

实验 C1 电子电荷的确定——密立根油滴实验

【数据处理与分析】

表 1: 密立根油滴实验参数

符号	物理意义	数值和单位	符号	物理意义	数值和单位
d	极板间距	$5.00 \times 10^{-3}m$	g	重力加速度	$9.78858m/s^2$
η	空气黏滞系数	$1.83 \times 10^{-5}kg/(m \cdot s)$	ρ	油的密度	$981kg/m^3(20^\circ C)$
b	修正常数	$6.17 \times 10^{-6}m/cmHg$	p	大气压强	76.0mmHg
l	下落距离	1.6mm	V	平衡电压	
t_g	油滴下落时间		t_e	油滴上升时间	

1. 静态（平衡）测量法

由油滴在极板间受力平衡及斯托克斯公式可得油滴半径为:

$$a = \left[\frac{9\eta l}{2\rho g t_g} \right]^{1/2} \quad (1)$$

进而求出带电量 q:

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

将实验数据代入公式1和公式 2得到结果见表 2:

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 (即电子的电荷量), 需对实验测得的各个电量 q 求最大公约数。若测量误差较大, 求出 q 的最大公约数比较困难, 通常需采用“倒过来验证”的办法进行数据处理。用实验测得的电量 q 除以公认的电子电荷值 $e = 1.602177 \times 10^{-19}C$, 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, 就得到电子的电荷值 e。

计算数据见表 3:

以 q 为纵坐标, n 为横坐标做散点图, 并用 $y = ax$ 曲线拟合, 拟合结果斜率为元电荷 e 的测量值, 即 $e=a$ 。根据最小二乘法拟合直线得图 1:

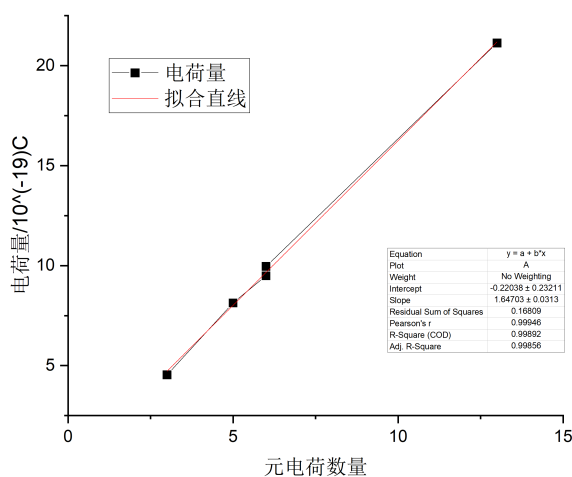
通过静态测量法实验测得的元电荷的平均值为 $1.64703 \times 10^{-19}C$, 与标准值 $e = 1.602177 \times 10^{-19}C$ 相对误差为 2.80%.

表 2: 静态测量法计算结果

实验次数		1	2	3	4	5	平均值
油滴 1	油滴半径 $a/10^{-7}m$	10.77	10.74	10.60	10.62	10.59	10.66
	电荷 $q/10^{-19}C$	21.84	21.91	20.79	20.53	20.57	21.13
油滴 2	油滴半径 $a/10^{-7}m$	6.91	7.16	7.06	7.02	6.99	7.03
	电荷 $q/10^{-19}C$	4.46	4.95	4.70	4.65	4.54	4.54
油滴 3	油滴半径 $a/10^{-7}m$	9.37	9.43	9.47	9.31	9.35	9.39
	电荷 $q/10^{-19}C$	9.62	9.75	9.75	9.50	9.49	9.49
油滴 4	油滴半径 $a/10^{-7}m$	8.33	8.52	8.23	8.49	8.50	8.41
	电荷 $q/10^{-19}C$	9.44	9.95	8.70	10.03	9.96	9.96
油滴 5	油滴半径 $a/10^{-7}m$	8.75	8.85	8.78	8.96	8.86	8.84
	电荷 $q/10^{-19}C$	8.06	8.05	7.939	8.63	8.13	8.13

表 3: 静态法油滴带电量及所带元电荷数目

油滴编号	油滴所带电荷量 $q/10^{-19}C$	元电荷数目 n	测得电子电荷值 $q/10^{-19}C$	相对误差
1	21.13	13	1.63	1.88
2	4.54	3	1.51	0.56
3	9.49	6	1.58	1.25
4	9.96	6	1.66	3.75
5	8.13	5	1.63	1.86

图 1: 静态测量法的 q - n 拟合曲线

误差分析

静态法产生误差的原因可能有：

- (1). 锁定的平衡电压不够准确
- (2). 计时时人为反应与机器显示延时导致测量下落时间有误差
- (3). 实验当时空气湿度极端导致空气粘滞指数与给定值不一致
- (4). 实验当天温度对应的油滴密度与给定值不同

