

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.08.019

徐杰, 王健, 何蕊, 等. 测量液体黏滞系数的圆锥系统实验平台设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(8): 227-235.

# 测量液体黏滞系数的圆锥系统实验平台设计

徐杰, 王健, 何蕊, 罗亚梅, 杨梦婷

西南医科大学 医学信息与工程学院, 四川 泸州 646000

**摘要:** 液体黏滞系数是表征流体流动特性与能量耗散行为的关键物理参量, 其数值大小直接反映流体内部相邻流层间的内摩擦阻力及抗剪切形变能力。该参数不仅是流体力学理论研究的基础, 更在航空航天润滑系统设计、化工管道输运优化、生物医学微流控芯片开发等工程领域具有重要应用价值。传统测量方法(如落球法、毛细管法)普遍存在操作复杂、环境干扰敏感或适用流体类型有限等问题。提出了一种创新的圆锥系统实验平台, 用于测量液体的黏滞系数。该平台通过分析圆锥在不同介质中的扭转周期变化, 结合理论公式和实验数据, 精确计算液体的黏滞系数, 并利用追踪器(Tracker)软件对理论进行验证和分析。实验结果表明, 该平台具备高精度和稳定性, 测量相对误差控制在 1% 以内, 为液体黏滞系数的高精度测量提供了一种可靠且创新的方法, 同时也为相关实验研究提供了新的技术支持和理论基础。

**关键词:** 黏滞系数; 圆锥系统; 实验平台; 阻尼比

**中图分类号:** O357 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2025)08-0227-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Experimental Platform Design for Measuring Liquid Viscosity Based on Cone System

XU Jie, WANG Jian, HE Rui,  
LUO Yamei, YANG Mengting

School of Medical Informatics and Engineering, Southwest Medical University, Luzhou Sichuan 646000, China

**Abstract:** The liquid viscosity coefficient is a critical physical parameter which characterizes the flow behavior and energy dissipation characteristics of fluids. Its magnitude directly reflects the internal frictional resistance between adjacent fluid layers and the resistance to shear deformation within the fluid. This param-

收稿日期: 2025-02-08

基金项目: 四川省科技厅自然科学基金项目(2023NSFSC1309); 教育部高等学校教学研究项目(DJZW202320hd-5); 教育部高等学校教学研究课题(WX202431); 四川省教育厅 2024 年省级普通本科高校创新性实验项目(序号 144)。

作者简介: 徐杰, 博士, 副教授, 主要从事单向波导和拓扑光子学研究。

通信作者: 杨梦婷, 博士, 讲师。

eter not only serves as a foundation for theoretical studies in fluid mechanics but also holds significant application value in engineering fields such as aerospace lubrication system design, chemical pipeline transport optimization, and biomedical microfluidic chip development. Traditional measurement methods (e. g. , falling ball viscometry, capillary tube method) often suffer from operational complexity, sensitivity to environmental interference, and limitations in applicable fluid types. To address these challenges, this study proposes an innovative conical system-based experimental platform for liquid viscosity measurement. The platform precisely analyzes the torsional periodic variations of a cone immersed in different media, and integrates theoretical formulas with experimental data to calculate liquid viscosity coefficients with high accuracy. Theoretical validation and analysis are further conducted using Tracker software to monitor and verify dynamic interactions. Experimental results demonstrate that the platform achieves high precision and stability, with relative measurement errors controlled within 1%. This work provides a reliable and innovative methodology for high-accuracy determination of liquid viscosity coefficients, and offers new technical support and theoretical foundations for related experimental research.

**Key words:** viscosity coefficient; cone system; experimental platform; damping ratio

近年来,随着材料科学和工程技术的发展,液体黏滞系数的精确测量在石油管道运输、生物医学研究、材料科学和机械工程等多个领域愈发重要<sup>[1-5]</sup>。例如,在石油工业中,原油的黏滞系数直接影响管道运输效率及润滑性能,需通过降黏技术优化输油能耗<sup>[6-7]</sup>;在生物医学领域,药物输送系统的设计需精确控制液体药物的黏度以调节其流动性和注射速度<sup>[8]</sup>;在材料科学领域,新型智能材料的研发依赖黏度动态响应特性的表征<sup>[9]</sup>。

