

文章编号:1005-4642(2020)08-0028-04

基于线性霍尔传感器的液体黏度测量实验仪

王学水,姜 浩,祝志浩,李志涛,马亚楠

(山东科技大学 电子信息工程学院,山东 青岛 266590)

摘 要:利用线性霍尔传感器改进传统落球法测量仪器,可以测量非透明液体的黏度. 用磁性球替换钢球,采用 4 个霍尔传感器 HG-302C 输出受磁性小球下落所引起的霍尔信号,STM32F103ZET6 微控制器实现信号的采集、时间计时和数据上传,LabVIEW 程序实现信号的显示与数据的接收保存,Matlab 拟合数据得到小球的终极速度. 经实验测试,蓖麻油的黏度测量偏差为 3.3%.

关键词:落球法;黏度;线性霍尔传感器;微控制器;LabVIEW;Matlab

中图分类号:O357

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.08.005

落球法通过测量下落小球的终极速度计算液体黏度^[1],传统的实验仪器通过人工秒表计时,存在视觉误差与反应误差. 张海林等利用 CCD 工业摄像机对落球法进行改进^[2],黄秋萍利用光电门进行改进^[3],这 2 种方法都不能测量非透明液体. 王本阳等利用集成霍尔开关式传感器进行改进^[4],虽然解决了非透明液体的黏度测量问题,但磁性小球提供的磁场到达定值后,传感器会持续输出高电平,影响测量精度.

本文利用线性霍尔传感器实时输出模拟霍尔电压信号,通过对霍尔信号采集、处理和分析计算出实验小球的终极速度. 该方法解决了传统落球法不能测量非透明液体黏度问题,同时还提高了测量精度,并且拓宽可测量液体黏度的范围,符合目前黏度测量仪对于传统测量方法改进的要求,使其智能化. 该方向还加强了学科间交叉渗透,拓宽了学生视野,丰富了实验内容,提高了学生实验的积极性.

1 基本原理及测量仪器

如图 1 所示,磁性小球由圆柱筒顶部下落到底部过程中,在经过传感器正中间时,传感器输出的霍尔电压为最大值或最小值. 因此实验结束时,每个传感器都会输出具有峰值的波形信号. 若传感器等间距分布,通过实验仪得出每个峰值

产生的时间,可判断小球的运动状态并求出终极速度,求得液体的黏度.

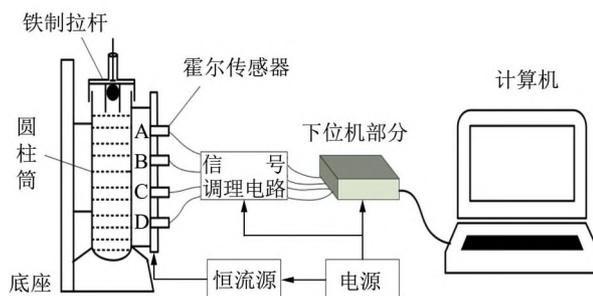


图 1 液体黏度测量仪系统框图

黏度测量仪由 5 部分组成:

- 1) 实验仪主体部分,该部分为传统落球法实验仪器.
- 2) 传感器及信号调理部分,将传感器 A, B, C 和 D 以 10 cm 间隔由上至下焊接在电路板上. 传感器采用恒流源供电方式,保证输出信号的变化只与小球作用的磁场变化有关. 信号调理电路用于放大霍尔信号,并转换为可被微控制器采集的单端电压.
- 3) 电源部分,为微控制器提供 3.3 V 工作电压,为恒流源电路提供 +12 V 工作电压,为信号调理电路提供 ±15 V 工作电压.
- 4) 下位机部分,使用微控制器内部 12 位 A/

收稿日期:2020-05-10;修改日期:2020-06-15

作者简介:王学水(1964—),男,山东泰安人,山东科技大学电子信息工程学院教授,硕士,主要研究领域为科教仪器、智能仪器仪表的研发. E-mail:sdkdwxs@163.com



D 转换器采集霍尔信号,转换精度高,转换速率快,最快为 $1 \mu\text{s}$. 使用内部定时器计时,时钟频率为 72 MHz ,计时准确. 在每次对霍尔信号转换完成后,将信号与时间数据上传到计算机.

5)上位机部分,LabVIEW 程序接收和保存下位机发送的数据,并根据数据实时显示霍尔信号波形图. 利用 Matlab 拟合数据,得到每个传感器输出的霍尔信号达到峰值时所对应的时间.

