

5.22 密立根油滴实验

1897 年，英国物理学家汤姆逊（J.J. Thomson）发现电子的存在后，许多科学家为了精确确定它的性质进行了大量科学探索。其中，英国物理学家汤森德（J.S.E. Townsend）、威尔逊（C.T.R. Wilson）和汤姆逊（J.J. Thomson）都对电子电荷 e 值进行了测定。1909-1913 年间，美国科学家密立根（R. A. Millikan）在前人工作的基础上，经过巧妙的实验设计和艰苦的实验过程，实现了对基本电荷量 e 的准确测量。密立根油滴实验是一个非常著名的经典物理实验，其重要的意义在于他直接揭示出了电荷的不连续性，并准确测定了基本电荷电量 e ，即电子所带电量。这一成就大大促进了人们对电荷物质结构的认识和研究。从实验角度来看，油滴实验中将微观量测量转化为宏观量测量的巧妙设想和精确构思，以及用比较简单的仪器，测得比较精确的结果都富有创造性。

密立根因为在测定电子电荷以及光电效应方面的卓越成就，获得 1923 年诺贝尔物理学奖。

5.22.1 实验要求

1. 实验重点

- ① 学习密立根油滴实验的设计思想。
- ② 用静态平衡法测量基本电荷的大小，验证电荷的量子性。
- ③ 培养严谨的科学实验态度，学会对仪器的调整、油滴的选定、跟踪、测量以及数据的处理。

2. 预习要点

- ① 物理科学史中，人们对电子电荷的认识过程。
- ② 物理量测量思想中，微观量测量与宏观量测量的相互转化和应用。
- ③ 了解油滴实验测量电子电荷的基本原理。
- ④ 熟悉本实验所用仪器的基本构造和使用方法。

5.22.2 实验原理

一个质量为 m ，带电量为 q 的油滴处在二块平行极板之间，在平行极板未加电压时，油滴受重力作用而加速下降，由于空气阻力的作用，下降一段距离后，油滴将作匀速下降运动，下降速度为 v_g ，这时重力与阻力平衡（空气浮力忽略不计），如图 5.22.1 所示。根据斯托克斯定律，粘滞阻力为

$$f_r = 6\pi a\eta v_g \quad (5.22.1)$$

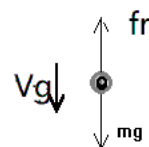


图 5.22.1

式中 η 是空气的粘滞系数， a 是油滴的半径，这时有

$$6\pi a\eta v_g = mg \quad (5.22.2)$$

当在平行极板上加电压 U 时，油滴处在场强为 E 的静电场中，设电场力 qE 与重力相反，如图 5.22.2 所示，使油滴受电场力加速上升，由于空气阻力作用，上升一段距离后，油滴所受的空气阻力、重力与电场力达到平衡（空气浮力忽略不计），则油滴

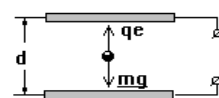


图 5.22.2

将以匀速上升，此时速度为 v_e ，则有：

$$6\pi a\eta v_e = qE - mg \quad (5.22.3)$$

又因为

$$E = \frac{U}{d} \quad (5.22.4)$$

由上述式 (5.22.2)、(5.22.3)、(5.22.4) 可解出

$$q = mg \frac{d}{U} \left(\frac{v_g + v_e}{v_g} \right) \quad (5.22.5)$$

为测定油滴所带电荷 q ，除应测出 U 、 d 和速度 v_e 、 v_g 外，还需知油滴质量 m ，由于空气中悬浮和表面张力作用，可将油滴看作圆球，其质量为

$$m = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho \quad (5.22.6)$$

式中 ρ 是油滴的密度。

由 (5.22.2) 和 (5.22.6) 式，得油滴的半径

$$a = \left(\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.22.7)$$

考虑到油滴非常小，空气已不能看成连续媒质，空气的粘滞系数 η 应修正为

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (5.22.8)$$

式中 b 为修正常数， p 为空气压强， a 为未经修正过的油滴半径，由于它在修正项中，不必计算得很精确，由式 (5.22.7) 计算就够了。

实验时取油滴匀速下降和匀速上升的距离相等，设为 l ，测出油滴匀速下降时间 t_g ，匀速上升时间 t_e ，则

$$v_g = l/t_g \quad v_e = l/t_e \quad (5.22.9)$$

将式 (5.22.6)、(5.22.7)、(5.22.8)、(5.22.9) 代入式 (5.22.5)，可得

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

$$\text{令 } K = \frac{18\pi d}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{\left(1 + \frac{b}{pa}\right)} \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$\text{得 } q = K \left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{U} \quad (5.22.10)$$

