

清华大学
Tsinghua University

复习、作业、预习

复习: 5.1-5.4
作业: 5-6、5-8、5-10、5-11、5-12
预习: 5.5-5.7、6.1、6.2

清华大学
Tsinghua University

线上、线下混合式教学
网络教学直播: 雨课堂

高电压工程—第9讲

绝缘检测与诊断

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

清华大学
Tsinghua University

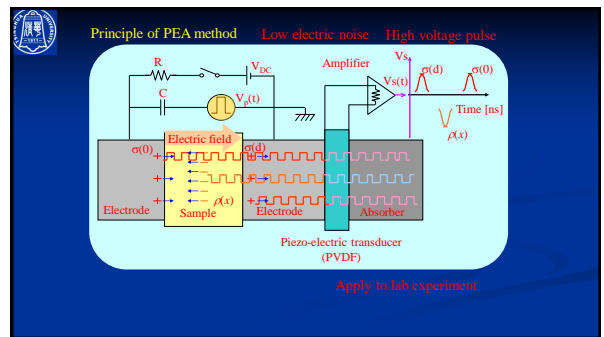
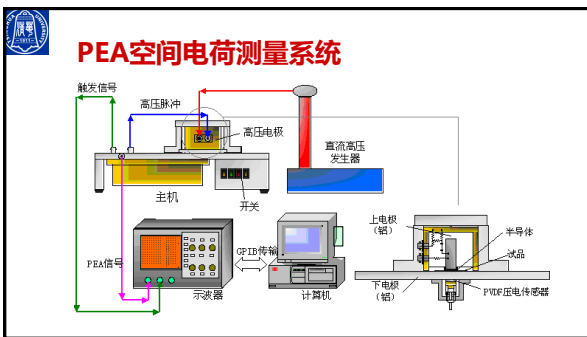
专题: 电声脉冲法测量固体电介质中空间电荷分布的研究

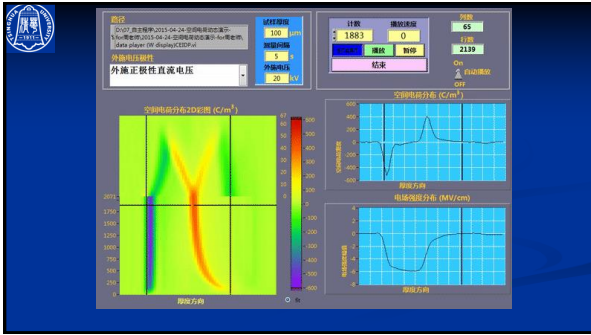
周远翔
清华大学电机工程与应用电子技术系
Email: zhou-yx@tsinghua.edu.cn
MB: 13911097570

PEA法空间电荷测量系统的发展

电声脉冲法: 又称PEA法: Pulse Electro-Acoustic Method

- 上世纪80年代由日本武藏工业大学高田达雄教授提出, 经过二十年的改进, 是目前在世界范围内较为流行的空间电荷无损测量方法
- **基本原理:** 利用电脉冲的作用, 在介质中的空间电荷处产生机械应力, 通过传感器转换为电信号, 经过对电信号的处理, 获得空间电荷分布的信息。





谢谢!



本研究早期与日本高田教授合作，曾受国家自然科学基金重点、面上等多个项目资助

高电压工程—第9讲 绝缘检测与诊断

第5章 绝缘检测与诊断（1）

本章核心概念

绝缘检测与监测，绝缘诊断
耐压试验，非破坏性试验
绝缘电阻，泄漏电流， $\tan\delta$ ，西林电桥
局部放电，气相色谱

补充：预防性试验，1min工频耐受试验，外施耐压试验，感应耐压试验

第5章 绝缘检测和诊断

- 5.1 绝缘检测和诊断的基本概念
- 5.2 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 5.3 电介质的损耗角正切的测量
- 5.4 局部放电的测量
- 5.5 绝缘油中溶解气体的色谱分析
- 5.6 耐压试验
- 5.7 耐压试验与预防性试验方法的特点
- 5.8 绝缘的在线监测（自学）