2. 动态（非平衡）测量法

由公式 3 可以计算油滴电荷量：

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

将实验数据代入公式1和公式 3 得到结果见表 4：

表 4: 动态测量法计算结果

实验次数		1	2	3	4	5	平均值
油滴 1	油滴半径 $a/10^{-7}m$	9.36	9.42	9.32	9.28	9.25	9.32
	电荷 $q/10^{-19}C$	8.16	8.26	8.24	8.00	7.88	8.11
油滴 2	油滴半径 $a/10^{-7}m$	8.85	8.72	8.78	8.80	8.92	8.81
	电荷 $q/10^{-19}C$	9.35	9.06	9.17	9.29	9.42	9.26
油滴 3	油滴半径 $a/10^{-7}m$	11.88	12.00	11.85	11.99	11.94	11.93
	电荷 $q/10^{-19}C$	27.37	28.36	27.92	28.34	28.04	28.01
油滴 4	油滴半径 $a/10^{-7}m$	9.10	9.03	9.20	9.09	9.20	9.13
	电荷 $q/10^{-19}C$	14.39	14.12	14.17	14.04	14.20	14.18
油滴 5	油滴半径 $a/10^{-7}m$	11.33	11.02	11.30	11.44	11.17	11.25
	电荷 $q/10^{-19}C$	26.78	25.11	27.85	27.62	25.65	26.60

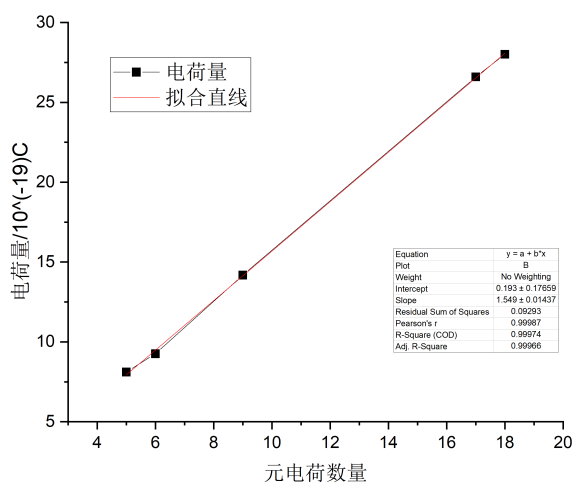
用同样方法计算得电量 q 、基本电荷的数目 n 及元电荷电量 e 。

以 q 为纵坐标， n 为横坐标做散点图，并用 $y = ax$ 曲线拟合，拟合结果斜率为元电荷 e 的测量值，即 $e=a$ 。根据最小二乘法拟合直线得图 2：

通过静态测量法实验测得的元电荷的平均值为 $1.549 \times 10^{-19}C$ ，与标准值 $e = 1.602177 \times 10^{-19}C$ 相对误差为 3.31%。

表 5: 动态法油滴带电量及所带元电荷数目

油滴编号	油滴所带电荷量 $q/10^{-19}C$	元电荷数目 n	测得电子电荷值 $q/10^{-19}C$	相对误差%
1	8.11	5	1.62	3.33
2	9.26	6	1.54	3.75
3	28.01	18	1.56	2.5
4	14.18	9	1.58	1.25
5	26.60	17	1.56	2.5

图 2: 动态测量法的 q - n 拟合曲线

误差分析

动态法产生误差的原因可能有：

- (1). 油滴通过计时起点和计时终点时只有一瞬间，人的反应时间会造成时间测量的误差
- (2). 油滴经过开始计时刻度线时还未到达匀速的状态，在计时的运动过程中并非全过程匀速运动，从而造成误差

动态法相对静态法误差较大，静态法各组数据更接近理论值，基本验证了电荷的不连续性，测出元电荷 e 的大小。

3. 大量油滴带电量分析

将所测 10 个油滴带电量随元电荷个数曲线拟合得图 3:

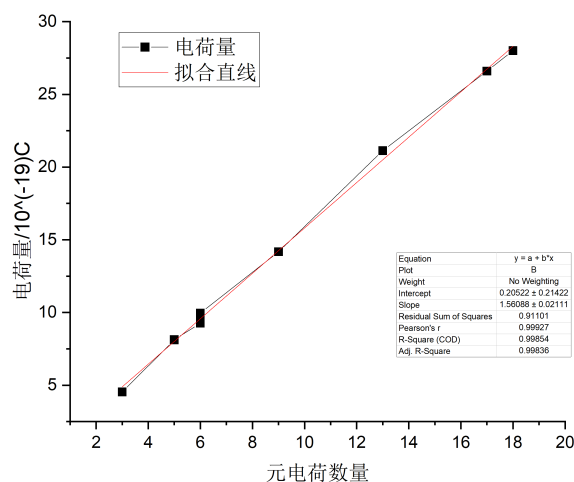


图 3: 大量油滴 q-n 拟合曲线

通过动态测量法实验测得的元电荷的平均值为 $1.56088 \times 10^{-19}C$ ，与标准值 $e = 1.602177 \times 10^{-19}C$ 相对误差为 2.58%。

误差分析

误差的原因可能有：

- (1). 用于分析的数据量不够多，拟合效果不佳，误差较大

【参考文献】

- (1). 沈韩. 基础物理实验 [M]. 科学出版社, 2015.

【思考题】

1. 本实验如何通过宏观量测量微观量？

答：本实验通过分析大量的宏观测量数据，得到微观量的统计规律。通过带电油滴在重力场和电场作用下的平衡运动来建立宏观量和微观量之间的联系，油滴的运动是可观测的，其重力（质量）也是可以在宏观的尺度下测得的，外加电场可直接通过仪器读数，有了这些表达量就可以测量微观的电荷。

2. 实验中如何保持油滴匀速运动？

答：实验时在视野范围内尽可能让油滴开始运动的位置离计时开始的刻度线远一些。让油滴在距计时开始刻度线前一段距离开始加速运动。一定速度后，油滴受到的空气阻力与重力平衡，保证油滴在到达刻度线时的速度已达到最终匀速运动的速度。