

近代物理实验

实验 1.1 电子电荷 e 值的测定

[引言]

1897年,汤姆孙(J. J. Thomson)在英国剑桥卡文迪许实验室采用如图 1.1-1 所示的装置测量了电子的比荷(电荷量与质量之比, e/m)。这个实验是 19 世纪末物理学的一个里程碑式实验,其最重要的价值是发现该比荷具有单一值,与阴极材料、管内残余气体种类以及与实验相关的其他物质均无关,表明粒子束中的粒子是组成所有物质的基本单元,我们现在称其为电子。因此,汤姆孙被认为是亚原子粒子——电子的首位发现者。在汤姆孙实验 15 年之后,美国物理学家密立根(R. A. Millikan)成功测量了电子电荷 e 的精确值。利用比荷 e/m 和电子电荷 e 值,就可以确定电子的质量。

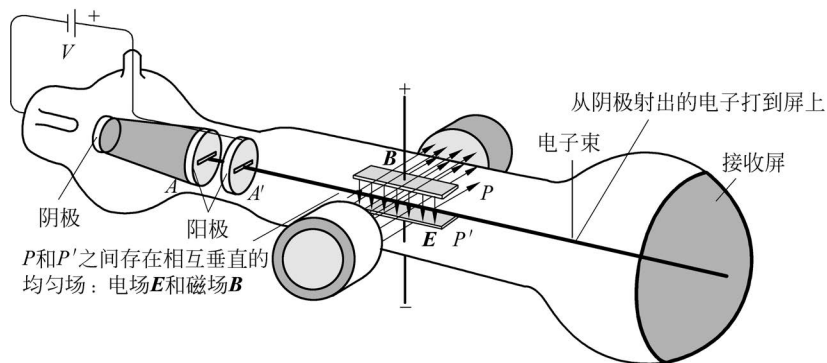


图 1.1-1 测量电子比荷的汤姆孙装置结构图

密立根设计的测定电子电荷 e 值的实验装置和方法,在实验物理学中占有很重要的地位。它不仅准确测定了电子电荷的数值, $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$,还证明了油滴所带电荷是元电荷——电子电荷 e 的整数倍,明确了电荷的不连续性。正是由于这一实验的成就,密立根获得了 1923 年诺贝尔物理学奖。目前给出的电子电荷的最好结果为 $e = (1.602\ 177\ 33 \pm 0.000\ 000\ 49) \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

由于密立根实验设计巧妙、简单,原理清楚,结果准确,它历来是一个著名而有启发性的物理实验。这种实验设计的基本思想在今天仍然具有活力,为从实验上测定一些其他物理量提供了可能性。

[实验目的]

- (1) 学习密立根油滴实验的设计思想。
- (2) 测量电子的电荷量,验证电荷的不连续性(电荷的量子性)。

[实验仪器]

电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)显微密立根油滴实验仪,钟表油,油喷雾器等。

[预习提示]

- (1) 了解测量油滴电荷实验的设计思想。
- (2) 了解平衡法和动态法测量油滴电荷所用的计算公式和需要测量的物理量。
- (3) 了解如何选择合适的油滴以及如何进行测量。

[实验原理]

密立根油滴实验测定电子电荷的基本设计思想是使带电油滴在测量范围内处于受力平衡状态,通过对带电微小油滴的受力分析,把对微小油滴所带电荷的测量转化为对油滴运动速度的测量。油滴实验原理如图 1.1-2 所示, A、B 为两块相距为 d 的平行极板, A 板中央有一小孔,能让微小油滴从孔中落入到极板间。A、B 板如不加电压,油滴将因重力作用而自由下落,当 A、B 两板加上电压且油滴又带有电荷(由油喷雾器喷出油滴时因摩擦可使之带电)时,则油滴要受到电场力的作用,改变电场方向可使油滴向上或向下运动。由于空气的黏滞性,油滴运动一小段距离后就要作匀速运动。油滴进入匀速运动前的变速运动时间非常短,小于 0.01s,与计时器精度相当,因此在测量上可以认为油滴从静止开始运动立刻进入匀速运动。

