

DOI: 10.3901/JME.2021.02.039

高精度双线圈式磨粒传感器的设计及研究^{*}

史皓天¹ 张洪朋¹ 马来好¹ 曾乃斌² 刘城³ 陈海泉¹

(1. 大连海事大学轮机工程学院 大连 116026;

2. 中国船舶重工集团海装风电股份有限公司 重庆 401122;

3. 重庆海装风电工程技术有限公司 重庆 401122)

摘要: 提出了一种可检测电感和电阻参数的高精度双线圈式磨粒传感器, 其可对液压油污染物的检测提供技术支持。激励硅钢片和内置硅钢片通过磁化作用以及对磁场的聚集作用在检测区域中生成了高强度磁场, 从而提升了传感器的检测精度。正方形检测通道的设计充分利用了两电感线圈之间的区域, 提高了传感器的检测通量。试验表明, 内置硅钢片不会改变磨粒传感器的信号噪声, 有助于获取更优的信噪比。并且激励硅钢片和内置硅钢片对置区域的磁场强度最强, 金属颗粒通过该区域时就会产生电感和电阻变化的脉冲峰值。在搭建的测量系统对油液中的金属磨粒进行检测试验, 结果表明电感参数能够检测到 25 μm 铁颗粒和 100 μm 铜颗粒, 电阻参数方式可检测 35 μm 铁颗粒和 85 μm 铜颗粒。通过结合电感参数检测结果和电阻参数检测结果, 磨粒传感器可实现对 25 μm 铁颗粒和 85 μm 铜颗粒的区分检测。

关键词: 磨粒传感器; 双线圈; 硅钢片; 高精度; 电感参数; 电阻参数

中图分类号: TP212; TH73

Design and Research of High Sensitivity Double-coil Wear Debris Sensor

SHI Haotian¹ ZHANG Hongpeng¹ MA Laihao¹ ZENG Naibin²LIU Cheng³ CHEN Haiquan¹

(1. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026;

2. CSIC Haizhuang Windpower Co., Ltd., Chongqing 401122;

3. Chongqing Haizhuang Windpower Engineering Technology Co., Ltd., Chongqing 401122)

Abstract: A high sensitivity dual-coil wear debris sensor that detects inductance and resistance parameters is presented, which provides technical support for the detection of particle contamination in hydraulic oil. The excitation silicon steel sheet and built-in silicon steel sheet generate a high-intensity magnetic field in the detection region by magnetization and aggregation effect, thereby improving the detection accuracy of the sensor. The square detection channel is designed to make full use of the region between the two coils, increasing the detection throughput of the sensor. Experiments show that the built-in silicon steel sheet does not change the signal noise of the wear debris sensor, which is conducive to obtain a better signal-to-noise ratio. In the region of the exciting silicon steel sheet and the built-in silicon steel sheet are placed opposite each other, the magnetic field strength is the strongest, so the inductance and resistance peak of metal particles will occur. In the built measuring system, the metal wear debris in the oil is detected. In the experiments, the 25 μm iron particle and 100 μm copper particle can be detected with inductance parameter, and the 35 μm iron particle and 85 μm copper particle can be detected with resistance parameter. By combining the inductance detection and resistance detection results, the wear debris sensor can distinguish and detect 25 μm iron particles and 85 μm copper particles.

Key words: wear debris sensor; dual-coil; silicon steel sheet; high sensitivity; inductance parameter; resistance parameter

0 前言

液压系统中的液压油具有传递能量、润滑、防

腐、防锈、冷却等作用。液压油可带走机械设备的摩擦副表面间产生的金属磨粒。随着机械设备正逐步向高速、高压、高精度方向发展, 为确保设备的正常运行, 对液压油污染物的检测显得极其重要。金属磨粒的材质可反映发生磨损的部位, 磨粒尺寸可反映磨损程度, 磨粒形状可反映磨损形式。工作

^{*} 国家自然科学基金(51679022)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132019034)和大连市科技创新基金(2019J12GX023)资助项目。
20191114 收到初稿, 20200618 收到修改稿

人员可根据检测结果及时更换系统油液,从而有效预防设备故障,减少停机维修所带来的经济损失。相比较传统的离线油污检测方法,如铁谱仪,光谱仪等,在线监测装置和便携式检测设备具有测量周期短、时效性强和成本低等优势,因而备受关注。其中,基于电磁感应原理的电感式磨粒传感器^[1-3]具有可区分检测油液中的铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒的优势,但检测精度较低仍为限制该类传感器广泛应用的主要因素。

