

文章编号 1004-924X(2019)09-2043-10

## 高精度磨粒检测传感器的设计及研究

史皓天, 张洪朋\*, 王文琪, 孙广涛, 纪玉龙  
(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为了提高电感检测传感器对于非铁磁性金属磨粒的检测精度, 提出了一种可实现电感和电阻参数检测的磨粒检测传感器。所设计的传感器主要由紧密贴合的环状硅钢片和平面电感线圈构成, 硅钢片的加入增强了检测区域的磁场强度, 使得金属颗粒的磁化效应和涡流效应更加剧烈, 从而提高了电感和电阻检测精度。通过对比实验发现, 环状硅钢片在提升检测精度的同时, 并未增加电感及电阻检测信号的噪声; 且电感检测和电阻检测都对铁磁性金属颗粒具有更强的检测能力; 对于铁磁性金属颗粒, 电感检测更为有效; 但对于非铁磁性金属颗粒, 电阻检测更为有效。将电感检测结果和电阻检测结果相结合, 则可使用 20 匝的平面电感线圈实现对 55  $\mu\text{m}$  铁颗粒和 115  $\mu\text{m}$  铜颗粒的检测。本文提出的磨粒检测传感器可为液压油污染物的在线监测提供了技术支持。

**关键词:** 电感参数; 电阻参数; 高精度; 液压油

**中图分类号:** TP212.1; TH73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192709.2043

## Design and research of high-sensitivity wear debris detection sensor

SHI Hao-tian, ZHANG Hong-peng\*, WANG Wen-qi, SUN Guang-tao, JI Yu-long

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhppeter@163.com

**Abstract:** A wear debris detection sensor used to detect inductance and resistance parameters was presented, which could improve the detection sensitivity of the inductive sensor for nonferromagnetic metal particles. The designed sensor mainly consisted of a ring silicon steel sheet and planar coil. The silicon steel sheet enhanced the magnetic field strength of the detection region, making the magnetization effect and eddy current effect of the metal particles more intense, thereby improving the sensitivity of inductance and resistance detection. Through comparative experiments, it was found that the ring silicon steel sheet does not increase the noise of the inductance and resistance detection signals; and both the inductance and resistance detection capability are stronger for ferromagnetic metal particles. For ferromagnetic metal particles, inductance detection is more effective; for nonferromagnetic metal particles, resistance detection is more effective. By combining the inductance detection and resistance detection results, 55  $\mu\text{m}$  iron particles and 115  $\mu\text{m}$  copper particles can be detected using a planar coil with 20 turns. The wear debris sensor provides technical support for online monitoring of hydraulic oil contaminants.

**Key words:** inductance parameter; resistance parameter; high sensitivity; hydraulic oil

收稿日期: 2019-04-29; 修订日期: 2019-06-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51679022); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 3132019034)

## 1 引言

液压油作为液压系统的关键工质,具有润滑、密封、传递能量、防锈、抗磨和冷却等作用。随着系统的运行,液压油的品质会有所下降。液压油中磨粒、水分和气泡目前已成为油液检测的主要内容<sup>[1-2]</sup>。磨粒可直观地反映出机械零部件的磨损程度及疲劳状态<sup>[3-4]</sup>,对磨粒尺寸和浓度的检测可有效预测零件的使用寿命,可确保设备及时维修,减少因故障停修带来的经济损失。而水和空气则表征着液压油的氧化和乳化程度<sup>[5-6]</sup>,根据检测结果可对换油周期作出合理的调整。

目前,液压油污染物的检测方式主要分为在线监测和离线检测两种<sup>[7]</sup>。离线检测可实现定量分析,获取详细的设备运行信息,但其需定期送样,耗时长,无法实时反应液压油的状态。而在线监测则可确保液压油污染物监测的时效性。根据检测原理,在线监测可分为电阻法、电感法、电容法和光阻法四类。然而上述方法都各有优缺点,电感法<sup>[8-10]</sup>可区分铁磁性和非铁磁性金属颗粒,但对非铁磁性金属颗粒的检测灵敏度较低;电阻法<sup>[11-12]</sup>的检测灵敏度高,但无法判断颗粒属性;光阻法<sup>[13-14]</sup>的检测精度高,但检测结果易受油液透光性的影响;电容法<sup>[15-16]</sup>可有效区分液压油中的水和气泡,但其无法区分固体颗粒的类型。现有的各种油液检测传感器都是基于一种或两种检测原理进行设计,因而都面临检测污染物种类有限以及精度不足的问题。本课题组<sup>[17]</sup>之前提出了一种电感-电容式传感器,可对液压油中的多种污染物进行区分检测,但其对非铁磁性金属颗粒的检测精度有待提高。ZHU 等人<sup>[18]</sup>将电感传感器、水分传感器和黏度传感器设置在同一检测装置上可用于检测油液的多种参数,但该装置复杂且成本较高。Matthew 等人<sup>[19]</sup>利用超声波、电容和电感测量相结合的方法,分析润滑油中磨粒的种类及大小,该传感装置可检测直径 1 mm 的球形碎片颗粒。

