

DOI: 10.3901/JME.2022.12.010

# 一种用于油液磨粒监测的多线圈阻抗传感器<sup>\*</sup>

顾长智 史皓天 张洪朋 马来好 孙玉清  
(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

**摘要:** 液压油是机械设备的关键介质,其携带的磨粒可反映设备的运行状态,有效地预测设备的早期故障,达到预知维修。为了实现液压油磨粒监测,设计并研究一种多线圈阻抗传感器。其中硅钢片用来增强检测区域的磁场强度,双矩形检测通道可以充分利用磁场分布区域,从而提高传感器的检测精度和通量。串并联线圈的对比试验表明,线圈同向串联时,传感器具有较高的检测灵敏度,更适合于磨粒的监测。该多线圈阻抗传感器可根据电感脉冲信号的方向以及电阻和电感脉冲信号有无来判断区分金属磨粒的属性,可有效检测和区分的最小金属磨粒为 46  $\mu\text{m}$  的铁颗粒和 110  $\mu\text{m}$  的铜颗粒。此类阻抗式磨粒传感器基于电感和电阻两个参数进行检测可以获得更为准确的磨粒信息,弥补传统电感式传感器对非铁磁性金属磨粒检测精度有限的不足。

**关键词:** 阻抗式传感器;磨粒;液压油;多线圈

**中图分类号:** TP212; TH73

## Impedance Sensor with Multi-coil for Oil Debris Monitoring

GU Changzhi SHI Haotian ZHANG Hongpeng MA Laihao SUN Yuqing  
(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

**Abstract:** Hydraulic oil is the key medium of mechanical equipment. The wear debris carried in hydraulic oil can reflect the operating state of the equipment, effectively predict the early failure of the equipment, and achieve predictive maintenance. In order to monitor the wear debris in hydraulic oil, an impedance sensor with multi-coil is designed and studied. The silicon steel strips are used to enhance the magnetic field strength of the detection region, the rectangular channels can make full use of the magnetic field distribution region, thereby improving the detection sensitivity and throughput of the sensor. The comparison experiment of series-parallel coils shows that the sensor has higher detection sensitivity and is more suitable to detect wear debris when the coils are connected in series in the same direction. The impedance sensor with multi-coil can judge the properties of the metal debris according to the direction of the inductance signal and the presence or absence of the resistance and inductance signals. The smallest metal debris that can be detected and distinguished by the sensor are 46  $\mu\text{m}$  iron particle and 110  $\mu\text{m}$  copper particle. The impedance debris sensor can obtain more accurate debris information based on the two parameters of inductance and resistance, which makes up for the insufficiency of the limited accuracy of traditional inductance sensors for non-ferromagnetic metal debris.

**Key words:** impedance sensor; wear debris; hydraulic oil; multi-coil

## 0 前言

液压油作为机械设备的“血液”,具有传递能量、密封、冷却、润滑摩擦副等作用,油液的清洁程度及理化性质是系统健康运行的关键性指

标。据统计,超过 75% 的液压系统故障、约 60% 的发动机故障、38.5% 的齿轮故障都是由摩擦磨损引起的。油液中所携带磨粒的种类、尺寸、形状和浓度等富含各元件摩擦与磨损的重要信息,对机械设备的状态监测和故障诊断具有重要意义。在运行良好的设备中,零件摩擦产生的磨损碎片的大小通常保持在 10~20  $\mu\text{m}$ ,且其浓度较低;如果发生异常磨损,磨损碎屑的尺寸及浓度

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(51679022),大连市科技创新基金(2019J12GX023)和兴辽人才计划(XLYC20074)资助项目。20210905 收到初稿,20220106 收到修改稿

都会迅速增大<sup>[1-2]</sup>；若不及时维修机械设备或者更换油液，则会造成机械故障。随着技术的发展，基于各种原理的磨粒检测装置被研究开发，其主要有光学检测，声学检测，电容检测和电感检测等<sup>[3]</sup>。光学法测量精度高，但检测结果易受油液透光性的影响<sup>[4]</sup>；声学法可区分油液中的固体和气体污染物，但其检测结果的稳定性受环境噪声的干扰较大<sup>[5]</sup>；电容法可有效检测污染物浓度，但其测量精度易受油液酸值和含水率的影响<sup>[6]</sup>；电感法<sup>[7-8]</sup>基于电磁感应原理，根据磁化效应和涡流效应对磁场的增强和减弱来区分铁磁性和非铁磁性金属颗粒，其具有抗干扰能力强、性能稳定、可实现无损检测等优势，从而引起了广泛的关注和研究。