近年来,单线圈、双线圈、三线圈等结构的电感式磨粒传感器^[4-8]被相继提出,并且可通过选择合适的线圈匝数和激励频率来获取更好的检测结果^[9-10]。然而上述通过优化传感器结构参数和激励参数的方式对检测能力的提升有限。为此,HONG 等^[11]设计了一种激励线圈和检测线圈共用一“C”形铁芯的磨粒传感器,其可以在 20 mm 直径的管道中检测直径 290 μm 铁颗粒。BAI 等^[12]将硅钢片插入电感线圈中,成功检测到了 40 μm 铁颗粒和 130 μm 铜颗粒。上述方法都是通过增强检测区域磁场强度的方式来提高传感器灵敏度。此外,还可通过改进检测电路以及采用各类信号处理算法的方式来降低噪声干扰,得到更为精确的检测结果。DU 等^[13]使用 LC 谐振方法,实现了对 32 μm 铁颗粒和 75 μm 铜颗粒的检测。FAN 等^[14]结合小波变换和峰度分析的方法来消除杂散信号,检测隐藏在背景噪声中的弱粒子信号。LI 等^[15]提出了一种基于积分增强经验模态分解和重构方法来提取颗粒信号特征,从而获取更为准确的颗粒信息。JIA 等^[16]通过锁相放大器和经验模态分解及逆重构的信号提取方法来获得更好的检测结果。HONG 等^[17]采用带通滤波器及相关算法来提高磨粒传感器的信噪比,从而可以检测到更小尺寸的金属碎片。电感式传感器还可以与其他检测技术集成,以提高检测能力。APPLEBY 等^[18]将超声波传感器,电容传感器和电感传感器结合起来检测表征油液状态的多种参数,获得了更为全面的油液信息。此外,还可通过减小检测通道尺寸的方式来减小油液中磨粒与检测线圈之间的距离,以此来提高传感器的检测精度,但这也牺牲检测通量,降低传感器的检测效率。

为了提高电感式磨粒传感器的检测能力以及检测效率,本文设计了一种高精度双线圈式磨粒传感器。该传感器通过在内感线圈内孔中设置激励硅钢片以及在通道中添加内置硅钢片的方式,从而在检测区域建立了高强度磁场来提高检测精度。并且该传感器可同时检测电感和电阻两种参数,根据电感

和电阻检测结果,可对所测金属磨粒的种类和尺寸进行判断。

1 传感器设计及制作

如图 1 所示,磨粒传感器主要包括锥形入口,检测通道,传感单元,通道出口。传感单元主要包括两个平行对置的电感线圈(中心孔插有激励硅钢片)和设置在检测通道中的内置硅钢片组成,两电感线圈之间的距离为 900 μm ;电感线圈由线径 70 μm 的漆包铜线进行绕制而成,共三层,每层 20 匝,线圈的内径为 900 μm ,外径约为 3.8 mm;激励硅钢片的厚度为 300 μm ,宽度为 800 μm ,长度为 1.5 mm;内置硅钢片的厚度为 200 μm ,宽度为 900 μm ,长度为 2 mm;检测通道的截面为边长 900 μm 的正方形;锥形入口的开口端直径为 1 cm,通道出口的直径为 8 mm。

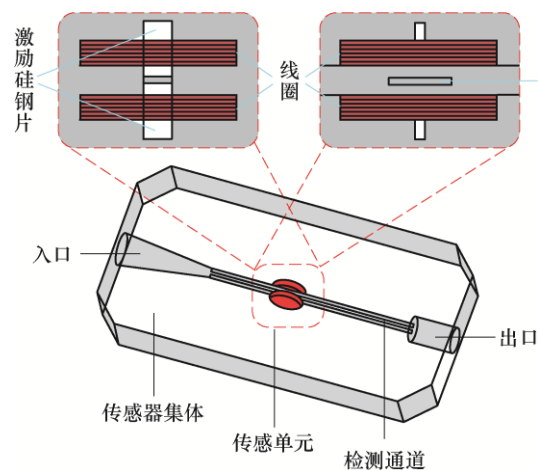


图 1 传感器整体结构图

阻抗信号的噪声随着线圈匝数的增加而增加,而同一金属磨粒所产生的脉冲信号幅值也随着线圈匝数的增加而增加,此时可根据信噪比来判断选取线圈匝数。在本文中,将线圈匝数选用范围在 40~100 时可获得较好的信噪比。本文所提出正方形通道充分利用了两电感线圈之间的区域,使得内置硅钢片两侧通道的截面积可达 0.63 mm²,从而可最大限度保证传感器的检测效率。由于本文所设计的传感器的通道中含有内置硅钢片,为防止液压油中所携带的污染物堵塞通道,因此选用竖直式通道,以降低油液中的污染物在通道壁上的黏附概率。

