

# 电气设备综合实验

## 实验指导书

上海交通大学

电气工程实验教学中心

2021年7月

## 目 录

- 实验一 高压开关柜质量评估实验
- 实验二 提前放电避雷针提前放电时间评估实验
- 实验三 绝缘电阻和泄漏电流测量实验
- 实验四 介电常数和介电损耗角正切测量实验
- 实验五 固体绝缘空间电荷测量实验
- 实验六 局部放电测量实验

# 实验一 高压开关柜质量评估实验

## 一、实验目的

1. 了解高压电器产品的定义、分类和用途、高压电器的基本参数、高压电器的绝缘、高压电器的试验分类等高压电器的基本知识。
2. 了解高压开关柜的作用与分类、组成、定额、内部故障、连锁装置、接地、防护等级、操作机构、型式试验项目、出厂试验项目等基本知识。
3. 掌握高压开关柜出厂试验的要求、试验方法、试验仪器和操作方法。以实际产品（试品）的出厂检验为目标，设计一系列试验并完成这一系列试验，综合判断产品（试品）是否合格。从中学习高压电器产品质量的综合判断方法。
4. 通过综合实验学习把各种机械和高电压试验技术综合应用到一个产品的质量的综合判断。通过锻炼增强实际运用课堂所学知识的能力。

## 二、实验设备

1. 12kV 高压开关柜(固定式)。
2. 12kV 金属铠装抽出式开关设备（中置柜）。
3. 12kV 真空断路器。
4. 50kV 移动式工频电压发生器
5. 400kV 冲击电压发生器。
6. 20kV/8kA 冲击电流发生器。
7. 开关机械特性测试系统。
8. 100A/1mΩ回路电阻测试仪。

## 三、实验原理

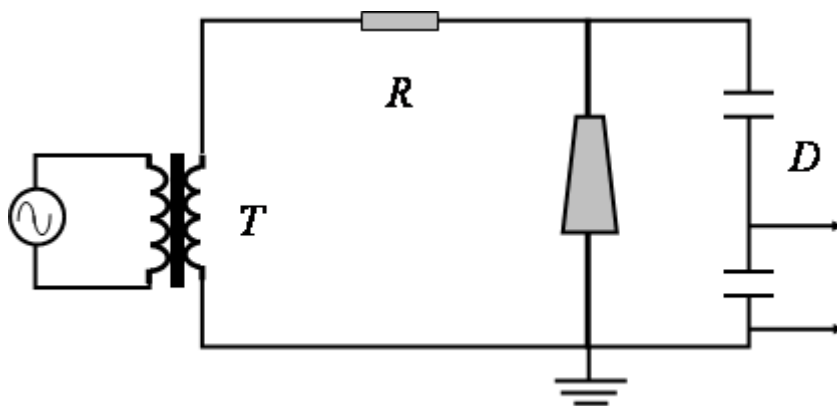


图 1 工频试验变压器原理

图中，T 为试验变压器；R 为保护电阻；D 为测量用分压器

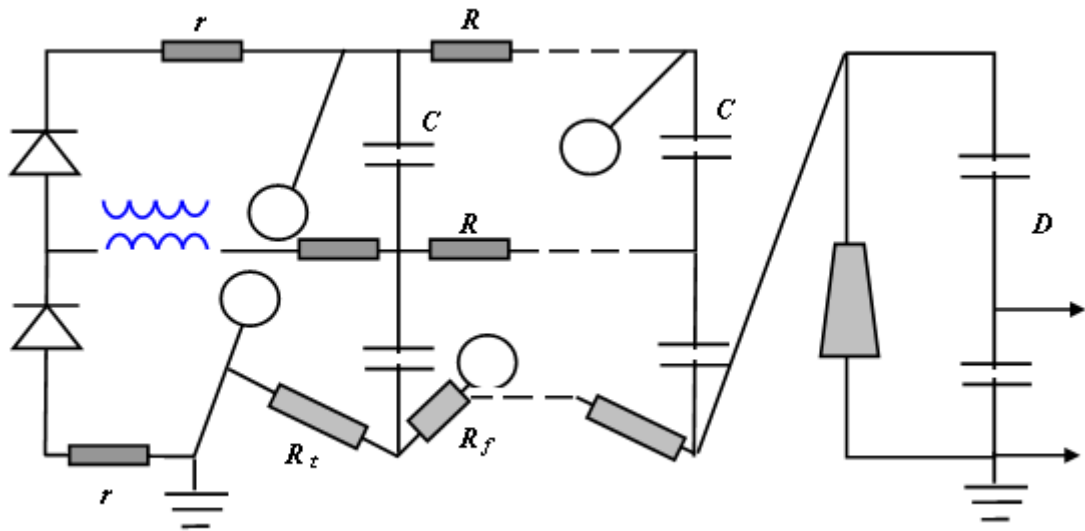


图2 (a) 冲击电压发生器原理

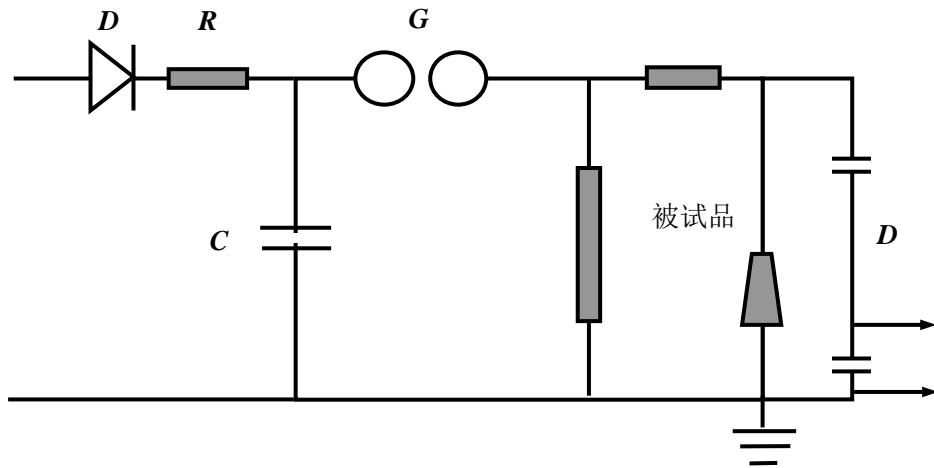


图2 (b) 冲击电压试验原理

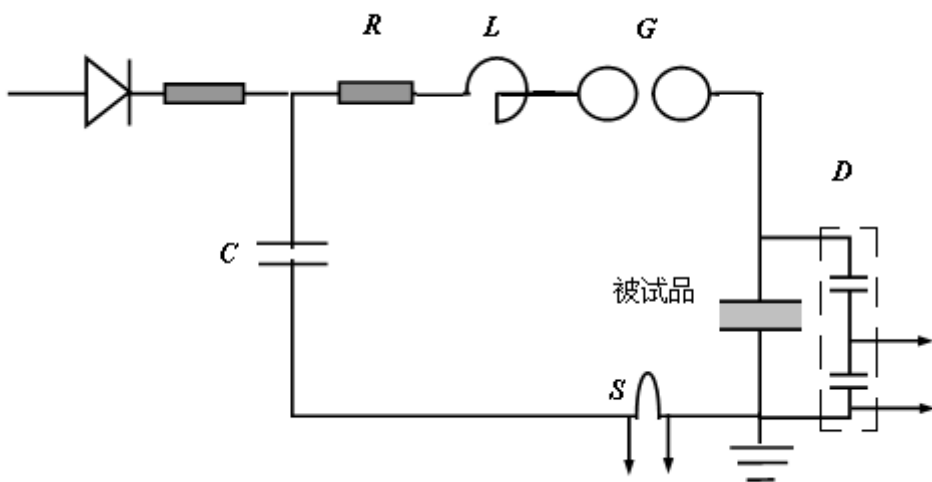


图3 冲击电流试验原理

## 四、实验内容

### 1. 机械试验

(1) 仔细观察真空断路器的铭牌，记录相应参数。

注意事项：尤其注意额定操作电压值及电压种类。

(2) 根据说明书将开关机械特性测试系统的测量线连接到真空断路器。

(3) 将电源柜的输出电压线连接到真空断路器。

(4) 打开开关机械特性测试系统的电源，调整菜单到“等待电动触发”状态。

(5) 打开电源柜电源，根据真空断路器的铭牌选择交流/直流。

(6) 调节电源柜输出电压到实验电压值。

注意事项：每次真空断路器合闸后，储能电机立刻启动进行储能，此时不能调节电压值。

(7) 根据真空断路器的开关状态，按下电源柜上电动合闸/分闸按钮。

(8) 待真空断路器合闸/分闸后，记录开关机械特性测试系统所测特性参数值。

(9) 重复第(6)~(8)步，可分别得到额定操作电压、最高操作电压和最低操作电压下真空断路器的特性参数值。

(10) 试验完成后，关闭电源柜的电源，关闭开关机械特性测试系统的电源，拆除电源线及测试线。

表 1 断路器机械试验记录表

产品名称				产品型号			
生产单位				产品编号			
序号	检测项目	技术要求	检测结果			是否合格	
			第一次	第二次	第三次		
1.1	机械特性试验	见 1.1~1.10	/				
	触头开距	(9-11) mm	A				
			B				
			C				
	触头超行程	(3-4) mm	A				
			B				
			C				
	合闸弹跳	(0-2) ms	A				
			B				
			C				
	分闸反弹	(0-3) ms	额定电压				
			最高电压				
			最低电压				
	合闸时间	(0-0.1) s	额定电压				
			最高电压				
			最低电压				
	分闸时间	(0-0.6) s	额定电压				
			最高电压				
			最低电压				
	合闸速度	(0.9-1.3) m/s	额定电压				
			最高电压				

			最低电压				
	分闸速度	(0.9-1.3) m/s	额定电压				
			最高电压				
			最低电压				
	合闸不同期	(0-2) ms	额定电压				
			最高电压				
			最低电压				
	分闸不同期	(0-2) ms	额定电压				
			最高电压				
			最低电压				
1.2	机械操作 试验	见 2.1~2.3		/			
	额定操作条件 下合分闸操作	应进行 3 次合、分闸， 动作应正确无误。/					
	最高操作电压 下合分闸操作	在 110%U <sub>N</sub> 合闸电压下 合闸 3 次，120% U <sub>N</sub> 分 闸电压下分闸 3 次，动 作应正确无误。					
	最低操作电压 下合分闸操作	在 85%U <sub>N</sub> 合闸电压下合 闸 3 次，65%U <sub>N</sub> 分闸电 压下分闸 3 次，动作应 正确无误。					