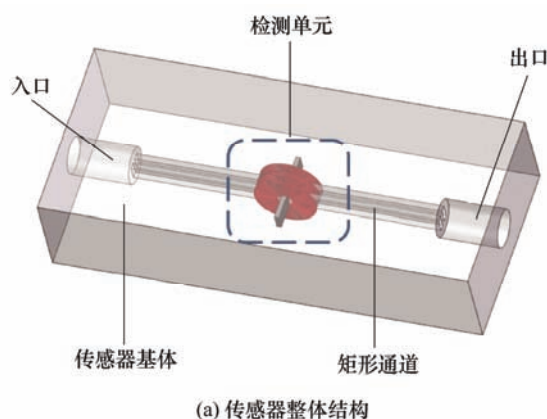
近年来，研究人员设计了三线圈<sup>[9]</sup>、单线圈<sup>[10]</sup>、双线圈<sup>[11]</sup>等多种结构的电感式磨粒传感器，并就如何提高传感器的检测精度和通量进行了研究。在提升检测精度方面，主要通过优化检测电路，改进信号提取方法以及增强检测区域磁场等方式来提升传感器的检测能力。通过优化检测电路，可以放大检测信号，抗干扰，提高传感器的稳定性。REN 等<sup>[12]</sup>将不平衡补偿电路应用于三线圈结构的电感式传感器中，从而提升传感器的灵敏度和稳定性。贾然等<sup>[13]</sup>提出使传感器工作于全谐振状态，其中激励线圈工作于并联谐振状态，感应线圈工作于串联谐振状态，共同增强颗粒引起的传感器输出感应电动势。为了从信号数据中准确获取磨粒产生的脉冲，不同的信号提取方法被应用于磨粒传感器中。LI 等<sup>[14]</sup>基于目标信号和干扰信号的特征，提出了一种基于小波域信息的新型油污特征提取技术，以提高磨粒测量能力。HONG 等<sup>[15]</sup>基于带通滤波器和相关算法的混合方法以提高所获得脉冲信号的信噪比，从而提升传感器的检测能力。通过增强检测区域磁场强度，可有效地提升电感式磨粒传感器的检测精度。HONG 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于双激励源的电感式传感器，该传感器包括用于产生静态磁场的永磁体和减小磁路磁阻的铁芯，该传感器可以检测直径为 12 mm 的管道中的 81  $\mu\text{m}$  铁颗粒。FENG 等<sup>[17]</sup>提出了一种基于高梯度磁场的感应式碎片传感器，可实现 25  $\mu\text{m}$  的铁磁性颗粒的检测。LIU 等<sup>[18]</sup>通过在电磁线圈周围添加磁粉的方式，来检测更小尺寸的金属磨粒。在提升传感器检测通量方面，WU 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于相分复用原理的多通道磨损碎片传感器，其中包含四个具有

400  $\mu\text{m}$  通道的传感单元。ZHU 等<sup>[20]</sup>基于时分复用原理的  $3 \times 3$  磨损碎片传感器阵列，实现了对多个通道的检测响应。此外，REN 等<sup>[21]</sup>设计了一种在激励线圈内部包括多个感应线圈的磨粒传感器，以实现提高检测效率。检测通道的横截面积在某种程度上标志着传感器的通量，但是较大的通道不能确保磨损碎片通过最敏感的区域，从而牺牲了检测灵敏度。因此，高灵敏度的传感器一般采用微通道(孔径  $< 1 \text{ mm}$ )。所以大通道电感传感器一般用于机械磨损状态在线监测，而微通道电感传感器则一般用于实验室检测以及制作成便携式装置对油液污染物进行检测。基于微流体芯片技术，本团队设计了多种油液磨粒传感器<sup>[22-23]</sup>，并通过设计环形检测通道的方式来确保磨粒可通过磁场分布最强的线圈内孔边缘<sup>[24]</sup>，此外还通过在线圈中添加硅钢片的方式来提高传感器的检测灵敏度<sup>[25]</sup>。

传统的电感式磨粒传感器只获取线圈的整体的阻抗变化，结果以感应电压的形式呈现，忽略了线圈阻抗的变化是交流电阻和电感共同作用的结果。本文介绍了一种多线圈阻抗传感器，其可同时检测电阻和电感信号，通过对比和分析两种参数的检测结果，可获得更为详细准确的磨粒信息。传感器中所添加的硅钢带可有效提升检测区域的磁场强度，从而提高传感器的灵敏度；而双矩形通道的设计则充分利用了磁场分布区域，从而提升检测通量。试验表明，三个线圈同向串联可获得更高的信号脉冲幅值以及信噪比，从而进一步提升检测灵敏度。

## 1 传感器设计

如图 1 所示，磨粒传感器主要包括通道入口，两个矩形检测通道，传感单元，通道出口，传感器基体。



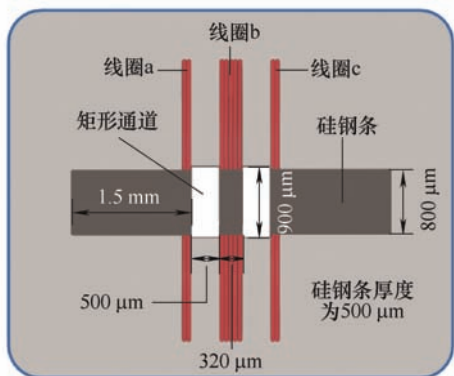


图 1 传感器设计

传感单元主要包括三个平行放置的平面线圈, 线圈之间的距离为  $500\text{ }\mu\text{m}$ , 且每个线圈的中心孔中都添加有硅钢条。线圈由  $70\text{ }\mu\text{m}$  的漆包线绕制而成, 每层 20 匝, 内径为  $900\text{ }\mu\text{m}$ 。中间的线圈为 5 层, 两侧的线圈为 3 层。硅钢条的厚度为  $300\text{ }\mu\text{m}$ , 宽度为  $800\text{ }\mu\text{m}$ 。中间硅钢条的长度为  $320\text{ }\mu\text{m}$ , 两侧硅钢条的长度为  $1.5\text{ mm}$ ; 矩形通道从线圈之间通过, 且正对硅钢条, 同时紧贴线圈, 其宽度为  $500\text{ }\mu\text{m}$ , 高度为  $900\text{ }\mu\text{m}$ 。为了可观察通道中颗粒物的流动状态, 传感器基体是采用透明的 PDMS 铸造而成。

