

转筒法测液体黏滞系数实验装置改进

黎智轩 刘晓缘 黄楚仪 黄小峰 蔡元海 吴玉洁

(广州大学物理与材料科学学院 广东 广州 510006)

(收稿日期:2022-08-05)

摘要:转筒法是大学物理实验中常用的一种测量液体黏滞系数的方法,研究了一种改进的转筒法测量液体黏滞系数的装置,该装置相比于传统转筒法装置,增加了电机驱动、光电门测速以及温控系统,并通过测量不同温度下甘油的黏滞系数验证了改进装置的有效性和高准确率.

关键词:转筒法;变温黏滞系数;大学物理实验;改进装置

黏滞系数是液体的重要性质之一,在日常生活、工程和医学等方面有许多应用,溶液的黏滞系数是一个重要的参量,宏观上有助于研究物体的运动情况,微观上有助于研究分子的力学性质^[1-4]. 液体黏滞系数的测量是大学物理实验的基本实验,常用的有落球法、扭摆法、毛细管法、转筒法. 其中转筒法是一种常见的测量液体黏滞系数的方法. 转筒法具有原理明了、结构简单、易操作的优点,但传统的转筒法装置使用砝码带动转筒转动,在实际的实验过程中受限于砝码的下落高度,转筒往往不能达到匀速转动状态或者匀速转动时间较短,不利于数据的测量,引起较大的误差^[5]. 除此之外,通过人工判断转筒是否达到匀速转动状态以及人工测量转筒的转速也会带来较大的实验误差. 因此在传统转筒法装置的基础上进行改进,使用电机代替砝码带动转筒转动,增加光电门计算转筒的转速并判断转筒是否达到匀速转动状态,提高了传统装置的测量精度^[6-7]. 对转筒法测量变温黏滞系数实验装置的改进有利于丰富大学物理实验教学,加深学生对黏滞系数性质的理解^[8].

1 转筒法原理

转筒法(实验装置原理图见图1)实验装置的外壳是圆柱形外圆筒,内部是可绕上下尖轴承转动的转筒,绕线轮固定在转筒上,细引线通过定滑轮悬挂一砝码盘,另一端系在绕线轮上,外圆筒与转筒之间

装满待测黏滞液体. 作用在绕线轮上的拉力 F 使转筒转动,此时转筒对附着其表面的液体施加力. 由于液体内部不同层间存在内摩擦力,因此转筒与外圆筒之间的液体会随转筒分层转动,同时液体施加转筒黏性力,该力随着转筒转速的增大而增加. 设转筒半径为 R_1 ,外圆筒半径为 R_2 ,转筒的长度为 L ,转筒的绕线轮半径为 R .

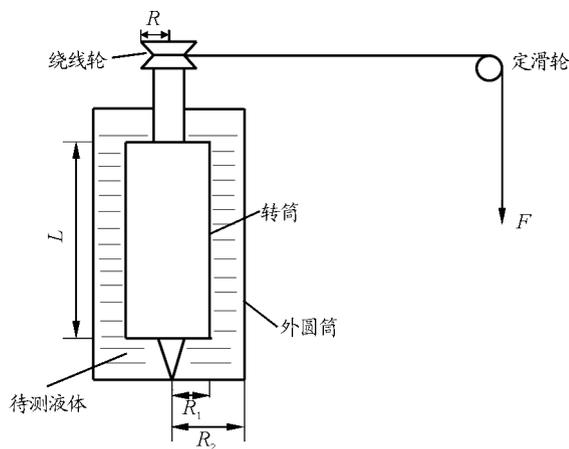


图1 转筒法测液体黏滞系数实验装置原理图

黏性力矩为

$$M = \eta S r \frac{dv}{dr} \quad (1)$$

其中 η 为黏滞系数, S 为距离转筒轴心 r 处的圆柱面积, $S = 2\pi rL$. 线速度与角速度的关系 $v = \omega r$, 则

$$M = 2\pi r^3 \eta L \frac{d\omega}{dr} \quad (2)$$

外加力矩

作者简介:黎智轩(2000-),男,在读本科生.