传感器的制作过程如图 2 所示。首先将激励硅钢片用胶水固定于电感线圈中心孔中,形成传感元件,随后将其与锥形通道入口模具及条状通道模具按既定位置固定(图 2a);然后将聚二甲基硅氧烷抽

真空后浇铸到模型上, 并加热固化形成传感器基体(图 2b); 抽出锥形通道入口模具和条状通道模具后即可形成锥形通道入口和检测通道(图 2c); 最后在两对置激励硅钢片之间的检测通道中添加内置硅钢片, 并打孔形成通道出口, 完成传感器的制作(图 2d)。

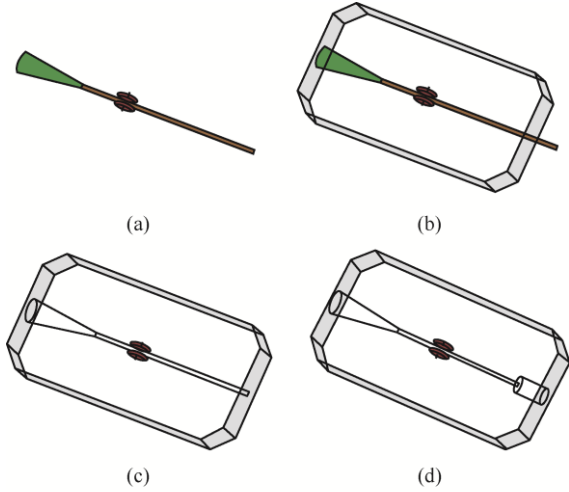


图 2 磨粒传感器制备过程

2 传感器检测原理

电感式传感器对铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒的检测是基于电磁感应原理。当电感线圈被施加以交流电激励之后, 线圈周围将会产生一不均匀交变磁场, 处于磁场中的金属颗粒物由于磁化效应和涡流效应会改变原有磁场的强度(磁化效应增强磁场, 涡流效应减弱磁场), 使线圈产生感应电动势, 表现为线圈阻抗值的变化。

先前的研究表明^[19], 当有金属颗粒通过检测区域时, 线圈的感应电动势为

$$U(\mathbf{r}_p) = \oint_{\text{coil}} -j\omega \mathbf{A}_p(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l} \quad (1)$$

式中, \mathbf{r}_p 为颗粒中心处的位置矢量, ω 为激励交流电的角频率, $d\mathbf{l}$ 为表征导线微分元件在常规电流方向上的分布矢量, \mathbf{r} 所要研究对象的位置矢量, $j^2 = -1$, $\mathbf{A}_p(\mathbf{r})$ 为金属颗粒所引起的磁矢量势分布, 其表达式为

$$\mathbf{A}_p(\mathbf{r}) = \frac{v\chi_a}{4\pi} \mathbf{B}(\mathbf{r}_p) \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_p}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_p|^3} \quad (2)$$

式中, v 为颗粒体积, χ_a 为交变磁场中颗粒物的磁化率, $\mathbf{B}(\mathbf{r}_p)$ 为颗粒所在的磁化场。

如图 3 所示, 为颗粒检测原理图。为了便于表述, 将本文所设计的磨粒传感器中的两个线圈命名为线圈 1 和线圈 2。线圈 1 和线圈 2 互为激励和接收线圈, 由式(1)可得其感应电动势分别为 $U_1(\mathbf{r}_p)$ 和 $U_2(\mathbf{r}_p)$ 。则线圈 1 和线圈 2 的阻抗为