电感式传感器的灵敏度仍然是限制其广泛应用的主要原因。为了提高电感式传感器的检测灵敏度,许多团队对电感传感单元的结构不断优化。DU 等人<sup>[20]</sup>证明了采用平面线圈比相同匝数的

3-D 螺线管具有更高的灵敏度。张洪朋团队<sup>[21]</sup>利用并联双线圈之间存在的互感作用,获得更好的检测效果。刘晓琳等人<sup>[22]</sup>对传统三线圈传感器进行优化,提出了一种内外层式三线圈磨粒传感器。此外,通过采用并行谐振的方法<sup>[23-24]</sup>,电感式传感器的检测灵敏度得以提高。徐涛等人<sup>[25]</sup>通过改进检测电路来提高检测精度。Bozchalooi 等人<sup>[26]</sup>使用数字滤波去除背景噪声的方式,获得更好的检测结果。此外,处理和分析数据也是提高检测精度的有效方法<sup>[27]</sup>。然而,我们注意到电感式传感器对非铁磁金属的检测能力相对较弱。如何提高液压油中非铁磁金属的检测力对于检测液压油污染物具有重要意义。

为此,本文设计了一种结合电感参数和电阻参数的高精度磨粒检测传感器。硅钢片的加入使得检测区域具有更强的磁场,从而使得金属颗粒的磁化效应和涡流效应更加剧烈,提升了电阻和电感检测的灵敏度。并且该传感器利用电阻检测法对非铁磁性金属检测能力强的特点,有效提高了传感器对非铁磁性金属的检测精度。