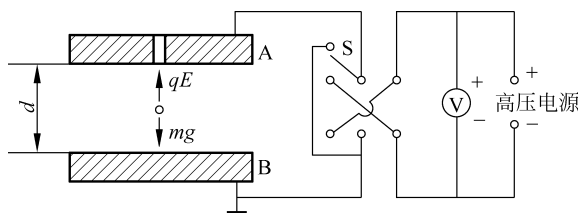


图 1.1-2 油滴实验原理图

设油滴质量为 m , 所带电荷量为 q , 当 A、B 两极板不加电压, 并用开关 S 将其短路使两极板间无电场时, 则油滴在重力作用下, 自由下落, 但空气的黏滞性对油滴所产生的阻力与油滴的速率成正比, 油滴下落一小段距离的速率达到一定值后, 黏滞力 F 就与重力平衡, 即 $F = mg$, 根据斯托克斯定律, 有

$$F = 6\pi\eta r V_g \quad (1.1-1)$$

式中, η 为空气黏滞系数, r 为油滴半径, 这时有

$$6\pi\eta r V_g = mg \quad (1.1-2)$$

如果在平行极板上加电场 E , 设电场力 qE 与重力方向相反, 油滴受电场力作用加速上升, 由于空气阻力作用, 上升一段距离后, 油滴所受的空气阻力、电场力与重力达到平衡(空气浮力忽略不计), 油滴将匀速上升, 设其速率为 V_e , 有

$$6\pi\eta r V_e = qE - mg \quad (1.1-3)$$

由式(1.1-2)、式(1.1-3)可得

$$q = \frac{mg}{E} \left(\frac{V_g + V_e}{V_g} \right) \quad (1.1-4)$$

由式(1.1-4)可以看到, 为测定油滴所带电荷 q , 除应测出 E 、 V_e 、 V_g 外, 还需测出油滴质量 m 。由于空气中悬浮和表面张力的作用, 油滴可视为圆球, 其质量为

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \sigma) \quad (1.1-5)$$

式中, ρ 为油的密度, σ 为空气密度, 用式(1.1-5)计算出的质量是抵消了浮力后的相当质量。

由喷雾器喷出的雾状油滴的半径 r 很小, 为微米量级, 难于直接测量, 可以采用间接测量的办法。利用斯托克斯定律, 由式(1.1-2)及式(1.1-5)可得

$$r = \left(\frac{9}{2}\eta \frac{V_g}{(\rho - \sigma)g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1-6)$$

考虑到油滴体积非常小, 空气已不能看作是连续介质, 空气的黏滞系数应修正为

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \quad (1.1-7)$$

式中, b 为修正常数, p 为空气压强。

实验时可控制油滴匀速下降和匀速上升的距离, 且使其相等, 设为 l , 测出油滴匀速下降时间 t_g 和匀速上升时间 t_e , 则

$$V_g = \frac{l}{t_g}, \quad V_e = \frac{l}{t_e} \quad (1.1-8)$$

将式(1.1-5)~(1.1-8)以及 $E = \frac{V}{d}$ (V 为 A 、 B 两极板上所加电压, d 为极板间距)代入式(1.1-4), 可得

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2(\rho - \sigma)g}} \left(\frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{d}{V} \left(\frac{l}{t_e} + \frac{l}{t_g} \right) \left(\frac{l}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1-9)$$

由式(1.1-9)可以计算出油滴所带电荷, 式中油滴半径可用式(1.1-6)近似计算(即不对黏滞系数进行修正)。

式(1.1-9)为动态法测油滴所带电荷的计算公式, 也可以用静态法测量油滴所带电荷。静态法也称平衡法, 测量时需要调整两极板上所加电压, 使油滴处于静止状态。此时 $V_e = 0$, 即 $t_e \rightarrow \infty$, 由式(1.1-9)可得

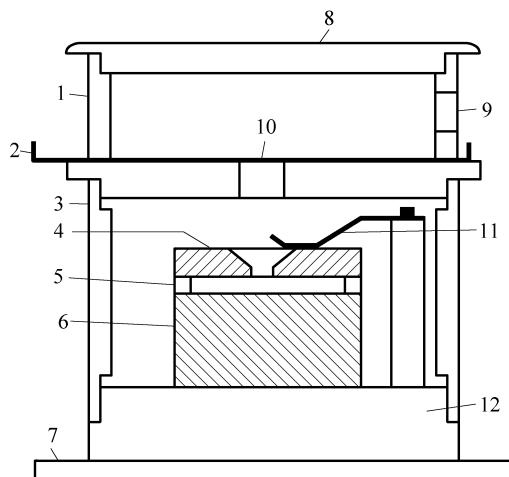
$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2(\rho - \sigma)g}} \left(\frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{d}{V} \left(\frac{l}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1-10)$$