$$Z_1(\mathbf{r}_p) = \frac{U_1(\mathbf{r}_p)}{I_1} \quad (3)$$

$$Z_2(\mathbf{r}_p) = \frac{U_2(\mathbf{r}_p)}{I_2} \quad (4)$$

式中, I_1 为线圈 1 中通过的电流, I_2 为线圈 2 中通过的电流。

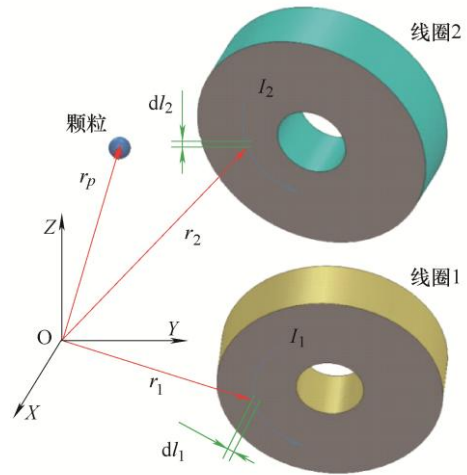


图 3 检测原理图

文中所设计的传感器所采用的是将两线圈顺向并联的方式, 考虑到两线圈之间存在互感, 则其并联后的阻抗值

$$Z_p = \frac{Z_1 Z_2 - Z_M^2}{Z_1 + Z_2 - 2Z_M} \quad (5)$$

式中, Z_M 为互感的阻抗值。

$$Z_M = j\omega M \quad (6)$$

式中, M 是两个线圈之间的互感。若无金属颗粒通过检测区域时传感器的阻抗值为 Z_0 , 则颗粒通过检测区域时, 两线圈的总阻抗变化为

$$\Delta Z = Z_p - Z_0 \quad (7)$$

ΔZ 的实部为线圈的电阻变化量, ΔZ 的虚部为线圈的电感变化量

$$\Delta R = \text{Re}(\Delta Z) \quad (8)$$

$$\Delta L = \text{Im}\left(\frac{\Delta Z}{\omega}\right) \quad (9)$$

传感器工作时,激励硅钢片和内置硅钢片都会被磁化,从而强化了检测区域的磁场。金属颗粒的涡流效应和磁化效应随磁场强度呈非线性变化趋势,使得线圈所产生的感应电动势更为明显,继而提高传感器的检测能力。铁磁性磨粒中的磁化效应会增强检测区域的磁场,产生正向电感脉冲;非铁磁性磨粒中的涡流效应会减小检测区域中的磁场,产生负向电感脉冲;金属磨粒通过检测区域时,线圈的电阻值都会增加,产生正向脉冲。因此根据电阻信号和电感信号,可对金属磨粒的属性进行判断。

3 检测试验与结果分析

3.1 试验测量系统

为了制备试验所需的待测油样,我们将一定直径范围的球状金属颗粒混合于液压油中,并振荡均匀。为验证磨粒传感器的检测效果,试验测量系统如图 4 所示。

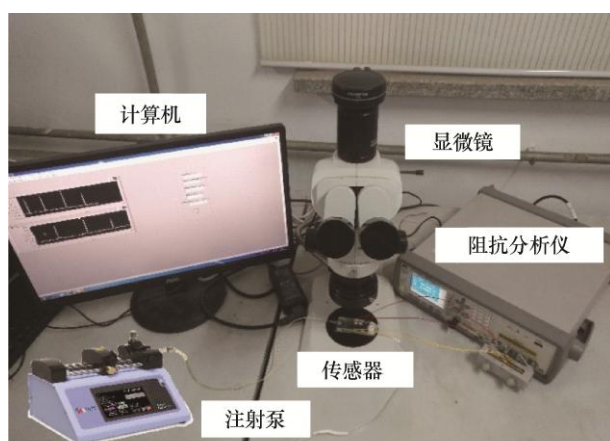
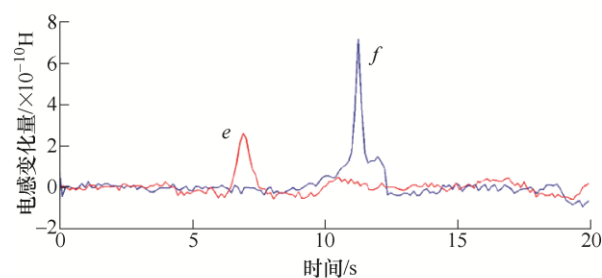


