

# 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. 培养学生列表法、作图法以及科学实验原始数据记录与处理等基本的科学素养；培养学生深度分析和解决复杂问题的综合能力，以及大胆质疑勇于创新的精神和能力。

### 【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，又利用正交的电磁场测量了这种基本粒子的比荷（荷质比），并证实了这个比值是一个定值，但不能确定电子的电荷量是多少，从而也未能得到电子的质量。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。

美国物理学家密立根(Robert Andrews Millikan)，以其卓越的研究方法和精湛的实验技术，历经 9 年的苦心钻研（1909 年-1917 年），设计了油滴实验，经过上千次测量，首次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特性，即任何物体带电荷量都是电子电荷量的整数倍。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，其实验系统的结构和设计思路有着广泛应用，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： $e=(1.60217733\pm0.00000049)\times10^{-19}\text{C}$ 。

### 【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  $q$  的油滴处于两平行极板间，两极板间电压为  $U$ ，极板间距为  $d$ 。由于油滴半径在微米量级，可忽略油滴受到的空气浮力作用，则油滴在极板间将同时受到重力和电场力，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

$mg = qE = q \frac{U}{d}$ ，于是油滴的电量  $q$  可以表示为：

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

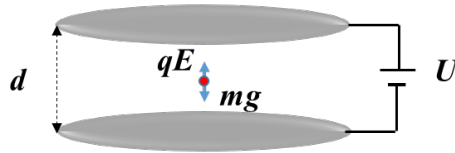


图 1 静电场中的带电油滴(电压  $U$ ，板间距  $d$ )

其中  $g$  为实验当地的重力常数，为已知或可查量，极板电压  $U$  和间距  $d$  不难测得。但因为油滴尺寸为微米量级，式子(1)中油滴质量  $m$  不能用常规的测质量的方法得到。在电场力和重力平衡的状态下，油滴保持静止不动，如果此时把平行极板间电压撤去，即  $U=0$ ，油滴将在重力作用下加速下降，同时也受空气阻力(粘滞阻力)作用。根据流体力学斯托克斯定律，粘滞阻力为  $f_r = 6\pi a \eta v_g$ ，其中  $a$  为油滴的半径， $\eta$  为空气的粘滞系数， $v_g$  为油滴运动的速度。空气的粘滞阻力与油滴下落速度成正比，因此在撤去极板电压的初始阶段，油滴将作初速度为零的变加速直线运动，同时油滴受的空气阻力将不断增加，直至粘滞阻力和重力相等，随后油滴将匀速直线下落，此时有

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

微小油滴由于受表面张力的作用，油滴可以作球形近似，油滴质量与半径的关系可以表示为：

$$m = \rho v = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \quad (3)$$

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

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

若油滴在  $t_g$  时间内匀速下落距离  $l$ ，这匀速下落的速度  $v_g$  为

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

由(1)、(2)、(6)、(7)式，油滴的带电量  $q$  表示为

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

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、CCD 等。仪器的简要说明参见【附录 3】

## 【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) 将油从喷雾口喷入，微调显微镜的调焦手轮，使 CCD 屏幕视场中出现大量清晰的油滴。
- (3) 如果 CCD 方向调节镜没有调正，则需要先将 CCD 方向调节镜的固定螺钉松开后，微调 CCD 方向调节镜直至油滴在竖直方向上运动，然后固定好螺钉。

**实验 2.** 选择合适的油滴。

从实验误差角度分析，油滴太大或太小都会导致大的测量误差，油滴太大时，油滴下落过快，而且电荷量子化特性也不明显；油滴过小，油滴下落非常慢，布朗运动对  $t_g$  测量会导致大的误差。大量实验结果表明，一般选择平衡电压位于 100~300V 之间、 $t_g$  时间在 8~30s 范围的油滴比较合适， $q$ - $n$  图的线性性比较好（数据处理 3）。可以将油滴仪的功能键置于“平衡”（即“BALANCE”）档，将极板电压调节在 200V 左右，喷油后进行显微镜调焦，在 CCD 屏幕上观察到的缓慢运动的油滴中挑选一颗可以自由控制的油滴，如果油滴匀速下降 1.5mm 所用时间在 8~30s 之间，就可以选择该油滴进行测量。

