

文章编号:1005-4642(2022)09-0043-05

受迫振动法测量液体黏度

杨泽斌¹,洪玲儿¹,彭 力^{1,2},刘朝辉¹

(1. 华南师范大学 物理与电信工程学院,广东 广州 510006;

2. 华南师大(清远)科技创新研究院有限公司,广东 清远 511517)

摘 要:将传统的欠阻尼振动法改进为受迫振动法,结合实时图像采集和虚拟仪器测量技术测量液体黏度. 采用磁动式扬声器提供周期性驱动力使小球做受迫振动,通过 USB 摄像头实现对小球运动图像的实时采集,利用虚拟仪器测量技术进行图像分析、目标追踪和数据可视化处理,测定小球的共振频率,进而得到液体的黏度. 在温度为 30 ℃、质量分数为 96.0% 时测得甘油黏度为 $(0.299 \pm 0.004) \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 相对偏差为 0.67%.

关键词:受迫振动法;黏度;实时采集;虚拟仪器

中图分类号:O351.2

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.09.008

测量黏度的方法有落球法^[1]、旋转法、振动法等,其中振动法利用物体的振幅和周期的变化规律测量液体的黏度,该方法具有响应快^[2]、测量方便等优点. 文献[3]利用小球在液体中做欠阻尼振动来测量液体黏度,但需找到与液体黏度适配的弹簧,否则会因欠阻尼数据不清晰而产生较大的拟合误差. 文献[4]用强迫振动扭摆法测量黏度较大的液体,但需先对已知黏度的标准样品进行标定后才能获得待测液体的黏度. 文献[5]用电机驱动钢球在待测液体中做受迫振动来测量液体黏度,但该方法受电机的限制,且在低电压时由于提供的驱动力变小,从而会导致测量误差变大.

本文利用磁动式扬声器提供周期性驱动力使小球做受迫振动,将实时图像采集和虚拟仪器测量技术相结合,测量液体黏度. 该方法操作简单,可一键生成实验结果,测量效率高. 通过该方法测量出甘油的黏度随温度以及质量浓度的变化曲线,并得到其经验公式.

1 基本原理

如图 1 所示,将小球通过轻质杆与劲度系数

为 k 的弹簧相连,由于小球受重力作用,通过磁动式扬声器的驱动柱给予弹簧竖直向下的周期性驱动力 $F_0 \cos(\omega t)$,由牛顿第二定律以及斯托克斯定律^[6]可得小球的动力学方程为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\mu}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = \frac{F_0}{m} \cos(\omega t), \quad (1)$$

该微分方程符合受迫振动动力学方程^[7],可解得:

$$\eta = \frac{m \sqrt{2(\omega_0^2 - \omega_m^2)}}{3\pi d}, \quad (2)$$

其中, m 为小球质量, d 为小球直径, η 为液体黏度, ω_0 和 ω_m 分别为弹簧振子固有角频率和共振角频率.

考虑到斯托克斯定律的成立条件以及在小球振动过程中其周围流体会存在运动,可能出现湍流现象,需要对式(2)进行二级修正,最后可得待测液体的黏度为

$$\eta_{\text{测}} = \frac{m \sqrt{2(\omega_0^2 - \omega_m^2)}}{3\pi d \left[\left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right) \left(1 + 1.6 \frac{d}{H}\right) \left(1 + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1080} Re\right) \right]} \quad (3)$$

收稿日期:2022-01-23

基金项目:国家自然科学基金资助(No. 61975058)

作者简介:杨泽斌(2001—),男,广东广州人,华南师范大学物理与电信工程学院 2019 级本科生. E-mail: 20192321098@m.scnu.edu.cn

通讯作者:彭 力(1978—),男,湖南桑植人,华南师范大学物理与电信工程学院讲师,博士,研究方向为光电技术及应用. E-mail: pengli27@126.com

其中: D 为容器直径, H 为液体高度, Re 为雷诺系数.

