

实验 10b 冲击法测量电容与高阻

工业上常用兆欧计测高阻，但要求电阻耐高压（达数千伏），且测量精度很低。多用表对高电阻不能准确测量。便携式惠斯通电桥由于受本身绝缘性能和灵敏度的限制，测量上限仅 $10^6 \Omega$ 左右。测高阻是冲击电流计的重要用途之一，可测高达 $10^8 \Omega \sim 10^{13} \Omega$ 的电阻。实验中利用已知物理规律对物理量进行间接测量，这是科研和生产中广泛采用的重要方法。

【预习重点】

- (1) 冲击电流计的结构特点、工作原理和使用方法。
- (2) RC 电路的放电规律，并导出电容电量的放电表达式。
- (3) 电容放电法测高阻的原理和方法。

【实验目的】

- (1) 学会电容、高阻值电阻的测量方法。
- (2) 进一步理解 RC 电路的放电规律

【实验仪器】

- 1、DQ-3 数字积分式冲击电流计。
- 2、FB836 冲击法电容与高电阻测量仪。

【实验原理】

1、用冲击电流计测量电容的原理

图 1 是比较法测量电容原理图， K_3 置于“标准”， K_2 置于“充电”，则电源 E 对标准电容 C_N 充电。标准电容 C_N 上所充电量为： $Q_0=C_N U$ 。将 K_2 置于“测量”挡，则 C_N 向冲击电流计 Q 放电，由于冲击电流计具有一定的内阻，故而在一定的时间内完成放电。冲击电流计完成电量的测量，并显示。

将 K_3 置于“被测”， K_2 置于“充电”，则电源 E 对被测电容 C_X 充电。被测电容 C_X 上所充电量为： $Q_X=C_XU$ 。将 K_2 置于“测量”挡，则 C_X 向冲击电流计 Q 放电。冲击电流计完成电量的测量，并显示。

忽略漏电阻和电源 E 的变化，则有 $Q_0/Q_X=C_N/C_X$ 。由于 C_N 为已知值，故可求得：

$$C_X = \frac{Q_X}{Q_0} C_N \quad (1)$$

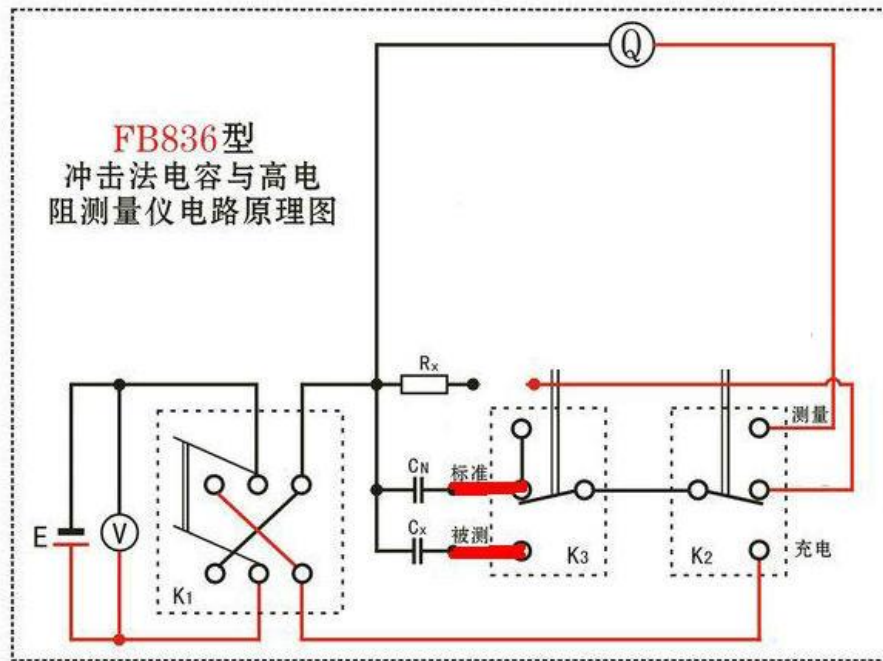


图 1 用冲击电流计测量电容

2、RC 放电法测高电阻的原理

借助于高性能的数字冲击电流计，用放电法测量高阻是一种较为准确的方法。将待测高阻与已知电容组成回路，在电容放电时测量电容上的电量（或电压）随时间的变化关系，确定其时间常数，在已知标准电容容量的情况下，可确定高阻的阻值。其原理如图 2 所示。

