



哈爾濱工業大學(深圳)

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

# 电子电荷的测定-密立根油滴法

钟瑞

2020年8月



实验与创新实践教育中心  
Education Center of Experiments and Innovations

## 目录

### 01 实验概述

- 实验背景
- 实验目的

### 02 实验原理

### 03 实验内容

- 实验设备
- 实验步骤
- 数据处理
- 注意事项

# 实验概述

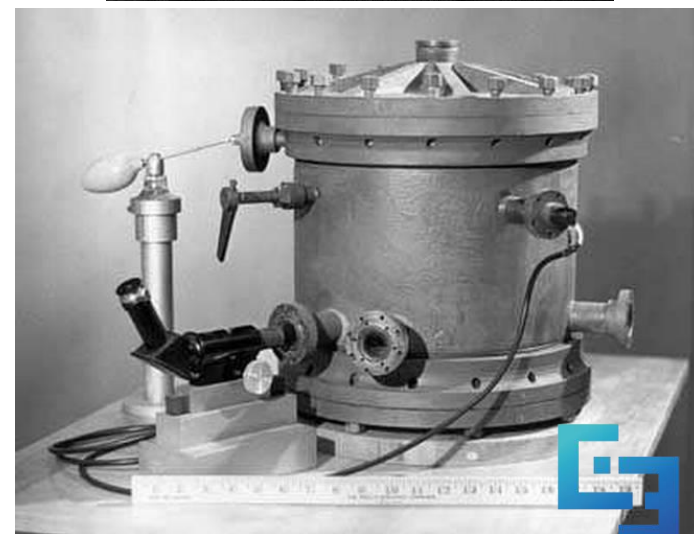
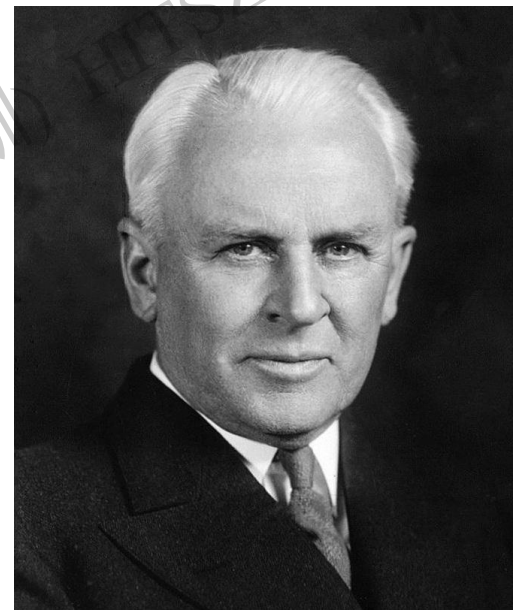
哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ

**基本电荷（元电荷）：**  $e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}\text{ C}$ （ISO 2019年5月20日设定）。

**油滴实验：**密立根（Robert A. Millikan）于1909年到1917年设计完成。

- 证明了**电荷的不连续性**：带电油滴所带的电荷量都是基本电荷的**整数倍**。
- 测出了**基本电荷值**： $e = 1.5924(17) \times 10^{-19}\text{ C}$ 。
- 构思和方法非常巧妙：采用宏观的力学方法研究微观世界的量子特性。

密立根因为测量电子电荷和研究光电效应的杰出成就而荣获**1923年度诺贝尔物理学奖**。



## 实验目的

1. 掌握密立根油滴法测定电子电荷的基本原理，观察带电油滴在电场中运动规律。
2. 测定电子电荷，验证电荷是量子化的。
3. 学习密立根油滴实验简明巧妙的设计思想，培养严肃认真、一丝不苟的科学实验方法和态度。