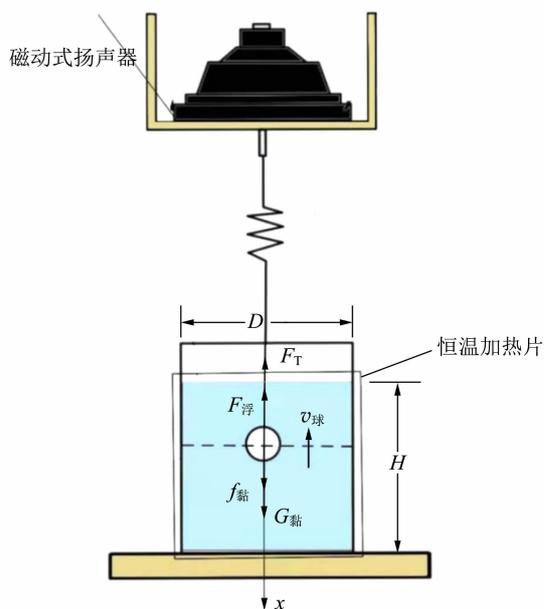


图 1 测量原理图

2 实验装置

图 2 为实验的整体装置图,由驱动装置和测量装置构成,通过驱动装置驱动小球在液体中做受迫振动,由测量装置对小球的运动进行追踪,得到小球在竖直方向上做受迫振动的相对位移-时间图像,分析图像可确定出液体的黏度.

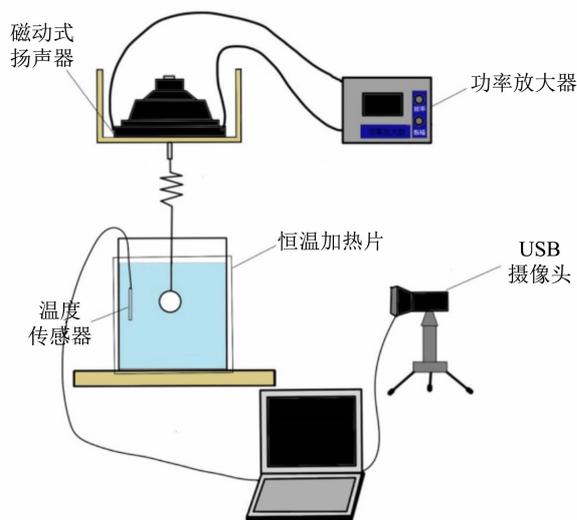


图 2 整体装置图

2.1 驱动装置

驱动装置由功率放大器、磁动式扬声器和驱动柱组成.功率放大器接通 220 V 交流电,可以为磁动式扬声器提供频率、振幅可调的正弦信号,磁动式扬声器通过驱动柱为弹簧振子提供竖直方向的周期性驱动力.

功率放大器有频率调节旋钮和振幅调节旋钮.通过调节频率旋钮,可以使得弹簧振子达到共振状态.调节振幅旋钮改变 F_0 的大小,可以让弹簧振子的振动速度适合(既不会出现湍流现象,又利于摄像头采集图像),从而减小实验误差.由于没有湍流,对于式(3)可近似取 $Re=0$.

图 3 为实验测出的驱动柱在不同频率下的轨迹图,从图 3 可看出:当频率发生改变时,振幅基本不变.因此,驱动柱可以提供较好的周期性驱动力.

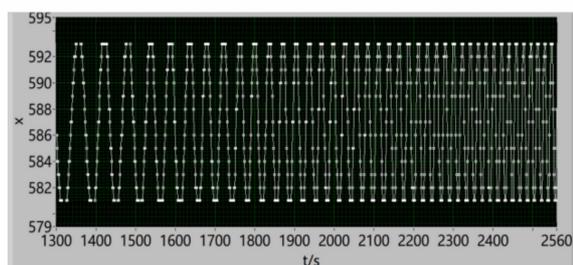


图 3 不同频率下驱动柱相对位移-时间图

2.2 测量装置

测量装置为 USB 摄像头,内置自主设计的测量程序.将实时图像采集和虚拟仪器测量技术相结合,实现了数据测量、数据分析、数据处理一体化.通过 USB 摄像头对小球的振动图像进行采集,通过测量程序进行图像分析和目标追踪,并实时显示出小球在竖直方向上的相对位移 x 和时间 t 的图像,再经过分析处理即可得出弹簧振子的振动角频率 ω_m .图 4 所示为测量程序基本流程图.

