

CCD 显微密立根油滴仪

油滴实验是近代物理学中测量基本电荷 e （也称元电荷）的一个经典实验，该实验是由美国著名物理学家密立根（Robert A. Millikan）经历十多年设计并完成的。这一实验的设计思想简明巧妙、方法简单，而结论却具有不容置疑的说服力，因此堪称物理实验的精华和典范。1908 年，在总结前人实验经验的基础上，密立根开始研究带电液滴在电场中的运动过程。结果表明，液滴上的电荷是基本电荷的整数倍，但因测量结果不够准确而不具说服力。1910 年，他用油滴代替容易挥发的水滴，获得了比较精确的测量结果。1913 年，密立根宣布了其开创性的研究结果，这一结果具有里程碑的意义：（1）明确了带电油滴所带的电荷量都是基本电荷的整数倍，（2）用实验的方法证明了电荷的不连续性，（3）测出了基本电荷值（从而通过荷质比计算出电子的质量）。此后，密立根又继续改进实验，提高实验精度，最终获得了可靠的结果（经过很多次的实验，密立根测出的实验数据是 $e=1.5924(17)\times 10^{-19}\text{C}$ ，这与现在公认的值相差仅 1%），最早完成了基本电荷的测量工作。这一结果再次证明电子的存在，使对“电子存在”的观点持怀疑态度的物理学家信服。由于在测定基本电荷值和测出普朗克常数等方面做出的成就，密立根在 1923 年获得了诺贝尔物理学奖。

随着现代测量精度的不断提高，目前公认的元电荷 $e = (1.60217733 \pm 0.00000049) \times 10^{-19}\text{C}$ 。

本实验采用 CCD 摄像机和监视器，可非常清楚地看到钟表油滴的运动过程，大大改善了实验条件，使测量结果更为准确。

实验目的

1. 学习用油滴实验测量电子电荷的原理和方法。
2. 验证电荷的不连续性。
3. 测量电子的电荷量。
4. 了解 CCD 摄像机、光学系统的成像原理及视频信号处理技术的工程应用等。
5. 训练学生在实验过程中严谨的态度、实事求是的作风。

实验原理

密立根油滴实验测量基本电荷的基本设计思想是使带电油滴在两金属极板之间处于受力平衡状态。按运动方式分类，可分为平衡法和动态法。

1. 动态法

首先分析重力场中一个足够小的油滴的运动，设此油滴半径为 r （亚微米量级），质量为 m_1 ，空气是粘滞流体，故此运动油滴除重力和浮力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。设油滴以速度 v_f 匀速下落，则有

$$m_1 g - m_2 g = K v_f \quad (1)$$

此处 m_2 为与油滴同体积的空气质量， K 为比例系数， g 为重力加速度。油滴在空气及重力场中的受力情况如图 1 左图所示。

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 1 右图所示，如果油滴以速度 v_r 匀速上升，则有

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

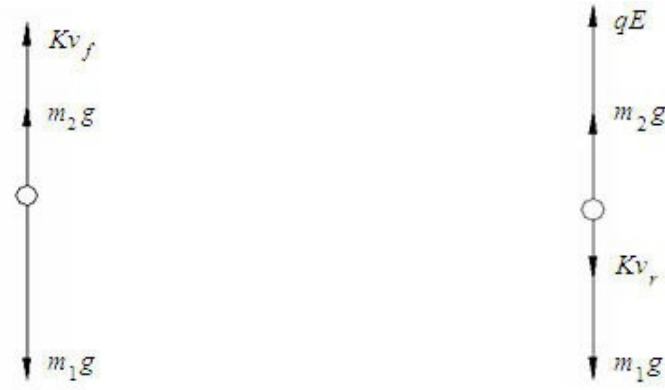


图 1 左图为重力场中油滴受力示意图，右图为电场中油滴受力示意图

由式（1）和（2）消去比例系数 K ，可解出 q 为

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

由式（3）可以看出，要测量油滴上电荷量 q ，需要分别测出 m_1 、 m_2 、 E 、 v_f 、 v_r 等物理量。

由喷雾器喷出的油滴的半径 r 是亚微米数量级，直接测量其质量 m_1 是困难的，为此希望消去 m_1 ，而代之以容易测量的量。设钟表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

$$m_1g - m_2g = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g \quad (4)$$

