

密立根油滴实验

电子电荷(元电荷)是物理学基本常数之一。通过油滴实验，密立根首次得到了电子电荷的精确值。同时，油滴实验还证实电荷分布是量子化的。由于元电荷测定及光电效应的贡献，密立根获得 1923 年诺贝尔物理学奖。本实验目的是测量元电荷，学习实验的设计思想。

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。如果调节两极板之间的电压 U ，可使油滴悬浮在空中，如图 1 所示。设油滴的质量为 m ，所带的电量为 q ，两极板间的电压为 U ，则油滴在平行极板之间所受重力 mg ，静电力 $qE = qU/d$ 。

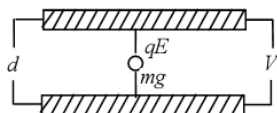


图 1 带电油滴受力图

油滴悬浮时，重力与电场力平衡

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

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 ρ ，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，如图 2 所示（空气浮力忽略不计），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 η 是空气的粘滞系数，是 r 油滴的半径。

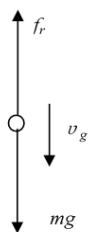


图 2 油滴受力图($E=0$)

由 (2) 式和 (3) 式得到油滴的半径

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

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

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

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

斯托克斯定律是以连续介质为前提的，对于半径小到 10^{-6}m 的微小油滴，已不能将空气看作连续介质，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。

最后得到理论公式：

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

上式就是用平衡法测定油滴所带电荷的计算公式。该式中还包含油滴的半径 r ，但因为它处于修正项中，不需要十分精确，故它仍可以用 (4) 式计算。已知参数： $b=0.00823\text{N/m}$, $\rho=981\text{kg/m}^3$, $g=9.79\text{m/s}^2$, $\eta=1.83 \times 10^{-5}\text{kg/(m.s)}$, $p=1.013 \times 10^5\text{Pa}$, $d=5.00\text{ mm}$, $l=1.6\text{ mm}$ 。待测参数为平衡电压 U 及下落时间 t_g 。

实验仪器

油滴实验装置是油滴盒，油滴照明装置，调平系统，测量显微镜，供电电源以及电子停表，喷雾器等组成的，其实验装置如图 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，并连接 CCD。

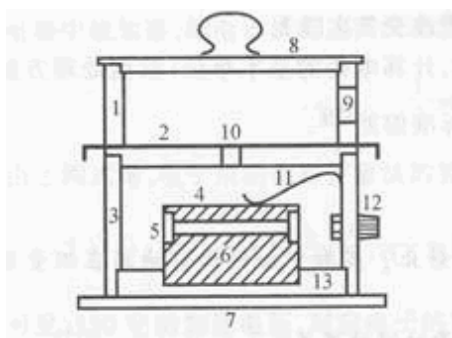


图 3 油滴实验装置图 1—油雾室；2—油雾孔开关；3—防风罩；4—上电极板；5—胶木圆环；6—下电极板；7—底板；8—上盖板；9—喷雾口；10—油雾孔；11—上电极板压簧；12—上电极板电源插孔；13—油滴盒基座

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。(如果极板不水平对测量有什么影响?)

2. 测量前的练习

(1) 熟悉操作按键。**按键 1**：计时开始/结束。**按键 2**：0V/工作，电压在 0V 和工作状态之间切换。**按键 3**：平衡/提升，工作电压可在平衡电压和提升电压之间切换，提升电压比平衡电压高约 200V。

(2) 练习控制油滴平衡。用喷雾器向油滴盒内喷油，仔细调节“电压调节”旋钮，使油滴置于分划板上某条横线附近，以便准确判断出这颗油滴是否平衡了。**注意**：不要连续喷多次，以防堵塞极板上的小孔。

3. 正式测量

测量时，选取目视直径在 1mm 左右的油滴，平衡电压为 200-300V，匀速下落 1.6mm 的

时间为 20s 左右。此时，油滴电量 q 和不确定度均较小。要求测 5 个不同的油滴。(此时油滴带多少个元电荷?不确定度有多大?)

将按键 2 置于工作，按键 3 置于平衡，将电压调至 250V 左右。向油雾口喷油，调节显微镜旋钮，寻找移动缓慢的油滴，**细调“电压调节”，使油滴处于静止状态**。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”，使油滴静止。然后按下按键 2，使电压为“0V”，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 1.6mm 格线，停止计时。记下油滴匀速下降的时间 t_g 。

测量完一次后，使油滴上升至顶部格线。对同一颗油滴应测 3 次 t_g 。

4.计算元电荷

a)根据公式(6)和(8)计算油滴所带电荷。也可参考简化公式。

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 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ 去除，四舍五入取整得到每个油滴带基本电荷个数 n_i 。油滴的元电荷 $e_i = q_i / n_i$ ，对 e_i 取平均，求得元电荷值。计算元电荷测量值与公认值的相对误差。

思考题

油滴实验有两种方法：静态法和动态法，简述动态法原理（不超过 3 行字），比较两种方法的差异。

参考文献

1. Charge is quantized, Halliday *et al*, Principles of Physics (9th Edition), chapter 21, pages 570-571.
2. Measuring the elementary charge, Halliday *et al*, Principles of Physics (9th Edition), chapter 22, page 592.
3. 用密立根油滴实验测量电子电荷, 吴泳华, 霍剑青, 浦其荣, 大学物理实验 (第一册第二版), 第 8 章, 实验 8.1.1。
4. R. A. Millikan 1911, "On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant." Phys. Rev. 32, 349

报告要求

实验名称

密立根油滴实验

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。

实验仪器

密立根油滴实验装置、油滴喷雾器

实验原理

阅读实验讲义，重点弄清以下问题。

1. 理解实验的设计思想。油滴电荷为微观量，将其转换为宏观量测量。
2. 理解终极速度。油滴质量如何测量。

实验内容

见讲义，简要概括。

数据记录

表 1 不同油滴的数据表

油滴编号	U/V	t_{g1}/s	t_{g2}/s	t_{g3}/s	平均 t_g/s
1					
2					
3					
4					
5					

数据处理

1. 计算时间平均值。计算各油滴的电量 q 。可参考以下简化公式。
2. 计算元电荷、元电荷平均值及与公认值的相对误差。

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

据此公式计算得到的结果单位为：库伦 (C)。

$$A = 9\pi d \sqrt{\frac{2\eta^3 l^3}{\rho g}} = 1.022 \times 10^{-14} \quad B = \frac{b}{p} \sqrt{\frac{2\rho g}{9\eta l}} = 0.02193$$

3. 估算元电荷的相对不确定度。

任取一个油滴的数据，利用下面的公式估算元电荷相对不确定度 (仅考虑 B 类)。其中,仪器显示电压的不确定度是 1 V，而人操作计时的反应时间为 0.2 s。即 $\Delta U=1V$ ， $\Delta t_g=0.2s$ 。

$$\frac{\Delta e}{e} = \frac{\Delta q}{q} \approx \frac{\Delta U}{U} + \frac{3}{2} \frac{\Delta t_g}{t_g}$$

实验结论

简要陈述实验目的, 方法及结果。根据实验精度, **元电荷结果保留 3 位有效数字即可**。

将元电荷的相对误差与估算的不确定度比较，评估结果是否合理。

分析可能的误差来源。

思考题

回答讲义中的思考题。

更新时间：2022 年 1 月