图 4 测量系统图

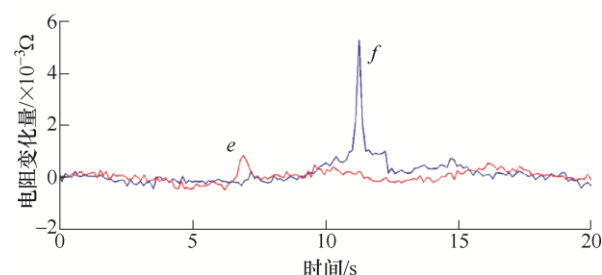
所需测量的液压油样品由微量注射泵定速注射到传感器的检测通道中;阻抗分析仪既可作为激励源为线圈施加交流电激励,又可实时采集线圈的阻抗数据,并将其传输到计算机;计算机中的 LabVIEW 程序和 Matlab 程序可实现对数据的可视化及处理分析。试验时,需将两线圈的引线端同向并联至阻抗分析仪,且设置阻抗分析仪的参数为 2 V、2 MHz。为了获取颗粒尺寸与脉冲信号幅值之间的对应关系,可采用微量注射泵(流量设置为 100 $\mu\text{L}/\text{min}$)先将待测油样缓慢注入传感器中,然后使用显微镜选取特定尺寸的颗粒用于试验,并可通过调整微量注射泵(流量设置为 300 $\mu\text{L}/\text{min}$)的方向使得颗粒反复多次通过检测区域。

3.2 有无硅钢片的对比试验

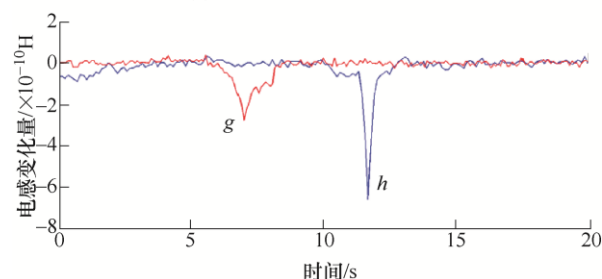
为探索内置硅钢片对检测效果的提升效果,首先使用不含内置硅钢片的传感器检测金属颗粒;在检测通道中添加内置硅钢片后,对同一金属颗粒进行检测。在显微镜下,选取尺寸约为 72 μm 铁颗粒和 150 μm 铜颗粒进行了有无硅钢片的对比试验。图 5 为所得的电感和电阻信号图。其中信号脉冲 *e* 为不含内置硅钢片的传感器对 72 μm 铁颗粒的检测结果,信号脉冲 *f* 为含内置硅钢片的传感器对 72 μm 铁颗粒的检测结果,信号脉冲 *g* 为不含内置硅钢片的传感器对 150 μm 铜颗粒的检测结果,信号脉冲 *h* 为含内置硅钢片的传感器对 150 μm 铜颗粒的检测结果。



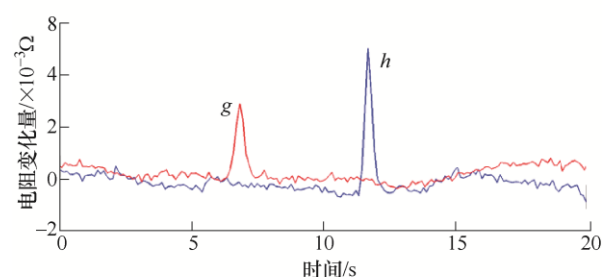
(a) 72 μm 铁颗粒的电感检测结果



(b) 72 μm 铁颗粒的电阻检测结果



(c) 150 μm 铜颗粒的电感检测结果



(d) 150 μm 铜颗粒的电阻检测结果

图 5 内置硅钢片对检测结果的影响

由图 5 和表 1 可发现,取出内置硅钢片之后,72 μm 铁颗粒和 150 μm 铜颗粒所产生的电感信号和电阻信号都有着大幅度的降低。其原因主要为内置硅钢片受磁化作用使得检测区域的磁场强度有着显著的提升,从而使得颗粒物对所引起的电感线圈的阻抗变化更为明显;而且待测颗粒可从内置硅钢片的两侧紧贴电感线圈经过电感检测区域,拉近金属颗粒距电感线圈的距离,使得线圈可以准确捕捉到颗粒所带来的磁场变化,继而进一步提升了传感器的检测精度。并且,原磨粒传感器的基础电感值为 $3.256\ 74 \times 10^{-6}\text{H}$,基础电阻值为 $5.671\ 12\ \Omega$;去掉内置硅钢片之后基础电感值和基础电阻值下降为 $3.086\ 95 \times 10^{-6}\text{H}$ 和 $4.163\ 18\ \Omega$ 。从而证明了内置硅钢片的存在不但提升了检测区域磁场,而且增加了传感器的电阻。

