

密里根油滴实验

实验简介

杰出的美国物理学家密立根在 1909 年至 1917 年所做的测量微小油滴所带的电荷的工作，即油滴实验，是物理学史上具有最重要意义的实验。Millikan 在这一实验工作中花费了近 10 年的心血，取得了具有重大意义的结果，那就是：

(1)证明电荷的不连续性(具有颗粒性)，所有电荷都是基本电荷 e 的整数倍。

(2)测量并得到了基本电荷即为电子电荷，其值为 $e=1.60\times 10^{-19}$ 库仑。现公认 e 是基本电荷，目前给出的最好结果为： $e=(1.60217731\pm 0.00000049)\times 10^{-19}$ 库仑。

正是由于这一实验成就，他荣获了 1923 年诺贝尔物理学奖。八十多年过去了，物理学发生了根本的变化，而这个实验又重新站到了物理实验的前列。近年来，根据这一实验的设计思想改进的用磁漂浮的方法测量分数电荷的实验，使古老的实验又焕发青春，说明了 Millikan 油滴实验是富有巨大生命力的实验。

实验原理

根据油滴在电场中作直线运动或静止两种运动方式分类，油滴法测电子电荷分为动态测量法和平衡测量法。

1. 动态测量法：

考虑重力场中一个足够小油滴的运动，设此油滴半径为 r ，质量为 m_1 ，空气是粘滞流体，故此运动油滴除受重力和浮力作用外还受粘滞阻力的作用。由斯托克斯定律，粘滞阻力与物体运动速度成正比。设油滴以匀速 v_f 下落，则有

$$m_1g - m_2g = Kv_f \quad (1)$$

此处 m_2 为与油滴同体积空气的质量， K 为比例常数， g 为重力加速度。油滴在空气及重力场中的受力情况如图示 1。



图 1 重力场中油滴受力示意图

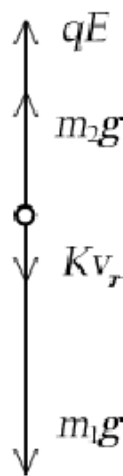


图 2 电场中油滴受力示意图

若此油滴带电荷为 q ，并处在场强为 E 的均匀电场中，设电场力 qE 方向与重力方向相反，如图 2 所示，如果油滴以匀速 v_r 上升，则有

$$qE = (m_1 - m_2)g + Kv_r \quad (2)$$

由式 (1) 和 (2) 消去 K ，可解出 q 为：

$$q = \frac{(m_1 - m_2)g}{Ev_f}(v_f + v_r) \quad (3)$$

由 (3) 式可以看出来，要测量油滴上的电荷 q ，需要分别测出 m_1 ， m_2 ， E ， v_r ， v_f 等物理量。

由喷雾器喷出的小油滴半径 r 是微米量级，直接测量其质量 m_1 也是困难的，为此希望消去 m_1 而带之以容易测量的量。设油与空气的密度分别为 ρ_1, ρ_2 ，于是半径为 r 的油滴的视重为：

$$(m_1 - m_2)g = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g \quad (4)$$

由斯托克斯定律，粘滞流体对球形运动物体的阻力与物体速度成正比，其比例系数 K 为 $6\pi\eta r$ ，此处 η 为粘度， r 为物体半径，于是可将公式 (4) 带入式 (1) 有

$$v_f = \frac{2gr^2}{9\eta}(\rho_1 - \rho_2) \quad (5)$$

因此，

$$r = \left[\frac{9\eta v_f}{2g(\rho_1 - \rho_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

以此带入 (3) 并整理得到

$$q = 9\sqrt{2}\pi \left[\frac{\eta^3}{(\rho_1 - \rho_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{E} \left(1 + \frac{v_r}{v_f} \right) v_f^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

因此，如果测出 v_r ， v_f 和 η ， ρ_1 ， ρ_2 ， E 等宏观量即可得到 q 值。

考虑到油滴的直径与空气分子的间隙相当，空气已不能看成是连续介质，其粘度 η 需作相应的修正

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}}$$

此处 p 为空气压强， b 为修正常数， $b=0.00823\text{N/m}$ ，因此，

$$v_f = \frac{2gr^2}{9\eta}(\rho_1 - \rho_2) \left(1 + \frac{b}{pr} \right) \quad (8)$$

当精确度要求不太高时，常采用近似计算方法，先将 v_f 带入 (6) 式计算得

$$r_0 = \left[\frac{9\eta v_f}{2g(\rho_1 - \rho_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

再将此 r_0 值带入 η' 中，并以 η' 入式 (7)，得

$$q = 9\sqrt{2} \left[\frac{\eta^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{E} \left(1 + \frac{v_r}{v_f} \right) v_f^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

实验中常常固定油滴运动的距离,通过测量它通过此距离 s 所需的时间来求得运动速度,且电场强度 $E=U/d$, d 为平行板间的距离, U 为所加的电压,因此,式(10)可写成

$$q = 9\sqrt{2}\pi d \left[\frac{(\eta s)^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{U} \left(\frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_r} \right) \left(\frac{1}{t_f} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