## 2 传感器设计及制作

### 2.1 传感器设计

如图 1 所示,为传感器的整体设计图。该传感器主要由一平面电感线圈,一圆环形硅钢片以

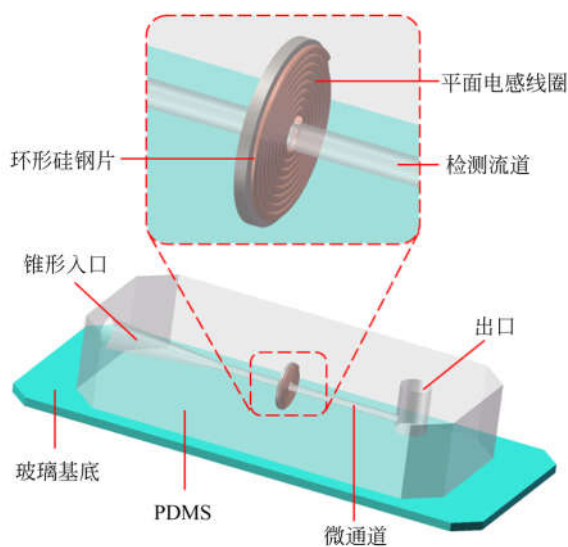


图 1 传感器设计

Fig. 1 Design of sensor

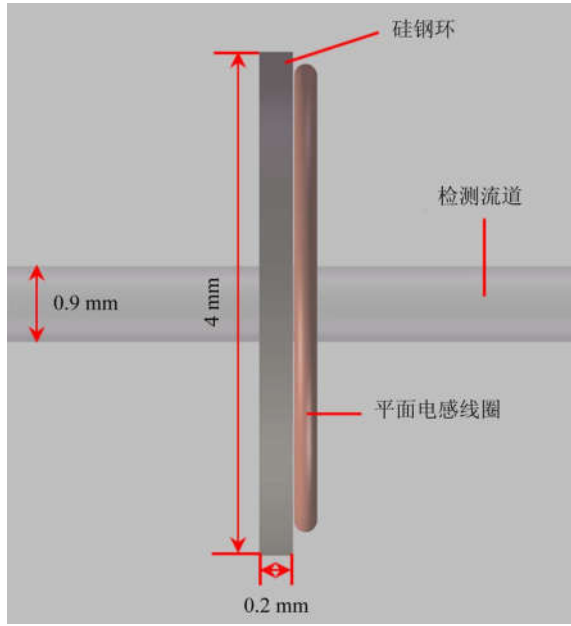


图2 检测区域

Fig. 2 Detection region

及一个直通道组成。平面电感线圈是由线径  $70 \mu\text{m}$  的漆包线绕制,匝数为 20 匝,线圈内孔直径为  $900 \mu\text{m}$ ;圆环形硅钢片的厚度为  $0.2 \text{ mm}$ ,外径为  $4 \text{ mm}$ ,内孔直径为  $900 \mu\text{m}$ 。平面电感线圈和硅钢片紧密贴合,直径为  $900 \mu\text{m}$  的通道从其内孔垂直通过。为防止污染物在流道中沉积,本文仍选用竖直式流道<sup>[28]</sup>。

首先使用强力胶将环状硅钢片和平面电感线圈紧密粘合起来,并将线圈的 2 个出线端焊接在

玻璃基底上;接着将直径  $900 \mu\text{m}$  的铜棒垂直穿过平面电感线圈和硅钢片的中心孔;然后将锥形入口模具、铜棒、平面电感线圈及硅钢片按既定位置固定在玻璃基底上,从而形成模具;随后将配制好的 PDMS 胶浇筑在模具上且放入真空干燥箱中抽真空并加热固化;最后把铜棒从固化好的芯片中的抽出,并用打孔器在芯片上制作流道出口,至此油液检测传感器制作完成。

为了形成实验对比,与上述方法相似,制作了仅含平面电感线圈的传感器。

### 3 电感-电阻检测原理

当对电感线圈施加以交流电激励后,电感线圈周围会产生交变磁场。处于交变磁场中的金属颗粒在其内部会形成电涡流,涡流会减弱原有的磁场强度;同时金属颗粒也会被磁化,对周边磁具有增强作用。检测区域中的磁场变化可由平面电感线圈捕获,表现于线圈的阻抗变化。

根据先前的研究<sup>[29]</sup>,金属颗粒通过线圈内孔中心所引起的阻抗变化峰值为:

$$\Delta Z_{\text{max}} = j\pi\mu_0\omega n_c^2 W^2 K_p \log^2 \left( \frac{d^2 + \sqrt{d^2 + W^2}}{D + \sqrt{D^2 + W^2}} \right), \quad (1)$$

其中: $\mu_0$  是真空磁导率, $n_c$  是线圈的匝数密度, $W$  是线圈的轴向长度, $d$  是线圈内孔直径, $D$  是线圈的外径, $\omega$  是激励交流电的角频率, $K_p$  是磁化因子。

$$K_p = \frac{r^3}{2} \cdot \frac{(-r^2 k^2 + 2\mu_r + 1)\sin(2\mu_r + 1) - rk(2\mu_r + 1)\cos(rk)}{(r^2 k^2 + \mu_r - 1)\sin(rk) - rk(\mu_r - 1)\cos(rk)}, \quad (2)$$

其中: $k = \sqrt{-j\omega\mu_r\mu_0\sigma}$ ,  $r$  是金属颗粒半径, $\mu_r$  是金属颗粒的相对磁导率, $\sigma$  为金属颗粒的电导率。

$\Delta Z_{\text{max}}$  的虚部为金属颗粒对平面电感线圈电感的影响,其变化值为:

$$\Delta L = \text{Im} \left\{ \frac{\Delta Z_{\text{max}}}{\omega} \right\}, \quad (3)$$

$\Delta Z_{\text{max}}$  的实部为金属颗粒对平面电感线圈电阻的影响,其变化值为:

$$\Delta R = \text{Re}(\Delta Z_{\text{max}}). \quad (4)$$

将硅钢片与平面电感线圈紧密贴合后,处于交变磁场中的硅钢片被磁化,会产生新的磁场增强了检测区域的磁场强度。强磁场中的金属颗粒具有更为突出的磁化因子,其伴有的磁化效应和涡流效应也更加强烈,使得线圈的阻抗变化更为明显,继而提高了检测精度。如图 3 所示,铁磁性颗粒以磁化效应为主,会增加检测区域的磁通量,形成正向电感脉冲和正向电阻脉冲;非铁磁金属颗粒以涡流效应为主,会减若检测区域的磁通量,形成负向电感脉冲和正向电阻脉冲。