实验时将磁性小球固定在铁制拉杆中央,套在圆柱筒上. 调整圆柱筒竖直放置,霍尔传感器电路板也竖直固定在圆柱筒上. 然后接通电源,上位机运行 LabVIEW 程序,配置串口通信参量,设置数据文件保存位置. 在配置完成后,点击运行界面的开始按钮,将铁制拉杆向上拔起,使小球下落. 待小球下落完成后,点击运行界面的停止按钮,完成实验.

2 技术实现方法

2.1 元器件选型

HG-302C 线性霍尔传感器具有很好的线性度,温度性能稳定,现已作为霍尔效应实验中使用的 THS119 线性霍尔元件的替代元件.

磁性小球选择 N35 烧结钕铁硼磁铁,其具有非常优异的磁特性,充磁方向分为轴向与径向,可排除小球下落过程因自身翻转带来的实验误差.

2.2 恒流源及信号调理电路

图 2 为由运放 LM324 和三极管构成的压控恒流源电路^[5],组态为电流串联负反馈. 调节 R_{15} 阻值,可实现 $0 \sim 10 \text{ mA}$ 恒流变化.

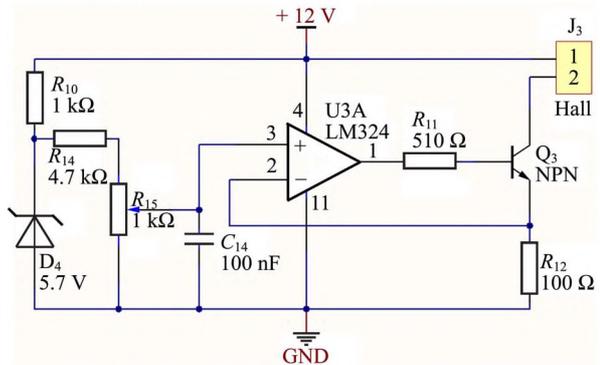


图 2 恒流源电路

在实际测量中发现,磁性小球下落过程使传感器输出的霍尔信号在 $0 \sim 1 \text{ mV}$ 内变动. 微控制器不能采集微弱的信号,因此设计了由 3 个 OP07 构成的仪用放大电路^[6]. 如图 3 所示,第 1 级用于信号放大及提高共模抑制比,并且可以改变 $R_w = R_{20} + R_{21}$ 阻值调节放大倍数;第 2 级放大用于电压跟随,双端输入转单端输出,其输入与输出电压关系为

$$V_{\text{out}} = - \left[1 + \frac{2R_{19}}{R_w} \right] V_{\text{in}}. \quad (1)$$

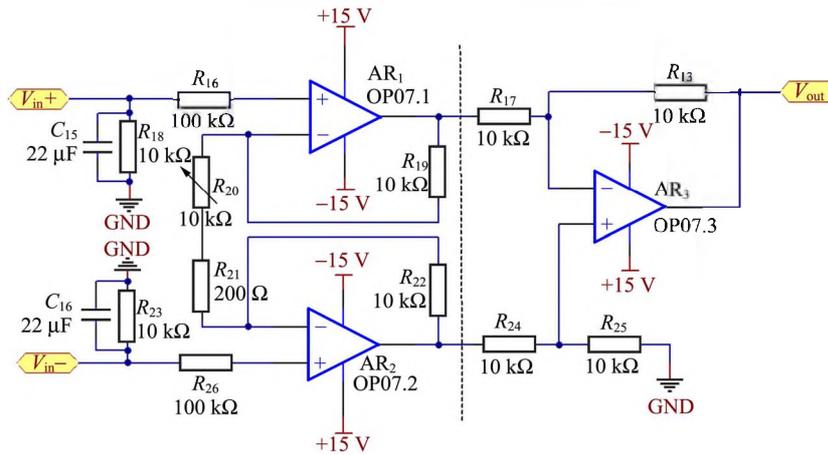


图 3 霍尔信号放大电路

实验时小球对传感器施加的磁场方向不同,因此传感器会输出正负霍尔电压,经过放大之后,微控制器不能采集负电压,因此设计了升压电路. 如图 4 所示,该电路为同相输入求和电路,输入与

输出电压关系为

$$V_{\text{AUX}} \approx 0.4(V_{\text{分}} + V_{\text{out}}), \quad (2)$$

其中 $V_{\text{分}}$ 为电阻 R_{30} 的分压.

