

2020年秋季大学物理实验（4）-密里根油滴实验

专业班级：电气1908 学号：U201912072 姓名：柯依娃 日期：2020/10/22 实验台：15号 报告柜：J21 第八周星期四 上午

实验名称:

密立根油滴实验

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. 感受和体验物理经典真滋味

实验仪器材料

本实验中需要用到的仪器包括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、监视器等。

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？

具体的原理带公式的见下文，在此简单提一下自己对于物理实验本身方法的逻辑思考。电子电荷本身很小，难以直接测量，于是使用带电的油滴通过其运动将之可视化，那么油滴所带电量应该是电子电荷的整数倍，且通过电压装置可以改变油滴的运动形态，方便可视化。那么任务便转化为通过油滴的运动测量油滴所带电量，于是进行受力分析，通过牛顿第一定律，将 q 的测量转化为 m 的测量，再通过匀速下降将 m 的测量转化为时间的测量其中有模型化和修正的一些计算方式，从而获得结果。

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？

静态：施加平衡电压 U ，油滴受力平衡，再距离 l 匀速下落时间 t ，求得 q

动态：不加电压时 l 匀速下落 t ，加上升电压匀速上升 l 用时 t ，求得 q

表 1 实验方法的比较

	动态法 ^[9,10]	静态法 ^[3-8]
物理过程	匀速下降、匀速上升	静止、匀速下降
测量量	匀速下降时间 t_d 、 匀速上升时间 t_e 、 上升电压 U	平衡电压 U 、 匀速下降时间 t
受外界扰动情况	不易受扰动	易受扰动使 U 测量不准确
原理及公式复杂性	$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{1 + \frac{b}{pr}} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}}$ 繁琐、计算量大	$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t \left(1 + \frac{b}{pr} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U}$ 简单、计算量小
实验操作节奏	较快、油滴容易丢失	缓慢、油滴不易丢失
理论不确定度 ^[18-20]	较小	较大

静态法数据量少，易于求解，但在测量平衡电压时不可避免地因环境扰动使 U 产生较大误差，且实验公式理论不确定度较大

动态法含两个匀速过程，数据量大，计算麻烦，但是可以编程序实现，理论不确定度小

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？

因为如果有加速度 a ，公式以平衡状态计算出 q 得到 q 不准确

静态测量法：

二、静态测量法

此法要求选择一颗在 300V 左右平衡电压下缓慢上移的油滴，仔细调节平衡电压，使它静止。与动态测量法不同的是，升降电压不参与使油滴静止的“行动”。由表 2 可看到各开关在对油滴“发号施令”过程中的具体位置。

(表 2)

油滴运动状态	静止	在重力场中匀速下落	停止	上 升	停止
“平衡电压”开关位置	+	0	+	+	+
“升降电压”开关位置	0	0	0	↑ [注]	0
测量与记录		测量下落 L 距离 所用时间 t_g	记录 t_g	无任何测量	

[注]：此时需有适当的升降电压。

总之，对油滴实施有效控制的核心是通过调节极板电压，使油滴能够静止在视场中，然后利用各开关的协调运作，“命令”油滴按操作者的意志做上下运动。只有这样我们才能在每次测量结束后先令油滴停下来，再从从容不迫地进行记录或更换操作者，彻底改变了过去那种被动跟踪，手忙脚乱的状况，免去了因为没有一刻不停地盯住油滴而使之丢失的烦恼，提高了实验的效率，而且可以保证测得足够多的数据，获得较精确可靠的结果。

动态测量法：

一、动态测量法

1、显微镜视场中出现大量油滴后，通过必要调节，使油滴清晰明亮。

2、“平衡电压”拨动开关由原来的位置“0”拨到“+”，并在平行极板上加 300V 平衡电压，驱走不需要的油滴，直到剩下几颗缓慢向上移动的油滴为止。注意其中的一颗。

3、将“升降电压”换向开关置于“↓”，即与“平衡电压”开关动作相反。逐渐增大升降电压，同时观察油滴的运动，可以看到随着该电压的增大，油滴逐渐减速直至静止。此时停止增大升降电压。建议将油滴悬于分划板某条横线附近，观察一、二分钟，以准确判断这颗油滴是否静止。至此，一颗待测油滴被我们“捕获”，并使它停在了视场当中，静静地等待我们发号施令。

下面用表格的形式说明测量过程中如何协调“平衡”换向开关和“升降”换向开关的动作，控制油滴在视场中的上下运动。(表 1)

油滴运动状态	静止	在重力场中匀速下落	停止	在静电场中匀速上升	停止
“平衡电压”开关位置	+	0	+	+	+
“升降电压”开关位置	↓	↓ [注]	↓	0	↓
测量与记录		测量下降 L 距离 所用时间 t_g	记录 t_g	测量上升 L 距离所用 时间 t_e	记录 t_e