表 1 检测结果对比表

传感器	金属颗粒	电感脉冲幅值 / $\times 10^{-10}\text{H}$	电阻脉冲幅值 / $\text{m}\Omega$
原传感器	72 μm 铁颗粒	7.650 32	5.574 25
	150 μm 铜颗粒	6.758 14	5.131 07
取出内置 硅钢片	72 μm 铁颗粒	2.563 64	1.161 09
	150 μm 铜颗粒	3.125 58	2.788 71

由于环境因素以及信号采集的扰动,所得信号会存在一定的噪声。信号噪声对于颗粒脉冲的判断具有重要的意义。当脉冲淹没于信号噪声中时,则无法实现颗粒检测。所得脉冲幅值与噪声的比值则为信噪比,信噪比越大则表明检测精确度越高。磨粒传感器中有无内置硅钢片其检测结果中的电感信号噪声为 $5.0 \times 10^{-11}\text{H}$,电阻信号噪声为 $6.0 \times 10^{-4}\ \Omega$,因此内置硅钢片的存在不仅可以增加检测信号的脉冲幅值,而且并未增加信号噪声值,这有利于获取更优的信噪比,提升磨粒传感器的检测能力。

3.3 检测区域的磁场分布特征试验

磨粒传感器的检测区域的磁场并不均匀,为探索磁场分布特征,在显微镜下,选取尺寸约为 74 μm 铁颗粒进行检测试验。如图 6 所示,为 74 μm 铁颗粒所得的电感和电阻信号。

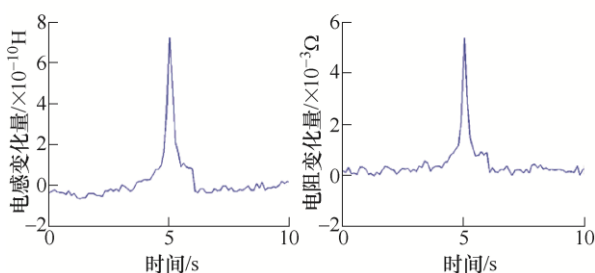


图 6 电感和电阻脉冲信号特征

由图 6 可以发现,金属颗粒通过检测区域所产生的电感和电阻脉冲信号都具有以下变化特征:当颗粒通过存在硅钢片区域时才会出现较为明显的电感值和电阻值变化,而在电感线圈边缘的区域几乎不会产生信号;通过仅含内置硅钢片区域时,颗粒所带来的电感和电阻变化较弱且平缓;且颗粒通过激励硅钢片和内置硅钢片对置区域时,则会产生电感和电阻变化的脉冲峰值,继而表明该区域的磁场强度最强。

出现上述现象的主要原因还是传感器检测区域的磁场分布不均匀,导致金属颗粒在不同区域所引发的电感和电阻值变化有差异。电感线圈在被施加以交流电激励之后会在其周围产生一交变磁场。在不加硅钢片时,两正对放置的电感线圈的内孔边缘区域的磁场最强,在加入硅钢片后会改变原有磁场的分布。如图 7 所示,在加入激励硅钢片和内置硅钢片之后,在两线圈之间会产生一高梯度磁场。这是由于硅钢片作为软磁性材料,不但可被磁化增强原有磁场,而且其具有高导磁率可聚集磁场,如图 7 中的 M 区域的磁场分布。并且由于内置硅钢片和激励硅钢片位置不同,其所受到的磁化场也不同(激励硅钢片插在电感线圈的内孔中,所受到的磁化场更强;而内置硅钢片设置在通道正中心,所受到的磁化场相对较弱),以至于两种硅钢片磁化后对原有磁场的增加效果不同,如图 7 中的 N 区域的磁场分布。在高强度磁场下,金属颗粒所伴随的涡流效应和磁化效应都更加剧烈,因此激励硅钢片和内置硅钢片对置区域的检测效果最为突出。