## 2. 主回路电阻的测量

- (1) 仔细观察高压开关柜(固定式)的主回路接线图。
- (2) 根据说明书将高压开关柜(固定式)主回路的断路器和所有隔离开关都闭合。
- (3) 将两个电压电流夹头的电流线和电压线分别连接到回路电阻测试仪上。
- (4) 将一个电压电流夹头夹到高压开关柜(固定式)其中一个相线的输入端，将另一个电压电流夹头夹到电流互感器的前端。  
 注意事项：如该相线没有电流互感器，则将另一个电压电流夹头夹到相线的输出端。
- (5) 打开回路电阻测试仪电源开关，测试电流选择 100A，按下测试按钮，等待测试完成后记录所测电阻值，并关闭回路电阻测试仪电源开关。  
 注意事项：如果测试完成后回路电阻测试仪没有显示数据或显示接线不良，请关闭电源，调整两个电压电流夹头所夹的位置后重新测试一次。
- (6) 将一个电压电流夹头夹到高压开关柜(固定式)其中一个相线的输出端，将另一个电压电流夹头夹到电流互感器的后端。
- (7) 打开回路电阻测试仪电源开关，测试电流选择 100A，按下测试按钮，等待测试完成后记录所测电阻值，并关闭回路电阻测试仪电源开关。
- (8) 重复第(4)~(7)步，可分别测得高压开关柜(固定式)的 A 相、B 相和 C 相的回路电阻值。  
 注意事项：如果相线上有电流互感器则，则回路电阻值为所测的两端电阻值之和。
- (9) 试验完成后，拆除回路电阻测试仪的电压电流夹头。

表 2 主回路电阻测量记录表

序号	检测项目	技术要求	检测结果		是否合格
2	主回路电阻的测量	主回路电阻值≤ $\mu\Omega$	部位	主回路电阻值 ( $\mu\Omega$ )	
			A 相		
			B 相		
			C 相		

3. 主回路工频耐压试验和辅助回路工频耐压试验

- (1) 仔细观察高压开关柜(固定式)的主回路接线图。
- (2) 根据说明书将高压开关柜(固定式)主回路的断路器和所有隔离开关都闭合。
- (3) 将移动式工频电压发生器的高压引线连接到高压开关柜(固定式)的相线输入端 (A 相、B 相、C 相短接)。
- (4) 将接地线连接到高压开关柜(固定式)金属外壳的接地点上。
- (5) 取下移动式工频电压发生器的接地棒。
- (6) 打开移动式工频电压发生器的电源, 选择 60kV 档位, 按下合闸按钮, 操作升压按钮将输出电压升至规定的实验电压值。  
 注意事项: 如果实验过程中有任何意外情况, 必须立刻按下分闸按钮。
- (7) 当输出电压值达到规定的实验电压值后, 打开计时器开关, 倒计时 1 分钟。
- (8) 等计时结束后, 移动式工频电压发生器会自动降压至零位。按下分闸按钮, 关闭电源, 在高压输出端挂好接地棒。
- (9) 将移动式工频电压发生器的高压引线连接到高压开关柜(固定式)的 B 相相线输入端。
- (10) 将接地线连接到高压开关柜(固定式)的 A 相、C 相相线输入端和金属外壳的接地点上。
- (11) 重复第(5)~(8)步, 可完成相间工频耐压试验。
- (12) 根据说明书将高压开关柜(固定式)主回路的断路器断开。
- (13) 将接地线连接到高压开关柜(固定式)的相线输出端 (A 相、B 相、C 相短接)。
- (14) 重复第(3)~(8)步, 可完成断路器断口工频耐压试验。
- (15) 根据说明书将高压开关柜(固定式)需检测的辅助回路触点短接。
- (16) 将移动式工频电压发生器的高压引线连接到高压开关柜(固定式)的辅助回路触点。
- (17) 重复第(4)~(8)步, 其中第(6)步中, 选择 2kV 档位, 可完成辅助回路工频耐压试验。

表 3 主回路电阻测量记录表

序号	检测项目	技术要求	检测结果		是否合格
3.1	主回路工频耐压试验	在相地、相间和断口间施加工频电压 kV, 耐压 1min, 应无击穿或闪络现象。	部位	电压值 (kV)	
			相地		
			相间		
			断口		

3.2	辅助回路工频耐压试验	应能承受工频 kV，耐压 1min 无击穿或闪络现象。		
-----	------------	-----------------------------	--	--

#### 4. 主回路雷电冲击耐压试验

- (1) 仔细观察金属铠装抽出式开关设备（中置柜）的主回路接线图。
- (2) 根据说明书将金属铠装抽出式开关设备（中置柜）的断路器闭合。
- (3) 将冲击电压发生器的高压引线连接到金属铠装抽出式开关设备（中置柜）的相线输入端（A 相、B 相、C 相短接）。
- (4) 将接地线连接到金属铠装抽出式开关设备（中置柜）金属外壳的接地点上。
- (5) 取下冲击电压发生器的接地棒。
- (6) 打开冲击电压发生器的电源，按下合闸按钮，操作升压按钮将输出电压升至规定值后按下触发按钮。按下触发按钮后，输出电压会降低，之后会自动升压，每当输出电压升至规定值都要立即按下触发按钮。

注意事项：如果实验过程中有任何意外情况，必须立刻按下分闸按钮。

- (7) 观察数字示波器上的波形，记录是否放电，记录电压峰值及极性。
- (8) 记录 15 个冲击电压波形的数据后，按下分闸按钮，等调压器归零后关闭冲击电压发生器的电源，在高压输出端挂上接地棒。
- (9) 转换冲击电压发生器输出电压的极性。
- (10) 重复第(5)~(8)步，可完成另外一个极性的雷电冲击耐压试验。
- (11) 将冲击电压发生器的高压引线连接到高压开关柜(固定式)的 B 相相线输入端。
- (12) 将接地线连接到金属铠装抽出式开关设备（中置柜）的 A 相、C 相相线输入端和金属外壳的接地点上。
- (13) 重复第(5)~(10)步，可完成相间的雷电冲击耐压试验。
- (14) 根据说明书将金属铠装抽出式开关设备（中置柜）主回路的断路器断开。
- (15) 将接地线连接到金属铠装抽出式开关设备（中置柜）的相线输出端（A 相、B 相、C 相短接）。
- (16) 重复第(3)~(10)步，可完成断路器断口的雷电冲击耐压试验。

表 4 雷电冲击耐压试验记录表

序号	雷电冲击耐压试				
	试验电压 kV，波形： / μs				
	相地	相间		断口	
1					
2					
3					
4					
5					
6					



7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
结论						

### 5. 氧化锌电阻片的 8/20 $\mu$ s 冲击电流试验

- (1) 仔细观察冲击电流发生器的回路。
- (2) 将氧化锌电阻片接入试验回路。
- (3) 取下冲击电压发生器的接地棒。
- (4) 打开冲击电流发生器的电源，按下合闸按钮，调节充电按钮充电至规定值后，按下触发按钮。

注意事项：如果实验过程中有任何意外情况，必须立刻按下分闸按钮。

- (5) 按下分闸按钮，关闭冲击电流发生器的电源。
- (6) 观察数字示波器上的波形，记录电流波形的峰值，记录残压波形的峰值，并利用数字示波器的测量线测量电流波形的时间参数  $T_1$  和  $T_2$ 。

表 5 氧化锌电阻片冲击电流试验记录表

参 数	实 测 值	误 差
施加冲击电流的幅值	kA	/
施加冲击电流的波头时间	$\mu$ s	
施加冲击电流的波尾时间	$\mu$ s	
测得残压幅值	kV	/

## 五、实验报告要求

- 1、通过分析实验数据和实验结果来评估真空断路器、高压开关柜以及氧化锌电阻片的质量好坏。
- 2、解答实验指导书中的思考题。
- 3、按规定格式编写实验报告。

## 六、思考题

- 1、在做高电压试验时应采取那些安全措施？

- 2、真空断路器动触头的分闸速度是否越快越好？为什么？
- 3、为什么高压开关柜要测量主回路电阻？
- 4、隔离开关、负荷开关和断路器的用途有何不同？
- 5、在氧化锌电阻片的  $8/20\mu\text{s}$  冲击电流试验中，为什么电流波形和残压波形是反相的？

## 七、参考文献

- [1] 国家标准 GB/T 11022-2011，高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求，国家质量技术监督局，北京，2011
- [2] 华中理工大学、上海交通大学合编，高电压试验技术，中国电力出版社，北京，2002
- [3] 国家标准 GB/T 11032-2000，交流无间隙金属氧化物避雷器，国家质量技术监督局，北京，2000 年
- [4] 上海交通大学编，电气工程基础，上海交通大学出版社，上海，2000 年

## 实验二 提前放电避雷针提前放电时间评估实验

### 一、实验目的

1. 了解提前预放电避雷针的接闪放电特性。
2. 通过模拟自然雷击，测量提前预放电避雷针的提前放电时间。

### 二、实验设备

1. 3000kV 冲击电压发生器及其测量系统。
2. DPO3012 数字示波器。

### 三、实验原理

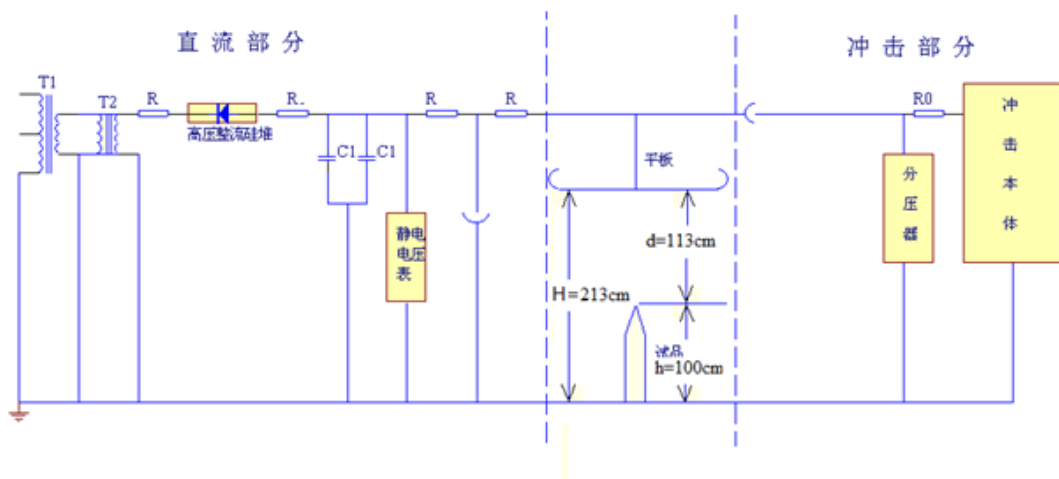


图 1 实验布置图

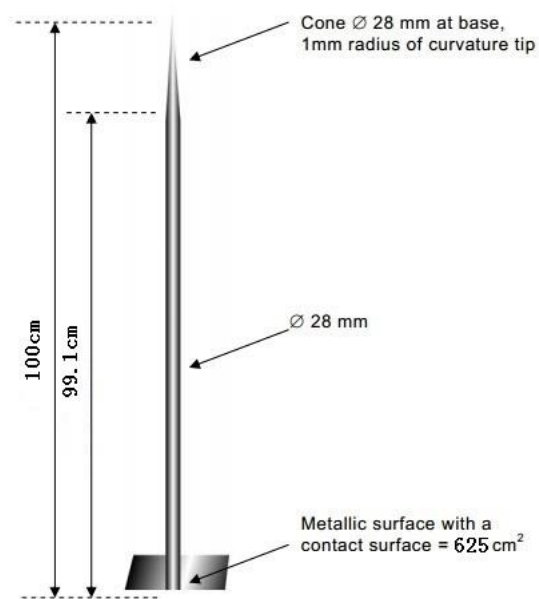


图 2 普通避雷针结构图



图 3 提前预放电避雷针

#### 四、实验内容

1. 对普通避雷针进行 50 次模拟雷击接闪放电试验，测量并记录其放电时间。
  - (1) 根据实验布置图搭建整个试验回路。
  - (2) 调节平板电极水平度使其平行于地面。
  - (3) 调节平板电极垂直地面高度到规定高度。
  - (4) 调节普通避雷针的高度到 1m。
  - (5) 将普通避雷针固定在平板电极中心正下方。
  - (6) 取下冲击电压发生器的接地棒，取下直流电压发生器的接地棒。
  - (7) 打开直流电压发生器的电源，按下合闸按钮，调节输出电压到规定值。
  - (8) 打开冲击电压发生器的电源，极性调整为负极性，按下合闸按钮，调节输出电压到规定值后按下触发按钮。

