

基本电荷测定——密立根油滴实验

密立根 (*R. A. Millikan*) 是著名的实验物理学家, 1907 年开始, 他在总结前人实验的基础上, 着手电子电荷量的测量研究, 之后改为以微小的油滴作为带电体, 进行基本电荷量的测量, 并于 1911 年宣布了实验的结果, 证实了电荷的量子化。此后, 密立根又继续改进实验, 精益求精, 提高测量结果的精度, 在前后十余年的时间里, 做了几千次实验, 取得了可靠的结果, 最早完成了基本电荷量的测量工作。密立根的实验设备简单而有效, 构思和方法巧妙而简洁, 他采用了宏观的力学模式来研究微观世界的量子特性, 所得数据精确且结果稳定, 无论在实验的构思还是在实验的技巧上都堪称是第一流的, 是一个著名的有启发性的实验, 因而被誉为实验物理的典范。由于密立根在测量电子电荷量以及在研究光电效应等方面的杰出成就, 而荣获 1923 年诺贝尔物理学奖。

【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, 培养学生严谨的科学实验态度。

【实验原理】

利用带电荷的微小油滴在均匀电场中运动的受力分析, 可将油滴所带的微观电荷量 q 的测量转化为油滴宏观运动速度的测量。

1. 静态平衡测量法

一带电油滴在水平的平行板均匀电场中受到重力 mg 、电场力 qE 和空气浮力 f 作用, 平衡时有 $mg = qE + f$, 即

$$q = \frac{mg - f}{E} \quad (1)$$

因表面张力作用, 油滴呈小球状, 设油滴半径为 r , 油滴的密度为 ρ_0 , 则重力和浮力分别为

$$mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_0 \cdot g$$
$$f = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho' \cdot g \quad (2)$$

式中 ρ' 为空气的密度。上式中油滴半径 r 为未知量, 由此油滴电荷量 q 的测量转化为微

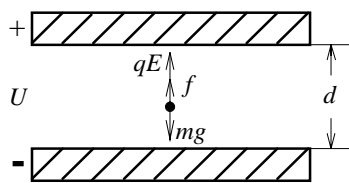


图1-1-1电场中油滴受力情况

小油滴半径 r 的测量。

当平行板未加电压，油滴在重力作用下降落时，除有空气浮力作用外，还受到空气对油滴的粘滞力作用，粘滞力可由斯托克斯定律给出

$$f_r = 6\pi\eta rV$$

式中 η 为空气的粘滞系数， V 为油滴运动速度。空气的粘滞力、浮力和油滴的重力平衡时，油滴作匀速运动，设速度为 V_g ，则有

$$f_r = 6\pi\eta rV_g = \frac{4}{3}\pi(\rho_0 - \rho')r^3g = \frac{4}{3}\pi\rho r^3g$$

式中 $\rho = (\rho_0 - \rho')$ 。由此从油滴运动速度 V_g 可得出油滴半径

$$r = \left(\frac{9\eta V_g}{2g\rho} \right)^{1/2} \quad (3)$$

当平行板电压为零时，油滴作匀速运动的速度 $V_g = l/t_g$ ，若测得油滴下降的距离 l 和相应的时间 t_g ，则可得出

$$V_g = \frac{l}{t_g} \quad (4)$$

由此，油滴所带电荷量 q 的测量，最终转化为油滴运动的距离 l 和所需时间 t_g 的测量。

由(1)-(4)式，可得带电油滴在平行板电压为 U 的电场中，受重力、空气浮力作用而平衡时的电荷量

$$q = \frac{18\pi(\eta)^{3/2}}{(2g\rho)^{1/2}} \cdot \frac{d}{U} \cdot \left(\frac{l}{t_g} \right)^{3/2} \quad (5)$$

