

淮南师范学院实验报告

学院： 电子工程学院 专业： 物理学 班级: 请输入

学号: 请输入 姓名 请输入 日期： 请输入

一、实验名称：液体粘滞系数的测量

二、实验目的：

1. 理解液体粘滞现象和斯托克斯定律，掌握落球法测定液体粘滞系数的基本原理。
2. 掌握螺旋测微器、秒表和落球法粘滞系数测量仪的规范操作方法。
3. 学会对连续计时数据进行逐差法和最小二乘法处理，并完成直接测量量与间接测量量的不确定度评定。
4. 分析有限管径、人工计时和小球运动状态等因素对测量结果的影响。

三、实验原理：

（一）斯托克斯定律

半径较小、表面光滑的钢球在粘滞液体中下落时，受到重力、浮力和粘滞阻力。小球达到收尾速度 v_0 后近似做匀速直线运动。斯托克斯定律给出的粘滞阻力为：

$$f = 3\pi\eta dv_0$$

式中， η 为液体粘滞系数， d 为小球直径。小球匀速下落时满足：

$$mg = F_{\text{浮}} + f$$

由此得到无限广延液体中的粘滞系数：

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0}$$

其中， ρ 为钢球密度， ρ_0 为液体密度。

（二）有限管径修正

实际实验中小球在内径为 D 的玻璃管内下落，管壁会增大粘滞阻力。取小球通过测量区间 L 的时间为 t ，有 $v_0 = L/t$ ，考虑管壁修正后：

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2t}{18L\left(1 + 2.4\frac{d}{D}\right)}$$

（三）连续计时与最小二乘法

六个小球依次通过相同测量区间，秒表连续运行。设第 i 次累计时间为 T_i ，则理论上：

$$T_i = ti + b$$

其中斜率 t 即一个小球通过测量区间的平均时间， b 表示启动时刻造成的截距偏差。用最小二乘法拟合 $T_i - i$ 直线，可综合利用全部累计时间并减小随机计时误差。

四、主要仪器设备：落球法粘滞系数测定仪、蓖麻油、小钢球、螺旋测微器、秒表、镊子、钢盘和温度测量装置。

五、实验步骤：

1. 调节实验装置，使盛有蓖麻油的玻璃管保持竖直，确认液体中无明显气泡和杂质。
2. 检查螺旋测微器零点，记录零点误差；依次测量六个小钢球的直径。
3. 将小球用镊子放入液体中央，避免贴近管壁或带入气泡。
4. 以玻璃管 $0 \sim 20$ cm 刻度段作为测量区间。第一个小球到达起始刻度时启动秒表，到达终止刻度时记录累计时间；秒表不清零，依次完成六个小球的连续计时。
5. 记录温度、量筒内径和测量距离，采用逐差法与最小二乘法求平均下落时间，计算粘滞系数及其不确定度。

六、原始数据记录：

（一）实验条件

物理量	符号	数值	单位
待测液体	—	蓖麻油	—
测试温度	T	25	℃
钢球密度	ρ	7.8×10³	kg/m³
蓖麻油密度	ρo	0.95×10³	kg/m³
重力加速度	g	9.8	m/s²
玻璃管内径	D	20.0	mm
匀速测量距离	L	20.0	cm
螺旋测微器零点误差	do	+0.005	mm
秒表分辨力	Δt	0.01	s

（二）小球直径记录

原始记录中的直径写为 0.0995cm，统一换算为 0.995mm。螺旋测微器为正零差，故修正直径

$d_i = d_{\text{视}i} - d_{0^{\circ}}$

测量次数 i	1	2	3	4	5	6
原始记录/cm	0.0995	0.0995	0.0995	0.0995	0.0995	0.0995
直径视值/mm	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
修正直径 di/mm	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990

（三）连续计时记录

测量次数 i	1	2	3	4	5	6
原始累计读数	31.28 s	1'03"15	1'34"77	2'06"25	2'38"10	3'09"60
累计时间 Ti/s	31.28	63.15	94.77	126.25	158.10	189.60
单次时间 ti/s	31.28	31.87	31.62	31.48	31.85	31.50