注意事项：如果实验过程中有任何意外情况，必须立刻按下分闸按钮。

- (9) 观察数字示波器上的波形，记录电压峰值及截断时间。
- (10) 重复第(8)、(9)步，可完成 50 次模拟雷击接闪放电试验。
- (11) 试验完成后，按下冲击电压发生器的分闸按钮并关闭电源；按下直流电压发生器的分闸按钮并关闭电源。等直流电压值降到一定值后，挂上接地棒。

表 1 普通避雷针接闪放电试验数据记录表

普通避雷针接闪放电试验			
样品名称	普通避雷针		
平板电极直径 D (cm)		平板电极高度 H (cm)	

避雷针高度 h (cm)			放电空气间隙 距离 d (cm)			
直流电压 U <sub>直流</sub> (kV)			气象条件	温度 ℃	相对 湿度	气压 kPa
序号 No.	放电峰值 Voltage U (kV)	放电时间 Emission time T (μs)	序号 No.	放电峰值 Voltage U (kV)	放电时间 Emission time T (μs)	
1			26			
2			27			
3			28			
4			29			
5			30			
6			31			
7			32			
8			33			
9			34			
10			35			
11			36			
12			37			
13			38			
14			39			
15			40			
16			41			
17			42			
18			43			
19			44			
20			45			
21			46			
22			47			
23			48			
24			49			
25			50			
放电时间平均值 (μs)			放电时间的标准方差(μs)			

2. 对提前放电避雷针进行 50 次模拟雷击接闪放电试验，测量并记录其放电时间。

- (1) 根据实验布置图搭建整个试验回路。
- (2) 调节平板电极水平度使其平行于地面。
- (3) 调节平板电极垂直地面高度到规定高度。
- (4) 调节提前放电避雷针的高度到 1m。
- (5) 将提前放电避雷针固定在平板电极中心正下方。
- (6) 取下冲击电压发生器的接地棒，取下直流电压发生器的接地棒。

- (7) 打开直流电压发生器的电源，按下合闸按钮，调节输出电压到规定值。
- (8) 打开冲击电压发生器的电源，极性调整为负极性，按下合闸按钮，调节输出电压到规定值后按下触发按钮。
- 注意事项：如果实验过程中有任何意外情况，必须立刻按下分闸按钮。
- (9) 观察数字示波器上的波形，记录电压峰值及截断时间。
- (10) 重复第(8)、(9)步，可完成 50 次模拟雷击接闪放电试验。
- (11) 试验完成后，按下冲击电压发生器的分闸按钮并关闭电源；按下直流电压发生器的分闸按钮并关闭电源。等直流电压值降到一定值后，挂上接地棒。

表 2 提前放电避雷针接闪放电试验数据记录表

提前放电避雷针接闪放电试验						
样品名称	提前放电避雷针					
平板电极直径 D (cm)			平板电极高度 H (cm)			
避雷针高度 h (cm)			放电空气间隙 距离 d (cm)			
直流电压 U <sub>直流</sub> (kV)			气象条件	温度 ℃	相对 湿度	气压 kPa
序号 No.	放电峰值 Voltage U (kV)	放电时间 Emission time T (μs)	序号 No.	放电峰值 Voltage U (kV)	放电时间 Emission time T (μs)	
1			26			
2			27			
3			28			
4			29			
5			30			
6			31			
7			32			
8			33			
9			34			
10			35			
11			36			
12			37			
13			38			
14			39			
15			40			
16			41			
17			42			
18			43			
19			44			
20			45			
21			46			

22			47		
23			48		
24			49		
25			50		
放电时间平均值 ( $\mu s$ )			放电时间的标准方差 ( $\mu s$ )		

## 五、实验报告要求

1、根据上述两个实验的实验数据，对提前预放电避雷针的放电时间和普通避雷针的放电时间进行统计分析，并画出两种避雷针的放电时间分布图。

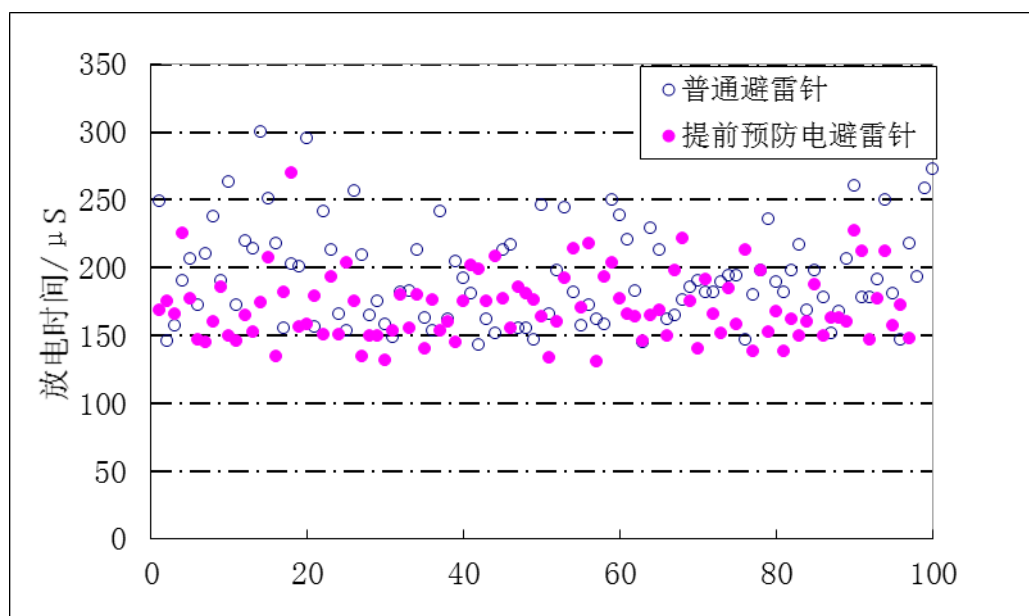


图 4 两种避雷针的放电时间点散分布图 (样图) 请同学们根据自己所测实验数据作图

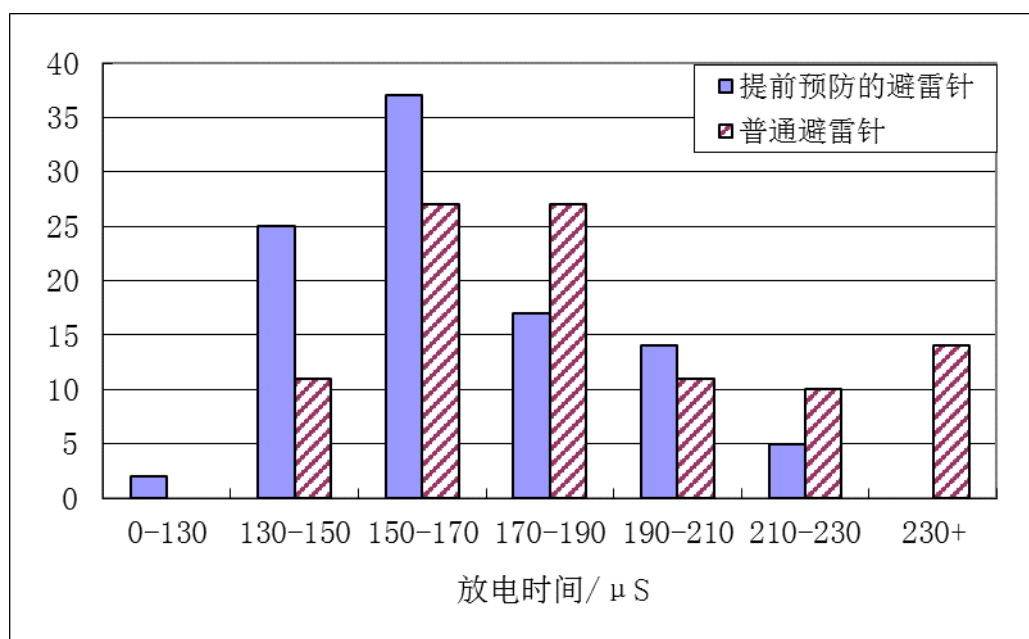


图 5 两种避雷针的放电时间柱状分布图 (样图) 请同学们根据自己所测实验数据作图

- 2、解答实验指导书中的思考题。
- 3、按规定格式编写实验报告。

## 六、思考题

- 1、法国发布的关于提前放电避雷的标准编号及名称是什么？
- 2、根据上述法国标准，提前预防电避雷针的提前时间应折算到规定波形下，该规定波形的波头时间为多少？折算后的提前时间最大限值为多少？



## 实验三 绝缘电阻和泄漏电流测量实验

### 一、实验的意义

绝缘是电气设备中用于分割不同电位导体，实现电能变换与传输的部件，当电气设备在长期工作过程中，可能受到电场应力、热应力、化学应力以及环境应力等的作用而发生绝缘的老化过程，导致丧失承受工作电场或者过电压电场等的的能力。另外电气设备在运行过程中，绝缘吸收或吸附周围环境中的水分，或者由于绝缘在长期老化过程中绝缘材料劣化过程中由化学反应而产生水分子，这些过程都可能是电气设备的绝缘体内。此外电气设备在运行过程中，环境中的污秽等可能沉积在绝缘表面，与环境中的水分共同作用而导致绝缘表面的绝缘性能丧失。上述过程中，通过绝缘电阻或者泄漏电流的测量，能够在一定程度上反映绝缘的老化和受潮或者表面污秽程度，因此绝缘电阻或者泄漏电流在评估电气设备的绝缘状况是具有非常重要的意义。

