《基础物理实验》课程完整报告

学院： 物理学院　专业： 物理学　年级： 2024 级　地址： 陆佑堂

日期： 2025 年 11 月 7 日　　时间： 上午

室温： 25°C　　相对湿度：

实验人姓名（学号）： 周文斌 (　　)

参加人姓名（学号）： 焦润泽 (　　)

实验 E2 密立根油滴实验测电子电荷

1　实验目的

1. 分别用静态法和动态法观测带电油滴的运动状态，测定电子电荷值 e。

2. 测量不同带电油滴的电荷量，验证电荷的不连续性。

3. 测量大量电荷的带电量，研究电荷的统计分布规律。

2　仪器用具

密立根油滴实验仪（包括视频监视器）、机油及喷雾器。

3　实验原理

美国物理学家密立根在 1909 年到 1917 年期间所做的测量微小油滴上所带电荷的工作，即油滴实验，是物理学发展史上一个具有重要意义的实验。这一实验的设计思想简明巧妙、原理清楚、设备简单、结果准确。密立根在这一实验上花费了近 10 年的时间，取得了具有重大意义的结果：①证明了电荷的不连续性；②测量并得到了电子电荷，其值为 1.60×10^{-19}C，目前公认的最好结果为

$$e = 1.602176634 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$$

由于这一实验的巨大成就，密立根获得 1923 年的诺贝尔物理学奖。

3.1　静态（平衡）测量法

用喷雾器将油喷入两块相距为 d 的水平放置的平行板之间。电中性的油在喷射时被撕裂成许多油滴，一般都带有电荷。设油滴的质量为 m，所带的电量为 q，两极板间的电压为 V，则油滴在平行板间将同时受到重力 mg 和静电力 qE 的作用。如果调节两极板间的电压 V，可使两力达到平衡，这时

$$mg = qE = qV/d \tag{1}$$

平行板极不加电压时，油滴受重力作用而加速下降。由于空气阻力的作用，下降一段距离达到某一速度 v_g 后，阻力 f_r 与重力 mg 平衡，油滴将匀速下降。根据斯托克斯定律，油滴匀速下降时

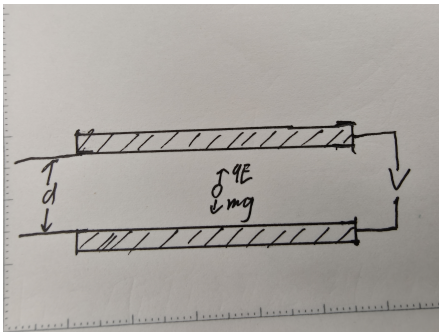


图 1: 带电平行板

$$f_r = 6\pi a\eta v_g \tag{2}$$

其中，η 是空气的黏滞系数；a 是油滴的半径。设油的密度为 ρ，油滴的质量 m 可以用下式表示

$$m = 4\pi a^3\rho/3 \tag{3}$$

由上式可得油滴的半径

$$a = (9\eta v_g/2\rho g)^{1/2} \tag{4}$$

对于半径小到 10^{-6}m 的小球，空气的黏滞系数 η 应作如下修正

$$\eta' = \eta/(1 + b/pa) \tag{5}$$

其中，b 为修正常数，$b = 6.17 \times 10^{-6}\text{m} \bullet \text{cmHg}^{-1}$；$p$ 为大气压强。则斯托克斯定律应改为

$$f_r = 6\pi a\eta v_g/(1 + b/pa) \tag{6}$$

得

$$a = \left(\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \cdot \frac{1}{1 + b/pa}\right)^{1/2} \tag{7}$$

代入前式得：

$$m = \frac{4\pi}{3}(\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \cdot \frac{1}{1 + b/pa})^{3/2}\rho \tag{8}$$

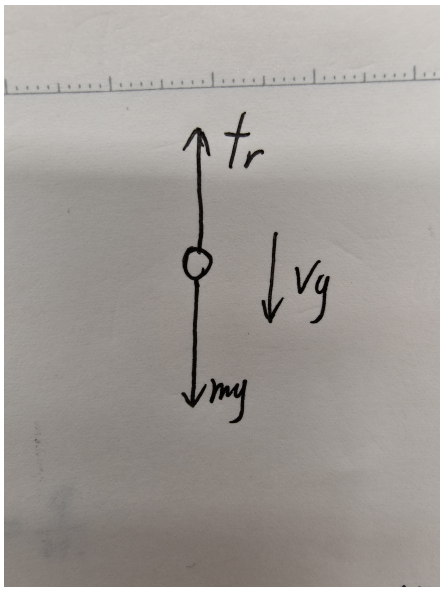


图 2: 静态法油滴下降受力

当两极板间的电压 V 为零时，设油滴匀速下降的距离为 l，时间为 t_g，则

$$v_g = l/t_g \tag{9}$$

代入得

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}\left[\frac{\eta l}{t_g(1 + \frac{b}{pa})}\right]^{3/2}\frac{d}{V} \tag{10}$$