液体黏滞系数的测量是大学物理的经典内容,常用方法包括落球法、滚筒法、毛细管法等。落球法<sup>[10-13]</sup>基于斯托克斯定律,通过测量小球在液体中的下落时间计算黏滞系数,其操作简单、成本低,仅适用于透明或半透明液体(如蓖麻油、甘油),存在显著局限性,且需手动计时引入人为误差。滚筒法也叫旋转法<sup>[14-17]</sup>,通过测量转子在液体中旋转的扭矩计算黏度,适用于高黏度流体(如原油、熔融聚合物),在低黏度液体(如水性溶液)中的扭矩信号微弱,导致液体黏滞系数的测量灵敏度不足,此外,旋转剪切可能改变非牛顿流体(如血液、水凝胶)的微观结构,影响液体黏滞系数测量的真实性。毛细管法<sup>[18-22]</sup>利用泊肃叶公式,通过液体在毛细管中的流量与压力差关系计算黏滞系数,适用于低黏度牛顿流体(如纯水、乙醇),高黏度液体易堵塞管道,且温度波动会显著影响结果(温度偏差 0.5 °C 可导致 5% 误差),虽然乌氏黏度计等改进设计提升了标准化程度,但毛细管法测量黏滞系数仍受限于重力驱动原理的适用范围。

为克服以上传统方法的局限性,本研究设计了一种基于圆锥系统的黏滞系数测量平台,其核心原理如下:通过圆锥系统在液体中的无阻尼自由振动与有阻尼受迫振动的对比,记录简谐运动周期变化,可间接推导液体的黏滞系数。为验证理论模型的可靠性,采用追踪器(Tracker)软件对圆锥的运动轨迹进行追踪,实现理论预测与实验数据的交叉验证。该方法创新性地动态振动响应与数字化验证手段相结合,借助比较分析法,将相对误差控制在 1% 以内,实现液体黏滞系数的间接测量,为流体特性研究提供了一种新方法。

本研究的结构安排如下:第一节介绍实验设计的理论基础,第二节对理论进行验证,描述整个实验设计的具体过程并对实验数据进行分析,第三节对实验结果进行总结和讨论。

## 1 理论方法

### 1.1 圆锥系统的物理模型

实验装置的模型示意图如图 1 所示。该装置主要由 3 个核心组件构成:圆锥体、扭簧以及连接圆锥体

的细手柄。在实验过程中, 通过对手柄施加微小的外力扰动, 使圆锥体产生旋转运动。这一创新性设计能够通过观察圆锥在各种液体介质中的旋转行为, 深入分析液体的黏滞阻尼效应。通过比较不同液体中圆锥运动的特征参数, 间接测定液体的黏滞系数。

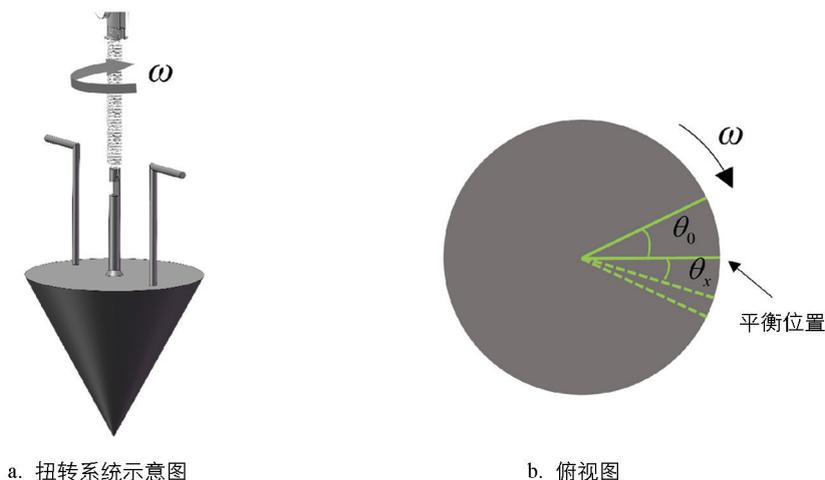


图 1 实验装置的模型示意图

## 1.2 圆锥系统的周期

在空气中进行实验时, 轻轻拨动圆锥使其转动后释放。忽略空气阻力的作用, 扭簧和圆锥系统的总能量  $E_{\text{total}}$  由扭簧的弹性势能和圆锥的动能组成, 其表达式为:

