

# 落球法测液体的粘滞系数实验数据记录与分析

袁子强      2025533009

2025 年 11 月 14 日

## 1 小球直径 $d$

| 次数                             | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $d \text{ (} 10^{-3}\text{m)}$ | 0.990 | 0.980 | 0.980 | 0.990 | 0.980 |

求  $\bar{d}$ 、 $\sigma_{\bar{d}}$ 。

平均值  $\bar{d}$ 、标准偏差  $\sigma_{\bar{d}}$

$$\begin{aligned}\bar{d} &= 0.984 \times 10^{-3} \text{ m} \\ \sigma_{\bar{d}} &= 0.002449 \times 10^{-3} \text{ m}\end{aligned}$$

不确定度  $U$

取不确定度为平均值的标准偏差：

$$U = \sigma_{\bar{d}} = 0.002449 \times 10^{-3} \text{ m} \approx 0.0025 \times 10^{-3} \text{ m}$$

最终结果： $\bar{d} = (0.984 \pm 0.0025) \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

### 1.1 误差分析

测量的不确定度主要来源于测量过程中的随机误差。

系统误差

1. 螺旋测微器在使用前可能未正确校准零点，或引入了一个固定的偏差；
2. 螺旋测微器本身的制造精度会带来系统误差，通常为  $\pm 0.004 \text{ mm}$ 。

## 随机误差

1. 虽然螺旋测微器可估读到 0.001 mm，但在判断刻度线是否对齐时存在主观性，导致多次测量结果在末位数字上波动；
2. 尽管使用了棘轮机构以保证恒定的测量力，但每次操作的微小差异仍可能导致测杆对小球施加的压力略有不同，从而引起读数变化；
3. 小球并非理想的完美球体，可能存在微小的椭圆度或表面瑕疵——在不同方位测量时，得到的直径值会有微小差异。

## 2 $v_0$ 的测定

$L = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，（1 个刻度为 1 cm）； $v_0 = \frac{L}{t}$ 。

| $T (^{\circ}\text{C})$ | $t (\text{s})$ |      |      |      |      |           |                    | $v_0 (\text{m/s})$     |
|------------------------|----------------|------|------|------|------|-----------|--------------------|------------------------|
|                        | 1              | 2    | 3    | 4    | 5    | $\bar{t}$ | $\sigma_{\bar{t}}$ |                        |
| 26                     | 9.43           | 9.44 | 9.22 | 9.18 | 9.07 | 9.27      | 0.0725             | $5.39 \times 10^{-3}$  |
| 28                     | 7.91           | 7.90 | 7.71 | 7.78 | 7.86 | 7.83      | 0.0381             | $6.39 \times 10^{-3}$  |
| 30                     | 7.22           | 7.17 | 7.23 | 7.13 | 6.93 | 7.14      | 0.0546             | $7.00 \times 10^{-3}$  |
| 32                     | 6.23           | 6.03 | 6.14 | 6.15 | 6.04 | 6.12      | 0.0373             | $8.17 \times 10^{-3}$  |
| 34                     | 5.34           | 5.31 | 5.45 | 5.23 | 5.24 | 5.31      | 0.0398             | $9.42 \times 10^{-3}$  |
| 36                     | 4.76           | 4.76 | 4.64 | 4.64 | 4.71 | 4.70      | 0.0269             | $10.64 \times 10^{-3}$ |

根据理论公式求  $\eta$ 。

( $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_0 = 0.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $D = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ )

## 粘度 $\eta$ 计算

已知参数

$$\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_0 = 0.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.794 \text{ m/s}^2$$

$$d = 0.984 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$$

修正系数

$$(1 + 2.4 \times \frac{d}{D}) = 1 + 2.4 \times \frac{0.984 \times 10^{-3}}{2.0 \times 10^{-2}} = 1.1181$$

计算  $\eta$

以 26°C 为例:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{(7800 - 950) \times 9.794 \times (0.984 \times 10^{-3})^2}{18 \times 5.393 \times 10^{-3} \times 1.1181} \\ &= \frac{6850 \times 9.794 \times 9.682 \times 10^{-7}}{1.085 \times 10^{-1}} = 0.599 \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \eta - \frac{3}{16} v_0 d \rho_0 = 0.599 - \frac{3}{16} \times 5.393 \times 10^{-3} \times 0.984 \times 10^{-3} \times 950 \\ &= 0.599 - 9.45 \times 10^{-4} = 0.598 \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

