

基于径向交变磁场的油液磨粒传感器设计

万真志 王衍学 陈志刚

(北京建筑大学机电与车辆工程学院 北京 100044)

摘要:随着现在工业技术的快速发展,大型复杂机械设备在生产生活中大量长时间使用,因此不可避免的会有零件磨损,磨损产生的颗粒会掺杂在润滑油液中,因此对于油液中的颗粒检测对于设备的状态监测尤为重要。本文设计了一种可以产生径向交变磁场油液磨粒传感器,基于电磁感应原理使用交变电流驱动避免了直流驱动传感器发热的问题,使用 Maxwell 软件对于传感器内部磁场分布进行建模,分析各结构参数对于传感器输出信号所产生的影响,对于强化磁场的铁芯尺寸进行了仿真并分析了传感器内部的磁场变化,同时设计了相应的信号处理电路和激励信号的发生电路,传感器最终实现了在 8 mm 流道中对于 200 μm 铁磁性磨粒和 500 μm 非铁磁性磨粒的检测。

关键词:油液磨粒;径向磁场;平面线圈;Maxwell

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Design of oil debris sensor based on radial alternating magnetic field

Wan Zhenzhi Wang Yanxue Chen Zhigang

(School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of
Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: With the rapid development of industrial technology, large and complex machinery equipment are used for a large number of long periods of time in production, so it is inevitable that there will be wear of parts, and the debris generated by wear will be doped in the lubricating oil, so the detection of debris in the oil is particularly important for the condition monitoring of the equipment. Based on the principle of electromagnetic induction, the use of alternating current drive avoids the heating problem of DC drive sensor. Maxwell software is used to model the internal magnetic field distribution of the oil debris sensor, analyze the influence of various structural parameters on the output signal of the sensor, simulate the core size of the strengthened magnetic field and analyze the magnetic field change inside the sensor, also design the corresponding signal processing circuit and the excitation signal generation circuit. The sensor finally realizes the detection of 200 μm ferromagnetic abrasive grains and 500 μm non-ferromagnetic abrasive grains in the 8 mm flow channel.

Keywords: oil debris; radial magnetic field; planar coils; Maxwell

0 引言

对于机械设备中高速旋转和往复运动部件的状态监测尤为重要,其运动特性导致零部件更易磨损,通常这类零部件都通过油液进行润滑,磨损产生的金属碎屑会随润滑油路进行循环,因此对于油路中的金属磨粒的大小及含量进行监测可以准确判断和预测机械设备的健康状

态,是装备服役状态及诊断故障根源的重要依据^[1],通过判别磨粒的材质可以定位零件损坏的位置,降低设备维修难度。就像使用血液检测来辅助诊断疾病一样,对于油液中金属颗粒的分析可以对机械可能会产生的故障进行诊断和预估^[2-3],提高了设备状态监测的实时性,避免了因停机检测造成的经济损失,增强机械设备长时间运转的可靠性。电感式油液磨粒传感器因其成本低、结构简单、便于安装并且可以实现铁磁性和非铁磁性金属磨

粒进行区分,不侵入油道的优点^[4],是目前最有潜力的在线油液磨粒监测技术之一,广泛运用于液压系统的磨损监测^[5]、航空发动机工作状态评估^[6]等领域。国外研发的电磁式检测传感器有加拿大 Gas TOPS 公司 Metal SCAN、美国 MA-COM 公司 techalerttm10 等^[7-8]。美国的阿克伦大学的 Murali 等^[9]通过检测微流体通道(100 μm)中一对微电极的电容变化来检测金属颗粒,可以检测到 10 μm 左右的金属碎屑颗粒。国内大连海事大学的孙广涛等^[10]针对微流体和微线圈(管径约 300 μm)对油液金属颗粒在线检测研究较多。重庆邮电大学的 Xiao 等^[11]设计了一种高梯度磁场的油液磨粒传感器该传感器将一个 L 形铁芯缠绕上 2 000 匝铜线作为激励线圈,通过铁芯的磁路在上方的气隙中产生一个高梯度的恒定磁场,在激励线圈上方为 7 000 匝的感应线圈,通过对于金属的磁化效应对于磨粒进行检测。中北大学的白文斌等^[12]设计了一款三线圈电感式的磨粒检测系统,基于 FPGA 的采集方案对于传感器的灵敏度进行了建模优化,解决了高通量传感器精度低的问题,最终实现油液流量为 5~10 L/min 的工况下实现 500 μm 铁磨粒和 1 000 μm 铜磨粒的检测。北京理工大学的郑长松等^[13]通过建立三线圈电感式传感器数学模型并结合锁相放大技术对磨感电动势进行提取。李萌等^[14]分析了激励频率、磨粒大小对传感器感应电动势的影响。吴超等^[15]通过 JMAG Designer 建立传感器的二维有限元模型,得到磨粒运动过程中线圈磁场与感应线圈中感应电压的变化规律。西北工业大学的郭静英等^[16]利用 Maxwell 有限元仿真软件分析了不同磨屑进入传感器后螺线管磁场及线圈感应电动势的变化。文献^[17]将两个单层平面线圈正对排布在微通道两侧,通过调节激励源实现电感电容模式的切换,其中电容模式可以实现对水和气泡的检测。北京航空航天大学的 Hong 等^[18]设计了一种 C 形铁芯的油液磨粒传感器,这种传感器产生的磁场方向是径向分布的,径向分布比轴向分布的磁场密度大,相同的磨粒检测体积下,径向分布方式具有更高的灵敏度。

