

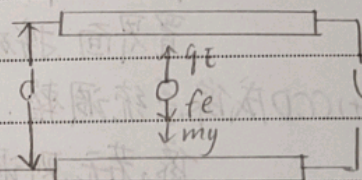
实验目的

- ① 了解密立根油滴实验的设计思想、实验方法和实验技巧
- ② 学习CCD图像传感器的原理和应用
- ③ 验证电荷的不连续性，测定电子电荷量

实验原理

一质量为 m 、带电量为 q 的油滴受重力作用而加速下落。在油滴下落过程中，将受到空气黏滞阻力的作用。根据斯托克定律，空气的黏滞阻力与油滴运动速度成正比。当油滴下落一段距离后空气黏滞阻力和油滴重力达平衡，此时油滴作匀速直线运动，速度为 v_g ，则有 $6\pi\eta a v_g + mg = qE$ ①。

当该油滴处于相距为 d 的水平极板中间时，给极板加电压 V 后，油滴将处在场强为 E 的静电场中，若电场力 qE 与重力方向相反且大于油滴重力，此时油滴将加速上升。由于空气黏滞阻力的作用，油滴上升一段距离后达平衡，油滴将匀速上升，速度为 v_e ，则 $6\pi\eta a v_e + mg = qE$ ②。用 $E = \frac{V}{d}$ ③，由①②③，解得 $q = mg \frac{d}{V} \left(\frac{v_g + v_e}{v_e} \right)$ ④。



在实验过程中油滴悬浮于极板间，由于油滴表面张力的作用，可将油滴视为圆球，其质量可表示为： $m = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho$ ⑤，式中 ρ 为油滴的密度。由①⑤得油滴的半径 $a = \left(\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{2}}$ ⑥。由于油滴非常小，此时空气已不能看为连续介质，空气黏滞系数应修正为： $\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{\eta}{p a}}$ ⑦，式中 b 为修正系数， p 为空气压强。 a 为未经修正过的油滴半径，由于 a 在修正项中，不必计算很精确，由⑥计算即可。

实验时取油滴匀速下降和匀速上升的距离均为 l ，测出油滴匀速下降的时间 t_g ，匀速上升的时间 t_e ，则 $v_g = \frac{l}{t_g}$ ， $v_e = \frac{l}{t_e}$ ⑧。将⑤⑥⑦⑧代入④，可得： $q = \frac{18\pi}{\eta g} \left[\frac{\eta l}{1 + \frac{\eta}{p a}} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{1}{V} \left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_e} \right)^{\frac{1}{2}}$ ，令 $K = \frac{18\pi}{\eta g} \left[\frac{\eta l}{1 + \frac{\eta}{p a}} \right]^{\frac{3}{2}} d$ ⑨，可得出： $q = \frac{K}{V} \left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_e} \right)^{\frac{1}{2}}$ ⑩。此式为动态法测油滴带电量公式。

下面导出静态法测电子电荷量的公式，调节平行极板间的电压，使初始时油滴不动，即 $v_e = 0$ ，则 $t_e \rightarrow \infty$ ，由式⑩可得 $q = K \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{V}$ 。

分别测量多个油滴的带电量 q ，由于任何油滴的带电量都是电子电荷量 e 的整数倍，所以各个油滴电荷量 q 的最大公约数就是电子电荷量 e 。

实验仪器

ZKY-MLG-6型密立根油滴实验仪,由主机、CCD成像系统、油滴盒、监视器等组成。

实验步骤与数据记录

1. 调整油滴实验仪

(1) 水平调整: 调整实验仪面板上的调平螺钉,使水准仪中气泡处于中央圆环内,仪器处于水平状态,平衡电场沿竖直方向

(2) 喷雾器调整: 将少量钟表油缓慢地倒入喷雾器中的储油腔内,使钟表油淹没提油管下方,将喷雾器竖起,用手挤压气囊,使提油管内充满钟表油

(3) 进入实验界面,打开实验仪和监视器电源,按主机上任意键,监视器出现参量设置界面,按确认键出现实验界面,切换至“工作”,红灯亮,设置“平衡”