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2}k\theta^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

式中:  $k$  是扭簧的扭转刚度(扭转弹簧常数);  $\theta$  是扭簧的扭转角度;  $I$  是圆锥的转动惯量;  $\omega$  是角速度。

根据  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ , 系统总能量公式可表示为:

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2}k\theta^2 + \frac{1}{2}I\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$$

根据拉格朗日方程  $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial l}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial l}{\partial \theta} = 0$ , 其中  $l = K - U$  是拉格朗日量,  $K$ 、 $U$  分别是系统的动能和势能, 可得:

$$l = \frac{1}{2}I\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 - \frac{1}{2}k\theta^2$$

计算得:

$$\frac{\partial l}{\partial \dot{\theta}} = I \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{\partial l}{\partial \theta} = -k\theta \quad (2)$$

式中:  $\dot{\theta}$  为角度对时间的导数。

将公式(1)、公式(2)代入拉格朗日方程, 简化得:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{k}{I}\theta = 0$$

其解的形式为  $\theta(t) = \Theta \cos(\omega t + \varphi)$ , 其中振动频率  $\omega$  的模为:

$$|\omega| = \sqrt{\frac{k}{I}}$$

根据角频率  $\omega$  与周期  $T$  的关系  $T = \frac{2\pi}{|\omega|}$ , 可得圆锥系统的振动周期  $T$  为:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}} \quad (3)$$

### 1.3 液体黏滞系数的测定

将部分圆锥浸没在液体中, 在圆锥转动角度较小 ( $\theta \leq 5^\circ$ ) 的情况下, 可以测量液体的黏滞系数。当圆锥旋转时, 会带动周围的流体运动, 黏性边界层的厚度会随着流动距离的增加而逐渐增大。然而, 由于圆锥的形状几何特征, 流体在流动方向上会加速运动, 导致边界层相对变薄, 因此边界层的厚度通常是较小的。这种特性有助于提高液体黏滞系数测量的精确性。

建立理论模型, 如图 2 所示。假设圆锥半径为  $R$ , 高度为  $H$ , 圆锥浸没液体高度为  $H_0$  ( $H_0 < H$ ), 角速度为  $\omega$ 。液体密度为  $\rho_{\text{液}}$ , 液体的黏滞系数为  $\eta$ , 系统的液体最大边界层厚度为  $\Delta r$  (根据边界层理论  $\Delta r < R$ ), 根据壁面不滑移条件可知, 特征速度  $v$  的模小于最大圆锥边界转速  $v_{\text{max}}$  的模。

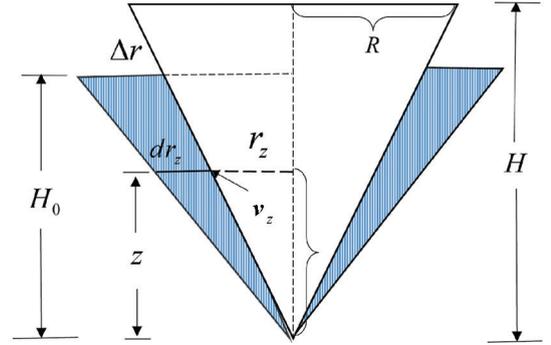


图 2 液体黏滞系数测量实验理论模型图

本实验中的雷诺数可以表示为:

$$Re \leq \frac{\rho_{\text{液}} |v_{\text{max}}| \Delta r}{\eta} \quad (4)$$

当旋转圆锥系统后释放, 通过能量守恒定律计算旋转的最大旋转角速度, 扭簧的弹性势能等于系统在静止状态下的总动能:

$$\frac{1}{2} k \theta_0^2 = \frac{1}{2} I \omega_{\text{max}}^2$$

则最大角速度和线速度可以分别表示为:

$$\omega_{\text{max}} = \sqrt{\frac{I}{k}} \theta_0 \quad (5)$$

$$v_{\text{max}} = \omega_{\text{max}} R \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(4)可得:

$$Re \leq \frac{\rho_{\text{液}} |v_{\text{max}}| \Delta r}{\eta} = \frac{\rho_{\text{液}} \cdot \Delta r \cdot R}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{I}{k}} |\theta_0|$$