式中有些量和实验仪器以及条件有关,选定之后在实验过程中不变,如 d , s , $(\rho_1 - \rho_2)$ 及 η 等,将这些量与常数一起用 C 代表,可称为仪器常数,于是式(11)简化成

$$q = C \frac{1}{U} \left(\frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_r} \right) \left(\frac{1}{t_f} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}}$$

由此可知,测量油滴上的电荷,只体现在 U , t_f , t_r 的不同。对同一油滴, t_f 相同, U 和 t_r 的不同,标志着电荷的不同。

2. 平衡测量法:

平衡测量法的出发点是,使油滴在均匀电场中静止在某一位置,或在重力场中作匀速运动。

当油滴在电场中平衡时,油滴在两极板间受到的电场力 qE ,重力 m_1g 和浮力 m_2g 达到平衡,从而静止在某一位置,即

$$qE = (m_1 - m_2)g$$

油滴在重力场中作匀速运动时,情形同动态测量法,将式(4), (9)和

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}}$$

带入式(11)并注意到

$$\frac{1}{t_r} = 0$$

则有

$$q = 9\sqrt{2}\pi d \left[\frac{(\eta s)^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{U} \left(\frac{1}{t_f} \right)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}}$$

3. 元电荷的测量方法:

测量油滴上带的电荷的目的是找出电荷的最小单位 e 。为此可以对不同的油滴,分别测出其所带的电荷值 q_i ,它们应近似为某一最小单位的整数倍,即油滴电荷量的最大公约数,或油滴带电量之差的最大公约数,即为元电荷。

实验中采用紫外线，X 射线或放射源等改变同一油滴所带的电荷，测量油滴上所带电荷的改变值 Δq_i ，而 Δq_i 值应是元电荷的整数倍。

即

$$\Delta q_i = n_i e (\text{其中 } n_i \text{ 为一整数})$$

也可以用作图法求 e 的值，根据 (14) 式， e 为直线方程的斜率，通过测量大量油滴的电量，拟合直线，即可求得 e 值。

实验内容

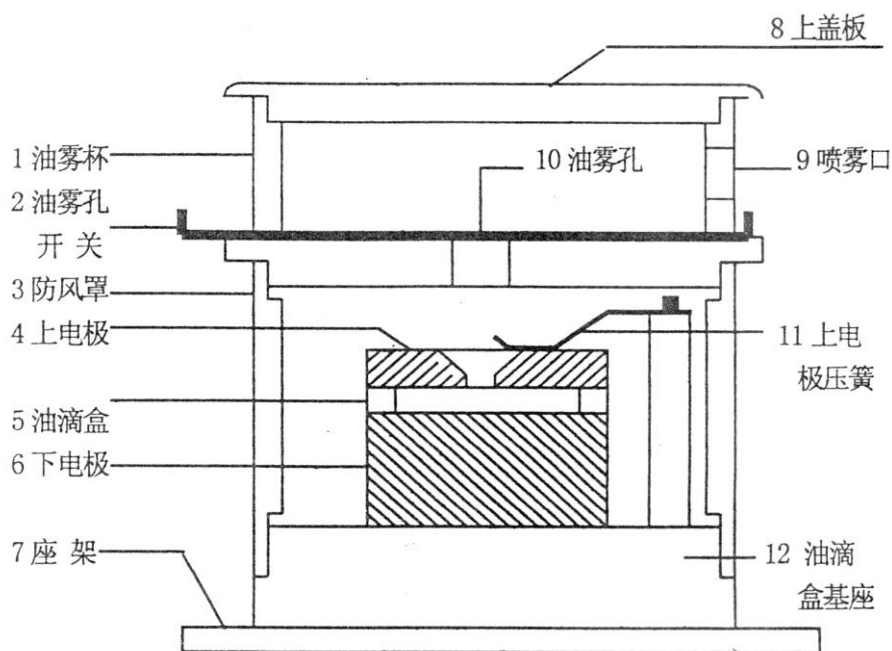
学习控制油滴在视场中的运动，并选择合适的油滴测量元电荷。

1. 选择适当的油滴并测量油滴上所带电荷

要做好油滴实验，所选的油滴体积要适中，大的油滴虽然比较亮，但下降速度快，不容易测准确；太小则受布朗运动的影响明显，测量结果涨落很大，也不容易测准确。因此应该选择质量适中，而带电不多的油滴。

2. 调整油滴实验装置

油滴实验装置是油滴盒，油滴照明装置，调平系统，测量显微镜，供电电源以及电子停表，喷雾器等组成的，其实验装置如下图所示。其中油滴盒是由两块经过精磨的金属平板，中间垫以胶木圆环，构成的平行板电容器。在上板中心处有落油孔，使微小油滴可以进入电容器中间的电场空间，胶木圆环上有进光孔，观察孔。进入电场空间内的油滴由照明装置照明，油滴盒可通过调平螺旋调整水平，用水准仪检查。油滴盒防风罩前装有测量显微镜，用来观察油滴。在目镜头中装有分划板，如下图所示。（请思考，电容器两极板不水平对测量有何影响？）