上述是平衡测量法测定油滴所带电量的理论公式。其中各种参数的物理意义和数值列于下表

表 1: 密立根油滴实验参数

符号	物理意义	数值和单位
d	极板间距	5.00×10^{-3} m
η	空气黏滞系数	1.83×10^{-5} kg • m^{-1} • s^{-1}
b	修正常数	0.00823 N • m 或 6.17×10^{-6} m • cmHg^{-1}
l	下落距离	默认 1.6 mm
g	重力加速度	9.78858 m • s^{-2} (广州)
ρ	油的密度	981 kg • m^{-3} (20 ℃)
p	大气压强	101325 Pa 或 76.0 cmHg
V	平衡电压	
t_g	油滴下落时间	

3.2 动态（非平衡）测量法

非平衡测量法是在平行极板上加上适当的电压 V，但并不调节 V 使静电力和重力达到平衡，而是使油滴受静电力作用加速上升。由于空气阻力的作用，上升一段距离达到某一速度 v_e 后，空气阻力、重力与静电力达到平衡，油滴将匀速上升。这时

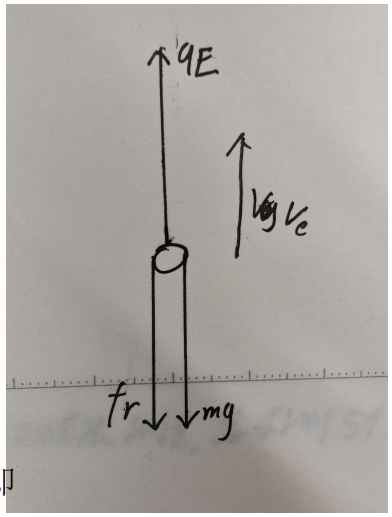


图 3: 动态法油滴受力

$$6\pi a\eta v_e = q\frac{V}{d} - mg \tag{11}$$

当去掉平行极板上所加的电压 V 后，油滴受重力作用而加速下降。当空气阻力和重力平衡时，油滴将以匀速 v_g 下降，这时

$$6\pi a\eta v_g = mg \tag{12}$$

将两式相除可得

$$v_e/v_g = \left(q\frac{V}{d} - mg\right)/(mg) \tag{13}$$

即

$$q = mg\frac{d}{V}\left(\frac{v_g + v_e}{v_g}\right) \tag{14}$$

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

$$v_g = l/t_g, \quad v_e = l/t_e \tag{15}$$

代入油滴的质量 m 得

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}\left(\frac{\eta l}{1+\frac{b}{pa}}\right)^{3/2}\frac{d}{V}\left(\frac{1}{t_e}+\frac{1}{t_g}\right)\left(\frac{1}{t_g}\right)^{1/2} \tag{16}$$

则

$$K = \frac{18\pi d}{\sqrt{2\rho g}} \left(\frac{\eta l}{1 + \frac{b}{pa}} \right)^{3/2} \tag{17}$$

$$q = K \left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{1/2} \frac{1}{V} \tag{18}$$

从实验所测得的结果，可以分析出 q 只能为某一数值的整数倍，由此可以得出油滴所带电子的总数 n，从而得到一个电子的电荷值为

$$e = q/n \tag{19}$$

从以上讨论可见：

(1) 用平衡法测量时油滴有平衡不动的时候，实验操作时间容易控制，但需仔细调整平衡电压；用非平衡法测量，在原理和数据处理方面较平衡法要烦琐一些，测量时不需要调整平衡电压，但油滴没有静止不动的时候，实验操作稍一疏忽，油滴就会丢失。

(2) 比较式 (E2.10) 和式 (E2.16) 可见，当调节电压 V 使油滴受力达到平衡时，油滴匀速上升的时间 $t_e \to \infty$，两式一致。可见平衡测量法是非平衡测量法的一个特殊情况。

3.3 测量油滴带电量的改变量

如果油滴所带的电量从 q 变为 q'，油滴在电场中（电压 V 不变）匀速上升的速度将由 v_e 变为 v'_e，而匀速下降的速度 v_g 不变。测出油滴改变量后匀速上升距离 l 的时间为 t'_e，则

$$v'_e = l/t'_e \tag{20}$$

得

$$q' = K \left(\frac{1}{t'_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{1/2} \frac{1}{V} \tag{21}$$

