

面向工程应用的电磁感应实验教学改革与实践 ——以油液铁磁颗粒检测为例

张均营 姚泰锋 侯志灵

(北京工业大学物理与光电工程学院, 北京 100124)

摘要 测量润滑油中微小的铁磁性颗粒是判断机械设备磨损程度和形式的重要手段。利用自主开发传感器、LM324 放大器件、TLC549A/D 转换器、STC89C52 单片机和 CH451 数码管驱动芯片,通过 C 语言编程,本文设计了一套基于法拉第电磁感应原理测量铁磁颗粒含量的实验仪器。提出了非介入式铁磁颗粒含量的测量方案。确定了检测信号变化量与铁磨粒含量之间的定量关系。通过对于静态及动态数据的实验采集,确定了检测系统各部分的最优执行参数以及系统的检测精度,实现了铁磁颗粒含量的非接触定量检测。利用该装置可以开展基于电磁感应定律的验证性实验,该实验设备结构简单,可以锻炼学生的动手能力和运用理论知识解决实际问题的能力,非常适合用于大学物理实验教学。

关键词 实验教学;铁磁颗粒;电磁感应;油液监控;实验仪器设计

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.11.26.01

EXPERIMENTAL TEACHING REFORM AND PRACTICE OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION FOR ENGINEERING APPLICATIONS —TAKING THE DETECTION OF OIL LIQUID FERROMAGNETIC PARTICLES AS AN EXAMPLE

ZHANG Junying YAO Taifeng HOU Zhiling

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract Detecting trace ferromagnetic wear particles in lubricating oil is important for assessing the degree and mode of wear in mechanical equipment. Based on Faraday's law of electromagnetic induction, this study presents an experimental apparatus for measuring ferromagnetic particle content using a self-developed sensor, an LM324 amplifier, a TLC549 A/D converter, an STC89C52 single-chip microcontroller, and a CH451 display driver chip. A non-intrusive measurement scheme for ferromagnetic particle detection is proposed. The quantitative

收稿日期: 2025-11-26; 修回日期: 2026-01-22; 出版日期: 2026-03-30

通信作者: 侯志灵, houzl@bjut.edu.cn。

引文格式: 张均营, 姚泰锋, 侯志灵. 面向工程应用的电磁感应实验教学改革与实践——以油液铁磁颗粒检测为例[J]. 物理与工程, 2026, 36(2): 204-210.

Cite this article: ZHANG J Y, YAO T F, HOU Z L. Experimental teaching reform and practice of electromagnetic induction for engineering applications—Taking the detection of oil liquid ferromagnetic particles as an example[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(2): 204-210. (in Chinese)

relationship between variations in the detection signal and the amount of iron wear particles is established, enabling sensor signals to be converted into electrical outputs. Through static and dynamic experiments, the optimal operating parameters and detection accuracy of the system are determined. The results demonstrate that the apparatus can achieve non-contact quantitative detection of ferromagnetic particles. In addition to its engineering value, the device can also be used in college physics laboratory teaching as a verification experiment based on electromagnetic induction. Owing to its simple structure, it helps students develop hands-on skills and improve their ability to apply physical principles to practical problems.

Key words experimental teaching; ferromagnetic particles; electromagnetic induction; oil fluid monitoring; design of experimental instruments

润滑油是机器正常运转的关键工质,机械在运转过程中产生的微小的铁磁性硬颗粒是磨损状态的重要信息载体,可以反映机械设备磨损的程度和形式。油液监控在机械设备、船舶柴油机和煤矿设备等领域有着广泛的应用^[1-3]。尤其是,飞机发动机油液监控成为现代航空航天技术中监控飞机、发动机状态和保证飞行安全的有效手段^[4]。通过非接触式检测磨损颗粒的含量,可以实现发动机等的机械状况的快速监测,对有效监控故障出现以及避免事故发生具有十分重要的实际工程应用价值。