5.1 绝缘检测和诊断的基本概念

- 绝缘的检测和诊断技术
 - 设备故障：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
 - 检测和诊断概念：通过对绝缘的试验和各种特性的测量，了解并评估设备的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检测和诊断技术
- 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检测，通常为绝缘预防性试验
- 绝缘的检测和诊断技术分类
 - 按照对设备造成的影响程度分类：非破坏性、破坏性
 - 按照设备是否处于带电运行方式分类：在线、离线



●非破坏性试验 (亦称绝缘特性试验)

➢概念：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

●破坏性试验 (即耐压试验)

➢概念：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

特点：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、操作冲击耐压试验

13

投票 最多可选1项

设置

你认为应该先做破坏性试验，还是先做非破坏性试验？

- ☐ A 先做破坏性试验
- ☐ B 先做非破坏性试验
- ☐ C 都可以
- ☐ D 看情况

提交

14



●离线方式

➢概念：被试设备退出运行状态的测量方式

➢特点：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；可采用破坏性试验和非破坏性试验两种方式，两种方式相輔相成；耐压试验往往是在非破坏性试验之后进行

➢缺点：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

●在线方式

➢概念：在线检测则是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检测

➢特点：通常是自动进行的，只能采用非破坏性试验方式；由于可连续检测，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

15



●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

➢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

✓对绝缘的发展趋势进行预测，从而对故障提供预警，可为下一步的维修决策提供技术根据

16



●绝缘诊断规则

➢诊断分类：逻辑诊断、模糊诊断、统计诊断

➢逻辑诊断 (二值逻辑)

✓特征有二：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”）

✓状态有二或好坏：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。

✓特点：简单明了，应用较广，但把问题过于简化，诊断准确度较低

➢模糊诊断

➢多值逻辑：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

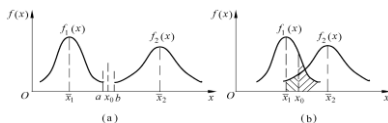
✓特点：如采用连续变化的特征函数，判断可更加准确

17



➢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

$f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 分别为完好和损坏绝缘某参数 x 的概率密度曲线



绝缘完好和损坏时概率密度曲线不重叠 则可准确 (可能产生误判或漏判)

某特征参数的概率密度

绝缘诊断的准确性随着特征参数种类的增加而提高

18

第5章 绝缘检测和诊断

5.1 绝缘检测和诊断的基本概念

5.2 绝缘电阻和泄漏电流的测量

5.2.1 测量绝缘电阻与吸收比的工作原理

5.2.2 测量绝缘电阻与吸收比的方法

5.2.3 泄漏电流的测量

5.3 电介质的损耗角正切的测量

5.4 局部放电的测量

5.5 绝缘油中溶解气体的色谱分析

5.6 耐压试验

5.7 耐压试验与预防性试验方法的特点

5.8 绝缘的在线监测 (自学)