由斯托克斯定律，粘滞流体（此处为空气）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 $6\pi\eta r$ ，此处的 η 为空气粘度， r 为物体半径。于是可将式（4）代入式（1），有

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

因此

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

以此代入式（3）并整理得到

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

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，其空气粘度 η 需修正为 η'

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \quad (8)$$

此处 p 为空气压强， b 为修正常数， $b=0.00823\text{N/m}$ ，因此式（5）可修正为

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

由于半径 r 在修正项中，当精度要求不是太高时，油滴半径由式（6）计算即可。

将（6）代入（8）中，并以（8）代入式（7），得

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

实验中常常固定油滴运动的距离 s ，通过测量油滴在距离 s 内所需要的运动时间 t 来求得其运动速度 v ，且电场强度

$$E = \frac{U}{d}$$

d 为平行平板间的距离， U 为所加的电压，因此，式（10）可写成

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

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

$$q = C \frac{1}{U} \left(\frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_r} \right) \left(\frac{1}{t_f} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (11')$$

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 与 t_r 的不同，标志着电荷的不同。

2. 平衡法

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）、（8）和（9）代入式（11）并注意到 $1/t_r=0$ ，则有

$$q = 9\sqrt{2}\pi d \left[\frac{(\eta s)^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{U} \left(\frac{1}{t_f} \right)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

3. 元电荷的测量方法

测量油滴上所带电荷量 q 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 ，它们应近似为元电荷的整数倍。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 e 。

$$q_i = n_i e \quad (n_i \text{ 为整数}) \quad (13)$$

也可用作图法求 e 值，根据式 (13)， e 为直线方程的斜率，通过拟合直线即可求的 e 值。

我们建议实验中选择带 1-5 个电子的油滴（具体的选择方法会在后面提到），若油滴所带的电子过多，则不好确定该油滴所带的电子个数。

仪器介绍

实验仪由主机、CCD 成像系统、油滴盒、监视器和喷雾器等部件组成。

其中主机包括可控高压电源、计时装置、A/D 采样、视频处理等单元模块。CCD 成像系统包括 CCD 传感器、光学成像部件等。油滴盒包括高压电极、照明装置、防风罩等部件。监视器是视频信号输出设备。仪器部件示意如图 2。