式中: 以水为例, 相关参数如下:  $k \approx 1.79 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,  $|\theta_0| = \frac{\pi}{36} \text{ rad}$ ,  $I \approx 1.1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $\Delta r < R < 4.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ ,  $\rho_{\text{水}} = 1.0 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $\eta$  为液体黏滞系数,  $\eta = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。计算得到雷诺数  $Re < 110$ , 表示液体运动处于层流状态<sup>[23]</sup>。

当圆锥部分浸没在液体中旋转时, 圆锥在扭簧恢复力矩作用下, 绕中心轴做往返扭转运动。圆锥表面附着的液体在黏滞阻力的作用下, 将跟随圆锥做相同的扭转运动。圆锥在液体扭转时受到扭簧恢复力矩和液体内摩擦力矩的作用, 根据刚体定轴转动定律可知:

$$I \alpha = -k \theta - M_{\text{阻}} \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  表示圆锥系统的角加速度;  $I = \frac{3mR^2}{10}$  表示圆锥的转动惯量;  $-k \theta$  表示扭簧的恢复力矩;  $M_{\text{阻}}$  表示液体内摩擦力矩。

为研究旋转液体的力矩, 如图 2 所示, 设任意位置距离锥顶的距离为  $z$ , 相对应的圆锥半径为  $r_z$ , 此处

对应的流体边界层厚度为  $dr_z$  ( $0 \leq dr_z \leq \Delta r$ ,  $0 \leq z \leq H_0$ ),  $z$  处的线速度为  $v_z$ 。进一步假设液体运动速度随着半径的增大呈现均匀递减趋势<sup>[24-25]</sup>, 递减梯度为  $\frac{v_z}{\Delta r}$ 。

由牛顿黏滞定律可知液体的黏滞阻力  $F_{\text{阻}}$  为:

$$F_{\text{阻}} = \eta \frac{dv}{dx} s \quad (8)$$

则液体所受的阻力力矩为:

$$M = r_z \times F_{\text{阻}} \quad (9)$$

由于  $\frac{\Delta r}{dr_z} = \frac{H_0}{z}$ ,  $\frac{r_z}{R} = \frac{z}{H}$ ,  $v_z = r_z \omega$ , 联立式(8)、式(9) 两式可得:

$$dM = r_z \cdot \eta \cdot \frac{dv}{dx} \cdot ds = r_z \cdot \eta \cdot \frac{v_z}{dr_z} \cdot 2\pi r_z \cdot dz = \eta \cdot \omega \cdot \frac{2\pi R^3 H_0}{\Delta r \cdot H^3} \cdot z^2 dz$$

则液体黏滞阻力的力矩  $M_{\text{阻}}$  为:

$$M_{\text{阻}} = \int_0^{H_0} dM = \eta \cdot \omega \cdot \frac{2\pi R^3 H_0}{\Delta r \cdot H^3} \cdot \frac{H_0^3}{3} \quad (10)$$

设  $A = \frac{2\pi R^3 H_0^4}{3\Delta r \cdot H^3}$ , 则式(10) 变为:

$$M_{\text{阻}} = \eta \cdot \omega \cdot A \quad (11)$$

将式(11) 代入式(7) 中, 得:

$$I\alpha = -k\theta - A\eta\omega$$

对上式移项求解, 得:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{A\eta}{I} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{k}{I}\theta = 0 \quad (12)$$

式中:  $A$  和  $k$  是常数, 这是一个标准的阻尼简谐振动方程, 可以用特征方程的方法求解。特征方程为:

$$r^2 + \frac{A\eta}{I} \cdot r + \frac{k}{I} = 0$$

根据判别式  $\Delta = \left(\frac{A\eta}{I}\right)^2 - 4\frac{k}{I}$ , 本实验的  $\Delta < 0$ , 因此为欠阻尼情况, 复数根  $r = \beta \pm i\omega_d$ , 式(12) 的解为:

$$\theta(t) = e^{\beta t} (C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sin \omega_d t) \quad (13)$$