七、数据处理：

（一）小球直径及其不确定度

平均直径为：

$$\bar{d} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 d_i = 0.990 \text{ mm}$$

六次修正直径相同，故按记录数据有 $u_A(d) = 0$ 。取螺旋测微器示值允许误差为 0.005mm，B 类

标准不确定度为：

$$u_B(d) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029 \text{ mm}$$

$$u(d) = \sqrt{u_A^2(d) + u_B^2(d)} = 0.0029 \text{ mm}$$

因此：

$$d = (0.990 \pm 0.003) \text{ mm}$$

（二）下落时间处理

逐差法取 $\Delta T_i = T_{i+3} - T_i$ ， 则：

i	1	2	3
ΔTi/s	94.97	94.95	94.83
ΔTi/3/s	31.657	31.650	31.610

$$\bar{t}_{\text{逐差}} = 31.639 \text{ s}$$

对累计时间作最小二乘直线拟合，得到：

$$T_i = (31.655 \text{ s})i - 0.268 \text{ s}$$

故采用最小二乘法所得平均下落时间：

$$t = 31.655 \text{ s}$$

斜率的 A 类标准不确定度为：

$$u_A(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (T_i - ti - b)^2}{(6 - 2) \sum_{i=1}^6 (i - \bar{i})^2}} = 0.027 \text{ s}$$

秒表 B 类标准不确定度为：

$$u_B(t) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.0058 \text{ s}$$
$$u(t) = \sqrt{u_A^2(t) + u_B^2(t)} = 0.028 \text{ s}$$

因此：

$$t = (31.655 \pm 0.028) \text{ s}$$

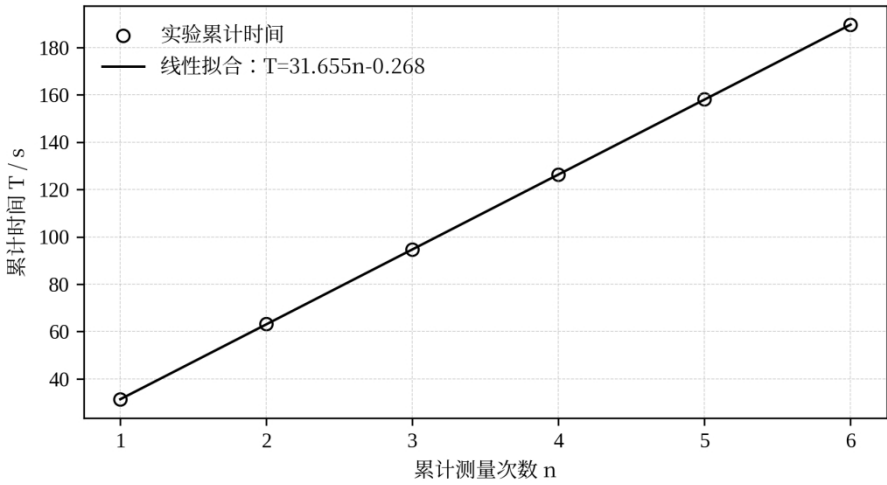


图 1 累计时间与测量次数的线性拟合

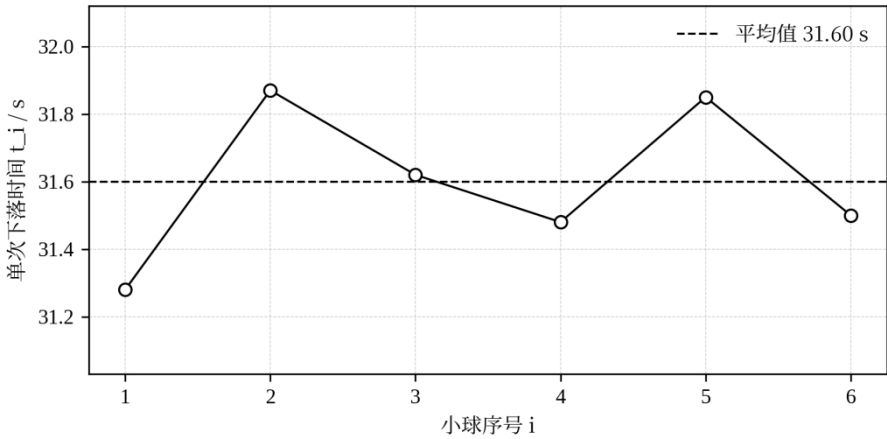


图 2 六次单次下落时间的波动

（三）粘滞系数计算

小球收尾速度为：

$$v_0 = \frac{L}{t} = \frac{0.200}{31.655} = 6.318 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