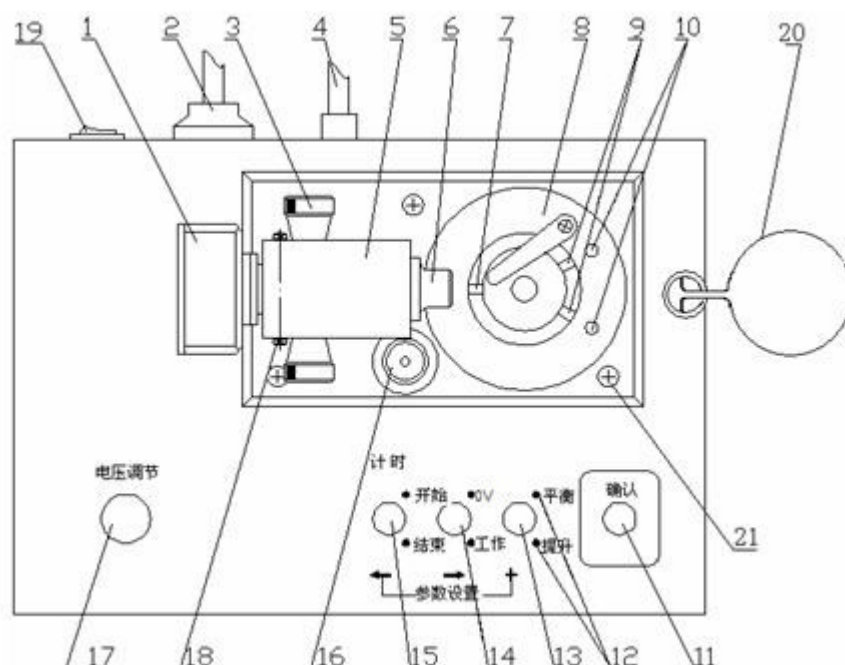


图 2 主机部件示意图

1、CCD 盒 2、电源插座 3、调焦旋钮 4、Q9 视频接口 5、光学系统 6、镜头 7、观察孔 8、上极板压簧 9、进光孔 10、光源 11、确认键 12、状态指示灯 13、平衡/提升切换键 14、0V/工作切换键 15、计时开始/结束切换键 16、水准泡 17、电压调节旋钮 18、紧定螺钉 19、电源开关 20、油滴管收纳盒安放环 21、调平螺钉 (3 颗)

CCD 模块及光学成像系统用来捕捉暗室中油滴的像，同时将图像信息传给主机的视频处理模块。实验过程中可以通过调焦旋钮来改变物距，使油滴的像清晰地呈现在 CCD 传感器的窗口内。

电压调节旋钮可以调整极板之间的电压大小，用来控制油滴的平衡、下落及提升。

计时“开始/结束”按键用来计时、“0V/工作”按键用来切换仪器的工作状态、“平衡/提升”按键可以切换油滴平衡或提升状态、“确认”按键可以将测量数据显示在屏幕上，从而省去了每次测量完成后手工记录数据的过程，使操作者把更多的注意力集中到实验本质上来。

油滴盒是一个关键部件，具体构成如图 3 所示。

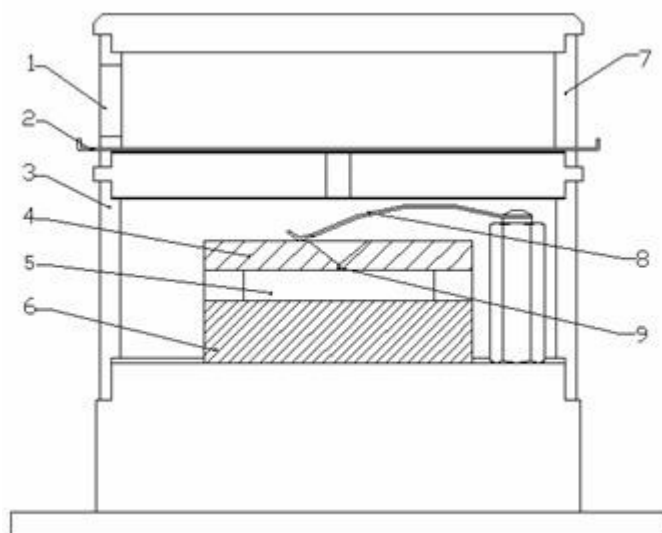


图 3 油滴盒装置示意图

1、喷雾口 2、进油量开关 3、防风罩 4、上极板 5、油滴室 6、下极板 7、油雾杯 8、上极板压簧 9、落油孔

上、下极板之间通过胶木圆环支撑，三者之间的接触面经过机械精加工后可以将极板间的不平行度、间距误差控制在 0.01mm 以下；这种结构基本上消除了极板间的“势垒效应”及“边缘效应”，较好地保证了油滴室处在匀强电场之中，从而有效地减小了实验误差。

胶木圆环上开有两个进光孔和一个观察孔，光源通过进光孔给油滴室提供照明，而成像系统则通过观察孔捕捉油滴的像。照明由带聚光的高亮发光二极管提供，其使用寿命长、不易损坏；油雾杯可以暂存油雾，使油雾不会过早地散逸；进油量开关可以控制落油量；防风罩可以避免外界空气流动对油滴的影响。