## 2 阻抗检测原理

在对含有铁芯的线圈施加以交流电激励后, 电感线圈周围会产生交变磁场。此外具有高导磁性的铁芯被磁化, 产生新的磁场以增强检测区域的磁场强度, 从而提高了传感器的检测灵敏度。处于交变磁场中的金属颗粒内部主要会产生磁化效应和涡流效应, 涡流效应会削弱磁场, 而磁化效应会增强磁场。金属颗粒经过检测区域所引发的磁场变化会被线圈捕获, 总体表现为线圈阻抗的变化。

线圈的阻抗  $Z$  主要由线圈的交流电阻  $R$  和线圈的电感  $L$  两部分组成。

$$Z = R + j\omega L \quad (1)$$

式中,  $j^2 = -1$ ,  $\omega$  为激励频率。

线圈的交流电阻主要由三部分组成：线圈的直流电阻  $R_{dc}$ ，由集肤效应所产生的电阻  $R_s$ ，由临近效应所产生的电阻  $R_p$  [26]。

$$R = R_{dc} + R_s + R_p \quad (2)$$

在线圈中加入硅钢后，线圈的电感

$$L = \frac{\phi}{I} = \frac{\int (\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_s) dS}{I} \quad (3)$$

式中,  $\phi$  为线圈的磁通量,  $I$  为通过线圈的电流,  $B_0$  为线圈所产生的磁感应强度矢量,  $B_s$  为硅钢磁化后产生的磁感应强度矢量,  $S$  为磁场分布面积。

为确保线圈所产生的磁场不互相抵消, 本文所设计的传感器有两种连接方式: 同向串联, 同向并联。传感器中的线圈 a, 线圈 b, 线圈 c 的自感分别为  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$ 。线圈 a 和 b 之间的互感为  $M_{ab}$ , 线圈 a 和 c 之间的互感为  $M_{ac}$ , 线圈 b 和 c 之间的互感为  $M_{bc}$ 。

根据串联电路等效电感和交流电阻的计算公式, 线圈的串联等效电感为

$$L_{Seq} = L_a + L_b + L_c + M_{ab} + M_{ac} + M_{bc} \quad (4)$$

串联等效交流电阻为

$$R_{Sea} = R_a + R_b + R_c \quad (5)$$

根据并联电路等效电感和交流电阻的计算公式, 线圈并联等效电感为

$$L_{\text{req}} = \left( \begin{array}{ccc} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{array} \right) \quad (6)$$

并联等效交流电阻为

$$R_{P_{eq}} = \frac{R_a R_b R_c}{R_a R_b + R_a R_c + R_b R_c} \quad (7)$$

如图 2 所示, 铁磁性磨粒具有顺磁性特质, 在磁场中以磁化效应为主, 增强了线圈的电感; 非铁磁性磨粒具有抗磁性特质, 在磁场中以涡流效应为主, 减弱了线圈的电感; 金属磨粒通过检测区域时, 会对线圈原有的集肤效应和临近效应

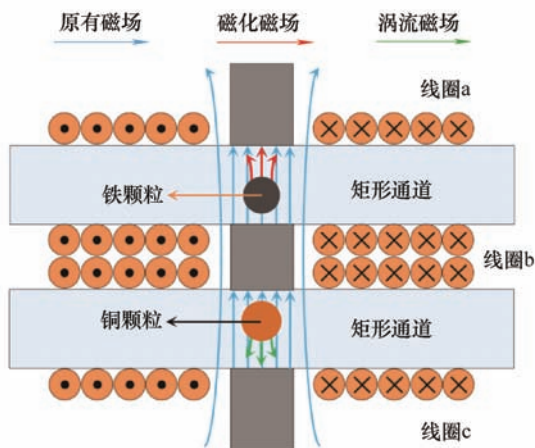


图 2 检测原理示意图

造成影响, 从而改变线圈的交流电阻。在试验部分, 本文将探究三个线圈的连接方式对检测结果的影响。

### 3 检测试验及结果分析

#### 3.1 阻抗检测系统

为了测试线圈串并联的检测效果和阻抗传感器的性能, 在实验室中建立了阻抗检测系统(图 3)。该检测系统主要由微量注射泵(Harvard pump 11 plus), 本文所制作的多线圈阻抗传感器, 显微镜(Nikon AZ100), 阻抗分析仪(Agilent E4980A)和安装有 LabVIEW 软件 and 数据分析计数程序的计算机组成。