19

5.2.1 测量绝缘电阻与吸收比的工作原理

● 双层电介质模型的电流-时间特性

➢ 吸收电流

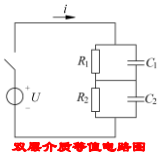
$$i(t) = A + B \exp(-t/\tau)$$

✓ 其中

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

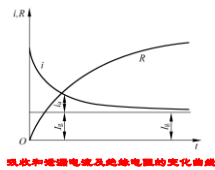
$$A = [U / (R_1 + R_2)]$$

$$B = U (R_1 C_1 - R_2 C_2)^2 / [(C_1 + C_2)^2 (R_1 + R_2) R_1 R_2]$$



双电介质等效电路

20



吸收和泄漏电流及绝缘电阻的变化曲线

$$i(t) = A + B \exp(-t/\tau)$$

➢ 绝缘电阻：直流电压 U 作用下通过仪表测出的 U/i 数值，简称为绝缘电阻

➢ 工程应用上：把电介质吸收过程的 U/i 也称作绝缘电阻

➢ 吸收比 K 的定义：为加压 60 s 时的绝缘电阻 $R_{60''}$ 与 15 s 时电阻 $R_{15''}$ 之比值

$$K = R_{60''} / R_{15''}$$

➢ 极化指数 P 的定义：为加压 10 min 时的绝缘电阻 $R_{10'}$ 与 1 min 时电阻 R_1 之比值

$$P = R_{10'} / R_1$$

21

单选题 1分

设置

以下哪种绝缘是良好绝缘？

- ☐ A 吸收比接近1，极化指数接近1
- ☒ B 吸收比比1大得多，极化指数比1大得多
- ☐ C 吸收比比1大得多，极化指数接近1
- ☐ D 吸收比接近1，极化指数比1大得多

提交

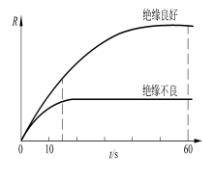
22

● 依据绝缘电阻的绝缘状况诊断

➢ 若绝缘内部有集中性导电通道，或绝缘严重受潮，则电阻 R_1 、 R_2 会显著降低，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

➢ 即使绝缘部分受潮，只要 R_1 与 R_2 中的一个数值降低， τ 值也会大为减小，吸收电流仍会迅速衰减，仍可造成吸收比 K 或极化指数 P 的下降

➢ 当 $K=1$ 或接近于1，则设备基本丧失绝缘能力



不同绝缘状态下绝缘电阻的变化曲线

23

● 设备绝缘状况判断准则

➢ 判断依据：电力行业标准 DL/T 596 《电力设备预防性试验规程》

➢ 判断标准

✓ 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

✓ 大发电机当采用环氧粉云母者：

• K 值应不小于1.6

• P 应不小于2.0

➢ 建议：发电机容量在200MW及以上者推荐测量 P 值

24




5.2.2 测量绝缘电阻与吸收比的方法

- 测量仪表：一般用兆欧表进行绝缘电阻与吸收比的测量。为了测准吸收比，需用灵敏度足够高的兆欧表
- 兆欧表的电压：500、1000、2500、5000V等
- 兆欧表的种类
 - 摇表：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
 - 兆欧表选择：根据设备电压等级的不同，选用不同电压的兆欧表
 - 额定电压3kV及以下者使用1000V兆欧表
 - 3kV以上者使用2500V兆欧表

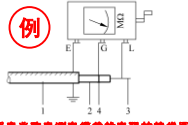



25



用摇表（兆欧表）测量电缆绝缘电阻


- 转速：120 r/min
- 读数时间：15 s和60s
- 缺点：持续时间长时，人力难以维持
- 解决的办法：采用晶体管兆欧表





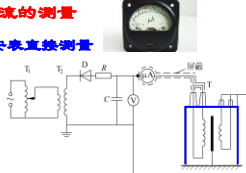
- 注意测量过程中温度的影响
 - 由于温度等因素的影响，绝缘电阻将发生变化
 - 测量时一定要记录环境温度和绝缘体（设备）的温度
 - 注意纵向、横向对比

26



5.2.3 泄漏电流的测量

- 加直流用微安表直接测量




T₁——调压器； T₂——高压试验变压器； D——高压电极
R——保护电阻； C——滤波电容； T——微安表

绝缘标称电压/kV	3	6~10	20~35	66~330	500
直流试验电压/kV	5	10	20	40	60

施加的试验电压比绝缘电阻测试的电压高，更能反映绝缘的实际状况


27



第5章 绝缘检测和诊断

- 5.1 绝缘检测和诊断的基本概念
- 5.2 绝缘电阻和泄漏电流的测量
- 5.3 电介质损耗角正切的测量
 - 5.3.1 西林电桥的基本原理
 - 5.3.2 反接法的西林电桥
 - 5.3.3 存在外界电磁场干扰时的测量
- 5.4 局部放电的测量
- 5.5 绝缘油中溶解气体的色谱分析
- 5.6 耐压试验
- 5.7 耐压试验与预防性试验方法的特点
- 5.8 绝缘的在线监测（自学）