电容器极板上所加电压由直流平衡电压和直流升降电压两部分组成。其中平

衡电压大小连续可调，并可从显示屏上直接读数，其极性由换向开关控制，以满足对不同极性电压的需要。升降电压的大小可连续调节，并可通过换向开关叠加在平衡电压上，以控制油滴在电容器内上下位置。

油滴实验是一个操作技巧要求较高的实验，为了得到满意的实验结果，必须仔细认真调整油滴仪。

(1) 首先要调节调平螺丝，将平行电极板调到水平，使平衡电场方向与重力方向平行以免引起实验误差。

(2) 调节显微镜焦点，使油滴清晰显示在显示屏上。

(3) 喷雾器是用来快速向油滴仪内喷油雾的，在喷射过程中，由于摩擦作用可使油滴带电。

当油雾从喷雾口喷入油滴室内后，视场中将出现大量清晰的油滴，有如夜空繁星。试加上平衡电压，改变其大小和极性，驱散不需要的油滴，练习控制其中一颗油滴的运动，并记录油滴经过两条横丝间距所用的时间。

3. 正式测量

(1) 取平衡电压约 200V、匀速下降时间约 20s—35s 的油滴，测量油滴匀速运动 2mm 所用的时间。如果油滴过大，下降速度会过快，油滴过小，则布朗运动明显。

数据处理时所需要的参数值如下：

以上各式中的有关参考数据为：

油密度	$\rho = 981\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
空气密度	$\rho = 1.29\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}(20^\circ\text{C})$
重力加速度	查当地值
空气粘滞系数	$\eta = 1.832 \times 10^{-5}\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})(23^\circ\text{C})$
平行板间距	$d = 5 \times 10^{-3}\text{m}$
修正系数	$b = 8.23 \times 10^{-3}\text{N/m}$

(2) 计算每个油滴的带电量，然后计算电子电荷。这里我们采用倒过来验证的方法，即用公认的电子电量值去除每个油滴的电量，取一个最接近的整数，再用这个整数除油滴的电量，从而得到电子电荷的测量值。

(3) 将电子电荷的测量值与理论值进行比较，计算相对百分误差。

为了提高测量结果的精确度，每个油滴上下往返次数不宜少于 8 次。

4. 读取实验给定的其他有用常数

计算电荷的基本单位（数据处理方法不限），并选取一个油滴计算所带电荷的标准偏差 $\Delta q/q$ 。

实验仪器

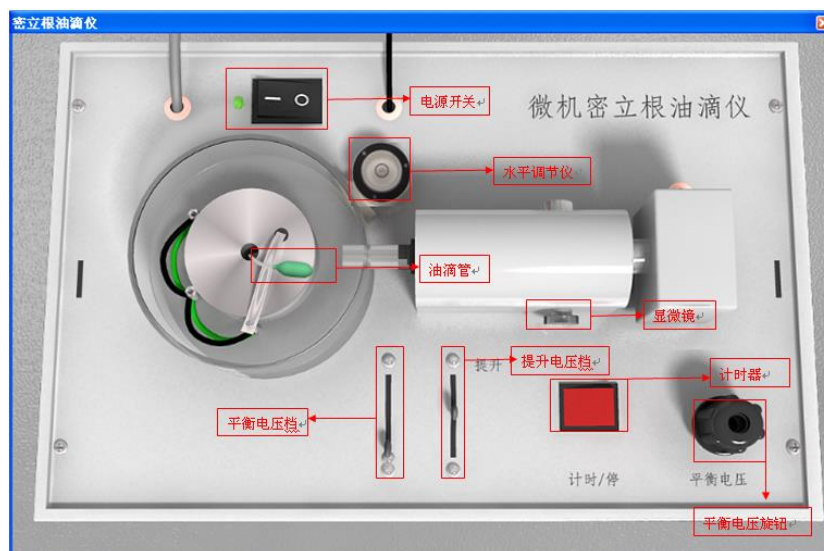
仪器：密立根油滴仪、显示器、油滴管、实验总体装置

1. 密立根油滴仪：

双击实验桌上密立根油滴仪小图标，弹出密立根油滴仪。



密里根油滴仪实物图



密立根油滴仪仿真图

密立根油滴仪功能及其用法介绍：

(1)电源开关：打开/关闭电源，控制平衡电压、提升电压和计时器。当电源关闭是，开关的指示灯为暗，此时单击鼠标，可以打开电源，电源指示灯变亮

(2)水平调节仪：调节密立根油滴仪和桌面的水平情况。单击鼠标即可打开水平调节装置，然后对水平调节的底座旋钮进行调节，这样就可以调，使水平调节装置的水平气泡处在中央位置，如果水平气泡不在中央位置，会影响观察油滴下落和上升时间的计量。