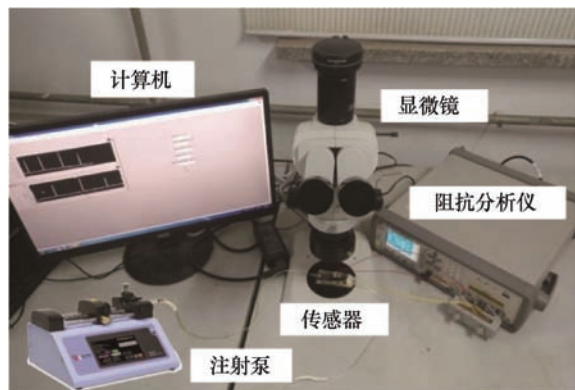


图 3 阻抗检测系统

显微镜可用于识别并测量流经检测区域的磨粒的材质和尺寸, 便于获取信号脉冲和磨粒特性的对应关系。微量注射泵可定速驱动油样, 通过调整微注射方向可推动选定的颗粒反复通过检测区域。阻抗分析仪可给线圈施加交流电激励, 并且会配合 LabVIEW 程序实时获取线圈的阻抗值, 并将其传输给计算机进行储存和显示。计算机中的分析计数程序则可对检测数据分析, 从而区分颗粒属性, 测量颗粒尺寸, 实现颗粒计数。

#### 3.2 线圈串并联对比试验

研究表明油样流速对传感器的检测效果具有一定的影响, 流速越慢颗粒产生的信号脉冲越明显<sup>[27]</sup>。为确保传感器的检测效率, 在接下来的试验中微量注射泵的流量被设为  $400 \mu\text{L}/\text{min}$ 。随着交流励磁频率的增加, 金属颗粒内部的涡电流将增强, 考虑到电感式传感器对于铁磁性磨粒的检测能力更强, 为保证传感器的综合检测能力, 应选用高频激励来检测更小尺寸的非铁磁性磨粒<sup>[28]</sup>。试验中的阻抗分析仪可设置的激励频率范围为  $0 \sim 2 \text{ MHz}$ , 因此在接下来的试验中激励设置

为  $2.0 \text{ V}$ ,  $2.0 \text{ MHz}$ 。使用微量注射泵将含有金属磨粒的油样(用电子天平称取  $3 \text{ mg}$  粒径为  $90 \sim 100 \mu\text{m}$  的铁颗粒, 将其混入  $100 \text{ mL}$  液压油中并摇匀; 以相同的方法将  $3 \text{ mg}$  粒径为  $190 \sim 200 \mu\text{m}$  的铜颗粒与  $100 \text{ mL}$  液压油均匀混合。)注射到传感器进行检测试验。使用显微镜选取直径为  $93 \mu\text{m}$  铁质球状磨粒和直径为  $186 \mu\text{m}$  铜质球状磨粒, 并通过控制微量注射泵的方向使磨粒往复通过检测单元。为探索三个平面电感线圈同向串联和同向并联对检测结果的影响, 分别在两种连接方式下对  $93 \mu\text{m}$  铁颗粒和  $186 \mu\text{m}$  铜颗粒进行检测。所得的电感和电阻信号见图 4、5。

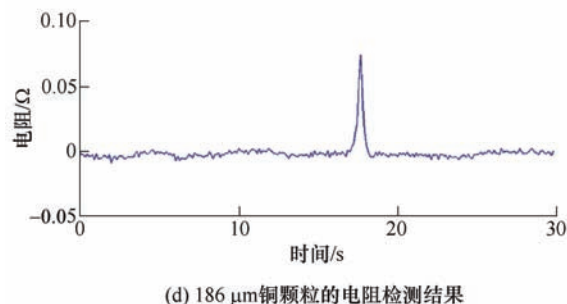
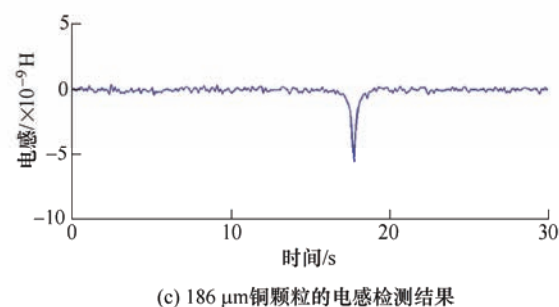
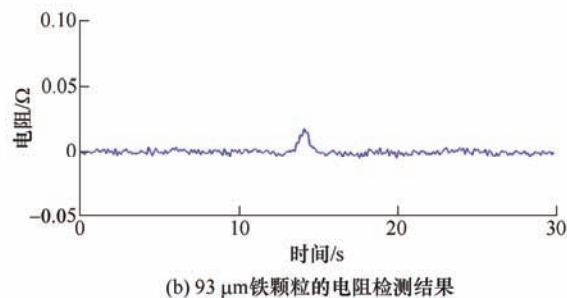
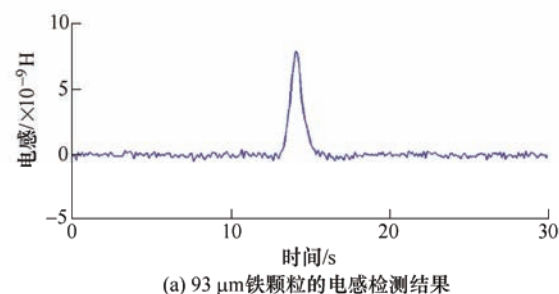