目前的油液监控研究包括基于近红外光谱技术的油液监控研究、基于卡尔曼滤波的油液监控研究和基于电磁感应原理的油液监控研究等,但相关研究大多停留在理论方面,未能设计出具体的实验仪器装置,也未能实现磨粒的非接触式定量检测^[5-7]。本项目通过法拉第电磁感应定律原理,实现了铁含量非介入式检测仪器的开发,除了工程应用价值外,可作为大学物理实验的验证性仪器设备,通过感应电流或者感应电压来确定润滑油的铁磁颗粒含量,该实验不仅可以训练学生运用基本物理原理进行定量无损检测的能力,而且可以训练学生进行非线性到线性变换以及最小二乘法拟合等基本数据处理方法的能力。

1 实验原理

1.1 测量系统原理

传感器作为一种物理实验重要工具,在数据测量中有着广泛应用^[8-10]。目前已有许多用于油液监控的传感器,如微三轮型线圈传感器和三线圈传感器,其研究目的是提高传感器的检测精度,

但传感器无法捕捉铁磁颗粒的信息并转换成电信号^[11,12]。为了实现将等效磁导率变化转化为可测量交变电流变化的任务,本文设计了一种自开发传感器,自开发传感器原理图如图1所示。

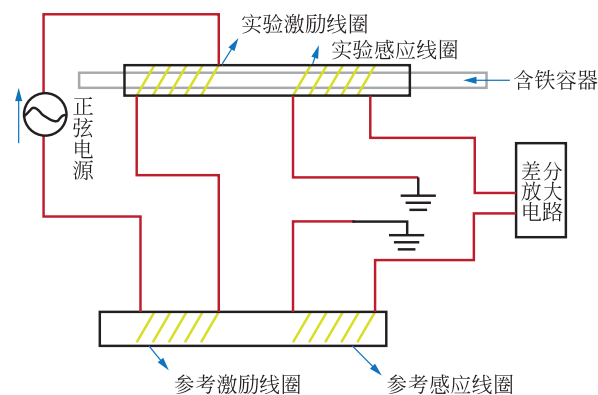


图1 自开发传感器原理图

亥姆霍兹线圈两个子线圈的自感系数分别为： $L_1 = \mu_1 n_1^2 V_1$, $L_2 = \mu_2 n_2^2 V_2$, μ_1 和 μ_2 分别为两个子线圈所处介质的磁导率。实验开发中设计令： $n_1 = n_2$, $V_1 = V_2$ 分别表示单位长度线圈的匝数和线圈体积。初级线圈通有交流电,电流强度： $I_1 = \sqrt{2} I_0 \cos(\omega t + \varphi)$,其中 I_0 表示初级线圈中交流电流的有效值, ω 表示角频率, φ 表示初相。

次级线圈产生的感应电动势： $\varepsilon = -(K \cdot \sqrt{L_1 L_2}) dI_1 / dt$,其中 K 为两线圈磁耦合系数。相应的感应电流

$$\begin{aligned} I &= -K \sqrt{L_1 L_2} dI_1 / (dt R) \\ &= -K n_1 n_2 \sqrt{\mu_1 \mu_2} \sqrt{V_1 V_2} \sqrt{2} \omega I_0 \sin(\omega t + \varphi) / R \end{aligned} \quad (1)$$

其中, R 为次级线圈所在回路的总电阻。

电流测量端

$$\bar{I} = K n_1 n_2 \sqrt{\mu_1 \mu_2} \sqrt{V_1 V_2} \omega I_0 / R \quad (2)$$

令 $\sqrt{\mu_1 \mu_2} = \mu_e \mu_0, c = K n_1 n_2 \mu_0 \sqrt{V_1 V_2} I_0 / R, \bar{I} = c \mu_e \omega$, 其中 μ_e 表示等效磁导率, μ_0 表示真空磁导率。

