浙江大学

物 理 实 验 报 告

实验名称： 密立根油滴实验

实验桌号： 5

指导教师：

班级：

姓名：

学号：

实验日期： 2025 年 11 月 25 日　　**星期** 二 **下午**

（此处填实验选课系统内日期）

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：

情况说明：

一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

密立根油滴实验的核心目的是精确测定基本电荷量 e。实验通过观测带电油滴在均匀电场和重力场中的运动状态来实现。

实验现象 在电场未施加电压时，油滴在重力 mg 和空气粘滞阻力 f 的作用下以恒定的末速度 v 匀速下落。当施加电压 V 后，油滴受到向上的静电力 F_e 作用。通过调节电压，可使油滴静止悬浮（静态平衡），或使油滴向上/向下以新的恒定速度运动。

实验原理 本实验主要结合两种方法：静态平衡法和匀速下降法。

(1) **静态平衡法**当油滴静止悬浮在平行板之间时，油滴所受的重力 mg 与静电力 F_e 平衡。其中，平行板间的电场强度为 $E = V/d$，则静电力为 $F_e = qE$。平衡条件如公式 (1)所示：

$$mg = q\frac{V}{d} \tag{1}$$

其中 q 是油滴所带电荷量，d 是平行板间距。油滴的受力分析图如图 1所示。

(2) **匀速下降法**在不施加电压时，油滴匀速下降。油滴重力 mg 与空气粘滞阻力 f 平衡。根据斯托克斯定律（Stoke's Law），粘滞阻力 f 为：

$$f = \frac{6\pi\eta r v}{1 + b/(pr)} = mg \tag{2}$$

其中 r 是油滴半径，η 是空气粘滞系数，$v = l/t$ 是下落末速度（l 为测量距离，t 为用时），p 是空气压强，b 是与空气有关的常数（密立根对斯托克斯定律的修正项）。联立公式 (1)和 (2)，并考虑油滴质量 $m = \frac{4}{3}\pi r^3\rho$，可以解得油滴的电荷量 q 的最终表达式（忽略中间步骤）：

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

实验方法 实验中，通过测量油滴在无电压下的匀速下落速度 $v = l/t$ 和使其静止所需的平衡电压 V（或使它匀速上升所需的电压 V_n），代入公式 (3)即可求得电量 q。对多颗油滴测量的 q 值进行公约数法处理，最终确定基本电荷量 e。实验装置如图 2所示。