(4) CCD成像系统调整: 从喷雾口喷入油雾,此时监视器上应该出现大量运动油滴图像,若无,则调整调焦旋钮,检查喷雾是否有油雾喷出或落油孔是否堵塞

2. 选择适当的油滴

调节电压平衡旋钮将电压调至400V以上,喷入油雾,此时监视器出现大量运动的油滴,观察上升较慢且明亮的油滴,然后降低电压,使之达到平衡状态

3. 测量油滴平衡电压及下落速度

(1) 将“平衡/提升”键置于“提升”,油滴向上运动,当回到高于有“0”标记的格线时,将“平衡/提升”键设置为平衡状态,微调电压旋钮使其静止,记录当下电压

(2) 将“0V/工作”键切换至“0V”,此时油滴开始下落,当油滴下落至有“0”标记的格线时,按下计时键开始计时,当油滴下落至有距离标记的格线时,再次按下计时键停止计时(此时“0V/工作”键切换至“工作”,油滴停止移动)

(3) 重复步骤(1)(2),共测量5次,共测量3个油滴带电量

油滴	平衡电压/V	下落时间/s	平均电压/V	平均时间/s	油滴所带电量/ $10^{19}e$
1	176	12.36 12.25 12.87 12.96 12.21	176	12.53	13.1
2	209	15.71 15.64 15.59 15.76 16.32	209	15.80	7.77
3	320	18.52 18.71 19.41 19.66 18.72	320	19.00	3.34

2.3

调节电压平衡旋钮将电压调至400V以上, 喷入油雾, 此时监视器出现大量运动的油滴, 观察上升较慢且明亮的油滴, 然后降低电压, 使之达到平衡状态

3. 测量油滴平衡电压及下落速度

(1) 将“平衡/提升”键置于“提升”, 油滴向上运动, 当回到高于有“0”标记的格线时, 将“平衡/提升”键设置为平衡状态, 微调电压旋钮使其静止, 记录当下电压

(2) 将“0V/工作”键切换至“0V”, 此时油滴开始下落, 当油滴下落至有“0”标记的格线时, 按下计时键开始计时, 当油滴下落至有距离标记的格线时, 再次按下计时键停止计时 (此时“0V/工作”键切换至“工作”, 油滴停止移动)

(3) 重复步骤(1)(2), 共测量5次, 共测量3个油滴带电量

实验数据处理

1. 第一滴油滴

$$t_1 = \frac{1}{5} (12.36 + 12.25 + 12.87 + 12.96 + 12.21) = 12.53$$

$$v_1 = \frac{L}{t_1} = \frac{1.6 \times 10^{-3}}{12.53} = 1.28 \times 10^{-4}$$

$$a_1 = \left(\frac{9\eta v_1}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{9 \times 1.83 \times 10^{-5} \times 1.28 \times 10^{-4}}{2 \times 981 \times 9.792} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.05 \times 10^{-4}$$

$$k_1 = \frac{18\eta}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta L}{1 + \frac{b}{Pa_1}} \right]^{\frac{3}{2}} d = \frac{18 \times 3.14}{\sqrt{2 \times 981 \times 9.792}} \times \left[\frac{1.83 \times 10^{-5} \times 1.6 \times 10^{-3}}{1 + 0.00823 \div (101325 \times 1.05 \times 10^{-4})} \right]^{\frac{3}{2}} \times 5 \times 10^{-3} = 1.02 \times 10^{-14}$$

$$q_1 = k_1 \left(\frac{1}{t_1} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{v} = 1.02 \times 10^{-14} \times \left(\frac{1}{12.53} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{176} = 1.31 \times 10^{-18}$$

$$n_1 = \frac{q_1}{e} = \frac{1.31 \times 10^{-18}}{1.6 \times 10^{-19}} = 8 \text{ 个}$$

$$e_1 = \frac{q_1}{n_1} = \frac{1.31 \times 10^{-18}}{8} = 1.64 \times 10^{-19}$$