根据 Lichtenecker 公式

$$\ln \epsilon_{eff} = v_1 \ln \epsilon_1 + v_2 \ln \epsilon_2 \quad (3)$$

其中, ϵ_{eff} 为混合物等效介电常数, v_1, v_2 为两种组分的体积分数 ($v_1 + v_2 = 1$), ϵ_1, ϵ_2 为两种组分的介电常数。可得到

$$\log \mu_e = f \log \mu_{Fe} + (1 - f) \log \mu_{oil} \quad (4)$$

其中, μ_{Fe} 和 μ_{oil} 分别表示铁磁性磨粒和润滑油的相对磁导率, f 表示体积浓度比。

因为 $\mu_{oil} \approx 1$, 所以

$$\mu_e = \mu_{Fe}^f \quad (5)$$

因此

$$\bar{I} = c \omega \mu_{Fe}^f \quad (6)$$

对式(6)两边取对数, 可得到

$$\log \bar{I} = f \log \mu_{Fe} + \log c \omega \quad (7)$$

由上述推导可以看出, 严格意义下, 电流强度均值与磁性磨粒体积浓度满足线性关系: $\log \bar{I} = B \cdot f + C$, 在微量近似下

$$d\bar{I} = c \omega \mu_{Fe}^f df + c \omega df \quad (8)$$

由式(8)可见, 测量端电流增量与磁性磨粒浓度增量呈近似正比关系。

1.2 理论基础可靠性分析

为了从实验上验证上述理论分析, 对核心理论式(2)与(8)进行了理论—实验的一致性验证, 实验给出的数据如表 1 所示:

将表 1 中数据代入理论式(2)计算得到的测量端电流与实验值得到的测量端电流 0.99mA 相近, 在线圈磁耦合系数 K 的不可测值允许范围内。由此证明, 本项目所提出的系统遵循的物理

理论基础可行。实验得到的测量端电流变化随铁磁性磨粒浓度(体现为质量)变化的对应关系, 如图 2 所示, 二者近似满足线性关系, 因此可以应用测量端电流变化测量磁性磨粒浓度变化。

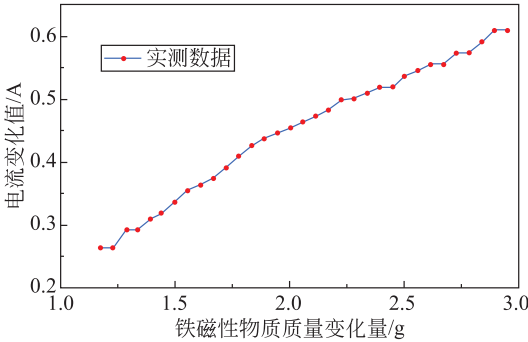


图 2 电流变化量与铁磁性磨粒质量变化量关系

1.3 静态测量数据分析

由图 2 给出的一组静态测量数据拟合直线可以得到本系统直线拟合方程为

$$y = 0.217x \quad (9)$$

由此可计算出本系统所能检测出的最小铁磁性磨粒质量含量: 0.05g。该极值含量可作为系统定标参数使用。

以规则球状模型考虑铁磁性磨粒, 可计算得该磨粒直径大小为 2.3mm。

也就是说, 在本系统当前精度下(主要体现为测量端交流电流表的测量精度), 本系统理论上可以测出直径为 0.8mm 的铁磁性磨粒。当磨粒采集系统能够一次性捕获约 5 个发动机异常磨粒的情况下, 本系统即能够满足技术要求。

表 2 是实验中测量不同铁磁性磨粒质量变化量时的绝对误差和相对误差。表 2 结果表明, 测量相对误差均在 5% 以内, 精度满足测量准确性要求。

表 1 可靠性分析测试实验数据

物理量	$n_1, n_2 / m^{-1}$	$V_1, V_2 / m^3$	μ_0 / Hm^{-1}	R / Ω	ω / Hz	K	I_0 / mA	I / mA
实验数据	1.29×10^3	1.05×10^{-6}	$4\pi \times 10^{-7}$	10	155.26	0.2~0.5	122.7	0.99