实验内容与步骤

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。要求至少测量 5 个不同的油滴，每个油滴的测量次数应在 5 次。

1. 调整仪器

① 水平调整

调整实验仪主机的调平螺钉旋钮(俯视时，顺时针平台降低，逆时针平台升高)，直到水准泡正好处于中心（注：严禁旋动水准泡上的旋钮）。将实验平台调平，使平衡电场方向与重力方向平行以免引起实验误差。极板平面是否水平决定了油滴在下落或提升过程中是否发生左右的漂移。

② 喷雾器调整

将少量钟表油缓慢地倒入喷雾器的储油腔内，使钟表油湮没提油管下方，油不要太多，以免实验过程中不慎将油倾倒至油滴盒内堵塞落油孔。将喷雾器竖起，用手挤压气囊，使得提油管内充满钟表油。

③ 仪器硬件接口连接

主机接线：电源线接交流 $220\text{V}/50\text{Hz}$ 。

监视器：视频线缆输入端接“VIDEO”，另一 Q9 端接主机“视屏输出”。DC12V 适配器电源线接 $220\text{V}/50\text{Hz}$ 交流电压。前面板调整旋钮自左至右依次为显示开关、返回键、方向键、菜单键（建议亮度调整为 20、对比度调整为 100）。

④ 实验仪联机使用

- a、打开实验仪电源及监视器电源，监视器出现仪器名称及研制公司界面。
- b、按主机上任意键：监视器出现参数设置界面，首先，设置实验方法，然后根据该地的环境适当设置重力加速度、油密度、大气压强、油滴下落距离。“←”表示左移键、“→”表示为右移键、“+”表示数据设置键。
- c、按确认键后出现实验界面：计时“开始/结束”键为结束、“0V/工作”键为 0V、“平衡/提升”键为“平衡”。

⑤、CCD 成像系统调整

打开进油量开关，从喷雾口喷入油雾，此时监视器上应该出现大量运动油滴的像。若没有看到油滴的像，则需调整调焦旋钮或检查喷雾器是否有油雾喷出。

2. 熟悉实验界面

在完成参数设置后，按确认键，监视器显示实验界面，如图 4。不同的实验方法的实验界面有一定差异。

		(极板电压) (计时时间)
0		(电压保存提示栏)
		(保存结果显示区) (共 5 格)
		(下落距离栏)
(距离标志)		(实验方法栏)
		(仪器生产厂家)

图 4 实验界面示意图

极板电压：实际加到极板的电压，显示范围：0~1999V。

计时时间：计时开始到结束所经历的时间，显示范围：0~99.99S。

电压保存提示：将要作为结果保存的电压，每次完整的实验后显示。当保存实验结果后（即按下确认键）自动清零。显示范围同极板电压。

保存结果显示：显示每次保存的实验结果，共 5 次，显示格式与实验方法有关。

平衡法：

(平衡电压)
(下落时间)

动态法：

(提升电压)	(平衡电压)
(上升时间)	(下落时间)

当需要删除当前保存的实验结果时，按下确认键 2 秒以上，当前结果被清除(不能连续删)。

下落距离：显示设置的油滴下落距离。当需要更改下落距离的时候，按住平衡、提升键 2 秒以上，此时距离设置栏被激活(动态法 1 步骤和 2 步骤之间不能更改)，通过 + 键（即平衡、提升键）修改油滴下落距离，然后按确认键确认修改。距离标志相应变化。

距离标志：显示当前设置的油滴下落距离，在相应的格线上做数字标记，显示范围：0.2mm~1.8mm。垂直方向视场范围为 2mm，分为 10 格，每格 0.2mm。

实验方法：显示当前的实验方法（平衡法或动态法），在参数设置界面设定。欲改变实验方法，只有重新启动仪器（关、开仪器电源）。对于平衡法，实验方法栏仅显示“平衡法”字样；对于动态法，实验方法栏除了显示“动态法”以外，还显示即将开始的动态法步骤。如将要开始动态法第一步(油滴下落)，实验方法栏显示“1 动态法”。同样，做完动态法第一步骤，即将开始第二步骤时，实验方法栏显示“2 动态法”。