现有的轴向磁场的油液磨粒传感器普遍有体积较大工作时线圈发热量较高且磁场分布不均的缺点,本文设计了一种交流激励径向磁场驱动的平面线圈传感器,避免了直流激励驱动传感器长时间工作发热的缺点,也缩小了线圈匝数,减小了整体传感器的体积。

1 传感器检测原理

传感器的设计是由两个激励线圈一个感应线圈所构成,其结构如图 1 所示。

基于电磁感应定律,使用上下两个带有铁芯的平面线圈通入正弦交流信号作为激励,两个激励线圈在油路

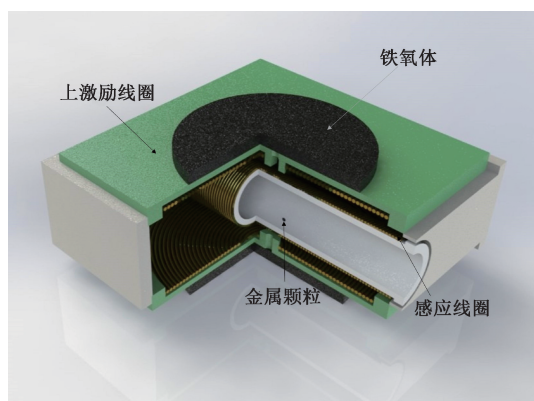


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure

径向产生相反方向的交变磁场,理想情况下两磁场沿油路轴向对称并相互抵消,当金属颗粒通过磁场范围时会影响径向磁场的扰动导致中心磁场不平衡,缠绕在油路管道上的感应线圈接收到由磨粒产生的微小扰动后输出磨粒信号。

油路中的金属磨粒大致分为铁磁性、顺磁性和逆磁性 3 种。铁磁性和顺磁性磨粒有较大的磁导率,在磁场中会导致材料内部的磁偶极子朝一定方向排列,导致磁化后产生与外磁场极性相同的磁场^[19]。在磁场中的逆磁性磨粒内部的磁偶极子会反方向对齐,使磨粒产生与外部磁场相反的磁场。综上所述,铁磁性和顺磁性磨粒会使外部磁场增强,如图 2(a) 所示,而逆磁性磨粒会削弱磁场,如图 2(b) 所示。基于此原理可使传感器感应出金属磨粒信号并根据输出信号的方向和幅值来区分磨粒种类和大小。

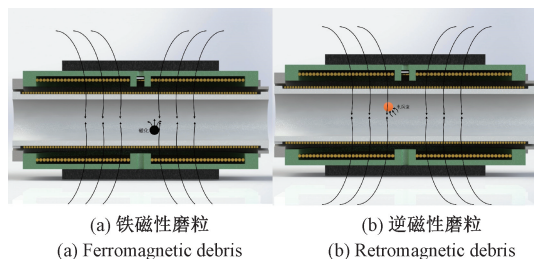


图 2 不同种磨粒通过传感器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different abrasive grains passing through the sensor

2 激励线圈及电路设计

根据毕奥-萨法尔定律,单个环形导线在空间中产生的磁场强度 B 为:

$$\vec{B} = \int d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

通过式(1)可知,环形线圈中通入电流可以使线圈产生磁场,若通入正弦交流电流则可产生高频交变磁场。单个平面线圈在传感器内部 x, y, z 方向磁场场强大小变化如式(2)~(4)所表示。

$$B_x = \frac{\mu_0 I r_0 z}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\theta d\theta}{[(x - r_0 \cos\theta)^2 + (y - r_0 \cos\theta)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I r_0 z}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\theta d\theta}{[(x - r_0 \cos\theta)^2 + (y - r_0 \cos\theta)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_0(r_0 - y \cos\theta - x \cos\theta d\theta) d\theta}{[(x - r_0 \cos\theta)^2 + (y - r_0 \cos\theta)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