式中:  $\beta = -\frac{A\eta}{2I}$ ,  $|\omega_d| = \sqrt{\frac{k}{I} - \left(\frac{A\eta}{2I}\right)^2}$ ,  $C_1$  和  $C_2$  是由初始条件确定的常数。

在无阻尼情况下, 系统的周期  $T_n$  由式(3) 可知:

$$T_n = \frac{2\pi}{|\omega_n|} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}}$$

在欠阻尼情况下, 系统的周期  $T_d$  由频率  $\omega_d$  决定:

$$|\omega_d| = \sqrt{\frac{k}{I} - \left(\frac{A\eta}{2I}\right)^2} \quad (14)$$

$$T_d = \frac{2\pi}{|\omega_d|} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{I} - \left(\frac{A\eta}{2I}\right)^2}}$$

比较两个周期可得:

$$\frac{T_d}{T_n} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A\eta}{2\sqrt{kI}}\right)^2}} \quad (15)$$

进行数学变形可得:

$$1 - \left(\frac{T_n}{T_d}\right)^2 = \left(\frac{A\eta}{2\sqrt{kI}}\right)^2$$

当圆锥系统分别在两种不同的黏滞系数液体中进行实验时,根据式(15)可知,通过不同液体中圆锥系统的欠阻尼运动周期,可以推导得到不同液体的黏滞系数之比为:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{T_n}{T_{d_1}}\right)^2}{1 - \left(\frac{T_n}{T_{d_2}}\right)^2}} \quad (16)$$

## 2 实验设计

### 2.1 实验装置

本实验的实验装置图如图 3 所示,包括立杆、扭簧、光电门、圆锥、水缸、升降台、底座以及计时计数仪。此外,实验中还用到以下测量装置:游标卡尺、电子天平、直尺和水银温度计。基本参数如表 1 所示。

本实验使用计时计数仪对圆锥运动的周期进行测量。拨动圆锥上的 L 型挡杆,使其周期地通过光电门,进而捕捉并记录圆锥的扭转周期。在扭簧与圆锥的连接设计上,采用 SolidWorks 建模软件在圆锥顶部设计凹型卡槽,使用 3D 打印技术进行实物制造,如图 4a 所示。扭簧的下部圆环稳固地卡入圆锥的凹槽中,实现圆锥与扭簧的稳定连接,确保圆锥能够进行水平扭转。此外,固定和悬挂组件的设计如图 4b 所示,采用轻型卡扣管夹将长杆与扭簧的上部固定,扭簧和圆锥被垂直悬挂在实验装置上,以确保实验过程中圆锥的水平扭转特性。最后,升降台的设计如图 4c 所示,用于精确控制圆锥浸入液体的深度,其具体规格详见表 1。

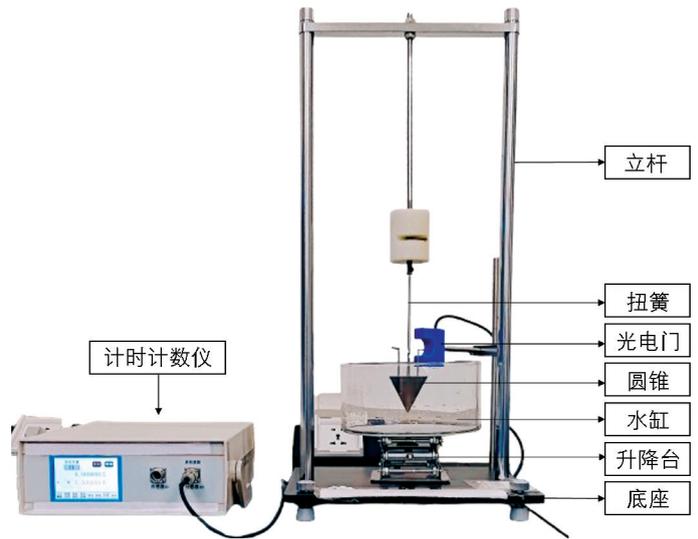


图 3 液体黏滞系数测量实验装置图

表 1 实验平台参数

名称	参数
圆锥	半径: 24.20 mm; 高度: 47.14 mm; 质量: 238.50 g
水缸	容量: 1.00 L; 外径: 150.50 mm; 内径: 141.20 mm; 深度: 67.50 mm
升降台	长: 100 mm; 宽: 100 mm。升降可调范围: 45~150 mm; 承重: 小于等于 5 kg; 净重: 500 g
计时计数仪	精度: 0.000 1 s
游标卡尺	精度: 0.02 mm
直尺	精度: 0.10 mm
电子天平	精度: 0.10 g