此式是动态法测油滴电荷的公式（式中 U 为匀速上升时所加提升电压）。

下面导出静态法测油滴电荷的公式。

调节平行极板间的电压，使油滴不动，此时所加电压 U 为平衡电压， $v_e=0$ ，即 $t_e \rightarrow \infty$ ，由式 (5.22.10) 可得

$$q = K \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{U} \quad (5.22.11)$$

或者

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t_g \left(1 + \frac{b}{pa} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \quad (5.22.12)$$

上式即为静态法测油滴电荷的公式（式中 U 为小球静止时的平衡电压）。

为了求电子电荷 e ，对实验测得的各个电荷 q 求最大公约数，就是基本电荷 e 的值，也就是电子电荷 e ，也可以测得同一油滴所带电荷的改变量 Δq_1 （可以用紫外线或放射源照射油滴，使它所带电荷改变），这时 Δq_1 应近似为某一最小单位的整数倍，此最小单位即为基本电荷 e 。

5.10.3 仪器介绍

本实验的实验装置由 OM99 CCD 微机密立根油滴仪和喷雾器组成。

1. OM99 CCD 微机密立根油滴仪

OM99 CCD 微机密立根油滴仪主要由油滴盒、CCD 电视显微镜、电路箱、监视器等组成。

（1）**油滴盒**是个重要部件，加工要求很高，其结构见图 5.22.3。

图 5.22.3 中，上下电极用精加工的平板垫在胶木园环上，极板间的不平行度和间距误差都控制在 0.01 mm 以下。在上电极板中心有一个直径为 0.4 mm 的油雾落入孔，在胶木园环上开有显微镜观察孔和照明孔。

