

基于音叉振动的液体黏滞系数测量方法研究

冯朝欣¹ 王子轩¹ 周祺智¹ 焦阳初² 辜旸羽² 文小青^{1,3} 李强^{1,3} 王瑾^{1,3} 李文华^{1,3}

(¹ 南开大学物理科学学院; ² 南开大学电子信息与光学工程学院;

³ 基础物理国家级实验教学示范中心(南开大学), 天津 300071)

摘要 本文提出了一种基于音叉振动的液体黏滞系数测量方法。在音叉臂底端固定振片, 振片浸入测量液体中, 利用电磁驱动, 音叉带动振片在液体中作一维往复运动, 通过测量液体黏性剪切力对振动特性的影响, 来实现液体黏滞系数的测量。本文通过实验数据验证了该方法的正确性, 分析了测量误差的主要来源——密度测量和共振频率漂移; 加入温控装置, 可以实现不同温度下液体黏滞系数的测量。该方案不仅可以加深学生对流体黏滞性及振动原理的理解, 也为实验室测量液体黏滞系数提供了新方案。

关键词 黏滞系数; 音叉振动; 阻尼因数; 温度控制

RESEARCH ON MEASUREMENT METHOD OF LIQUID VISCOSITY COEFFICIENT BASED ON TUNING FORK VIBRATION

FENG Chaixin¹ WANG Zixuan¹ ZHOU Qizhi¹ JIAO Yangchu² GU Yangyu² WEN Xiaoqing^{1,3}
LI Qiang^{1,3} WANG Jin^{1,3} LI Wenhua^{1,3}

(¹ School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071;

² College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300071;

³ National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract A method for measuring the viscosity coefficient of liquids based on the vibration of a tuning fork is proposed. A vibrating plate is fixed at the bottom of the tuning fork arm, and the plate is immersed in the liquid to be measured. By using electromagnetic driving, the tuning fork drives the vibrating plate to make one-dimensional reciprocating motion in the liquid. The measurement of liquid viscosity coefficient is realized by measuring the influence of liquid viscous shear force on vibration characteristics. The correctness of the method is verified by experimental data, and the main sources of measurement errors including density measurement and resonance frequency drift are analyzed. By adding a temperature control device, the measurement of liquid viscosity coefficient at different temperatures can be realized. The device can not only deepen students' understanding of fluid viscosity and vibration principles, but also provide a new solution for measuring liquid viscosity coefficient in laboratory.

Key words viscosity coefficient; tuning fork vibration; damping factor; temperature control

收稿日期: 2022-07-15

基金项目: 2021 南开大学自制实验教学仪器设备项目(No. 21NKZZYQ02); 教育部产学研合作协同育人项目(202102227007); 2020 高等学校教学研究项目(No. DJZW202010hb); 国家基础科学人才培养基金项目(No. J1210027); 南开大学物理基地能力提高项目(No. J1103208)。

通信作者: 文小青, 南开大学物理科学学院、基础物理国家级实验教学示范中心实验师, wenxiaoqing@nankai.edu.cn。

引文格式: 冯朝欣, 王子轩, 周祺智, 等. 基于音叉振动的液体黏滞系数测量方法研究[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 160-167, 188.

Cite this article: FENG C X, WANG Z X, ZHOU Q Z, et al. Research on measurement method of liquid viscosity coefficient based on tuning fork vibration[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 160-167, 188. (in Chinese)

1 实验背景

液体的黏滞性是液体重要的物理性质之一,测定液体黏滞系数有多种方法^[1],诸如:(1)利用泊肃叶定律的毛细管法;(2)利用斯托克斯公式的落球法;(3)利用牛顿黏滞定律的旋转圆筒法;(4)利用振动法测定黏滞系数。液体黏滞系数的测定是高校物理实验教学中的重要内容,目前,高校普遍采用落球法测量蓖麻油的黏滞系数,实验方法同质化严重,几乎没有使用振动法的装置,商用市场上振动法测量液体黏滞系数的装置集成度及价格均较高,不适用于实验教学。

此外,温度是影响流体黏性的重要因素,液体黏度随温度的升高几乎按指数规律减小^[2]。市场上可以测量高于和低于环境温度液体黏度的仪器很少,且体积大、结构复杂。

基于这些问题,本文提供一种适用于实验教学,基于音叉振动的不同温度下的液体黏滞系数测量方案。

2 装置实现

2.1 音叉的特性

如图 1 所示,音叉为自身一体的结构,省去了轴承等连接结构,减小了各结构之间可能存在的摩擦,音叉振动时为稳定的一维运动,为实现高精度测量提供了基础,因此音叉可以用来制作各种传感器。

