

西安石油大学

物理实验报告

班级 三年级一班 姓名 小美 学号 10086 实验日期 2025.6.12

实验名称：密里根油滴实验

一、实验目的

1. 了解密里根油滴仪的结构，掌握利用滴定法测定电子电荷的设计思路和方法。
2. 了解 CCD 图像传感器的原理和电视显微测量方法
3. 学会使用图示法处理数据

二、实验原理

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。

2.1、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

$$m_1g - m_2g = K v_f \quad (1)$$

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 1所示。

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

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

由式（1）和（2）消去 K ，可解出 q 为：

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

设油与空气的密度分别为 ρ_1, ρ_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 η 为粘度， r 为物体半径，于是可将公式（4）带入式（1）有

$$6\pi\eta r v_f = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g \quad (5)$$

因此，

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2(\rho_1 - \rho_2)g}} \quad (6)$$

以此带入（3）并整理得到

$$q = \frac{18\pi\eta^{3/2}(\rho_1 - \rho_2)^{-1/2}g^{-1/2}(v_f + v_r)v_f^{1/2}}{E} \quad (7)$$

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 η 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， $b = 0.00823 \text{ N/m}$ ，因此，

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2(\rho_1 - \rho_2)g(1 + \frac{b}{pr})}} \quad (8)$$

当精确度要求不太高时，常采用近似计算方法，先将 v_f 带入（6）式计算得

$$r_0 = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2(\rho_1 - \rho_2)g}} \quad (9)$$

再将此 r_0 值带入 η' 中，并以 η' 入式（7），得

$$q = \frac{18\pi\eta^{3/2}(\rho_1 - \rho_2)^{-1/2}g^{-1/2}(v_f + v_r)v_f^{1/2}}{E\left(1 + \frac{b}{pr_0}\right)^{3/2}} \quad (10)$$

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

$$q = \frac{18\pi\eta^{3/2}(\rho_1 - \rho_2)^{-1/2}g^{-1/2}d(t_f + t_r)t_f^{1/2}}{Us^{1/2}\left(1 + \frac{b}{pr_0}\right)^{3/2}} \quad (11)$$

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 η 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

$$q = C \frac{(t_f + t_r)t_f^{1/2}}{U}$$



图 1: 重力场中油滴受力示意图

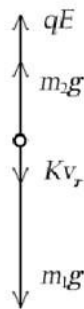


图 2: 电场中油滴受力示意图

2.2、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 $m_1 g$ 和浮力 $m_2 g$ 达到平衡，从而静止在某一位置，即

$$qE = (m_1 - m_2)g \quad (12)$$

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

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr_0}}$$

带入式（11）并注意到 $v_r = 0$ ，则有

$$q = \frac{18\pi\eta^{3/2}(\rho_1 - \rho_2)^{-1/2}g^{-1/2}dt_f^{1/2}}{Us^{1/2}\left(1 + \frac{b}{pr_0}\right)^{3/2}} \quad (13)$$

2.3、元电荷的测量方法

测量油滴上带的电荷的目的是找出电荷的最小单位 e 。为此可以对不同的油滴，分别测出其所带的电荷值 q_i ，它们应近似为某一最小单位的整数倍，即油滴电荷量的最大公约数，或油滴带电量之差的最大公约数，即为元电荷。

实验中采用紫外线，X 射线或放射源等改变同一油滴所带的电荷，测量油滴上所带电荷的改变值 Δq_i ，而 Δq_i 值应是元电荷的整数倍。即

$$\Delta q_i = n_j e \quad (\text{其中 } n_j \text{ 为一整数}) \quad (14)$$

也可以用作图法求 e 的值，根据式 (14)， e 为直线方程的斜率，通过测量大量油滴的电量，拟合直线，即可求得 e 值。

三、实验步骤及注意事项

3.1、选择适当的油滴并测量油滴上所带电荷

要做好油滴实验，所选的油滴体积要适中，大的油滴虽然比较亮，但下降速度快，不容易测准确；太小则受布朗运动的影响明显，测量结果涨落很大，也不容易测准确。因此应该选择质量适中，而带电不多的油滴。

3.2、调整油滴实验装置

油滴实验装置由油滴盒、油滴照明装置、调平系统、测量显微镜、供电电源、电子停表及喷雾器等组成，其结构如图 3 所示。其中油滴盒是由两块经过精磨的金属平板，中间垫以胶木圆环，构成的平行板电容器。在上板中心处有落油孔，使微小油滴可以进入电容器中间的电场空间，胶木圆环上有进光孔、观察孔。进入电场空间内的油滴由照明装置照明，油滴盒可通过调平螺旋调整水平，用水准仪检查。油滴盒防风罩前装有测量显微镜，用来观察油滴。