# 实验原理

哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ

# 平衡法测定电子电荷的原理

油滴经喷雾器喷出进入平行极板之间，由于摩擦会带电。

油滴质量为  $m$ ，半径为  $a$ ，带电量为  $q$ ；极板电压为  $U$ 、间距为  $d$ 。

静止平衡状态下，油滴受  $mg$ 、 $Uq/d$ 、 $F_{\text{浮}}=4\pi\rho_{\text{空气}}a^3g/3$  作用。

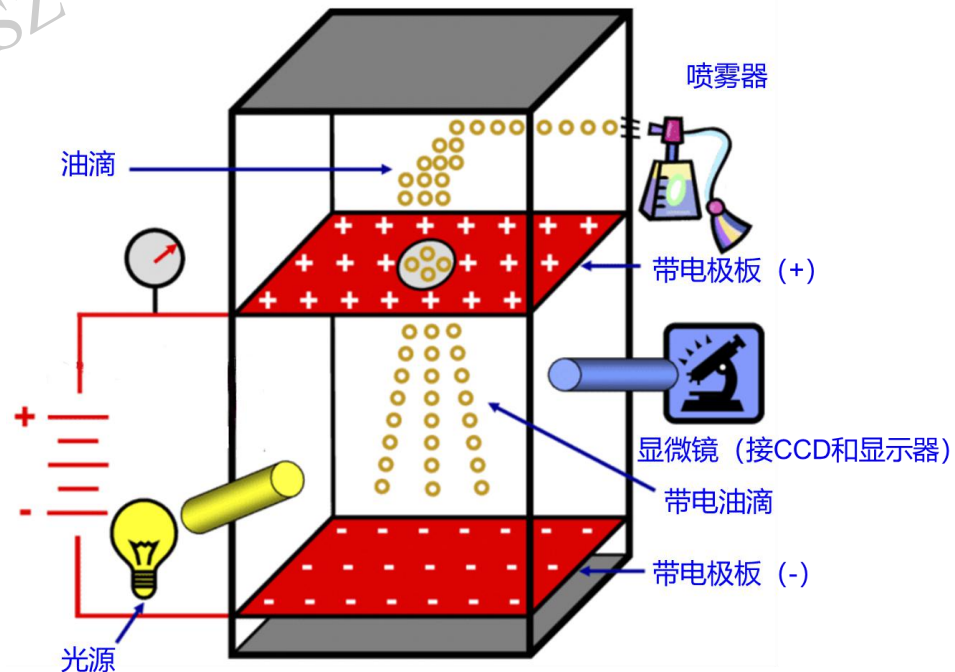
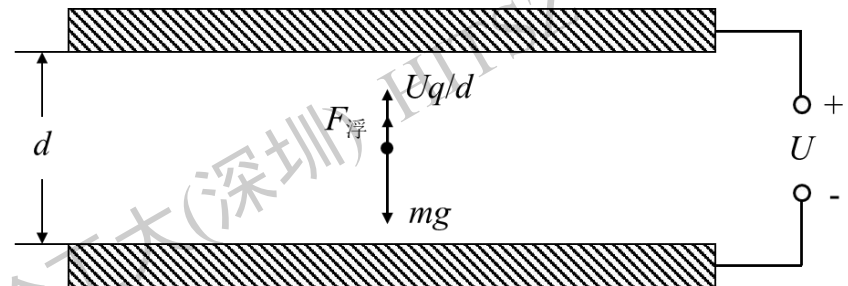
$U \sim 10^2 \text{ V}$ ,  $d \sim 10^{-3} \text{ m}$ ,  $q \sim 10^{-19} \text{ C}$ ,  $\rho_{\text{空气}} \sim 10^0 \text{ kg/m}^3$ ,  $a \sim 10^{-6} \text{ m}$ ,  
 电场力  $\sim 10^{-14} \text{ N}$ ,  $F_{\text{浮}} \sim 10^{-17} \text{ N}$ ;  $\rho_{\text{空气}}$  与  $\rho$  相差3个数量级。

$F_{\text{浮}}$  与  $mg$ 、 $Uq/d$  均相差3个数量级，可忽略不计。

$$mg = \frac{qU_n}{d} \rightarrow q = \frac{mgd}{U_n} \rightarrow m = \frac{4}{3}\pi\rho a^3$$

$m \sim 10^{-15} \text{ kg}$ , 直接测量极为困难

已知油的密度  $\rho$ 、极板间距  $d$ ，测出平衡电压  $U_n$ 、油滴半径  $a$ ，即可得到油滴所带电荷量  $q$ 。



# 带电油滴半径的测量

撤掉极板电压，油滴开始下落，受重力  $mg$ 、空气的黏滯力  $f$  作用。

斯托克斯 (Stokes) 定律

$$f = 6\pi a \eta v \quad (v: \text{油滴下落速度}, \eta: \text{空气黏度}, a: \text{油滴半径})$$

