

密立根油滴实验

Millikan Oil-Drop Experiment

【实验目的】

1. 了解密立根油滴仪的结构，掌握利用油滴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. 用平衡法和动态法(选做)测量电子电量的大小，验证电子电荷的量子化特性。
4. 感受和体验物理经典真滋味

【预备问题】

1. 密立根利用油滴测定电子电荷的基本原理和设计思路是什么？
2. 什么是静态(平衡)测量法和动态(非平衡)测量法？两种方法有何不同与优缺点？测量中需注意哪些问题？
3. 为什么必须保证油滴在测量范围内做匀速运动或静止？怎样控制油滴运动？
4. 使用油滴喷雾器应注意什么问题？若喷油后，在显示器看不到油滴如何处理？
5. 如何判断油滴盒内平衡极板是否水平？不水平对实验结果有何影响？
6. 用 CCD 成像系统观测油滴比直接从显微镜中观测有何优点？

【实验背景】

1897 年，英国物理学家汤姆逊(Thomson, Joseph John)发现了电子，又测量了这种基本粒子的比荷（荷质比），并证实了这个比值是唯一的。因此，电子的电荷量的测量成为当时物理学家面临的重大课题。

1917 年，美国物理学家密立根(Robert Andrews Millikan)历经 9 年苦心钻研，以卓越的研究方法和精湛的实验技术，设计了油滴实验，经过上千次测量，最早从实验上测得电子电荷的精确数值为 $e=1.60\times 10^{-19}\text{C}$ ；明确了电荷的量子化，具有不连续性。密立根油滴实验堪称物理学的经典实验，实验结果对近代物理学发展有重要意义，其实验思路和方法有着广泛应用，其实验原理至今仍在当代物理科学研究的前沿发挥着作用。密立根因此获得了 1923 年的诺贝尔物理学奖。

目前，测量电子电荷的最好结果为： $e=(1.60217733\pm 0.00000049)\times 10^{-19}\text{C}$ 。

【实验原理】

用油滴法测量电子的电荷 e ，可以用静态(平衡)测量法或动态(非平衡)测量法，也可以通

过改变油滴的带电量，用静态法或动态法测量油滴带电量的改变量。

本实验主要采用静态测量法，原理如下：

设质量为 m 带电量为 q 的油滴在两平行极板间运动，两极板间电压为 U ，极板间距为 d 。则油滴在极板间将同时受到重力和电场力的作用，如图 1 所示。如果调节两极板间的电压 U ，可使电场力和重力达到平衡，即

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

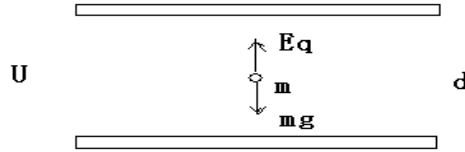


图 1 静电场中的带电油滴(电压 U ，板间距 d)

当两平行极板间不加电压时，油滴在重力作用下加速下降，同时也受空气阻力(粘滞阻力)作用，根据斯托克斯定律，粘滞阻力为 $f_r = 6\pi a \eta v_g$ ，这里， a 为油滴的半径， η 为空气的粘滞系数， v_g 为油滴运动的速度。油滴的速度达到一定值后，粘滞阻力和重力会平衡，油滴进而做匀速直线运动，有

$$f_r = 6\pi a \eta v_g = mg \quad (2)$$

油滴的质量与半径的关系
$$m = \rho v = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \quad (3)$$

由(2)和(3)式得
$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2\rho g}} \quad (4)$$

考虑到油滴的半径为 10^{-6} 米量级，空气不能再看作连续介质，空气的粘滞系数应做如下修正

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (5)$$

这里， b 为修正常数， $b=6.17 \times 10^{-6} \text{ m cmHg}$ ， p 为大气压强， a 为未修正过的油滴半径。而则修正后的油滴半径 a 为

$$a = \sqrt{\frac{9\eta' v_g}{2\rho g} \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}}} \quad (6)$$