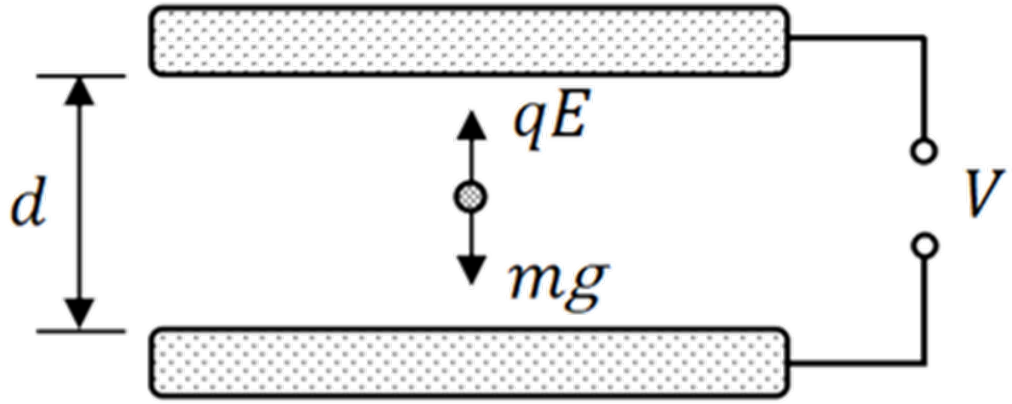


图 1: 密立根油滴受力平衡示意图

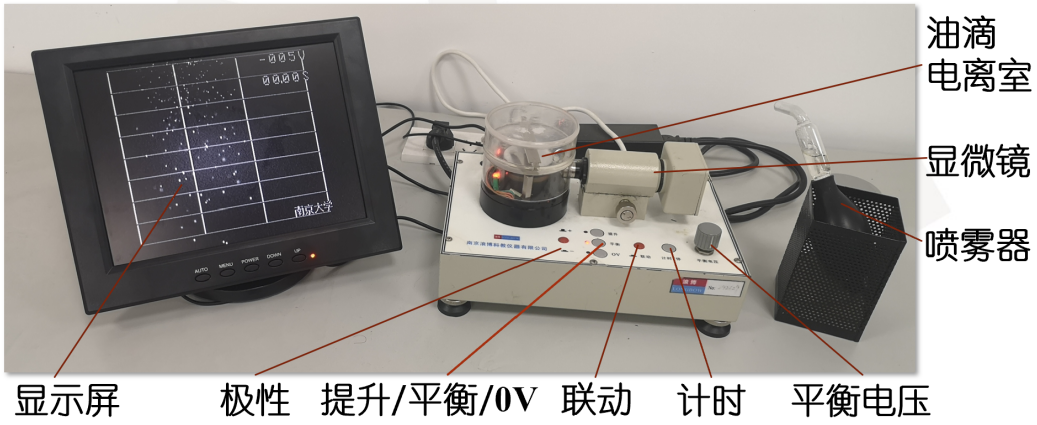


图 2: 密立根油滴实验装置

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

本实验的学习重点在于掌握静态平衡法和匀速下降法测定油滴电荷量的原理，特别是密立根对斯托克斯定律的修正。同时，熟练操作密立根油滴仪，精确测量油滴的下落时间和平衡电压，并使用公约数法对电量数据进行统计分析，最终求出基本电荷量 e。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