升压电路将霍尔信号提升了约 1.5 V ,微控

制器电压采集范围为 0~3.3 V,所以霍尔信号的放大范围为 0~1.5 V. 由于未对传感器存在的不等位电势进行补偿,所以信号放大倍数选为偏小的 100 倍.

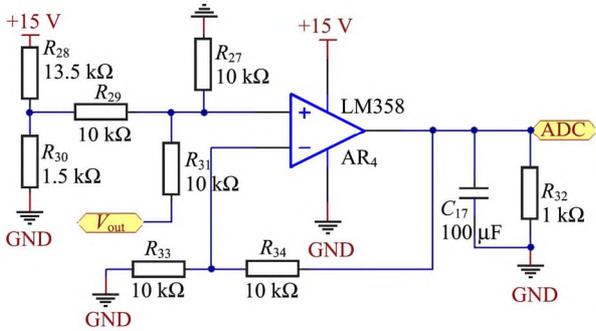


图 4 霍尔信号升压电路

2.3 微控制器软件工作流程

微控制器工作流程如图 5 所示,先对串口通信参量、内部 DMA 通道参量等进行配置,并启动 A/D 转换. 在实验开始时,通过上位机发送字符 1,微控制器启动定时器开始计时,读取并计算 A/D 转换值,然后发送数据. 延时 5 ms,实现每 5 ms 采集 1 次霍尔信号. 上位机发送字符 2,关闭定时器并停止发送数据,结束本次实验. 上位机发送字符 3,重置计时时间,可重新开始实验. 这样设计的目的是实验时只需在上位机进行操作即可,简化实验步骤.

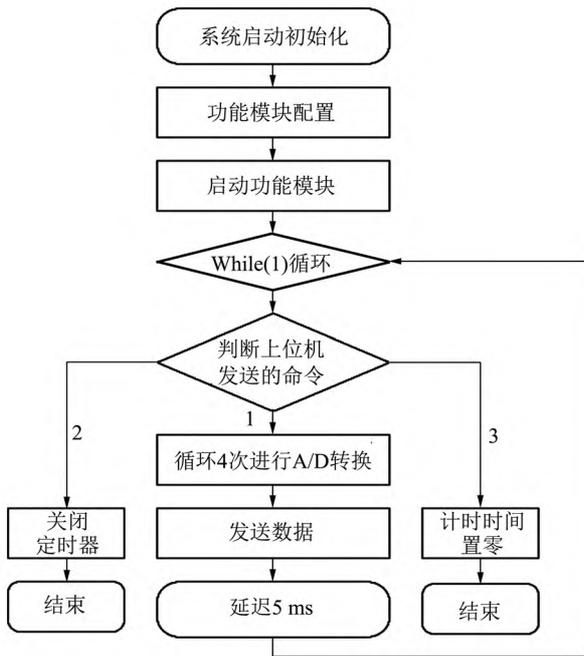


图 5 微控制器工作流程

3 实验数据测量及处理

待测液体为蓖麻油,室温为 17.5 °C. 直接测量量测 6 次,液体的密度 $\rho_l = (0.959 \pm 0.002) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,液面高度 $H = (596.8 \pm 0.5) \text{ mm}$,筒内直径 $D = (29.47 \pm 0.12) \text{ mm}$,磁力小球直径 $d = (7.993 \pm 0.004) \text{ mm}$,小球密度 $\rho = (7.497 \pm 0.002) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

点击 LabVIEW 面板上的开始、停止、复位按钮,对应向微控制器发送字符 1,2,3,实现对下位机的控制. 实验过程中波形图控件会实时绘制每个传感器产生的电压信号,使实验现象非常明显. 其波形显示如图 6 所示,图中红、绿、蓝、粉曲线分别代表霍尔传感器 A,B,C 和 D 输出的霍尔电压信号.

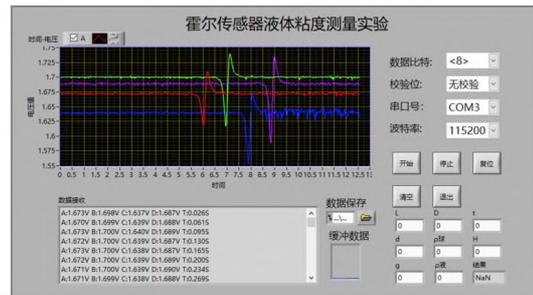


图 6 LabVIEW 程序前面板

通过 Matlab 对保存的实验数据进行曲线拟合,得到霍尔信号峰值所对应的时间. 拟合结果如图 7 所示.