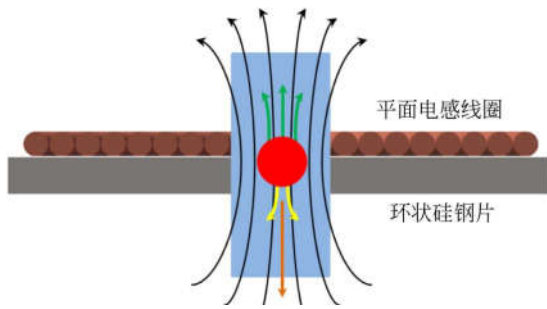


图 3 电感检测机制示意图

Fig. 3 Schematic of inductance detection mechanism

## 4 检测实验

### 4.1 检测系统的搭建

本文搭建的检测系统如图 4 所示。该系统包括微量注射泵 (Harvard pump 11 plus), 文中制作的微流体检测芯片, 显微镜 (OLYMPUS

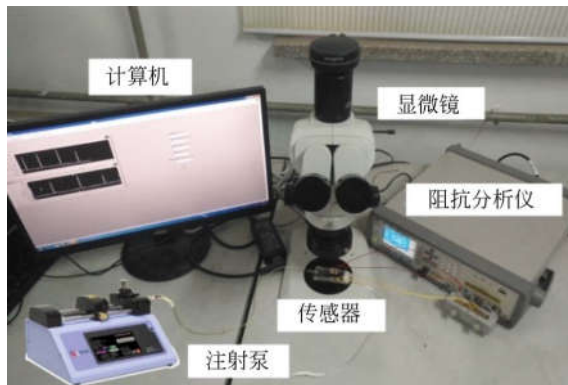


图 4 检测系统

Fig. 4 Detection system

SZX7), 阻抗分析仪 (Agilent E4980A), 安装有 LabVIEW 和 MATLAB 软件的计算机。

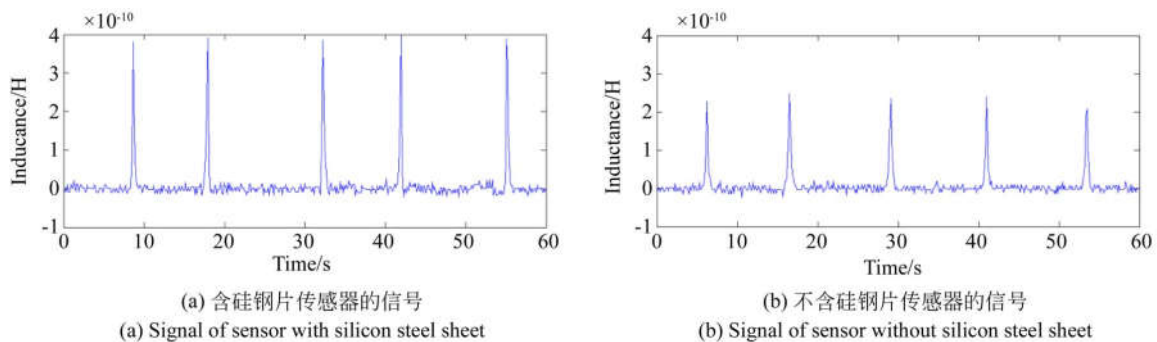
微量注射泵可定速驱动油样从锥形入口流经检测芯片的检测区域。显微镜可实时观测流经检测区域的颗粒物的尺寸, 以确保所得信号的准确性。阻抗分析仪不仅向油液检测芯片中的电感线圈提供交流电激励, 并且可通过模数转换装置经所得电感线圈的阻抗变化量实时输入到计算机。计算机中的 LabVIEW 程序可对所得电感和电阻脉冲信号进行储存和显示; 同时, MATLAB 数据处理程序可对所得脉冲信号进行测量和分析, 从而获取测得颗粒的种类、尺寸及数量。

### 4.2 电感及电阻参数检测实验

由理论分析可知, 硅钢片的加入对于电感和电阻检测都具有较大的影响。为此, 设置对比试验研究硅钢片对电感和电阻检测精度的提升效果; 然后对电感检测和电容检测的下限进行探寻。

用电子天平 (Precisa XS225A) 分别称取 2 mg 粒径为  $100 \sim 110 \mu\text{m}$  的铁颗粒和粒径为  $185 \sim 195 \mu\text{m}$  的铜颗粒, 将其分别与 100 mL 的液压油 (长城 L-HM 46) 混合并摇匀, 即制备实验所需的含有金属磨粒的液压油样品。