在图 2 中，开关 K_1 、 K_2 、 K_3 是一个三刀三位开关，其绝缘电阻高、断路间隙小、接触抖动小，测量工作过程如下：

C_N 充电： K_3 置于“标准”， K_2 置于“充电”，假设 E 的内阻为 5 欧，标准电容的值为 1uF，则时间常数为 5us，在 30~50us 内，电容充电完成。所以只要将 K_2 置于“充电”位置很短时间，就可认为充电完成。同时 K_2 的另一组开关接通计时器 S 的“复位”端，计时表示值回零。

C_N 放电: K_3 置于“高阻”端, 一组开关接至 C_N 不变, 另一组开关接至“开始/停止”端, 准备进行计时。将 K_2 置于“放电”端, R_x 就并联到 C_N 两端, 电容开始放电; 同时, K_2 的另一组开关接通计时器 S 的“开始/停止”端, 计时器开始计时。由于 K_2 的两组开关是联动的, 所以确保了放电与计时的同步性。由于 K_2 、 K_3 使用了高绝缘性能的开关, 而且 C_N 本身的绝缘电阻很高, 所以实验中切换开关时, 开关动作快慢并不会明显影响计时准确度, 这降低了操作难度, 并提高了测量准确性。

测量: 放电一段时间后, 将 K_2 切换到“测量”端, C_N 向冲击电流计放电, 并断开 R_x , 以免在冲击电流计测量期间 C_N 向 R_x 放电。同时 K_2 的另一组开关再次接通计时器 S 的“开始/停止”端停止计时; 也由于 K_2 的两组开关是联动的, 所以确保了冲击电流计测量与计时停止的同步性。

