

## 实验名称 密立根油滴实验

姓名          学号 10182 专业班          实验班          组号         

教师 陈学谦 张震 成绩          批阅教师签名          批阅日期         

实验内容包括: 实验目的,原理,仪器,操作步骤,数据记录与处理, 分析讨论

实验目的

1. 学习密立根油滴实验的设计思想。
2. 通过对带电油滴在重力场和静电场中运动的测量, 验证电荷的不连续性, 并测定基本电荷值  $e$ 。
3. 通过对实验仪器的调整, 油滴的选择、跟踪和测量, 以及实验数据处理等, 培养严谨的科学实验态度。

原理

根据油滴在电场中作直线运动或静止两种运动方式分类, 油滴法测电子电荷分为动态测量法和平衡测量法。

### 1. 动态测量法:

考虑重力场中一个足够小油滴的运动, 设此油滴半径为  $r$ , 质量为  $m_1$ , 空气是粘滞流体, 故此运动油滴除受重力和浮力作用外还受粘滞阻力的作用。由斯托克斯定律, 粘滞阻力与物体运动速度成正比。设油滴以匀速  $v_f$  下落, 则有

$$\underline{m_1 g - m_2 g = K v_f} \quad (1)$$

此处  $m_2$  为与油滴同体积空气的质量,  $K$  为比例常数,  $g$  为重力加速度。油滴在空气及重力场中的受力情况如图示 1。

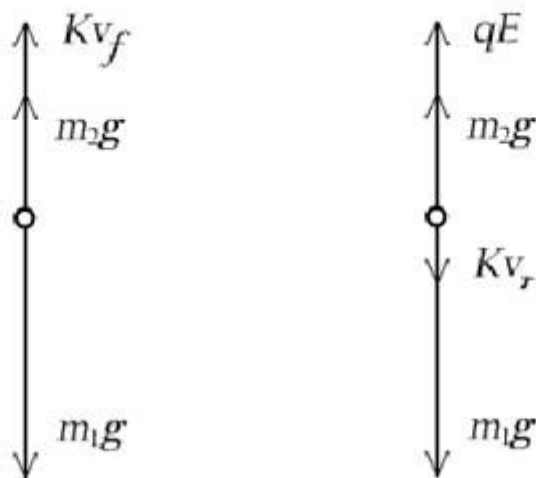


图 1 重力场中油滴受力示意图 图 2 电场中油滴受力示意图

若此油滴带电荷为  $q$ , 并处在场强为  $E$  的均匀电场中, 设电场力  $qE$  方向与重力方向相反, 如图 2 所示, 如果油滴以匀速  $v_r$  上升, 则有

$$qE = (m_1 - m_2)g + Kv_r \quad (2)$$

由式(1)和(2)消去K,可解出q为:

$$q = \frac{(m_1 - m_2)g}{Ev_f}(v_f + v_r) \quad (3)$$

由(3)式可以看出来,要测量油滴上的电荷q,需要分别测出m1, m2, E, vr, vf等物理量。

由喷雾器喷出的小油滴半径r是微米量级,直接测量其质量m1也是困难的,为此希望消去m1,而带之以容易测量的量。设油与空气的密度分别为 $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,于是半径为r的油滴的视重为:

$$(m_1 - m_2)g = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g \quad (4)$$

由斯托克斯定律,粘滞流体对球形运动物体的阻力与物体速度成正比,其比例系数K为 $6\pi\eta r$ ,此处 $\eta$ 为粘度,r为物体半径,于是可将公式(4)带入式(1)有

$$v_f = \frac{2gr^2}{9\eta}(\rho_1 - \rho_2) \quad (5)$$

因此,

$$r = \left[ \frac{9\eta v_f}{2g(\rho_1 - \rho_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

以此带入(3)并整理得到

$$q = 9\sqrt{2}\pi \left[ \frac{\eta^3}{(\rho_1 - \rho_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{E} \left( 1 + \frac{v_r}{v_f} \right) v_f^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

因此,如果测出vr, vf和 $\eta$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , E等宏观量即可得到q值。

考虑到油滴的直径与空气分子的间隙相当,空气已不能看成是连续介质,其粘度需作相应的修正

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}}$$

此处p为空气压强,b为修正常数,b=0.00823N/m,因此,

$$v_f = \frac{2gr^2}{9\eta}(\rho_1 - \rho_2) \left( 1 + \frac{b}{pr} \right) \quad (8)$$

当精确度要求不太高时,常采用近似计算方法,先将vf带入(6)式计算得

$$r_0 = \left[ \frac{9\eta v_f}{2g(\rho_1 - \rho_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