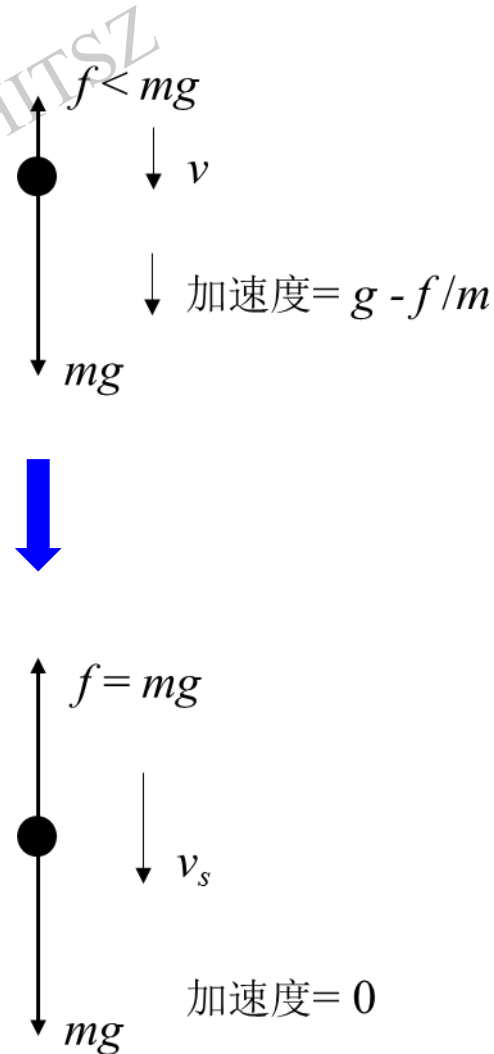
$v$  增加到某一值  $v_s$  时，油滴所受外力平衡

$$6\pi a \eta v_s = \frac{4}{3} \pi \rho g a^3 \quad \rightarrow \quad a = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2\rho g}}$$

油滴非常小，空气不能看作连续、均匀的介质，斯托克斯定律修正为

$$f = \frac{6\pi a \eta v_s}{1 + \frac{b}{pa}} \quad \rightarrow \quad a = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2g\rho \left(1 + \frac{b}{pa}\right)}}$$

**说明：**修正项中的  $a$  仍用  $\sqrt{\frac{9\eta v_s}{2\rho g}}$  计算， $p$  为当地大气压强，修正常数  $b = 8.22 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$ 。





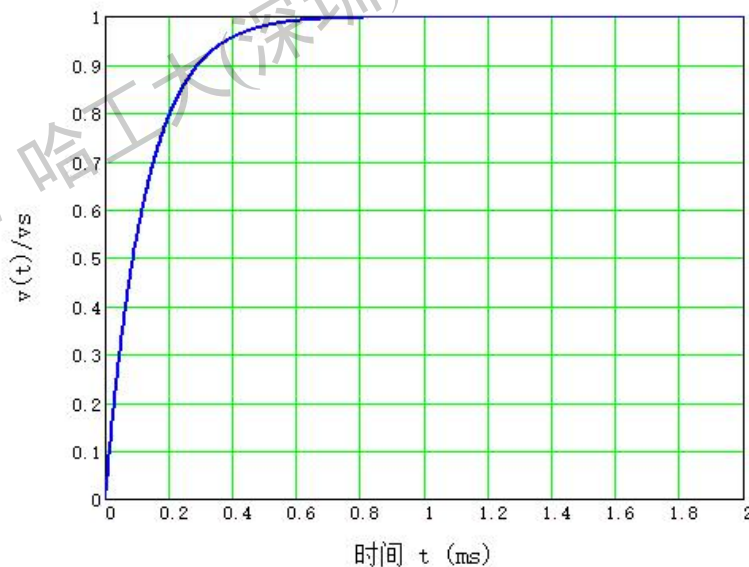
# 油滴匀速下落速度的测量及电荷量计算

$v_s$  的测量：测出油滴匀速下落给定距离  $L$  所用的时间  $t$ ，则  $v_s = L/t$ 。

何时达到匀速下落？

$$ma' = mg - f \rightarrow \frac{dv}{dt} = g - \frac{6\pi a \eta v}{\left(1 + \frac{b}{pa}\right) \cdot \frac{4\pi a^3}{3} \rho} \xrightarrow{v(0)=0} v(t) = \frac{2\rho g a^2 \left(1 + \frac{b}{pa}\right)}{9\eta} \left(1 - e^{-\frac{9\eta t}{2\rho a^2 \left(1 + \frac{b}{pa}\right)}}\right) \rightarrow v_s = v(\infty) = \frac{2\rho g a^2 \left(1 + \frac{b}{pa}\right)}{9\eta}$$