将平面电感线圈的两个接线端与阻抗分析仪连接, 且阻抗分析仪的激励电压和频率分别调为 2 V, 2 MHz。将微量注射泵的流量设为  $350 \mu\text{L}/\text{min}$ , 进行电感及电阻检测实验。下面使用含硅钢片和不含硅钢片的两个传感器对  $100 \sim 110 \mu\text{m}$  的铁颗粒和  $185 \sim 195 \mu\text{m}$  的铜颗粒进行了区分检测, 如图 5~图 8 所示, 为 1 min 内所得的电感检测信号以及对应的电阻检测信号。

图 5  $100 \sim 110 \mu\text{m}$  铁颗粒的电感检测结果Fig. 5 Inductance detection result of  $100 \sim 110 \mu\text{m}$  iron particles

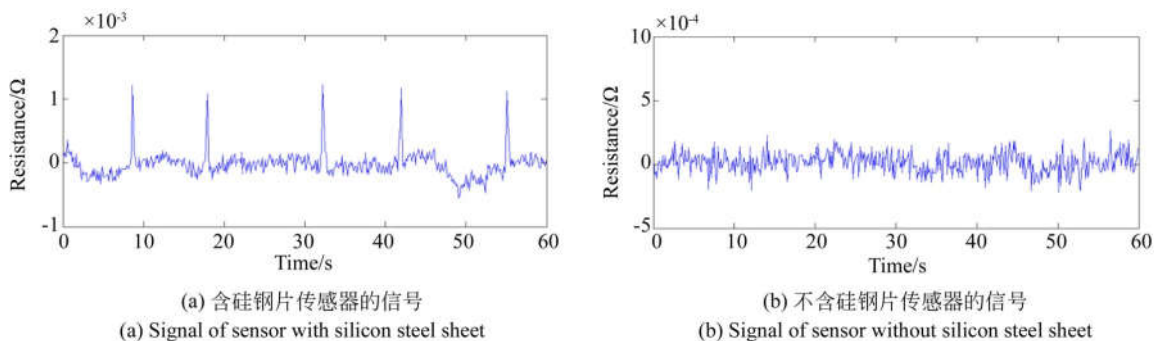


图 6 100~110 μm 铁颗粒的电阻检测结果

Fig. 6 Resistance detection result of 100~110 μm iron particles

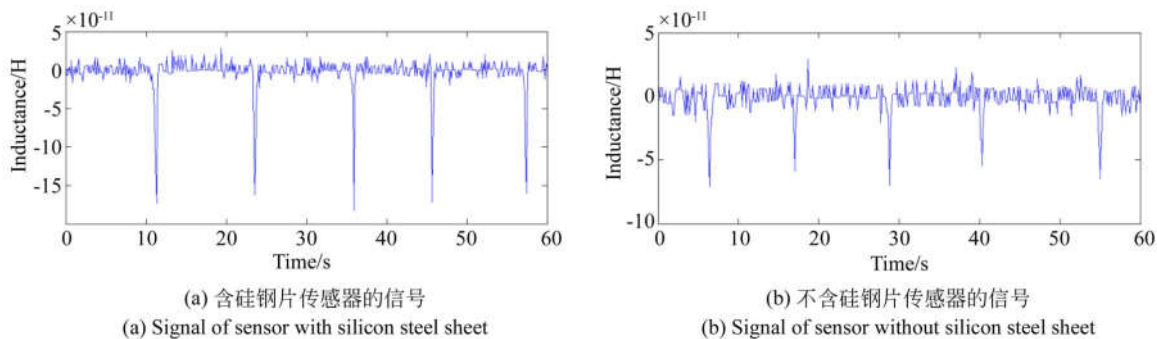


图 7 185~195 μm 铜颗粒的电感检测结果

Fig. 7 Inductance detection result of 185~195 μm copper particles

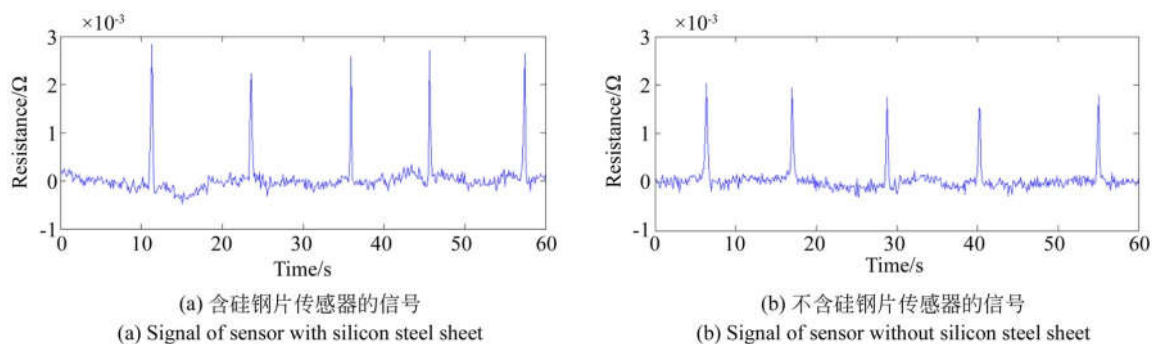


图 8 185~195 μm 铜颗粒的电阻检测结果

Fig. 8 Resistance detection result of 185~195 μm copper particles

由图 5~图 8 可知,环状硅钢片使得传感器的电感和电阻检测精度都有明显的提高。如表 1,表 2 所示,统计结果表明,添加环状硅钢片传感器较不含硅钢片传感器而言,100~110 μm 铁颗粒所产生的电感脉冲幅值提高了  $1.60 \times 10^{-10}$  H,信噪比提升了 71.36%;185~195 μm 铜颗粒所产生的电感脉冲幅值提高了  $1.01 \times 10^{-10}$  H,

信噪比提升了 148.96%。无硅钢片时,100~110 μm 铁颗粒并无电阻检测信号,添加硅钢片后,电阻信号幅值变为  $1.31 \times 10^{-3}$  Ω;硅钢片使得 185~195 μm 铜颗粒产生的电阻脉冲幅值提高了  $6.06 \times 10^{-4}$  Ω,信噪比提升了 42.06%。究其原因,环状硅钢片在交变磁场的作用下被强烈的磁化,产生了一个新的磁场,该磁场对于检测区域的磁场

表 1 电感检测信号统计表

Tab. 1 Statistics of inductance detection results