通讯作者:吴玉洁(1979-),女,博士,副教授,主要从事物理教学和研究工作.

$$M' = FR \quad (3)$$

当转筒达到匀速转动状态时,黏性力矩与外加力矩大小相等,则有

$$2\pi r^3 \eta L \frac{d\omega}{dr} = FR \quad (4)$$

整理后可得

$$2\pi \eta L d\omega = FR \frac{dr}{r^3} \quad (5)$$

两边积分可得

$$2\pi \eta L \omega_0 = \frac{FR(R_2^2 - R_1^2)}{2R_1^2 R_2^2} \quad (6)$$

因为 $\omega_0 = 2\pi n$, n 为转速,整理可得

$$\eta = \frac{FR(R_2^2 - R_1^2)}{8\pi^2 n L R_1^2 R_2^2} \quad (7)$$

考虑到在实验中装置还存在恒定系统阻力,因此

$$\eta = \frac{(F - F_{阻})R(R_2^2 - R_1^2)}{8\pi^2 n L R_1^2 R_2^2} \quad (8)$$

2 装置改进设计

2.1 装置介绍

实验装置(图2)包括主体部分、电机驱动测力系统、光电门测转筒转速系统和加热温控系统.其中实验的主体部分是一个双层玻璃圆柱,外圆柱壁上端和下端分别有一个出水口和入水口,用于水浴加热时水流循环.

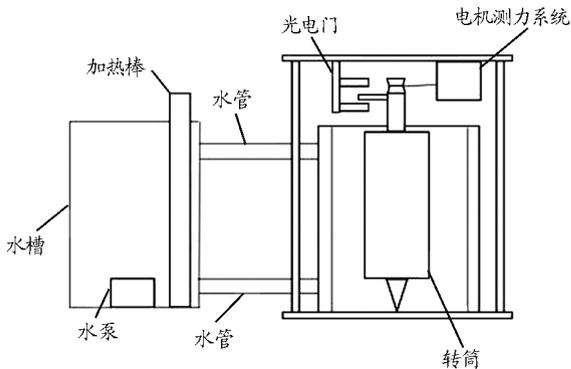


图2 改进后的装置示意图

内圆柱筒内装有可绕上下尖轴承转动的转筒,细引线一端固定在转筒上,并通过定滑轮与电机(绕线转筒)相连,定滑轮与拉力传感器相连,通过受力分析可知拉力传感器的读数为转筒所受切向力大小的2倍,如图3所示.在实验中,使用电机驱动转筒转动,由拉力传感器和光电门可以分别测出转筒受到的切向拉力和转筒的转速.将测出的切向拉力大小和转筒的转速代入转筒法的公式

便可计算得出液体的黏滞系数.

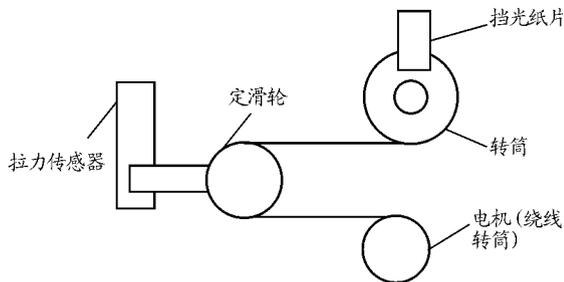


图3 装置电机测力系统示意图

2.2 电机驱动测力系统设计

使用电机带动转筒转动可以有效解决传统实验装置中转筒难以达到匀速转动状态、转筒转动时间短等问题.使用 GA12 - N20 减速电机,电机借助齿轮可以带动绕线筒转动,进而通过绕在转筒上的细线带动转筒转动.由于减速电机的转速与输入的电压成正相关关系,改变输入电压便可以改变减速电机的转速.在测量转筒所受切向拉力部分,实验装置巧妙地将带动转筒转动的细线经过一个定滑轮,通过拉力传感器测出定滑轮所受拉力的大小,经过受力分析后可以知道转筒受到的切向拉力等于定滑轮所受拉力的一半.

2.3 光电门测转筒转速系统设计

转筒法的原理是当转筒达到匀速转动状态时,转筒受到的黏性力矩等于受到的切向拉力力矩,实验时通过对转筒受到的拉力进行测量,根据式(8)便可以计算得出待测液体的黏滞系数.因此,判断转筒是否达到匀速转动状态对于减小实验误差有重要意义.装置在转筒的边缘粘上了一张硬卡纸片,如图3所示,每当转筒转动一圈时,硬卡纸片便会经过光电门一次.通过自行设计程序可以计算硬卡纸片经过光电门的时间间隔进而计算得到转筒的平均转速,转速会实时显示在装置的 OLED 显示屏上,供实验者判断转筒是否达到匀速转动状态.