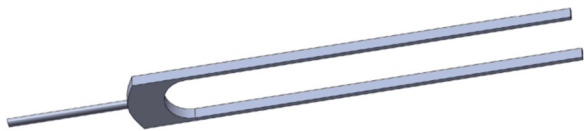
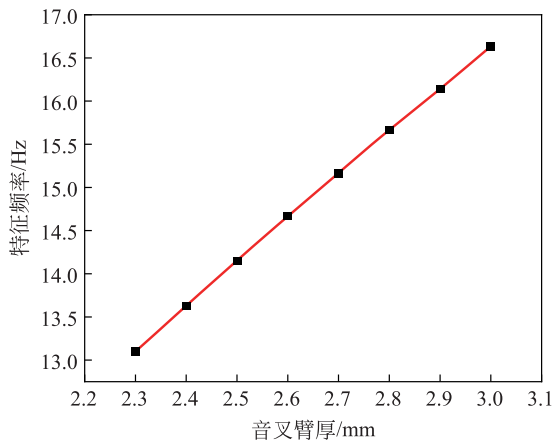


图 1 音叉

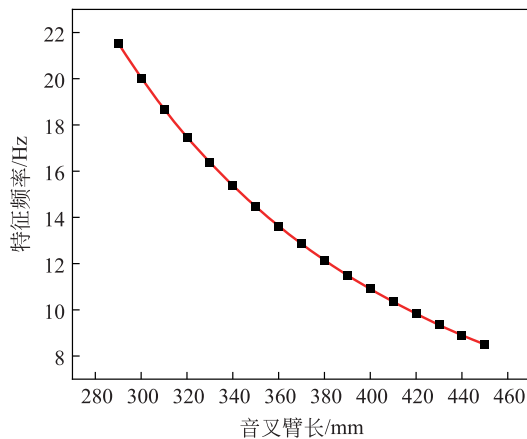
音叉的本征频率与音叉的材质,形状等都有关系,利用 COMSOL 软件对音叉结构进行模拟并结合 origin 软件进行数据处理,如图 2,发现音叉双臂越长,越薄,固有频率越低,更能精确反映黏滞力的影响^[3]。

2.2 装置结构

装置以音叉为主要器件,包括振动、数据采集



(a)



(b)

图 2 音叉特征频率与臂厚、臂长的关系

(a) 特征频率与臂厚关系(臂长 350mm); (b) 特征频率与臂长关系(臂厚 2.5mm)

和温控三部分。图 3 为整个装置的结构框图。图 4 为实物装置图。

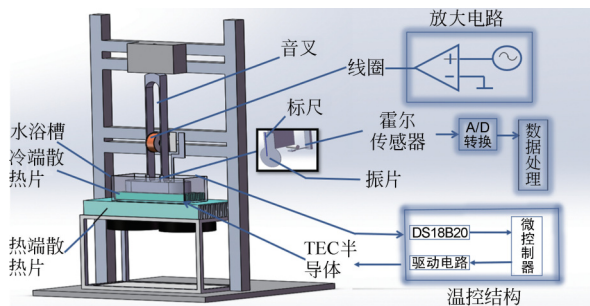


图 3 装置系统构架

振动部分包括功率放大板、电磁线圈、音叉和振片。线圈固定在音叉臂中间中下部位置,振片固定在音叉臂末端。振片部分浸在待测液体中,正弦信号经功率放大后,通入电磁线圈中,线圈中

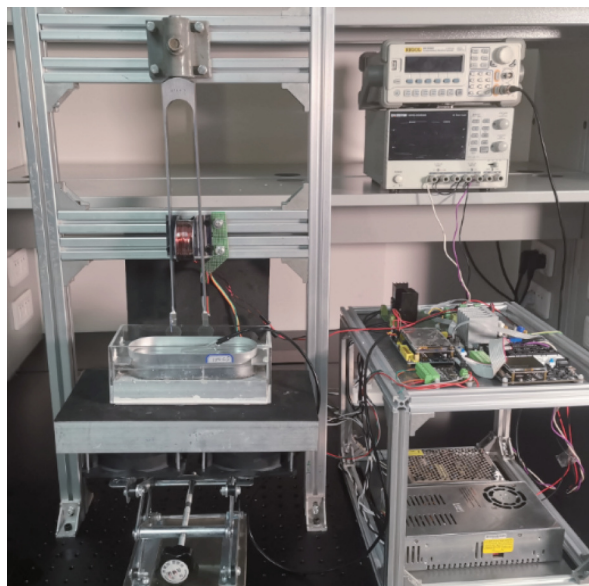


图4 实物装置

产生稳定的交变磁场。音叉臂在交变磁场作用下带动振片在液体中做一维往复运动,并带动流体产生与振片平面相平行的平面涡层运动。不同黏度的液体对振片的黏滞剪切力是不同的,通过测量液体黏性剪切力对振动特性的影响,实现液体黏滞系数的测量^[4]。