图 4 液体黏滞系数实验平台

## 2.2 理论验证

为验证式(13)所描述的理论模型的正确性,本部分通过实验方法对圆锥体阻尼周期运动进行系统研究,并对实验过程中可能存在的误差来源进行评估。实验系统由圆锥体、L型挡杆及液体介质构成,通过将圆锥体部分浸入液体并轻微拨动L型挡杆,观察并记录其阻尼周期运动特征。实验数据的采集与处理均围绕式(13)的验证展开。采用追踪器(Tracker)视频分析软件对圆锥体运动过程进行记录,具体分析流程如下:首先建立以圆锥体几何中心为原点,L型挡杆中心连线及其法线分别为 $x$ 轴和 $y$ 轴的坐标系;随后选取圆锥体上特征点作为追踪目标,利用追踪器(Tracker)的自动追踪功能获取其运动轨迹;最后基于采集数据执行函数拟合,将实验结果与式(13)的理论预测值进行对比分析。实验拟合结果如图5所示,很显然,特征点的运动轨迹拟合曲线呈现典型的阻尼周期运动特征,拟合结果如下:

$$|\theta(t)| = e^{-0.0065t} (23.1728 \cos 1.25t - 1.5186 \sin 1.25t) + 1.2116$$

可得拟合角速度的模为 $|\omega_{\text{拟合}}| = 1.25 \text{ rad/s}$ 。根据式(14)计算得到理论角速度的模为 $|\omega_{\text{理论}}| =$

$$\sqrt{\frac{k}{I} - \left(\frac{A\eta}{2I}\right)^2} \approx 1.2812 \text{ rad/s}$$

两者之间存在约2.5%的相对误差。排除软件误差、实验装置偏差以及人为操作等干扰因素,实验结果验证了圆锥在液体中进行水平扭转后呈现出阻尼周期运动的特性。这表明设计的实验平台的理论模型具有较高的可靠性和精确性。