此即平衡测量法测量油滴所带电荷的理论公式。

2. 动态非平衡测量法

为解决静态平衡法中由于气流扰动而产生的非预期的影响以及油滴蒸发引起的误差，可在平行极板上加电场 E_2 ，使 $qE_2 > mg$ ，且电场方向与重力方向相反，则带电油滴将向上作加速运动。速度增加时，空气对油滴的粘滞力也随之增大，直到油滴所受诸力又达平衡后，油滴将以速度 V_2 匀速上升，此时油滴受力为

$$qE_2 + f = mg + f_r = mg + 6\pi\eta rV_2$$

若固定油滴运动的距离 l ，测量通过距离 l 所需时间 t_2 即可得相应的速度 V_2 。整理可得

$$q = k \left(\frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{l}{t_g} \right)^{1/2} \eta^{3/2} \left(\frac{1}{U_2} \right) \quad (7)$$

$$\text{其中 } k = \frac{18\pi dl}{(2\rho g)^{1/2}}。$$

3. 对粘滞系数的修正

斯托克斯定律适用于连续介质中球状物体所受的粘滞力。由于油滴甚小，其直径可和空气分子的平均自由程相比拟，所以不能再将空气看成是连续介质，油滴所受粘滞力必将减小，粘滞系数应修正为

$$\eta' = \eta / \left(1 + \frac{b}{pr}\right) \quad (8)$$

式中修正系数 $b = 8.22 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$ ， p 为以 Pa 为单位的大气压强。上式修正项中还包含油滴半径 r ，当精确度要求不太高时，常采用类似一次微扰法的计算方法，用(3)式求得 r_0

$$r_0 = \left(\frac{9\eta V_g}{2g\rho}\right)^{1/2}$$

代入(8)式，由此得(5)式的修正式为

$$q = \frac{18\pi}{(2g\rho)^{1/2}} \cdot \frac{d}{U} \cdot \left(\frac{l}{t_g}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr_0}}\right)^{3/2} \quad (9)$$

(7)式的修正式为

$$q = k \left(\frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_g}\right) \left(\frac{l}{t_g}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{U_2}\right) \left(\frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr_0}}\right)^{3/2} \quad (10)$$

比较(9)式和(10)式，当调节电压 U_2 等于平衡电压 U 时， $t_2 \rightarrow \infty$ ，两式相一致，可见平衡测量法是非平衡测量法的一个特殊情况。

4. 基本电荷 e 的计算

为了证明电荷的不连续性和所有电荷都是基本电荷 e 的整数倍，并得到基本电荷 e 值，应对实验测得的各个电荷量 q 求最大公约数，这个最大公约数就是基本电荷 e 值，也就是电子的电荷值。但由于存在测量误差，要求出各个电荷量 q 的最大公约数比较困难。通常可用“倒过来验证”的办法进行数据处理，即用公认的电子电荷值 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 去除实验测得的电荷量 q ，得到一个接近与某一个整数的数值，这个整数就是油滴所带的基本电荷的数目 n ，再用这个 n 去除实验测得的电荷量 q ，即得电子的电荷值 e 。

用这种方法处理数据，只能是作为一种实验验证。而且仅在油滴的带电量比较少（少

数几个基本电荷)时,可以采用。当 n 值较大时,带来误差的0.5个电子的电荷在分配给 n 个电子时,误差必然很小,其结果 e 值总是十分接近于 1.602×10^{-19} 库仑。这也是实验中不宜选用带电量比较多的油滴的原因。