(3)油滴管：喷出雾状油滴

(4)显微镜：调节显示器的油滴是否清晰可见。点击密立根油滴仪的当中的显微镜观察窗旋钮，会自动打开显微镜观察窗的“针形”，调节旋钮使针形清晰可见。

(5)平衡电压档：控制电压的正负极以及数值

(6)提升电压档：在平衡电压数值的绝对值之上加上一定电压

(7)计时器：记录油滴的上升和下落的时间

(8)平衡电压旋钮：微调电压的数值

单击密立根油滴仪的水平气泡区域打开底座水平调节装置：



其中底座水平调节装置包括两个部分，分别是：

水平调节仪：



气泡所在中心的位置：



2. 显示器:



显示器实物图



显示器仿真图

3. 油滴管:

单击油滴管产生油滴。



油滴管实物图



油滴管仿真图

密立根油滴实验总体装置:



密立根油滴实验总体装置实物图

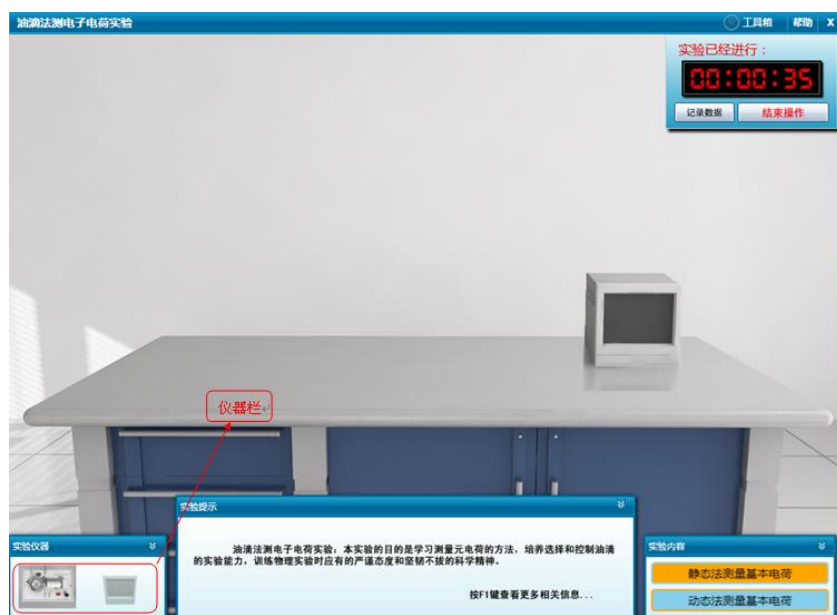


密立根油滴实验总体装置仿真图

实验指导

1. 主窗口:

打开油滴法测电子电荷的仿真实验



2. 实验前准备工作

- (1) 开始实验后，从实验仪器栏中点击拖拽仪器至实验桌上。



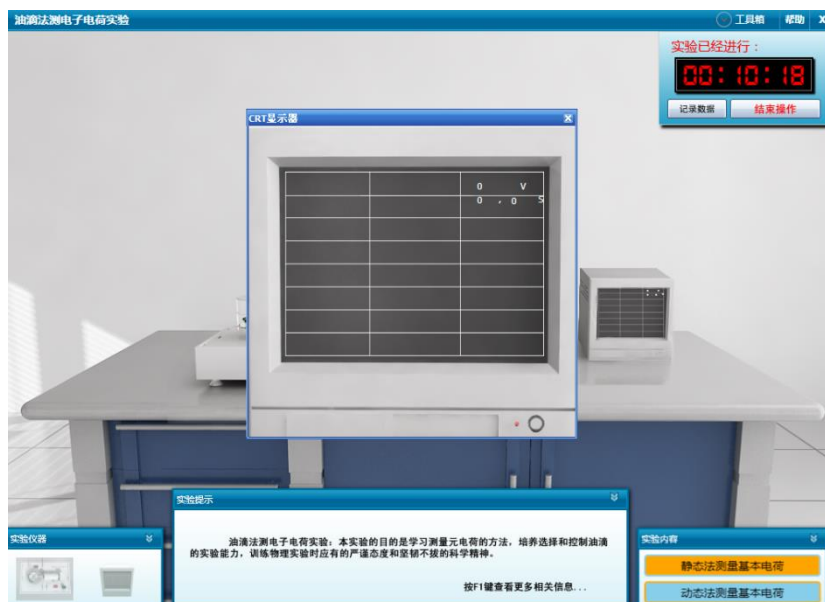
(2) 双击密立根油滴仪小图标，打开密立根油滴仪。



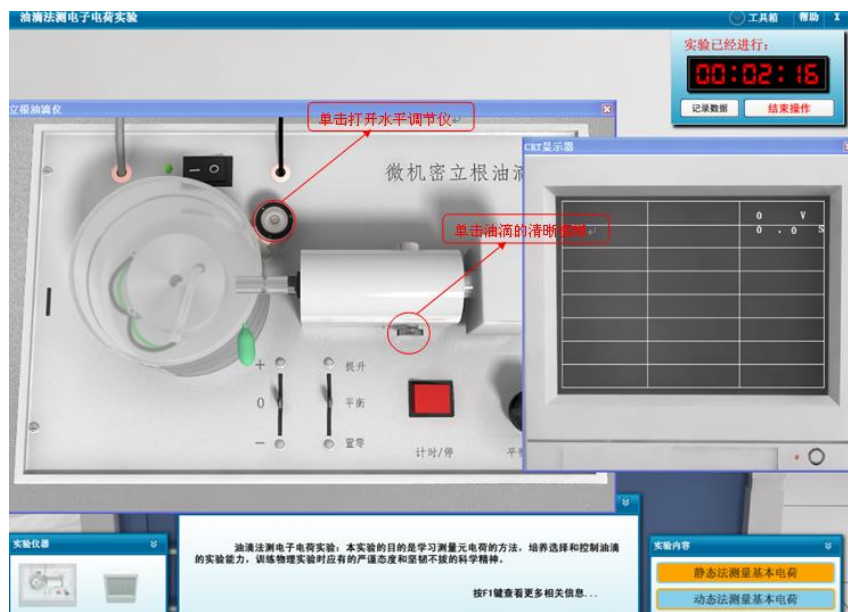
(3) 双击显示器小图标，打开显示器。



(4) 单击鼠标打开显示器的开关。



(5) 这个时候桌面上会产生密立根油滴仪和显示器等装置的图像。



(6) 单击密立根油滴仪的水平气泡区域打开底座水平调节装置，调节底座进行调节。



在下图中观察水平气泡的位置



(7) 观察油滴在显示器上升、下落的时间。



(8) 保存数据，单击记录数据按钮弹出记录数据页面。

实验数据表格

实验室提供的密立根油滴仪，油滴喷雾器等实验仪器，利用静态法测量单位电荷的带电量，并将测量实验数据填入表格内。本实验提供相关实验常数，油滴的密度： 981kg/m^3 ；重力加速度： 9.794m/s^2 ；空气粘滞系数： 1.83E-13 ；油滴匀速下降距离： 2mm ；修正常数： 8.22E-3N/m ；大气压强： 1.013E5 Pa ；电压板之间的距离： 5mm ；单元电荷电量： 1.602E-19C ；油滴在面板上移动的距离为： 2mm

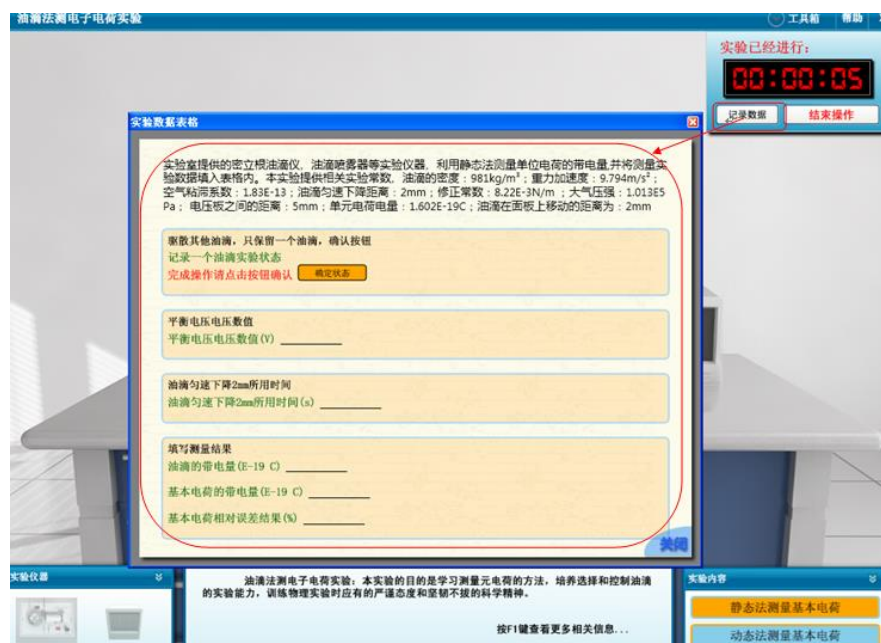
驱散其他油滴，只保留一个油滴，确认按钮
记录一个油滴实验状态
完成操作请点击按钮确认

平衡电压电压数值
平衡电压电压数值 (V) _____

油滴匀速下降2mm所用时间
油滴匀速下降2mm所用时间 (s) _____

填写测量结果
油滴的带电量 (E-19 C) _____
基本电荷的带电量 (E-19 C) _____
基本电荷相对误差结果 (%) _____

(9) 在记录数据页面的相应地方填写实验中的测量数据后，点击保存按钮即可保存当前数据；点击关闭按钮，则暂时关闭记录数据页面；再次点击记录数据按钮会显示记录数据页面。



(10) 其他辅助功能介绍，界面的右上角的功能显示框，当在普通做实验状态线，显示实验实际用时、记录数据按钮、结束实验按钮、计算器按钮；在考试状态下，显示考试所剩时间的倒计时、记录数据按钮、结束考试按钮、显示试卷按钮、计算器按钮。

