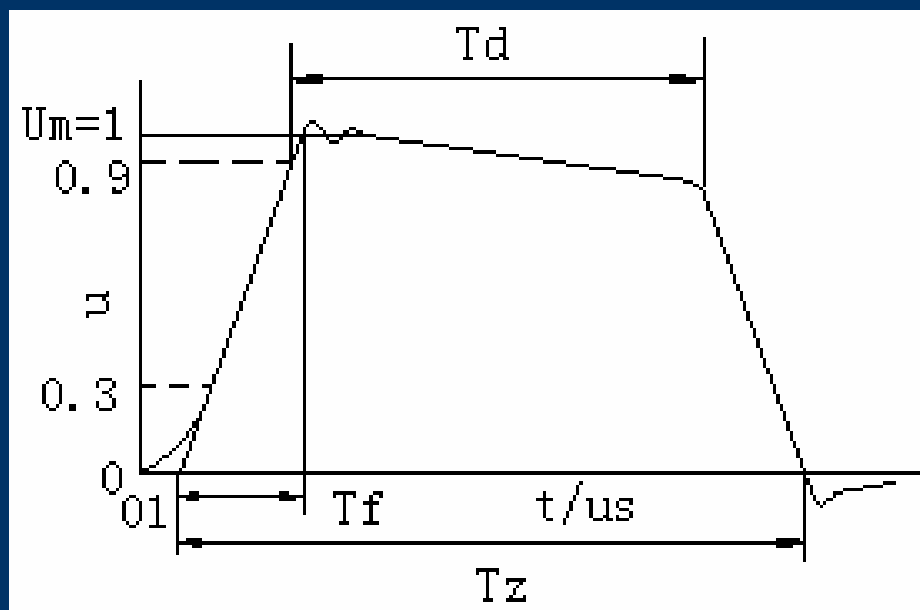
IEC 1980年76-3刊物对电力变压器内绝缘操作波试验的波形，作出了下述规定，第一个半波极性为负，视在波前时间 T_f 不小于 $20\mu\text{s}$ ，通常小于 $250\mu\text{s}$ ；视在波长时间 T_z 不小于 $500\mu\text{s}$ ，90%峰值持续时间 T_d 不小于 $200\mu\text{s}$



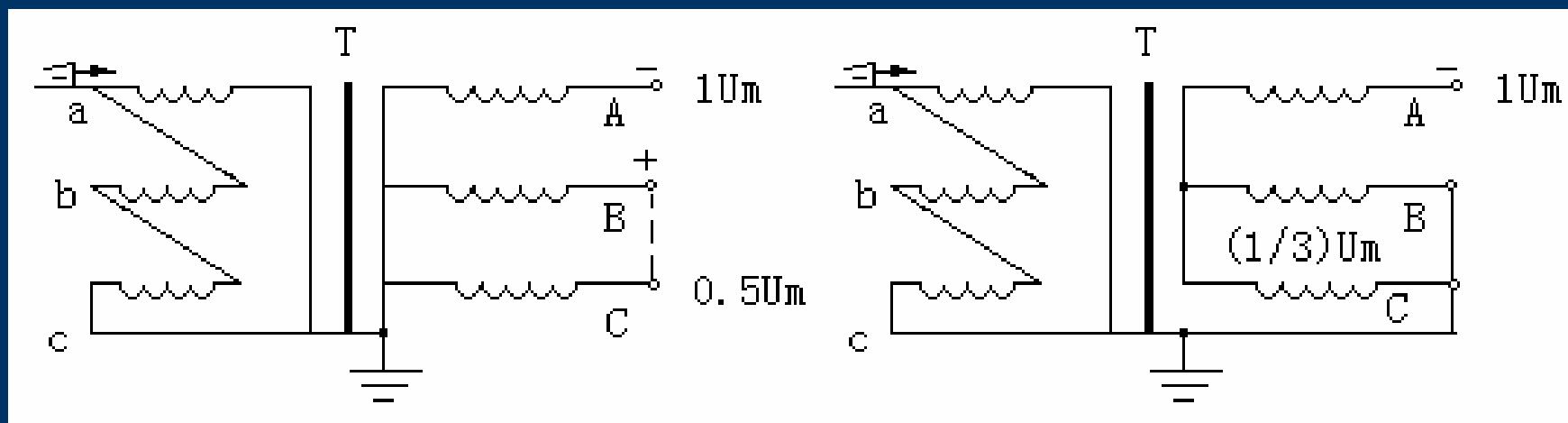
IEC76-3和国家标准规定的操作冲击波形

国家标准 GB7449—87 文件对波形的规定，明确 T_f 应为 $20\mu\text{s}\sim 250\mu\text{s}$ ，反极性的峰值 $U_{2m} \leq 0.5U_m$