28



测试无线电材料：

常采用高频施压法，所加的电压不高


在电工业：

测量tanδ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等）

在线监测：

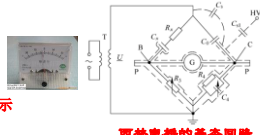
采用微计算机对tanδ的测量


29



5.3.1 西林电桥的基本原理

- 高压臂
 - ✓试品以Z₁表示
 - ✓无损耗的标准电容C₀，以阻抗Z₂表示
- 低压臂
 - ✓处在桥臂体内
 - ✓可调无感电阻R₃，以Z₃表示
 - ✓无感电阻R₄和可调电容C₄并联，以Z₄表示
- 保护：放电臂P
- 电桥平衡：检流计G检零
- 屏蔽：
 - ✓消除杂散电容影响
 - ✓抗电磁干扰





30

主课题 10分



如何用电阻丝绕制无感电阻？

正常使用主课题需2.0以上版本雨课堂

作答

31



电桥的平衡条件

$$\checkmark Z_1/Z_3 = Z_2/Z_4$$

串联等值回路

$$\checkmark \tan\delta = \omega R_4 C_4$$

$$\checkmark C_x = R_4 C_0 / R_3$$

并联等值回路

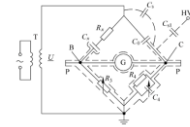
$$\checkmark \tan\delta = \omega R_4 C_4$$

$$\checkmark C_x = R_4 C_0 / [R_3 (1 + \tan^2\delta)]$$

两种等值回路C_x相等

$\tan^2\delta$ 极小

故两种等值电路的C_x相等



西林电桥的基本回路



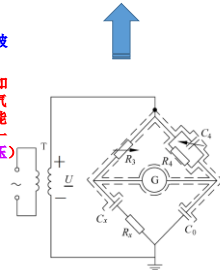
32



反接法的西林电桥

在实验室内：通常测试材料或小设备，被试品可以对地绝缘

现场试验中：有许多一端接地的试品，如敷设在地下电缆及摆在地面的重大电气设备，要改成对地绝缘是不可能的，只能改变电桥回路的接地点。这样就产生了一种反接法的西林电桥（人体直接接高压）



反接法西林电桥的接线

33



5.3.3 存在外界电磁场干扰时的测量

1. 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：消除或减小外界电场影响的测试方法，是采用两次测量

第一次先调电桥到平衡，测得 $\tan\delta$ 和 C_x'

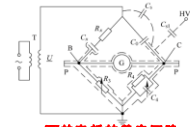
然后倒换试验变压器原边电源线的两头，即把试验电压 U 的相位转一个 180°

然后再测得第二次的数值 $\tan\delta_2$ 和 C_x''

可计算得到准确的 $\tan\delta$ 和 C_x 值

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

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



西林电桥的基本回路

强电场干扰时 $\tan\delta$ 的测量

当外界电场很强烈时，有可能出现 $-\delta$

要使电桥获得平衡，必须使 C_4 与 R_4 并联而改为与 R_4 并联

34



2. 存在外界磁场干扰时的测量

磁干扰：现场试验附近母线电抗器、通信的滤波器和漏磁通较大的设备，可引起电桥回路的感应电动势和感应环流

回路磁干扰：由于试品和标准电容器在工频下的阻抗很大，所以引起的误差不大

磁流计磁干扰：虽有良好屏蔽，但也容易受到干扰

两次测量法：在有磁场干扰时，检流计两端接线对调，由对调前后的测量结果通过计算可得实际结果

检流计正接： $\tan\delta_1 = \omega (C_4 + \Delta C_4) R_4$, $C_{x1} = C_0 R_4 / (R_3 + \Delta R_3)$

检流计反接： $\tan\delta_2 = \omega (C_4 - \Delta C_4) R_4$, $C_{x2} = C_0 R_4 / (R_3 - \Delta R_3)$