实验仪器栏，存放实验所需的仪器，可以点击其中的仪器拖放至桌面，鼠标触及到仪器，实验仪器栏会显示仪器的相关信息；仪器使用完后，则不允许拖动仪器栏中的仪器了。

提示信息栏，显示实验过程中的仪器信息，实验内容信息，仪器功能按钮信息等相关信息，按 F1 键可以获得更多帮助信息。

实验状态辅助栏，显示实验名称和实验内容信息(多个实验内容依次列出)，当前实验内容显示为红色，其他实验内容为黑色；可以通过单击实验内容进行实验内容之间的切换。切换至新的实验内容后，实验桌上的仪器会重新按照当前实验内容进行初始化。

3. 静态法测电子电荷

(1) 单击电源开关，打开电源。



(2) 左击鼠标，使两极板电压产生向上的电场。



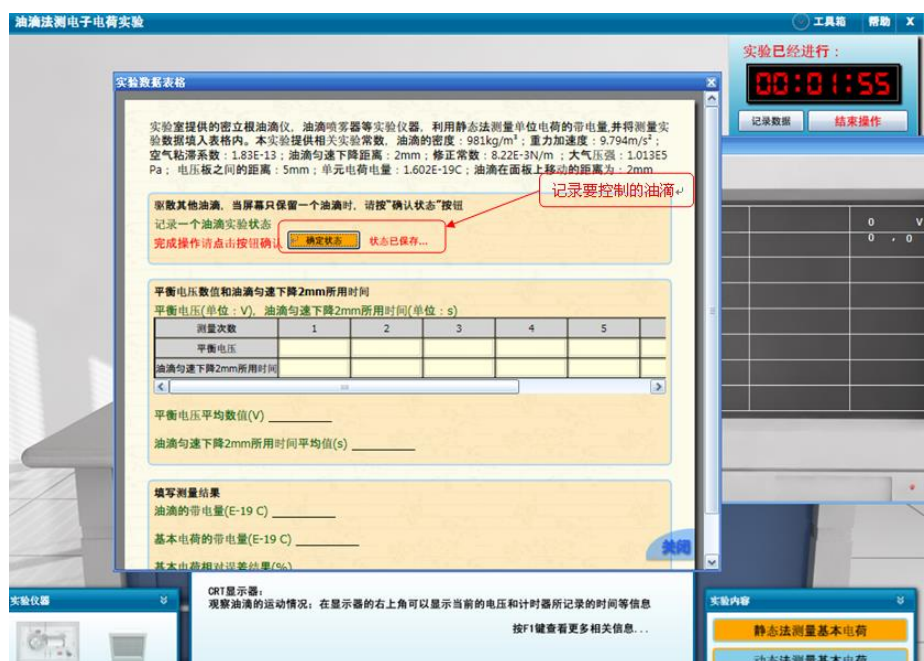
(3) 单击油滴管，产生雾状油滴。



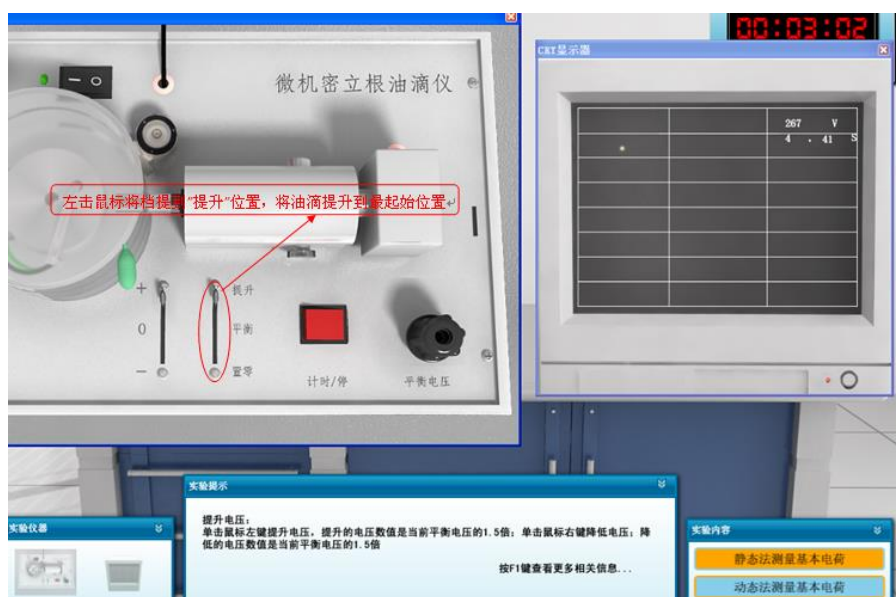