**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 颗油滴进行实验，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（坐标纸作图或计算机软件作图）作  $q$ - $n$  曲线，求电子的电荷量数值  $e_{\text{测}}$

(即  $q-n$  曲线的斜率) 和相对误差  $U_r = \left| \frac{e_{\text{测}} - e}{e} \right| \times 100\%$ 。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】

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。

### 【重点难点】

1. 选出合适的油滴进行实验不易（合适油滴参数范围：平衡电压  $U$ （100-300V）， $t_g$  范围（8-30s）。

**指导建议：**事先将极板电压设置在 200V 左右，喷油后加速跑掉的油滴非所选，在缓慢运动的油滴中选能自由操控的油滴，测量其  $t_g$  看是否也符合要求，从而确定是否选中该油滴。

2. 调整水平泡和 CCD 方向镜让油滴保持在竖直方向上运动不易。

**指导建议：**油滴从 A 位置“down”到 B 位置，再“UP”时不能回到 A 位置，可断定极板不水平；若油滴从 A 位置“down”到 B 位置，再“UP”时能回到 A 位置，但 AB 不在竖直方向，可断定 CCD 方向镜没有调正。

### 【常见易错】

1. 喷油后 CCD 屏幕上看不到油滴多次反复喷油。这样做的后果是很可能导致极板上的微孔被堵塞，油滴不能到达电场区，导致 CCD 屏幕上不可能再看到油滴。

**指导建议：**先只喷 1 次油（切忌多次连续喷），如果 CCD 上找不到油滴，应该去检查显微镜调焦是否合适、油滴孔 3 是否打开、CCD 屏幕的对比度是否调节适度等因素。若极板上微孔堵塞，为安全起见，务必找教师处理，学生严禁动手触碰带电极板。

2. 按下“down”键的同时就按下秒表的“start”键开始计时测量  $t_g$ 。这样测量的  $t_g$  是错误的。

**指导建议：**将所选油滴在“0mm”线处调平衡静止后，按下“down”键待油滴下落到“0.5mm”线处时才能按下“start”键开始计时，以保证  $t_g$  测量的是油滴匀速下落 1.5mm

时所用的时间。

3. 对油滴进行多次重复测量时,油滴水平漂移严重,甚至没测量满五次油滴便跑出了屏幕,这会导致较大测量误差。

**指导建议:** 一方面检查水平泡是否调平,另一方面检查 CCD 的方向镜是否调正。判断方法可参照【重点难点】2。

### 【参考文献】

- [1] V Halyo V, P Kim et.al, Search for free fractional electric charge elementary particles using an automated Millikan oil drop technique, Phys. Rev. Lett. 84,2576, (2000).
- [2] RA Millikan, On the elementary electrical charge and the Avogadro Constant, Phys. Rev. 2, 109, (1913).
- [3] CW Peterson, T Li et.al, Trapped fractional charges at bulk defects in topological insulators, Nature, Vol.589: 376–380 (2021).
- [4] 熊永红等. 大学物理实验(第一册). 科学出版社, 2007 年 8 月.
- [5] 任忠明等. 大学物理实验(第二册). 科学出版社, 2007 年 8 月.
- [6] 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  $\eta=1.83\times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ ，油滴下落距离  $l=1.5\text{mm}$ ，修正常数  $b=6.17\times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{cmHg}$ ，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	$U/\text{V}$	$t_g/\text{s}$						$q$ ( $\times 10^{-18}\text{C}$ )	$n$
		$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$\bar{t}_g$		
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：