图 4 线圈同向串联检测结果



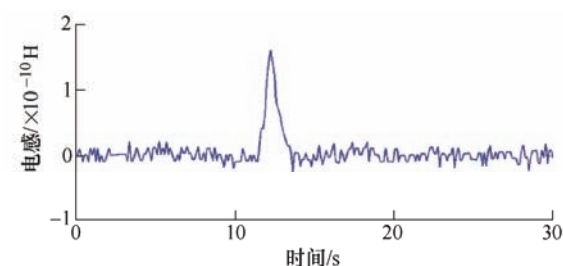
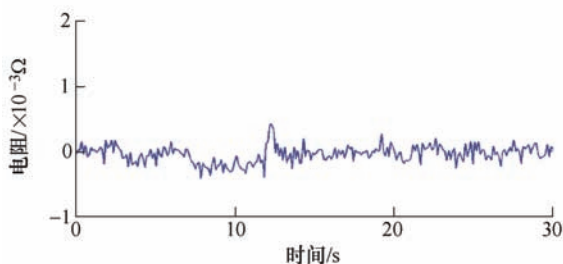
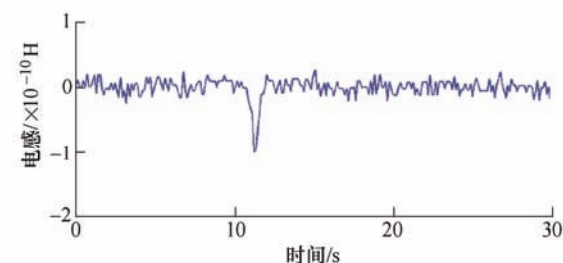
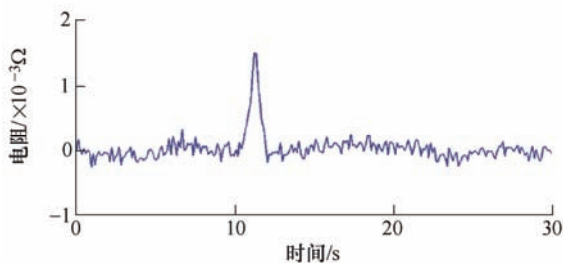
(a) 93  $\mu\text{m}$ 铁颗粒的电感检测结果(b) 93  $\mu\text{m}$ 铁颗粒的电阻检测结果(c) 186  $\mu\text{m}$ 铜颗粒的电感检测结果(d) 186  $\mu\text{m}$ 铜颗粒的电阻检测结果

图5 线圈同向并联检测结果

如图4、5及表1所示,我们对线圈同向串联和同向并联两种情况下的检测结果进行了对比。结果表明,线圈同向串联更适用于磨粒的检测。当线圈同向串联时,传感器的基础电感值为  $4.70 \times 10^{-5} \text{H}$ ,电感信号噪声为  $5.0 \times 10^{-10} \text{H}$ ;电阻信号基值为  $59.39 \Omega$ ,电阻信号噪声为  $5.0 \times 10^{-3} \Omega$ 。93  $\mu\text{m}$ 的铁颗粒产生的电感信号脉冲幅值为  $7.64 \times 10^{-9} \text{H}$ ,信噪比为 15.28;186  $\mu\text{m}$ 的铜颗粒产生的电感信号脉冲幅值为  $5.63 \times 10^{-9} \text{H}$ ,信噪比为 11.26;93  $\mu\text{m}$ 的铁颗粒产生的电阻信号脉冲幅值为  $1.65 \times 10^{-2} \Omega$ ,信噪比为 3.30;186  $\mu\text{m}$ 的铜颗粒所得的电阻信号脉冲幅值为  $8.03 \times 10^{-2} \Omega$ ,信噪比为 16.06。当线圈同向并联时,传感器的基础电感值为  $2.60 \times 10^{-6} \text{H}$ ,电感信号

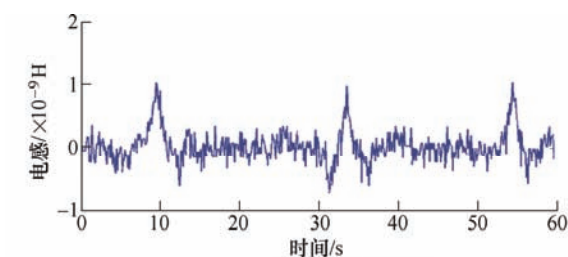
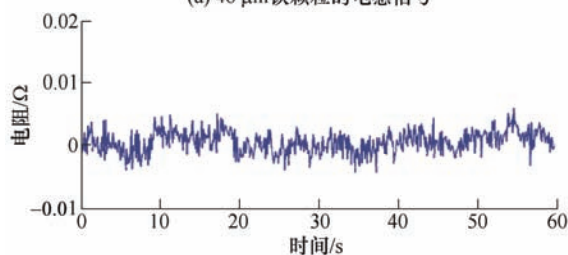
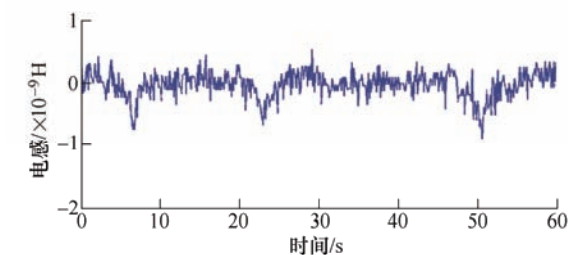
噪声为  $3.00 \times 10^{-11} \text{H}$ ;电阻信号基值为  $3.80 \Omega$ ,电阻信号噪声为  $3.0 \times 10^{-4} \Omega$ 。93  $\mu\text{m}$ 的铁颗粒产生的电感信号脉冲幅值为  $1.72 \times 10^{-10} \text{H}$ ,信噪比为 5.73;186  $\mu\text{m}$ 的铜颗粒产生的电感信号脉冲幅值为  $1.05 \times 10^{-10} \text{H}$ ,信噪比为 3.50;93  $\mu\text{m}$ 的铁颗粒产生的电阻信号脉冲幅值为  $7.4 \times 10^{-4} \Omega$ ,信噪比为 1.57;186  $\mu\text{m}$ 的铜颗粒产生的电阻信号脉冲幅值为  $1.69 \times 10^{-3} \Omega$ ,信噪比为 5.63。对于同一颗粒物,线圈同向串联所得的电感和电阻脉冲幅值远大于同向并联所得的电感和电阻脉冲幅值;虽然串并联时所得的信号噪声也不同,但线圈串联时所得脉冲信号具有更高的信噪比;高的 SNR 代表着高的检测精度,线圈同向串联可进一步提升传感器的检测能力。