仪器生产厂家：显示生产厂家。

3. 选择适当的油滴并练习控制油滴（以平衡法为例）

① 怎样选择合适的油滴

根据油滴在电场中受力平衡公式 $qv/d=4\pi r^3 \rho g/3$ 以及多次实验的经验，当油滴的实际半径在 $0.5-1 \mu m$ 时最为适宜。若油滴过小，布朗运动影响明显，平衡电压不易调整，时间误差也会增加；若油滴过大，下落太快，时间相对误差增大，且油滴带多个电子的几率增加，前面说到，我们希望合适的油滴最好带 1-5 个电子。

操作方法：三个参数设置按键分别为：“结束”、“工作”、“平衡”状态，平衡电压调为约 400V。喷入油滴，调节调焦旋钮，使屏幕上显示大部分油滴，可见带电多的油滴迅速上升出视场，不带电的油滴下落出视场，约 10s 后油滴减少。选择那种上升缓慢的油滴作为暂时的目标油滴，切换“0V/工作”键，这时极板间的电压为 0V，在暂时的目标油滴中选择下落速度为 0.2—0.5 格/s 的作为最终的目标油滴，调节调焦旋钮使该油滴最小最亮。

② 平衡电压的确认

目标油滴聚焦到最小最亮后，仔细调整平衡时的“电压调节”使油滴平衡在某一格线上，等待一段时间（大约两分钟），观察油滴是否飘离格线。若油滴始终向同一方向飘离，则需重新调整平衡电压；若其基本稳定在格线或只在格线上下做轻微的布朗运动，则可以认为油滴达到了力学平衡，这时的电压就是平衡电压。

③ 控制油滴的运动

	○（开始下落的位置）	
0	●（开始记时的位置）	
↑ 油滴下落距离 ↓	○ ○ ○	
1.6	●（结束记时的位置）	
	○（停止下落的位置）	

图 5 平衡法计时位置示意图

将油滴平衡在屏幕顶端的第一条格线上，将工作状态按键切换至“0V”，绿色指示灯点亮，此时上、下极板同时接地，电场力为零，油滴在重力、浮力及空气阻力的作用下作下落运动。油滴是先经一段变速运动，然后变为匀速运动，但变速运动的时间非常短（小于 0.01s，与计时器的精度相当），所以可以认为油滴是立即匀速下落的。当油滴下落到有 0 标记的格线时，立刻按下“计时”键，计时器开始记录油滴下落的时间；待油滴下落至有距离标志（1.6）的格线时，再次按下计时键，计时器停止计时（计时位置见图 5），此时油滴停止下落。“0V/工作”按键自动切换至“工作”，“平衡/提升”按键处于“平衡”，可以通过“确认”键将此次测量数据记录到屏幕上。将“平衡/提升”按

键切换至“提升”，这时极板电压在原平衡电压的基础上增加约 200V 的电压，油滴立即向上运动，待油滴提升到屏幕顶端时，切换至“平衡”，找平衡电压，进行下一次测量。每颗油滴共测量 5 次，系统会自动计算出这颗油滴的电荷量。