无磁场干扰： $\tan\delta = \omega C_4 R_4$, $C_x = C_0 R_4 / R_3$

故可得

$$\tan\delta = (\tan\delta_1 + \tan\delta_2) / 2$$

$$C_x = 2C_{x1} C_{x2} / (C_{x1} + C_{x2})$$

35



第5章 绝缘检测和诊断

5.1 绝缘检测和诊断的基本概念

5.2 绝缘电阻和泄漏电流的测量

5.3 电介质损耗角正切的测量

5.4 局部放电的测量

5.4.1 局部放电的基本概念

5.4.2 测量局部放电的几种方法

5.4.3 局部放电的脉冲电流测量法

5.4.4 脉冲电流法测PD的基本回路和检测阻抗

5.4.5 脉冲电流法的测量仪器及其校正

5.4.6 固体PD测量的其它技术问题5.5 绝缘油中溶解气体的色谱分析

5.6 耐压试验

5.7 耐压试验与预防性试验方法的特点

5.8 绝缘的在线监测（自学）

36



5.4.1 测量局部放电的几种方法

● **局部放电 (Partial Discharge, PD) 的概念**: 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



37

投票 最多可选1项

设置

你是否同意电晕放电也是一种局部放电的现象?

- ☐ A 同意
- ☐ B 不同意

提交

38



●局部放电的危害

- 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
- 放电能量很小, 所以并不影响电气设备的短时绝缘强度
- 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



39



●电介质内部局部放电的现象

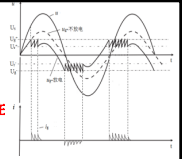
- 电磁现象: 如电脉冲的产生, 电介质损耗的增大和电磁波放射
- 非电现象: 如光、热、噪音、气体压力的变化和化学变化

●局部放电的检测

- 电磁现象和非电现象可以用来判断局部放电是否存在
- 由此产生的检测方法也可以分为电的和非电的两类

●测量局部放电的几种常用方法

- (1) **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
- (2) **超声波检测法**: 在电气设备外壁上放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, 检测其强度和发生的部位
- (3) **绝缘油的气相色谱分析法**: 通过检查电气设备油样中所含的气体组成的含量来判断设备内部的隐藏缺陷



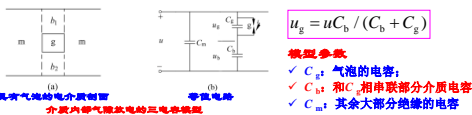
40



5.4.2 局部放电的脉冲电流测量法

●局部放电的三电容模型

➢ **概念**: 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



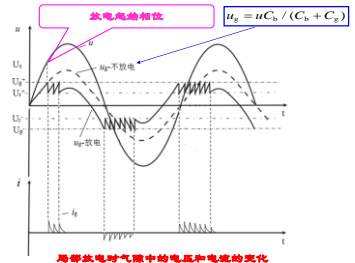
- 三个电容的大小: 气泡很小, C_g 比 C_b 大, C_m 比 C_g 大很多
- 气泡上分得的电压: 电极间加上交流电压 u , 则 C_g 上的电压为 u_g