电气设备在设计开发以及生产制造过程中，绝缘电阻也是电气设备绝缘材料选择恰当与否，以及生产工艺控制严格与否的一个评判依据。由于绝缘电阻与被测试品的尺寸参数密切相关，为了能够比较绝缘材料的性能，一般将绝缘材料制成特定规格的样品，用于测量绝缘电阻和表面电阻，并且根据试品的尺寸规格计算绝缘材料的体积电阻率和表面电阻率。

电气设备在生产制造、运输安装以及长期运行中，可能在绝缘中产生微孔和杂质等缺陷，当为电气设备施加一个较高直流电场时测量流过电气设备绝缘中的电流，此电流即为泄漏电流，在测量泄漏电流的过程中，哪些潜在的微孔和杂质在较高直流电场下可能发生微弱放电，从而产生脉冲电流，并叠加在泄漏电流上；或者由于电气设备的受潮和劣化，而导致泄漏电流随时间的变化与绝缘良好是有很大的差异。通过这些差异性可以判断电气设备中是否存在潜在放电缺陷，或者是否受潮等状况，因此泄漏电流是电气设备运行中绝缘状态评估的一个重要参数。

### 二、基本定义

#### (1) 绝缘电阻（绝缘电阻率）

为绝缘材料或者电力设备的绝缘施加直流电压，记录加压 60s 时的直流电流，用电压除以 60s 时的电流所得的电阻值即为绝缘电阻，用公式 1-1 表示如下：

$$R = U / I_{60s} \quad (1-1)$$

#### (2) 泄漏电流

为绝缘材料或者电力设备的绝缘施加直流电压，记录电流随时间变化的过程，为了使绝缘材料或电气设备的绝缘的缺陷能够在泄漏电流中表现出来，一般施加的直流电压（电场）比测量绝缘电阻时的要高。

#### (3) 极化比（弱点比）

在工程上，绝缘电阻和极化比能反映发电机、油浸式电力变压器等设备绝缘的受潮程度。采用较长时间的绝缘电阻比值，即 10min 时的绝缘电阻（ $R_{10min}$ ）和 1min 时的绝缘电阻（ $R_{1min}$ ）的比值来描述绝缘极化的全过程。通常用  $PI$  作为绝缘的极化比，即

$$PI = \frac{R_{10min}}{R_{1min}} \quad (1-2)$$

### 三、测量原理及注意事项

#### ➤ 测量原理

绝缘电阻和泄漏电流的测量原理相同，如图所示为绝缘电阻的测量电路。

三个电流加起来，即  $i=i_1+i_2+i_3$ ，可得到在直流电压作用下流过绝缘介质的总电流  $i$  随时间变化的曲线，通常称为吸收曲线，如图 1-1(c)所示。从吸收曲线可以看出，电容电流  $i_1$  和吸收电流  $i_2$  经过一段时间后趋近于零，因此总电流  $i$  趋近于  $i_3$  泄露电流。

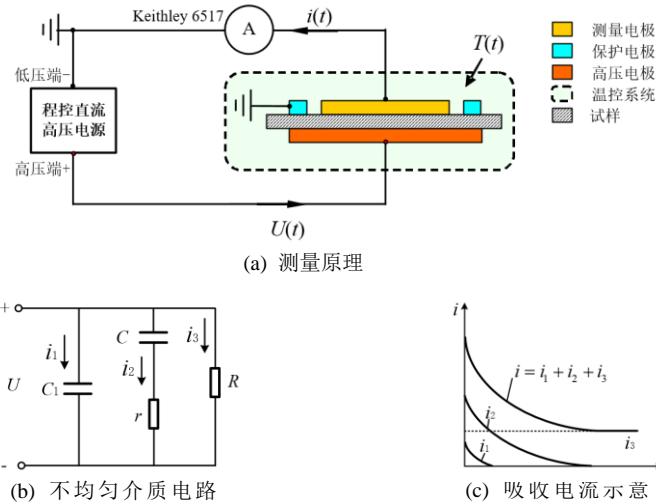


图 1-1 直流电压下介质中电流构成示意图

#### ➤ 注意事项

- (1) 所加直流电压等级应与被测试样的耐压水平相适应，以避免被测试样发生绝缘击穿；
- (2) 开机时，必须先将 Keithley 电流表、高压源和电导测试仪的通讯线接到 USB 集线器上，后接到电脑 USB 2.0 端口，否则软件打开运行时无法控制设备；
- (3) Keithley 电流表、高压源和电导测试仪必须可靠接地；
- (4) 开始测量前，必须选定测试电极  $\Phi 10\text{mm}$  型或  $\Phi 20\text{mm}$  型，否则将显示错误的分析参数；
- (5) 放置的样品，必须满足试样的最小尺寸要求，否则高场时会发生沿面放电，影响测试和设备安全；
- (6) Keithley 电流表在加压测量过程中，电流量程必须遵守先大再小、逐渐缩小的原则，否则将出现烧表，破坏表内部结构；
- (7) 更换样品时，必须先拔出高压源高压端，以防高压源内高压电到操作者；
- (8) 对同一试样进行不同电场下的测试，应遵循先低压后高压的原则，并且开始测试前均应先短路放电，以减小前一次加压时的历史极化影响。

### 四、实验仪器

#### (1) 直流电导测试仪

##### ➤ 结构说明

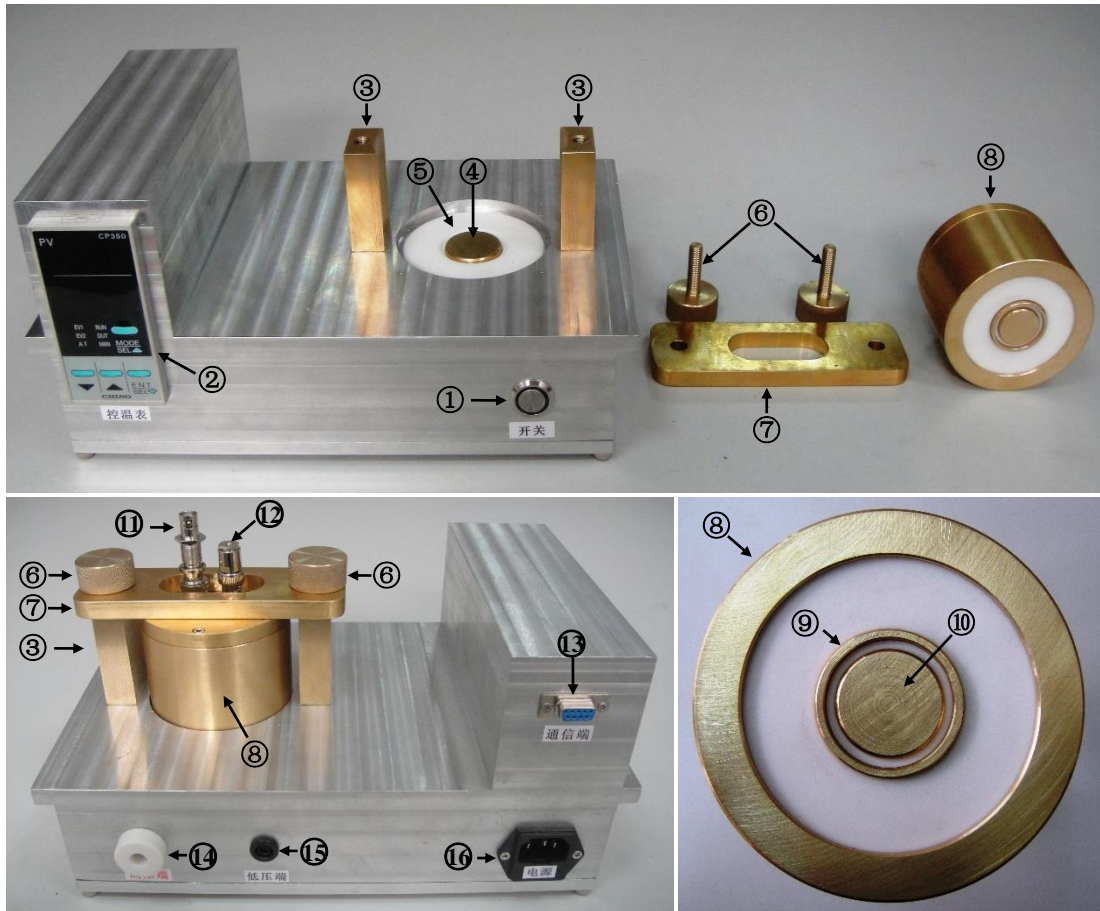


图 1-2 电导测试仪

- ①. 开关：测试仪温度控制系统开关
- ②. 温控仪：控制试样温度，其中 SV 为设定温度，PV 为实际温度，温控仪为电脑控制，严禁手动操作
- ③. 电极支柱：支撑上电极
- ④. 高压电极：测量电极之一，连接直流电源输出的高压端
- ⑤. 试样槽：待测试样放置处
- ⑥. 固定旋钮：固定上电极
- ⑦. 固定压片：固定上电极
- ⑧. 上电极：包含保护电极⑩和测量电极⑨
- ⑨. 保护电极：消除高压测量时试样表面的沿面电流干扰
- ⑩. 测量电极：和 Keithley 电流表相连
- ⑪. 电流 BNC 端：与测量电极相连
- ⑫. 短路帽：与保护电极相连，使其直接与测试仪金属箱体相连接
- ⑬. 通信端：通过 RS485-USB 通讯线与电脑相连，实现自动控温
- ⑭. 高压端：根据电压等级与 NI-10kV 电源或 KE-1kV 电极的高压端相连，从而使高压电极④带直流电压
- ⑮. 低压端：根据电压等级与 NI-10kV 电源或 KE-1kV 电极的高压端相连，从而使高压电源和电流表电流测量的低端相连
- ⑯. 电源插座：接 ~ 220VAC

### ➤ 参数说明

测试类型：体积电阻率和体积电导率

电极结构：三电极系统，参照 GB/T 1410 和 IEC60093

电极参数：二套独立电极，高压极、测量极、保护极各为

Φ10mm 型：Φ18mm、Φ10mm、Φ14 内-18 外 mm

Φ20mm 型：Φ28mm、Φ20mm、Φ24 内-28 外 mm

试样要求：最小尺寸为

Φ10mm 型：Φ38mm

Φ20mm 型：Φ48mm

电极耐压：直流 10kV

测试温度：室温—90℃，稳定时间 10min,控温精度±2℃

### (2) 高压电源：

#### ➤ 结构说明



图 1-3 高压直流电源

- ①. 电源开关：高压直流源系统开关
- ②. 高压开关：控制高压电源开关
- ③. 短路放电指示：试样测试回路放电时，指示灯亮
- ④. 极化电流指示：试样测试回路加压时，指示灯亮
- ⑤. 紧急开关：加压过程中，出现紧急情况时，用于中断高压直流输出
- ⑥. 高压端：直流电源 NI-10kV 输出的高压端
- ⑦. 低压端：直流电源 NI-10kV 输出的低压端