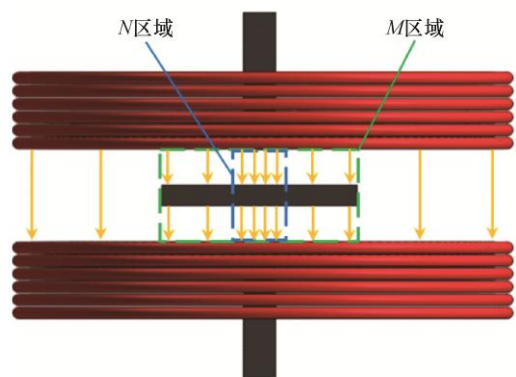


图 7 检测区域的磁场分布

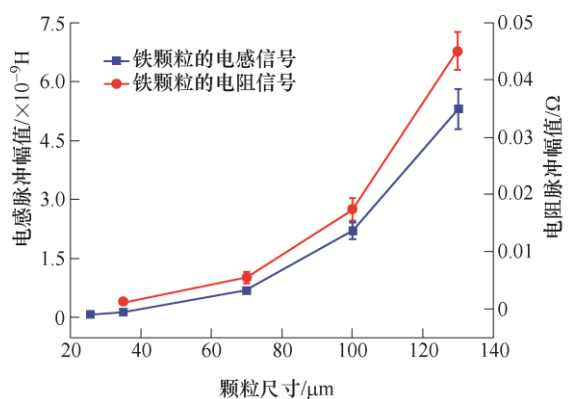
3.4 粒径与脉冲信号的对应关系试验

先前的研究表明^[20],电感参数检测对于铁磁性颗粒具有更强的检测能力,而电阻参数检测对于非铁磁性颗粒具有更强的检测能力。为得到颗粒尺寸与所得检测脉冲信号幅值的关系,我们在实验室中

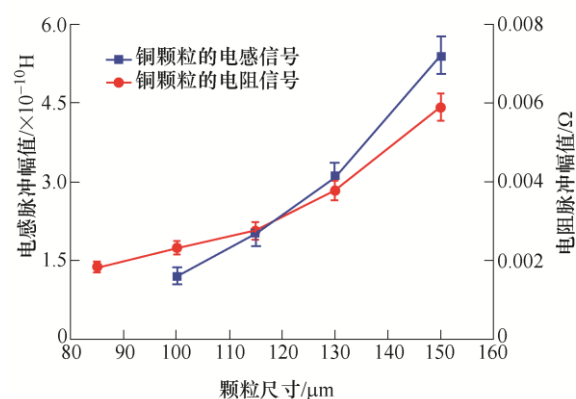
对不同尺寸的铁颗粒以及铜颗粒进行检测,并绘制了颗粒粒径与所得脉冲信号幅值的对应关系图,如图 8 所示。

试验结果表明,该磨粒传感器的电感参数可检测到 25 μm 铁颗粒和 100 μm 铜颗粒,电阻参数可检测到 35 μm 铁颗粒和 85 μm 铜颗粒。尺寸大于 25 μm 铁颗粒可直接由其所产生的正向电感脉冲来检测;而 85~100 μm 铜颗粒可根据其无电感脉冲而具有正向电阻脉冲的特性来判断;尺寸大于 100 μm 铜颗粒则可直接根据其所产生的负向电感脉冲来区分。因此,本文所设计的磨粒传感器可有效检测并区分 25 μm 铁颗粒和 85 μm 铜颗粒。

由图 8 可知,电阻和电感脉冲信号幅值都随颗粒尺寸的增加呈非线性变化。130 μm 铁颗粒较 100 μm 铁颗粒所得的电感信号幅值增加了 $3.074\ 08\times 10^{-9}\text{ H}$,电阻信号幅值增加了 $2.779\times 10^{-2}\ \Omega$;130 μm 铜颗粒较 100 μm 铜颗粒所得的电感信号幅值增加了 $1.89\times 10^{-10}\text{ H}$,电阻信号幅值增加了 $1.47\times 10^{-3}\ \Omega$;铁颗粒和铜颗粒的尺寸都是从 100 μm 变化到 130 μm ,而铁颗粒的电感和电阻信号幅值的变化量都远大于铜颗粒,这符合磁化效应较涡流效应更为显著的检测原理。