管壁修正因子为：

$$1 + 2.4 \frac{d}{D} = 1 + 2.4 \times \frac{0.990}{20.0} = 1.1188$$

代入有限管径修正公式：

$$\eta = \frac{(7.8 - 0.95) \times 10^3 \times 9.8 \times (0.990 \times 10^{-3})^2 \times 31.655}{18 \times 0.200 \times 1.1188}$$

得：

$$\eta = 0.5171 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

（四）粘滞系数不确定度

忽略 ρ 、 ρ_0 、 g 、 L 和 D 的不确定度，粘滞系数相对标准不确定度为：

$$\frac{u(\eta)}{\eta} = \sqrt{\left[\frac{2D + 2.4d}{D + 2.4d} \frac{u(d)}{d} \right]^2 + \left[\frac{u(t)}{t} \right]^2}$$

计算得：

$$\frac{u(\eta)}{\eta} = 0.56\%, \quad u(\eta) = 0.0029 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

按照不确定度与测量值末位对齐的规则，最终结果为：

$$\eta = (0.517 \pm 0.003) \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

（五）斯托克斯条件检验

取雷诺数：

$$Re = \frac{\rho_0 v_0 d}{\eta} = 1.15 \times 10^{-2} \ll 1$$

雷诺数远小于 1，说明小球周围液体处于低雷诺数层流状态，采用斯托克斯定律是合理的。

八、实验结果与讨论:

（一）实验结果

在 25℃ 条件下，采用落球法测得蓖麻油的粘滞系数为：

$$\eta = (0.517 \pm 0.003) \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

相对标准不确定度约为 0.56%。六次单球下落时间分布在 31.28~31.87s 范围内，波动较小；累计时间与测量次数具有良好的线性关系，说明连续计时数据整体稳定。

（二）数据处理方法讨论

连续计时避免了每次重新启动和停止秒表所产生的独立反应误差。逐差法得到 31.639s，最小二乘法得到 31.655s，两者仅相差 0.016s，表明处理结果具有良好一致性。最小二乘法利用全部累计时间，能够同时修正非零截距，因此作为最终时间结果更为合理。

（三）误差分析

- 直径测量误差。 粘滞系数近似与 d^2 成正比，小球直径的微小误差会被放大。原始记录中的直径单位与表头不一致，统一换算时也可能引入记录误差。
- 人工计时误差。 小球通过刻度线的瞬间由实验者判断，视差和反应时间会使累计时间产生随机波动。
- 管壁效应。 虽已使用 $1 + 2.4d/D$ 进行有限管径修正，但该修正式仍是近似表达，且小球偏离管轴时壁面影响会增强。
- 小球运动状态。 若小球在进入 0~20cm 测量区间前尚未充分达到收尾速度，或下落时发生摆动、转动和贴壁，均会使测得时间偏大。
- 温度影响。 液体粘滞系数对温度较敏感。实验过程中若蓖麻油温度不均匀或发生波动，将形成系统误差。
- 小球一致性。 六个小球的实际直径、球形度和表面状态不可能完全相同，而原始记录将其直径记为相同数值，可能低估了直径测量的 A 类不确定度。

（四）改进措施

测量前应充分恒温并排除气泡；用导向装置使小球沿管轴释放；在相互垂直方向多次测量直径；采用光电门或视频计时；增加测量次数，并将管径和下落距离的不确定度纳入合成不确定度。

（五）实验结论

本实验利用小球在蓖麻油中的低雷诺数匀速下落过程，验证了落球法测量液体粘滞系数的基本原理。连续计时数据具有较好的线性，逐差法与最小二乘法结果一致。考虑有限管径修正后，得到 25℃ 时蓖麻油粘滞系数为 $\eta = (0.517 \pm 0.003) \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，完成了实验目的。