参数	数值	单位
油滴密度 $\rho$	$0.981 \times 10^3$	$kg \cdot m^{-3}$
重力加速度 $g$	9.78	$m \cdot s^{-2}$
空气黏度 $\eta$	$1.83 \times 10^{-5}$	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
匀速下落距离 $L$	$1.60 \times 10^{-3}$	$m$
修正常数 $b$	$8.22 \times 10^{-3}$	$m \cdot Pa$
大气压强 $p$	$1.0098 \times 10^5$	$Pa$
平行极板距离 $d$	$5.00 \times 10^{-3}$	$m$



半径为  $1\mu m$  的油滴下落速度

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \cdot \frac{d}{U_n} \left[ \frac{\eta L}{t \left(1 + \frac{b}{p} \sqrt{\frac{2\rho g t}{9\eta L}}\right)} \right]^{\frac{3}{2}}$$



## 基本电荷量 $e$ 的计算

- **最大公约数法：**测量不同油滴的带电量  $q_1, q_2, q_3, \dots$ ，找到其最大公约数，即为  $e$  的测量值，极为困难。
- **倒推法：**用公认的元电荷值  $e_{\text{公认}} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  去除  $q$ ，即  $n = q / e_{\text{公认}}$ ，若实验是成功的，则  $n$  将非常接近某个整数值  $N$ ，可认为  $N$  就是油滴所带的元电荷数目。则  $e_{\text{测}} = q / N$ 。