表1 线圈同向串并联检测结果对比表

线圈连接方式	金属磨粒	电感脉冲幅值/H	电感信噪比	电阻脉冲幅值/ $\Omega$	电阻信噪比
同向串联	93 $\mu\text{m}$ 铁颗粒	$7.64 \times 10^{-9}$	15.28	0.016 5	3.30
	186 $\mu\text{m}$ 铜颗粒	$5.63 \times 10^{-9}$	11.26	0.080 3	16.06
同向并联	93 $\mu\text{m}$ 铁颗粒	$1.72 \times 10^{-10}$	5.73	0.000 74	1.57
	186 $\mu\text{m}$ 铜颗粒	$1.05 \times 10^{-10}$	3.50	0.001 69	5.63

### 3.3 检测下限试验

为获取传感器的综合检测能力,我们探究了在线圈同向串联情况下电感参数和电阻参数对金属颗粒的检测下限,其结果见图6、7。

(a) 46  $\mu\text{m}$ 铁颗粒的电感信号(b) 46  $\mu\text{m}$ 铁颗粒的电阻信号(c) 125  $\mu\text{m}$ 铜颗粒的电感信号

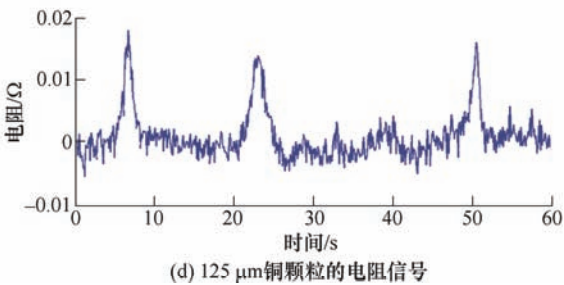


图 6 电感检测下限

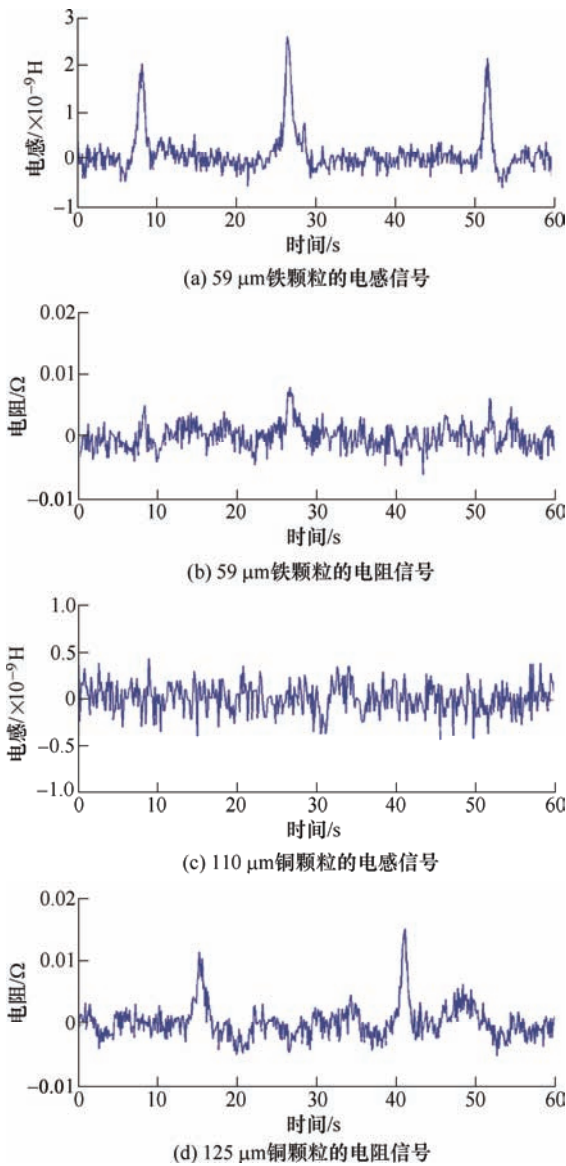


图 7 电阻检测下限

如图 6、7 所示，该磨粒传感器的电感参数可检测到  $46\text{ }\mu\text{m}$  铁颗粒和  $125\text{ }\mu\text{m}$  铜颗粒，电阻参数可检测  $59\text{ }\mu\text{m}$  铁颗粒和  $110\text{ }\mu\text{m}$  铜颗粒。试验结果表明电感参数可以检测到更小尺寸的铁磁性颗粒；电阻参数可以检测到更小尺寸的非铁磁性颗粒；且不同尺寸范围的不同材质的金属磨粒所产生的电感和电阻信号也具有不同的特征。因此，可以直接通过