颗粒属性	传感器类型	平均电感幅值/H	电感噪声/H	信噪比
100~110 $\mu\text{m}$ 铁颗粒	含硅钢片	$3.86 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^{-11}$	11.07
	无硅钢片	$2.26 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^{-11}$	6.46
185~195 $\mu\text{m}$ 铜颗粒	含硅钢片	$1.69 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^{-11}$	4.83
	无硅钢片	$6.8 \times 10^{-11}$	$3.5 \times 10^{-11}$	1.94

表 2 电阻检测信号统计表

Tab. 2 Statistics of resistance detection results

颗粒属性	传感器类型	平均电阻幅值/ $\Omega$	电阻噪声/ $\Omega$	信噪比
100~110 $\mu\text{m}$ 铁颗粒	含硅钢片	$1.31 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-4}$	3.74
	无硅钢片		$3.5 \times 10^{-4}$	
185~195 $\mu\text{m}$ 铜颗粒	含硅钢片	$2.67 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-4}$	7.63
	无硅钢片	$1.88 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-4}$	5.37

具有增强作用,使得金属颗粒所引发的磁化效应和涡流效应更为剧烈,所引发的平面电感线圈的阻抗变化量更大,产生更明显的信号脉冲,从而提升了电感和电阻检测的精度,这与检测原理相一致。同时,注意到不同尺寸和种类的颗粒的电感和电阻检测结果的信噪比提升量并不一致,这是由于同一尺寸金属颗粒所伴随的磁化效应和涡流效应随磁场强度呈非线性增长。

由于阻抗分析仪可同时采集电感和电阻检测信号,我们需获取电感参数测量和电容参数测量的检测下限,从而得知传感器的检测能力。在对比试验中,两种传感器的电感信号噪声( $3.5 \times 10^{-11} \text{H}$ )和电阻信号噪声( $3.5 \times 10^{-4} \Omega$ )都保持为一定值,这表明硅钢片并不会增加电感和电阻信号噪声,相较通过增加电感线圈匝数(信号噪声会随线圈匝数的增加而增大<sup>[30]</sup>)来提升检测精度的方式更具优势。经过若干次实验,探究了含硅钢环传感器在不同参数下对金属颗粒的检测下限,其结果如图 9,图 10 所示。