表 2 铁磁性磨粒质量变化量测量数据分析

理论质量变化量/g	1.21	1.47	1.80	2.09	2.30	2.51	2.72
测量质量变化量/g	1.17	1.44	1.72	2.00	2.28	2.56	2.84
绝对误差/g	0.04	0.03	0.08	0.09	0.02	0.05	0.12
相对误差/%	3.39	1.46	4.28	4.36	0.96	1.90	4.32

2 实验装置

2.1 测试系统实验装置

本文设计了一套基于法拉第电磁感应原理的测试系统,原理框图如图3所示。该测试系统主要由三部分组成:①驱动系统,包括稳压电源及油泵;②油路系统,包括控油阀,测试铁屑加注活塞、集油池、钛管及导油管等;③信号发生及测试系统,包括信号发生器、自开发传感器、高精度交流电流表等。信号发生及测试系统是整个测试系统的核心部分,用来收集铁磁颗粒的信息并以电流的形式表现出来。该测试系统可以实现磁性磨粒在润滑油中的不间断流通并将铁磁颗粒的信息转换为电信号。

2.2 优化频率与优化线圈参数分析

根据法拉第电磁感应定律,线圈的导线匝密度、线圈尺度、初级线圈的电流变化频率等都直接影响着感应电流大小,以及感应电流频率。考虑测量端电流表的时间响应特性及测量精度,上述三个基本参数都需要优化选择。

本项目通过大量实验确定两个主要优化参数如下:

- (1) 信号发生器信号频率:120~350Hz;
- (2) 线圈导线匝密度:1000~1500N/m。

3 结构设计

3.1 设计思路

由于润滑油中的磁性磨粒的数据需要长时间

实时精确的采集,因此,本系统的设计必须包含两个方面:一方面能实现润滑油磁性磨粒数据的采集;另一方面能进行精确的数据转换和存储,并能用3位数码管显示,以便直接观测到采集结果。根据系统需求分析,本数据采集处理通信系统的硬件电路主要包括传感器部分、信号处理部分、A/D转换部分、数码管显示部分组成,设计框图如图4所示。从传感器出来的信号经过放大,并经半桥电路半波整流。通过A/D转换将电压信号转换成数字信号送往单片机。单片机对数据进行处理并送给数码管进行数字显示。该设计可以完成磁性磨粒数据的采集、A/D转换与显示等功能。

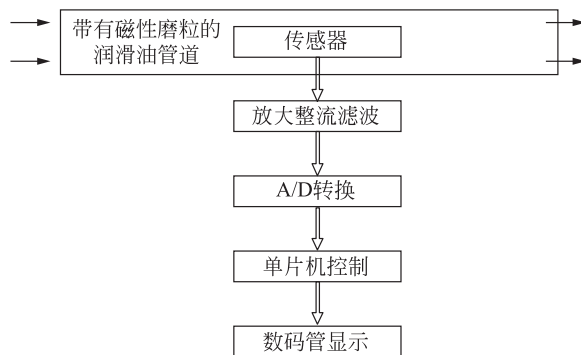


图4 数据采集处理通信系统设计原理图

3.2 系统硬件所用芯片的选择

1) 传感器的选择

本文采用自开发传感器。首先由信号发生器产生稳定的交流电压信号,再经传感器感应产生电流信号,该电流信号和润滑油中的磁性磨粒有关,自开发传感器能完成将等效磁导率变化转化为可测量交变电流变化的任务。