4. 正式测量

实验可选用平衡法（推荐）、动态法。**实验前仪器必须调水平。**

平衡法

- ① 开启电源，进入实验界面将工作状态按键切换至“工作”，红色指示灯点亮；将“平衡/提升”按键置于“平衡”。
- ② 将平衡电压调整为 400V 左右，通过喷雾口向油滴盒内喷入油雾，此时监视器上将出现大量运动的油滴。选取合适的油滴，仔细调整平衡电压 U ，使其平衡在起始（最上面）格线上。
- ③ 将“0V/工作”状态按键切换至“0V”，此时油滴开始下落，当油滴下落到有“0”标记的格线时，立即按下计时开始键，同时计时器启动，开始记录油滴的下落时间 t 。
- ④ 当油滴下落至有距离标记的格线时（例如：1.6），立即按下计时结束键，同时计时器停止计时，油滴立即静止，“0V/工作”按键自动切换至“工作”。通过“确认”按键将这次测量的“平衡电压和匀速下落时间”结果同时记录在监视器屏幕上。
- ⑤ 将“平衡/提升”按键置于“提升”，油滴将向上运动，当回到高于有“0”标记格线时，将“平衡/提升”键切换至平衡状态，油滴停止上升，重新调整平衡电压。（注意：如果此处的平衡电压发生了突变，则该油滴得到或失去了电子。这次测量不能作数，从步骤②开始重新找油滴。）
- ⑥ 重复③④⑤，并将数据（平衡电压 V 及下落时间 t ）记录到屏幕上。当 5 次测量完成后，按“确认”键，系统将计算 5 次测量的平均平衡电压 \bar{U} 和平均匀速下落时间 \bar{t} ，并根据这两个参数自动计算并显示出油滴的电荷量 q 。
- ⑦ 重复②③④⑤⑥步，共找 5 颗油滴，并测量每颗油滴的电荷量 q_i 。

数据处理

计算法：至少测量 5 颗油滴，记录每颗油滴的电荷量 q_i ，再 $\frac{q_i}{e_{\text{理论}}}$ ，对商四舍五入取整后得到

每颗油滴所带电子个数 n_i ；再 $\frac{q_i}{n_i} = e_i$ 得到每次测量的基本电荷，再求出 n 次测量的 \bar{e} ，与理论值比

较求百分误差及不确定度。

作图法：得到 q_i 和对应的 n_i 后，以 q 为纵坐标， n 为横坐标作图，拟合得到的直线斜率即为基

本电荷 $e_{\text{测量}}$ ，与理论值比较求百分误差及不确定度。

动态法（选做）

① 动态法分两步完成，第一步骤是油滴下落过程，其操作同平衡法（参看平衡法）。完成第一步骤后，如果对本次测量结果满意，则可以按下确认键保存这个步骤的测量结果，如果不满意，则可以删除（删除方法见前面所述）。

② 第一步骤完成后，油滴处于距离标志格线以下。通过“0V/工作”键、“平衡/提升”键配合使油滴下偏距离“1.6”标志格线一定距离。调节“电压调节”旋钮加大电压，使油滴上升，当油滴到达“1.6”标志格线时，立即按下计时开始键，此时计时器开始计时；当油滴上升到“0”标记格线时，再次按下计时键，停止计时，但油滴继续上升，再次调节“电压调节”旋钮使油滴平衡于“0”