- ⑧. 接地端：必须和地相连，以保证高压安全输出和人身安全
- ⑨. 风扇：设备降温用
- ⑩. 通讯端：USB 端口，通过通讯线与电脑相连，实现高压输出自动控制
- ⑪. 计算电源：计算电源的备用端口
- ⑫. 电源插座：接 ~ 220VAC

➤ 参数说明

KE-1kV 型：5mV-1000V，步进 5mV

NI-10kV 型：1000V-10000V，连续可调

(3) 静电计电流表：型号 Keithley 6517B

➤ 结构说明



图 1-4 Keithley 电流表

- ①. 电源开关：电流表系统开关
- ②. 高压指示灯：KE-1kV 高压输出时亮
- ③. 电流输入端：测量时需采用 TRX-BNC 转接头和测试回路相连接
- ④. COMMON 端：电流测量公共端，为保证测量精度，必须接地
- ⑤. 低压端：直流电源 KE-1kV 输出的低压端
- ⑥. 高压端：直流电源 KE-1kV 输出的高压端
- ⑦. 闭锁端：此端为高压输出的闭锁保护，不加时无高压输出
- ⑧. GPIB 通讯端：通过 KUSB-488B 模块与电脑通讯，实现控制和电流采集
- ⑨. 电源插座：接 ~ 220VAC

➤ 参数说明

电阻测量可达 1016Ω

电流测量范围 1fA-20mA

最小电流量程输入压降 $<20\mu\text{V}$

200T $\Omega$  输入阻抗

$<3\text{fA}$  偏置电流

高达 425rdgs/s

噪声 0.75fA p-p

(4) 附件：电源线和信号传输线若干。

#### KUSB-488B 通讯模块



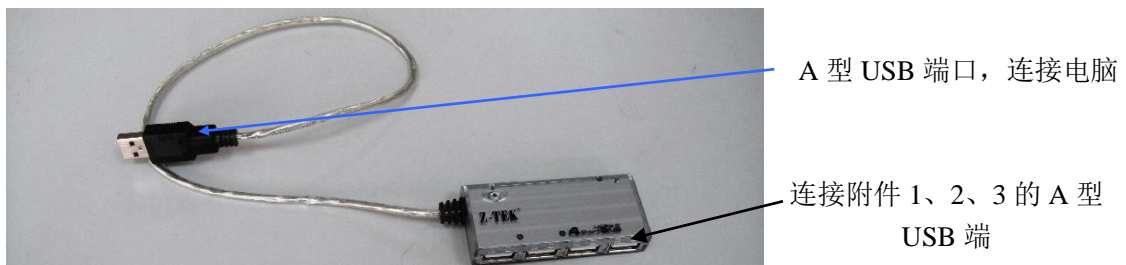
#### RS485-USB 通讯模块



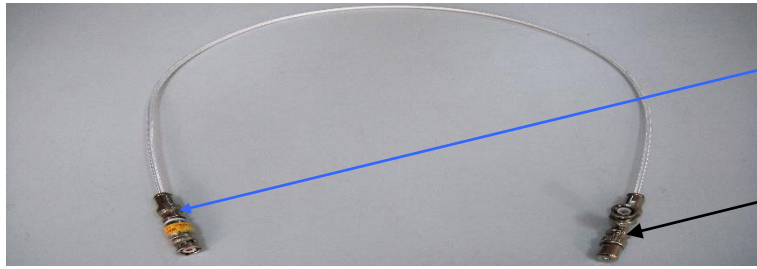
#### USB 通讯线



#### USB 集线器



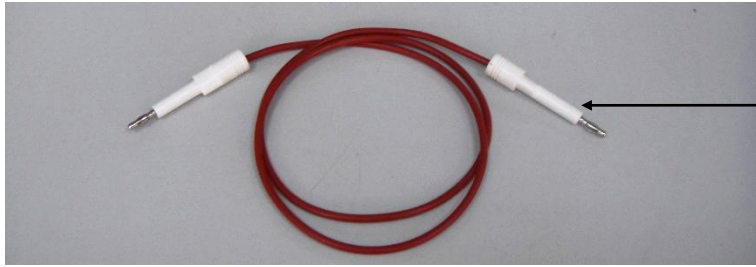
#### 电流测量套件



TRX-BNC 转换器, 连接  
Keithley 表电流测量端

电流保护器, 连接上电极电  
流测量端

高压导线



一端接高压源高压端, 一端  
接电导测试仪高压端

低压导线



一端接高压源低压端, 一端  
接电导测试仪低压端

接地线



连接直流高压源和 Keithley 电  
流表的 COMMON 端

(5) 系统软件: High Field Conduction Measurement System V2.0, 其有如下特点

- 设置简便, 一键运行
- 直流高压、温度实时控制
- 微电流自动采集
- 测量结果自动保存

## 五、样品准备

- 环氧样片 (浸水/未浸水处理)
- 聚乙烯样片 (浸水/未浸水处理)

## 六、实验步骤

### ➤ 开机准备

- ①. 高压电源通讯：用通讯线将 NI-10kV 型电源的 USB 通讯端与 USB 集线器相连；
- ②. Keithley 表通讯：用 KUSB-488B 通讯模块将 Keithley 表 GPIB 端与 USB 集线器相连；
- ③. 电导测试仪通讯：用 RS485-USB 通讯模块将电导测试仪的 RS485 端与 USB 集线器相连；
- ④. USB 集线器连接：将 USB 集线器与电脑 USB 2.0 端相连；
- ⑤. 软件运行：运行软件 C:\Program Files\HFC\HFC Measurement System V2.0。如果上述连接没完成，或者连接不可靠，软件打开后会有相应的报警提示，之后软件自动关闭！

### ➤ 测试准备

- ①. 电极选型：选定测量所需的电极类型（ $\Phi 10\text{mm}$  型或  $\Phi 20\text{mm}$  型），并将电极清洗干净，或用极性液体清理，则需要短路静置一小时，以消除表面极化效应；
- ②. 试样裁剪：按试样最小尺寸要求裁剪，其中  $\Phi 10\text{mm}$  型电极所需试样最小尺寸为  $\Phi 38\text{mm}$ ， $\Phi 20\text{mm}$  型电极所需最小尺寸为  $\Phi 48\text{mm}$ ；
- ③. 厚度测量：用测厚仪测量试样厚度，并输入软件参数设置项中。
- ④. 试样放置：先将试样放置在高压电极上，注意试样边沿离高压电极边沿的距离应足够大，以防高压时发生沿面放电；之后盖好上电极，并安放固定压片，用固定旋钮固定。

### ➤ 系统接线

- ①. 电流测量回路：上电极接好短路帽，并用电流测量套件与 Keithley 电流测量端连接；
- ②. 高压电源回路：根据测试电场选择直流高压电源，并将电源高压端和低压端与电导测试仪相对应端连接。

### ➤ 软件运行

- ①. 文件设置：选择保存路径和文件名；
- ②. 设备设置：选择电极系统项（ $\Phi 10\text{mm}$  型或  $\Phi 20\text{mm}$  型），此项运行后不能更改，若设置错误，将显示错误的分析参数；选择高压电源项，其中 KE-1kV 型电源输出 5mV-1000V，NI-10kV 型电源 1000V-10000V；选择电流量程，必须遵守先大再小，逐渐缩小的原则；
- ③. 参数设置：设置测量电场、厚度、测试温度、稳温时间、极化时间和短路时间；
- ④. 开始测量：点击该键后，步进键变为“测试 or 中止？”，电导测试仪开始升温，达到设置温度后进入稳温状态，稳温时间完成后弹出图 1-5（a）提示，确认后再点击“测试 or 中止？”，则弹出图 1-5（b）提示。确认开始加压测量，则点击“测量”，若要退出，则点击“中止”；
- ⑤. “测量”：点击后系统开始加压极化和电流测量，在升压过程中步进键变为“测量 or 降压？”，电场达到设定值后步进键变为“结束极化？”，测量示例如图 1-6 所示；设定的极化时间完成后，步进键变为“结束短路？”，并开始短路放电，完成设置的短路时间后，测量数据自动保存，见图 1-7，系统弹出图 1-5（c）提示，显示测试结束，确认后再弹出图 1-5（c）提示，询问是否保持温度，可根据测试需要选择。另外，点击步进键可实现降压、中止短路等功能，可根据实测情况点击；
- ⑥. “中止”：系统恢复到等测状态，步进键变为“...”。





图 1-5 提示框界面

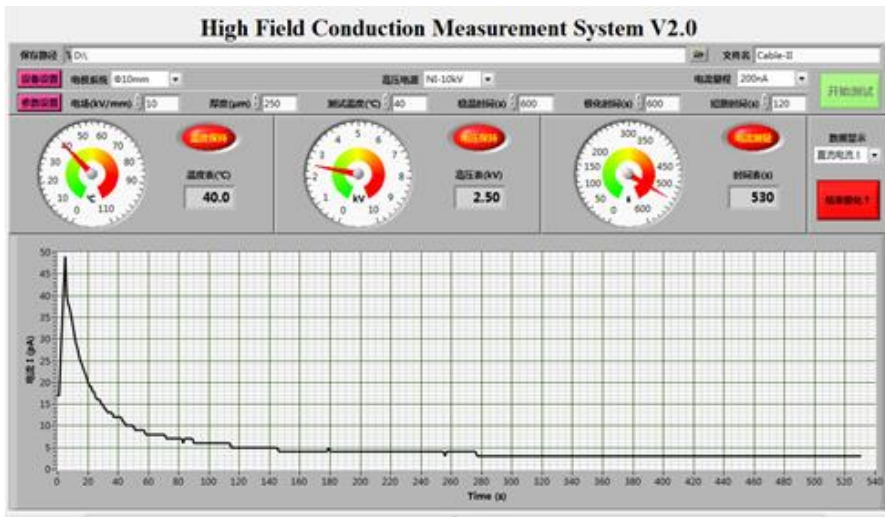


图 1-6 测试界面

CT-30C-20KV-mm.txt - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

### 高场电导测试

测试开始时间: 13:38:53, 2013/7/2  
 结束时间: 13:51:09, 2013/7/2

测试项目: 极化测试  
 接线类型: 体积 电极系统:  $\Phi 10\text{mm}$   
 高压电源: NI-10kV  
 电流表: Keithley 6517B 量程:  $\pm 20\text{nA}$

测试参数:  
 极化电场 (kV/mm), 20      样品厚度 ( $\mu\text{m}$ ), 300      测试温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 30  
 极化时间 (s), 600      短路时间 (s), 120      采样间隔 (s), 1.0