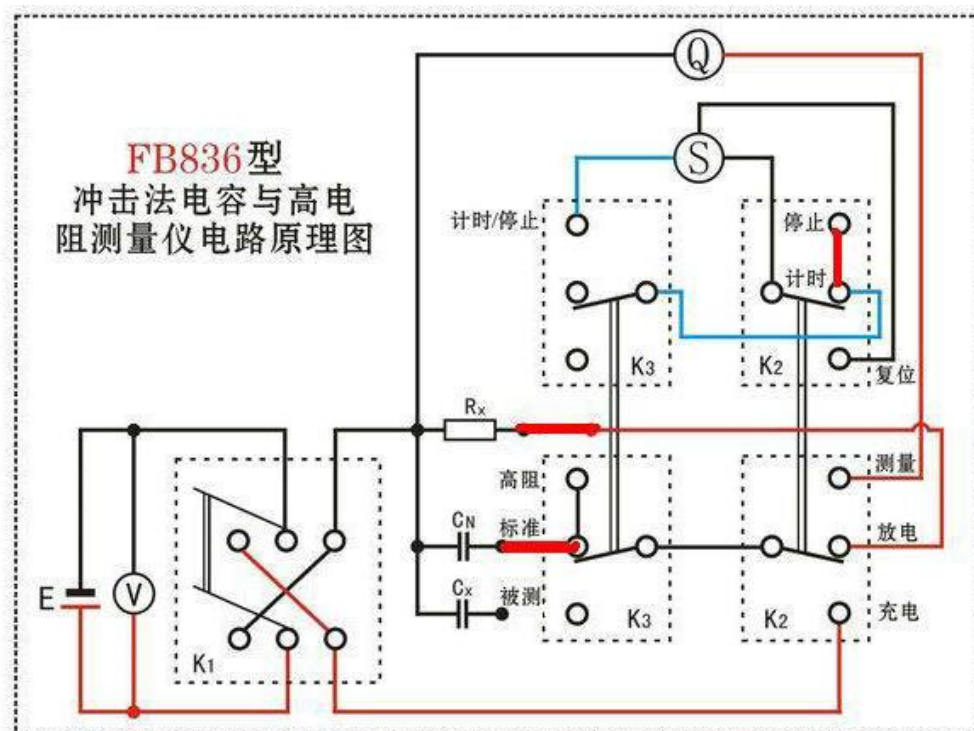


图 2 用冲击电流计测量高阻

在上述的测量过程中, 设放电时间为 t , 则在 t 时刻电容 C 上的电量 Q 、电压 U 和 RC 回路中的电流 I 之间满足:

$$Q = CU; \quad \text{其中 } U = RI \quad I = -\frac{dQ}{dt}$$

其中负号表示随着放电时间的增加, 电容器极板上的电荷 Q 随之减少。注意: Q 、 U 、 I 三个量都是时间的函数。

设初始条件为： $t=0$ 时， $Q=Q_0$ ， 则电容上电量随时间的关系：

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{q}{RC}。 即 Q = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

式中 RC 称为时间常数， 一般用 τ 表示， 其物理意义为： 当 $t = \tau = RC$ 时， 电容上的电量由 $t=0$ 时的 Q_0 下降到 $0.368Q_0$ ， 它决定放电过程的快慢。 τ 时间常数越大， 放电越慢； 反之， τ 越小， 放电越快。

对应的放电曲线见图 3

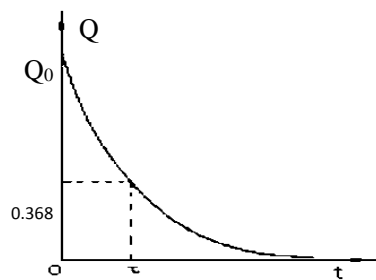


图 3 $Q \sim t$ 曲线

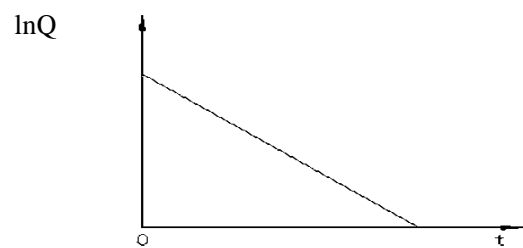


图 4 $\ln Q \sim t$ 曲线

对(2)式取自然对数有：

$$\ln Q = -\frac{t}{RC} + \ln Q_0 \quad (3)$$

根据式(3)可知 $\ln Q$ 与 t 成线性关系， 见图 4。 其直线斜率就是 $-\frac{1}{RC}$ ， 根据已知标准电容值就可以求得 R 的大小。

【实验内容及要求】

1、用冲击电流计测量电容

按图 1 连接线路， (R_x 不要连接) 接好冲击电流计、 分别测量 C_N 和 C_X 。 在测量 C_N 和 C_X 为 $1 \mu\text{F}$ 、 $0.1 \mu\text{F}$ 时所选电压 15V ， 使 $Q=CU$ 值的大小在冲击电流计的量程范围内 (C_N 和 C_X 另有 $10 \mu\text{F}$ 为拓展备用)。

1.1 K_1 置于“正向”， K_3 置于“标准”， K_2 置于“充电”， 则电源 E 对标准电容 C_N 充电。 将 K_2 置于“测量”挡， 则 C_N 向冲击电流计 Q 放电。 冲击电流计完成电量的测量， 自动显示 Q 的大小并保持， 直到下一次测量。 记录这个 Q_0 值。 同一个电容值在同样的电压下测量 5 次电容值， 并以平均值作为 Q_0 。