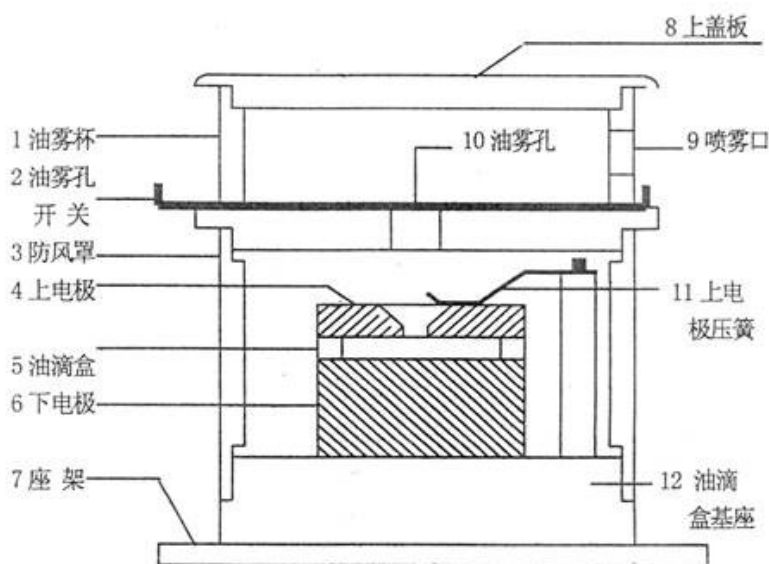


图 3: 密里根油滴实验装置图

电容器极板上所加电压由直流平衡电压和直流升降电压两部分组成。其中平衡电压大小连续可调，并可从显示屏上直接读数，其极性由换向开关控制，以满足对不同极性电压的需要。升降电压的大小可连续调节，并可通过换向开关叠加在平衡电压上，以控制油滴在电容器内上下位置。

油滴实验是一个操作技巧要求较高的实验，为了得到满意的实验结果，必须仔细认真调整油滴仪，具体步骤如下：

1. 调节调平螺丝，将平行电极板调到水平，使平衡电场方向与重力方向平行，避免引起实验误差。
2. 调节显微镜焦点，使油滴清晰显示在显示屏上。
3. 喷雾器用于快速向油滴仪内喷油雾，喷射过程中由于摩擦作用可使油滴带电。

当油雾从喷雾口喷入油滴室内后，视场中将出现大量清晰的油滴，此时可加上平衡电压，改变其大小和极性，驱散不需要的油滴，练习控制其中一颗油滴的运动，并记录油滴经过两条横丝间距所用的时间。

3.3、 正式测量

1. 选取平衡电压约 200V、匀速下降时间约 20s—35s 的油滴，测量油滴匀速运动 2mm 所用的时间。油滴过大则下降速度过快，过小则布朗运动明显，均会影响测量精度。

数据处理时所需的参数值如下：

油密度	$\rho = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
空气密度	$\rho = 1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} (20^\circ\text{C})$
重力加速度	查当地值
空气粘滞系数	$\eta = 1.832 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) (23^\circ\text{C})$
平行板间距	$d = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$
修正系数	$b = 8.23 \times 10^{-3} \text{ N/m}$

2. 计算每个油滴的带电量，采用倒过来验证的方法：用公认的电子电量值去除每个油滴的电量，取最接近的整数，再用该整数除油滴的电量，得到电子电荷的测量值。
3. 将电子电荷的测量值与理论值进行比较，计算相对百分误差。为提高测量精度，每个油滴上下往返次数不宜少于 8 次。

四、 原始数据记录

4.1、 实验设备及器件记录

密立根油滴仪、显示器、油滴管、实验总体装置

4.2、实验数据记录

表 1: 平衡电压与油滴下降时间测量数据

测量次数	1	2	3	4	5
平衡电压 (V)	204	204	204	204	204
油滴匀速下降 2mm 所用时间 (s)	14.18	14.16	14.16	14.18	14.18

数据处理:

平衡电压平均数值	204 V
油滴匀速下降 2mm 所用时间平均值	14.17 s
油滴的带电量 ($\times 10^{-19}$ C)	1.536
基本电荷的带电量 ($\times 10^{-19}$ C, 理论值)	1.601
基本电荷相对误差结果	4.18%

五、实验结论与误差分析

5.1、误差分析

1. 选取油滴时，难以保证油滴完全静止，导致计算出的电量存在误差。2. 计算过程中数据精度有限，加上有效数字的取舍，进一步导致结果偏差。3. 油滴在空气中的蒸发、空气流动等环境因素也可能对测量结果产生影响。

5.2、实验结论

本实验通过密里根油滴实验测量了油滴所带电荷，计算得到电子电荷的测量值为 1.536×10^{-19} C，与理论值 1.601×10^{-19} C 相比，相对误差为 4.18%。实验结果验证了电子电荷的量子化特性，即电荷是以元电荷 e 为单位的整数倍存在的，成功实现了利用油滴法测定电子电荷的目标。

评阅老师: _____

评阅时间: _____