为获得电子电荷 e 值,对实验测得的各个油滴所带电荷 q 求最大公约数,最大公约数就是电子电荷 e 的值。也可以测同一油滴所带电荷的改变量 Δq (可以用紫外线或放射源照射油滴,使它所带电荷量改变),这时 Δq 近似为某一最小单位的整数倍,此最小单位即为元电荷 e 。

[仪器装置]

油滴实验仪主要由油滴盒、CCD 显微镜、监视器和主机等组成。

油滴盒是整个实验装置的核心部件,其结构见图 1.1-3。油滴盒 5 是由两块经过精磨的相互平行的圆电极板 4 和 6 组成。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将极板间的不平行度、间距误差控制在 0.01mm 以下。在上电极板 4 中央有一个油雾落入孔 10,整个油滴盒装在防风罩 3 中,以防周围空气流动对油滴运动产生影响。防风罩上面是一个可取下的油雾杯 1,油雾杯底部中心有一个落油孔 10 和一个落油孔开关 2。油滴用喷雾器从喷雾口 9 喷入,经落油孔 10 落入油滴盒内。落油孔开关 2 可以关闭落油孔。



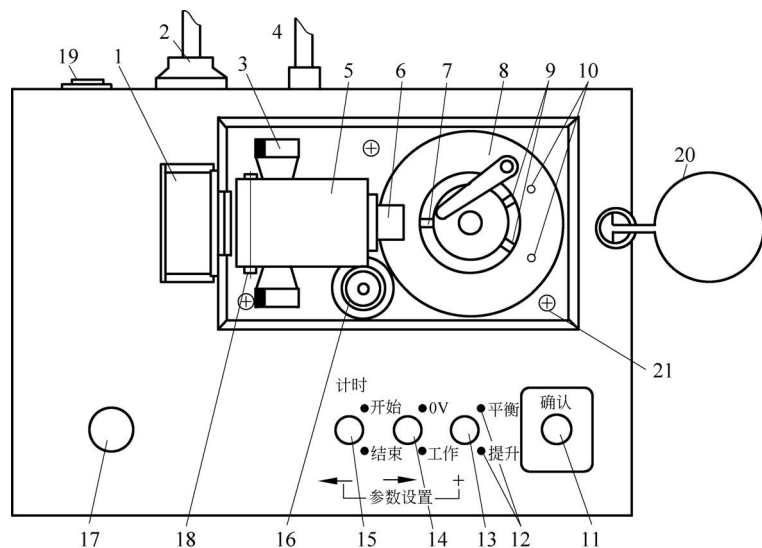
1—油雾杯；2—落油孔开关；3—防风罩；4—上电极；5—油滴盒；6—下电极；7—座架；
8—上盖板；9—喷雾口；10—落油孔；11—上电极压簧；12—油滴盒基座。

图 1.1-3 油滴盒结构示意图

胶木圆环上开有两个进光孔和一个观察孔,带聚光的高亮度发光二极管通过进光孔给油滴盒提供照明,而 CCD 显微镜则通过观察孔观察油滴。

CCD 显微镜将 CCD 摄像头与显微镜集成为一体,其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镜焦距,使油滴的像清晰地呈现在监视器屏幕上。

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,其面板如图 1.1-4 所示。主机面板上的电压调节旋钮 17 可以调整极板之间的电压,用来控制油滴的平衡、下落或上升;计时开始/结束切换键 15 用来计时;0V/工作切换键 14 用来切换仪器的工作状态;平衡/提升切换键 13 可以切换油滴平衡或上升状态;确认键 11 可以将测量数据显示在屏幕上。



1—CCD盒；2—电源插座；3—调焦旋钮；4—视频接口；5—光学系统；6—镜头；7—观察口；8—上极板压簧；9—进光口；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—紧固螺钉；19—电源开关；20—油滴管收纳盒安放环；21—调平螺钉(3颗)。

图 1.1-4 主机面板

[实验内容与测量]

学习控制油滴在视场中的运动,并选择合适的油滴进行测量。要求至少测量 5 个不同的油滴,每个油滴测量 5 次。

1. 仪器调节

1) 水平调整

调整实验仪主机上的调平螺钉旋钮(俯视时,螺钉顺时针旋转,平台降低;逆时针旋转,平台升高),直到水准泡正好处于中心,即通过水准泡将实验平台调平,使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上升过程中是否发生前后或左右的漂移。

2) 喷雾器调整

将几滴钟表油注入喷雾器的储油腔内,用手挤压气囊,使得提油管内充入钟表油。

3) 仪器硬件接口连接

主机接线:电源线接交流 220V/50Hz。

监视器:视频线缆一端接监视器上的“VIDEO”插座,另一端接主机上的“视频输出”端口。监视器上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