磁场强度大小与线圈绕制的匝数及输入电流大小有关,本设计中漆包线的直径为 0.55mm,匝数为 700 匝。功率放大采用 OPA541 功放模块,输出正弦波电压峰峰值为 20V。音叉为不锈钢材质,臂厚度为 2.5mm,臂长为 350mm,空气中固有频率 14.14Hz。实验中振片两侧的液层在振片带动下做平面涡层运动,这要求振片足够薄,振片引起的压差阻力可以忽略^[5],此时对振片的形状没有要求。本设计中振片为直径 2cm 的圆形不锈钢片,厚度为 0.2cm,上端颈部宽 1cm,长 1.5cm。在振片上贴有标尺,以控制实验时振片浸入液体的面积相同。

如图 5 所示,在音叉的一臂下端固定圆柱形的磁铁,在磁铁的正下方放置霍尔传感器,音叉振动时,霍尔传感器把磁铁磁场强度的变化线性转化为电压信号的变化,同时圆柱形磁铁在其轴向上的一段区域内磁感应强度与位移是线性的^[6],为得到振幅与霍尔传感器输出电压的线性关系,霍尔传感器采集电压信号的同时,采用长曝光摄影的方法拍摄振动片,使振动片多个周期的运动

同时呈现在视频画面内(图 6),通过 Tracker 软件分析振动片图像宽度,与静止时振动片直径大小对比,得到振动片的振幅,再与相同时刻的霍尔输出电压对比。本实验使用 BASLER acA1300-30gm 相机,每秒 30 帧图像,130 万像素分辨率,设置曝光时间 2s,得到振动片不同频率下振幅和相应输出电压的线性关系如图 7。将同样质量的金属块粘在另一个音叉臂下端,使两个音叉臂的质量相同,两个音叉臂的振动频率及振幅相同。

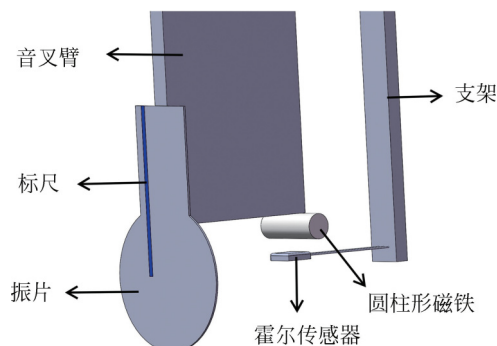


图5 霍尔传感器与磁铁位置图

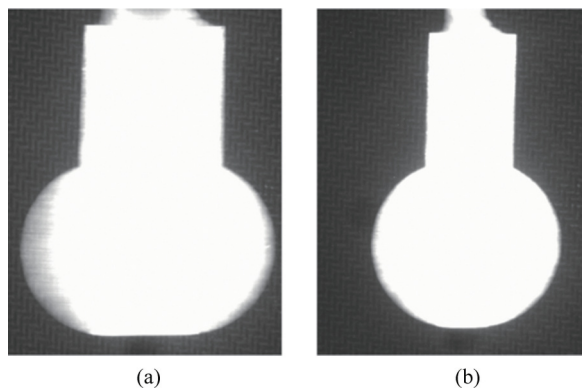


图6

(a) 运动振动片; (b) 静止振动片

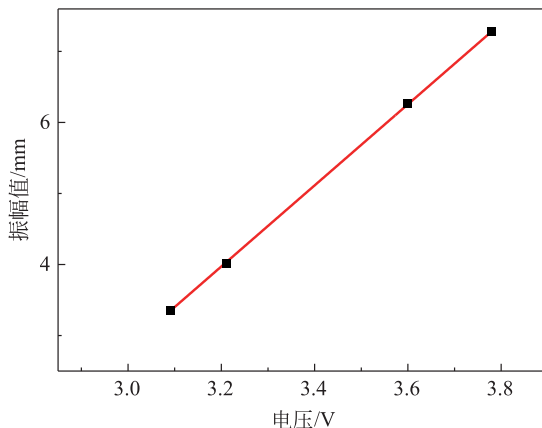


图7 振幅值与霍尔传感器输出电压关系

温控部分包括 TEC 半导体片及冷热端散热器、水浴槽、DS18B20 温度传感器及 STM32 微控制器。根据帕尔贴效应,TEC 半导体冷热端的温差可达到 $40\sim 65^{\circ}\text{C}$ 。以冷端散热器为底做一个水浴槽(图 8),盛有待测液体的盒子放入其中,改变 TEC 半导体的电流方向,可以实现制热和制冷的转换,对待测液体实现水浴式加热或制冷。水浴槽体积约为 200ml ,待测液体体积为约 100ml ,使用 2 片 TEC-12715,可以实现高于环境温度 30°C 和低于环境温度 15°C 范围的温控。图 9 为待测液体从 26°C 到达不同目标温度所用时间。根据半导体片性能,达到制冷目标温度比制热要花费更长时间。