电力工业部的行业标准 DL/T 596—1996 规定的波形，基本上符合 IEC 标准，唯 T_f 规定为不小于 $20\mu\text{s}$ ，未作上限值的规定。因为感应法产生的操作波，其 T_f 常会超过 $250\mu\text{s}$ 。若强行规定 T_f 不大于 $250\mu\text{s}$ ，波形上所迭加的高频振荡的幅值有可能会较高



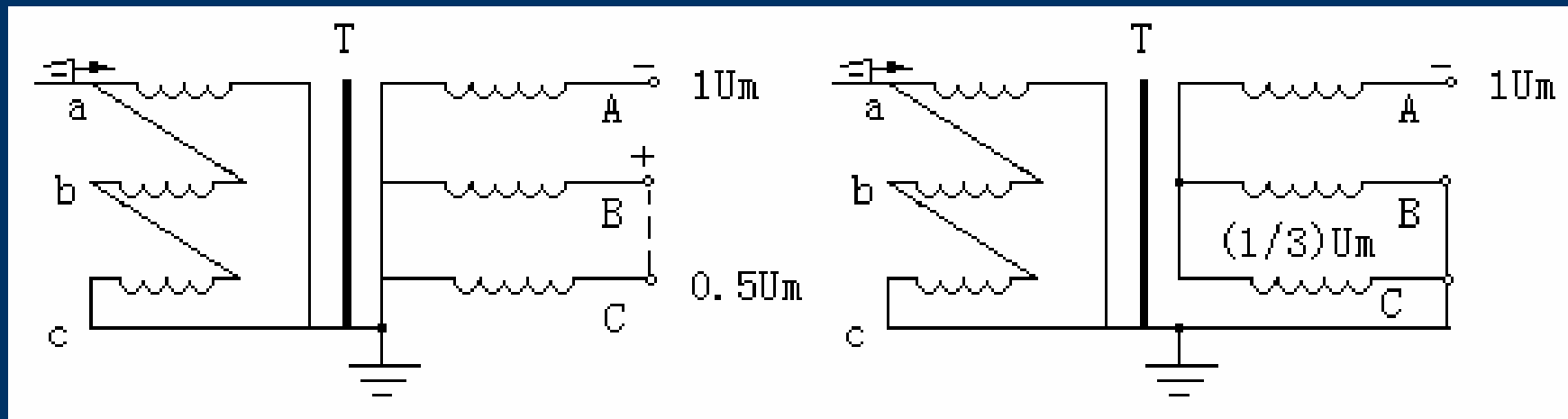
不同电压等级三相变压器（Y/ Δ 接法），采用感应法产生操作波时的变压器接线图，两个图中，被试相全励磁，其余两相各半励磁



**IEC规定的对330kV
及以上变压器的试验接线**

**对220kV及以下
变压器的试验接线**

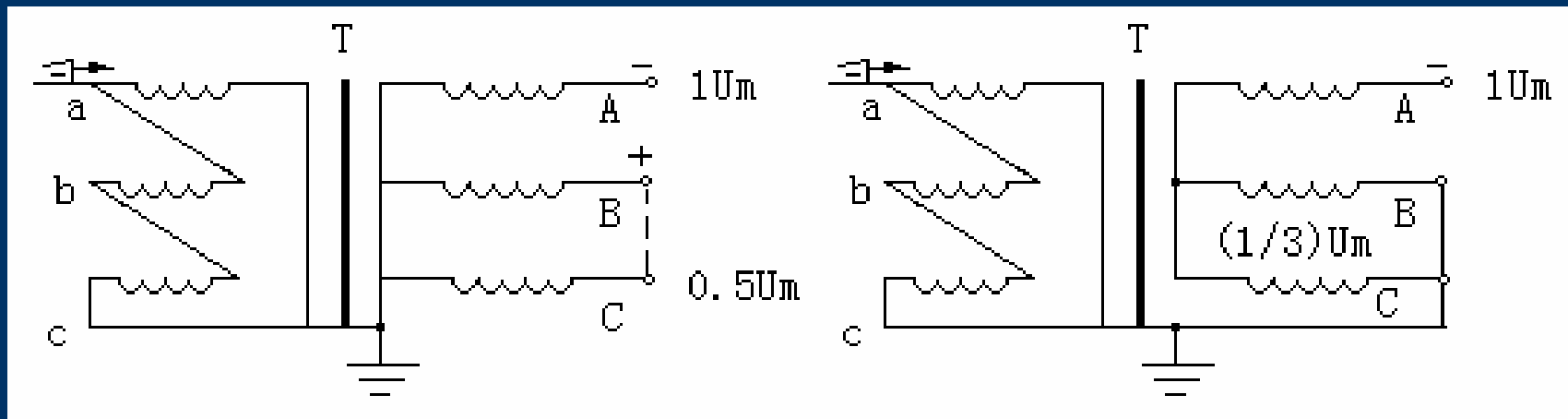
左图： 高压绕组中性点接地，在被试相产生额定试验电压；在其余两相产生与它极性相反、幅值为1/2额定试验电压值的操作波。这样使被试相的对地绝缘受到了考核；相间绝缘在出线处受到了1.5倍额定试验电压的考核