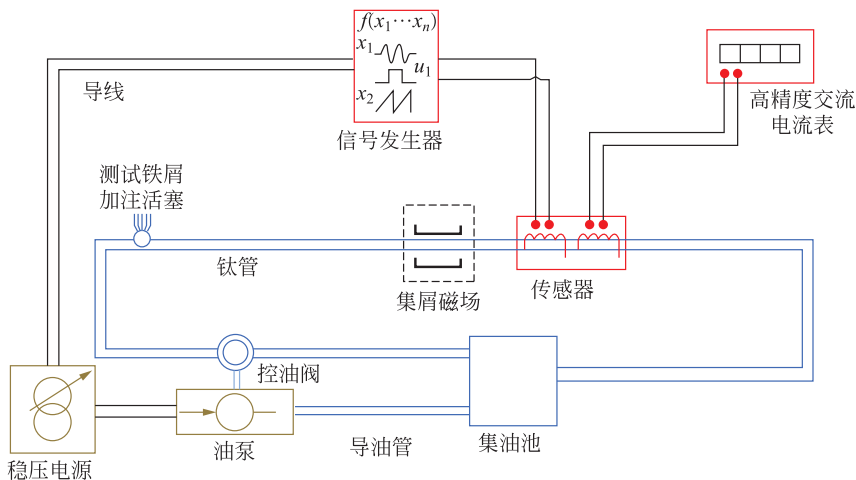


图3 铁磁颗粒含量测试系统原理图

2) 放大器件的选择

由于传感器输出的是交流信号。在本系统中,采用 LM324 进行信号的放大,LM324 可以完成交流电压信号的放大,放大的交流电压信号经全波整流电路后再滤波得到直流信号,从而完成信号的转换^[13]。

3) A/D 转换芯片的选择

本设计采用 TLC549 进行 A/D 转换。A/D 转换是本系统的核心器件,是前端信号采集和数码管显示同单片机之间联系的枢纽,它的优劣对整个系统的检测精度和稳定性起着至关重要的作用。在本系统中 A/D 转换芯片用于实现电压信号到数字信号的转换^[14]。

4) 单片机的选择

本设计单片机型号选用 8 位微处理器 STC89C52。在本论文要研究的监测设计中,单片机是必不可少的部分,它作为整个系统的控制核心,起着重要的作用。在本系统中单片机用于控制 TLC549 转换器工作并取得监测数据,同时对数据进行处理并通过 CH451 送给数码管,最后把监测结果显示在数码管中^[15]。

5) 数码管驱动芯片的选择

本设计采用 CH451 作为数码管驱动芯片。在本系统中,数码管驱动芯片接收单片机输入的数据,然后把数据送到数码管中并驱动数码管进行数字显示^[16]。

3.3 数码管显示电路设计

根据系统的要求设计硬数码管显示的电路,如图 5 所示,该电路可以接收单片机输入的数据并把监测结果显示在数码管中,其中 $P0^0, P0^1, P0^2$ 为 TLC549 与单片机的连接引脚,首先由 LM324 的 $A_{IN}(+)$ $A_{IN}(-)$ 输出至 TLC549 的 A_{IN} 端,再由 TLC549 中的上述三引脚与单片机相连,这样就构成了整个硬件电路的设计。

3.4 系统总体 C 语言编程逻辑

系统 C 语言的编程可分为两大部分:一部分是 A/D 转换芯片 TLC549 的编程,另一部分是数码管显示程序的编程。根据 TLC549 各引脚功能和数码管显示的原理,系统总体 C 语言编程逻辑流程图如图 6 所示,这一流程实现了电压信号到数字信号的转换,并把监测结果显示在数码管中。

4 实验结果与分析

4.1 信号的放大整流测试

本设计的信号源采用标准信号发生器所输出的频率为 353Hz、幅度为 3.94V 的正弦交流信号。该信号是由自制的传感器所输出的正弦交流信号,信号幅度为 270mV,频率为 353Hz。半波整流信号显示的电压为 0.37V,输入的电压 X_i 为 270mV,反馈电阻 R_f 为 40k Ω ,输入电阻 R_s 为 15k Ω ,则输出的电压为