测试数据: 时间 t (s)	极化电流 I (pA)	电流密度 J (A/m <sup>2</sup> )	U/I (G $\Omega$ )	电阻率 $\rho$ ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	电导率 $\sigma$ (S/m)
0.0000E+0	2.23420E+1	1.68324E-7	2.68553E+5	1.18819E+14	8.41619E-15
1.0000E+0	2.23420E+1	1.68324E-7	2.68553E+5	1.18819E+14	8.41619E-15
2.0000E+0	4.15980E+1	3.13398E-7	1.44238E+5	6.38167E+13	1.56699E-14
3.0000E+0	5.14980E+1	3.87984E-7	1.18509E+5	5.15485E+13	1.93992E-14
4.0000E+0	5.88120E+1	4.43087E-7	1.02020E+5	4.51378E+13	2.21544E-14
5.0000E+0	6.49380E+1	4.89240E-7	9.23958E+4	4.08797E+13	2.44620E-14
6.0000E+0	4.82530E+1	3.63536E-7	1.24345E+5	5.50151E+13	1.81768E-14
7.0000E+0	3.43810E+1	2.59025E-7	1.74515E+5	7.72126E+13	1.29513E-14
8.0000E+0	3.21390E+1	2.42134E-7	1.86689E+5	8.25989E+13	1.21067E-14
9.0000E+0	2.76220E+1	2.08103E-7	2.17218E+5	9.61062E+13	1.04052E-14
1.0000E+1	2.5800E+1	1.94376E-7	2.32558E+5	1.02893E+14	9.71881E-15
1.1000E+1	2.43360E+1	1.83346E-7	2.46548E+5	1.09083E+14	9.18732E-15
1.2000E+1	2.28930E+1	1.72475E-7	2.62089E+5	1.15983E+14	8.62375E-15
1.3000E+1	2.11960E+1	1.59690E-7	2.83072E+5	1.25243E+14	7.98449E-15

图 1-7 测量数据

## 七、思考与提升

- (1) 测试环境对试样的绝缘电阻率有何影响？为什么？
- (2) 样片厚度对试样的绝缘电阻率有何影响？为什么？

## 八、实验报告

请从实验目的、实验原理、注意事项、实验步骤、实验结果及思考解答六个方面撰写详尽的实验报告。

## 实验四 介电常数和介电损耗角正切测量实验

### 一、实验目的

1. 了解介电常数和介质损耗角正切值对于描述电介质介电性能的意义；
2. 了解影响电介质介电常数与介质损耗角正切值的因素与原理；
3. 通过综合实验学习把介电常数和介电损耗角正切值综合应用到一个产品的质量的综合判断。通过锻炼增强实际运用课堂所学知识的能力。

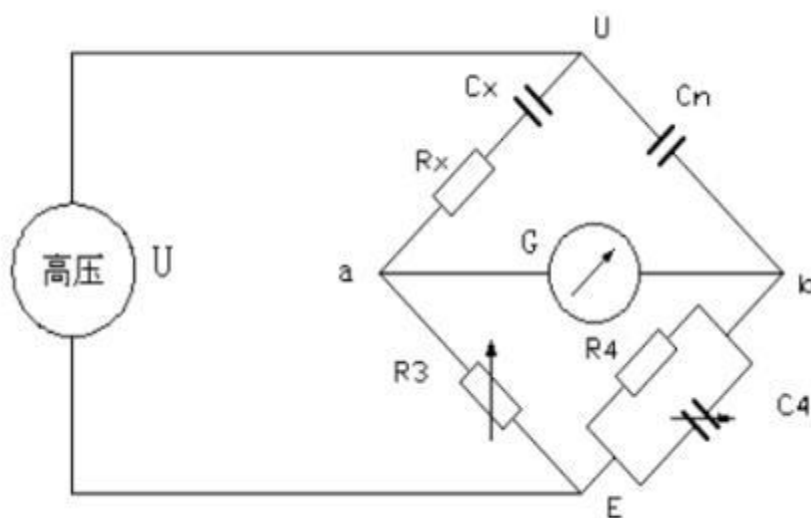
### 二、实验内容

1. 干燥聚乙烯试样的介电常数和介质损耗角正切值测量。
2. 浸泡过水聚乙烯试样的介电常数和介质损耗角正切值测量。
3. 干燥聚四氟乙烯试样的介电常数和介质损耗角正切值测量。
4. 浸泡过水聚四氟乙烯试样的介电常数和介质损耗角正切值测量。

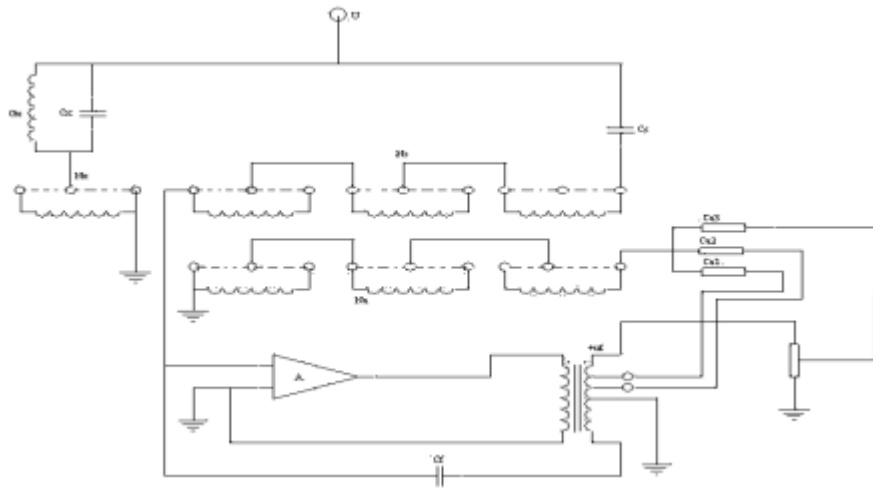
### 三、实验主要仪器设备

1. 高精度高压电容电桥
2. RY2 固体电极
3. 高压电源及测温控温仪
4. 聚乙烯样片
5. 聚四氟乙烯样片

### 四、实验示意图



(a) 电桥原理图



(b) 测量电容的原理图

## 五、实验数据记录

在本测量系统中,真空介电常数  $\epsilon_0=0.08854\text{PF/cm}$ ,  $C_0=\epsilon_0 \cdot A/h$ , 式中 A 为有效面积, 其直径大小为 50mm, h 为有效距离, 即为试样材料厚度。

样品测试量	数值
试样厚度	
试样介质损耗角正切值	
试样电容量	

计算试样的介电常数值:

## 六、思考与提升

- 1.试样的介电常数与什么因素有关? 请具体阐述。
- 2.试样的介质损耗角正切值与什么因素有关? 请具体阐述。
- 3.浸泡过水试样与干燥试样的介电常数与介质损耗角正切值存在较大差异, 请造成差异的分析原因。

## 实验五 固体绝缘空间电荷测量实验

### 一、实验的意义

固体绝缘在电场作用下,载流子在传导过程中,可能受绝缘中缺陷的捕获,而在一定时间内束缚于一定的物理位置上。当在固体绝缘中形成空间电荷时,空间电荷对电力设备的运行具有以下几个方面的作用:(1)空间电荷建立的电场将该改变电力设备中的电场分布,增强了某些区域的电场,同时也削弱了某些区域的电场,当某些区域电场增加较大时,可能导致这些区域发生局部放电,甚至会引起瞬时的击穿,因此空间电荷的存在对于电力设备的运行具有负面的影响;(2)空间电荷在微观层面的极化增加了局部区域的能量储存,可能加速绝缘的老化;(3)空间电荷的存在会引起局部区域的机械形变,如果形变严重,有可能引发电机机械击穿;(4)对一些利用电荷建立的电场作为传感器感知参数的材料中,可以定制空间电荷在材料中的分布和驻留特性,形成新型传感器材料。总之空间电荷对于电气设备的绝缘可能负面的影响多于正面的效应,但是对一些传感器的敏感元件,空间电荷具有调控方便的特点,此时又具有正面的效应,因此空间电荷不管是对于电气设备还是传感器材料都非常重要,定量检测空间电荷是提高电力设备可靠性,有效利用其正面效应制备新型传感器的必要手段。固体绝缘中的空间电荷的来源以及形成空间电荷的机制比较复杂。从电气设备绝缘中空间电荷的来源来说,大致可以分为两类:(1)在高电场下,通过电极向绝缘中注入的电子或者空穴,被缺陷捕获形成空间电荷;(2)绝缘中的杂质在热的作用下发生解离,形成离子,同时离子又可能与周围的电子或者空穴发生复合,恢复到中性状态,但是当存在电场作用时,将会导致杂质解离的几率大于复合的几率,并且在电场作用下,这些离子发生迁移,在迁移过程中,部分离子也可能被附近的缺陷捕获,形成空间电荷。固体绝缘材料形成空间电荷的另外一给必要条件是绝缘中存在宏观或微观的缺陷,宏观缺陷是指绝缘中存在宏观界面,包括微孔以及复合绝缘等,即介电参数不连续的区域,而微观缺陷是指材料中在分子结构层面,存在电荷中心不对称的部分,如极性的端基和测量,以及在固体材料表面向着另外一相(气体或者液体测)延伸出来的悬挂键等。

从上面的分析来看,固体绝缘中的空间电荷不管是来源还是形成机制都非常复杂,但是固体绝缘中的空间电荷对于介质材料的研究和应用至关重要,所以空间电荷的测量与表征技术的研究起步较早且得到了不断发展。目前,用于介质中空间电荷测试的主要方法有三种:热学方法,激光压力波法和电声脉冲法。然而,针对介质内部空间电荷分布的动态响应监测,则主要通过基于电声脉冲法(Pulsed Electro-acoustic, PEA)或压力波法(Pressure Wave Propagation, PWP)的测试系统获得。

PEA测试技术主要由T. Takada和Y. Li等提出并发展,是一种非常可靠并且重复性较高的方法,能直观地监测介质内部空间电荷的动态响应过程。PWP法是由Laurenceau和Lewiner等倡导的,也可监测介质内部空间电荷分布。由于PEA法结构简单,对硬件要件较低,因此,从PEA法提出至今,其测试系统硬件结构和测试方法不断得到改进且日臻成熟。日本学者在PEA法空间电荷测试理论研究、设备研制、信号处理及软件开发方面成果显著,早在上个世纪末已经成功实现了商业化。目前,国外PEA法研究重点主要集中在提高空间分辨率及测试速度、开发三维测试装置和小型化及多功能化等方面。国内PEA法空间电荷测试技术研究始于1990年前后,在理论研究、硬件开发方面取得相当成果。

通过空间电荷的测量,可以获得聚合物内部一些参数的基本信息,如不同电场和温度场下的载流子极性、载流子迁移率和陷阱深度。载流子的极性是空间不同位置净电荷的极性,并且对电场梯度非常敏感,而这些信息用基于空间信息平均值的外部电流法和表面电位法等

全域技术是无法获得的。通过与其它测试技术的结合，如松弛电流、电致发光测试，可获得介质内部电荷迁移、复合的详细信息，从而有效地研究介质内部电荷的输运机理。

## 二、基本定义

### (1) 空间电荷

在 pn 结中，电子和空穴带有相反极性的电荷，它们在扩散过程中会产生复合，结果使 P 区和 N 区中原来的电中性被破坏。空间电荷区指载流子浓度超过原载流子浓度的区域，空间电荷指载流子浓度超过原载流子浓度。