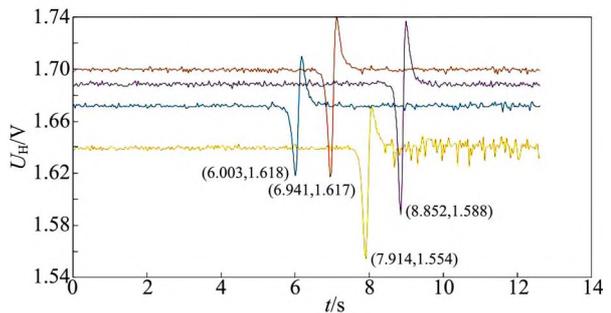


图 7 Matlab 数据拟合

重复 6 次实验,得到小球经过每个传感器所用时间如表 1 所示. 可以看出小球经过每个传感器的时间基本一致,可以判定小球处于匀速运动状态,取经过传感器 A 和 D 的时间计算小球的终极速度. t_{AD} 测量均值为 2.907 s.

将数据代入黏度测量公式并做二级修正,

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0) g d^2 t}{18l} \frac{1}{\left(1 + 2.4 \frac{r}{R}\right) \left(1 + 3.3 \frac{r}{H}\right) \left(1 + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1080} Re^2 + \dots\right)}, \quad (3)$$

计算所得蓖麻油黏度值为 $\eta = 1.19 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。计算黏度测量不确定度^[7]为 $\mu_c(\eta) = 0.01 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，最终测得的蓖麻油黏度为 $\eta = (1.19 \pm 0.01) \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。实际环境下蓖麻油的黏度值为 $1.23 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，本实验仪测量结果与其相比较，测量偏差为 3.3% 。

表1 小球经过各传感器所用时间

次数	t_{AB}/s	t_{BC}/s	t_{CD}/s
1	0.938	0.973	0.938
2	0.938	0.938	0.973
3	0.972	0.939	1.007
4	0.939	0.972	0.973
5	1.007	0.973	1.008
6	1.007	0.973	0.973

4 结束语

从实验过程可以看出，该实验仪器并没有增加操作难度，在实验时只需点击上位机界面的开始和停止按钮便可以进行实验，完成对实验数据的记录，实验操作方便。对测量仪器进行重复性

实验，测量数据稳定。本文对于传统落球法的改进，是对其添加硬件电路，这样可以很方便地对传统测量仪器进行升级改进。

参考文献:

- [1] 陈淑妍. 落球法液体黏滞系数测定实验中的几个关键技术研究[C]//第6届全国高等学校物理实验教学研讨会论文集(下册). 西安, 2010:197-201.
- [2] 张海林, 张爱军. CCD落球法液体粘滞系数测定仪[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(4): 49-51.
- [3] 黄秋萍. 落球法液体粘滞系数实验的改进[J]. 大学物理实验, 2015, 28(3): 38-41.
- [4] 王本阳, 毛晓芹, 王新顺, 等. 集成霍尔开关传感器测量非透明液体的黏度[J]. 物理实验, 2018, 38(4): 27-29.
- [5] 秦玲, 赖青贵, 张良, 等. 基于运算放大器的压控恒流源[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(3): 553-556.
- [6] 唐金元, 王翠珍, 于潞. 微小电压测量放大电路的抗共模噪声设计方法[J]. 中国测试, 2012, 38(4): 83-85, 109.
- [7] 全红娟. 落球法测液体粘滞系数的不确定度评定[J]. 景德镇高专学报, 2010, 25(2): 1-2.

Measuring liquid viscosity based on linear Hall sensor

WANG Xue-shui, JIANG Hao, ZHU Zhi-hao, LI Zhi-tao, MA Ya-nan

(College of Electronic and Information Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The traditional falling ball measuring instrument was improved using linear Hall sensor, and the viscosity of non-transparent liquid was measured. The rigid ball used in the traditional falling ball method was replaced with a magnetic ball, 4 Hall sensors HG-302C were used to detect the falling of the magnetic ball. STM32F103ZET6 microcontroller realized the signal collection, time counting and data upload. LabVIEW program realized the signal display and data reception and storage. Matlab was used to fit the signal data to get the terminal speed of the ball. After experimental testing, the viscosity error of castor oil was 3.3% .

Key words: falling ball method; viscosity; linear Hall sensors; microcontroller; LabVIEW; Matlab

[责任编辑:任德香]