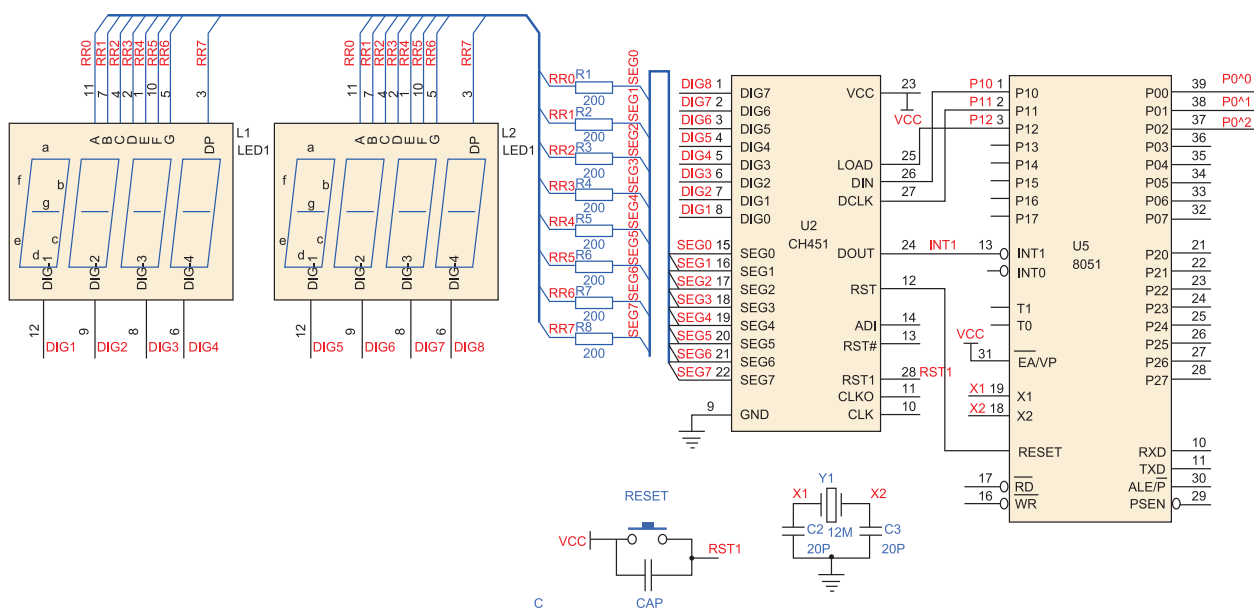


图 5 数码管显示电路设计图

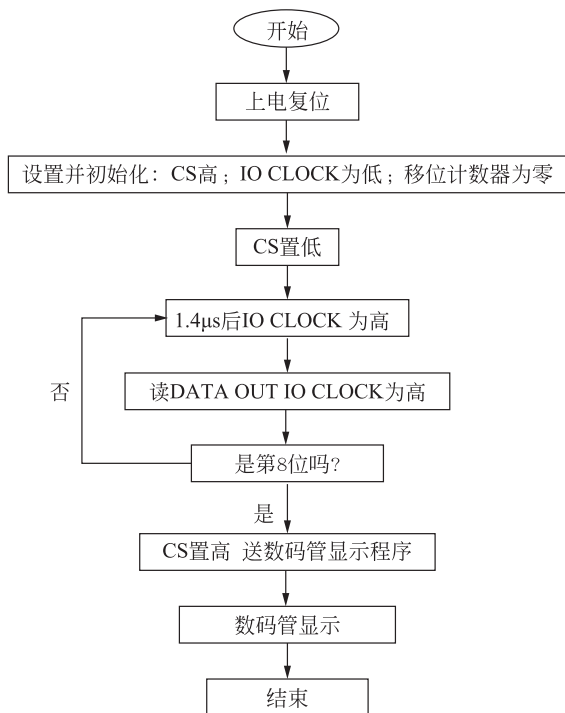


图6 系统总体C语言编程逻辑流程图

$$X_0 = [\sqrt{2}(1 + R_f/R_3)X_i]/4 = 350\text{mV} \quad (10)$$

与半波整流信号所显示的 370mV 相近,所以传感器信号半波整流放大信号测试结果良好。

4.2 数码管显示部分测试

数码管驱动程序采用开发板上的数码管驱动芯片作为 A/D 结果的显示,显示为 0.37V,与半波整流信号所显示的 0.37V 一致,说明本设计 A/D 模数转换、单片机计算及数码管显示非常精确。

