

# 《基础物理实验》实验报告

学号 00000000 姓名 我是谁 实验日期 2025.03.25 星期 二 下午

## 密立根油滴实验

### 一、实验目的

1. 验证电荷的不连续性,并测定元电荷的值。
2. 学习和理解密立根利用宏观量测量微观量的巧妙设想。

### 二、实验仪器

密立根油滴实验装置

### 三、实验原理

实验研究对象是带电的油滴,基本思想是使油滴处于受力平衡状态。油滴通过喷雾器喷射进入两块相距为  $d$  的平行极板之间。油在喷射撕裂成油滴时,一般都是带电的。调节两极板之间的电压  $U$ ,可使油滴悬浮在空中。设油滴的质量为  $m$ ,所带的电量为  $q$ ,两极板间的电压为  $U$ ,则油滴所受重力  $mg$ ,静电力  $qE = \frac{qU}{d}$ 。油滴悬浮时,重力与电场力平衡(忽略空气浮力):

$$q = mg \frac{d}{U} \quad (1)$$

为了测出油滴所带的电量  $q$ ,除了需测定平衡电压  $U$  和极板间距离  $d$  外,还需要测量油滴的质量  $m$ 。这种测量电量的方法叫静态平衡法。

因  $m$  很小,难直接测量。油滴可视为球状,设密度为  $\rho$ ,油滴的质量  $m$  可表示为:

$$m = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (2)$$

而油滴的半径  $r$  可通过其在重力场中的终极速度求出。平行极板不加电压时,油滴受重力作用而加速下降,由于空气阻力的作用,下降一段距离达到某一速度  $v_g$  后,阻力  $f_r$  与重力  $mg$  平衡,油滴将匀速下降。 $v_g$  称为终极速度。根据斯托克斯定律,阻力  $f_r = 6\pi r \eta v$ ,重力与阻力平衡时:

$$mg = 6\pi r \eta v_g \quad (3)$$

其中  $\eta$  是空气的粘滞系数, $r$  是油滴的半径。

由 (2) 式和 (3) 式得到油滴的半径

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2g\rho}} \quad (4)$$

当两极板间的电压  $U$  为零时,设油滴匀速下降的距离为  $l$ ,时间为  $t_g$ ,则

$$v_g = \frac{l}{t_g} \quad (5)$$

$$r = \sqrt{\frac{9\eta l}{2gt_g\rho}} \quad (6)$$

斯托克斯定律是以连续介质为前提的。对于半径为微米量级的油滴，空气已不能看作连续介质，空气的粘滞系数应作如下修正：

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \quad (7)$$

其中  $b$  是修正常数， $p$  为大气压强。公式中包含油滴的半径  $r$ ，因为它处于修正项中，不需要十分精确，故它仍可以用 (6) 式计算。最后得到理论公式：

$$q = \frac{18\pi d}{\sqrt{2\rho g}} \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \cdot \frac{l}{t_g} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{U} \quad (8)$$

上式就是用静态平衡法测定油滴所带电荷的计算公式。其中，

电容器极板距离	$d = 5.00 \text{ mm}$	大气压强	$p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$
油的密度	$\rho = 981 \text{ kg/m}^3$	油滴下落距离	$l = 1.6 \text{ mm}$
重力加速度	$g = 9.79 \text{ m/s}^2$	油滴半径	$r$ (由公式 (6) 计算)
空气粘滞系数	$\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$	平衡电压	$U$ (待测)
粘滞系数修正常数	$b = 0.00823 \text{ N/m}$	下落时间	$t_g$ (待测)

## 四、实验内容

### 1. 仪器调整

调节仪器面板上的三只平衡旋钮，将平行电极板调到水平。打开仪器和显示器开关，按“确认”键，选“平衡法”，进入测量界面。

### 2. 测量前练习

- (a) 熟悉操作按键。
- (b) 练习喷油和控制油滴平衡。

### 3. 正式测量

将按键 2 置于工作、按键 3 置于平衡、电压调至 200 V 左右。向油雾口喷油，调节显微镜旋钮，寻找移动缓慢的油滴，缓慢旋转“电压调节”，使油滴处于悬浮状态。选取适中的油滴：目视直径  $\approx 1 \text{ mm}$ 。记录此时的平衡电压  $U$ 。将按键 3 切换为“提升”，使油滴上升至顶部网格线，然后将按键 3 切换为“平衡”，使油滴悬浮。然后按下按键 2，使电压为 0 V，油滴匀速下降。当下降到 0 格线时，迅速按下计时按钮，开始计时，待油滴下落至 1.6 mm 格线，停止计时。记下油滴下落时间  $t_g$ 。同一个油滴测量三次下落时间，共测量五个油滴。