在油滴盒外套上有防风罩，罩上放置一个可取下的油雾杯，杯底中心有一个落油孔及一个档片，用来开关落油孔。

在上电极板上方有一个可以左右拨动的压簧（**只有将压簧拨向最边位置，方可取出上极板**），保证压簧与电极始终接触良好。

照明灯安装在照明座中间位置，OM99 油滴仪采用了带聚光的半导体发光器件，使用寿命极长，为半永久性。

(2) **CCD 电视显微镜**的光学系统体积小，成像质量好。CCD 摄像头与显微镜是整体设计，使用可靠、稳定、不易损坏。

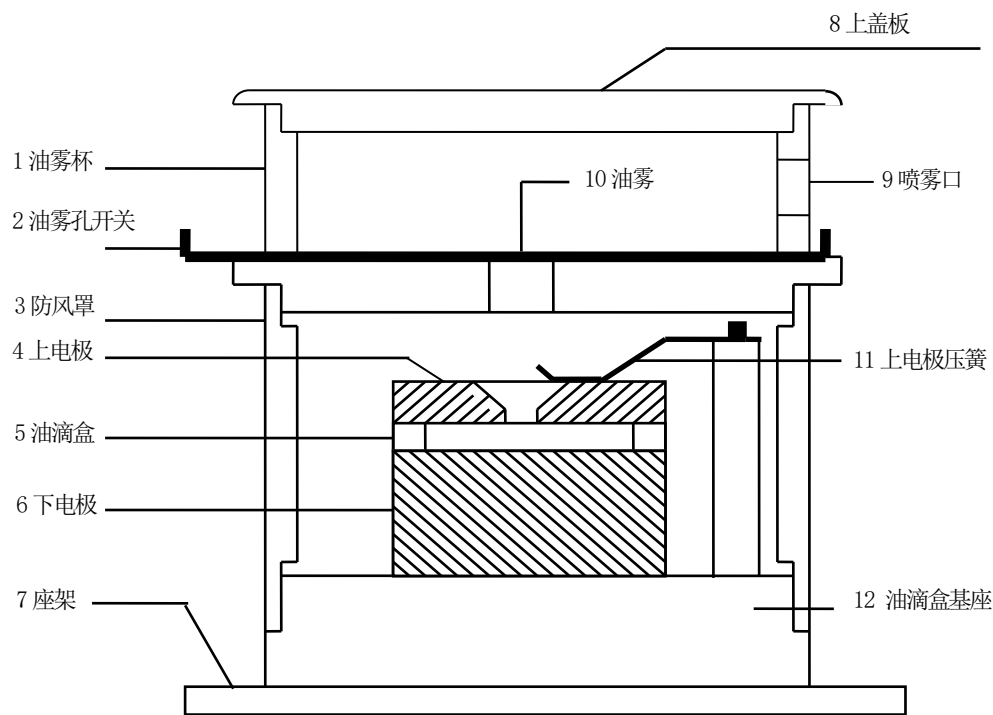


图 5. 22. 3

(3) **电路箱**体内装有高压产生、测量显示等电路。底部装有三只调平手轮，面板结构见图 5.22.4。测量显示电路产生的电子分划板刻度与 CCD 摄像头的行扫描严格同步，相当于刻度线是做在 CCD 器件上的，所以，尽管监视器有大小，或监视器本身有非线性失真，但刻度值是不会变的。

OM99 油滴仪备有两种分划板，标准分划板 A 是 8×3 结构，垂直线视场为 2mm，分八格，每格为 0.25mm。为观察油滴的布朗运动，设计了另一种 X、Y 方向各为 15 小格的分划板 B（**进入或退出分划板 B 的方法是**，按住“计时 / 停”按钮大于 5 秒即可切换分划板）。用随机配备的标准显微物镜时，每格为 0.08mm；换上高倍显微物镜后(选购件)，每格值为 0.04mm，此时，观察效果明显，油滴运动轨迹可以满格。

在面板上有两只控制平行极板电压的三档开关， K_1 控制上极板电压的极性， K_2 控制极板上电压的大小。当 K_2 处于中间位置即“平衡”档时，可用电位器调节平衡电压。打向“提升”档时，自动在平衡电压的基础上增加 200~300 V 的提升电压，打向“0V”档时，极板上电压为 0V。

为了提高测量精度，OM99 油滴仪将 K_2 的“平衡”、“0V”档与计时器的“计时 / 停”联动。在 K_2 由“平衡”

打向“0V”，油滴开始匀速下落的同时开始计时，油滴下落到预定距离时，迅速将 K_2 由“0V”档打向“平衡”档，油滴停止下落的同时停止计时。此时，屏幕上显示的是油滴实际的运动距离及对应的时间，可提高测距和测时精度。根据不同的教学要求，也可以不联动（关闭联动开关即可）。