2. 第二滴油滴

$$t_2 = \frac{1}{5} (15.71 + 15.14 + 15.59 + 15.76 + 16.32) = 15.80$$

$$v_2 = \frac{L}{t_2} = \frac{1.6 \times 10^{-3}}{15.80} = 1.01 \times 10^{-4}$$

$$a_2 = \left(\frac{9\eta v_2}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{9 \times 1.83 \times 10^{-5} \times 1.01 \times 10^{-4}}{2 \times 981 \times 9.792} \right)^{\frac{1}{2}} = 2.94 \times 10^{-4}$$

$$k_2 = \frac{18\eta}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta L}{1 + \frac{b}{Pa_2}} \right]^{\frac{3}{2}} d = 1.02 \times 10^{-14}$$

$$q_2 = k_2 \left(\frac{1}{t_2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{v} = 7.77 \times 10^{-19}$$

$$n_2 = \frac{q_2}{e} = 5 \text{ 个}$$

$$e_2 = \frac{q_2}{n_2} = 1.55 \times 10^{-19}$$

3. 第三滴油滴

$$t_3 = \frac{1}{5} (18.52 + 18.71 + 19.41 + 19.16 + 18.72) = 19.00$$

$$v_3 = \frac{L}{t_3} = 8.42 \times 10^{-5}$$

$$a_3 = \left(\frac{9\eta v_3}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} = 2.69 \times 10^{-4}$$

$$k_3 = \frac{18\eta}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta L}{1 + \frac{b}{Pa_3}} \right]^{\frac{3}{2}} d = 1.02 \times 10^{-14}$$

$$q_3 = k_3 \left(\frac{1}{t_3} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{v} = 3.34 \times 10^{-19}$$

$$n_3 = \frac{q_3}{e} = 2 \text{ 个}$$

$$e_3 = \frac{q_3}{n_3} = 1.67 \times 10^{-19}$$

4. 电子电荷量

$$e' = \frac{1}{3} (e_1 + e_2 + e_3) = 1.62 \times 10^{-19}$$

$$\text{相对误差} \cdot E = \left| \frac{e' - e}{e} \right| = \left| \frac{1.62 \times 10^{-19} - 1.6 \times 10^{-19}}{1.6} \right| = 1.25\%$$

实验结论

- ① 测量得电子电荷量为 1.62×10^{-19} ，相对误差为 1.25%。
- ② 通过对重力场和静电场中的带电油滴的不同运动状态进行测量和分析，验证了电荷的不连续性，并测定电子电荷量。
- ③ 学习到了 CCD 图像传感器的原理和应用。

实验讨论

1. 误差分析

- ① 在调节电压使油滴平衡时，可能油滴没有完全稳定，以极小速度运动。
- ② 实验通过人眼观察并记录油滴到达指定位置的时刻，人眼对油滴所在位置观察有偏差，人眼反应速度需要时间，察觉到按下计时键有时差。
- ③ 计算时数据精度有限，数字舍五入，造成误差。
- ④ 为确保数据准确，应多次测量取平均值。

2. 实验关键

- ① 选取油滴时电压范围应在 150-400V 之间，下落时间 17-28s 之间。
- ② 选取油滴的大小要合适，若油滴体积大，带电量较多，下落速度比较慢，下落时间则会较长，易导致实验测量数据不准确。
- ③ 选取油滴时要有足够的耐心，找到较为合适的油滴。
- ④ 每次记录油滴下落时间时，油滴到线的位置要保持一致，若油滴刚到达线上方时按下计时器，则停止计时时，油滴也应刚到下方线。

思考题

1. 如何判断油滴盒内两平行极板是否水平? 不水平对实验结果有何影响?
 - (1) 如果不水平, 那么重力就在平行于极板方向有个分量, 如果不加电压, 油滴就会在平行方向有速度。可以通过观察水准泡, 或者可以观察 CCD 成像仪中油滴的轨迹, 如果油滴轨迹不是竖直的, 往其他方向飘移, 则说明不水平
 - (2) 如果不水平, 垂直极板方向的加速度分量就和电场力、空气阻力平衡, 测出的电压等数据不准确, 导致最终计算的元电荷量不准确
2. 用 CCD 成像系统观测油滴比直接从显微镜中观测有何优点?
 - ① 观测的视野宽广, 可以选择的对象更多, 可找最适合测量的油滴测量
 - ② 图像鲜明, 对于油滴的形状、运动状态清晰可见, 观察省力
 - ③ 观察更加方便, 节省实验时间, 增加有效位数
3. 为什么必须使油滴作匀速运动或静止? 实验中如何保证作匀速运动?
 - (1) 测量时, 采用平衡法测量, 所以要求油滴作匀速运动或静止。只有使油滴作匀速运动, 才能满足力的平衡原理, 即重力等于电场力
 - (2) 由于空气阻力存在, 油滴加速时间非常短, 可认为瞬间做匀速运动