(1) 打开实验仪电源及监视器电源,监视器屏幕出现仪器名称界面。

(2) 按主机上任意键,监视器出现参数设置界面。此时,按主机面板上的平衡/提升按

钮,选择平衡法或动态法,然后设置重力加速度、油密度、大气压强、油滴下落距离等。主机面板上的“←”为左移键、“→”为右移键、“+”为数据设置键。

(3) 按主机面板上的确认键,监视器上出现如图 1.1-5 的实验界面。此时,主机面板上的计时“开始/结束”按钮的“结束”指示灯亮,“0V/工作”按钮的“0V”指示灯亮,“平衡/提升”按钮的“平衡”指示灯亮。

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

图 1.1-5 监视器上的实验界面示意图

5) CCD 成像系统调整

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,如满天星斗。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。CCD 显微镜对焦时先将显微镜筒上小黑圈外缘与防风罩边缘大致对齐,喷油后再稍稍前后微调即可。如果按上述方法调节始终看不到油滴,则首先要检查喷雾器是否能喷出油滴,将喷雾器对着空中喷一下,用眼睛直接观察有没有油雾喷出即可确定。如果喷雾器喷雾没有问题,则可以打开油雾杯,先清除堵塞上电极落油孔的油污,然后在油滴盒中放一根细金属丝(此时要先将平衡电压放到“0V”档),调节显微镜调焦旋钮,使金属丝的像清晰。最后取出金属丝,盖好油雾杯。焦距调好后,在使用过程中,前后调焦范围不要过大。

2. 熟悉实验界面

在完成参数设置后,按确认键,监视器屏幕显示实验界面。平衡法和动态法的实验界面略有不同。

实验界面显示的主要内容有:

- (1) 极板电压:实际加到极板上的电压,显示范围:0~9999V。
- (2) 经历时间:定时开始到定时结束所经历的时间,显示范围:0~99.99s。
- (3) 电压保存提示:在每次完整的实验后显示将要作为结果保存的电压。保存实验结果后(即按下“确认”键)会自动清零。显示范围:0~9999V。
- (4) 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,如图 1.1-6 所示。当需要删除当前保存的实验结果时,按下确认键 2s 以上,当前结果被清除(不能连续删)。

(5) 下落距离设置:显示当前设置的油滴下落距离。当需要更改下落距离时,按住“平衡/提升”键 2s 以上,此时距离设置栏被激活(注意动态法步骤(1)和步骤(2)之间不能更



图 1.1-6 保存结果显示格式

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,距离标志也会相应变化。

(6) 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:0.2~1.8mm,垂直方向视场范围为2.0mm,分为10格,每格0.2mm。

(7) 实验方法:显示当前实验方法(平衡法或动态法),在参数设置画面一次设定。若要改变实验方法,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,实验方法栏显示“动态法”和即将开始的实验步骤,如将要开始动态法步骤1(油滴下落)时,实验方法栏显示“1 动态法”,而当完成动态法步骤(1)即将开始步骤(2)时,实验方法栏显示“2 动态法”。

3. 选择适当的油滴并练习控制油滴

1) 选择适当的油滴

要做好油滴实验,所选的油滴大小要适中,体积大的油滴虽然明亮,但一般带的电荷多,下降或提升速度太快,不容易测准确。油滴太小则受布朗运动影响显著,测量时涨落较大,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。建议选择平衡电压在100~400V之间、下落1mm距离用时10s左右的油滴进行测量。

具体操作:将“计时”按键置为“结束”,工作状态置为“工作”,“平衡/提升”键置为平衡,调节电压旋钮将电压调至400V左右,喷入油雾,调节调焦旋钮,使监视器上显示大部分油滴,可以看到带电多的油滴迅速上升移出视场,不带电的油滴下落移出视场,约10s后油滴减少。选择那些上升缓慢的油滴作为暂时的目标油滴,切换“0V/工作”键到“0V”,这时极板间电压为0V,在暂时目标油滴中选择下落1格(0.2mm)的时间为2s左右的油滴作为测量对象,调节调焦旋钮使该油滴最为清晰(即最小且最亮)。

2) 平衡电压的确认

目标油滴聚焦到最小且最亮后,仔细调整平衡电压旋钮使油滴平衡在某一格线上,等待一段时间(约2min),观察油滴是否飘离格线。若油滴始终向同一方向飘动,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作轻微的布朗运动,则可以认为其基本达到了力学平衡,这时的电压就是平衡电压。