### 4. 计算元电荷

- (a) 根据公式 (6) 和 (8)，代入已知量，可以得到计算油滴电荷的简化公式：

$$q = \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{t_g}) t_g]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{U}$$

据此计算油滴所带电荷  $q_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 。

- (b) 计算油滴所带元电荷个数  $n_i$ 。得到每个油滴电量  $q_i$  后，用  $e$  的公认值  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  去除，四舍五入取整得到每个油滴携带的基本电荷个数  $n_i$ 。油滴的元电荷  $e_i = \frac{q_i}{n_i}$ ，对  $e_i$  取平均，求得元电荷值  $\bar{e}$ ，计算元电荷测量值与公认值的相对误差。

## 五、数据记录

原始数据见附录

## 六、数据处理

1. 计算时间平均值;(见附录数据表中的  $\overline{t_g}/s$ )

2. 计算各油滴的电量;

$$\begin{aligned}q_1 &= \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{t_{g1}}) t_{g1}]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{U_1} = \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{17.94}) \times 17.94]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{196} = 6.01 \times 10^{-19} C \\q_2 &= \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{t_{g2}}) t_{g2}]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{U_2} = \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{7.24}) \times 7.24]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{161} = 2.99 \times 10^{-18} C \\q_3 &= \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{t_{g3}}) t_{g3}]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{U_3} = \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{13.67}) \times 13.67]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{295} = 6.10 \times 10^{-19} C \\q_4 &= \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{t_{g4}}) t_{g4}]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{U_4} = \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{14.62}) \times 14.62]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{266} = 6.09 \times 10^{-19} C \\q_5 &= \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{t_{g5}}) t_{g5}]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{U_5} = \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{15.22}) \times 15.22]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{111} = 1.37 \times 10^{-18} C\end{aligned}$$

3. 计算油滴所带元电荷个数  $n_i$ ;

$$\begin{aligned}n_1 &= \frac{q_1}{e} = \frac{6.01 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 4 \text{ (个)} \\n_2 &= \frac{q_2}{e} = \frac{2.99 \times 10^{-18}}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 19 \text{ (个)} \\n_3 &= \frac{q_3}{e} = \frac{6.10 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 4 \text{ (个)} \\n_4 &= \frac{q_4}{e} = \frac{6.09 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 4 \text{ (个)} \\n_5 &= \frac{q_5}{e} = \frac{1.37 \times 10^{-18}}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 9 \text{ (个)}\end{aligned}$$

4. 计算元电荷测量值、与公认值的相对误差。

$$\begin{aligned}e_1 &= \frac{q_1}{n_1} = \frac{6.01 \times 10^{-19}}{4} = 1.50 \times 10^{-19} C \\e_2 &= \frac{q_2}{n_2} = \frac{6.01 \times 10^{-19}}{4} = 1.57 \times 10^{-19} C \\e_3 &= \frac{q_3}{n_3} = \frac{6.01 \times 10^{-19}}{4} = 1.53 \times 10^{-19} C \\e_4 &= \frac{q_4}{n_4} = \frac{6.01 \times 10^{-19}}{4} = 1.52 \times 10^{-19} C \\e_5 &= \frac{q_5}{n_5} = \frac{6.01 \times 10^{-19}}{4} = 1.52 \times 10^{-19} C\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\bar{e} &= \frac{\sum_{i=1}^5 e_i}{5} \\
&= \frac{1.50 \times 10^{-19} + 1.57 \times 10^{-19} + 1.53 \times 10^{-19} + 1.52 \times 10^{-19} + 1.52 \times 10^{-19}}{5} \\
&= 1.53 \times 10^{-19} \text{ C} \\
\frac{\Delta e}{e} &= \frac{|\bar{e} - e|}{e} = \frac{|1.52 \times 10^{-19} - 1.602 \times 10^{-19}|}{1.602 \times 10^{-19}} = 5.119\%
\end{aligned}$$

## 七、误差分析

1. 油滴会做布朗运动, 难以确定油滴是否达到平衡, 导致平衡电压有误差;
2. 大量给定的常数带来系统误差;
3. 油滴受到空气浮力;
4. 实验者测量下落时间产生误差。

## 八、实验结论

本实验利用静态法测量油滴所带电量, 进而测得元电荷为  $e = 1.53 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 与公认值的相对误差为 5.119%。