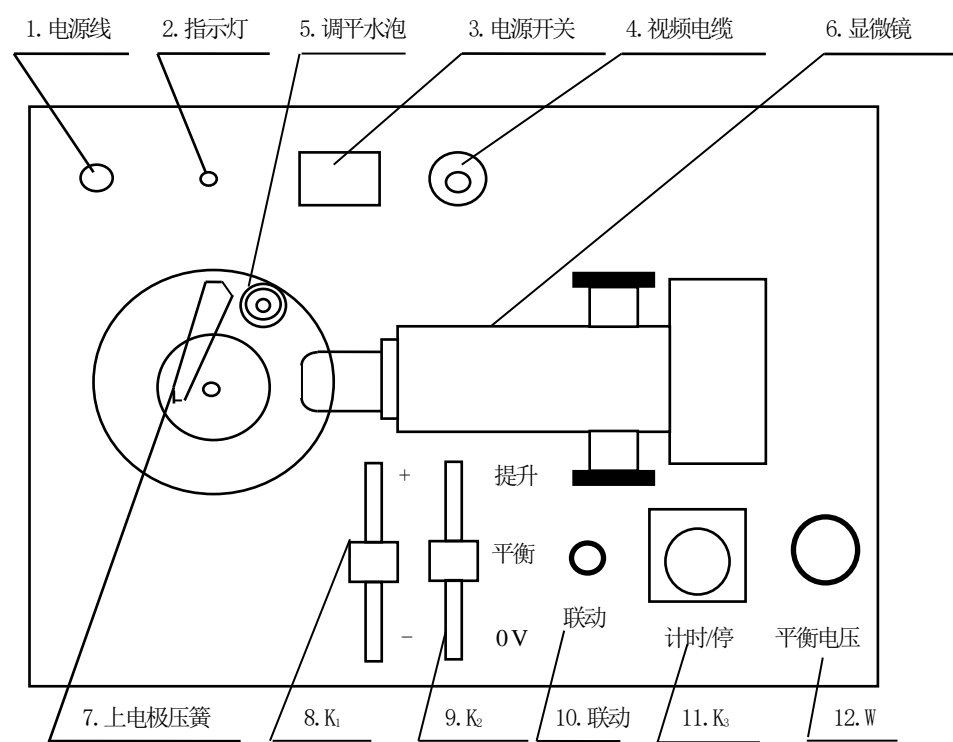
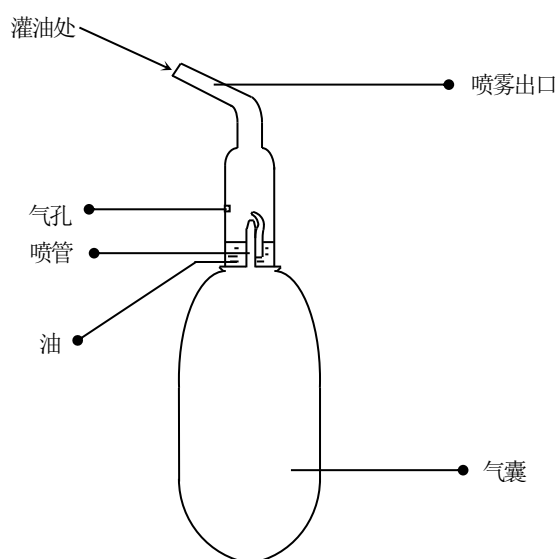


图 5.22.4

由于空气阻力的存在，油滴是先经一段变速运动后进入匀速运动的。但变速运动时间非常短，远小于 0.01 秒，与计时器精度相当。可以看作当油滴自静止开始运动时，油滴是立即作匀速运动的；运动的油滴突然加上原平衡电压时，将立即静止下来。所以，采用联动方式完全可以保证实验精度。

OM99 油滴仪的计时器采用“计时 / 停”方式，即按一下开关，清 0 的同时立即开始计数，再按一下，停止计数，并保存数据。计时器的最小显示为 0.01 秒，但内部计时精度为 1 微秒，即清 0 时刻仅占用 1 微秒。

2. 喷雾器



喷雾器结构如图 5.22.5 所示，使用时用滴管从油瓶里吸取油，由灌油处滴入喷雾器里，油的液面 3-5 毫米足够，千万不可高于喷管上口。喷雾器的喷雾出口比较脆弱，一般将其置于油滴仪的油雾杯圆孔外 1-2 毫米即可，不必伸入油雾杯内喷油。使用时注意安全及卫生。

5.10.4 实验内容

1. 密立根油滴仪调整

将 OM99 面板上最左边带有 Q9 插头的电缆线接至监视器后背下部的插座上，然后接上电源即可开始工作。调节仪器底座上的三只调平手轮，将水泡调平。CCD 显微镜只需将显微镜筒前端和底座前端对齐，然后喷油后再稍稍前后微调即可。在使用中，前后调焦范围不要过大，取前后调焦 1 mm 内的油滴较好。

打开监视器和 OM99 油滴仪的电源，显示出标准分划板刻度线。

面板上 K_1 用来选择平行电极上极板的极性，实验中置于“+”位或“-”位置均可，一般不常变动。使用最频繁的是 K_2 、平衡电压调节开关 W 和“计时 / 停”开关 K_3 。