3) 控制油滴的运动

以平衡法为例,如图1.1-7所示,将油滴平衡在监视器屏幕上方的第一条格线上,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,油滴将在重力、浮力及空气阻力的作用下下落,当油滴下落到有0标记的刻度线时,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(例如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1.1-7),油滴将停止下落。而后,“0V/工作”按键自动切换至“工作”,“平衡/提升”按键处于“平衡”,此时,可以按下“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”,这时极板电压将在原来平衡电压的

基础上再增加约 200V 电压,油滴立即向上运动,待油滴到达监视器屏幕上方时,将“平衡/提升”按键切换至“平衡”,通过调整平衡电压找平衡电压,进行下一次测量。每颗油滴测量 5 次,系统会自动计算出这颗油滴所带的电荷量。在测量过程中如果油滴变模糊,可微调显微镜调焦旋钮聚焦。

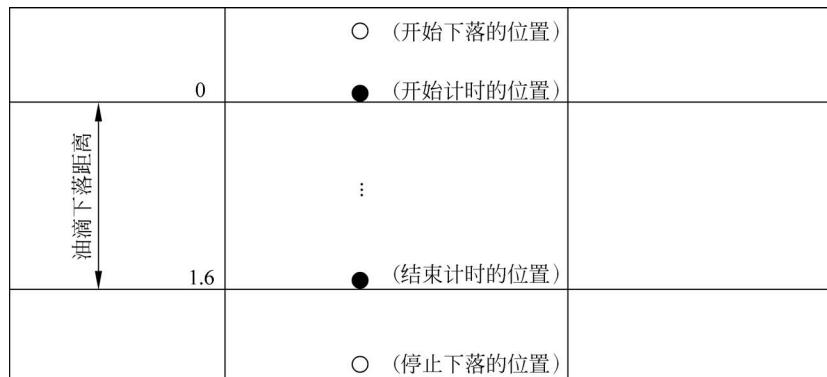


图 1.1-7 平衡法示意图

4. 正式测量

可采用平衡法或动态法。

1) 平衡法

(1) 开启主机和监视器电源,屏幕显示实验界面。将“0V/工作”按键切换至“工作”,红色指示灯点亮;将“平衡/提升”按键置“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,此时屏幕上将出现大量运动的油滴。选取适当的油滴,仔细调整平衡电压,使其停留在监视器屏幕上方的第一条格线上(图 1.1-7)。

(3) 将“0V/工作”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,计时器启动,开始记录油滴下落时间。

(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,计时器停止计时。而后“0V/工作”按键将自动切换至“工作”,此时按下“确认”按键,这次测量的平衡电压和匀速下落时间将同时记录在监视器屏幕上。

(5) 将“平衡/提升”按键置“提升”,油滴将向上运动,当回到高于“0”标记格线时,将“平衡/提升”按键置回“平衡”,油滴停止上升,然后重新调整平衡电压,使其静止,得到新的平衡电压(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。这次的测量不能作数,需从步骤(2)开始重新找油滴)。

(6) 重复步骤(3)~(5)的操作,平衡电压及下落时间的数据将被记录到屏幕上。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和平均下落时间,进而自动计算和显示出该油滴的电荷量。

(7) 重复步骤(2)~(6),测量 5 颗油滴,由式(1.1-10)计算所测的每颗油滴的电荷量。

2) 动态法

油滴的运动距离取为 1.6mm。对于每颗油滴,动态法分两步完成。

(1) 油滴下落过程,其操作同平衡法。完成后,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,可以删除,再重新测量。

(2) 步骤(1)完成后,油滴处于距离标志格线以下。通过“0V/工作”“平衡/提升”按键配合使油滴在“1.6”标志格线下一定距离(图 1.1-8)。然后调节“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。但油滴会继续上移,再次调节“电压调节”旋钮使油滴平衡,即停留在“0”格线以上。按下“确认”键保存本次实验结果。