2.4 温控加热系统设计

增加温控加热系统可以改变待测液体的温度,探究黏滞系数与温度的关系.装置采用水浴加热方式,实验装置主体部分用于盛放待测液体的圆柱形玻璃器皿,使用双层设计,其中内层用于盛放待测液体,外层则用于水浴加热.在水浴加热的过程中,加热棒加热水槽中的水,然后利用水泵将

水抽进玻璃器皿的外层进行水流循环加热. 装置采用了 XH-W1209 数字温控器, 该温控器与加热棒连接, 当温度达到预定的温度时, 加热棒便会停止加热.

3 实验

3.1 实验仪器技术参数和已知物理量

实验仪器的各参数如图 4 所示, 已知量如表 1 所示.

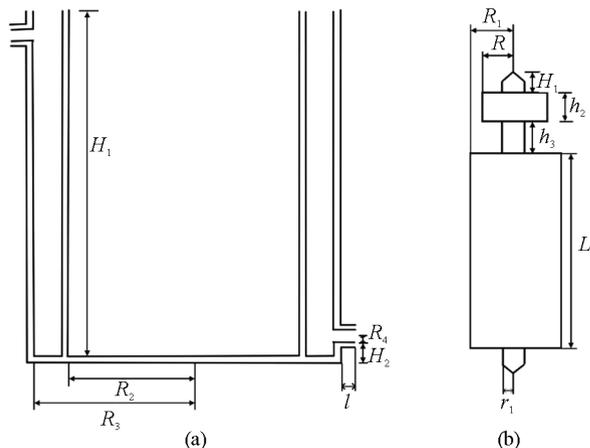


图 4 玻璃圆柱器皿和转筒示意图

表 1 装置参数表

| 物理量 | 参数 / mm | 物理量 | 参数 / mm |
|--------------|---------|------------|---------|
| 高 H_1 | 250 | 转筒半径 R_1 | 25 |
| 圆筒内半径 R_2 | 50 | 绕线轮半径 R | 20 |
| 圆筒外半径 R_3 | 70 | h_1 | 20 |
| 进出水口长 l | 10 | h_2 | 20 |
| 进出水口半径 R_4 | 10 | h_3 | 30 |
| 进水口高度 H_2 | 10 | r_1 | 7 |
| 转筒长度 L | 100 | | |

拉力传感器测量精度: 0.001 N (1 s 采集 20 次).

光电门精度: 0.001 r/s (相应时间: 104 μ s).

3.2 实验内容与实验步骤

(1) 在没有装入待测液体时, 测量装置的系统阻力.

(2) 装入待测液体.

(3) 连接装置各部分线路, 接通电源.

(4) 将数字温控器调整到目标温度, 接通水泵和加热棒电源开始水浴加热.

(5) 当温度达到目标温度时, 控制电机带动转筒转动.

(6) 判断转筒达到匀速转动状态, 记录转筒转速和切向拉力并计算黏滞系数.

3.3 实验数据

实验数据如表 2 所示 (系统阻力为 0.584 N).

表 2 实验数据表

| 甘油温度 / $^{\circ}$ C | 转筒平均转速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 平均切向拉力 / N | 测量黏滞系数 / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) | 经验黏滞系数 / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) |
|---------------------|---|------------|---|---|
| 36 | 1.603 | 0.978 | 0.373 | 0.367 |
| 37 | 1.584 | 0.941 | 0.343 | 0.338 |
| 38 | 1.664 | 0.957 | 0.341 | 0.311 |
| 40 | 1.539 | 0.865 | 0.278 | 0.263 |
| 42 | 1.622 | 0.824 | 0.225 | 0.224 |
| 44 | 1.596 | 0.765 | 0.173 | 0.190 |
| 46 | 1.547 | 0.737 | 0.151 | 0.162 |
| 48 | 1.745 | 0.730 | 0.127 | 0.139 |
| 50 | 1.828 | 0.693 | 0.091 | 0.119 |

实验中选择了 36 $^{\circ}$ C 至 50 $^{\circ}$ C 不同温度进行实验, 分别测量了装置的系统阻力、转筒的平均转速和平均切向拉力, 并计算得到了黏滞系数, 与不同温度下由经验公式计算得到甘油的黏滞系数作比较, 其中经验公式为^[9]

$$\eta = 1.748 \times 10^{-12} e^{\frac{8.056}{T+273}}$$

3.4 黏滞系数随温度的变化

根据实验结果计算得到的不同温度甘油的黏滞系数, 如图 6 所示.