正向的电感脉冲信号的幅值来判断尺寸大于  $46\text{ }\mu\text{m}$  的铁颗粒，而通过负向的电感脉冲信号的幅值可判断尺寸大于  $125\text{ }\mu\text{m}$  的铜颗粒；对于尺寸在  $110\sim 125\text{ }\mu\text{m}$  的铜颗粒，可依据无明显电感脉冲且具有显著的电阻脉冲的信号特征来判断；并且对于同时具有电感脉冲和电阻脉冲的金属磨粒(尺寸大于  $59\text{ }\mu\text{m}$  的铁颗粒和尺寸大于  $125\text{ }\mu\text{m}$  的铜颗粒)，可通过取两种参数检测结果所对应颗粒尺寸的平均值的方法来提升传感器的准确度。

如图 8 所示，结合电感和电阻两种参数的检测结果，该阻抗传感器可有效检测和区分的最小金属磨粒为  $46\text{ }\mu\text{m}$  的铁颗粒和  $110\text{ }\mu\text{m}$  的铜颗粒，解决了传统的电感式磨粒传感器对非铁磁性金属颗粒检测能力较弱的问题。该传感器对金属磨粒尺寸的检测值和实际值的误差在  $5\text{ }\mu\text{m}$  内，同时不同尺寸范围金属磨粒的电感和电阻信号特征与传感单元的线圈参数、硅钢条参数、激励参数、测量电路有关。因此在实际应用时需要针对不同参数的传感器建立数据库，以实现金属磨粒尺寸的准确识别。

颗粒类型	电感信号特征	电阻信号特征
铁颗粒 ( $46\sim 59\text{ }\mu\text{m}$ )		
铁颗粒 ( $>59\text{ }\mu\text{m}$ )		
铜颗粒 ( $110\sim 125\text{ }\mu\text{m}$ )		
铜颗粒 ( $>125\text{ }\mu\text{m}$ )		

图 8 电感和电阻信号特征

4 结论

本文设计并研究了一种多线圈阻抗传感器，其可同时检测电感和电阻两种参数。该传感器主要包括三个电感线圈、插在线圈内孔的硅钢条和两个矩形通道。硅钢条用来增强检测区域的磁场强度，从而提升检测精度。矩形检测通道则可增加通道截面积，从而提高检测通量。在串联和并联的对比试验中，线圈同向串联所得的信号脉冲的幅值和信噪比线圈并联所得的更大，因此线圈串联时传感器具有更高的检测灵敏度，更适用于磨粒的检测。在本文所设计的多线圈阻抗传感器中，可根据电感脉冲信号的方向以及电阻和电感脉冲信号的有无来判断区分颗粒的属性，并且基于两个参数的检测结果进行比较，以获得准确的尺寸信息。电感参数可检测到

46  $\mu\text{m}$  铁颗粒和 125  $\mu\text{m}$  铜颗粒, 电阻参数可检测 59  $\mu\text{m}$  铁颗粒和 110  $\mu\text{m}$  铜颗粒。通过对比分析电感和电阻参数的检测结果, 阻抗传感器可有效检测和区分的最小金属磨粒为 46  $\mu\text{m}$  的铁颗粒和 110  $\mu\text{m}$  的铜颗粒。但是, 该传感器的检测精度仍有待提高, 在将来的工作中可通过滤波器和放大器来提升所得信号脉冲的信噪比, 从而进一步提升该传感器的抗干扰能力。经过上述优化后, 该传感器有望为油液磨粒的高精度检测提供技术支持。