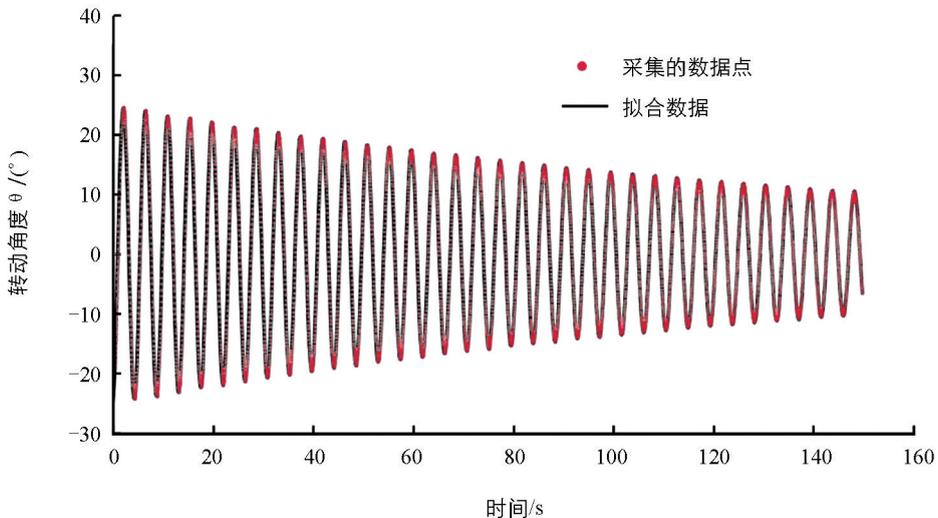


图 5 Tracker 软件采集的数据及函数拟合结果

## 2.3 实验步骤和数据处理

### 2.3.1 实验步骤

测量步骤如下：① 组装实验装置：连接计时计数仪，调整光电门的位置，连接并固定圆锥与扭簧；② 启动计时计数仪；③ 扭转圆锥：用双手轻轻拨动 L 型挡杆，使圆锥轻微转动，角度约为  $5^\circ$ ；④ 数据记录：待圆锥转动稳定后，启动计时计数仪，预设周期数为 15，记录圆锥在空气中的扭转周期  $T_n$ ；⑤ 重复实验：重复步骤③和④，共进行 3 次，记录圆锥在空气中的扭转周期  $T_n$ ，并计算平均周期  $\overline{T_n}$ ；⑥ 向水缸中加水，并调节升降台，使圆锥浸没液体至合适位置，重复步骤③和④，记录圆锥在水中的扭转周期  $T_{d_1}$ ，并计算平均扭转周期  $\overline{T_{d_1}}$ ；⑦ 清空水缸，加入酒精，并调节升降台，使得圆锥浸没液体至合适位置，重复步骤③和④，记录圆锥在酒精中的扭转周期  $T_{d_2}$ ，并计算平均扭转周期  $\overline{T_{d_2}}$ 。实验测量数据如表 2 所示。

### 2.3.2 数据记录及处理

实验测量结果显示，水的温度为  $T_{\text{水}} = 24^\circ\text{C}$ ，酒精的温度为  $T_{\text{酒精}} = 21^\circ\text{C}$ 。根据表 2 测量数据，并根据式(16)，计算得出水与酒精黏滞系数的比值为：

$$\frac{\eta_{\text{水}}}{\eta_{\text{酒精}}} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{T_n}{T_{d_1}}\right)^2}{1 - \left(\frac{T_n}{T_{d_2}}\right)^2}} \approx 0.7798$$

查阅文献[23]，水在  $24^\circ\text{C}$  时的理论黏滞系数  $\eta_{\text{水-理论}} = 0.916 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，酒精在  $21^\circ\text{C}$  时的理论黏滞系数  $\eta_{\text{酒精-理论}} = 1.17 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。则酒精黏滞系数的实验值为：

$$\eta_{\text{酒精-实验}} = \eta_{\text{水-理论}} \div \frac{\eta_{\text{水}}}{\eta_{\text{酒精}}} = 1.1747 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

对比酒精黏滞系数的理论值和实验值，计算得出其相对误差为  $0.4\%$ 。在多次不同条件下重复进行实验，结果显示实验相对误差控制在  $1\%$  以内。经过对测量值进行不确定度分析，得到的相对不确定度为  $4.8\%$ 。因此，酒精的黏滞系数最终结果可以表示为：

$$\eta_{\text{酒精-实验}} = 1.1747 \times 10^{-3} \pm 5.6386 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

表 2 液体黏滞系数实验测量数据

次数	$T_n$	$T_{d_1}$	$T_{d_2}$
1	3.169 6	3.176 4	3.179 7
2	3.169 2	3.176 1	3.180 1
3	3.168 9	3.174 8	3.180 2
平均周期	3.169 2	3.175 8	3.180 0

## 3 结语

本研究设计并开发了一种基于圆锥系统的新型实验平台，通过创新性的圆锥系统实现对液体黏滞系数的精确测量，并借助追踪器(Tracker)软件验证理论模型的正确性。实验结果表明，该平台能够有效测量无阻尼和有阻尼的简谐运动周期，通过比较法获得高精度的黏滞系数数据，实验相对误差控制在  $1\%$  以内，并通过不确定度分析为测量结果提供合理的误差范围评估。与传统液体黏滞系数测量方法相比，该装置显著简化了操作流程并提高了测量精度，为液体黏滞系数的测量提供了一种简便且高效的实验方案。

本实验方法在水和酒精等低黏度液体中表现良好，但在极高黏度液体(如蜂蜜)或极低黏度液体(如某些有机溶剂)中的应用仍存在一定的局限性，需进一步验证和优化。对于极高黏度液体，圆锥系统的运动会受到显著阻尼，导致测量精度下降；而对于极低黏度液体，由于液体黏滞性极低，对测量周期的设备精度