格线以上（图 6），按下“确认”键保存本次实验结果。

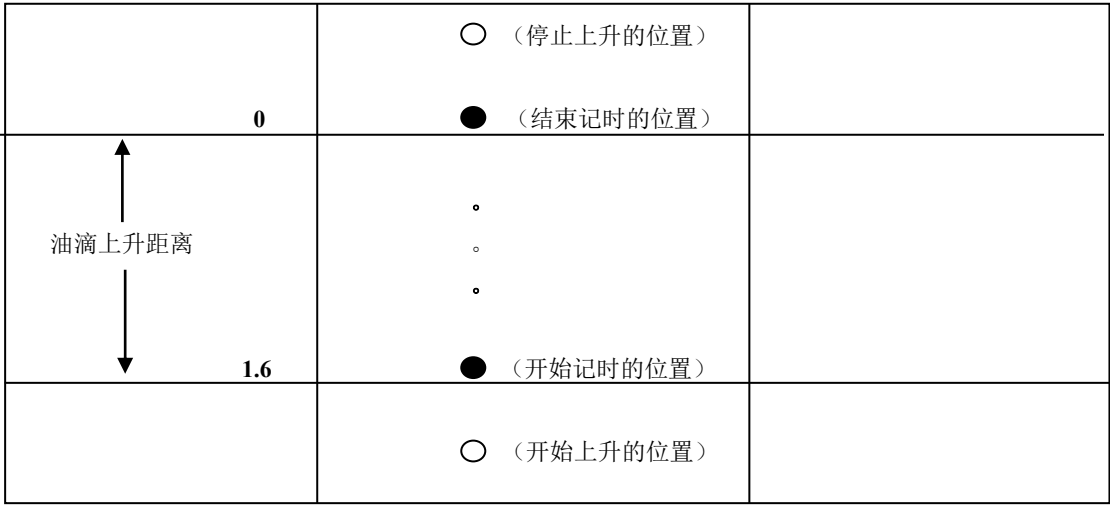


图 6 动态法计时位置示意图

③ 重复以上步骤完成 5 次完整实验，然后按下确认键，出现实验结果画面。动态测量法是分别测出下落时间 t_f 、提升时间 t_r 及提升电压 U ，并代入式（11）即可求得油滴带电量 q 。

注意事项

- 1、CCD 盒、紧定螺钉、摄像镜头的机械位置不能变更，否则会对像距及成像角度造成影响。（见图 1-3）
- 2、仪器使用环境：温度为（0-40℃）的静态空气中。
- 3、注意调整进油量开关（见图 1-4），应避免外界空气流动对油滴测量造成影响。
- 4、仪器内有高压，实验人员避免用手接触电极。
- 5、实验前应对仪器油滴盒内部进行清洁，防止异物堵塞落油孔。
- 6、注意仪器的防尘保护。

附：平衡法系统参数

原理公式

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

其中 r 为油滴半径

$$r=\left[\frac{9\eta s}{2g(\rho_1-\rho_2)t}\right]^{\frac{1}{2}};$$

d 为极板间距

$$d=5.00\times10^{-3}m$$

η 为空气粘度

$$\eta=1.83\times10^{-5}kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$$

s 为下落距离

依设置，默认 1.6mm

图 1-2 电场
中油滴受力
示意图

- ρ_1 为钟表油密度

$\rho_1 = 981kg \cdot m^{-3}$ (20℃)
- ρ_2 为空气密度

$\rho_2 = 1.2928kg \cdot m^{-3}$ (标准状况下)
- g 为重力加速度

$g = 9.794m \cdot s^{-2}$ (成都)
- b 为修正常数

$b = 8.23 \times 10^{-3} N / m$ ($6.17 \times 10^{-6} m \cdot cmHg$)
- p 为标准大气压强

$p = 101325Pa$ ($76.0cmHg$)
- U 为平衡电压
- t 为油滴匀速下落时间

注：

①由于油的密度远远大于空气的密度，即 $\rho_1 \gg \rho_2$ ，因此 ρ_2 相对于 ρ_1 来讲可忽略不计（当然也可代入计算）。

②标准状况是指大气压强 $p = 101325Pa$ ，温度 $W = 20^\circ C$ ，相对湿度 $\phi = 50\%$ 的空气状态。实际大气压强可由气压表读出，温度可由温度计读出。

③油的密度随温度变化关系

$W(^{\circ}C)$	0	10	20	30	40
$\rho (kg/m^3)$	991	986	981	976	971

④一般来讲，流体粘度受压强影响不大，当气压从 $1.01 \times 10^5 Pa$ 增加到 $5.07 \times 10^6 Pa$ 时，空气的粘度只增加 10%，在工程应用中通常忽略压强对粘度的影响。温度对气体粘度有很强的影响。

气体粘度可用苏士兰公式来表示

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{(\frac{T}{T_0})^{\frac{3}{2}}(T_0 + T')}{T + T'}$$

式中， μ_0 是绝对温度 T_0 的动力粘度，通常取 $T_0 = 273K$ 时的粘度， $\mu_0 = 1.71 \times 10^{-5} kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ；

常数 n 和 T' 通过数据拟合得出，对于空气， $n = 0.7$ ， $T' = 110K$ 。