油滴匀速运动的距离 l 和速度 v_g 之间的关系为

$$v_g = \frac{l}{t_g} \quad (7)$$

由(1)、(2)、(6)、(7)式得，油滴的带电量 q 为

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

式(8)即静态测量法的油滴带电量的表达式，要注意的是，因为油滴的半径 a 处于修正项中，可以不十分精确。因此，式(8)中油滴的半径 a 仍用(4)式计算。

【实验仪器】

P6701 型密立根油滴仪：包括水平放置的平行极板(油滴盒)、调平装置、照明装置、电源、计时器、实验油、喷雾器、显微镜、监视器等。

【实验内容】

实验 1. 仪器调整与熟悉，观察油滴运动，练习控制油滴。

实验 2. 选择合适的油滴。

实验 3. 平衡法测量电子电荷量的数值。

实验 4. 动态法测量电子电荷量的数值（拓展选做）。

【实验步骤与要求】

实验 1. 仪器调整与熟悉，观察油滴运动，练习控制油滴。

(1) 调整仪器底部的调平螺丝，使水准泡指示水平；

(2) 如果显微镜的分划板位置不正，则转动目镜头，直到分划板的位置放正；调整接目镜，使分划板刻线清晰。

(3) 将油从油雾室旁的喷雾口喷入，微调显微镜的调焦手轮，使视场中出现大量清晰的油滴。

实验 2. 选择合适的油滴。

将油滴仪的功能键置于“平衡”（即“BALANCE”）档，调节平衡电压至 100~300V 之间，观察能够静止的油滴，并且要满足油滴匀速下降 1.5mm 所用时间在 8~30s 之间。具体操作

为，将油滴仪的功能键置于“UP”档，使油滴运动到显示屏的最高刻度线，将功能键置于“BALANCE”档，油滴静止。然后将功能键置于“DOWN”档，使油滴运动到第二刻度线的时候开始计时，一直运动到底端刻度线时计时停止。选择这段时间在 8~30s 的油滴。

实验 3. 平衡法测量电子电荷量的数值。

选择满足上述条件的 10 颗油滴进行时间的测量，每个油滴需要重复测量 5 次。

注意：计时结束的同时，一定要迅速将油滴仪的功能键置于“平衡”（即“BALANCE”）档，否则油滴就会运动到下极板而观察不到，造成跟踪油滴丢失，进而无法测量 5 次。

实验 4. 动态法测量电子电荷量的数值（自主设计，拓展选做）。

略。

【数据处理】

1. 计算每颗油滴的带电量 q 。

2. 计算 n 值。 $n = \text{取整}\left(\frac{q}{e}\right)$ 。

3. 采用图示法（坐标纸-手绘-选点-求斜率）作 q - n 曲线，求解电子的电荷量数值 $e_{\text{测}}$ （即 q - n 曲线的斜率）和相对不确定度 $U_r = \left| \frac{e_{\text{测}} - e}{e} \right| \times 100\%$ 。此外， $e_{\text{测}}$ 的数值还可再用最小二乘法来求得，并与图示法的结果作比较，分析这两种处理方法的异同点和优缺点。

【注意事项】

1. 实验安全第一，认真操作，如实记录，规范处理。
2. 喷雾器喷口方向不能朝下，否则会导致漏油。平衡电压最佳取值范围：100~300V。
3. 注意针对选中油滴用显微镜调焦，呈现出清晰的亮点后再测量。
4. 个别情况下喷雾器产生的油滴数量过多且无法快速消散，严重妨碍了对油滴的选择和观察。这时要先通过风吹等方式消除过多的悬浮油滴。
5. 测量时要对油滴跟踪聚焦；计时结束时同时按下“BALANCE”键，以防油滴丢失。
6. 通电时极板带电，请勿用手接触。
7. 做完实验后请擦拭掉自己仪器上的油渍。
8. 请 1~4 号负责实验室清洁卫生。

