

物理实验报告



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

学号: 12311004 姓名: 刘达洲 日期: 2025.3.28 时间: 周五下午

1 实验目的

学习落球法测量液体黏度的原理和方法, 掌握黏度测定实验的操作技术及数据处理方法。

2 实验原理

小球在液体中下落时受到三个力的作用:

$$F = G - F_b - F_d \quad (1)$$

其中, 重力 $G = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho g$, 浮力 $F_b = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_0 g$, d 、 ρ 、 ρ_0 分别为小球直径、密度和液体密度。

粘滞阻力的表达式与液体的流动形态密切相关。液体的流动形态分为层流和湍流。层流是一种稳定的流动, 整个流动可划分成互不干扰的流动层, 粘滞阻力的表达式较为简单; 湍流是一种非稳定的流动, 伴随着涡旋和混沌边界等现象, 粘滞阻力的表达式非常复杂。在流体力学中, 液体的流动形态由雷诺数来预测。雷诺数越小, 流动形态越接近层流; 反之, 容易产生湍流。对于小球在液体中下落的情形, 雷诺数的定义为

$$Re = \frac{v \rho_0 d}{\eta} \quad (2)$$

其中, η 表示液体黏度, v 表示小球下落速度。不难验证, 本实验的相关参数可保证 $Re \ll 1$, 流动形态为层流, 且粘滞阻力的表达式可简化为

$$F_d = 3\pi\eta dv \quad (3)$$

此即著名的 Stokes 公式。

由 Stokes 公式可知, 在小球加速下落的过程中, 粘滞阻力不断增加。最终, 小球会达到一个终止速度 v_f , 此时粘滞阻力与重力、浮力达到平衡, 即

$$3\pi\eta dv_f = \frac{1}{6}\pi d^3 (\rho - \rho_0) g \quad (4)$$

达到平衡后, 小球以速度 v_f 匀速下落。由方程 (4) 可得黏度计算公式

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 (\rho - \rho_0) g}{v_f}$$

注意, 上述黏度计算公式仅适用于液体无限宽广的理想情况。由于本实验中的液体处在量筒中, 因而计算黏度时需要使用 Ladenburg 修正公式

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 g (\rho - \rho_0)}{v_f (1 + 2.4d/D)(1 + 1.7d/H)} \quad (5)$$

其中, D 和 H 分别代表液柱的直径和高度。上述方程等号右边分母中的两个因子 $(1 + 1.2d/D)$ 和 $(1 + 1.65d/H)$ 分别是对容器壁效应和液柱有限高效应作出的修正。

3 实验器材

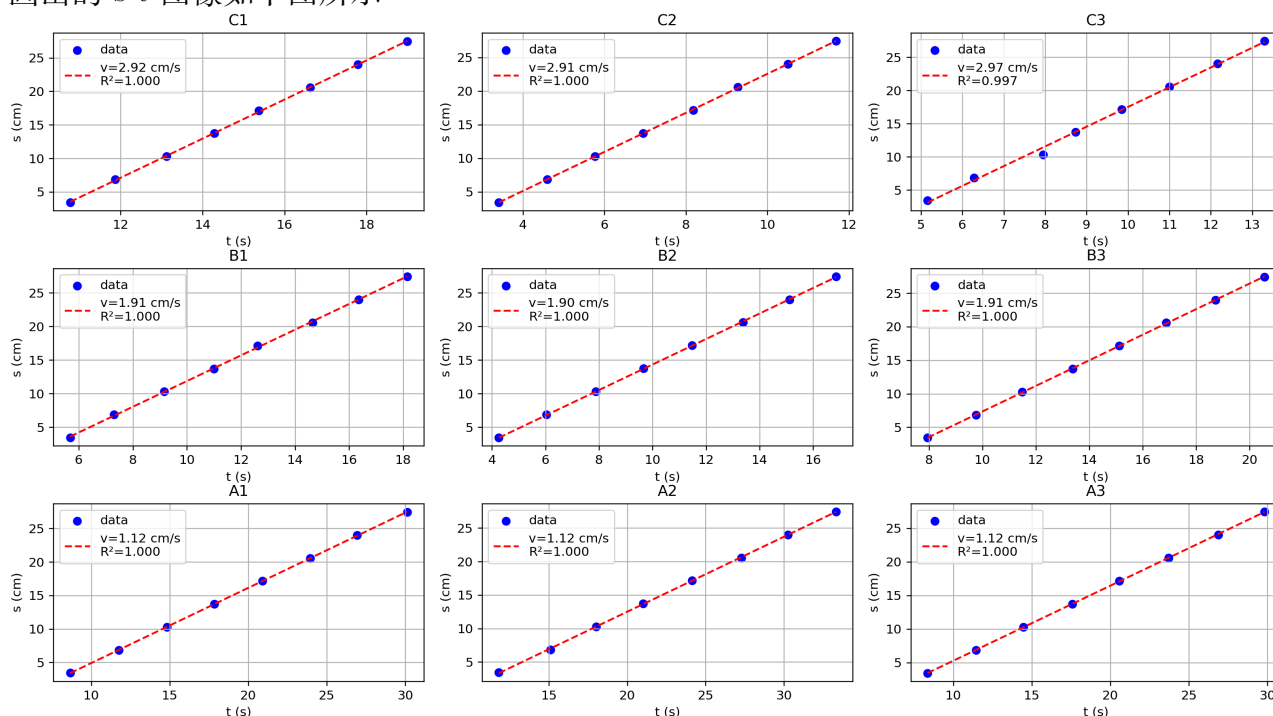
量筒, 蓖麻油 (密度 0.96g/cm^3), 温度计, 钢尺, 游标卡尺, 钢球, 秒表