要求显著提高。此外,该方法对液体的均匀性和温度敏感性有一定要求,非均匀液体或温度变化较大的液体可能影响测量结果的准确性。在实验过程中,一些细微影响因素,如人为扭转导致的圆锥轻微摆动以及浸入高度难以保持一致等问题,也可能对测量结果产生一定影响。

未来,通过进一步优化实验装置的设计和操作流程,有望进一步减小误差并提高测量精度,例如引入自动化控制技术以减少人为误差,并改进浸入高度的调节机制。此外,拓展该方法在复杂流体体系中的应用也将成为下一步研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 商新月,韩定强,舒雷,等.鱼尾型搅拌桨设计及在羧甲基纤维素钠溶液中的应用[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(3):147-158.
- [2] 汤博文,彭月祥,张宇,等.基于泊肃叶定律的未知气体粘滞系数测量[J].计量学报,2024,45(4):540-545.
- [3] 肖尊群,王鑫,汤东桑,等.考虑粘滞系数时间效应的圆形巷道围岩径向位移计算方法研究[J].现代隧道技术,2017,54(6):77-84.
- [4] 张伏,付三玲,程建辉.液体粘滞系数精确测量系统设计[J].自动化与仪表,2010(10):16-19.
- [5] 蔡鑫杭,陈光伟,胡世新,等.变温粘滞系数测量系统研究[J].传感器与微系统,2023,42(3):69-72.
- [6] 张瑶,唐晓飞,徐若千,等.油品运动粘度的影响因素探究[J].应用化工,2021,50(S1):24-26,31.
- [7] 郝东东.铁基催化剂催化臭氧氧化能力及降低油田三元采出水粘度效果[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [8] 周航.制药流化床颗粒制备过程数值模拟及实验研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
- [9] 周宸宇.磁流变减震材料免干燥制备方法及其力学性能研究[D].南京:东南大学,2021.
- [10] 高德文,赵英.落球法测量液体粘滞系数的实验研究[J].北京石油化工学院学报,2016,24(1):64-66.
- [11] 郝杰.落球法测定液体粘滞系数实验的测时装置改进[J].长春师范大学学报,2020,39(4):18-21.
- [12] 张庆宇,李霞,冯秀绒.落球法粘滞系数测量仪的改进[J].大学物理实验,2023,36(1):90-94.
- [13] 余森源,唐锐涛,余其旺,等.落球法测量液体粘滞系数的研究与改进[J].实验科学与技术,2024,22(2):26-29.
- [14] 陈贤隆.对“用转筒法测定液体的粘滞系数”的改进[J].大学物理,1984,3(9):37-39.
- [15] 童刚,陈丽君,冷健.旋转式粘度计综述[J].自动化博览,2007,24(1):68-70.
- [16] 衡耀付,张宏.转筒法测定液体粘滞系数实验的改进[J].天中学刊,2002,17(5):65-66.
- [17] 王党社,张建生,张欣,等.Couette型液体粘滞系数测量公式修正[J].大学物理实验,2017,30(6):13-17.
- [18] 朱震钧,王明时.新型全自动毛细管式粘度测量系统的设计[J].化工自动化及仪表,2001,28(3):54-57.
- [19] 钱钧,康明,王槿,等.毛细管法测量液体粘滞系数[C]//教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会,中国高校实验物理教学研究会.第六届全国高等学校物理实验教学研讨会论文集(下册).西安:南开大学物理学基地,2010:91-94.
- [20] 董耀,田文静,董宸希,等.工作用毛细管粘度计粘度常数测量结果不确定度的评估[J].化工自动化及仪表,2021,48(5):436-440.
- [21] 唐笑年,诸挥明,唐笑迪.毛细管法测流体黏度实验装置的设计与改进[J].大学物理实验,2018,31(6):25-27.
- [22] 刘竹琴,李伟.乙醇溶液的粘滞系数与浓度关系的实验研究[J].延安大学学报(自然科学版),2020,39(4):94-96.
- [23] 丁祖荣.流体力学-上册[M].3版.北京:高等教育出版社,2018.
- [24] 段廷亿,舒雷,赵行,等.陀螺转子组件动态性能分析与优化设计[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(8):162-171.
- [25] GIACOMIN A J, GILBERT P H. Exact-Solution for Cone-Plate Viscometry [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(17): 175101.