可以看出传感器中心处场强最大,场强大小随距中心距离变大而减弱。上下两线圈共同作用产生相互抵消的磁场,当磨粒进入平衡交变磁场产生扰动,并输出磨粒信号。

在实际工作的过程中,线圈中所通入的高频电流仅有 20 mA 左右,使线圈长时间工作的发热量得到有效的控制。

在交变磁场中金属磨粒会因为趋肤效应在其表面产生涡电流,从而产生削弱原磁场的涡流场。由于铁磁性和顺磁性磨粒的磁化效应所产生的磁场远大于其感应出的涡流场,所以该两种磨粒进入检测范围时仍可以增强磁场强度,从而输出幅值为正的脉冲电压信号。而适当提高交流激励频率可以使逆磁性磨粒感应出的涡流场增大,加强磨粒对于原磁场的削弱能力并输出幅值为负的脉冲电压信号,进一步提高对于逆磁性磨粒的检测精度。

使用 Maxwell 对于磁场频率进行参数扫描,扫描范围为 10~100 kHz,步长 5 kHz,分别使用 1 000 μm 铜磨粒和 500 μm 铁磨粒进行仿真,结果如图 3、4 所示。

由仿真结果可以看出随着激励磁场频率的提高逆磁性磨粒对于磁场的削弱效果增强,而铁磨粒对于磁场的加强效果会随着频率的增加而逐步减弱。当激励频率 60 kHz 左右时,两种磨粒对于外部磁场都有较好的扰动效果,故选则激励信号的频率为 60 kHz。

为了可以在激励源不变的情况下使激励线圈产生最大的磁场,还需要对于线圈匝数进行计算。

由式(1)可知,单匝线圈所产生的磁场大小计算公式为:

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (5)$$

根据式(5)可将激励线圈所产生的磁场强度表示为:

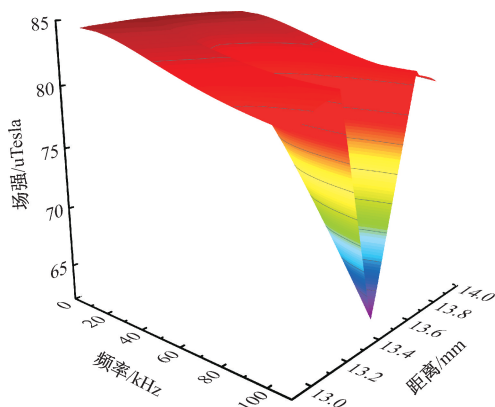


图 3 铜磨粒在不同频率下对于磁场的影响

Fig. 3 The effect of copper debris on the magnetic field at different frequencies

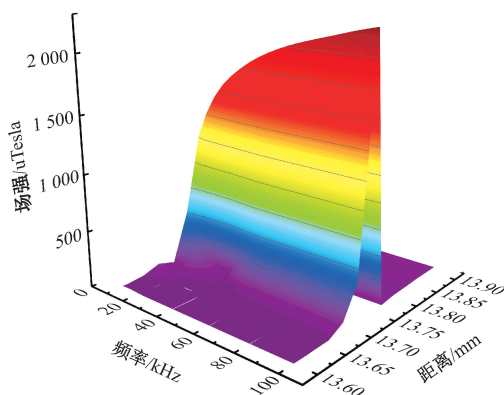


图 4 铁磨粒在不同频率下对于磁场的影响

Fig. 4 The effect of iron debris on the magnetic field at different frequencies

$$B = \frac{\mu_0 V}{2R(r_0^2 + (\frac{w_0(\frac{R}{25.4})^2 N^2}{(\frac{8R}{25.4}) + 22Nr})^{\frac{1}{2}})} \quad (6)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, V 为激励信号幅值, r_0 为线圈的电阻, $w_0 = 60$ kHz 为激励信号频率, R 为线圈半径随着匝数 N 增多而增大, $r = 0.0005$ m 为漆包线半径。

通过式(6)对于 1~50 匝平面线圈所产生的磁场分别进行计算,最终得到匝数 N 与磁场强度 B 的关系曲线,如图 5 所示。

由于线圈的阻抗随着线圈匝数的增多而增加,所以线圈所产生的磁场并不会随着匝数的增多而单调增大,当线圈匝数 $N = 23$ 时,线圈所激发的磁场强度达到最大。

为了使平面线圈在一定幅值的信号激励下激发出更强的磁场,可在线圈圆心背部放置圆柱形铁氧体,使磁极

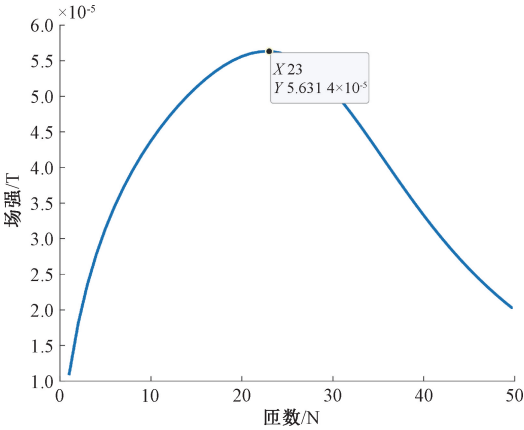


图 5 平面线圈匝数 N 与磁场强度 B 关系图

Fig. 5 Diagram of the number of turns N of the planar coil vs. the strength of the magnetic field B