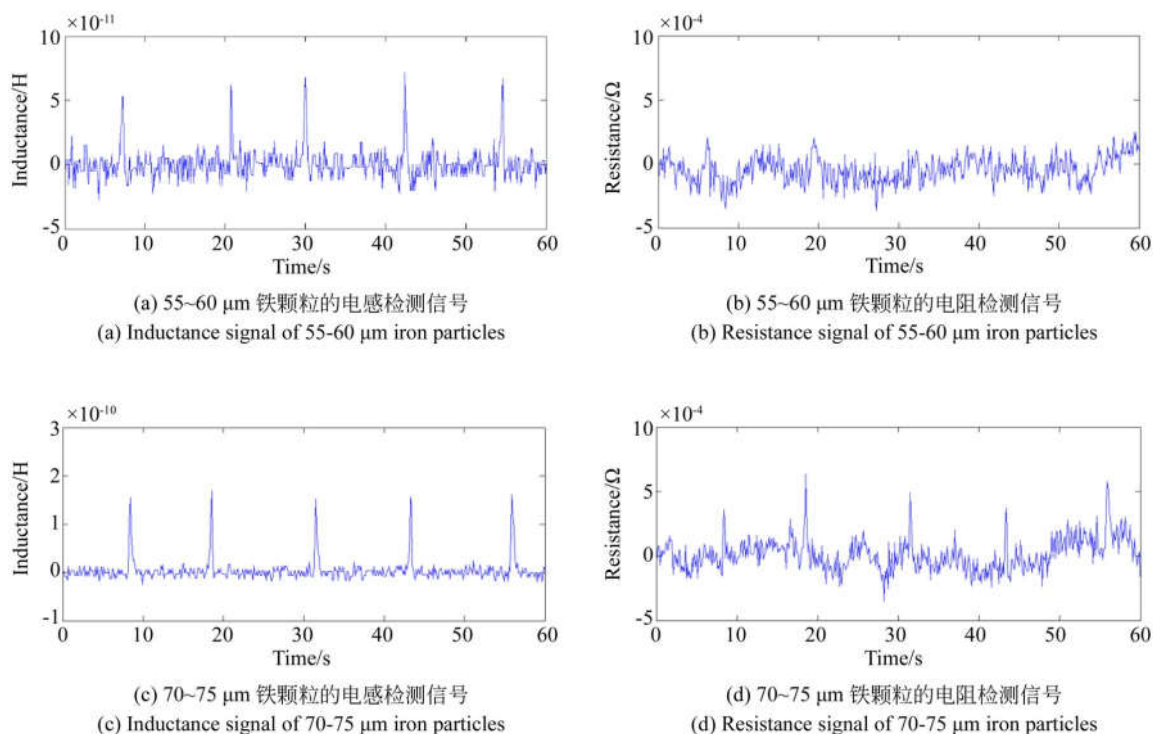


图 9 铁颗粒的检测下限

Fig. 9 Floor level of iron particles

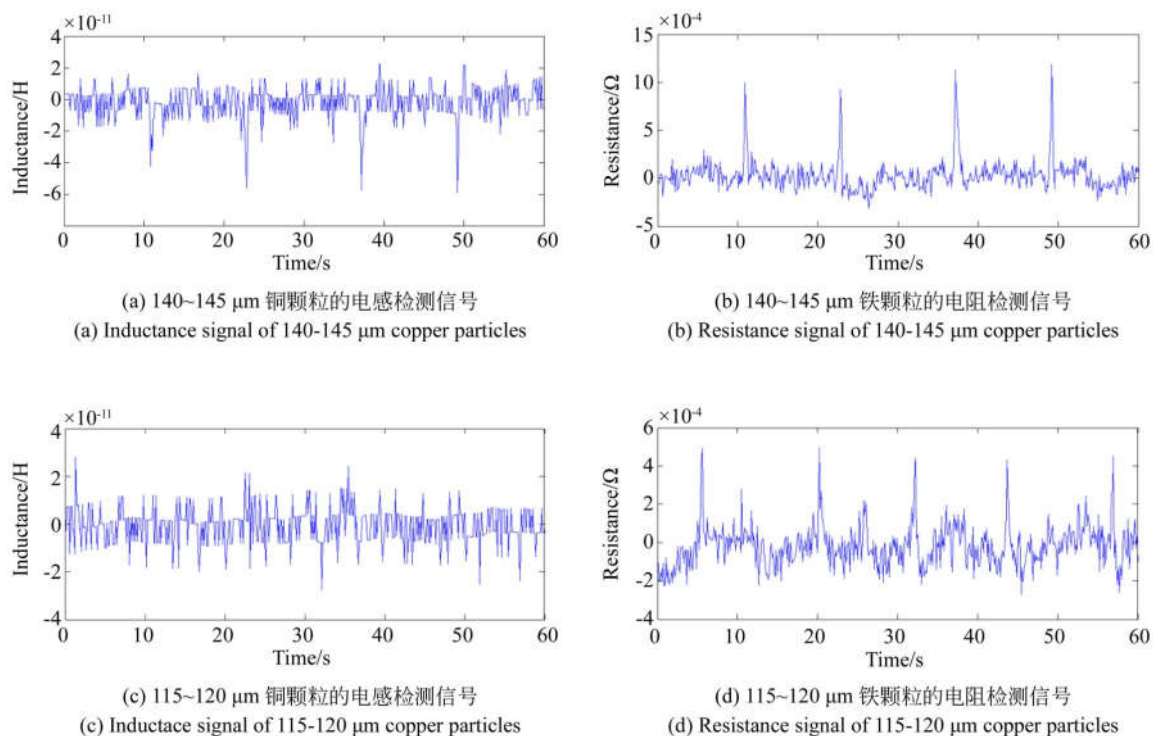


图10 铜颗粒的检测下限

Fig. 10 Floor level of copper particles

如上图所示,电感参数检测对于铁颗粒的检测下限为  $55 \mu\text{m}$ ,对于铜颗粒的检测下限为  $140 \mu\text{m}$ 。电阻参数检测对于铁颗粒的检测下限为  $70 \mu\text{m}$ ,对于铜颗粒的检测下限为  $115 \mu\text{m}$ 。电感和电阻参数可检测到的铁颗粒比铜颗粒的尺寸小,这表明电感和电阻检测对铁磁性金属颗粒的检测能力更强,究其原因,仍为金属颗粒的磁化效应较涡流效应更强。对于  $55 \sim 60 \mu\text{m}$  的铁颗粒,有明显的电感信号脉冲,但无电阻脉冲;对于  $115 \sim 120 \mu\text{m}$  的铜颗粒,有明显的电阻信号脉冲,但无电感脉冲;对比电感检测和电容检测,电感参数检测可检测到更小尺寸的铁磁性颗粒;而电阻参数检测则可检测到更小尺寸的非铁磁性颗粒。实验发现,无论何种颗粒物通过检测区域,电阻脉冲信号都为正向;而对于电感检测,铁磁性颗粒产生正向脉冲,非铁磁性颗粒产生负向脉冲。