由于摄像头监测的灵敏度较高,并且通过目标追踪程序实时显示小球的运动情况,可以直观地获得小球的振幅,有效减少判断小球最大位移处所引起的偶然误差.通过选择对应的小球振动周期即可一键显示小球的共振频率和待测液体的黏度.

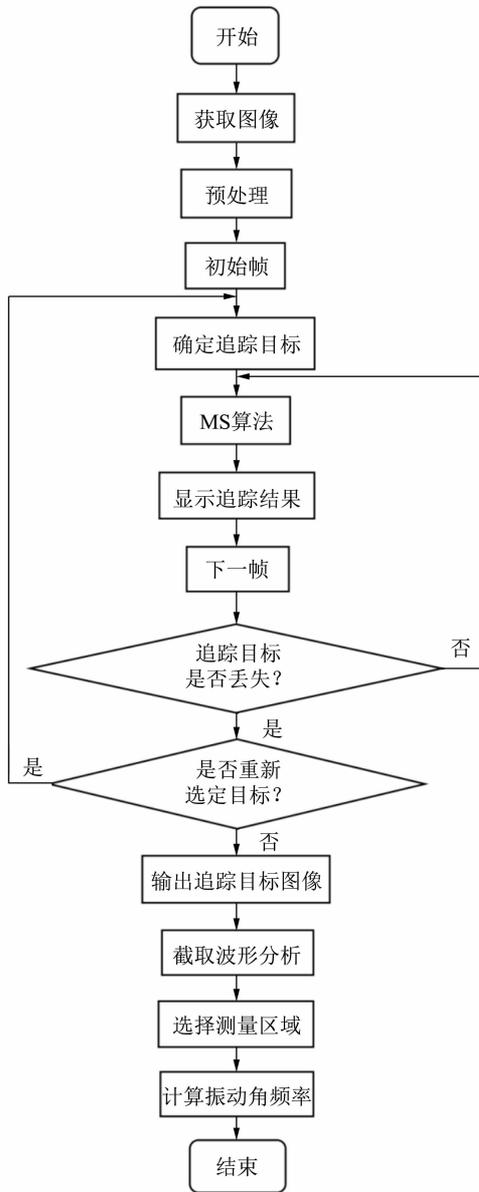


图 4 测量程序流程图

3 实验结果

实验中选用小球质量 $m=0.01595\text{ kg}$, 直径 $d=0.0132\text{ m}$, 筒内直径 $D=0.2000\text{ m}$, 甘油液面高度 $H=0.2000\text{ m}$.

3.1 测量弹簧振子的平均固有角频率

让弹簧振子在空气中自由振动, 测出弹簧振子的固有角频率 ω_0 , 所测数据如表 1 所示. 测量 5 次取平均, 得到弹簧振子的平均固有角频率为 $\overline{\omega_0}=10.3366\text{ rad/s}$.

表 1 弹簧振子固有角频率的测量结果

n	$\omega_0 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
1	10.345 5
2	10.315 9
3	10.332 4
4	10.312 3
5	10.376 9

3.2 测量液体黏度

在程序中输入测定的弹簧振子的平均固有角频率、小球质量及直径, 将小球作为追踪目标即可开始采集小球的运动轨迹. 调节驱动装置中的频率旋钮, 观察实时显示的相对位移-时间图像, 判断小球的运动状态. 当小球在竖直方向有最大相对位移时, 弹簧振子达到共振状态. 待小球振动稳定后, 停止采集, 得到如图 5 所示的弹簧振子的共振图像.

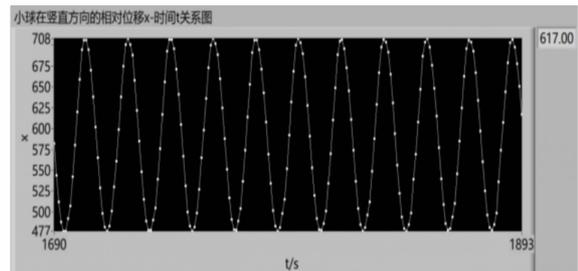


图 5 弹簧振子共振图像

获得弹簧振子共振图像后, 在测量面板上用区间选择线选定好共振图像中 3 个振动周期, 点击面板“生成结果”键, 可以测量出液体的黏度并显示在测量面板上, 如图 6 所示.