性与通电线圈的磁场一致,以增强磁场^[20]。对比图 6 (a)与(b),证明在线圈背部的铁氧体可以对于线圈激发的磁场进行增强,同时屏蔽磁场对于另一侧的影响。

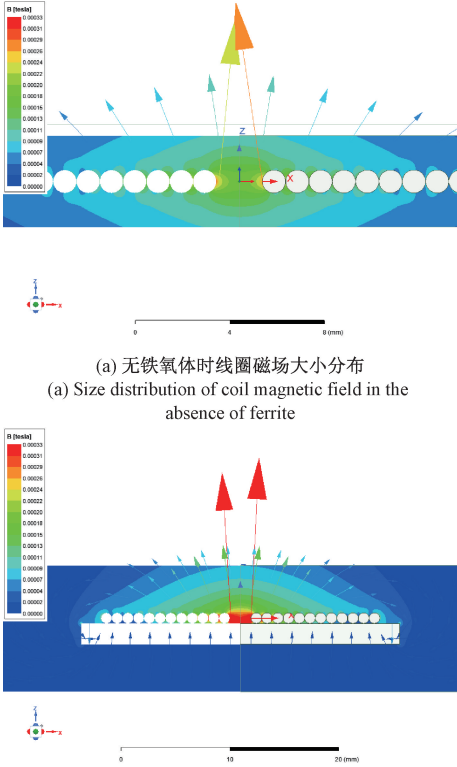


图 6 线圈磁场大小分布

Fig. 6 Distribution of coil magnetic field size

为确定铁氧体的外形参数对于磁场增强效果的影响,分别将半径 $X = 1 \sim 15$ mm,厚度 $Z = 1 \sim 5$ mm 的铁氧

体放置在相同匝数的线圈背部,针对每种尺寸对于线圈上方从左到右激发的磁场大小进行仿真分析,仿真结果如图 7 所示。

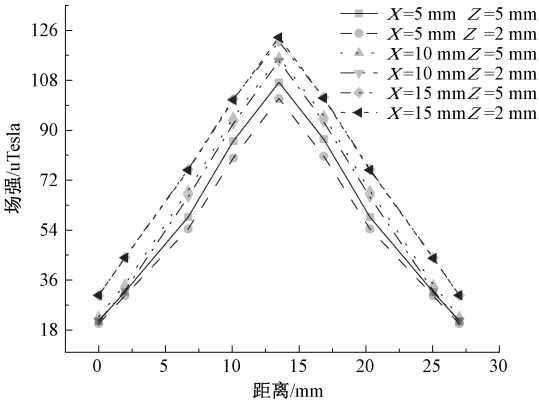


图 7 铁氧体尺寸对于线圈磁场大小的影响

Fig. 7 The effect of ferrite size on the magnetic field of the coil

由图 7 可知,线圈所产生的磁场从线圈外部至内部逐渐增大并且在 13 mm 线圈中心处达到最大,同时,随着铁氧体半径增加磁场的强度也在增加,在铁氧体半径 $X = 15$ mm,厚度 $Z = 2$ mm 时,对磁场增强的效果最好。

传感器在工作状态下内部径向磁场分布如图 8 所示。

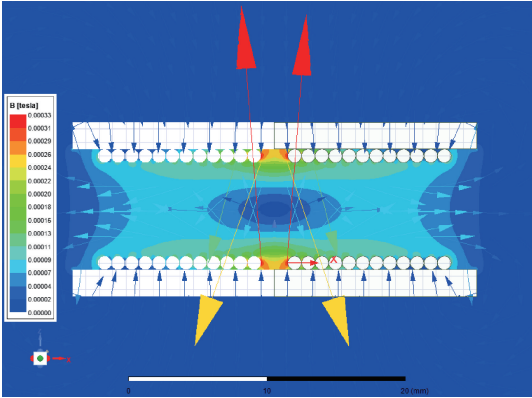


图 8 传感器内部磁场分布

Fig. 8 Magnetic field distribution inside the sensor

由图 8 可知,上下两个激励线圈所产生的磁场可以在检测区域对称分布并相互抵消,实现了在径向产生了一个较小的金属磨粒感应区域,金属磨粒在右左两侧时所感应到的磁场强度最小,越靠近中间磁场强度越大,满足实际使用需要。

采用 AD9833 DDS 芯片及其外围电路作为激励信号的发生装置^[21],该芯片通过 SPI 协议与 STM32 控制芯片进行通信,以设置信号频率和信号类型。为了使信号有理想的电流输出提高信号驱动能力,采用 LT1210 作为信号的功率放大芯片,其最高可以输出 1.1 A 的电流,可以