**IEC规定的对330kV
及以上变压器的试验接线**

**对220kV及以下
变压器的试验接线**

右图：对于 $\leq 220\text{kV}$ 的变压器，其相间试验电压不能高于相对地试验电压，采用右图接线，非试相出线端接地，中性点受到 $1/3$ 的试验电压，非试相绕组起着在电位上支撑被试相绕组的作用



**IEC规定的对330kV
及以上变压器的试验接线**

**对220kV及以下
变压器的试验接线**

35~500 kV变压器的操作冲击耐受电压

(DL474.6—92)

电压等级 kV	35	63	110	220	330	500
操作冲击 耐受电压 kV	160	270	375	685 750	850 950	1050 1175

- 注：1. 220~500kV有两个数值是因为有两种绝缘水平
2. 500kV原表列出一个耐受值为1300，根据国家标准改列为1050及1175，与IEC76—3值相符

上表的耐受电压值适用于大修全部更换绕组后试验用，部分更换绕组及交接试验时应取表中值再乘以0.85



第8讲 绝缘诊断与绝缘试验

- 绝缘监测和诊断的基本概念
- 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 介质损耗角正切的测量
- 局部放电的测量
- 耐压试验
- 预防性试验方法的特点总结
- 绝缘的在线监测

五、各种预防性试验方法的特点总结

序号	试验方法	能发现的缺陷
1	测量绝缘电阻及泄漏电流	贯穿性的受潮、脏污和导电通道
2	测量吸收比	大面积受潮、贯穿性的集中缺陷
3	测量 $\text{tg}\delta$	绝缘普遍受潮和劣化
4	测量局部放电	有气体放电的局部缺陷
5	油的气相色谱分析	持续性的局部过热和局部放电
6	交流或直流耐压试验	使抗电强度下降到一定程度的主绝缘局部缺陷
7	操作波或倍频感应耐压试验(限于变压器)	使抗电强度下降到一定程度的主绝缘或纵绝缘的局部缺陷

表中序号6和7两项为破坏性试验，其它各项均属于非破坏性试验



第8讲 绝缘诊断与绝缘试验

- 绝缘监测和诊断的基本概念
- 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 介质损耗角正切的测量
- 局部放电的测量
- 耐压试验
- 预防性试验方法的特点总结
- 绝缘的在线监测

六、绝缘的在线监测

- $\text{tg}\delta$ 的在线监测
- 局部放电 (PD) 的在线监测

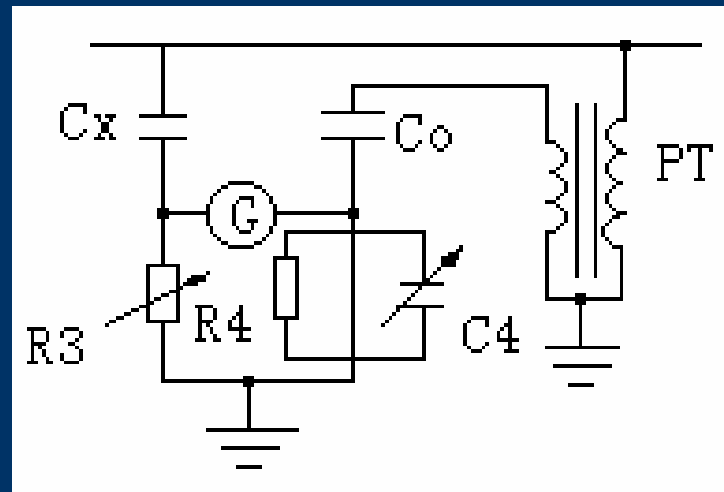
离线监测的缺点： 绝缘预防性试验方法，都是电力设备处于离线情况下进行的。离线监测的缺点是：