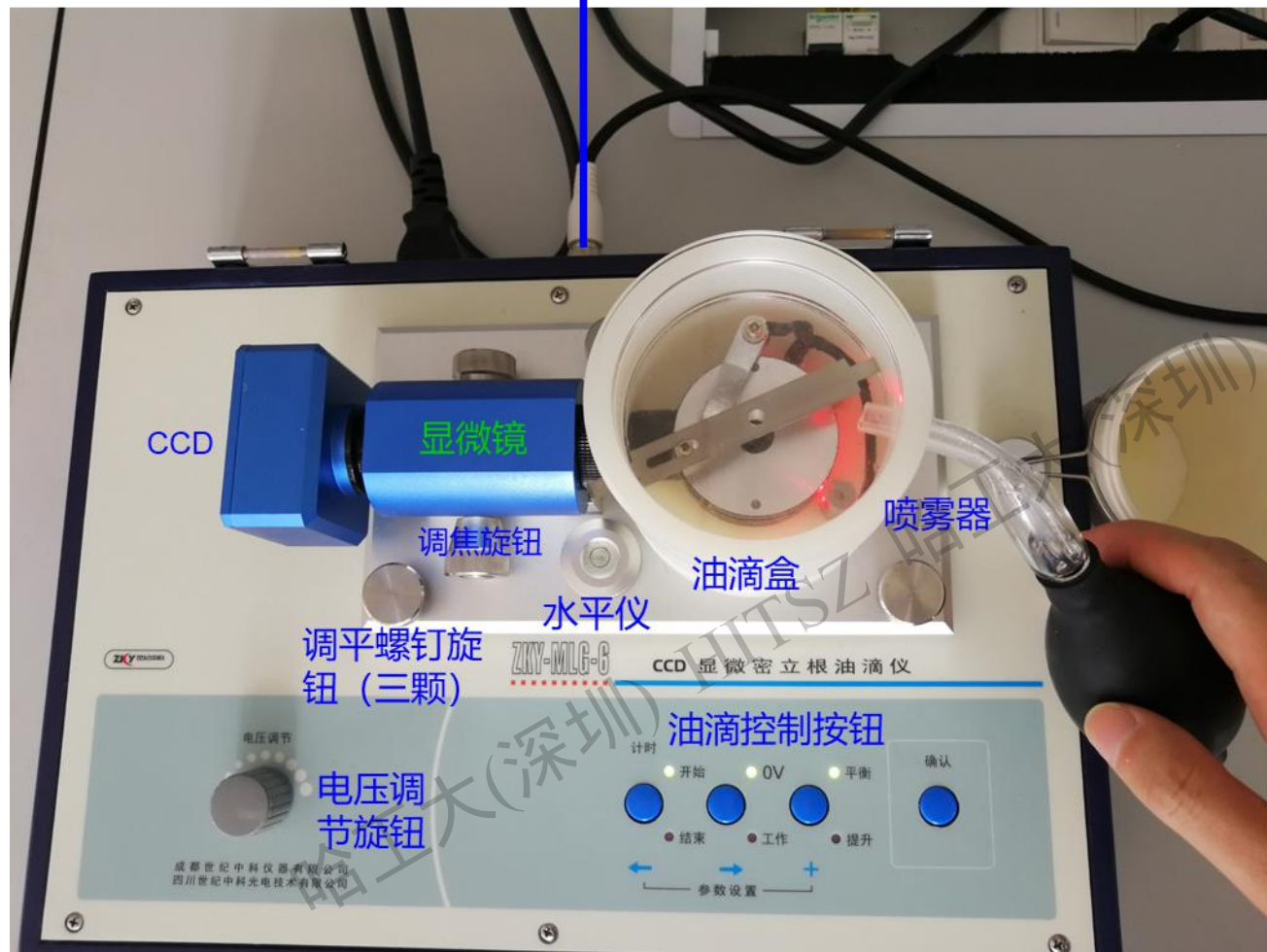


# 实验内容

哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ



# 实验设备：密立根油滴仪 & 实验界面



密立根油滴仪



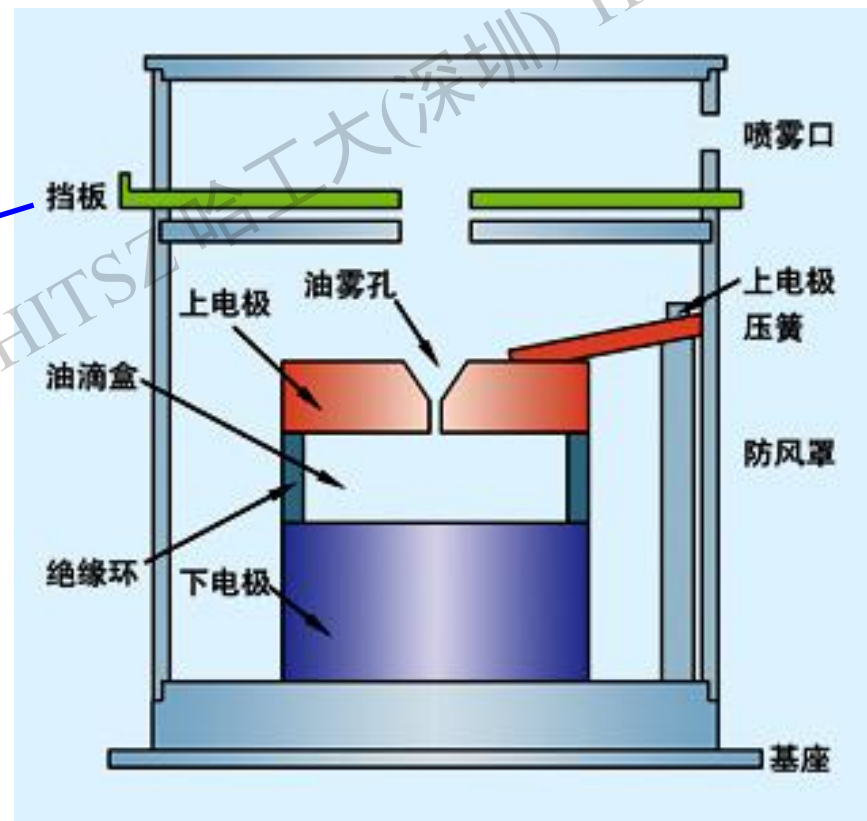
显示器





## 实验设备：油滴盒结构

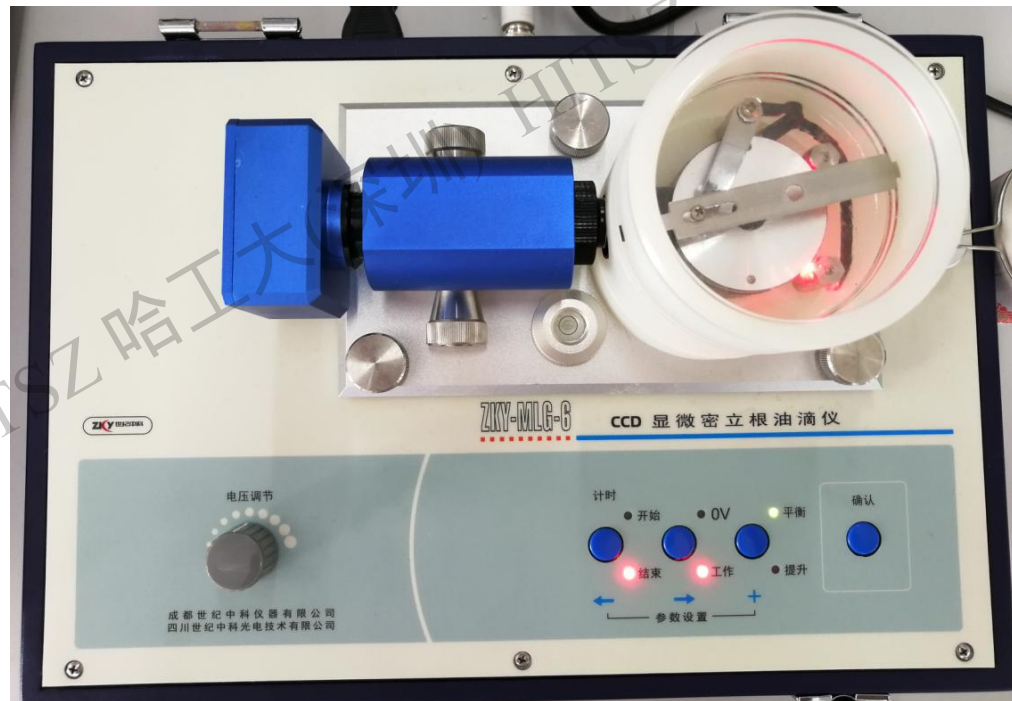
可左右移动，测试过程中应遮挡油雾孔，以免空气流动影响油滴的运动状态。





## 实验步骤一：仪器调整

1. **水平调整**：调整调平螺钉旋钮，使水平仪的气泡处于中心，**保证电场方向与重力方向平行**。
2. **联机**：将密立根油滴仪和显示器连接，打开电源，连续按“确认”键，出现实验界面。
3. **显微镜调整**：移动挡板，打开油雾孔，从喷雾口喷入油雾，调整显微镜的调焦旋钮，使显示器上出现大量运动油滴的像。



## 实验步骤二：挑选合适的油滴

### • 挑选原则：

1. 油滴过小，布朗运动影响明显，平衡电压不易调整，时间误差会增加；
2. 油滴过大，下落太快，时间相对误差增大，油滴带电量大的几率增加，合适的油滴带电量  $< 10e$ 。