满足驱动平面线圈激发理想的磁场大小。

激励信号发生器电路拓扑如图 9 所示。

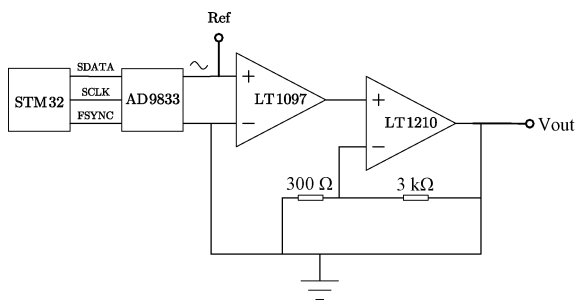
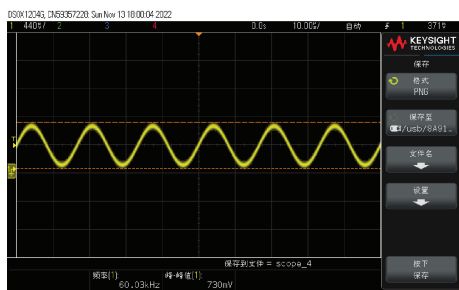


图 9 信号发生器电路拓扑

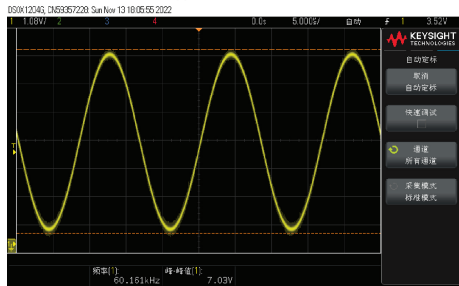
Fig. 9 Topology of signal generator circuit topology

图 10(a) 为 AD9833 输出信号, 图 10(b) 为经 LT1210 放大后的功率信号。



(a) 输出信号

(a) Output signal



(b) 功率信号

(b) Power signal

图 10 激励信号示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the stimulus signal

对比图 10(a) 和(b)可知,该电路可以准确生成激励信号并放大 10 倍使其有足够功率驱动线圈产生理想的交变磁场。

3 感应线圈及电路设计

磨粒产生的微小磁场扰动会被感应线圈捕获产生感应电流,恰当的线圈匝数可以使感应线圈输出的感应电流达到最大,提高传感器的灵敏度。

由法拉第电磁感应定律得知,感应线圈的输出电压

V 的表达式为:

$$V = N \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (7)$$

根据式(7)可将感应线圈输出电流 I_{out} 大小与线圈匝数 N 的数学表达式写为:

$$I_{out} = \frac{N}{(r_0^2 + (\frac{w_0 \mu_0 N^2 A}{l})^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

其中, N 为感应线圈匝数, 频率 $w_0 = 60$ kHz, A 为感应线圈漆包线的截面积, l 为感应线圈长度, r_0 为纯铜线阻值。

由图 11 可知,当感应线圈匝数为 199 匝时,所感应出来的感应电流达到最大。

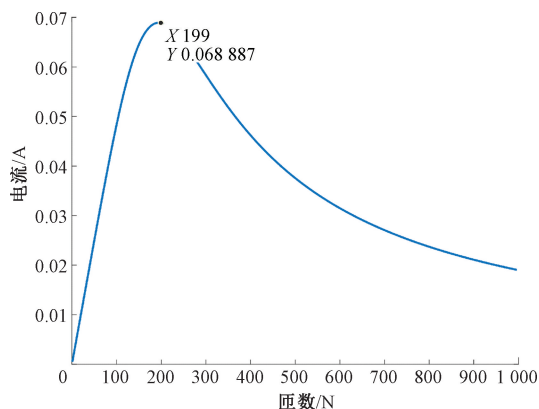


图 11 感应线圈匝数 N 与电流 I 的关系

Fig. 11 The relationship between the number of turns N of the induction coil and the current I

感应线接收的磨粒信号将混杂在噪声与高频载波信号当中,因此将信号完整清晰的解调出来是电路设计的第一目的。由于采用已知信号作为驱动信号,因此采用相干解调技术能更加高效精准的进行信号解调。

调理电路如图 12 所示。

通过前置放大后得到金属磨粒原始信号为 A , 载波信号为 $\cos(\omega_0 t + \theta)$, 则在感应线圈中感应到的磨粒调制信号为 $A \cos(\omega_0 t + \theta)$ 。因此引入相干的参考信号 $\cos(\omega_0 t + \theta)$ 进行解调,解调后的信号 V_{out} :

$$V_{out} = 2A \cos(\omega_0 t + \theta) \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (9)$$

最终得到:

$$V_{out} = \frac{A}{2} + \frac{A}{2} \cos(2\omega_0 t + 2\theta) \quad (10)$$

由式(10)可知,相干解调后会导致原始信号衰减一倍并同时产生一个高频信号 $\frac{A}{2} \cos(2\omega_0 t + 2\theta)$, 通过低通滤波器得到所需磨粒信号 A 。