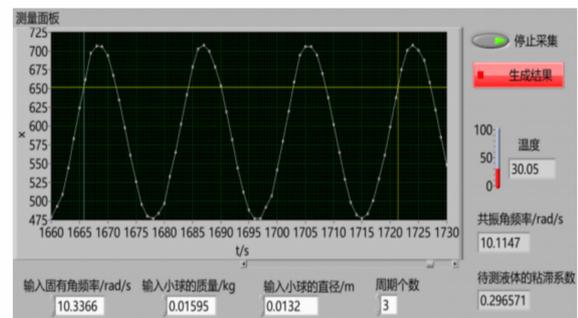


图 6 测量结果图

测量温度为 30 ℃, 质量分数为 96.0% 的甘油黏度测量结果如表 2 所示, 根据表中数据可得甘油黏度为 $\eta = (0.299 \pm 0.004) \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 与文献 [8] 中参考值 $0.2967 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 相比较, $E_r = 0.67\%$, 测得的黏度较为准确.

表 2 液体黏度测量数据

n	$\eta / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
1	0.296 6
2	0.298 7
3	0.302 1
4	0.295 2
5	0.301 0

3.3 测量黏度随温度变化的曲线

利用恒温加热片为甘油加热, 重复 3.1 和 3.2 中的操作步骤. 测量出不同温度下质量分数为 99% 的甘油黏度, 所测数据如表 3 所示.

表 3 不同温度下液体黏度测量数据

T/K	$\eta_{\text{测}} / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\eta_{\text{参考}} / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	E_r
293.15	1.180	1.193 9	1.16%
294.15	1.080	1.093 9	1.27%
295.15	0.992	1.002 9	1.09%
296.15	0.910	0.920 0	1.09%
297.15	0.838	0.844 4	0.76%
298.15	0.785	0.775 4	1.24%
299.15	0.706	0.712 6	0.93%
300.15	0.661	0.655 1	0.90%
301.15	0.595	0.602 7	1.28%
302.15	0.559	0.554 7	0.73%
303.15	0.513	0.510 9	0.41%

将所测数据与文献 [8] 中的数据进行比较, 其相对偏差均小于 2%, 说明本文方法的测量较为准确, 且可重复性高.

图 7 为利用 Matlab 软件拟合的甘油黏度参考值 $\eta_{\text{参考}}$ 和测量值 $\eta_{\text{测}}$ 分别随 T^{-1} 的变化曲线. 2 条变化曲线基本一致, 均满足指数变化规律 [9]. 得出甘油黏度 η 和温度 T 的经验公式为

$$\eta = 9.93 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{7.475}{T}\right),$$

与参考文献 [8] 中结论相符.

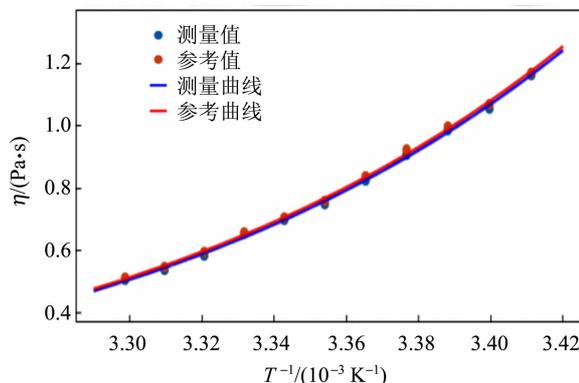


图 7 甘油黏度随温度倒数的变化曲线

3.4 测量黏度随质量分数的变化曲线

用蒸馏水稀释甘油, 配置出不同质量分数的甘油水溶液, 测量出温度 22.5 ℃ 下, 质量分数为 95%~99.5% 甘油水溶液的黏度, 测量结果如表 4 所示.

表 4 不同质量分数下甘油黏度的测量数据

ω_B	$\eta_{\text{测}} (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\eta_{\text{参考}} (\text{Pa} \cdot \text{s})$	E_r
99.5%	1.049	1.065	1.50%
99.0%	0.941	0.957	1.67%
98.5%	0.859	0.867	0.92%
98.0%	0.775	0.784	1.15%
97.5%	0.701	0.713	1.69%
97.0%	0.653	0.645	1.24%
96.5%	0.579	0.584	0.86%
96.0%	0.523	0.532	1.70%
95.5%	0.485	0.495	2.02%
95.0%	0.436	0.443	1.58%
94.5%	0.410	0.406	0.99%

将所测数据与文献 [8] 中的数据进行比较, 其相对偏差均小于 2.1%. 图 8 是利用 Matlab 软件拟合的甘油黏度参考值和实验值分别随质量分数 ω_B 的变化曲线.