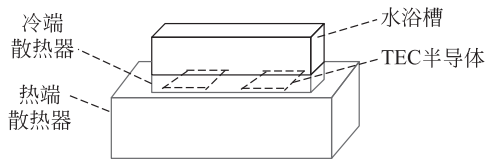


图 8 水浴槽结构图

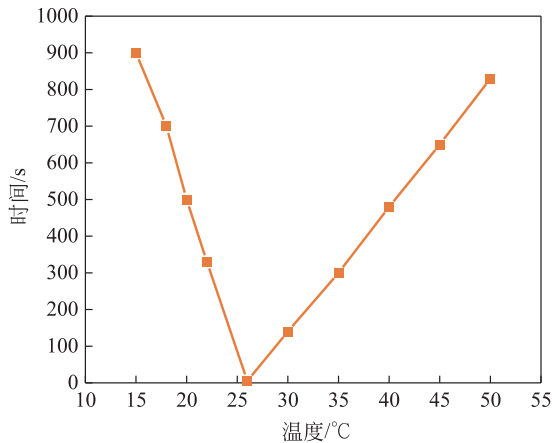


图 9 从 26°C 到达不同目标温度所用时间

3 实验原理

待测液体为牛顿流体,振片足够薄,无壁滑移,不发生湍流,忽略边缘效应,振片的突然运动使振片两侧各产生一个切向速度的间断面,即平面涡层,振片在静止液体中的一维振动过程也就等价于平面涡层的黏性扩散过程^[7]。取一个和无穷远处的流体相固连的笛卡尔坐标系,使 xy 平面与振片重合, z 轴指向平板一侧的流体,振片运动的方向为 y 轴方向。

振片的振动速度为 $v_1(t) = v_0 e^{i\omega t}$ 。其中 v_0 和 ω 分别为最大振动速度和角频率。当振片以 $v_0 e^{i\omega t}$ 的速度在被测液体中振动时,由对称性可知液层振动速度为 $v = v(z, t)$,满足 N - S 方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (1)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} z=0, v=v_0 e^{i\omega t} \\ z=\infty, v=0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 z 为振动液层到振片距离, ρ 为流体密度,通过分离变量法解得:

$$v(z, t) = v_0 e^{i\omega t} e^{-\sqrt{\frac{i\omega\rho}{\eta}}z} \quad (3)$$

根据牛顿黏滞定律:

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dz} \quad (4)$$

其中 F 为振片受到的黏滞力, S 为振片浸入液体正背面面积之和, η 为流体的动力黏滞系数。由于流体的负荷引起的力阻抗 Z 等于作用在振动薄片上的黏滞力与振片的振动速度之比,根据式(3)和(4):

$$Z = \frac{F}{v_0 e^{i\omega t}} = \frac{\sqrt{2}}{2} S \sqrt{\omega\rho\eta} + i \frac{\sqrt{2}}{2} S \sqrt{\omega\rho\eta} \quad (5)$$

力阻抗为力阻和力抗之和,即: $Z = R_z + iX_z$,作用在振片上的力阻为:

$$R_z = S \sqrt{\pi f \eta \rho} \quad (6)$$

从式(6)可得出力阻与被测液体黏度的关系,将黏度的测量转化为力阻的测量^[8]。 f 为系统振动频率。

振片在液体中做剪切运动过程中受到的力阻 R_z 等于系统振动时受到液体产生的阻尼系数 γ ^[4],再将 $2\beta = \gamma/m$ 代入式(6)可得:

$$\beta = \frac{S}{2m} \sqrt{\pi f \eta \rho} \quad (7)$$

m 表示整个系统的有效质量。阻尼因数 β 为系统总阻尼,减去系统的固有阻尼 β_0 可得到由于振片浸入被测液体而产生的阻尼因数,式(7)可变换为:

$$\eta = \frac{4m^2}{\pi S^2 f} \cdot \frac{(\beta - \beta_0)^2}{\rho} \quad (8)$$

当音叉在共振频率 f_0 下振动,即 $f = f_0$, $4m^2/\pi S^2 f_0$ 是与音叉的自身性质相关的常数,记为 a ,则有:

$$\eta = a \cdot \frac{(\beta - \beta_0)^2}{\rho} \quad (9)$$

m 可根据音叉臂及振片的几何尺寸得到, S 也可根据振片浸入液体的深度得到, 但为了提高测量的准确度, a 通过标定实验得到。

可通过受迫振动或阻尼振动测量阻尼因数 β 。对于受迫振动, 振动的微分方程为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\gamma \frac{dx}{dt} - kx + H \cos(\omega t) \quad (10)$$