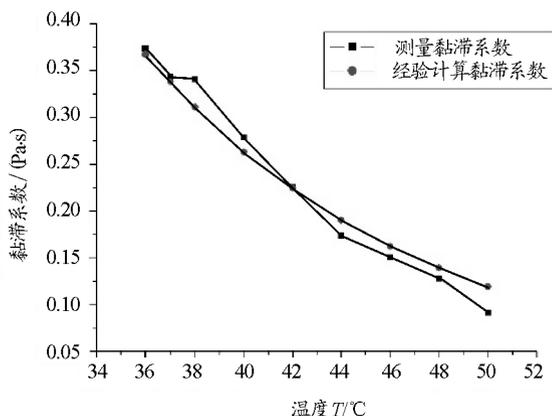


图 6 黏滞系数随温度的变化关系

从图 6 可以看到实验测量得到的黏滞系数随温度的增加而逐渐减小, 这是因为温度升高后液体分

子的间距变大,分子间的作用力变小,因此黏滞系数随着温度的增加而减小,与经验相符合^[10-11].而且测量得到的黏滞系数与标准黏滞系数比较接近.

3.5 误差分析

将计算得到的黏滞系数与标准的黏滞系数作比较并计算得到相对误差.如图7所示,从实验误差来看该装置测量黏滞系数的误差在0~3.5%之间,误差较小,测量结果比较精确.其主要误差来源于系统的阻力以及装置测量精度.

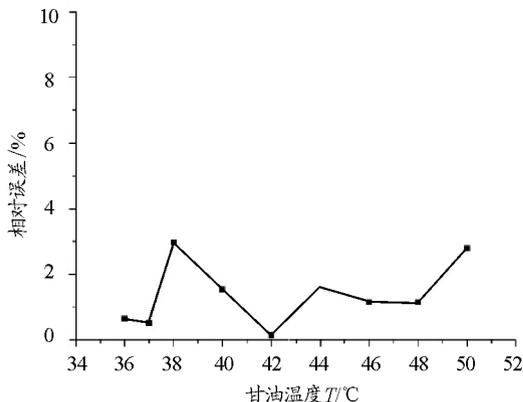


图7 实验误差与温度的关系

4 结束语

实验装置基于传统的转筒法装置进行改进,增加了电机、光电门和拉力传感器等器件.在实际实验中该装置操作简便,由于使用单片机采集数据上传到电

脑,减少了人工读数带来的误差,同时使得数据处理更加方便快捷.从实验结果来看,该装置的测量结果准确.由此可见,该基于转筒法的改进装置实用有效.

参考文献

- [1] 魏勇. 用激光光镊测量液体微区的粘滞系数[J]. 激光技术, 2016, 40(5): 738-741.
- [2] 李书光, 胡青松, 令坦. 大学物理实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 130-131.
- [3] 李晨浩, 韦帅兵, 罗钧洋, 等. 环境对蓖麻油粘滞系数的影响研究[J]. 科学技术创新, 2021(5): 18-20.
- [4] 王山林. 液体粘滞系数测量的探讨[J]. 科技与生活, 2012(20): 180-181.
- [5] 郑泽龙. 粘滞系数实验方法的再改进[J]. 物理实验, 2000, 20(11): 38, 40.
- [6] 李伟, 刘竹琴. 利用转动惯量实验仪测量液体粘滞系数[J]. 科技风, 2020(33): 60-61.
- [7] 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(5): 65-66.
- [8] 王海鹏. 浅谈大学实验教学[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2007(1): 57-58.
- [9] 盛忠志, 简家文. 甘油的粘滞系数随温度变化的经验公式[J]. 新疆石油学院学报, 1998, 10(1): 68-70.
- [10] 武瑞兰, 孙建刚. 介绍一种蓖麻油粘度随温度变化的经验公式[J]. 物理实验, 1998(1): 8, 7.
- [11] 金叶, 刘雪芹, 彭川黔, 等. 蓖麻油粘滞系数公式的Origin拟合[J]. 大学物理实验, 2012, 25(1): 58-60.

Improvement on the Experimental Device of Measuring Viscosity Coefficient of Liquid by Rotating Cylinder Method

LI Zhixuan LIU Xiaoyuan HUANG Chuyi HUANG Xiaofeng CAI Yuanhai WU Yujie

(School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006)

Abstract: The rotating cylinder method is a commonly used method to measure the liquid viscosity coefficient in college physics experiments. This paper introduces an improved device for measuring the liquid viscosity coefficient by the rotating cylinder method. Compared with the traditional rotating cylinder method device, the device increases the motor drive, photoelectric gate speed measurement and temperature control system. The effectiveness and high accuracy of the improved device are verified by measuring the viscosity coefficient of glycerol at different temperatures.

Key words: rotating cylinder method; variable temperature viscosity coefficient; college physics experiment; mechanism improved