【实验仪器】

MOD-5型密立根油滴仪如图2和图3所示。

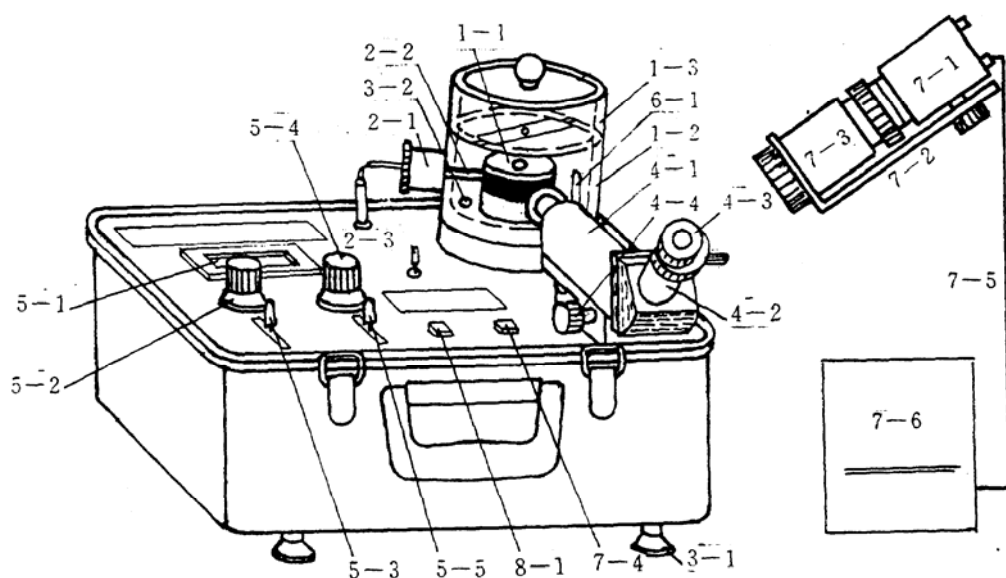


图2 油滴仪结构图

- 1-1 油滴盒; 1-2 防风罩; 1-3 油雾室; 2-1 油滴照明灯; 2-2 导光棒; 2-3 照明灯电源插座;
 3-1 调平螺丝; 3-2 水准泡; 4-1 测量显微镜; 4-2 目镜头; 4-3 接目镜; 4-4 调焦手轮;
 5-1 数字电压表; 5-2 工作电压调节旋钮; 5-3 工作电压反向开关; 5-4 升降电压调节旋钮;
 5-5 升降电压反向开关; 6-1 低压汞灯 (A型、AC型无); 6-2 汞灯按钮 (显微镜右侧);
 7-1 CCD (仅AC型、BC型有); 7-2 CCD托板; 7-3 CCD接筒; 7-4 CCD电源插座; 7-5 视频电缆;
 7-6 监视器; 8-1 计时器插座

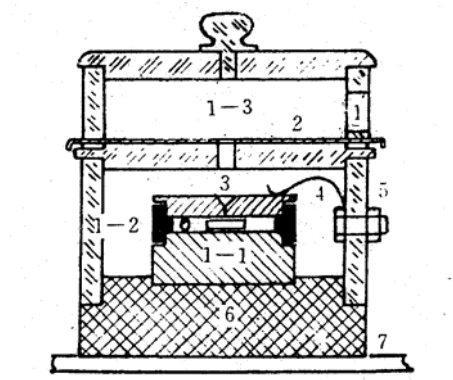


图3 油滴盒

- 1 喷雾口；2 油雾口开关；3 油雾孔；4 上电极板压簧；
5 外接电源插孔；6 油滴盒基座；7 油滴仪面板

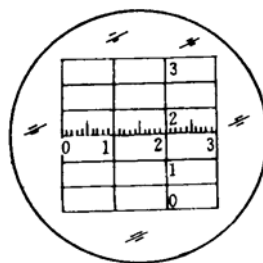


图4 分划板

油滴仪包括油滴盒、照明装置、调平装置、测量显微镜、电源、计时器、喷雾器等。MOD-5B 型密立根油滴仪带有低压汞灯，可改变油滴所带的电荷量。MOD-5BC 型密立根油滴仪还配有 CCD 电子显示装置。

油滴盒是由两块经过精磨的平行极板（上、下电极）中间垫以胶木圆环组成，胶木圆环上有进光孔、观察孔和石英玻璃窗口，油滴盒放在防风罩中。上电极中央有一个直径 0.4 毫米的小孔，油滴从油雾室经油雾孔落入小孔，进入上下电极之间。

油滴盒防风罩前装有测量显微镜，用以观察平行极板间的油滴。测量显微镜目镜头中装有分划板（图 4），其垂直总刻度相当于视场中的 0.3 厘米，用以测量油滴运动的距离。分划板中间的横向刻度可用来观测油滴的布朗运动。

电源部分提供四种电压：①3.6V 油滴照明电压；②500V 直流工作电压，该电压可连续调节，从数字电压表上直接读数，并由工作电压反向开关改变上下电极板的极性；③200V 左右的直流升降电压，该电压叠加在工作电压上，以控制油滴在视场中的合适位置，升降电压高，油滴移动速度快，反之则慢，该电压在电压表上无指示；④12V CCD 电源电压。