由图 8 可知实验值和参考值随质量分数 ω_B 的变化趋势基本一致. 得出甘油黏度和质量分数 ω_B 的经验公式为

$$\eta = 5.31 \times 10^{-9} \exp(19.199\omega_B).$$

由经验公式可知: 甘油黏度 η 与质量分数 ω_B 也满足指数变化规律.

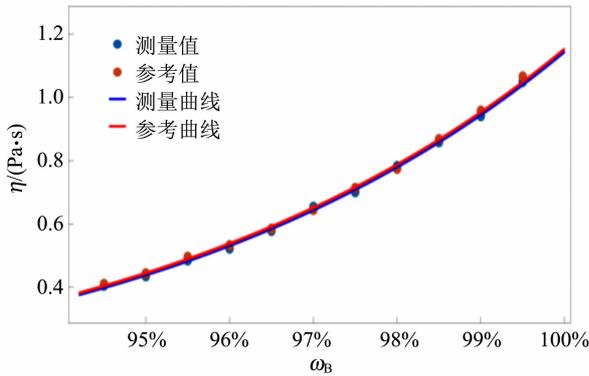


图8 甘油黏度随质量分数的变化曲线

4 结束语

本实验将磁动式扬声器作为驱动源给弹簧振子提供了稳定的周期性驱动力,并且设计了液体黏度测量装置,该装置可一键生成实验数据.利用该装置测量的甘油黏度随温度、质量分数的变化曲线与参考值基本一致,数据相对偏差都在2.1%以内.本文所用方法具有操作简单、高效便捷、测量结果精确等特点.

参考文献:

- [1] 张凯悦,潘国华,贾晓倩,等.可控温式液体黏度测定仪的设计与测试[J].物理实验,2020,40(5):50-53.
- [2] 冯令城.粘滞系数测量仪研究与实现[D].上海:华东交通大学,2019.
- [3] 许清滢,马遥,李紫娇,等.利用智能手机磁力计测量液体黏滞系数[J].大学物理实验,2021,34(3):64-67.
- [4] 陈刚,朱震刚,水嘉鹏.利用强迫振动扭摆方法测量液体粘滞系数的原理[J].物理学报,1999,(3):40-44.
- [5] 陈国杰,周有平,钟土基,等.用弹簧振子受迫振动测量液体黏度[J].大学物理,2013,32(10):30-34.
- [6] 张兆顺,崔桂香.流体力学[M].3版.北京:清华大学出版社,2015:287-292.
- [7] 王忆,杨玉屏,赵健生.受迫阻尼振动系统动力学性质的研究[J].大学物理,2001,20(7):22-25.
- [8] Madison L S. Glycerol viscosity tables [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 2002,24(9):1060-1064.
- [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(1):68-70.

Measuring liquid viscosity coefficient based on forced vibration method

YANG Ze-bin¹, HONG Ling-er¹, PENG Li^{1,2}, LIU Zhao-hui¹

(1. School of Physics and Telecommunications Engineering,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China;

2. SCNU Qingyuan Institute of Science and Technology Innovation Co. Ltd.,
Qingyuan 511517, China)

Abstract: In this experiment, the traditional underdamped vibration method was improved to the forced vibration method, the liquid viscosity coefficient was measured by combining real-time image acquisition and virtual instrument measurement technology. The magnetic loudspeaker was used to provide periodic driving force to force the small ball to vibrate. The USB camera realized the real-time acquisition of the moving image of the small ball. The virtual instrument measurement technology was used for image analysis, target tracking and data visualization. The resonance frequency of the small ball was measured and then the viscosity coefficient of the liquid was obtained. The glycerol viscosity coefficient measured in this experiment was $0.299 \pm 0.004 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ at the temperature of 30°C and the mass concentration of 96.0%, where the relative error was 0.67%.

Key words: forced vibration method; viscosity coefficient; real-time acquisition; virtual instrument

[责任编辑:郭伟]