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

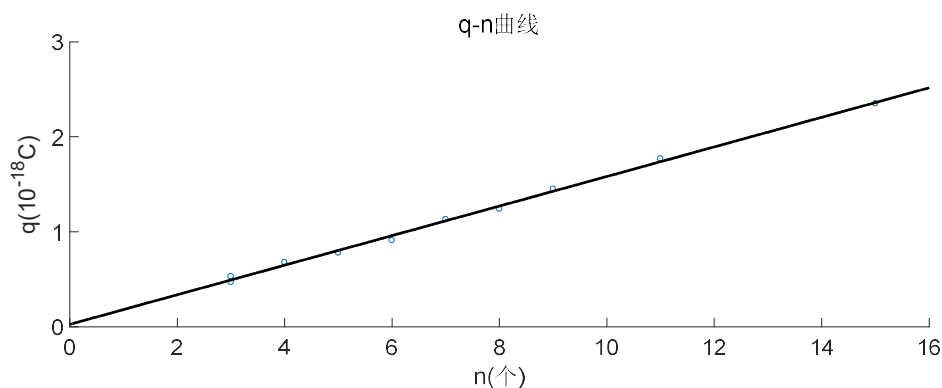


图 2.图示法数据处理示例

相对误差为（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

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

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)。

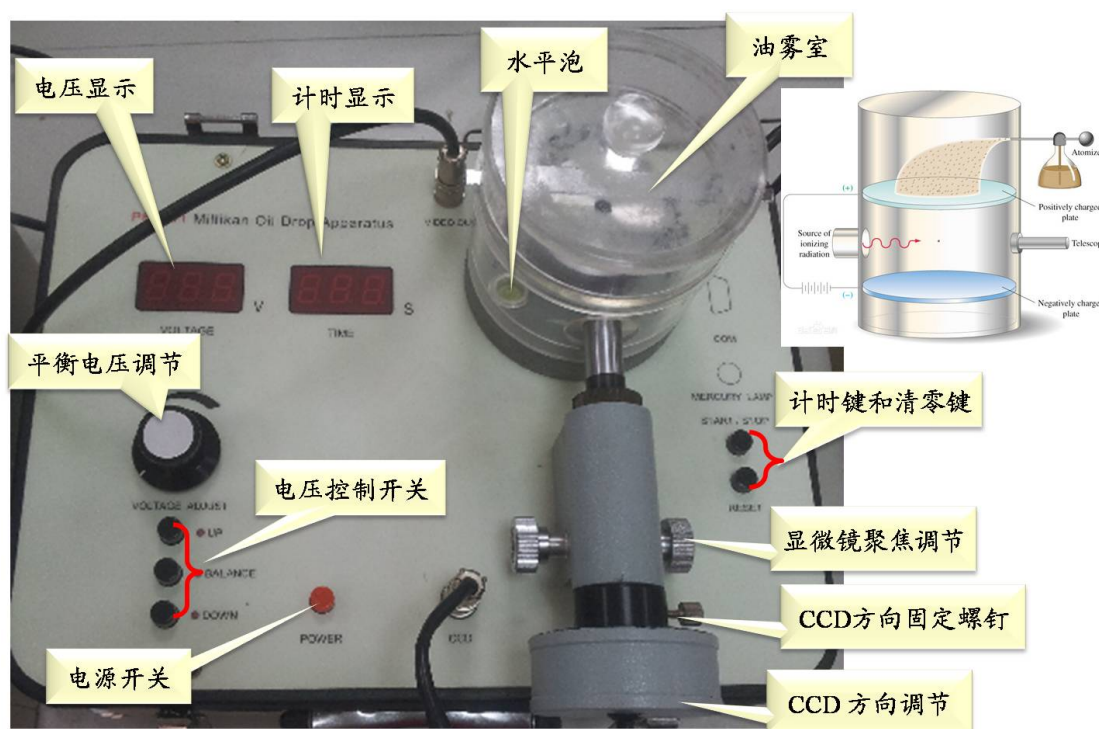


图 3. P6701 型密立根油滴仪功能概要

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，善于发现问题、分析问题和解决问题，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，实验方法错误，-30。 平衡电压：不在 100-300V 范围，-5。 时间测量：不在 8-30s 范围，-5，每组时间测量值 $\Delta t > 1s$ ，-5。	

	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 ( <b>注: 原始数据记录纸随报告上交</b> )。	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	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: 无数据列表或内容不完整, -5; 有效数字错, -3; 图示法: 未按图示法要求, -10; 标度、分度格和过程等不规范, -5。 直线未过零点, -2; 计算结果与图示不符, -10。 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, -5; 无误差分析和思考题, -15。	