[注]：此时“升降”开关可置任意位置，只是为了使其动作连贯起见，放于“↓”档。

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？

喷雾器中装油勿多，只喷一次，竖直放置烧杯中。喷油时，打开油滴孔。喷油后，关闭油滴孔，密立根油滴试验中使用喷雾器喷油时应注意，喷油有一定力度，同时油必须是以油雾的形式喷进去，而不能是倒进去。油雾盒上方的小孔非常小，如果一次倒入太多的油，小孔就会被堵住，不在有油滴进入了。

使用显微镜调焦：微调显微镜的调焦手轮，使视场中出现大量清晰的油滴。或者由于显微镜的分划板位置不正，则转动目镜头，直到分划板的位置放正，调整仪器底部的调平螺丝，使水准泡指示水平（当然两个应该先做哈，我就是说一下可能的问题）

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？

如果不水平，则油滴会漂移，因为会存在水平方向上不平衡的力，在平行方向有速度

如果不水平，垂直极板方向的加速度分量就和电场力、空气阻力平衡，测出的元电荷就不准。

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？

CCD可以将成像信息记录，保存，分析，色彩还原度高，使用光学放大系统更好的对之分析

实验原理

静态测量法：

设质量为 m 带电量为 q 的油滴在两平行极板间运动，两极板间电压为 U ，极板间距为 d 。则油滴在极板间将同时受到重力和电场力的作用，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，即

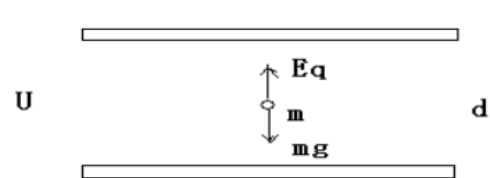
$$mg = qE = q \frac{U}{d} \quad (1)$$


图 1 静电场中的带电油滴(电压 U ，板间距 d)

当两平行极板间不加电压时，油滴在重力作用下加速下降，同时也受空气阻力(粘滞阻力)作用，根据斯托克斯定律，粘滞阻力为 $f_r = 6\pi a \eta v_g$ ，这里， a 为油滴的半径， η 为空气的粘滞系数， v_g 为油滴运动的速度。油滴的速度达到一定值后，粘滞阻力和重力会平衡，油滴进而做匀速直线运动，有

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

油滴的质量与半径的关系
$$m = \rho v = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \quad (3)$$

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

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

油滴匀速运动的距离 l 和速度 v_g 之间的关系为

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

由(1)、(2)、(6)、(7)式得，油滴的带电量 q 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。

动态测量法：

② 动态法

当平行板间未加电压时,油滴受重力 mg 与黏滞阻力 F_f 作用,做加速度逐渐减小的加速运动,最终二力平衡,开始匀速运动,此时速度为 v_g (即收尾速度),如图 2(a). 当平行板间加上升电压 U 时,油滴先加速上升,后匀速(速度为 v_e),油滴受重力 mg 、黏滞阻力 F_f 、电场力 qE 三个力作用(如图 2(b)所示).

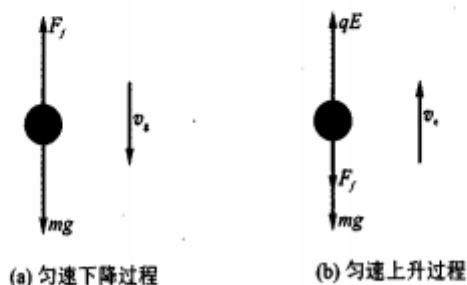


图 2 受力分析图

在匀速下降时,有

$$F_f = F_g \Rightarrow 6\pi r \eta v_g = mg \quad (14)$$

在匀速上升时,有

$$F_f + F_g = F_e \Rightarrow 6\pi r \eta v_e + mg = qE \quad (15)$$

$$E = \frac{U}{d} \quad (16)$$

此时,设定上升距离与下降距离均为 l ,测得下降时间 t_g 与上升时间 t_e ,则有

$$v_g = \frac{l}{t_g} \quad v_e = \frac{l}{t_e} \quad (17)$$

由式(6)和式(13)~(16)并考虑空气黏度修正^[15,16],有

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

其中 η 、 r 、 ρ 、 b 、 U 、 d 、 ρ 在①中均已介绍.

其中, η 为空气黏度, r 为油滴的半径. 假设油滴是球体

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho r^3 \quad (6)$$

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t \left(1 + \frac{b}{pr} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \quad (13)$$

其中 η 、 l 、 ρ 、 g 、 d 均为与实验条件、仪器有关的参量,均为已知量,只需测出平衡电压 U 和油滴匀速下落 l 所用时间 t 即可求出 q .