1. 需停电进行，而不少重要的电力设备不能轻易地停止运行
2. 只能周期性进行而不能连续地随时监视，绝缘有可能在诊断期间发生故障
3. 停电后的设备状态，如作用电场及温升等和运行中不符合，影响诊断的正确性。如前述的绝缘 $\text{tg}\delta$ 检测，采用电桥法时，由于标准电容器的额定电压的限制，一般只加到10kV，这对于220kV~500kV的电力设备而言，电压很低

在线监测和诊断的优缺点： 在线监测和诊断是电力设备在运行状态下进行的，故可避免离线监测及诊断的上述缺点，可使判断更加准确。自70年代以来，随着传感、信息处理及电子计算机技术的快速发展，在线监测和诊断技术也得到迅速的发展。根据在线监测和诊断的结论，还可以做到有的放矢地进行维修，这种维修称为预知性维修。在线监测和诊断技术的不足是投资费用较大，只适用于大型和重要设备及变电所

➤ $\text{tg}\delta$ 的在线监测

电桥法 在线监测 $\text{tg}\delta$ 时，仍可用前述的西林电桥测量方法。但由于原来应用在电桥中的标准电容器的工作电压大多仅为10kV，因此对于较高电压的现场电力设备的测量，需引入一电压互感器PT降压，以适应标准电容器的额定电压