低通滤波器为无限增益多路负反馈的二阶巴特沃斯

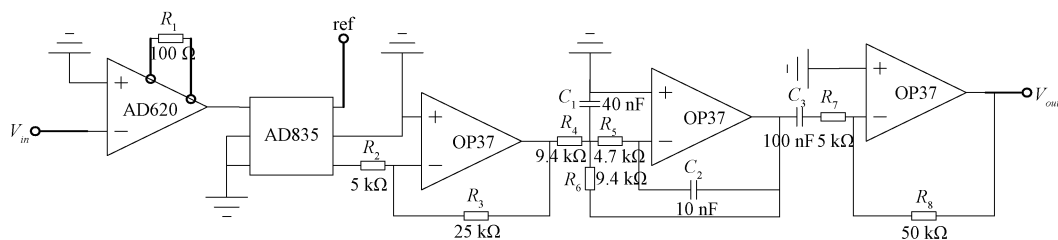


图 12 信号调理电路拓扑

Fig. 12 Topology of signal conditioning circuit

滤波器,其截止频率为 1.1 kHz,频率响应曲线如图 13 所示。

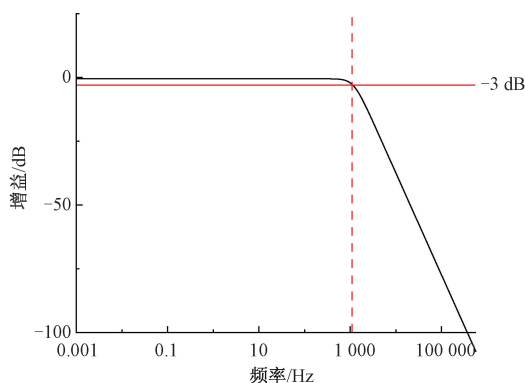


图 13 低通滤波器频率响应曲线

Fig. 13 Low-pass filter frequency response curve

4 实验

试验前准备了 1 000~100 μm 的铁颗粒和 1 000~400 μm 的铜颗粒,用热缩管进行标注封装。

制备好样本后调节两路 DDS 信号发生器波形为同频同相的 60 kHz 正弦波,一路经过功率放大接入激励线圈,另一路作为参考信号进行解调,此时观察到无磨粒时传感器输出信号 V_{pp} 如图 14 所示。

由于环境中存在电磁波以及工频干扰,使传感器在无磨粒状态下可以感应到主频为 150 kHz,幅值为 3 mV 左右的噪声信号。

将空热缩管通过传感器,波形无变化,证明单热缩管对于传感器感应无影响,将金属磨粒包裹在热缩管中进行试验可以准确反映磨粒通过传感器时感应信号的变化。

依次将包裹 6 种不同材质和大小金属颗粒的热缩管完全通过传感器,依次记录感应信号的峰峰值和波形。

图 15 为 300 μm 的铁颗粒的传感器输出信号,峰峰值为 35 mV,信号特点为先负后正的类正弦波。

图 16 为 500 μm 的铜颗粒的传感器输出信号,峰峰值为 10 mV,信号特点为先正后负的类正弦波。

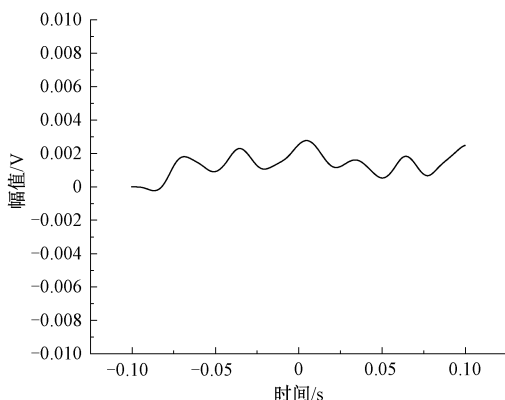


图 14 无磨粒时传感器输出波形

Fig. 14 The sensor outputs waveform in the absence of abrasive particles

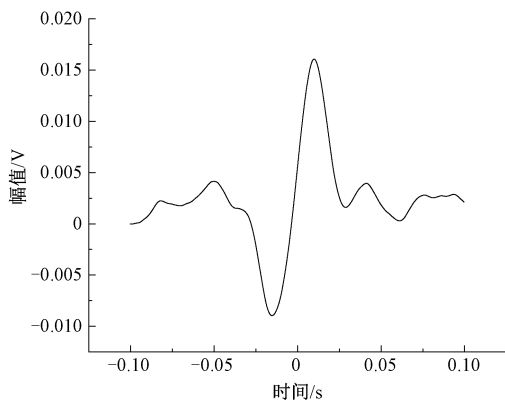
图 15 300 μm 铁磨粒信号Fig. 15 300 μm iron debris signal