K_1 置于“反向”后和前面同样的操作测量。取 K_1 正向和反向的电量的测量值的绝对值取平均作为该测量的最终值。

我们分别测量 2 个标准电容的饱和电量值。

将 K_3 置于“被测”， K_2 置于“充电”，则电源 E 对标准电容 C_X 充电。将 K_2 置于“测量”挡，则 C_X 向冲击电流计 Q 放电。冲击电流计完成电量的测量，自动显示 Q 的大小并保持，直到下一次测量。同一个待测电容值在同样的电压下测量 5 次，并以平均值作为 Q_x 。

我们分别测量 2 个待测电容的饱和电量值（表盘上的待测电容的数值仅仅作为参考）。用公式（1）计算 C_X 值。

2、用冲击电流计测量高阻

按图 2 接线，接好冲击电流计、 C_N 和 R_X ，测量 $R_X=100\text{ M}\Omega$ 的电阻时，选择 $C_N=1\text{ uF}$ ，选择电压为 15V。

具体操作步骤为：

C_N 充电： K_3 置于“标准”， K_2 置于“充电”，同时 K_2 的另一组开关接通计时器 S 的“复位”端，计时表示值回零。

C_N 放电： K_3 置于“高阻”端，一组开关接至 C_N 不变，另一组开关接至“开始/停止”端，准备进行计时。将 K_2 置于“放电”端， R_X 并联到 C_N 两端，电容开始放电；同时， K_2 的另一组开关接通计时器 S 的“开始/停止”端，计时器开始计时。

测量：放电一段时间后，将 K_2 切换到“测量”端， C_N 向冲击电流计放电，并断开 R_X 。同时 K_2 的另一组开关再次接通计时器 S 的“开始/停止”端停止计时；记录下时间 t 和 Q 值。

将测量时间取为 5s、10s、20s、30s、40s。每个放电时间分别测量 5 次 K_1 置于“正向”和 K_1 置于“反向”的充电条件。将测量结果取平均。

【数据处理】

1 用冲击电流计测量电容

按照下图连接电容器，并连接好冲击电流计。 C_N 和 C_X 分别选取为 $1\mu\text{F}$ ， $0.1\mu\text{F}$ ，所选电压为 15V。

$C_N = 1\mu\text{F}$	1	2	3	4	5	平均	$ \overline{Q_0} $
$Q_0 (\mu\text{C})$ 正向	14.84	15.23	14.78	14.79	14.95	14.92	15.3 6
$Q_0 (\mu\text{C})$ 反向	-15.65	-15.68	-15.89	-15.86	-15.87	-15.79	

$C_x =$	1	2	3	4	5	平均	$ \overline{Q_x} $
$Q_x (\mu\text{C})$ 正向	1.506	1.509	1.514	1.515	1.513	1.514	1.557
$Q_x (\mu\text{C})$ 反向	-1.572	-1.606	-1.622	-1.608	-1.607	-1.603	

忽略电阻和电源 E 的变化，根据公式有 $Q_0 / Q_x = C_N / C_x$ 。 $C_N = 1\mu\text{F}$ 。可求得 $C_x = 0.101\mu\text{F}$ 。

2.用冲击电流计测量高电阻

按照下图连接线路，连接好冲击电流计、 C_N 和 R_x ，选择 $C_N = 1\mu\text{F}$ ，测量 $R_x = 100\text{M}\Omega$ 时，选择电压为 15V。

$t=5\text{s}$	1	2	3	4	5	平均	$ \overline{Q_0} $	$\text{Ln} \overline{Q_0} $
$Q_N(\mu\text{C})$ 正向	14.81	14.90	14.69	14.83	15.05	14.856	14.484	2.673
$Q_N(\mu\text{C})$ 反向	-13.92	-14.12	-14.14	-14.24	-14.14	-14.112		