其中 x 表示振动位移, k 表示系统的劲度系数, H 表示施加的驱动力最大值, 系统的固有角频率为 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。取 $\beta = \frac{\gamma}{2m}$, $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$, $h = \frac{F}{m}$, 系统处于稳定状态时受迫振动的振幅 A 为:

$$A = \frac{h}{4\pi \sqrt{\pi^2 (f_0^2 - f^2)^2 + \beta^2 f^2}} \quad (11)$$

在受迫振动下采集振片的幅频信号, 将数据导入 Matlab 用式(11)进行拟合处理, 便可得出被测液体的阻尼因数 β 。对于阻尼振动, 其振动的微分方程为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\gamma \frac{dx}{dt} - kx \quad (12)$$

同样取 $\beta = \frac{\gamma}{2m}$, $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$, 得到此微分方程的解为:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\sqrt{4\pi^2 f_0^2 - \beta^2} t + \varphi_0) \quad (13)$$

φ_0 为初始相位, 在阻尼振动下采集振片的幅频信号, 将数据导入 MATLAB 用式(13)进行拟合处理, 也可得出被测液体的阻尼因数 β 。

以上推导过程建立了 x - β - η 关系模型, 通过测量位移随时间变化, 求出阻尼因数 β , 系统固有阻尼 β_0 可在系统空载状态下测得, 再求出待测液体的密度, 通过式(9), 即可实现黏度的测量。

4 实验内容

在受迫振动或阻尼振动模式下测量黏滞系数的实验步骤如下:

(1) 用量筒计算液体的体积 V , 用精密电子天平计算质量 M , 根据 $\rho = \frac{M}{V}$ 计算出液体的密度。

(2) 首先以 1Hz 进行粗扫频, 找到共振频率的大致范围, 本装置的共振频率在 13~15Hz。调

整信号发生器输出电压, 音叉臂振动时不碰撞电磁线圈。

(3) 再分别以 0.1Hz 和 0.01Hz 进行细扫频, 找到音叉在此种待测液体下的共振频率并记录。

(4) 测量系统在空气中的阻尼因数 β_0 且进行标定实验, 标定溶液选取 46mPa·s、90mPa·s、308mPa·s、447mPa·s 四种标准甲基硅油。

(4.1) 受迫振动法

振片置于空气中, 调节线圈电压及频率使音叉达到共振状态, 通过霍尔传感器测得磁感应强度随时间变化数据, 导入 Matlab 中, 利用磁感应强度与位移之间的线性关系得到该频率下的振幅值。在共振频率附近进行扫频得到不同频率下的振幅变化, 代入式(11)拟合可求得 $\beta_0 = 0.1488$ 。

依次将振片置于几种标定溶液中进行测量, 保持振片浸入的面积相同, 在相同电压下达到共振状态后扫频, 求得标定溶液对应的 β 值。每种标定溶液重复测量 5 次后, 取平均值, 根据式(9)进行拟合, 结果如图 10 所示。

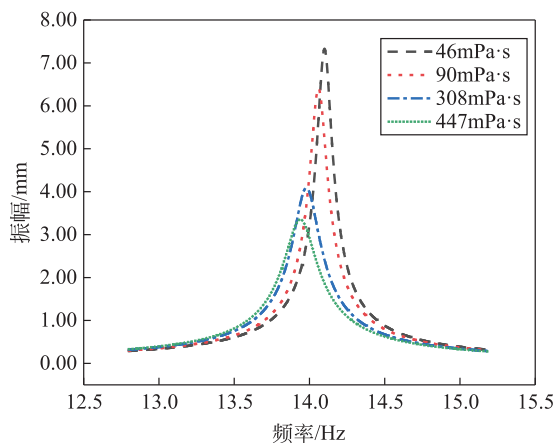


图 10 4 种黏度的甲基硅油标定实验拟合结果

将拟合所得阻尼因数和溶液密度列入表 1 中, 结合音叉系统在空气中的阻尼因数 β_0 及标定溶液的理论黏度进行线性拟合, 如图 11 所示, 拟合系数 $R^2 > 0.99$, 得到:

$$\eta = 1132 \frac{(\beta - \beta_0)^2}{\rho} \quad (14)$$

(4.2) 阻尼振动法

振片置于空气中, 当音叉振动稳定停止输入信号, 音叉做阻尼振动, 同样利用霍尔传感器采集磁感应强度数据, 获得音叉振幅衰减情况, 根据公式(13)拟合得到 $\beta_0 = 0.08854$, 结果如图 12 所示。

表 1 受迫振动法标定实验结果

二甲基 硅油理论 黏滞系数	46mPa·s	90mPa·s	308mPa·s	447mPa·s
$\beta/(s^{-1})$	0.284	0.366	0.657	0.731
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	0.920	0.900	0.880	0.894
$(\beta - \beta_0)^2/\rho$	0.020	0.054	0.278	0.400