监视器附有 4 个调节旋钮。对比度一般置于较大（顺时针旋到底或稍退回一些），亮度不要太亮。如发现刻度线上下抖动，这是“帧抖”，微调左边起第二只旋钮即可解决。

2. 测量练习

选择油滴：选择一颗合适的油滴十分重要。直径过大油滴，匀速下降时间比较短，增大了测量误差和给数据处理带来困难。通常选择平衡电压为 200~300 V、匀速下落 1.5 mm（6 格）用时在 8~20 S 左右的油滴较适宜。喷油后， K_2 置“平衡”档，调 W 使极板电压为 200~300 V，注意几颗缓慢运动、较为清晰明亮的油滴。试将 K_2 置“0V”档，观察各颗油滴下落大概的速度，从中选一颗作为测量对象。监视器上目视油滴直径在 0.5~1 mm 左右的较适宜。直径过小的油滴观察困难，布朗运动明显，会引入较大的测量误差。

控制油滴：仔细调节平衡电压，使油滴静止不动。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。如此反复多次练习，以掌握控制油滴的方法。

测量油滴：任意选择几颗运动速度快慢不同的油滴，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。如此反复多次测试，以掌握测量油滴运动时间的方法。

3. 静态法测量油滴电荷

将已调平衡的油滴用 K_2 控制移到“起始位置”（一般取第 2 格上线），按 K_3 （计时 / 停），让计时器停止计时（值未必要为 0），然后将 K_2 拨向“0V”，油滴开始匀速下降的同时，计时器开始计时。到“终止位置”（一般取第 7 格下线）时，迅速将 K_2 拨向“平衡”，油滴立即静止，计时也立即停止，此时电压值和下落时间值显示在屏幕上，进行相应的数据处理，求得电子电荷的平均值 e 。

4. 动态法测量油滴电荷

分别测出加电压时油滴上升的速度和不加电压时油滴下落的速度，代入公式，求出 e 值，此时最好将 K_2 与 K_3 的联动断开。油滴的运动距离一般取 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 。进行相应数据处理，求得电子电荷的平均值 e 。

5. 同一油滴改变电荷法

在平衡法或动态法的基础上，用汞灯照射目标油滴（应选择颗粒较大的油滴），使之改变带电量，表现为原有的平衡电压已不能保持油滴的平衡，然后用平衡法或动态法重新测量。

5.10.4 数据处理

1. 为了测定油滴所带电荷，一般需要对同一颗油滴重复测量 $5 \sim 10$ 次，同时选择 $5 \sim 10$ 颗油滴进行测量。
2. 计算各油滴的电荷，求它们的最大公约数，即为基本电荷 e 值。
3. 计算各油滴的电荷，用作图法求 e 值。
4. 将 e 的实验值与公认值比较，求相对误差。

5.15.6 思考题

1. 对实验结果造成影响的主要因素有哪些？
2. 如何判断油滴盒内平行极板是否水平？不水平对实验结果有何影响？
3. CCD 成像系统观测油滴比直接从显微镜中观测有何优点？

5.15.7 拓展研究

1. 研究密立根油滴实验的数据处理方法。
2. 若油滴平衡调节不好，对实验结果有何影响？
3. 实验中所选油滴的大小对实验结果有何影响？

5.15.8 参考文献

1. 南京朗博 OM99 密立根油滴使用说明书

5.15.9 附录

1. 主要参考数据(具体数值以实验室所给为准)

平行极板间距离	$d=5.000\times10^{-3}\text{m}$
重力加速度	$g=9.801\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (北京)
空气粘滞系数	$\eta=1.83\times10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
修正常数	$b=8.224\times10^{-6}\text{ m}\cdot\text{Pa}$
大气压强	$p=1.013\times10^5\text{Pa}$

2. 油的密度温度变化表

OM99 CCD 微机密立根油滴选用上海产中华牌 701 型钟表油，其密度随温度的变化如下表：

T(°C)	0	10	20	30	40
$\rho\text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$	991	986	981	976	971

3. K₁、K₂ 接线图

K₁、K₂所用型号为 KBD5 三档六刀开关。