### 参 考 文 献

- [1] DU L, ZHE J, CARLETTA J, et al. Real-time monitoring of wear debris in lubrication oil using a microfluidic inductive Coulter counting device[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 9(6): 1241-1245.
- [2] WANG Z, XUE X, YIN H, et al. Research progress on monitoring and separating suspension particles for lubricating oil[J]. *Complexity*, 2018(5): 1-9.
- [3] ZHU X, ZHONG C, ZHE J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring: A review[J]. *Tribology International*, 2017, 109: 473-484.
- [4] BORDATCHEV E, AGHAYAN H, YANG J. Object shape-based optical sensing methodology and system for condition monitoring of contaminated engine lubricants[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2014, 54: 128-138.
- [5] XU C, ZHANG P, WANG H, et al. Ultrasonic echo waveshape features extraction based on QPSO-matching pursuit for online wear debris discrimination[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 60-61: 301-315.
- [6] ISLAM T, YOUSUF M, NAUMAN M. A highly precise cross-capacitive sensor for metal debris detection in insulating oil[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(2): 025005.
- [7] 范红波, 张英堂, 陶凤和, 等. 铁磁质磨粒形态对电感式磨粒传感器输出特性的影响[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(10): 1401-1405.  
FAN Hongbo, ZHANG Yingtang, TAO Fenghe, et al. Effect of the ferromagnetic wear debris morphology on the output characteristic of inductive wear debris sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(10): 1401-1405.
- [8] 范红波, 张英堂, 陶凤和, 等. 电感式磨粒传感器中非铁磁质磨粒的磁场特性[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(2): 35-41.  
FAN Hongbo, ZHANG Yingtang, TAO Fenghe, et al. Magnetic characteristic of unferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(2): 35-41.
- [9] JIA R, MA B, ZHENG C, et al. Magnetic properties of ferromagnetic particles under alternating magnetic fields: Focus on particle detection sensor applications[J]. *Sensors*, 2018, 18: 4144.
- [10] DU L, ZHE J. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring[J]. *Tribology International*, 2011, 44(2): 175-179.
- [11] 史皓天, 张洪朋, 王文琪, 等. 高精度磨粒检测传感器的设计及研究[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 2043-2052.  
SHI Haotian, ZHANG Hongpeng, WANG Wenqi, et al. Design and research of high sensitive wear debris detection sensor[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2019, 27(9): 2043-2052.
- [12] REN Y, ZHAO G, QIAN M, et al. A highly sensitive triple-coil inductive debris sensor based on an effective unbalance compensation circuit[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 31(2): 025103.
- [13] 贾然, 马彪, 郑长松, 等. 电感式磨粒在线监测传感器灵敏度提高方法[J]. *湖南大学学报*, 2018, 45(4): 129-137.  
JIA Ran, MA Biao, ZHENG Changsong, et al. Sensitivity improvement method of on-line inductive wear particles monitor sensor[J]. *Journal of Hunan University*, 2018, 45(4): 129-137.
- [14] LI C, LIANG M. Enhancement of oil debris sensor capability by reliable debris signature extraction via wavelet domain target and interference signal tracking[J]. *Measurement*, 2013, 46(4): 1442-1453.
- [15] HONG W, WANG S, LIU H, et al. A hybrid method based on band pass filter and correlation algorithm to improve debris sensor capacity[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 82: 1-12.
- [16] HONG W, WANG S, TOMOVIC M, et al. A new debris sensor based on dual excitation sources for online debris monitoring[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(9): 095101.
- [17] FENG S, YANG L, QIU G, et al. An inductive debris sensor based on a high-gradient magnetic field[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(8): 2879-2886.
- [18] LIU L, CHEN L, WANG S, et al. Improving sensitivity of a micro inductive sensor for wear debris detection with magnetic powder surrounded[J]. *Micromachines*, 2019, 10(7): 440.
- [19] WU S, LIU Z, YUAN H, et al. Multichannel inductive sensor based on phase division multiplexing for wear debris detection[J]. *Micromachines*, 2019, 10(4): 246.
- [20] ZHU X, DU L, ZHE J, et al. A 3×3 wear debris sensor

- array for real time lubricant oil conditioning monitoring using synchronized sampling[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017: 296-304.
- [21] REN Y, LI W, ZHAO G, et al. Inductive debris sensor using one energizing coil with multiple sensing coils for sensitivity improvement and high throughput[J]. *Tribology International*, 2018: 96-103.
- [22] 曾霖, 张洪朋, 滕怀波, 等. 一种船机油液多污染物检测新方法研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(12): 125-132.
- ZENG Lin, ZHANG Hongpeng, TENG Huaibo, et al. Novel method for the detection of multi-contaminants in marine lubricants[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(12): 125-132.
- [23] 马来好, 张洪朋, 乔卫亮, 等. 双螺线管套管结构的液压油金属颗粒检测传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 216-223.
- MA Laihao, ZHANG Hongpeng, QIAO Weiliang, et al. Hydraulic oil metal particles detecting sensor of dual-solenoid coil with casing structure[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 216-223.
- [24] 史皓天, 张洪朋, 顾长智, 等. 液压油污染物多参数检测传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 172-179.
- SHI Haotian, ZHANG Hongpeng, GU Changzhi, et al. Multi-parameter sensor for hydraulic oil pollutant[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 172-179.
- [25] 史皓天, 张洪朋, 顾长智, 等. 电感-电容双模式液压油污染物检测传感器[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(2): 20-26.
- SHI Haotian, ZHANG Hongpeng, GU Changzhi, et al. Inductance-capacitance dual mode sensor for the detection of contaminants in hydraulic oil[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(2): 20-26.
- [26] 黄刘平, 田新启. 电涡流传感器线圈等效阻抗的计算与实验分析[J]. *化工自动化及仪表*, 2017, 44(1): 39-43.
- HUANG Liuping, TIAN Xinqi. Calculation and experimental analysis of equivalent impedance of eddy current sensor coil[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2017, 44(1): 39-43.
- [27] 刘恩辰, 张洪朋, 吴瑜, 等. 油液过流速度对船舶液压油检测精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 533-539.
- LIU Enchen, ZHANG Hongpeng, WU Yu, et al. Effect of oil velocity on sensitivity of micron metal particle detection by inductive sensor[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2016, 24(3): 533-539.
- [28] 张兴明, 张洪朋, 陈海泉, 等. 微流体油液检测芯片分辨率-频率特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(2): 427-433.
- ZHANG Xingming, ZHANG Hongpeng, CHEN Haiquan, et al. Study on the resolution-frequency characteristic of microfluidic oil detection chip[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(2): 427-433.
- 
- 作者简介: 顾长智, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电一体化和微流体检测技术。  
E-mail: msagcz@163.com
- 史皓天, 男, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为船舶机电一体化、机械设备的状态监测及故障诊断、电磁无损探伤、微纳传感器、磨粒检测技术。  
E-mail: dmu6hao@163.com
- 张洪朋(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为船舶机电一体化、船舶液压系统与微流体芯片检测技术。  
E-mail: zhppeter@163.com
- 孙玉清, 男, 1863 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电一体化、船舶液压驱动和控制以及制冷技术。