本实验的实现难点主要在于：

(1) 寻找并锁定电量合适（小于 10e）、清晰可见、运动稳定的油滴。

(2) 精确计时，由于油滴运动速度慢且易受布朗运动影响，准确测量下落时间 t 存在较大难度。

二、原始数据（20 分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）

原始数据如图3所示。

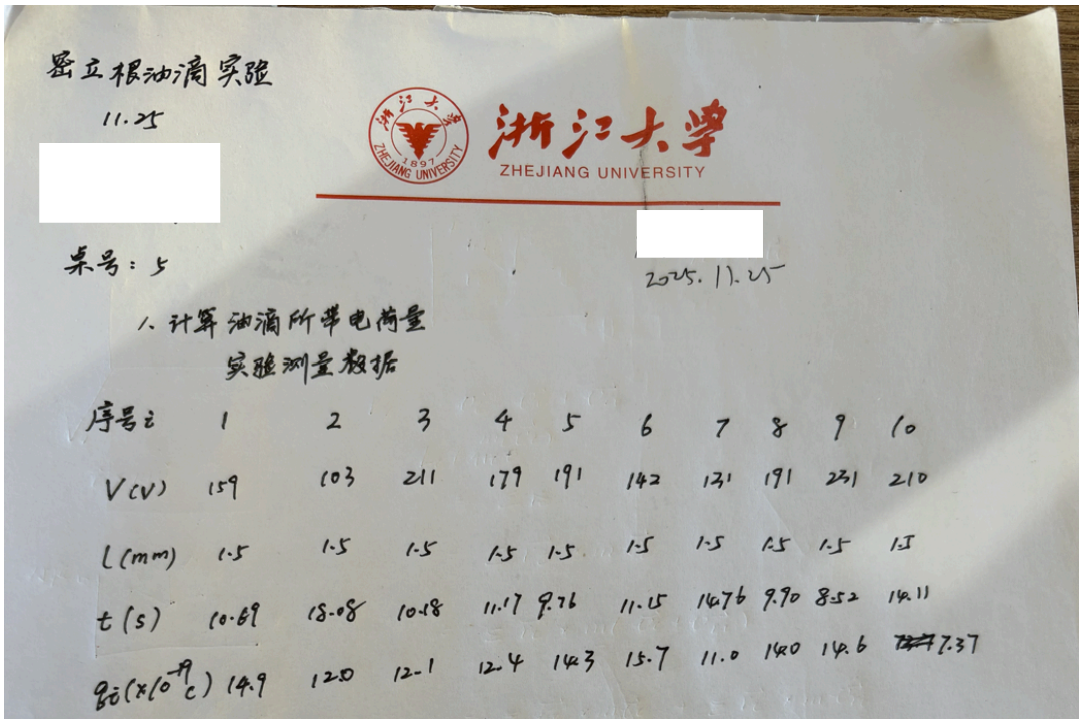


图 3: 原始数据记录

三、结果与分析（60 分）

1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）

原始数据如表1所示

表 1: 密立根油滴实验测量原始数据

序号 (i)	V (V)	l (mm)	t (s)	$q_i(\times 10^{-19}\text{C})$
1	159	1.5	10.69	14.9
2	103	1.5	18.08	12.0
3	211	1.5	10.18	12.1
4	179	1.5	11.17	12.4
5	191	1.5	9.76	14.3
6	142	1.5	11.15	15.7
7	131	1.5	14.76	11.0
8	191	1.5	9.90	14.0
9	231	1.5	8.52	14.6
10	210	1.5	14.11	7.37

将原始测得的电荷量 q_i 从小到大重新排序，利用公认的基本电荷量 $e = 1.60 \times 10^{-19}\text{C}$ 估算元电荷数目 n，并计算基本电荷量 e_i。

表 2: 公约数法计算基本电荷量数据表

排序序号 i	q_i	$q_{i+1} - q_i$	n		e_i
	$(\times 10^{-19}\text{C})$	$(\times 10^{-19}\text{C})$	计算值	取整数	$(\times 10^{-19}\text{C})$
1	7.37	3.63	4.61	5	1.47
2	11.0	1.00	6.88	7	1.57
3	12.0	0.10	7.50	8	1.50
4	12.1	0.30	7.56	8	1.51
5	12.4	1.60	7.75	8	1.55
6	14.0	0.30	8.75	9	1.56
7	14.3	0.30	8.94	9	1.59
8	14.6	0.30	9.13	9	1.62
9	14.9	0.80	9.31	9	1.66
10	15.7	—	9.81	10	1.57

平均基本电荷量计算：

$$\bar{e} = \frac{\sum e_i}{10} = \frac{1.47 + 1.57 + 1.50 + 1.51 + 1.55 + 1.56 + 1.59 + 1.62 + 1.66 + 1.57}{10} = 1.56 \times 10^{-19}\text{C}$$

2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

1. A 类不确定度计算　本实验共测量 10 组数据，计算平均值 $\bar{e} = 1.56 \times 10^{-19}\text{C}$。基本电荷量测量值的 A 类不确定度 u_A 为：

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(e_i - \bar{e})^2}{n(n-1)}}$$

计算各测量值与平均值的残差平方和：

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{10}(e_i - \bar{e})^2 &\approx (1.47-1.56)^2 + (1.57-1.56)^2 + \cdots + (1.57-1.56)^2 \\ &= (-0.09)^2 + (0.01)^2 + (-0.06)^2 + (-0.05)^2 + (-0.01)^2 \\ &\quad + (0.00)^2 + (0.03)^2 + (0.06)^2 + (0.10)^2 + (0.01)^2 \\ &= 0.0081 + 0.0001 + 0.0036 + 0.0025 + 0.0001 \\ &\quad + 0.0000 + 0.0009 + 0.0036 + 0.0100 + 0.0001 \\ &= 0.0290 \times (10^{-19}\text{C})^2\end{aligned}$$

代入公式计算 u_A：

$$u_A = \sqrt{\frac{0.0290}{10 \times (10-1)}} = \sqrt{\frac{0.0290}{90}} \approx 0.018 \times 10^{-19}\text{C}$$