41

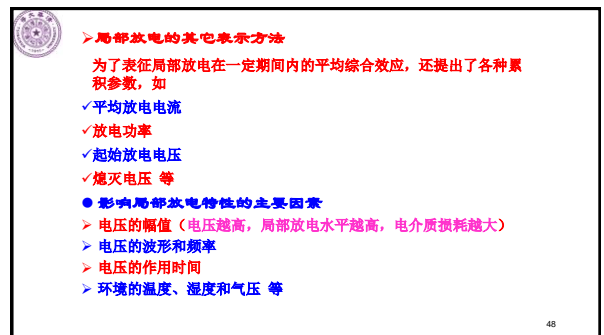
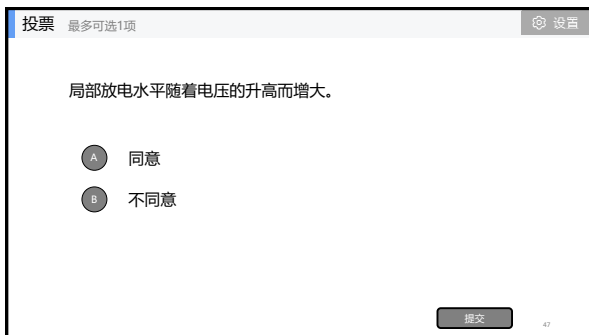
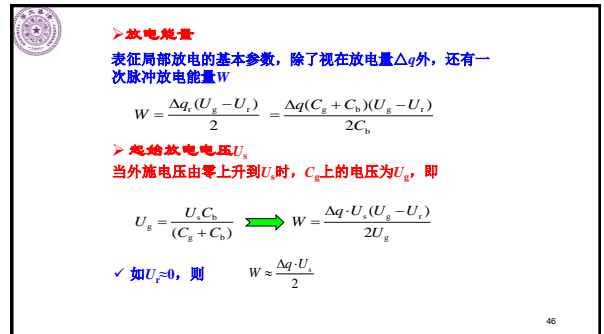
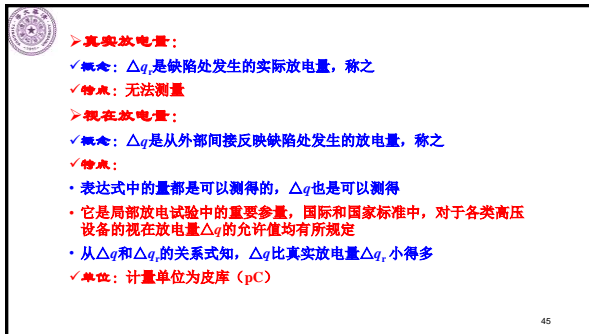
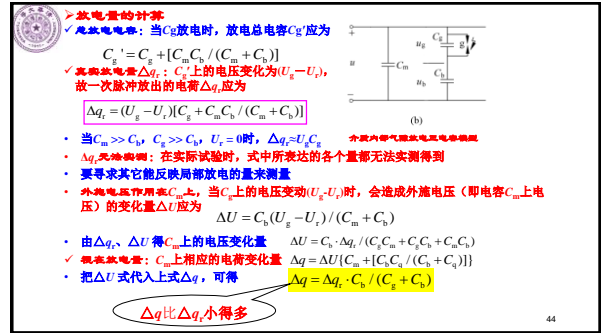
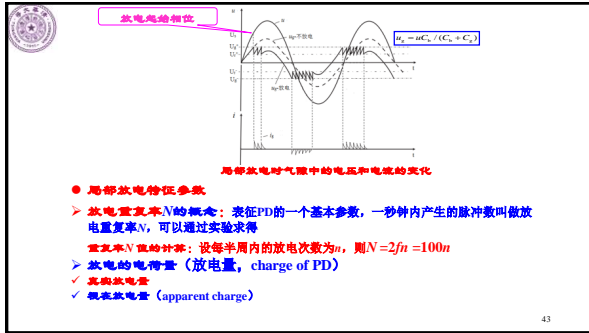


●局部放电产生的过程

- 气隙放电—放电熄灭—残余电压—重复放电—熄灭
- 伴随着声、光和电的信号发生, 同时分解介质, 产生各类气体

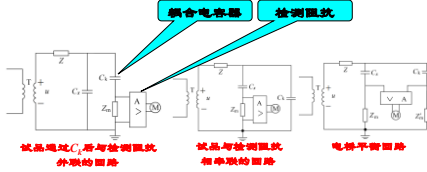


42



5.4.3 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

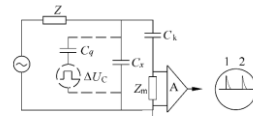


49

5.4.4 脉冲电流法的测量仪器及其校订

● 校订的概念：通过试验来确定局部放电脉冲值，亦即PD的测量仪器进行实验校订

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



PD试验的直接校订回路

50

5.4.5 实施PD测量的其它技术问题

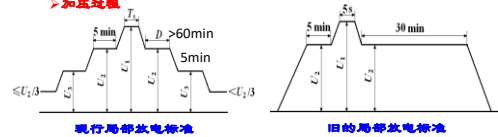
1. 抗干扰措施

- 背景噪声的影响：背景噪声决定最小可见视在放电量，亦即决定测量系统的灵敏度，严重噪声将使局部放电测量无法进行
- 抗干扰的关键：抗干扰措施在局部放电测量中是个严重任务。要消除干扰，必先找到干扰的来源
- 干扰的来源
 - ✓ 送电线路的电晕放电，无线电广播的电磁波，开关的开闭，电焊机、起重机的操作，试区高压线放电，导体接触不良，试验回路接地不良，试验变压器屏蔽不好，内部有放电等等