$t=10\text{s}$	1	2	3	4	5	平均	$ \overline{Q_0} $	$\text{Ln} \overline{Q_0} $
$Q_N(\mu\text{C})$ 正向	14.19	14.06	14.16	14.23	14.04	14.136	13.798	2.625
$Q_N(\mu\text{C})$ 反 向	-13.62	-13.27	-13.53	-13.45	-13.43	-13.46		

$t=20\text{s}$	1	2	3	4	5	平均	$ \overline{Q_0} $	$\text{Ln} \overline{Q_0} $
$Q_N(\mu\text{C})$ 正向	12.63	13.07	12.79	12.62	12.82	12.786	12.603	2.534

$Q_N(\mu\text{C})$ 反向	-12.31	-12.23	-12.12	-12.07	-12.13	-12.42		
-----------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--	--

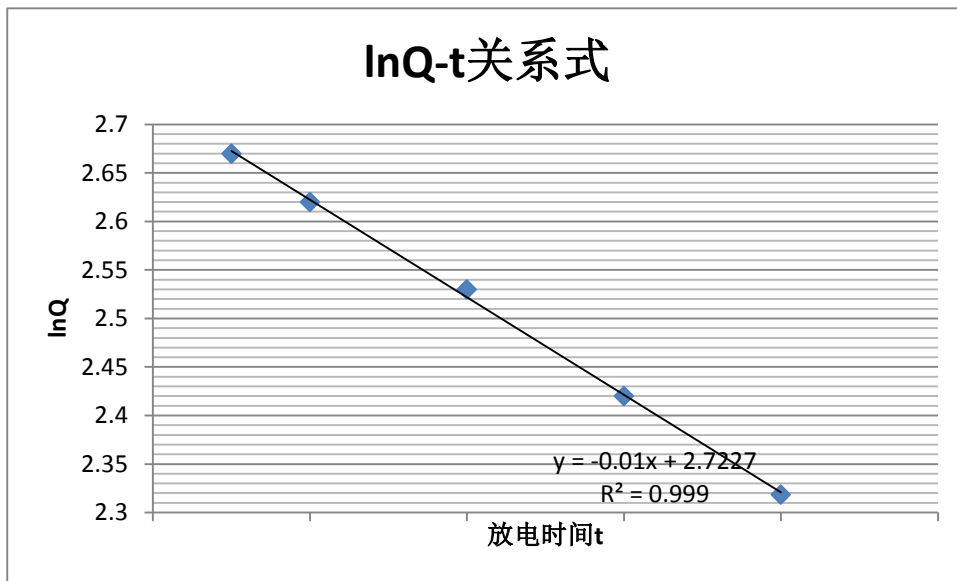
t=30s	1	2	3	4	5	平均	$ \overline{Q_0} $	$\ln \overline{Q_0} $
$Q_N(\mu\text{C})$ 正向	11.49	11.64	11.54	11.44	11.45	11.512	11.216	2.417
$Q_N(\mu\text{C})$ 反向	-11.10	-11.07	-11.09	-10.91	-10.74	-10.92		

t=40s	1	2	3	4	5	平均	$ \overline{Q_0} $	$\ln \overline{Q_0} $
$Q_N(\mu\text{C})$ 正向	10.59	10.37	10.32	10.30	10.33	10.302	10.161	2.319
$Q_N(\mu\text{C})$ 反向	-9.92	-9.85	-9.89	-9.99	-10.05	-9.94		

由上表格可得到 $\ln Q_N-t$ 的关系如下表格

t (s)	5	10	20	30	40
$\ln Q_N$	2.673	2.625	2.534	2.417	2.319

对 $\ln Q-t$ 进行直线拟合图如下



拟合后的直线方程为

$$\ln Q = 0.01t + 2.7227.$$

由公式 $\ln Q = -\frac{t}{RC} + \ln Q_0$ 可知 $\frac{1}{RC} = 0.01$, $c = 1\mu\text{F}$ 。可求得 $R=100\text{M}\Omega$