油滴带电量的改变量为

$$q_i = q' - q = K \left(\frac{1}{t'_e} - \frac{1}{t_e} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{1/2} \frac{1}{V} \tag{22}$$

由此可得油滴所带电子数的改变数 i 和一个电子的电荷值为

$$e = q_i/i \tag{23}$$

4 实验装置

本实验采用具有 CCD 显微成像装置的密立根油滴实验仪，便于对油滴电量进行快速测量。实验仪由以下部件组成： 视频监视器、 主机、 CCD 显微成像系统、 油滴盒、 喷雾器等。

4.1 主机和 CCD 显微成像系统

(1) 主机外形如下图所示，主机包括可控高压电源、计时装置、A/D 采样、视频处理等模块。其上的电压调节旋钮可以调节两平行电极间的电压 V，用以控制油滴的运动。

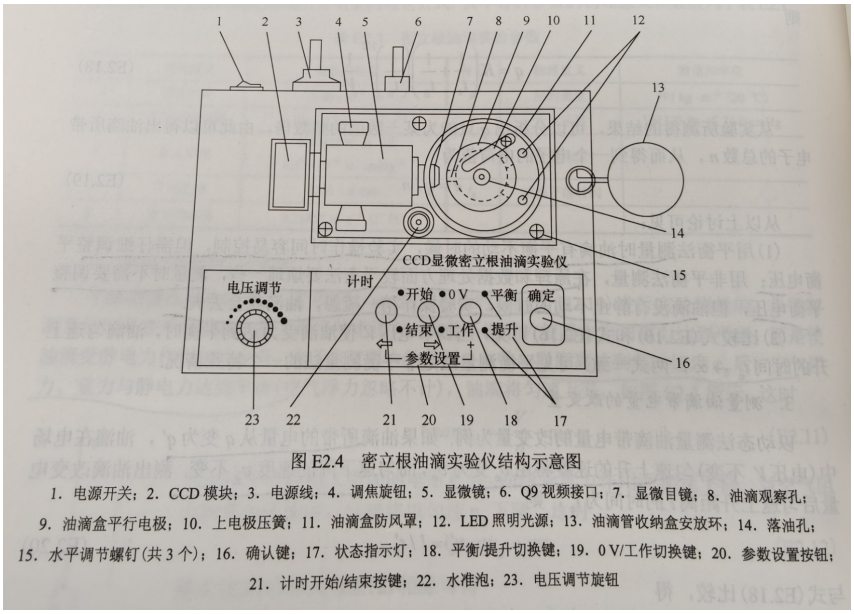


图 E2.4 密立根油滴实验仪结构示意图

1. 电源开关；2. CCD 模块；3. 电源线；4. 调焦旋钮；5. 显微镜；6. Q9 视频接口；7. 显微目镜；8. 油滴观察孔；9. 油滴盒平行电极；10. 上电极压簧；11. 油滴盒防风罩；12. LED 照明光源；13. 油滴管收纳盒安放环；14. 落油孔；15. 水平调节螺钉(共 3 个)；16. 确认键；17. 状态指示灯；18. 平衡/提升切换键；19. 0 V/工作切换键；20. 参数设置按钮；21. 计时开始/结束按键；22. 水准泡；23. 电压调节旋钮

(2) 油滴盒和 CCD 显微成像系统安装在主机顶部。油滴盒包括平行电极、发光二极管照明装置、防风罩等部件；CCD 显微成像系统包括显像镜和 CCD 传感器，用来捕捉油滴盒平行电极间油滴的影像，并通过视频监视器显示出来。

(3) 主机上的计时” 开始/结束” 按键用来计时；”0V/工作” 按键使平行电极间的电压在 0V 和电压调节旋钮的设置值之间切换。” 平衡/提升” 按键使平行电极间的电压在平衡电压 V 和 $(V + 200V)$ 之间切换。” 确定” 按键可以将测量数据显示在监视屏幕上并保存数据。

4.2 油滴盒

油滴盒是密立根油滴实验仪的一个关键部件, 其剖视图如下图所示。上、下极板之间用圆环形胶木支撑，极板间的不平行度、间距误差控制在 0.01mm 以下，基本消除了极板间的” 势垒效应” 及” 边缘效应”，较好地保证了极板间电场的均匀性。