【实验内容】

1. 调整仪器

将仪器放平稳，调节仪器底部左右两只调平螺丝，使水准泡指示水平，这时平行极板处于水平位置。先预热 10 分钟，利用预热时间，从测量显微镜中观察，如果分划板位置

不正，则转动目镜头，将分划板放正，目镜头要插到底。调节目镜，使分划板刻线清晰。

将油从油雾室旁的喷雾口喷入（喷口持平喷一次即可），微调测量显微镜的调焦手轮，使视场中出现大量清晰的油滴。如果视场太暗，油滴不够明亮，或视场上下亮度不均匀，可略微转动油滴照明灯的万向节，使小灯珠前面的聚光珠正对前方。

注意：调整仪器时，如果打开有机玻璃油雾室，必须先将平衡电压反向开关置“0”。

2. 练习测量

①练习控制油滴：用平衡法实验时，在平行极板上加工作（平衡）电压 250V 左右，反向开关放在“+”或“-”侧均可，赶走不需要的油滴，直到剩下几颗缓慢运动的为止。注视其中的某一颗，仔细调节平衡电压，使这颗油滴静止不动。然后去掉平衡电压，让它匀速下降，下降一段距离后再加上平衡电压和升降电压，使油滴上升。如此反复多次地进行练习，以掌握控制油滴的方法。

②练习测量油滴运动的时间：任意选择几颗运动速度快慢不同的油滴，用停表测出它们下降一段距离所需要的时间。或者加上一定的电压，测出它们上升一段距离所需要的时间。如此反复多练几次，以掌握测量油滴运动时间的方法。

③练习选择油滴：要做好本实验，很重要的一点是选择合适的油滴。选的油滴体积不能太大，太大的油滴虽然比较亮，但带的电荷比较多，下降速度也比较快，时间不容易测准确。油滴也不能选的太小，太小则布朗运动明显。通常选择平衡电压在 200 伏特以上，在 20~30 秒时间内匀速下降 2 毫米的油滴，其大小和带电量都比较合适。

④练习改变油滴的带电量：对 MOD-5 型密立根油滴仪，可以改变油滴的带电量。按下汞灯按钮，低压汞灯亮，约 5 秒钟，油滴的运动速度发生改变，这是油滴的带电量已经改变了。

3. 正式测量

①平衡测量法：从(5)或(9)式可见，用静态平衡测量法实验时要测量的有两个量，一个是平衡电压 U ，另一个是油滴匀速下降一段距离 l 所需要的时间 t_g 。测量平衡电压必须经过仔细的调节，并将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。

测量油滴匀速下降一段距离 l 所需要的时间 t_g 时，应先让油滴下降一段距离后再测量时间。选定测量的一段距离 l ，应该在平行板之间的中央部分，即视场中分划板的中央部分。若太靠近上电极板，小孔附近有气流，电场也不均匀，会影响测量结果。若太靠近下电极板，测量完时间 t_g 后，油滴容易丢失，影响测量。一般取 l 为 0.2 厘米比较合适。

对同一颗油滴应进行 10~12 次测量，而且每次测量都要重新调整平衡电压。如果油滴逐渐变得模糊，要微调测量显微镜跟踪油滴，勿让油滴丢失。

用同样方法分别对 4~5 颗油滴进行测量，对 MOD-5B 型密立根油滴仪，也可用改变

油滴带电量的办法，反复对同一颗油滴进行实验，求得电子电荷 e 。

②动态非平衡测量法：具体方法学生可根据实验原理自拟。

【实验已知参数】

$$g = 9.794 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}、\rho_0 = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}、\rho' = 1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}、d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}、$$
$$\eta_{t=20^\circ\text{C}} = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}、p_{t=20^\circ\text{C}} = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}、b = 8.22 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$$

【思考题】

1. 若平行极板不水平，对测量有何影响？
2. 如何选择合适的油滴进行测量？
3. 实验上怎样做才能保证油滴做匀速运动？
4. 怎样判断油滴所带电荷量的改变？

【参考文献】

1. R.A.Millikan, Phys.Rev. Vol.21(1923)483; Vol.22(1923)409
2. 潘人培等，物理实验教学参考书，高等教育出版社（1990）