4.3 模拟测试

本部分通过已经设计好的硬件和软件系统,在传感器中加入一定量的铁磁性物质来模拟润滑油中的铁磁性磨粒,用以检测系统的好坏。加入铁磁性物质的半波放大整流信号所显示的电压值为 428mV,比加入之前的半波整流信号所显示的 370mV 高了 58mV。同时加入铁磁性物质后数码管显示的值为 0.41V,与加入之前的数码管显示的 0.37V 的差值是 40mV,根据传感器前端的电阻 1.1Ω 得到电流为 36.36mA,根据式(9)算得引起变化的铁磁性物质质量,即加入的铁磁性物质质量为 0.17g,与实际加入的铁磁性物质质量 0.18g 相近。测试的结果表明系统在 STC89C52 的控制下,能顺利完成润滑油中磁性磨粒的数据

采集、A/D 转换、显示等功能。

从模拟测试实验结果可以看出,本文设计的实验仪器具有较高的精度,实验相对误差为 5.56%。经过多次实验后总结得出,本实验中,测量误差主要来源于:

(1) 交流信号放大的误差。集成运放芯片 LM324 对放大的要求较高,若 R_f 超出了放大的范围或者电压过低都会影响放大的结果,造成失真,因此本部分是误差产生的主要原因;

(2) 半波整流的误差。半波整流采用的二极管的压降和放大器输出的电压有很大的关系,同时半波整流采用的电容也会对实验产生较大的影响,是可能的误差来源;

(3) 单片机和数码管驱动芯片产生的异常值。经过长期测试和数据统计,数据的出错率能控制在万分之三左右,可能会产生随机误差;

(4) 传感器本身的误差。经过多次测试,传感器误差率在万分之一左右,可能会产生随机误差。

5 结语

本文设计了一套基于法拉第电磁感应原理的铁磁颗粒测量物理实验仪器,通过自开发传感器确定了检测信号变化与铁磨粒含量之间的定量关系,并通过放大整流滤波、A/D 转换、单片机控制和数码管显示环节,实现了润滑油中的磁性磨粒数据的采集、A/D 转换与显示等功能。创新性的提出非介入式的铁磁颗粒含量的测量方案。设计了差分放大电路,有效地放大了参考线圈和测量线圈的电压差值,实现了非正常磨损铁磁性磨粒的非接触式定量检测。

综上,该实验仪器测量精确、结构简单,除了工程应用价值外,学生可以通过感应电流或者感应电压来确定润滑油的铁磁颗粒含量,可作为大学物理实验的验证性仪器设备。

参考文献

- [1] 武伟超,吴佳珊,马舒凡. 油液检测在机械设备中的应用[J]. 建筑机械, 2023(S1): 62-64.
WU W C, WU J S, MA S F. Application of oil detection in mechanical equipment[J]. Construction Machinery, 2023(S1): 62-64. (in Chinese)
- [2] 崔桂成,张礼华,曹伟,等. 船舶柴油机油液检测装置设计及