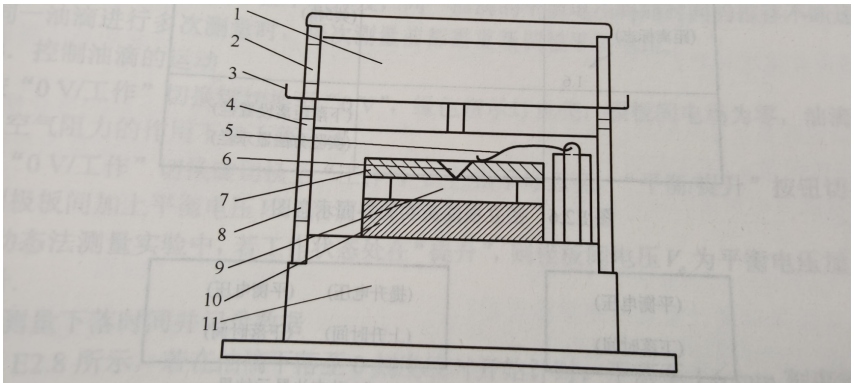


图 E2.5　油滴盒结构示意图

1．油雾杯；2．喷雾口；3．油滴挡板；4．防风罩；5．上极板压簧；6．落油孔；7．上极板；8．油滴观察孔；9．油滴室；10．下极板；11．油滴盒底座

圆环形胶木上有两个进光孔和一个观察孔，LED 光源通过进光孔对极板间的油滴室照明，而显微镜的目镜则通过观察孔捕捉油滴的像。油滴盒顶部的油雾杯可以使油雾扩散并保持较长时间，油滴挡板可以控制是否让油滴下落进入油滴室，防风罩可以降低空气流动对油滴运动的影响。

4.3　视频监视器

视频监视器用于观察油滴的运动状态，并显示实验方法（静态法或动态法）、极板电压、油滴运动时间、运动距离等实验相关参数，以及所观测油滴的带电量等。在工作状态下，监视器的实验界面如图 E2.6 所示，不同实验方法下，实验界面略有不同。界面上显示的参数包括：

1. **极板电压**：加在两平行极板上的电压，显示范围 0～9999V。
2. **经历时间**：计时开始到计时结束所经历的时间，显示范围 0～99.99s。
3. **电压保存提示栏**：显示将要保存的电压值，每测一颗油滴的电荷后显示。按” 确认” 键保存后自动清零，显示范围 0～9999V。
4. **保存结果显示区**：显示测量结果，只能循环显示最近测量的 5 组数据。显示的内容与采用的测量方法有关，如图 E2.7 所示，静态法时每组数据有两个参数，动态法时有四个参数。
5. **下落距离设置栏**：显示当前设置的油滴下落距离。若需更改，按下” 平衡/提升” 键 2s 以上，激活距离设置栏，再通过”+” 键进行修改，最后按” 确定” 键。
6. **距离标志**：显示当前设置的油滴下落距离，并在相应的横格线上做数字标记。下落距离显示范围为 0.2～1.8mm。
7. **实验方法显示栏**：显示当前的实验方法，即静态法或动态法。

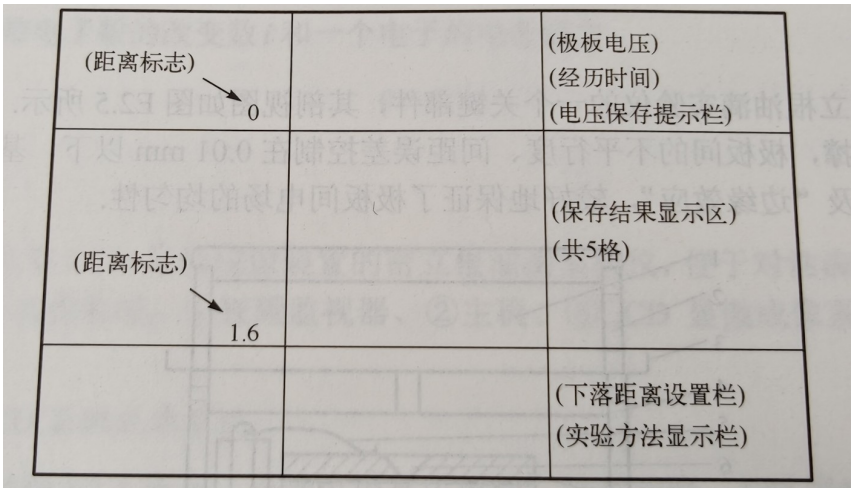
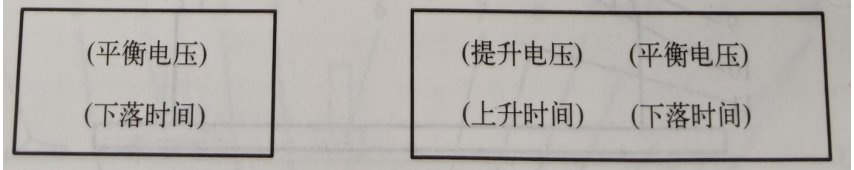