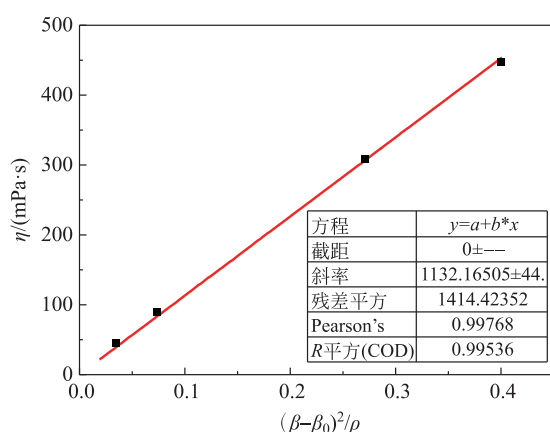


图 11 标定实验(9)式拟合图像

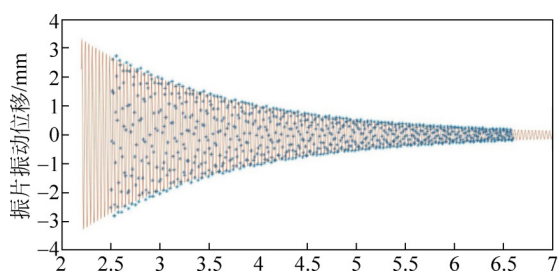


图 12 振片在空气中做阻尼振动位移时间拟合图

振片浸入标定溶液,测得的阻尼因数和溶液密度列入表 2 中,结合音叉系统在空气中的阻尼因数 β_0 及标定溶液的理论黏度进行线性拟合,如图 13 所示, $R^2 > 0.99$ 。得到:

$$\eta = 146 \frac{(\beta - \beta_0)^2}{\rho} \quad (15)$$

表 2 阻尼振动法标定实验结果

二甲基 硅油理论 黏滞系数	46mPa·s	90mPa·s	308mPa·s	447mPa·s
$\beta/(s^{-1})$	0.60	0.81	1.42	1.76
$\rho/(g/cm^3)$	0.92	0.900	0.880	0.894
$(\beta - \beta_0)^2/\rho$	0.284	0.578	2.015	3.125

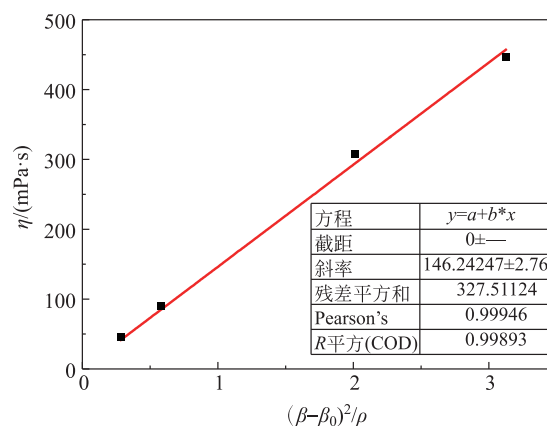


图 13 标定实验(9)式拟合图像

(5) 测量实验

受迫振动模式下,用(4.1)的实验方法求得待测溶液的 β 值,根据式(14)可求得待测溶液的黏滞系数。同理,阻尼振动模式下,用(4.2)的实验方法求得待测溶液的 β 值,根据式(15)可求得待测溶液的黏滞系数。

5 实验数据

5.1 室温下测量不同溶液的黏度系数

选取五种不同黏度的溶液重复进行实验,测量结果与数字式旋转黏度计 NDJ-99 的测量结果及理论值对比。

表 3 室温下五种不同溶液测量数据

液体名称	大豆油	玉米油	芥花油	二甲基 硅油 1	二甲基 硅油 2
理论黏度值 ^[9] / (mPa·s)	46.14	49.14	55.08	250.66	380.22
旋转式黏度计 结果/(mPa·s)	47	48	54	247	382
受迫振动法测量 结果/(mPa·s)	47.14	49.96	57.68	254.86	384.89
受迫振动法结果 偏差/(mPa·s)	1.00	0.82	2.60	4.20	4.67
阻尼振动法测量 结果/(mPa·s)	46.58	47.96	57.25	254.32	384.15
阻尼振动法结果 偏差/(mPa·s)	0.44	-1.18	2.17	3.66	3.93