4 实验内容

1. 用温度计测量实验室温度, 实验开始和结束时各测一次, 取平均值;
2. 用钢尺测量液柱高度 H ;
3. 用游标卡尺测量液柱直径 D ;
4. 量筒上均匀地分布着 9 道容积刻度线, 分别对应于 100ml, 200ml, 300ml, 400ml, 500ml, 600ml, 700ml, 800ml 和 900ml。测量量筒相邻刻度线间距 L ;
5. 选取三种钢球, 按直径从小打到大, 分别标记为 A, B 和 C, 并用千分尺测量直径;
6. 用电子称称量钢球质量;
7. 打开秒表, 用镊子将钢球 A 移至油面中心附近无初速释放, 用秒表依次记录其经过 800ml, 700ml, 600ml, 500ml, 400ml, 300ml, 和 100ml 8 个刻线处的时刻。对于钢球 B 和 C, 进行类似操作, 记录相应时刻。每种球释放三个;
8. 绘制钢球下落的 $s-t$ 图像, 并通过拟合确定各自终止速度;
9. 对每种钢球, 根据公式 (6) 分别计算蓖麻油黏度 η_A 、 η_B 和 η_C

5 实验结果

画出的 $s-t$ 图像如下图所示:



拟合得到的 R^2 均接近 1, 说明拟合较为准确。

将数据带入上面的公式, 计算得到:

计算得到的每个测量的速度：

速度 v_{C1} : 2.92 cm/s

速度 v_{C2} : 2.91 cm/s

速度 v_{C3} : 2.97 cm/s

速度 v_{B1} : 1.91 cm/s

速度 v_{B2} : 1.90 cm/s

速度 v_{B3} : 1.91 cm/s

速度 v_{A1} : 1.12 cm/s

速度 v_{A2} : 1.12 cm/s

速度 v_{A3} : 1.12 cm/s

计算得到的平均速度（每个小球）：

平均速度 v_A : 1.12 cm/s

平均速度 v_B : 1.91 cm/s

平均速度 v_C : 2.93 cm/s

使用平均速度计算得到的黏度（每个小球）：

黏度 η_A : 7.030271403618851 g/(cm·s)

黏度 η_B : 7.181458627089079 g/(cm·s)

黏度 η_C : 7.123766789013336 g/(cm·s)

验算雷诺数：

计算得到的平均雷诺数（每个小球）：

平均雷诺数 Re_A : 0.0229

平均雷诺数 Re_B : 0.0509

平均雷诺数 Re_C : 0.0986

雷诺数均小于 0.1，可以取零级解，无需因雷诺数对黏度计算公式进行额外修正。

6 实验结论

根据公式，计算得到

$$\eta_A = 7.03 \text{ g/(cm} \cdot \text{s)}, \eta_B = 7.18 \text{ g/(cm} \cdot \text{s)}, \eta_C = 7.12 \text{ g/(cm} \cdot \text{s)}$$