【思考题】

1. 如何判断油滴盒内平衡极板是否水平？如果上下极板不水平，对测量结果有什么影响？

参考解答：

调节仪器底座上的两只调平螺旋手轮，将仪器上的水泡调平，使水平仪水平，这样平衡极板就水平了。或将外置小水准器放在仪器上，调节仪器底座的调平螺旋手柄。

平行极板如果不水平，油滴横向漂移很厉害，影响实验结果。同时，电场力与重力不在同一方向，对于平衡电压的测量也有影响。

2. 对实验结果造成影响的主要因素有哪些？如何克服这些因素？

参考解答：

1) 要制造（喷出）和选择合适的油滴，这是最主要的。油滴不能太大或太小，并且每次选的油滴带电量应该不一样。

2) 人为因素，每次计时测量的反应时间可能不一样，选择的平衡线也会有差别。

3) 测量时没有平视观测，有视差。

4) 在测量每个油滴的下落时间时，在第四、五次时，油滴可能会有挥发，下落时间会有差距；当油滴挥发时，可以移动显微镜重新聚焦，但这也会影响实验结果。

【拓展思考问题】

1. 密立根油滴实验中，平衡法和动态法有何异同点，试分析其优缺点。

2. 密立根油滴实验的总结(油滴筛选、跟踪、测量)

(经验分享；体会；感想；讨论；建议等)

3. 在实验中，你所感受和体验的物理经典真滋味。

注：思考题和拓展思考题任选两题。其中，拓展思考题 2 和 3 必选一，在实验报告中回答和讨论。可以自己拟定题目，结合实际，具体分析讨论。鼓励在 BBS 分享和讨论。

【参考文献】

[1] Millikan R A. Coefficients of slip in gases and the law of reflection of molecules from the surfaces of solids and liquids. Physical Rev, 1923, 22:409

[2] 熊永红等. 大学物理实验(第一册). 科学出版社, 2007 年 8 月.

[3] 任忠明等. 大学物理实验(第二册). 科学出版社, 2007 年 8 月.

[4] 潘仁培. 密立根油滴试验仪说明书和光盘资料. 南京培中科技开发研究所.

【附录 1】实验数据记录表格与计算公式

1. 实验数据记录表格（推荐）

油 滴 序 号	U/V	t_g/s					
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	\bar{t}_g
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

2. 油滴带电量测量的实际计算公式

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{\bar{t}_g \left(1 + \frac{b}{pa}\right)} \right]^{3/2} \frac{d}{U}$$

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2\rho g}}$$

$$v_g = \frac{l}{\bar{t}_g}$$

式中，相关参数的取值：油滴密度 $\rho=981 \text{ kg/m}^3$ ，重力加速度 $g=9.795 \text{ m/s}^2$ ，空气的粘滞系数 $\eta=1.83\times 10^{-5} \text{ kg/(m s)}$ ，油滴下落距离 $l=1.5\text{mm}$ ，修正常数 $b=6.17\times 10^{-6} \text{ m cmHg}$ ，大气压强 $p=76.0 \text{ cmHg}$ ，极板间距 $d=5.00\times 10^{-3} \text{ m}$ 。

3. 油滴带电量与电子电荷 e 的倍数 n

$$n = \text{取整}\left(\frac{q}{e}\right)$$

式中，电子的电荷量取值： $e=1.60\times 10^{-19} \text{ C}$ 。

【附录 2】实验数据处理示例

1. 数据处理计算列表

油滴序号	U/V	t_g/s						q ($\times 10^{-18}C$)	n
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	\bar{t}_g		
1	192	19.6	19.8	19.2	19.5	19.6	19.5	0.47	3
2	135	10.6	10.8	10.4	10.6	10.7	10.6	1.77	11
3	107	10.4	10.2	10.4	10.2	10.4	10.3	2.35	15
4	158	12.8	12.6	12.9	12.9	12.7	12.8	1.13	7
5	232	11.5	11.6	11.5	11.8	11.3	11.5	0.91	6
6	151	11.1	10.9	10.8	10.8	10.9	10.9	1.45	9
7	127	18.9	18.7	18.6	19.0	18.8	18.8	0.78	5
8	107	22.9	22.5	23.2	22.9	23.1	22.7	0.68	4
9	275	14.5	14.4	14.3	14.8	14.9	14.6	0.53	3
10	130	13.7	13.9	13.9	13.5	13.8	13.8	1.24	8