数据处理

原始数据：

	U/V	t1	t2	t3	t4	t5	tg
1	212	42.4	41.6	40.7	41.2	42.1	41.6
2	223	25.6	25.6	24.6	25.4	25.6	25.4
3	210	8.3	8.8	8.2	8.4	8.4	8.4
4	247	35.7	34.9	35.5	35.8	36.0	35.6
5	169	11.6	11.7	11.5	11.0	11.7	11.5
6	210	13.6	13.6	13.4	13.5	13.3	13.5
7	139	15.7	15.6	15.5	15.8	15.3	15.6
8	173	9.6	9.8	9.7	9.6	9.9	9.7
9	191	22.4	22.6	22.2	21.8	22.0	22.2
10	212	20.5	20.7	20.8	20.7	21.1	20.8
11	229	21.0	21.0	21.1	20.6	20.7	20.9

通过公式

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

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

可以求得每个油滴的带电量，其中

- $\rho = 981kg/m^3$
- $g = 9.795m/s^2$
- $l = 1.5mm$
- $\eta = 1.83 \times 10^{-5}kg/(m \cdot s)$
- $p = 76.0cmHg$
- $b = 6.17 \times 10^{-6}m \cdot cmHg$
- $d = 5.00 \times 10^{-3}m$

取整n采用

$$n = \text{int}\left(\frac{q}{e} + 0.5\right)$$

	U/V	tg	q (x10 ⁻¹⁹)	n
1	212	41.6	1.33	1
2	223	25.4	2.76	2
3	210	8.4	16.49	10
4	247	35.6	1.46	1
5	169	11.5	12.59	8
6	210	13.5	7.90	5
7	139	15.6	9.52	6
8	173	9.7	16.02	10
9	191	22.2	3.98	2
10	212	20.8	3.98	2
11	229	20.9	3.66	2

附上数据处理代码

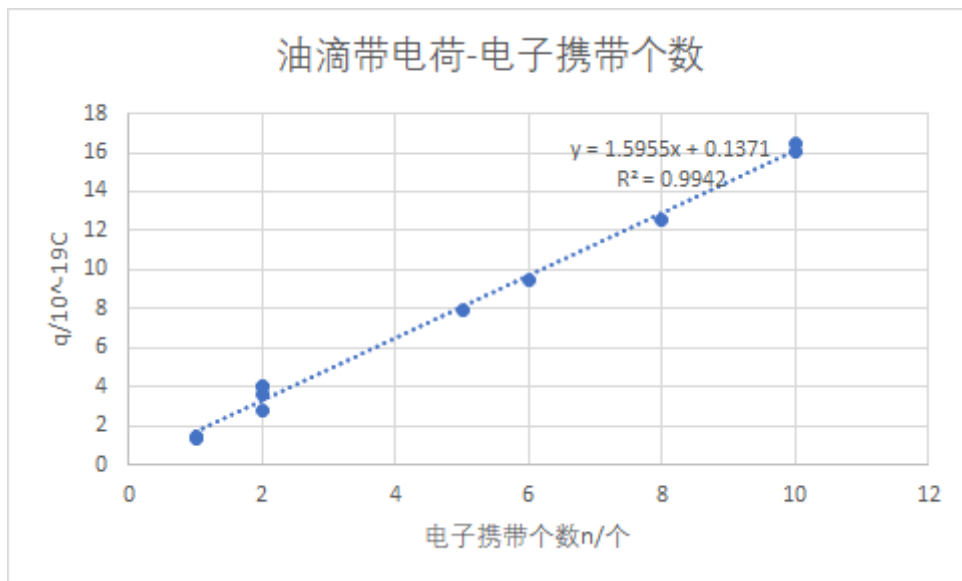
```
1 row = 981
2 g = 9.795
3 lx = 1.5*10**-3
4 nta = 1.83*10**-5
5 p = 76
6 b = 6.17*10**-6
7 d = 5*10**-3
8 pi = 3.1415926
9 e = 1.602176634*10**-19
10 U = [212, 223, 210, 247, 169, 210, 139, 173, 191, 212, 229]
11 TG = [41.6, 25.4, 8.4, 35.6, 11.5, 13.5, 15.6, 9.7, 22.2, 20.8, 20.9]
12 index = range(11)
13 Q = []
14 N = []
15
16 def mixieGen(u, tg):
17     # q = (18*pi/(2*row*g)**0.5)*(nta*lx/tg)**1.5*d/u
18     # 未修正
19     a = (9*nta*lx/(2*row*g*tg))**0.5
20     q = (18 * pi / (2 * row * g) ** 0.5) * (nta * lx / (tg*(1+b/(p*a)))) **
1.5 * d / u
21     n = int(q/e+0.5)
22     return q, n
23
24
25 for i in index:
26     temp = mixieGen(U[i], TG[i])
27     Q.append(temp[0])
```

```

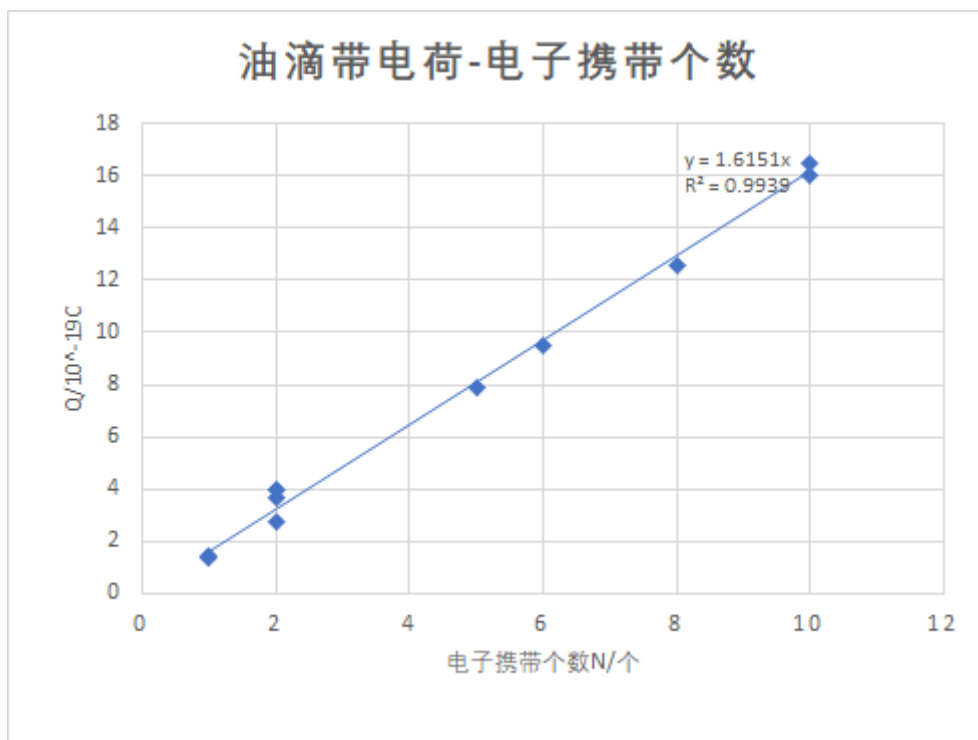
28 N.append(temp[1])
29
30 print(Q)
31 print(N)
32