图 E2.6　密立根油滴实验界面示意图



(a) 静态法显示结果　　(b) 动态法显示结果

图 E2.7　保存结果显示区显示的内容

5　安全注意事项

1. 仪器内有高压，极板间电压达到数百伏，实验过程中严禁用手接触电极。
2. 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　实验内容及步骤

6.1　测量油滴的带电量

1) 调整油滴实验仪

(1) 水平调整。通过实验仪工作平台的三个调平螺钉，调节水准仪气泡至中心位置。

(2) 喷雾器调整。用滴管将少量钟表油注入喷雾器的储油腔内，使钟表油液没提油管下部。

(3) 设置实验参数。接通实验仪电源，待监视器屏幕出现欢迎界面后按实验仪主机上的任意键，进入参数设置界面。可通过主机面板上的按键对实验方法、重力加速度、油密度、大气压强、油滴下落距离等参数进行设置。

(4) CCD 成像系统调整。从喷雾口喷入油雾，调整显微镜调焦旋钮直至监视器上观察到大量运动的油滴的清晰图像。

2) 选择适当的油滴并练习测量

A. 平衡电压的确认

将定时器置为" 结束"，工作状态置为" 工作"，" 平衡/提升" 状态置为" 平衡"，调节极板电压至 400V 以上。喷入油雾，监视器出现大量运动的油滴，选取上升较慢且明亮的油滴，降低电压使油滴位置基本不动或只在垂直方向上做轻微的布朗运动，则可认为油滴基本达到了力学平衡。要求平衡电压大于 100V。

随后将工作状态置为"0V"，油滴下落，记录下落时间 t_g，要求 $40\text{s} > t_g > 10\text{s}$。

B. 控制油滴的运动

按"0V/工作" 切换键切换至"0V"，极板间电场为零，油滴在重力、浮力及空气阻力的作用下做下落运动。

按"0V/工作" 切换键切换至" 工作"，" 平衡/提升" 按钮切换至" 平衡"，则极板间加上平衡电压 V，油滴停止下落。

在动态法测量实验中，若工作状态处在" 提升"，则极板间电压 V 为平衡电压加上 200V，油滴上升。

C. 测量下落时间并记录数据

在油滴下落至 0 刻度线时开始计时，下落至 1.6mm 刻度线时停止计时，则总时间为油滴匀速下落的时间 t_g。

在油滴上升至 1.6mm 刻度线时开始计时，上升至 0 刻度线时停止计时，则总时间为油滴匀速上升的时间 t_e。

测量一次时间后按" 确认" 键可记录一组电压值和计时值。记录 5 组数据后，按" 确认" 键，则实验仪内置单片机会根据设置的参数计算出平均数据。

3) 正式测量

本实验采用静态法和动态法两种方法测量油滴的电荷量。每种方法至少测 5 个油滴，每个油滴至少测量 5 次计算平均值。根据测得的平均电荷量 $\overline{Q}$ 求出它们的最大公约数，即为基本电荷 e 值。将实验结果与 e 的标准值进行对比。

4) 验证电荷的不连续性

为证明电荷的不连续性和所有电量都是基本电荷 e 的整数倍，并得到基本电荷 e 值，需对实验测得的各个电量 q 求最大公约数。用实验测得的电量 q 除以公认的电子电荷值 $e = 1.602177 \times 10^{-19}\text{C}$，可得一个接近整数的数值，这个整数就是油滴所带的基本电荷的数目 n。再用这个 n 去除实验测得的电量，得电子的电荷值 e。

用这种方法处理数据，只能作为一种实验验证，仅在油滴带电量比较少（少数几个电子）时，才可以采用。当 n 值较大时平衡电压 V 很低（100V 以下），匀速下降的时间很短（10s 以下），分析结果不准确。