再将此r0值带入'中,并以'入式(7),得

$$q = 9\sqrt{2} \left[ \frac{\eta^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{E} \left( 1 + \frac{v_r}{v_f} \right) v_f^{\frac{3}{2}} \left[ \frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

实验中常常固定油滴运动的距离，通过测量它通过此距离  $s$  所需的时间来求得其运动速度，且电场强度  $E=U/d$ ， $d$  为平行板间的距离， $U$  为所加的电压，因此，式（10）可写成

$$q = 9\sqrt{2}\pi d \left[ \frac{(\eta s)^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{U} \left( \frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_r} \right) \left( \frac{1}{t_f} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

式中有些量和实验仪器以及条件有关，选定之后在实验过程中不变，如  $d, s, (\rho_1 - \rho_2)$  及等，将这些量与常数一起用  $C$  代表，可称为仪器常数，于是式（11）简化成

$$q = C \frac{1}{U} \left( \frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_r} \right) \left( \frac{1}{t_f} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}}$$

由此可知，测量油滴上的电荷，只体现在  $U, t_f, t_r$  的不同。对同一油滴， $t_f$  相同， $U$  和  $t_r$  的不同，标志着电荷的不同。

## 2. 平衡测量法：

平衡测量法的出发点是，使油滴在均匀电场中静止在某一位置，或在重力场中作匀速运动。

当油滴在电场中平衡时，油滴在两极板间受到的电场力  $qE$ ，重力  $m_1g$  和浮力  $m_2g$  达到平衡，从而静止在某一位置，即

$$qE = (m_1 - m_2)g$$

油滴在重力场中作匀速运动时，情形同动态测量法，将式（4），（9）和

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}}$$

带入式（11）并注意到

$$\frac{1}{t_r} = 0$$

则有

$$q = 9\sqrt{2}\pi d \left[ \frac{(\eta s)^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{U} \left( \frac{1}{t_f} \right)^{\frac{3}{2}} \left[ \frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}}$$

## 仪器

---

仪器：密立根油滴仪、显示器、油滴管、实验总体装置

---

## 操作步骤

---

### 1. 主窗口:

打开油滴法测电子电荷的仿真实验

### 2. 实验前准备工作

(1) 开始实验后，从实验仪器栏中点击拖拽仪器至实验桌上。

(2) 双击密立根油滴仪小图标，打开密立根油滴仪。

(3) 双击显示器小图标，打开显示器。

(4) 单击鼠标打开显示器的开关。

(5) 这个时候桌面上会产生密立根油滴仪和显示器等装置的图像。

(6) 单击密立根油滴仪的水平气泡区域打开底座水平调节装置，调节底座进行调节。

在下图中观察水平气泡的位置

(7) 观察油滴在显示器上升、下落的时间。

### 3. 静态法测电子电荷

(1) 单击电源开关，打开电源。

(2) 左击鼠标，使两极板电压产生向上的电场。

(3) 单击油滴管，产生雾状油滴。

(4) 调节“平衡电压”旋钮使控制的油滴处于静止状态。

(5) 点击“确定状态”，记录被控油滴的状态。

(6) 左击“提升”电压档，使被控制油滴上升到最上面的起始位置，为下一步计时做准备。

(7) 右击到“置零”电压档，使被控制油滴匀速下落，开始计时。

(8) 左击到“平衡”电压档，使被控制油滴停止下落处于静止状态，并停止计时，然后记录平衡电压数值和油滴下落时间。

### 4. 动态法测电子电荷

(1) 单击电源开关，打开电源。

(2) 左击鼠标，使两极板电压产生向上的电场。

(3) 单击油滴管，产生雾状油滴。

(4) 调节“平衡电压”旋钮使控制的油滴处于静止状态。

(5) 点击“确定状态”，记录被控油滴的状态。

(6) 左击“提升”电压档，使被控制油滴上升到最上面的起始位置，为下一步计时做准备。

(7) 右击到“置零”电压档，使被控制油滴匀速下落，开始计时。

(8) 左击到“平衡”电压档，使被控制油滴停止下落处于静止状态，并停止计时，然后记录油滴下落时间。

(9) 左击到“提升”电压档，使被控制油滴向上匀速运动，并打开计时器开始计时。

(10) 当被控制油滴运动到起始位置时，计时器停止计时，并将此时的电压值和时间进行记录。

#### 数据记录与处理

##### 第一组数据平衡法

	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
U 平衡/V	336	336	336	336	336	336	336	336	336
t 下/s	23.75	24	23.8	23.8	23.9	24	24	24	23.906
U 上升/V	504	504	504	504	504	504	504	504	504
t 上/s	45.75	46	45.53	46	46	46	46	46	45.91