```

未设置过0点基准



设置过0基准



从而求得电荷约为 $1.5955 \times 10^{-19}C$

课后思考题

1. 如何判断油滴盒内金属极板是否水平？如果上下极板不水平，对测量结果有什么影响？

见预习问题5

2. 对实验结果造成影响的主要因素有哪些？

- 油滴上升和下降的可观测的距离较短，难以调节使油滴在测量距离内匀速上升或下降；

- 动态法中，油滴在上升下降过程的时间不稳定，特别在时间较长的时候出现油滴颤抖，这意味着油滴的质量过小，有产生少许的布朗运动,影响实验测量；
油滴在上升或下降过程中因为温度、空气流动等原因挥发,质量稍有改变；
- 在时间测量上判断油滴是否达到测量距离的开始点和结束点时主观性较大,时间带有人为误差。
- 对空气粘滞系数的修正
- 油滴的选取代表性不足，造成最小公约数计算困难

3. 平衡法和动态法有何异同点？分析其优缺点？

见预习问题2

4. 结合自身实验过程的总结(油滴筛选、跟踪、测量 ...)。经验分享、体会、感想、讨论、建议等)

我认为其实这个数据处理本身就很物理，通过除 e 取整再对比画线，这种操作给人一种测了个寂寞的感觉，虽然得出了一个近似正确的 e ，但是这个 e 本身是取整来的。我认为我测的两组大于30s的数据得到的电荷量都小于一个单位电荷，这个本身就是一件非常奇特的事情，也间接说明了我做的这个实验其实是不准的，我猜测可能是由于我没有完全调到水平，它还是会有微微的漂移运动。总之我其实测的不准，但是只是看数据的结果似乎是准的而已

至于一些体会，在预习问题1外，我实操感受到的是仪器的简单却能得到极好的效果，以及我感觉传统物理实验设备确实智能化程度偏低，需要人工来手动按一些机械按钮进行控制，实际上我认为这些按钮可以由单片机或者电脑来控制，写一些循环代码，然后设置不同的参数，配合tracker，opencv等来自动实验。不过可能现代物理实验设备已经拥有这些功能，总之建议推动自动化和物理实验结合。