6.2 测量大量油滴的带电量，分析电荷的统计分布规律

测量并收集尽可能多的油滴（不少于 1000 个）所带的电荷，用平衡法或动态法测量的结果均可。

(1) 以电荷量 q 为纵坐标，以油滴所带电子数 n 为横坐标，作图分析电荷的变化情况。

(2) 以电荷量 q（或电荷数 n）为横坐标，油滴数量为纵坐标，作图说明电荷量的统计分布。分析时需要调节电荷量的统计间隔 Δq，以便能够观察到明显的统计峰值。

7 数据记录及处理

7.1 静态法

Oil	Order	U/V	t_g/s	统计结果
Oil 1	1	211	25.30	$\bar{V} = 207$ V $\bar{t} = 25.84$ s $\bar{Q} = 3.208 \times 10^{-19}$ C
	2	204	25.16	
	3	207	26.41	
	4	208	25.69	
	5	208	26.66	
Oil 2	1	316	19.86	$\bar{V} = 328$ V $\bar{t} = 19.33$ s $\bar{Q} = 3.194 \times 10^{-19}$ C
	2	332	19.10	
	3	330	19.08	
	4	331	19.56	
	5	332	19.08	
Oil 3	1	253	14.80	$\bar{V} = 255$ V $\bar{t} = 14.45$ s $\bar{Q} = 6.4 \times 10^{-19}$ C
	2	256	14.60	
	3	255	14.28	
	4	256	14.30	
	5	257	14.31	
Oil 4	1	210	24.90	$\bar{V} = 210$ V $\bar{t} = 25.15$ s $\bar{Q} = 3.300 \times 10^{-19}$ C
	2	210	25.81	
	3	210	24.88	
	4	210	25.54	
	5	210	24.65	
Oil 5	1	139	12.29	$\bar{V} = 140$ V $\bar{t} = 12.25$ s $\bar{Q} = 15.242 \times 10^{-19}$ C
	2	142	12.36	
	3	140	12.18	
	4	142	12.07	
	5	139	12.37	

7.2 动态法

Oil	Order	U_1/V	t_g/s	U_2/V	t_e/s	统计结果
Oil 1	1	118	27.51	330	16.69	$\bar{V}_2 = 329$ V $\bar{T}_1 = 27.93$ s $\bar{T}_2 = 16.57$ s $\bar{Q} = 4.795 \times 10^{-19}$ C
	2	117	28.07	329	16.76	
	3	117	27.09	329	16.27	
	4	117	27.91	329	16.65	
	5	117	28.27	329	16.50	
Oil 2	1	166	22.87	377	17.67	$\bar{V}_2 = 377$ V $\bar{T}_1 = 23.59$ s $\bar{T}_2 = 17.75$ s $\bar{Q} = 4.735 \times 10^{-19}$ C
	2	166	22.81	377	17.27	
	3	166	23.71	377	17.97	
	4	166	24.25	377	17.86	
	5	166	24.31	377	18.00	
Oil 3	1	176	11.90	388	9.57	$\bar{V}_2 = 388$ V $\bar{T}_1 = 11.75$ s $\bar{T}_2 = 9.86$ s $\bar{Q} = 12.859 \times 10^{-19}$ C
	2	176	11.81	388	9.80	
	3	176	11.70	388	10.18	
	4	176	11.55	388	9.90	
	5	176	11.81	388	9.89	
Oil 4	1	171	11.81	383	9.90	$\bar{V}_2 = 383$ V $\bar{T}_1 = 11.98$ s $\bar{T}_2 = 9.94$ s $\bar{Q} = 12.719 \times 10^{-19}$ C
	2	171	12.07	383	10.00	
	3	171	11.99	383	9.99	
	4	171	12.00	383	9.94	
	5	171	12.14	383	9.89	
Oil 5	1	187	15.27	399	13.77	$\bar{V}_2 = 398$ V $\bar{T}_1 = 15.35$ s $\bar{T}_2 = 13.73$ s $\bar{Q} = 7.993 \times 10^{-19}$ C
	2	187	15.25	398	13.78	
	3	187	15.77	399	13.84	
	4	187	14.99	399	13.80	
	5	187	15.51	399	13.47	

7.3 数据处理

我们采用 6.1-4) 中的方法：

表 2: 数据处理结果

Order	q ($\times 10^{-19}$ C)	$n = q/e_{公认}$	n	$e_{实验}$ ($\times 10^{-19}$ C)
1	3.208	2.002	2	1.604
2	3.194	1.993	2	1.597
3	6.400	3.994	4	1.600
4	3.300	2.060	2	1.650
5	15.242	9.514	10	1.524
6	4.795	2.993	3	1.598
7	4.735	2.955	3	1.578
8	12.859	8.026	8	1.607
9	12.719	7.938	8	1.590
10	7.993	4.989	5	1.599

其中，第五组数据取的 $n \approx 9.5$, 位于 9 和 10 之间，误差较大，故去除这组数据，剩余 9 组数据继续处理运算，计算得出:

$$\begin{cases} e_{avg} & = 1.602 \times 10^{-19} C \\ \sigma & = 0.019 \times 10^{-19} C \end{cases} \tag{24}$$

8 讨论与分析

计算处理后数据相对标准差为

$$1.19\%$$

，偏差较小，数据处理可靠

与公认值

$$e = 1.602177 \times 10^{-19} C$$

相比较

绝对误差 $\approx 0.000 \times 10^{-19}$

相对误差 0.01%

实验结果与公认值偏差值很小

对于删除第五组数据:

对原本 10 组数据求平均数得

$$e_{arg} = 1.595 \times 10^{-19} C$$

，第五组数据中 $e = 1.524 \times 10^{-19} C$ 其偏差最大，去除改组数据合理

$$|1.524 - 1.595| = 0.071 \times 10^{-19} C$$

其原因推测为，该油滴大致估计带电量约为 9-10 倍 e，油滴带电量太大，在测量屏幕中运动速度过快，导致测量误差增大，故而使该组数据偏差较大

9 思考题

(1) 本实验如何通过宏观测量微观量？

首先，选取微观电荷的宏观载体。实验中喷入油滴盒的微小油滴（直径约微米量级）本身是宏观可见的，单个油滴在摩擦或喷射过程中可捕获若干数量的净电子，使其带电量 q 为元电荷 e 的整数倍，即 $q = ne$。

其次，通过力学平衡进行宏观量测量。通过调节平行极板间电压，使油滴在重力 mg 与静电力 qE 作用下达到静态平衡，或通过测量其在重力场及电场中的匀速运动速度，可获得平衡电压 V、下落时间 t_g、上升时间 t_e 等一系列可直接观测的宏观物理量。

再次，建立理论模型作为桥梁。基于斯托克斯定律及粘滞流体中的运动规律，引入空气浮力与分子平均自由程修正，导出油滴质量 m 及其所带电荷 q 的表达式，将宏观观测量（V、t_g、l 等）与微观电荷量 q 建立定量关系。

最终，分析电荷的量子化规律。通过测量多个油滴或同一油滴经辐照改变电荷后的带电量，发现所有 q 值均为某一最小单位的整数倍，该最小单位即为元电荷 e。由此，本实验完成了从宏观运动参数到微观基本常数的实验测定。

(2) 实验中如何保证油滴做匀速运动？

利用终端速度原理：油滴在空气介质中运动时，所受粘滞阻力随速度增加而增大，短时间内即可与驱动力（重力或静电力与重力合力）达到平衡，此后油滴以恒定速度运动。

设置预运动区间：在正式计时前，使油滴越过一段足够长的距离，确保其已进入匀速运动阶段。实验中设定上下两条标志线（如 0 mm 与 1.6 mm），仅在该区间内计时，以排除加速段的影响。

优化油滴选择标准：

选择大小适中的油滴，通常控制其自由下落时间 t_g 在 10-40 秒范围内。油滴过大则速度过快、测量误差大；过小则易受布朗运动影响，轨迹不稳定。

避免选择速度过快或过慢、运动轨迹不规则的油滴。

控制实验环境条件：

使用防风罩隔绝外界气流扰动。

调节仪器底座调平螺钉，确保极板水平，使重力与电场力方向严格共线，避免油滴漂移。

在静态平衡法中，需反复调节电压并观察，直至油滴在视野中持续静止，确认其处于稳定的平衡状态。

参考文献

[1] 沈韩. 大学物理实验[M]. 北京: 科学出版社, 2024.