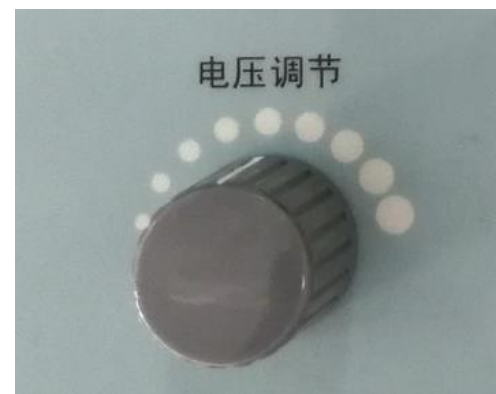
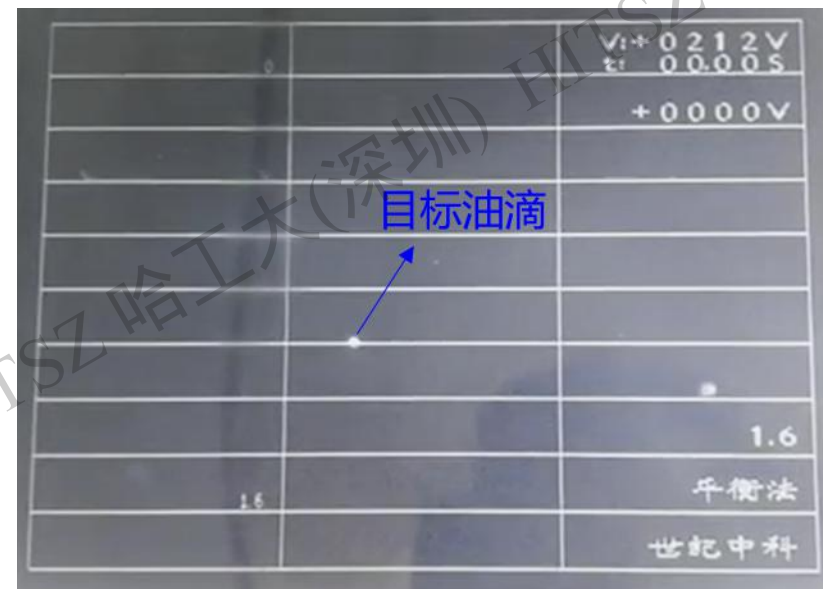
### • 操作方法：

1. 参数设置按键：“结束”、“工作”、“平衡”，平衡电压预设为  $150 \sim 250V$ 。
2. 喷入油滴，调节调焦旋钮，使屏幕上显示大部分油滴。
3. 约  $10s$  后油滴减少。选择上升缓慢的油滴作为暂时的目标油滴。
4. 切换“ $0V$ /工作”键至“ $0V$ ”状态，在暂时的目标油滴中选择下落速度为  $2 \sim 5s/格$  的作为最终的目标油滴，调节调焦旋钮使该油滴最小最亮。



## 实验步骤三：确认平衡电压

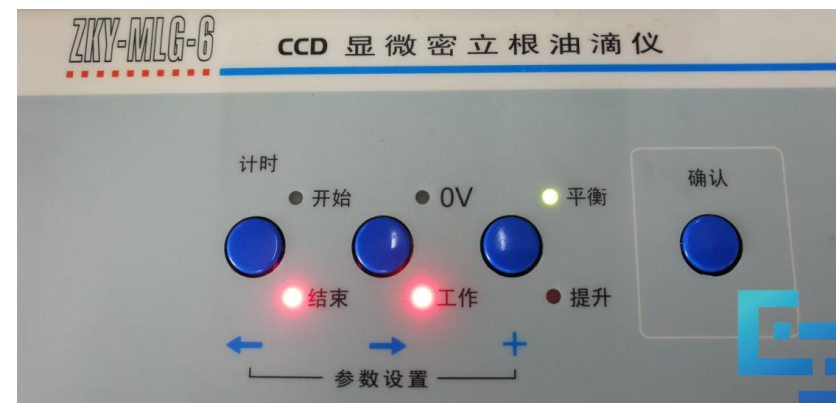
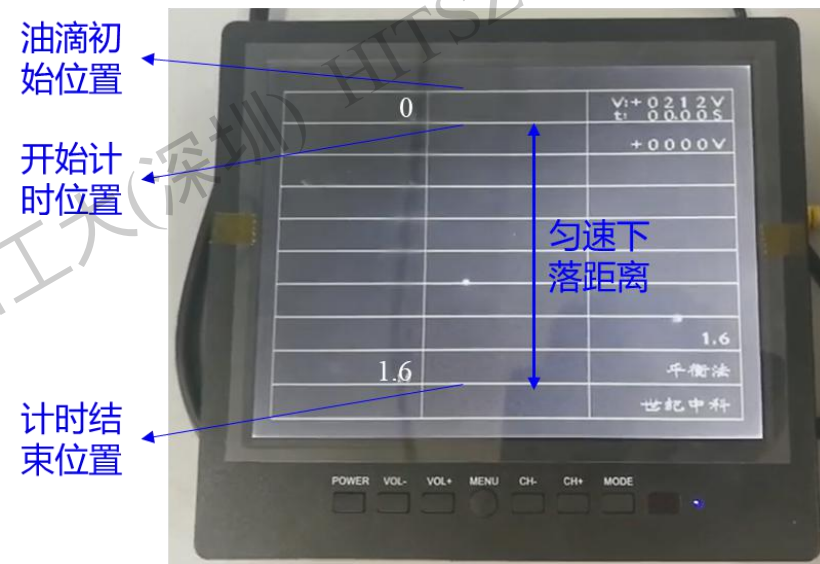
1. 仔细调整“电压调节”旋钮，使油滴平衡在某一格线处。
2. 等待约  $2\text{ min}$ ，观察油滴是否飘离格线。
3. 若油滴始终向同一方向飘离，需重新调整平衡电压。
4. 若油滴基本稳定在格线或只在格线上下做轻微的布朗运动，则认为油滴达到了力学平衡，此时的电压即为平衡电压  $U_n$ 。