- 其关键技术[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(1): 122-125.
- CUI G C, ZHANG L H, CAO W, et al. Design and key technology of marine diesel engine oil detection device[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(1): 122-125. (in Chinese)
- [3] 李娟, 刘文军, 段宇, 等. 煤矿设备油液监测系统的开发与应用研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(5): 134-137.
- LI J, LIU W J, DUAN Y, et al. Research on development and application of oil monitoring system for coal mine equipment[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(5): 134-137. (in Chinese)
- [4] 侯媛媛, 李江红, 张朝. 航空发动机滑油磨粒检测技术研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(12): 180-184.
- HOU Y Y, LI J H, ZHANG C. Research on the detection technology of aeronengine lubricating oil wear debris[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(12): 180-184. (in Chinese)
- [5] 殷雄, 崔洪帅, 刘雪婧, 等. 基于近红外光谱技术的润滑油磨粒含量检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(3): 816-825.
- YIN X, CUI H S, LIU X J, et al. Study on the detection of wear particle content in lubricating oil based on near-infrared spectroscopy technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2025, 45(3): 816-825. (in Chinese)
- [6] 刘威, 温鹏, 周诗超, 等. 基于卡尔曼滤波的油液金属磨屑检测系统[J]. 长江信息通信, 2023, 36(3): 40-43.
- LIU W, WEN P, ZHOU S C, et al. Oil metal abrasive swarf detection system based on Kalman filtering [J]. Changjiang Information & Communications, 2023, 36(3): 40-43. (in Chinese)
- [7] 籍明慧, 薛欣. 基于电磁感应原理的金属类型检测电路的设计与研究[J]. 电工技术, 2024(13): 105-106, 109.
- JI M H, XUE X. Design and study of metal detection circuit based on electromagnetic induction principle [J]. Electric Engineering, 2024(13): 105-106, 109. (in Chinese)
- [8] 李博涵, 邵燕宁, 曹子君, 等. 空间自适应的被动声源定位系统的设计[J]. 物理与工程, 2024, 34(1): 106-113, 136.
- LI B H, SHAO Y N, CAO Z J, et al. Design of spatial adaptive passive sound source location system [J]. Physics and Engineering, 2024, 34(1): 106-113, 136. (in Chinese)
- [9] 杨振清, 丁凯洋, 林春丹, 等. 一种新型的电容式角度位移测量仪[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 152-154.
- YANG Z Q, DING K Y, LIN C D, et al. A new capacitive displacement and angle measuring instrument [J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 152-154. (in Chinese)
- [10] 王锦辉, 赵西梅, 孙存英, 等. 利用智能手机磁传感器研究磁阻尼摆运动[J]. 物理与工程, 2022, 32(4): 145-149, 182.
- WANG J H, ZHAO X M, SUN C Y, et al. Analyzing magnetic damping pendulum with smartphone magnetic sensor [J]. Physics and Engineering, 2022, 32(4): 145-149, 182. (in Chinese)
- [11] XIE Y C, CHEN J L, LI G Q, et al. Characterization and superposition regularity of aliasing signal based on the micro-three-coil sensor [J]. Sensors and Actuators: A. Physical, 2025, 387: 116386.
- [12] GU C Z, ZHANG Z, ZHANG S X, et al. Design and detection performance of metal contaminant sensor with triple coil structure [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 13(1): 59.
- [13] 林江河. 基于 LM324 的信号发生器电路设计与仿真 [J]. 仪表技术, 2024(6): 74-78.
- LIN J H. Design and simulation of signal generator circuit based on LM324 [J]. Instrumentation Technology, 2024(6): 74-78. (in Chinese)
- [14] 陈春燕. 智能路灯控制系统设计与仿真实现 [J]. 科技与创新, 2023(7): 71-74.
- CHEN C Y. Design and simulation implementation of intelligent street lamp control system [J]. Science and Technology & Innovation, 2023(7): 71-74. (in Chinese)
- [15] 周浩. 基于 STC89C52 单片机的小球滚落计时系统设计 [J]. 轻工科技, 2024, 40(1): 109-112, 141.
- ZHOU H. Design of small ball rolling timing system based on STC89C52 single-chip microcomputer [J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2024, 40(1): 109-112, 141. (in Chinese)
- [16] 张蓓蕾, 祁永福, 颜清, 等. 基于大数据的电力网络监控仪表流量监控预警系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022(7): 329-333.
- ZHANG B L, QI Y F, YAN Q, et al. Design a traffic data monitoring pre-warning system of power network monitoring instrument based on big data [J]. Automation & Instrumentation, 2022(7): 329-333. (in Chinese)