51

2. 按照国家标准施加高电压的过程

- PD试验：根据IEC及国标要求进行
- 加压方式：(1) 无预加电压的测量 (2) 有预加电压的测量
- 测量中预加电压的作用：激发局部缺陷
- 加压过程



电力变压器PD测试加压过程 (预压时间 $T_p=60 \times 100/f$)

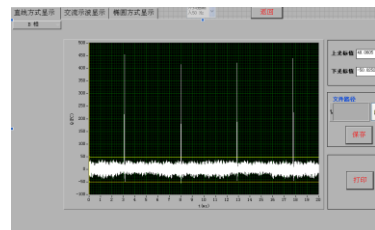
52

数字化局部放电测量系统

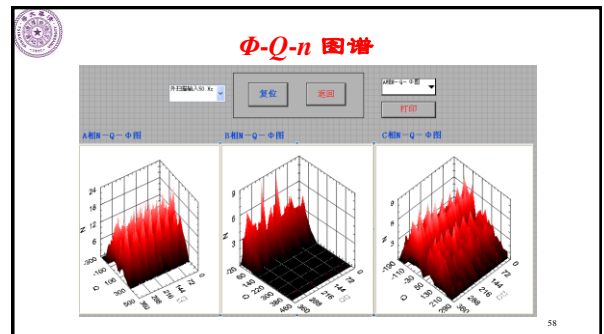
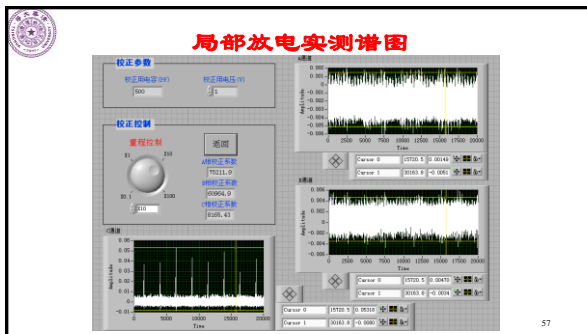
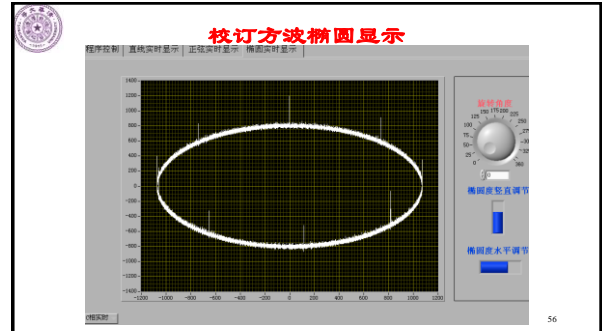
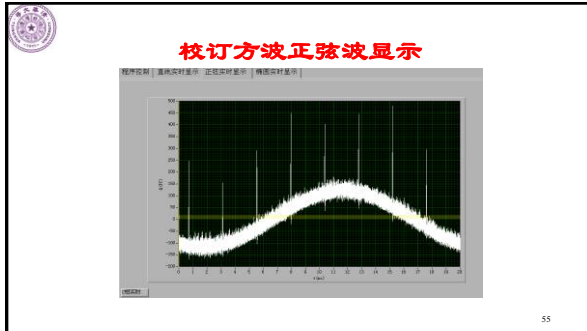


53

校订方波直线显示



54



清华大学 Tsinghua University

高电压工程一

之 绝缘检测与诊断

第4讲 The End

谢谢!

59