### (2) 同极性电荷

电荷间所带极性相同的电荷，或电荷所带极性与此处电极电压极性相同的电荷。

### (3) 异极性电荷

电荷间所带极性相反的电荷，或电荷所带极性与此处电极电压极性相反的电荷。

### (4) 电声脉冲法

声波由脉冲电压作用下的样品中的空间电荷产生，并由贴在检测电极上的压电传感器测得。

### (5) 电荷密度

从宏观效果来看，带电体的电荷可以认为是连续分布的。电荷分布的疏密程度可以用电荷密度来度量。电荷密度又可以分类为线电荷密度、面电荷密度和体电荷密度，分别表示单位长度、单位面积和单位体积的电荷量。

## 三、测量原理及注意事项

### ◆ 测试原理

被测试样施加一个重复的电脉冲，该脉冲电场与被测试样电极界面以及内部的空间电荷发生作用，产生超声频率范围的机械振动，被超声传感器所接收，经过阻抗匹配电路模块、前置放大器以及其他信号调理和放大电路后，由示波器采集和显示。这些数据经过数字信号滤波模块、信号衰减恢复模块、色散恢复模块以及反卷积模块等的处理后，得到真实的空间电荷分布。

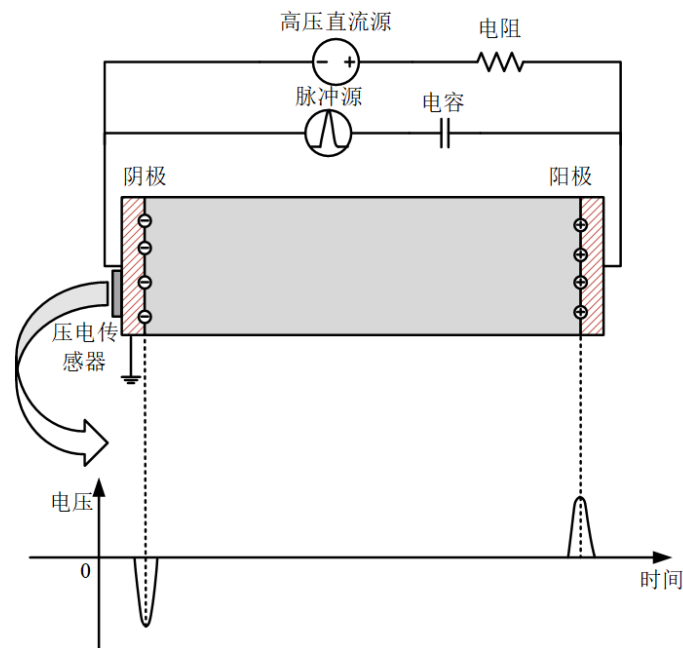


图 3-1 电声脉冲法空间电荷测试原理示意图

## ◆ 注意事项

- ①. 开机时，必须先开示波器后开测试仪；关机时，必须先关测试仪后关示波器，否则容易使仪器内部器件烧损；
- ②. 高压电源和脉冲源必须可靠接地；
- ③. 放置样品时，必须注意将试样、半导体电极和上电极对中；
- ④. 更换样品时，必须先用短路棒对高压电极短路 1 分钟，以免发生触电事故；
- ⑤. 接线时，必须将直流高压经过限流电阻接到测试仪的高压电极上，防止试样击穿时电流过大损坏仪器；
- ⑥. 刚开始为了计算参数加压时，不能将脉冲电压和直流电压加得过高，以免引起电荷注入；
- ⑦. 同一片试样的测量过程中，脉冲电压的幅值和频率应保持不变；
- ⑧. 加压测试过程中，要警惕试样击穿。如果试样击穿，软件会发出提示音，此时应立即将高压源和脉冲源输出降到 0，并关闭测试系统。用接地棒对高压电极放电后，放置一片新的样品重新测试；
- ⑨. 测量短路波形时，从降压到开始测试的时间应尽可能快，以便采集到短路刚开始时的电荷变化；
- ⑩. 对同一试样的一组波形进行恢复时，遵循先加压波形后短路波形，从低压到高压的原则。

## 四、实验仪器

### ◆ 硬件部分

#### ◇ 空间电荷测试仪

- ①. 高压电极：耦合激励脉冲，耐压 20 kV；
- ②. 信号耦合和传感模块：提供 3  $\mu\text{s}$  以上的脉冲时延，空间电荷灵敏度 0.2 C/m<sup>3</sup>，空间分辨率 20  $\mu\text{m}$ ；
- ③. 阻抗匹配模块：带宽 >800 MHz；
- ④. 高精度前置放大器：带宽 1 kHz-500 MHz，63 dB；
- ⑤. 相位补偿模块：带宽 500 MHz；
- ⑥. 液体连接头：试样腔体内配有两个液体导通接头，可扩散测量液体介质。

#### ◇ PEA 测试控制器

##### (1) 高压窄脉冲发生器

脉冲输出程序控制，脉冲幅值 0~1 kV，脉冲宽度不大于 10 ns，脉冲频率 50 Hz；

##### (2) 高压直流电源控制器

- ①. 控制直流高压电源输出，输出幅值由程序根据试样厚度和测量电场确定；
- ②. 高压直流电源：-20 kV~+20 kV，1 mA 直流高压；
- ③. 数字示波器：带宽 500 MHz，采样速率 2.5 GSa.S<sup>-1</sup>；
- ④. 附件：液体转接头、电源线和信号传输线若干。

### ◆ 软件部分

#### ◇ 数据采集软件( PEA Scan System V8.3)

设置简便，一键运行；

#### ◇ 信号处理软件( PEA Scan Signal Analysis V5.0)

信号恢复（信号滤波，衰减和色散恢复，电场和电位分布计算）和信号标定。

## 五、样品准备

聚乙烯平板试样（浸水/不浸水）

## 六、实验内容

### ◆ 系统接线

- ①. 如果测量正极性电场下的空间电荷，则打开正极性电压的控制开关，关闭负极性电压的控制开关，并将正极性电压输出线通过限流电阻接到高压电极上；如果测量负极性电场下的空间电荷，则打开负极性电压的控制开关，关闭正极性电压的控制开关，并将负极性电压输出线通过限流电阻接到高压电极上；
- ②. 限流电阻用 1 个  $50\text{ M}\Omega$ ， $30\text{ kV}$  的高压电阻；
- ③. 高压电源、高压控制器和脉冲电源必须可靠接地。

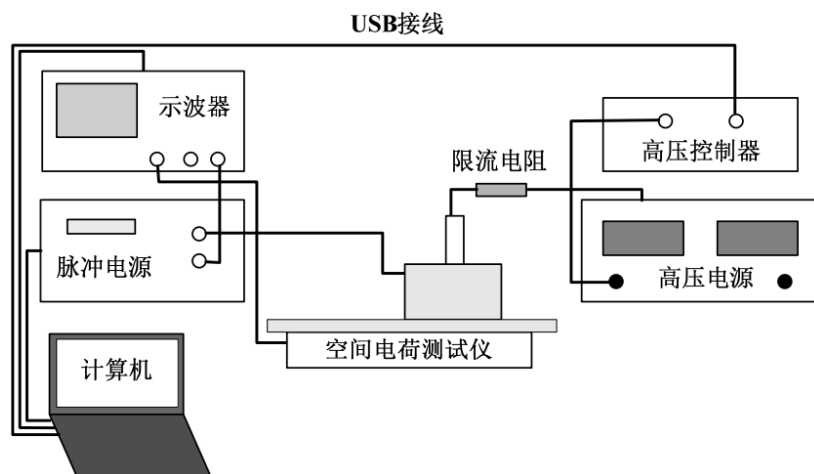


图 3-2 系统接线示意图

### ◆ 测试软件与操作步骤

#### ◇ 数据采集软件界面



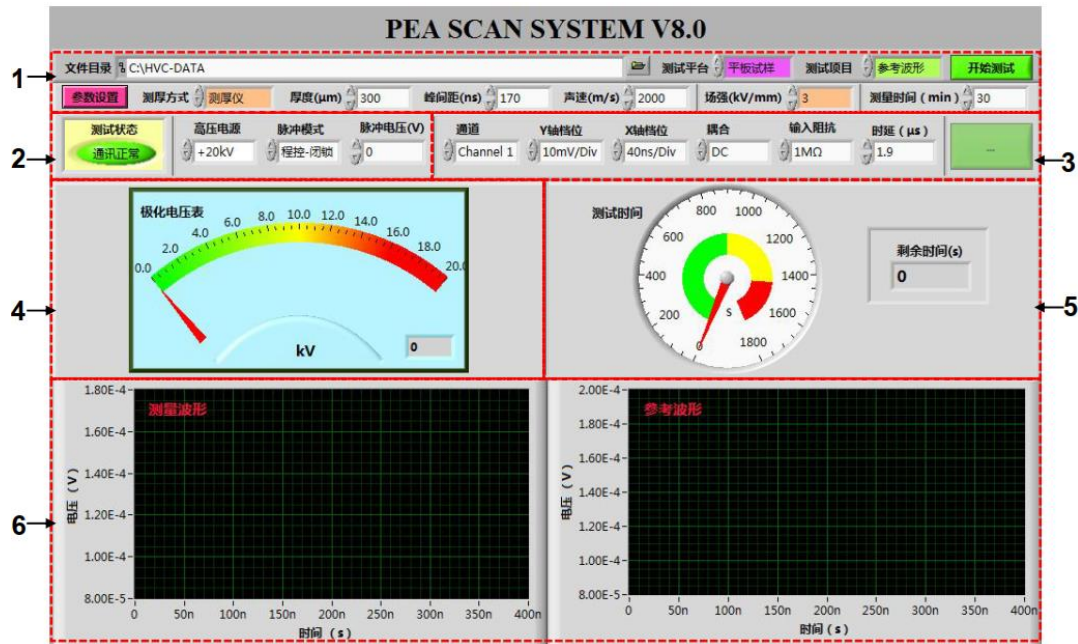


图 3-3 数据采集软件界面

- 1: 实验参数设置栏
- 2: 高压源和脉冲源设置栏
- 3: 示波器设置栏
- 4: 极化电压表
- 5: 测试时间显示表
- 6: 波形显示窗

#### ☆ 测试操作步骤

##### 1.准备工作:

用测厚仪测量待测试样的厚度，并做记录。

##### 2.样品放置

- ①. 在空间电荷测试仪的铝电极表面中心处滴少许硅油，放上样品并使其和电极紧密接触；
- ②. 将聚乙烯垫片放在样品上面，在中间的圆孔中滴少许硅油；
- ③. 将半导体电极放在聚乙烯垫片中间的圆孔中并压紧；
- ④. 将高压电极放上去，对中放好后放上固定压件，用两颗铜质的旋钮压紧固定。

**注意：**样品、半导体电极和高压电极在放置的时候一定要注意对中、压紧，以保证测试信号的真实性！

##### 3.接线和开机

- ①. 依照接线示意图可靠接线，将各台仪器的电源线接到 220V 交流电源；
- ②. 开机必须严格遵守以下次序：
  - ✓ 打开测试用计算机和示波器，打开数据采集软件；
  - ✓ 打开空间电荷测试仪；
  - ✓ 打开脉冲源和高压源。