##### 数据处理

平衡法油滴 q 计算公式如图：

$$q = \frac{18\pi}{(2g\rho)^{1/2}} \cdot \frac{d}{U_{\text{平衡}}} \cdot \left[ \frac{l}{t_f} \right]^{3/2} \cdot \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{3/2}$$
$$r_0 = \left[ \frac{9\eta v_g}{2g\rho} \right]^{1/2}$$

根据  $\rho = 981 \text{ kg/m}^3$ ,  $\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $g = 9.794 \text{ m/s}^2$ ,  $b = 8.22 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ,

$p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $d = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $l = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$

计算得  $q = 9.59322 \times 10^{-19}$ ,  $r_0 = 1.02626 \times 10^{-6}$

$$n_i = \frac{q_i}{e_{\text{公认值}}}$$

n=6

$$e_i = \frac{q_i}{\text{int}[n_i]}$$

计算得  $e_i = 1.5989 * 10^{-19}$

$$E = \frac{|e - e_{\text{公认}}|}{e_{\text{公认}}} \times 100\%$$

计算得  $E=0.2\%$

第二组数据动态法:

	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
U 平衡 /V	199	199	199	199	199	199	199	199	199
t 下/s	15	15.2	15.6	15	15.3	15	15.4	15	15.188
U 上升 /V	243	243	243	243	243	243	243	243	243
t 上/s	30.5	29.6	30.4	29.9	29.4	29.3	30	29.5	29.825

动态法 q 计算公式

$$q = \frac{18\pi l}{(2g\rho)^{1/2}} \cdot \frac{d}{U_{\text{上升}}} \cdot \left[ \frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_r} \right] \cdot \left[ \frac{l}{t_f} \right]^{1/2} \cdot \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{3/2}$$

$$r_0 = \left[ \frac{9\eta v_g}{2g\rho} \right]^{1/2}$$

根据  $\rho = 981\text{kg/m}^3$ ,  $\eta = 1.83 * 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}$ ,  $g = 9.794\text{m/s}^2$ ,  $b = 8.22 * 10^{-3}\text{N/m}$ ,

$p = 1.013 * 10^5\text{Pa}$ ,  $d = 5 * 10^{-3}\text{m}$ ,  $l = 2 * 10^{-3}\text{m}$

计算得  $q = 3.21623\text{E} - 19$ ,  $r_0 = 8.4735\text{E} - 07$

$$n_i = \frac{q_i}{e_{\text{公认值}}}$$

$n=2$

$$e_i = \frac{q_i}{\text{int}[n_i]}$$

计算得  $e_i = 1.6081\text{E} - 19$

$$E = \frac{|e - e_{\text{公认}}|}{e_{\text{公认}}} \times 100\%$$

计算得  $E=0.38\%$

### 第三组平衡法

	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
U 平衡 /V	199	199	199	199	199	199	199	199	199
t 下/s	14	13	14	13.2	14	13.5	14	13	13.588
U 上升 /V	243	243	243	243	243	243	243	243	243
t 上/s	26	27	26.5	27	26.7	27	26.8	27	26.75

计算得  $r_0 = 1.12395 \times 10^{-6}$ ,  $q = 1.29151 \times 10^{-18}$ ,  $n=8.0$ ,  $e = 1.6144 \times 10^{-19}$ ,  $E=0.77\%$

### 分析讨论

#### 1、若平行极板不水平，对测量有何影响？

在密立根实验中，如果两平行带电极板不水平，油滴在电场中运动的时候就会走斜线，或者受到的静电力和重力不在一条直线上，这样移动的距离相比较理论值会偏大，使得误差增加。

#### 2、如何选择合适的油滴进行测量？

平衡电压在 250 到 350 之间，在 15 到 25 秒时间内匀速下降 1.2 毫米的油滴较合适。

#### 3、实验上怎样才能保证油滴做匀速运动？

在密立根油滴试验中，要使得油滴在测量时处于匀速运动状态，只要让油滴下落一小段时间再开始计时就可以了。油滴在空气中下落时，一开始是加速运动，但是很快由于空气阻力，会变成匀速下落，这个时间非常短。

#### 4、怎样判断油滴所带电荷量的改变？

通过测量同一距离所用的时间，如果所用时间有明显的改变，则说明油滴所带的电荷量改变了。