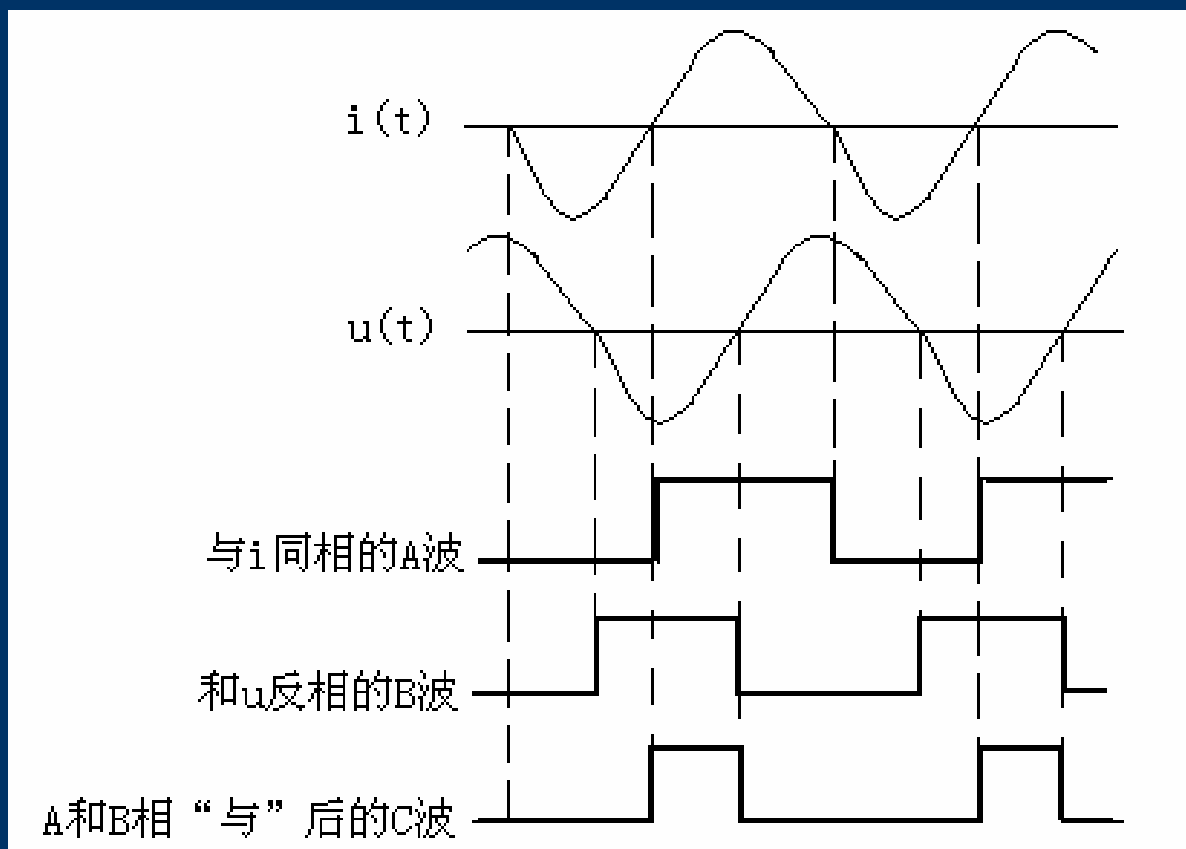
电桥法在线监测 $\text{tg}\delta$ 原理图

C_X —试品 C_0 —标准电容器 PT—电压互感器 G—指零仪

计数脉冲测相位差法：直接测量介质损失角 δ 的方法。一般情况下， δ 角很小，所以可以用测出的 δ 来代表 $tg\delta$

$$tg\delta \approx \delta$$

$$\delta = (\pi/2) - \theta$$

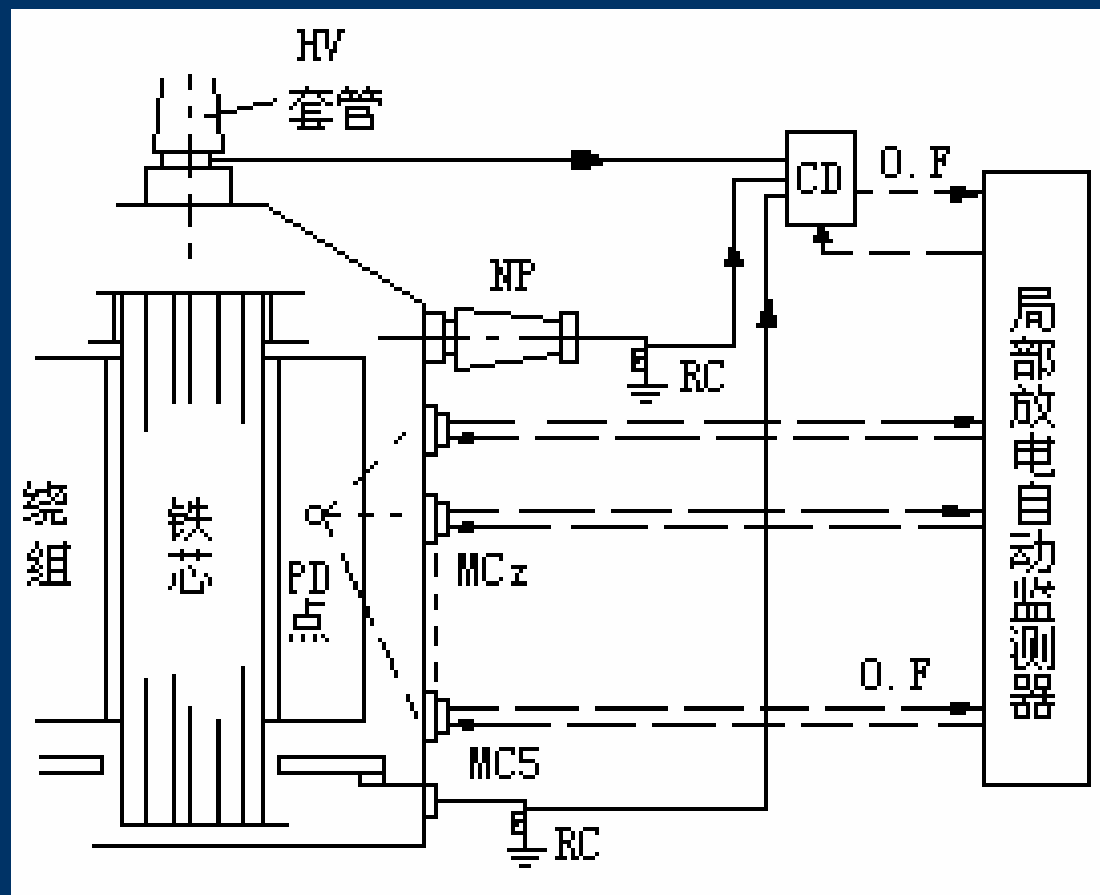


脉冲测相位差法原理波形图

全数字测量法

又称数字积分法。这是一种用A/D转换器分别对电压和电流波形进行数字采集，然后根据付里叶分析法的原理，进行数字运算，最终可求得 $\text{tg } \delta$ 值