(4) 调节“平衡电压”旋钮使控制的油滴处于静止状态。



(5) 点击“确定状态”，记录被控油滴的状态。



(6) 左击“提升”电压档，使被控制油滴上升到最上面的起始位置，为下一步计时做准备。



(7) 右击到“置零”电压档，使被控制油滴匀速下落，开始计时。

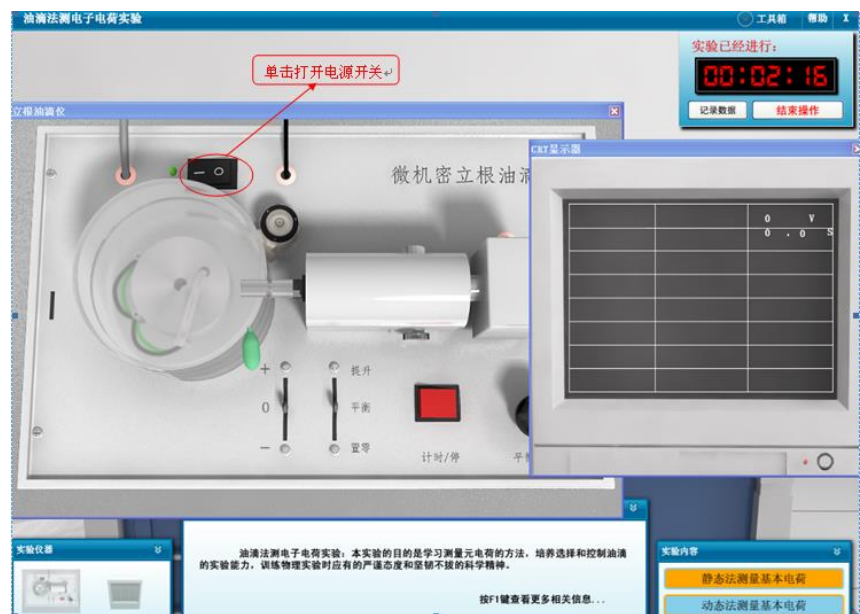


(8) 左击到“平衡”电压档，使被控制油滴停止下落处于静止状态，并停止计时，然后记录平衡电压数值和油滴下落时间。

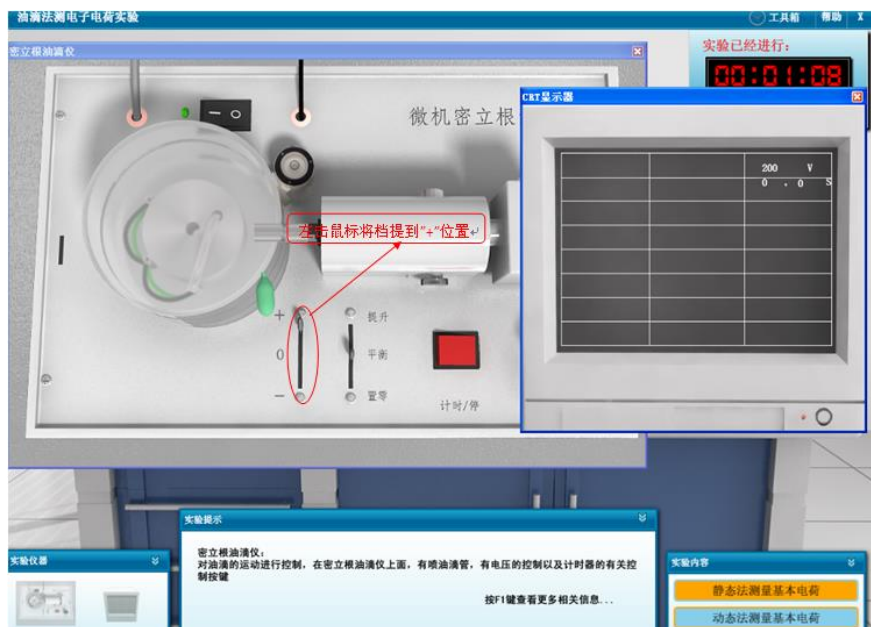


4. 动态法测电子电荷

(1) 单击电源开关，打开电源。



(2) 左击鼠标, 使两极板电压产生向上的电场。



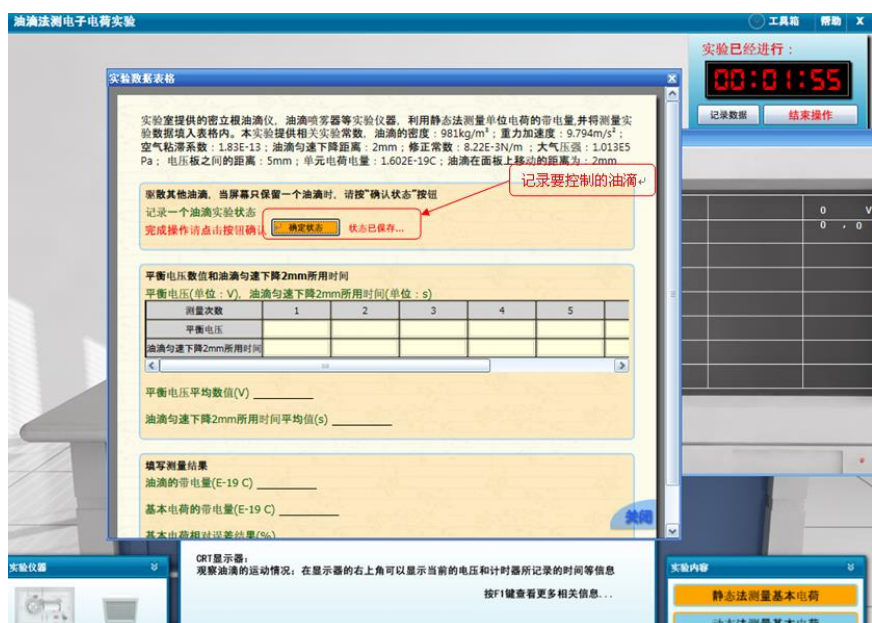
(3) 单击油滴管, 产生雾状油滴。



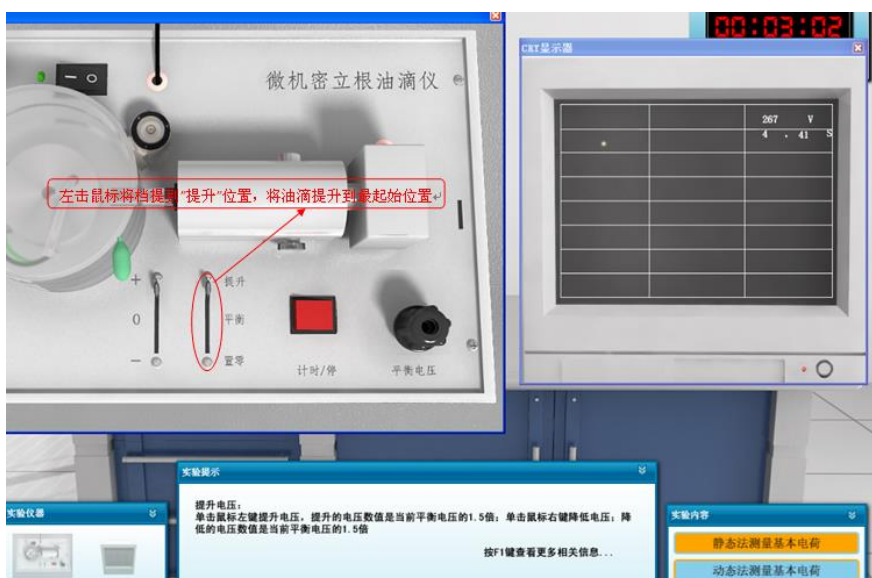