(a) 铁颗粒的检测结果



(b) 铜颗粒的检测结果

图 8 颗粒粒径与脉冲信号幅值关系曲线图

4 结论

本文设计并研究了一种可同时检测电感和电阻参数的高精度双线圈式磨粒传感器,其主要包括两同向并联的电感线圈,以及插在线圈内孔的激励硅钢片和设置在通道中心的内置硅钢片。激励硅钢片和内置硅钢片通过磁化作用以及聚集作用在检测区域中形成一高强度磁场,从而使得金属磨粒的涡流效应和磁化效应更为剧烈,以此来提升检测精度。正方形检测通道的设计充分利用了两电感线圈之间的区域,提高了传感器的检测通量。对比试验表明,内置硅钢片的存在使得磨粒传感器所检测到的信号脉冲幅值更为突出,并且其并不会改变磨粒传感器的信号噪声,这有助于获取更优的信噪比,提升磨粒传感器的检测能力。试验发现,受磁化场强弱差异的影响,激励硅钢片和内置硅钢片对置区域的磁场强度最强,金属颗粒通过该区域时会产生电感和电阻变化的脉冲峰值。电感参数能够检测到 25 μm 铁颗粒和 100 μm 铜颗粒,电阻参数可检测到 35 μm 铁颗粒和 85 μm 铜颗粒。通过结合电感参数检测结果和电阻参数检测结果,磨粒传感器可实现对 25 μm 铁颗粒和 85 μm 铜颗粒的区分检测。在接下来的研究中,将采用滤波算法以及优化检测电路方式进一步提高该传感器检测效果。本文所设计的磨粒传感器具有体积小,成本低,可实现颗粒计数的优点,可用于液压油污染物的检测,确保机械设备的安全运行,提高经济效益,节约能源。

参 考 文 献

- [1] HONG W, CAI W, WANG S, et al. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 31(5): 867-882.
- [2] ZHU X, ZHONG C, ZHE J, et al. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring: A review[J]. Tribology International, 2017: 473-484.
- [3] 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(12): 4144.
- [4] DU L, ZHE J. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring[J]. Tribology International, 2011, 44(2): 175-179.
- [5] 范红波, 张英堂, 任国全, 等. 新型磨粒在线监测传感

- 器及其试验研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 338-343.
- FAN Hongbo, ZHANG Yingtang, REN Guoquan, et al. Experimental study of an on-line monitoring sensor for wear particles in oil[J]. Tribology, 2010, 30(4): 338-343.
- [6] 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.
- [7] 王志娟, 赵军红, 丁桂甫. 新型三线圈式滑油磨粒在线监测传感器[J]. 纳米技术与精密工程, 2015(2): 154-159.
- WANG Zhijuan, ZHAO Junhong, DING Guifu. A novel online oil debris monitoring sensor with three coils[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2015(2): 154-159.
- [8] 刘晓琳, 施洪生. 三线圈内外层电感磨粒传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(11): 12-15.
- LIU Xiaolin, SHI Hongsheng. Research on three-coil inner and outer layer inductive wear particle sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(11): 12-15.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] HONG W, WANG S, TOMOVIC M M, et al. Radial inductive debris detection sensor and performance analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12): 125103.
- [12] BAI C, ZHANG H, ZENG L, et al. High-throughput sensor to detect hydraulic oil contamination based on microfluidics[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(19): 8590-8596.
- [13] DU L, ZHU X, HAN Y, et al. Improving sensitivity of an inductive pulse sensor for detection of metallic wear debris in lubricants using parallel LC resonance method[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7): 075106.
- [14] FAN X, LIANG M, YEAP T H, et al. A joint time-invariant wavelet transform and kurtosis approach to the improvement of in-line oil debris sensor capability[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(8): 085010.
- [15] LI C, LIANG M. Extraction of oil debris signature using integral enhanced empirical mode decomposition and correlated reconstruction[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(8): 085701.
- [16] JIA R, MA B, ZHENG C, et al. Comprehensive improvement of the sensitivity and detectability of a large-aperture electromagnetic wear particle detector[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3162.
- [17] 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(14): 1-12.
- [18] APPLEBY M, CHOY F K, DU L, et al. Oil debris and viscosity monitoring using ultrasonic and capacitance/inductance measurements[J]. Lubrication Science, 2013, 25(8): 507-524.
- [19] ZHANG X, ZENG L, ZHANG H, et al. Magnetization model and detection mechanism of a microparticle in a harmonic magnetic field[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(4): 1882-1892.
- [20] 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.

作者简介: 史皓天, 男, 1996 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: 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、磨粒检测技术与微流体芯片检测技术。

E-mail: zhppeter@163.com