## 实验步骤四：测量匀速下落时间

1. “平衡/提升” 键切换至 “提升”，将油滴提升到第一条格线。
2. “0V、工作” 键切换至 “0V”，油滴开始下落。
3. 油滴下落到第二条格线时，按下 “计时” 键开始计时。
4. 油滴下落至倒数第二条格线时，再次按下 “计时” 键停止计时，此时仪器自动切换到平衡状态，油滴停止下落。
5. 按 “确认” 键将此次测量数据记录到屏幕上。
6. 将油滴提升至第一条格线，重复测量，每颗油滴测量5次。
7. 重复步骤二~四，测量3颗油滴。





油滴序号	测量次数 $i$	平衡电压 $U_n$ (V)	下落时间 $t$ (s)	油滴电荷量 $q_i$ (C)	$q_i/e_{\text{公认}}$ (近似整数 $N$ )	基本电荷量测量值 $q_i/N$ (C)
1	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
平均值						

参数	数值	单位
油滴密度 $\rho$	$0.981 \times 10^3$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
重力加速度 (深圳) $g$	9.78	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
空气黏度 $\eta$	$1.83 \times 10^{-5}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
匀速下落距离 $L$	$1.60 \times 10^{-3}$	$\text{m}$
修正常数 $b$	$8.22 \times 10^{-3}$	$\text{m} \cdot \text{Pa}$
大气压强 (深圳) $p$	$1.0098 \times 10^5$	$\text{Pa}$
平行极板距离 $d$	$5.00 \times 10^{-3}$	$\text{m}$

$e_{\text{公认}}$  取  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 对3颗油滴的电荷量测量结果分别计算不确定度。

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \cdot \frac{d}{U_n} \left[ \frac{\eta L}{t \left( 1 + \frac{b}{p} \sqrt{\frac{2\rho g t}{9\eta L}} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} = \frac{1.023 \times 10^{-14}}{U_n \cdot [t(1 + 0.022\sqrt{t})]^{\frac{3}{2}}}$$



$$Eq = \frac{Uq}{\bar{q}} = \sqrt{\left( \frac{\partial \ln q}{\partial U_n} \right)^2 \cdot (U_{U_n})^2 + \left( \frac{\partial \ln q}{\partial t} \right)^2 \cdot (U_t)^2} = \sqrt{\left( \frac{1}{U_n} \right)^2 \cdot (U_{U_n})^2 + \frac{9}{4} \left[ \frac{1}{t} + \frac{1}{\sqrt{t} \left( \sqrt{t} + \frac{p}{b} \sqrt{\frac{9\eta L}{2\rho g}} \right)} \right]^2 (U_t)^2} = \sqrt{\left( \frac{1}{U_n} \right)^2 \cdot (U_{U_n})^2 + \frac{9}{4} \left[ \frac{1}{t} + \frac{1}{\sqrt{t}(\sqrt{t} + 45.525)} \right]^2 (U_t)^2}$$

1. 仪器内有高压，注意安全，避免用手接触电极。
2. 测量时关闭油雾孔开关，避免外界空气流动的影响。
3. 实验前须调节极板水平，保证电场力与重力平行。
4. 最佳油滴：平衡电压在  $150\sim 250V$  左右、下落时间  $16\sim 40s$  。
5. 测量前可以先反复练习控制油滴运动（平衡、下落、提升），掌握规律。

谢谢

哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ 哈工大(深圳) HITSZ