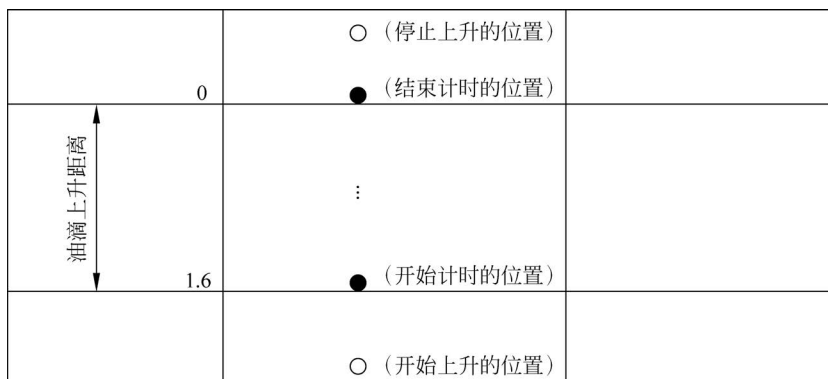


图 1.1-8 动态法步骤 2 示意图

重复以上步骤共测量 5 颗油滴,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_g 、上升时间 t_e 及上升电压 V ,代入式(1.1-9)即可求得油滴带电荷量 q 。

[注意事项]

- (1) 喷雾器内的油不可装得太满,否则操作时会喷出很多“油珠”而不是“油雾”。
- (2) 利用细丝插入油滴盒对显微镜调焦或清洁上极板落油孔油污时,油滴仪两极板绝不允许加电压,以免触电和损坏仪器。

[数据处理与分析]

- (1) 将测量数据代入相应公式求出每个油滴所带电荷量。
- (2) 求元电荷 e 值。求元电荷 e 值的方法有多种,这里给出一种简易方法,其他方法可参阅文献[6-12]。根据电荷的不连续性,应有 $q = ne$,此为一过原点的直线方程, n 为自变量, q 为因变量, e 为斜率。由 q_i 除以电子电荷的公认值 $e_0 = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 并取整来确定元电荷数 n_i ,再用最小二乘法进行直线拟合,若该直线过原点,则斜率即为元电荷实验测量值。

将元电荷实验测量值与公认值比较,求相对误差。

[讨论]

对实验结果造成影响的主要因素有哪些?对平衡法和动态法的测量结果进行对比讨论。

[结论]

通过对实验的分析和归纳总结,写出你最想告诉大家的结论。

[思考题]

参阅文献[6-12],分析不同油滴实验数据处理方法的异同,对自己所用的油滴实验数据处理方法做出评价。

[附录] 实验装置及实验用相关参数

平行极板距离: $d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$

分划板分度: 0.2mm/格

重力加速度: $g = 9.801 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (北京)(以实验室所给数据为准)

空气黏滞系数: $\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (20℃)(以实验室所给数据为准)

修正常数: $b = 8.23 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$

大气压强: $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ (以实验室所给数据为准)

油密度: $\rho = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (以实验室所给数据为准)

空气密度: $\sigma = 1.207 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (20℃)(以实验室所给数据为准)

[参考文献]

- [1] 成都世纪中科仪器有限公司. ZKY-MLG-6 CCD 显微密立根油滴仪实验指导及操作说明书[Z]. 2021.
- [2] YOUNG H D, FREEDMAN R A, FORD A L. 西尔斯当代大学物理(下)[M]. 吴平, 邱红梅, 徐美, 等译. 13 版. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [3] 杨述武. 普通物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] 吴平. 大学物理实验教程[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [5] 关舒月, 张明, 张师平, 等. 密立根油滴实验中的布朗运动[J]. 大学物理, 2019, 38(6): 48-54, 59.
- [6] 史志强. 油滴实验方法的研究[J]. 物理实验, 2002, 22(6): 29-32.
- [7] 陈西园, 徐铁军. 密立根油滴实验测量结果的不确定度评价[J]. 大学物理, 1999, 18(1): 34-35.
- [8] 王广涛, 陈健, 魏建宇, 等. 密立根油滴实验数据的处理方法[J]. 物理实验, 2004, 24(12): 22-24.
- [9] 陈森, 刘昉, 付硕, 等. 一种密立根油滴实验数据处理的新方法[J]. 大学物理, 2014, 33(9): 32-34.
- [10] 赵仁. 密立根实验数据的一种处理方法[J]. 物理实验, 2000, 20(6): 39-40.
- [11] 刘才明. 密立根油滴实验数据处理方法分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 1996, 30(6): 736-741.
- [12] 亓东林, 鲍祎楠, 张师平, 等. 基于大数据分析思路的油滴实验数据处理方法[J]. 物理与工程, 2018(6): 91-94, 99.

实验 1.2 光电效应

[引言]

当具有适当频率的光照射在金属表面上时,会从金属表面发射出电子,这种现象就叫作光电效应。发射出来的电子叫作光电子,依据照射在金属表面上的光的频率的不同,光电子具有不同的动能。