(4) 调节“平衡电压”旋钮使控制的油滴处于静止状态。



(5) 点击“确定状态”，记录被控油滴的状态。



(6) 左击“提升”电压档，使被控制油滴上升到最上面的起始位置，为下一步计时做准备。



(7) 右击到“置零”电压档，使被控制油滴匀速下落，开始计时。



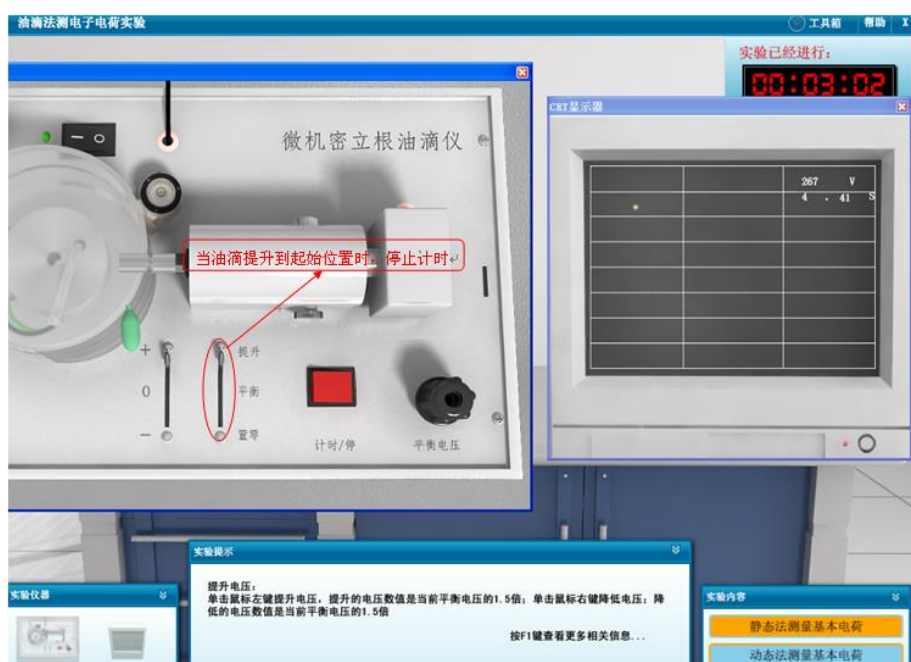
(8) 左击到“平衡”电压档，使被控制油滴停止下落处于静止状态，并停止计时，然后记录油滴下落时间。



(9) 左击到“提升”电压档，使被控制油滴向上匀速运动，并打开计时器开始计时。



(10) 当被控制油滴运动到起始位置时，计时器停止计时，并将此时的电压值和时间进行记录。



思考题

1. 本实验的巧妙构思在哪里？
2. 实验中如何保证油滴做匀速运动

参考资料

吴泳华，霍剑青，熊永红. 大学物理实验[M]. 高等教育出版社，2001.