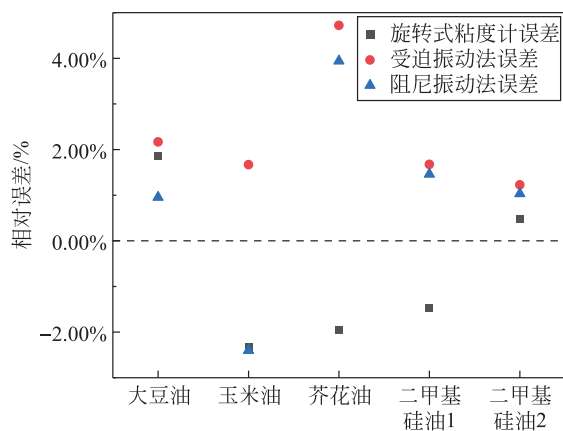


图 14 不同测量方法相对误差对比图

从表 3 和图 14 看,受迫振动法中最大偏差为 $4.67\text{mPa}\cdot\text{s}$,最小偏差为 $0.82\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。阻尼振动法中最大偏差为 $3.93\text{mPa}\cdot\text{s}$,最小偏差为 $0.44\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。两种方法的测量结果与理论值均有误差,都在 5.0% 以下,与旋转式黏度计的误差对比,测量准确度区别不大。

5.2 不同温度下测量不同溶液的黏度系数

对上述五种溶液分别在 15°C 、 20°C 、 30°C 进行阻尼振动模式下的测量,实验数据如表 4 所示,与理论值的相对误差如图 15 所示。

表 4 15°C 、 20°C 、 30°C 下黏度测量结果

溶液名称	大豆油	玉米油	芥花油	二甲基硅油 1	二甲基硅油 2
15℃理论黏度/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	77.83	76.44	83.59	287.43	417.98
15℃测量值/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	75.68	74.15	79.62	281.35	412.34
20℃理论黏度/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	63.95	63.59	68.62	262.25	398.34
20℃测量值/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	61.56	60.37	67.36	266.15	403.22
30℃理论黏度/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	44.62	45.31	47.62	244.85	369.32
30℃测量值/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	46.14	46.94	48.69	247.7	363.45

从测量结果看,五种被测液体不同温度下的黏度变化与理论相符,测量误差均在 6.0% 以内,证明了测量方案和温控设计的正确性。

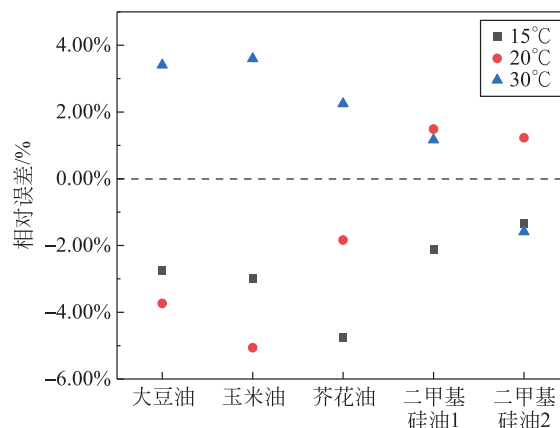


图 15 不同温度下各种溶液黏度测量相对误差

6 误差分析

6.1 密度测量引起的误差

密度 ρ 的测量误差来源于质量和体积的测量,实验中,选用友声 BS600+电子天平,最大允差 0.01g ,量筒的最小分度值为 1ml ,待测液体的质量是 50g ,体积为 45ml ,由间接测量的误差传递公式^[10],

$$\Delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial M}\Delta M + \frac{\partial\rho}{\partial V}\Delta V, \quad \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta M}{M} - \frac{\Delta V}{V}$$

密度测量误差为质量测量误差和体积测量误差之和,约为 2.24% 。

6.2 振幅测量引起的误差

当待测液体黏滞系数过大时,较大的黏滞力使振片的振幅明显减小。为降低数据拟合过程中产生的误差,使用 SS49E 霍尔传感器,AD7190 模数转换模块,通过串口传输得到的电压最小值为 0.000001V ,采集的数据精度较高,通过合理提取数据可忽略振幅测量带来的误差。

在霍尔传感器输出电压转换为振幅的过程中,两者的线性系数与实际值之间会存在误差,但阻尼因数 β 通过拟合得到,由式(11)和式(13)可知,线性系数的误差不体现在 β 值上,对实验结果的影响可以忽略。

6.3 共振频率漂移引起的误差

当振片浸入溶液后,部分溶液吸附在振片上使音叉臂有一定的附加质量,加载音叉的振动周期 T 为^[11]:

$$T^2 = B(m_x + m_0) \quad (16)$$

B 为常数,与音叉材料的力学性质、大小及形状有关, m_0 为与每个振动臂的有效质量有关的常数。由式(16)知,系统的共振频率将有小幅减小。表 5 为音

表 5 音叉在空气中及测定溶液中的共振频率

标定溶液种类	空气	二甲基硅油 46mPa·s	二甲基硅油 90mPa·s	二甲基硅油 308mPa·s	二甲基硅油 447mPa·s
共振频率/Hz	14.14	14.10	14.06	13.98	13.94