图 17 记录了 1 000~100 μm 不同大小的铁颗粒和铜颗粒通过传感器时示波器所采集信号的峰峰值大小,可以看出该传感器对于铁磨粒的检测相较于铜磨粒更精准且颗粒越小检测难度越高。

为证明交变电流驱动可以使传感器更加稳定的工作,同时将两组线圈分别通入直流电源与交变电源进行温度测试。第 1 组线圈在直流电流 1 A 大小的工况下,传感器在短时间有明显发热情况,长时间工作时线圈因高温烧断导致传感器失效。第 2 组线圈在大小为 1 A 交变电流的工况下,传感器温度并无明显变化,长时间使

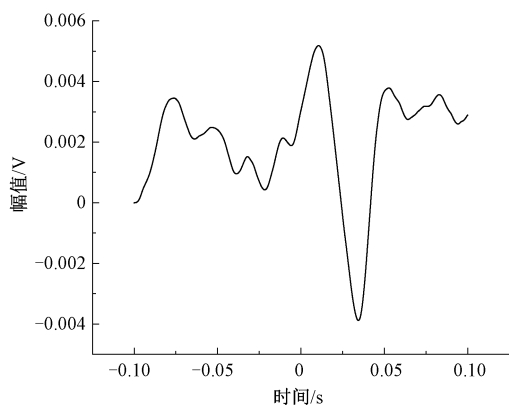
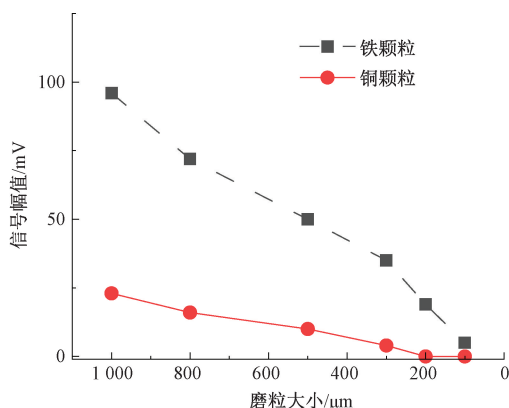
图 16 500 μm 铜磨粒信号Fig. 16 500 μm copper debris signal

图 17 不同大小磨粒的输出信号峰峰值

Fig. 17 Output signal peak-to-peak of different sizes of abrasive particles

用性能也与起始状态无异。

综上,该传感器可以通过信号的方向来区分不同磁性的磨粒,并且磨粒尺寸越大感应信号越大,而交变磁场的设计解决了传感器长时间工作发热的问题。本传感器最小可以采集到的铁磁性磨粒尺寸为 200 μm 球形颗粒,非铁磁性磨粒的尺寸为 500 μm 球形颗粒。

5 结 论

本文设计了一种基于交变磁场的平面线圈传感器,建立了激励线圈模型通过电磁场仿真得到合理的激励信号频率,并针对平面线圈的匝数设计进行了优化,根据感应信号的特点设计了信号的调理电路。试验结果表明该传感器可以对于不同磁性的磨粒进行检测并区分并且在工作时无明显发热情况,可对于油液进行长时间持续性监测。传感器最小可以采集到 200 μm 铁磁性磨粒,500 μm 非铁磁性磨粒,且输出的幅值信号特点清晰,降低了采集设备对于信号采集的难度,对于后续油液磨粒在线监测设备的开发提供了支持。

参考文献

- [1] 王奕首,吴迪恒,朱凌,等. 滑油磨粒在线传感技术研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3): 73-83.
WANG Y SH, WU D H, ZHU L, et al. Progress on online sensing technology for wear debris in lubricant [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 73- 83.
- [2] VAMSI I, SABAREESH G R, PENUMAKALA P K. Comparison of condition monitoring techniques in assessing fault severity for a wind turbine gearbox under non-stationary loading [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124: 1-20.
- [3] PRABHAKARAN A, JAGGA C R. Condition monitoring of steam turbine-generator through contamination analysis of used lubricating oil [J]. Tribology International, 1999, 32(3): 145-152.
- [4] 萧红,周威,罗久飞,等. 一种高梯度静磁场感应式全流量磨粒监测传感器[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 10-18.
XIAO H, ZHOU W, LUO J F, et al. An inductive sensor based on the high-gradient static magnetic field for full flow debris monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 10-18.
- [5] 史皓天,张洪朋,王文琪,等. 一种液压油磨粒检测新方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 44-51.
SHI H T, ZHANG H P, WANG W Q, et al. Research on a novel method for detection of wear debris in hydraulic oil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 44-51.
- [6] 孙衍山,杨昊,佟海滨,等. 航空发动机滑油磨粒在线监测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1561-1569.
SUN Y SH, YANG H, TONG H B, et al. Research on a novel method for detection of wear debris in hydraulic oil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1561-1569.
- [7] MILLER J L, KITALJEVICH D. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment [C]. IEEE Aerospace Conference, 2000: 49-56.
- [8] FAN X, LIANG M, YEAP T. A joint time-invariant wavelet transform and kurtosis approach to the improvement of in-line oil debris sensor capability [J]. Smart Materials & Structures, 2009, 18(8): 1-13.
- [9] MURALI S, JAGTIANI A V, XIA G, et al. A microfluidic coulter counting device for metal wear detection in lubrication oil [J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(1): 16-105.
- [10] 孙广涛,张洪朋,顾长智,等. 高精度微流体多参数液压油检测芯片设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2):