7 思考题

1. **本实验为何要测量实验室温度？**液体的黏度与温度密切相关，蓖麻油的黏度随温度升高显著降低。实验中测量温度可修正温度对黏度的影响，确保计算结果准确。同时，温度变化可能导致液体密度 ρ_0 变化，需通过温度平均值提高参数可靠性。
2. **分别计算三种钢球下落的雷诺数，看其是否满足 $Re \ll 1$ ？**雷诺数计算公式为 $Re = \frac{v\rho_0 d}{\eta}$ 。代入各钢球的 v_f （匀速段速度）、直径 d 、蓖麻油密度 ρ_0 及计算出的黏度 η 。计算得到满足 $Re \ll 1$ 。
3. **哪种钢球最先达到终止速度？**直径最大的钢球（C）最先达到终止速度。因其质量大，初始加速度高，粘滞阻力随速度增长更快，更快达到 $F_d = G - F_b$ 的平衡状态。

8 误差来源分析

1. **温度波动误差：**蓖麻油黏度对温度敏感，实验过程中温度变化未被实时监测，仅取首末温度平均值，导致黏度计算偏差。
2. **容器壁修正误差：**Ladenburg 修正公式 $(1 + 2.4d/D)(1 + 1.7d/H)$ 的系数适用范围有限，若量筒直径 D 或液高 H 测量不准，修正因子引入系统误差。
3. **计时人为误差：**手动秒表记录小球经过刻度线时刻存在反应延迟，尤其小球下落后期速度较快时，时间记录误差放大。
4. **尺寸测量误差：**游标卡尺测量钢球直径 d 时未多位置测量，球体不规则性未被消除；量筒直径 D 测量忽略刻度线内径与真实液柱直径差异。
5. **液体扰动影响：**多次释放钢球导致蓖麻油产生湍流或温度梯度，破坏层流条件，后续小球下落速度 v_f 偏离理论值。
6. **匀速段判定误差：**拟合 $s-t$ 曲线时，若未准确选取匀速段数据点（如包含加速段），导致 v_f 拟合值偏大。
7. **钢球密度计算误差：**电子秤称量质量时环境振动或球表面附着油膜未被清除，导致 ρ 计算偏差，影响 η 结果。

9 实验数据

表 1: 1. 温度测量

T_1	T_2	\bar{T}
23.2	23.5	23.4

表 2: 2. 液柱高度 (cm)

H_1	H_2	H_3	\bar{H}
33.05	33.08	33.10	33.77

表 3: 3. 液柱直径 (cm)

D_1	D_2	D_3	\overline{D}
6.020	6.032	6.018	6.023

表 4: 4. 刻线间距 (700ml 刻线到 800ml 刻线) (cm)

L_1	L_2	L_3	\overline{L}
3.45	3.42	3.41	3.43

表 5: 5. 小球直径 (mm)

	Φ_A			Φ_B			Φ_C		
	1.500	1.499	1.501	1.999	2.000	1.998	2.495	2.497	2.494
平均	1.500			1.999			2.495		

表 6: 6. 小球质量 (g)

0.0637

表 7: 数据表格

名称	C 球 1	C 球 2	C 球 3	B 球 1	B 球 2	B 球 3	A 球 1	A 球 2	A 球 3
t ₈₀₀	10.77	3.41	5.16	5.68	4.26	7.95	8.66	11.80	8.37
t ₇₀₀	11.87	4.60	6.28	7.30	6.04	9.77	11.76	15.10	11.45
t ₆₀₀	13.12	5.77	7.95	9.15	7.88	11.49	14.82	18.00	14.46
t ₅₀₀	14.29	6.95	8.73	11.00	9.66	13.38	17.84	21.00	17.57
t ₄₀₀	15.37	8.18	9.85	12.62	11.48	15.12	20.91	24.13	20.57
t ₃₀₀	16.62	9.27	11.00	14.65	13.38	16.88	23.95	27.29	23.70
t ₂₀₀	17.79	10.50	12.16	16.35	15.12	18.72	26.94	30.26	26.87
t ₁₀₀	18.99	11.68	13.30	18.15	16.85	20.56	30.12	33.32	29.82