又在空气中及标定溶液中的共振频率。可以看出,从 45mPa·s 到 450mPa·s,共振频率变化的最大值为 0.2Hz。

根据式(9),由间接测量的误差传递公式^[10]可知:

$$\Delta\eta = \frac{\partial\eta}{\partial f}\Delta f = \frac{4m^2(\beta-\beta_0)^2}{\pi S^2\rho f^2}\Delta f$$

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta f}{f} < \frac{0.2}{14.14} \approx 1.41\%$$

由频率变化引起的误差约为 1.41%。

图 16 为黏度在 45~450mPa·s 间的不同液体的理论值及测量值,测量值基本与理论值重合,黏度测量误差在 6% 以下。图 17 为黏度在 45~

905mPa·s 间的理论值及测量值,黏度增大时测量值偏离理论值,黏度超过 550mPa·s 时,测量误差达到 10%,黏度达到 905mPa·s 时,测量误差达到 18%。

从以上分析可以得出,在溶液黏度增大时,音叉共振频率的变化,是影响测量准确度的主要原因,也限定了该方法的黏度测量范围。为减小共振频率漂移的影响,音叉工作频率设置在较低频率,是本装置设计的核心。

6.4 温度对测量结果的影响

在本设计中,采用 PID 控温技术,在不同温度区间给出不同的 PID 系数,以达到精确控温的效果。图 18 为 15℃、20℃、30℃、40℃、50℃ 的控温曲线,达到目标温度后温度的波动在 ±0.3℃ 之间。实验装置温度控制精确,是黏滞系数测量误差相对较小的关键因素。

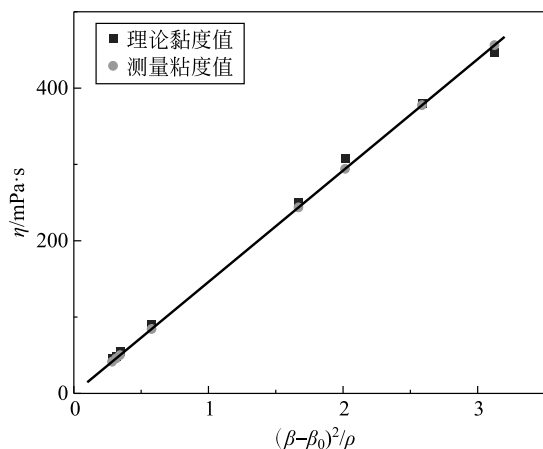


图 16 45~450mPa·s 间的黏度理论值及测量值

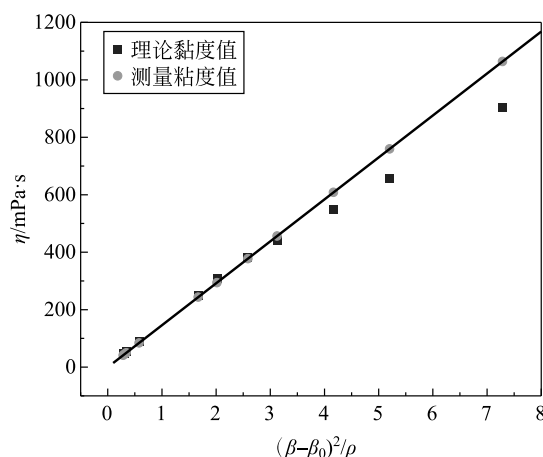


图 17 45~905mPa·s 间的黏度标定数据及测量数据

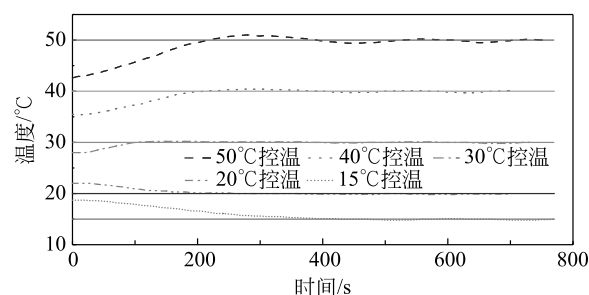


图 18 PID 温度控制曲线

7 结论

利用音叉作为振动部件,设计了一种测量液体黏滞系数的教学仪器。音叉的结构特性保证了振片在待测液体中做一维运动,更准确建立了“黏度—阻尼因数”的关系模型,装置的黏度测量范围在 45~450mPa·s,测量误差在 5% 以下。通过实验数据,对实验方法的正确性进行了合理验证。分析了密度测量和共振频率漂移是测量误差的主要来源。利用 TEC 半导体作为加热制冷器件对待测液体实现变温,实现了不同温度下黏滞系数的测量,控温装置结构简单,小巧。

(下转第 188 页)