2. 利用图示法（坐标纸-手绘-选点-求斜率） q_i-n_i ($i=1, 2, 3, \dots, 10$) (图 2)，在直线(红色虚线)上任取两点，读取相应坐标，可得直线的斜率即电子的电荷 e 值大小为：

$$e_{\text{测}} = \frac{q_2 - q_1}{n_2 - n_1} = \frac{2.35 \times 10^{-18} - 0.78 \times 10^{-18}}{15 - 5} = 1.57 \times 10^{-19} C$$

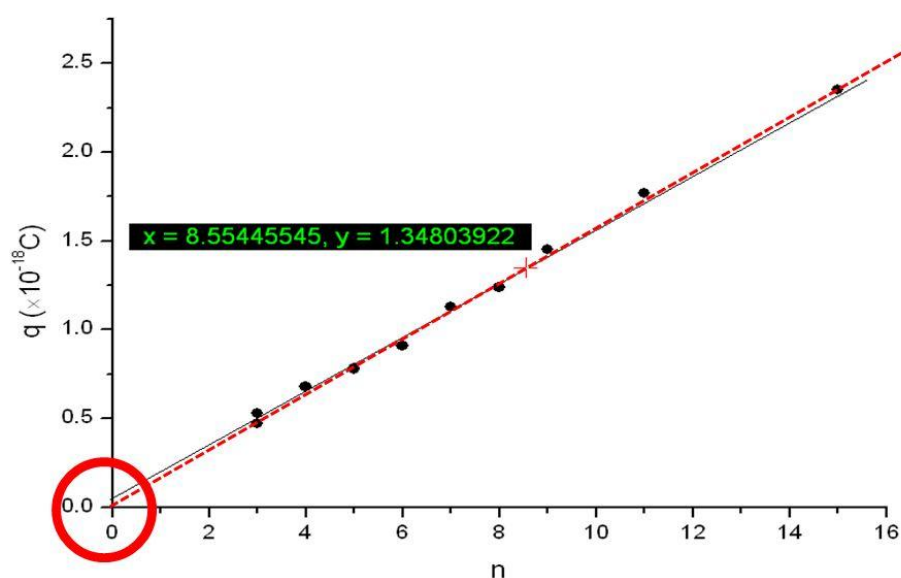


图 2.图示法数据处理示例

相对不确定度为（只求这个斜率即可）：

$$U_r = \frac{|1.57 \times 10^{-19} - 1.60 \times 10^{-19}|}{1.60 \times 10^{-19}} \times 100\% = 1.9\%$$

3. 利用最小二乘法也可得电子电荷值 $e_{\text{测}}$ 的大小为

$$e_{\text{测}} = \frac{\frac{\overline{nq} - \overline{n}\overline{q}}{\overline{n}^2 - \overline{n}}}{\overline{n}^2 - \overline{n}} = 1.586 \times 10^{-19} \text{ C} = 1.59 \times 10^{-19} \text{ C}$$

相对不确定度为

$$U_r = \frac{|1.59 \times 10^{-19} - 1.60 \times 10^{-19}|}{1.60 \times 10^{-19}} \times 100\% = 0.6\%$$