2. 实验结果　基本电荷量的最终测量结果表示为：

$$e = \bar{e} \pm u_A = (1.56 \pm 0.02) \times 10^{-19}\text{C}$$

与标准值 $e\ = 1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ 相比，相对误差为：

$$E = \frac{|\bar{e} - e\ |}{e} \times 100\% = \frac{|1.56 - 1.602|}{1.602} \times 100\% \approx 2.6\%$$

3. 误差原因分析

- **计时误差**：油滴下落时间 t 是人工使用秒表记录的，存在反应时间延迟，且油滴运动距离较短（1.5 mm），相对误差较大。
- **油滴选择与布朗运动**：微小油滴受空气分子撞击产生布朗运动，导致其运动轨迹不是严格的直线，影响速度测量的准确性。
- **系统误差**：电压表读数、显微镜标尺校准、极板间距 d 的测量等可能存在系统误差。
- **理论修正的不确定性**：斯托克斯定律的修正系数 b 和空气压强 p 等参数的取值也会引入一定的误差。

3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

本实验利用密立根油滴仪，通过静态平衡法和匀速下降法测量油滴电荷量。实验过程中观察了油滴在不同电压下的运动状态，通过斯托克斯定律修正公式计算电量。实验结果验证了电荷的量子化特征，即带电量均为基本电荷 e 的整数倍，测得 e 值与标准值相对误差较小，实验原理与方法切实可行。

四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

1. 在测量油滴匀速下降一段距离 l 所得时间 t 时，应选择哪段 l 最合适？为什么？

应选择显微镜分划板中距离适中（如 $l = 1.5\text{mm}$ 或 2.0mm）且位于视场中央的刻度线区间。

(1) **减小计时误差：**若 l 太短，下落时间 t 较短（例如小于 5 秒），人工操作秒表时的反应时间（约 0.1-0.2 秒）在总时间中占比过大，导致速度测量的相对误差显著增加。

(2) **避免视场影响：**若 l 太长，油滴容易在运动过程中飘出视场，或者因偏离焦平面而变模糊，增加跟踪难度和丢失油滴的风险。

(3) **确保匀速：**视场中央区域的电场通常最均匀，且油滴已充分达到匀速运动状态（终端速度），能保证斯托克斯定律的适用性。

2. 何谓合适的待测油滴？如何选择？

合适的油滴应具备“电量适中、质量适中、成像清晰”的特点。选择标准如下：

(1) **带电量适中：**油滴所带的基本电荷数 n 最好小于 10 个。如果 n 太大，相邻能级的电荷量（ne 与 $(n \pm 1)e$）差异不明显，难以准确分辨 n 的取值。

(2) **质量适中：**

- **平衡电压：**约在 $200\text{V} \sim 300\text{V}$ 之间。
- **下落时间：**匀速下落 1.5mm 或 2.0mm 的时间最好在 $10\text{s} \sim 20\text{s}$ 之间。
- 若油滴太小（下落太慢），受布朗运动影响大，很难做直线运动；若油滴太大（下落太快），下落时间短，计时误差大。

(3) **成像清晰：**能够清晰地聚焦在分划板平面上，便于观察起止点。

3. 对油滴进行跟踪测量时，有时油滴逐渐变得模糊，为什么？应如何避免在测量途中丢失油滴？

显微镜的景深很小（焦深短）。在油滴运动过程中，由于空气扰动、重力沉降或仪器轻微震动，油滴可能会产生垂直于镜面的前后位移（横向漂移）。一旦油滴偏离了显微镜的焦平面，成像就会变模糊甚至消失。

避免措施：

(1) **实时微调：**在测量过程中，操作者的手应始终放在显微镜的**微调焦旋钮**上。一旦发现油滴变模糊，应立即轻轻转动微调旋钮，追踪油滴的位置，使其重新清晰。

(2) **防风防震：**测量时动作要轻缓，避免呼吸直吹实验台或大幅度动作引起空气扰动。

(3) **预判位置：**在油滴上/下运动时，眼睛要紧盯视场，预判其运动轨迹，若偏离过大可适当调整升降电压将其拉回或放弃该油滴重新寻找。

注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名 + 学号 + 实验名称 + 周次。

2.“实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。

3.“实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。

4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制