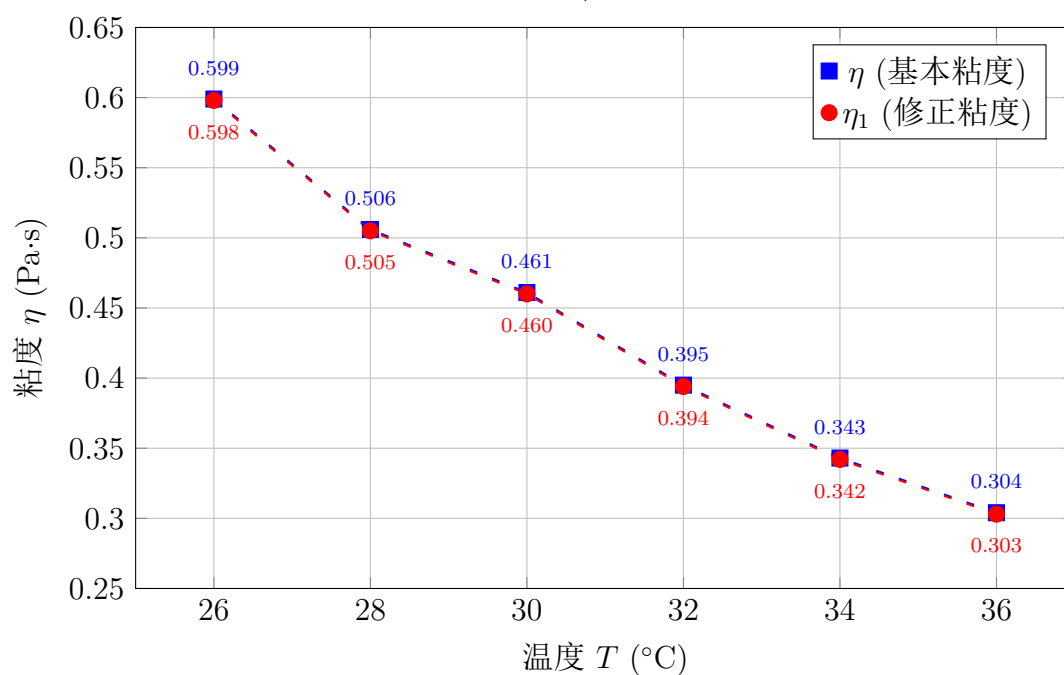
...

最终结果

| $T (^{\circ}\text{C})$              | 26    | 28    | 30    | 32    | 34    | 36    |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\eta (\text{Pa} \cdot \text{s})$   | 0.599 | 0.506 | 0.461 | 0.395 | 0.343 | 0.304 |
| $\eta_1 (\text{Pa} \cdot \text{s})$ | 0.598 | 0.505 | 0.460 | 0.395 | 0.342 | 0.303 |

$\eta$ - $T$  图

蓖麻油粘度  $\eta$  与温度  $T$  关系



## 粘度随温度变化关系

- 粘度随温度升高而显著降低，温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，粘度约减少 5.2 %；
- 从  $26^{\circ}\text{C}$  到  $36^{\circ}\text{C}$ ，粘度从  $0.599\text{ Pa}\cdot\text{s}$  降至  $0.304\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，下降约 49 %；
- 在实验温度范围内，粘度变化符合指数衰减规律；
- 修正项  $\eta_1$  与  $\eta$  差异很小（约 0.1%），说明雷诺数修正影响较小。

## 2.1 误差分析

测量的误差主要来源于速度测量和粘度计算过程。

### 系统误差

1. 理论模型可能存在管壁边界修正不足、温度速度增大时公式适用性降低、忽略雷诺数高阶修正等近似误差；
2. 实验装置可能存在玻璃管微小倾斜、液体内部温度微小梯度和波动等误差；
3. 计算过程中存在参数传递放大误差、忽略蓖麻油密度随温度变化等误差。

### 随机误差

1. 手动操作电子停表的反应时间存在约 0.1-0.2 s 的随机波动，特别是在判断小球通过刻度线的瞬间，导致计时起点和终点的不一致；
2. 释放小球时可能产生微小扰动，影响小球达到终端速度的过程；
3. 小球可能未严格沿管轴下落，产生轻微摆动或靠近管壁，影响下落速度。