附录：原始数据

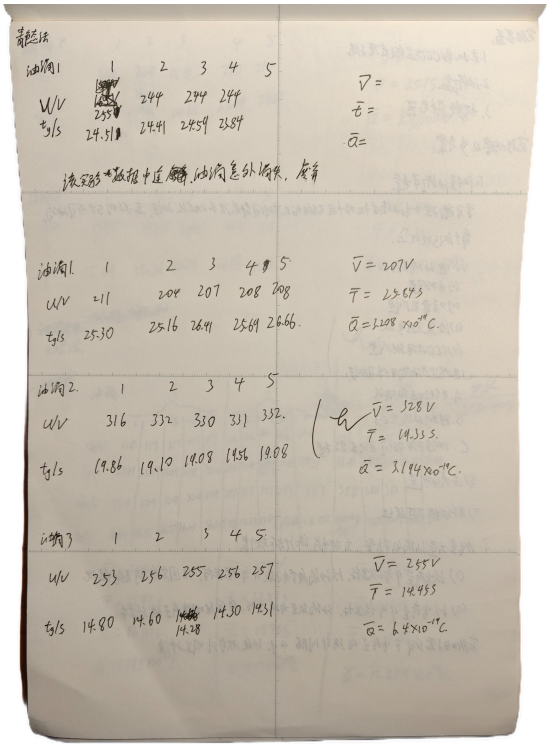


图 4: data1

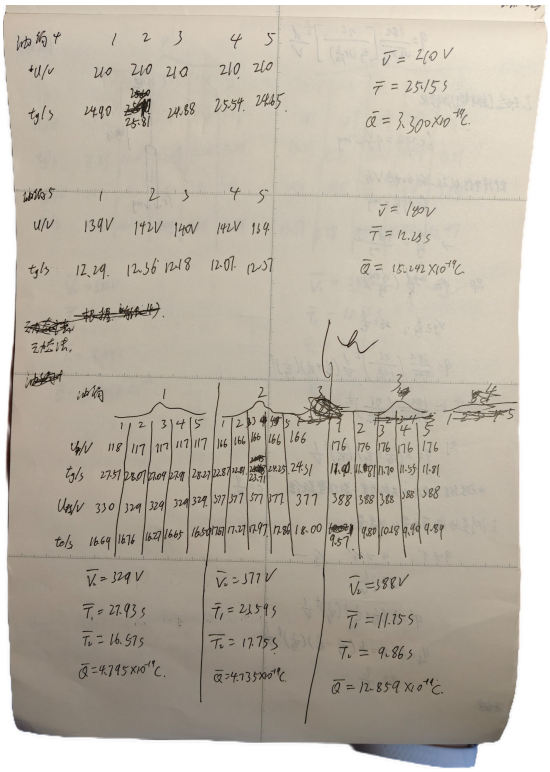


图 5: data2

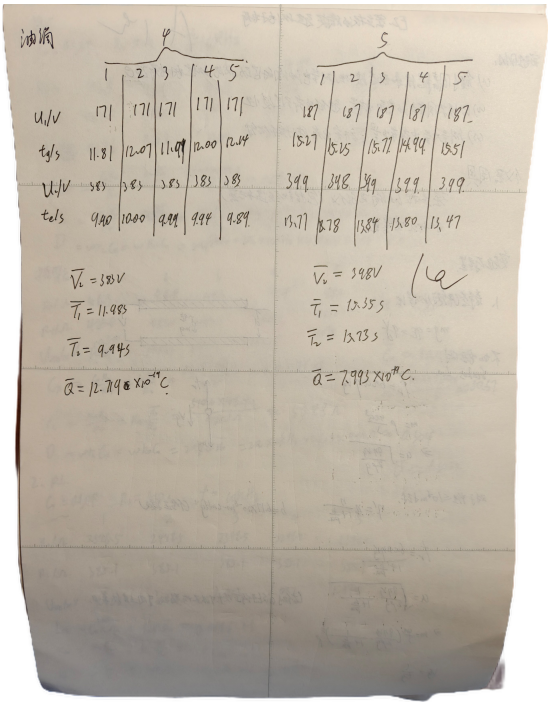


图 6

现场图：

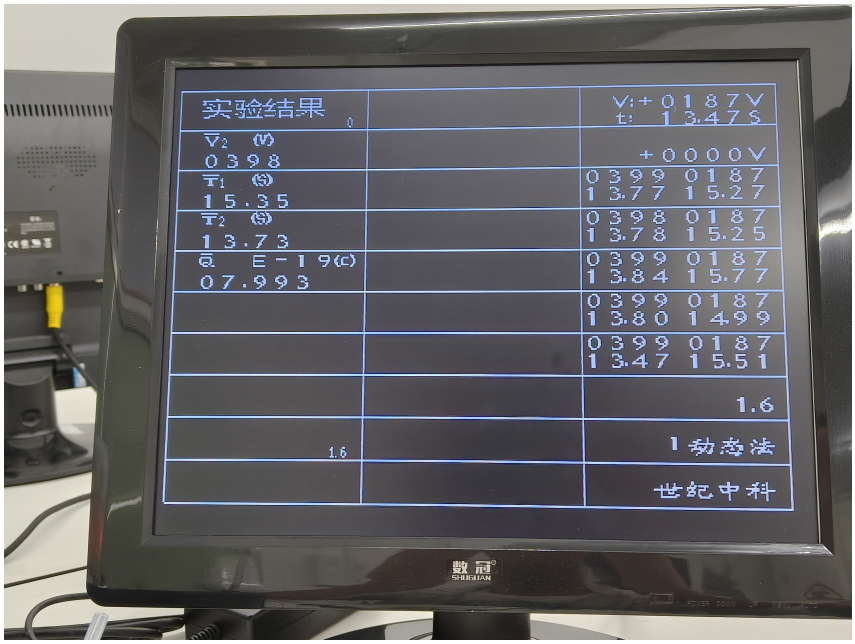

实验结果
V:+0187V
t: 13.47S
+0000V
0399 0187
13.77 15.27
0398 0187
13.78 15.25
0399 0187
13.84 15.77
0399 0187
13.80 14.99
0399 0187
13.47 15.51
1.6
1.6
1秒态法
世纪中科

图 7