【附录 3】仪器简要说明

本实验采用 P6701 型密立根油滴仪(图 3)。

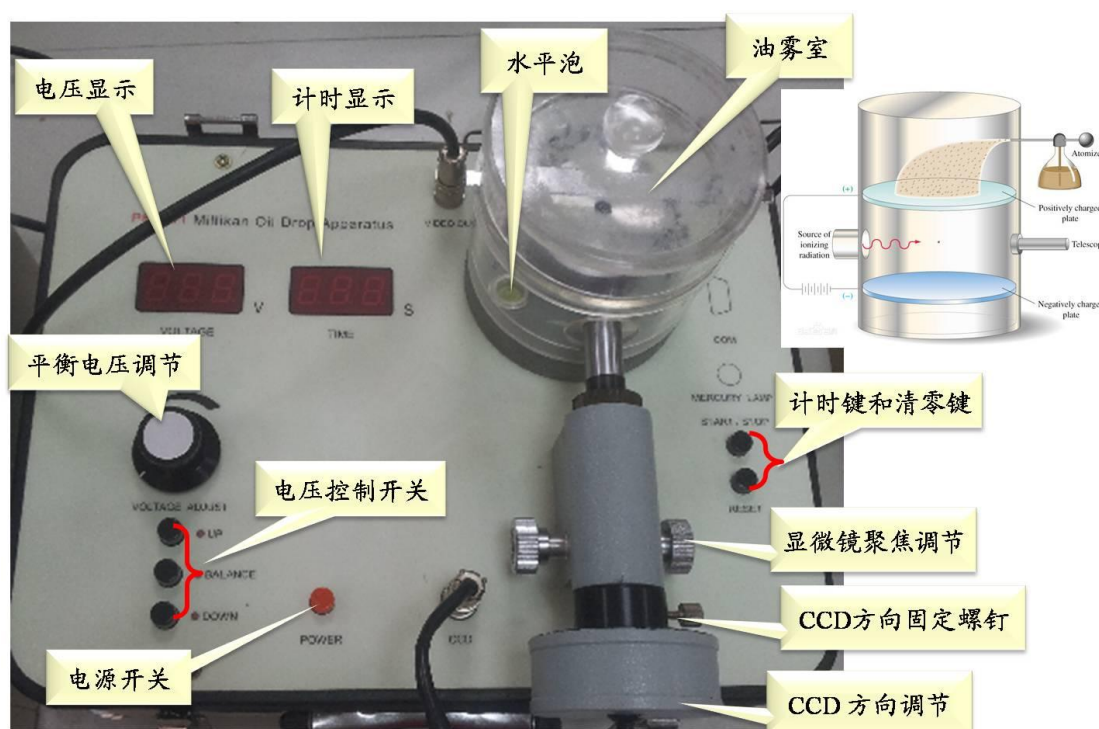


图 3. P6701 型密立根油滴仪功能概要

油雾室：产生带电油滴；水平泡：调节仪器水平；计时显示：0~99.9s；电压显示：0~999V；计时键：START/STOP；清零键：RESET；平衡电压调节：控制油滴静止，100~300V 为宜；电压控制开关：UP/BALANCE/DOWN；CCD 方向调节与固定；显微镜焦距调节。

【附录 4】评分细则

实验课堂评分

序号	要 求	分值
1	预习报告：内容完整（目的、原理、仪器、内容）。 原理部分描述清晰、重点突出。	20
2	理解实验设计，实验操作思路清晰，方法得当。	40
3	过程清楚，测量准确，数据记录完整，表格设计合理。 按时完成实验，实验仪器的摆放整齐有序，桌面整洁等。	40
4	重大扣分项与标准： 上课未带预习报告：-30；有抄袭、造假等违纪等行为记 0 分。 实验操作：未按时完成 10 颗油滴测量，-5/颗，实验方法错误，-30。 平衡电压：不在 100-300V 范围，-5/组。 时间测量：不在 8-30s 范围，-5/组，每组时间测量值 $\Delta t > 1s$ ，-5/组。 油滴未按要求自由下落 1.5mm 距离，-20。 数据记录：列表不规范，-5；有效数字错误，-5；记录不完整，-5。	

实验报告评分

序号	要 求	分值
1	报告形式规范，文字清晰工整，实验结果表达清晰、简洁易懂。 实验简要步骤和数据的整理列表（ 注： 原始数据记录随报告上交）。	20
2	实验数据符合要求，现象记录正确，坐标纸手绘作图，作图规范。 数据处理：过程清楚，计算正确，表达规范，误差分析。 数据列表与计算（20）；图示法与测量结果（40）。	60
3	结果表达规范，误差分析、思考题和实验的经验分享等。 实验总结要求紧密结合自己在实验中的问题。	20
4	重大扣分项与标准： 原始数据记录未随报告上交：-10；有抄袭、造假等违纪行为记 0 分。 数据处理：无数据列表，-20；有效数字错，-5； 列表内容不完整，-5；列表计算错误，-5。 图示法：未按图示法要求，-20；标度、分度格和过程等不规范，-15。 直线未过零点，-20；计算结果与图示不符，-20。 计算结果有效数字错误或无量纲表示，-5；结果错误，-5。 无结果表达，-10；无误差分析和思考题，-10。	