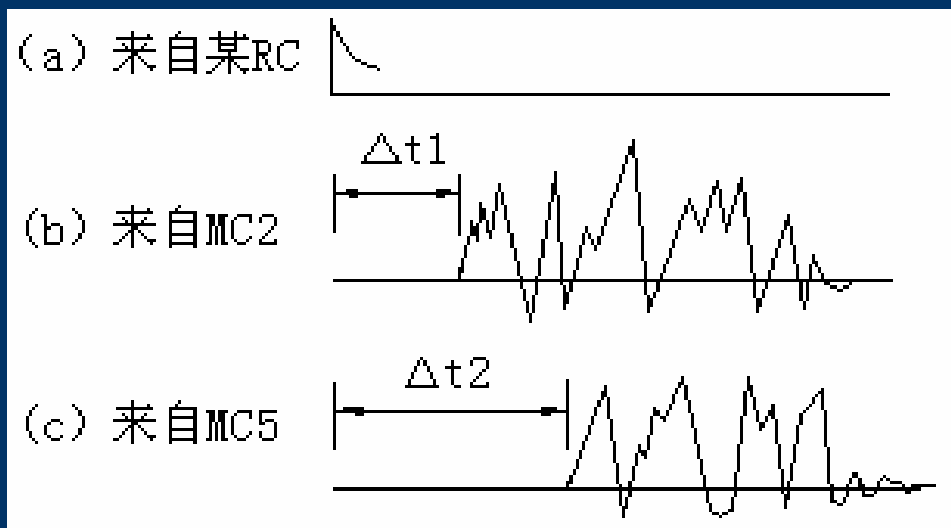
➤ 局部放电 (PD) 的在线监测



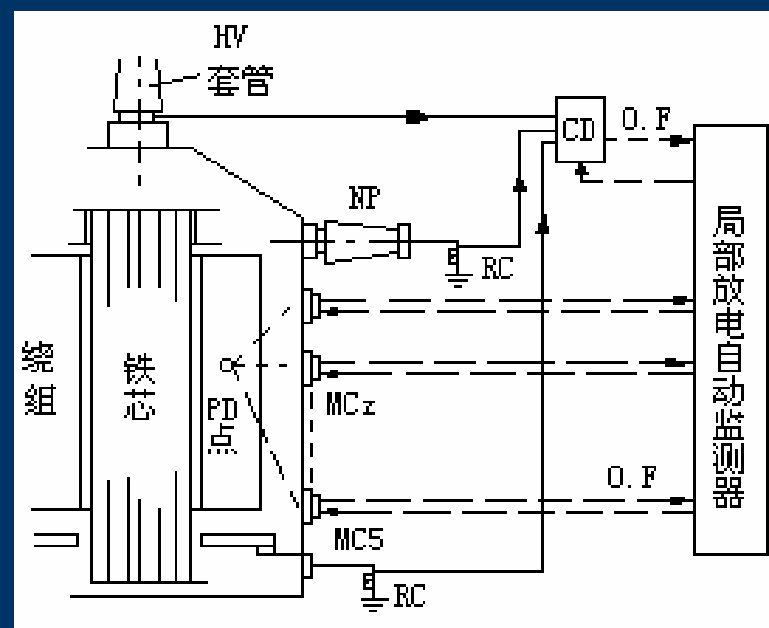
电力变压器PD的在线声电联合监测

CD - 电流脉冲检测器 MC - 超声压力传感器 RC - 罗戈夫斯基线圈

声电信号图形识别



电力变压器PD在线监测时所获得的电流脉冲及超声信号



现场带电测量的灵敏度

实验室： IEC要求新生产的 ≥ 300 kV变压器在制造厂的实验室里试验时，PD的视在放电量应小于 $300\sim 500$ pC

现场带电： 现场大变压器的PD量在 ≥ 10000 pC时，即应引起严重关切。所以PD的监测灵敏度至少应达到5000 pC。然而即使是这样一个要求。在在线测量时，也并非一定能够实现的

谢谢!

Q & A

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



80795842 13691145432



typ@ncepu.edu.cn