- 59-66.
SUN G T, ZHANG H P, GU CH ZH, et al. High precision microfluidic multi-parameter hydraulic oil detection chip design[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 59-66.
- [11] XIAO H, WANG X, LI H, et al. An inductive debris sensor for a large-diameter lubricating oil circuit based on a high-gradient magnetic field[J]. Applied Sciences, 2019, 9(8): 1546.
- [12] 白文斌, 李凯. 三线圈电感式油液金属磨粒检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 78-85.
BAI W B, LI K. Three coil inductive oil metal abrasive particle detection system[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(1): 78-85.
- [13] 郑长松, 李萌, 高震, 等. 电感式磨粒传感器磨感电动势提取方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2016, 36(1): 36-41, 196.
ZHENG CH S, LI M, GAO ZH, et al. Inductive abrasive particle sensor grinding induction electromotive force extraction method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(1): 36-41, 196.
- [14] 李萌, 郑长松, 李和言, 等. 电感式磨粒在线监测传感器的激励特性分析[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(6): 19-22, 30.
LI M, ZHENG CH S, LI H Y, et al. Analysis on incentive characteristic of inductance wear particle on-line monitoring sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(6): 19-22, 30.
- [15] 吴超, 郑长松, 马彪. 电感式磨粒传感器中铁磁质磨粒特性仿真研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2774-2780.
WU CH, ZHENG CH S, MA B. Simulation study on the characteristic of ferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 2774-2780.
- [16] 郭静英, 赵志龙, 陈森, 等. 二节螺线管式润滑油金属颗粒传感器研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018(1): 13-16.
GUO J Y, ZHAO ZH L, CHEN S, et al. Research on lubricating oil metal debris sensor with two-segment solenoid [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(1): 13-16.
- [17] 曾霖, 张洪朋, 赵旭鹏, 等. 液压油污染物双线圈多参数阻抗检测传感器[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1690-1697.
ZENG L, ZHANG H P, ZHAO X P, et al. Hydraulic oil contaminant double coil multi-parameter impedance detection sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017, 38(7): 1690-1697.
- [18] HONG W, WANG S P, TOMOVIC M, et al. Radial inductive debris detection sensor and performance analysis [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12): 103-125.
- [19] Magnetic properties of ferromagnetic materials. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/magprop.html#c2>, (Accessed 23 September 2019).
- [20] ZHU X, ZHONG C, ZHE J. A high sensitivity wear debris sensor using ferrite cores for online oil condition monitoring[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(7): 075102.
- [21] 把鑫, 王吉芳, 左云波, 等. 基于 FPGA 的油液在线监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2015(6): 103-106.
BA X, WANG J F, ZUO Y B, et al. FPGA-based oil online monitoring system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(6): 103-106.

作者简介



万真志, 2021 年于北京建筑大学获得学士学位, 现为北京建筑大学硕士研究生, 主要研究方向为装备故障诊断与智能维护。
E-mail: nemowan@sina.com

Wan Zhenzhi received his B. Sc. degree from Beijing University of Civil Engineering and Architecture in 2021. He is now a M. Sc. candidate in Beijing University of Civil Engineering and Architecture. His main research interests include equipment fault diagnosis and intelligent maintenance.



王衍学, 2009 年于西安交通大学获得博士学位, 2010~2011 年为加拿大渥太华大学博士后, 现为北京建筑大学教授、博导, 主要研究方向为装备故障诊断与智能维护、剩余寿命与健康管理及信号处理与特征提取等。
E-mail: wyx1999140@126.com

Wang Yanyue received his Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2009 and postdoctoral fellow at the University of Ottawa in Canada from 2010 to 2011. Now he is a professor and Ph. D. supervisor of Beijing University of Architecture. His main research interests include equipment fault diagnosis and intelligent maintenance, RUL prognosis and health management, signal processing and feature extraction etc.



陈志刚, 2008 年于中国石油大学获得博士学位, 现为北京建筑大学教授, 主要研究方向为机电设备状态监测与故障诊断以及城市地下管道安全检测方面的研究等。
E-mail: chenzhigang@bucea.edu.cn

Chen Zhigang received his Ph. D. from China University of Petroleum in 2008. Now he is a professor in Beijing University of Civil Engineering and Architecture. His main research interests include condition monitoring and fault diagnosis of electromechanical equipment and safety detection of urban underground pipelines.