**注意：**由于空间电荷测试仪中的前置放大器不能空载，所以开机时必须先开示波器，后开测试仪。

##### 4.参数设置

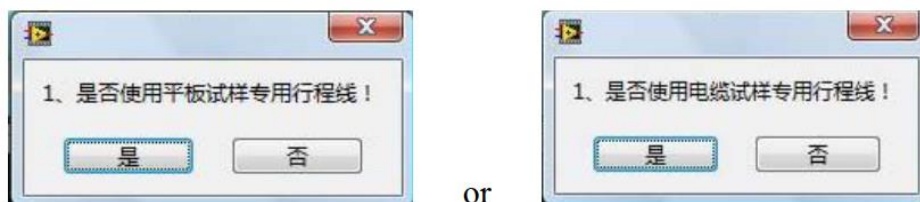
- ①. 点击文件路径选择按钮，在弹出的文件夹对话框中选择要保存的文件路径，

点击“当前文件夹”。此处严禁在文件名框中输入文件名；

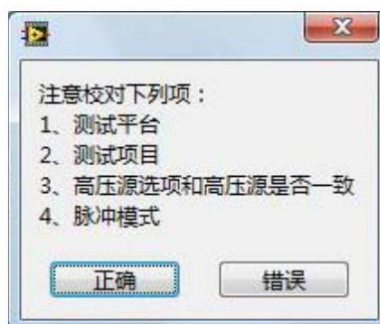
- ②. 点击“测试平台”按钮，选择当前使用的测试平台，“平板试样”或“电缆试样”；点击“测试项目”按钮，选择要进行的测试项目；
- ③. 点击“测厚方式”按钮，在下拉菜单中选择“测厚仪”方式，并且输入事先用测厚仪测的样品厚度，单位为 $\mu\text{m}$ ；设置“测试场强”和“测试时间”；
- ④. 设置高压源和脉冲源的参数：根据接线时选用的高压电源选择相应的“高压电源”选项；选择“脉冲模式”，若选择“脉冲-闭锁”则施加的脉冲电压由程序直接给出，若选择“脉冲-解锁”则需在“脉冲电压”中输入电压幅值，若选择“手动”则脉冲源输出通过手动控制；
- ⑤. 设置示波器参数：选择“示波器端口”，根据接线选择信号输出“通道”，选择“耦合”方式（一般选择DC）；“输入阻抗”根据不同的测试项目选择，平板试样选择“ $1\text{ M}\Omega$ ”，电缆试样选择“ $50\ \Omega$ ”；“Y轴档位”，“X轴档位”和“时延”可以先根据经验设置好，也可以待加压后再根据示波器显示的波形进行调整。

### 5. 波形采集

- ①. 点击“开始测试”按钮，弹出行程线确认对话框。如果行程线使用正确，点击“是”，进行下一步；如果不正确，点击“否”，程序终止。



- ②. 按照弹出的对话框中的提示，再次校对“测试平台”，“测试项目”，“高压源选项和高压源是否一致”和“脉冲模式”是否正确。如果是，点击“正确”，高压源和脉冲源开始输出加压；如果不正确，点击“否”，程序终止。



- ③. 观察示波器显示屏幕上的波形图，适当调整档位设置，如果正常，点击“开始采集”按钮，开始波形采集，测量时间显示按钮开始计时。如果异常，点击“中止测试”。
- ④. 波形测试结束后，软件发出提示音，同时弹出“采集结束”窗口，点击“确定”按钮；



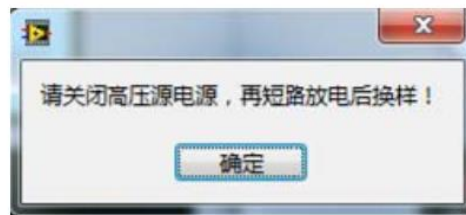
- ⑤. 软件弹出“高压源操作”窗口，如要继续进行测量波形的采集，则点击“维持”，高压源输出电压将保持不变；否则点击“降压”，高压源输出降为零；



- ⑥. 软件弹出“脉冲源操作”窗口，如要继续进行此样品的测试，则点击“维持”，脉冲源输出电压将保持不变；只有当此样品的测试全部结束时，才点击“降压”，脉冲源输出降为零；

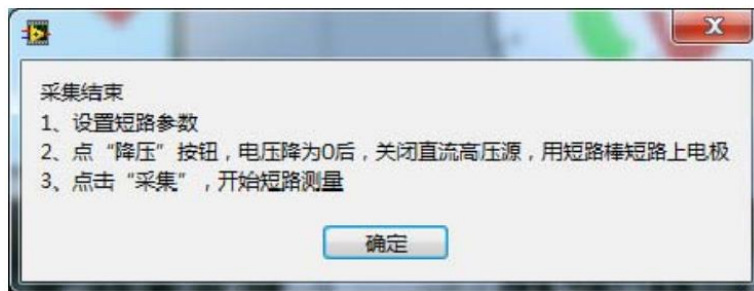


- ⑦. 软件弹出“测试结束”窗口，点击“确定”，波形采集结束，按照弹出窗口的提示进行短路放电。



## 6. 短路波形采集

- ①. 若选择的“测试项目”为“测量-短路”，则测量波形采集结束后，软件发出提示音，同时弹出“采集结束”窗口，提示短路过程的操作步骤，点击“确定”按钮；



- ②. 设置短路波形的“测量时间”和示波器的“Y轴档位”；
- ③. 点击闪烁的“降压”按钮，待“极化电压表”的指针归零后，关闭高压源，用短路棒短路测试仪的上电极；
- ④. 点击“开始采集”按钮，开始短路波形采集，同时测量时间显示窗口开始计时；
- ⑤. 短路波形采集结束后，软件发出提示音，同时弹出“采集结束”窗口，点击“确定”按钮；



- ⑥. 软件弹出“脉冲源操作”窗口，如要继续进行此样品的测试，则点击“维压”，脉冲源输出电压将保持不变；只有当此样品的测试全部结束时，才点击“降压”，脉冲源输出降为零；
- ⑦. 软件弹出“测试结束”窗口，点击“确定”，测量波形采集结束。



### 7. 关机和拆线

- ①. 关闭高压源和脉冲源的电源；
- ②. 关闭空间电荷测试仪；
- ③. 关闭示波器和计算机；
- ④. 将接地棒取下，拆除直流高压接线和脉冲信号接线；
- ⑤. 拧开固定高压电极的两个旋钮，将高压电极拿起来，取出试样，再将高压电极放回原位。

## 七、思考与提升

- (1) 浸水和未浸水处理的两种试样哪种更容易积累空间电荷？为什么？
- (2) 短路过程的电荷消散特性主要受什么因素的影响？

## 八、实验报告

请从实验目的、实验原理、注意事项、实验步骤、实验结果及思考解答六个方面撰写详尽的实验报告。

# 实验六 局部放电测量实验

## 一、实验目的

1. 了解电力设备绝缘中产生电树枝现象并发展成局部放电的机理；
2. 观察电树枝图像与局部放电数据，学会利用电树枝生长图像与局部放电 PRPD 图简单判断绝缘受损情况；
3. 学习操作电树枝观察设备，获得树枝直观的外形参数；并学会使用局部放电检测仪获取局部放电的次数和每一次放电的脉冲幅值。

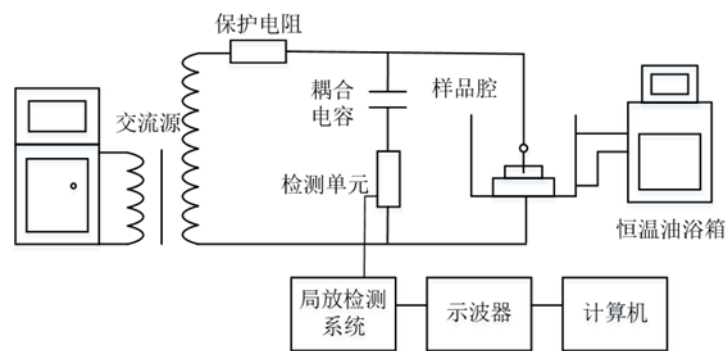
## 二、实验内容

1. 电树枝形状参数的测量；
2. 局部放电次数与幅值的获取。

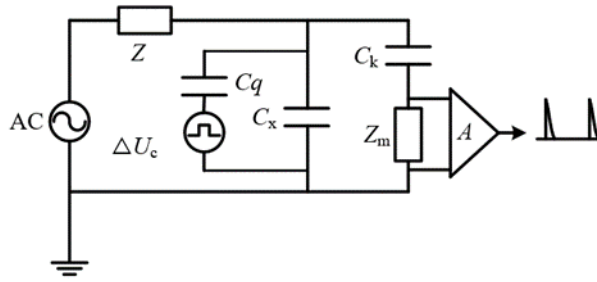
## 三、实验主要仪器设备

1. 工频试验变压器
2. 工业相机
3. 示波器
4. 局部放电综合分析仪
5. 钢针
6. 聚乙烯样片。

## 四、实验示意图



(a) 交流电树枝-局部放电系统示意图



(b) 交流电树枝-局部放电系统示意图

(1) 按照所示原理图进行接线，并连接观察电树枝的工业相机，调节焦距使得针尖图像清晰，记录针尖图像，设置图片文件存储路径和存储间隔时间。

(2) 为了确定检测得到的 PD 脉冲电压幅值与被试品的视在放电量比例系数，进行校准。按通过将一输出可调的局部放电校准仪与被试品并联，在试品上产生放电量已知的脉冲信号。通过示波器测量检测阻抗两端的电压大小。并选择示波器触发阈值。

记录背景噪声的峰峰值：                    mV  
 局部放电校准仪放电量：                    pC  
 示波器检测脉冲峰峰值：                    mV  
 示波器触发阈值：                            mV

(3) 移除校准仪，检查接线。准备升压。在试验变压器控制台以 500V/s 升至 9kV，此时开始记录电树枝图片和局部放电信号。记录电树枝出现的时间：                    s。

(4) 电树枝生长 10min 后，在试验变压器控制台降压到 0V，短路棒接地短路，实验结束。

(5) 每隔 2min 选取一张电树枝图片，用 Labview 软件测量电树枝长度（此长度为像素度，换算公式为  $2.4 \mu\text{m}/\text{像素}$ ）；用 Labview 软件处理局部放电数据，得到局部放电的时间、相位和放电量。

## 五、实验数据记录

(1) 根据实验结果，计算电树枝每两分钟的平均生长速率 ( $\mu\text{m}/\text{s}$ )。

(2) 根据电树枝长宽文件，作出电树枝的长与宽根据时间的变化趋势图。

(3) 根据相位-放电量文件，作出局部放电 PRPD 图。

## 六、思考与提升

(1) 脉冲电流法测量局部放电的优缺点。

(2) 局部放电信号的相位分布特点。