为此,对于尺寸大于  $55 \mu\text{m}$  的铁磁性颗粒,我们可以直接通过电感脉冲信号的方向及幅值来判断;对于尺寸大于  $140 \mu\text{m}$  的铜颗粒也可通过电感信号的方向及幅值来判断;对于尺寸在  $115 \sim 140 \mu\text{m}$  的铜颗粒,并无明显电感信号,而具有显著的电容信

号,可通过对比分析颗粒物所得的电感和电阻信号来实现判断。因此,该传感器结合电感及电阻信号,采用 20 匝的平面电感线圈可对  $55 \mu\text{m}$  的铁颗粒和  $115 \mu\text{m}$  的铜颗粒进行区分检测,有效解决了电感参数对非铁磁性金属颗粒检测能力较弱的问题,提升了检测精度。

## 5 结论

本文提出了一种高精度磨粒检测传感器,并研究了使用硅钢片来提高电阻和电感检测精度的方法。所设计的传感器主要由紧密贴合的环状硅钢片和平面电感线圈构成,而检测流道从环状硅钢片和平面电感线圈的中心孔处垂直通过。环状硅钢片在交变磁场中被磁化后,增强了检测区域的磁场强度,使得金属颗粒的磁化效应和涡流效应更加剧烈,从而提高了电感和电阻检测精度。通过对比实验发现,环状硅钢片在提升检测精度的同时,并未增加电感及电阻检测信号的噪声;且电感检测和电阻检测都对铁磁性金属颗粒具有更强的检测能力;对于铁磁性金属颗粒,电感检测更

为有效;对于非铁磁性金属颗粒,电阻检测更为有效;结合电感检测和电阻检测结果,则可使用 20 匝的平面电感线圈实现对 55  $\mu\text{m}$  的铁颗粒和 115  $\mu\text{m}$  的铜颗粒的检测。在接下来的研究中,需优化传感器的结构参数,以获取更优的检测下限;且

通过物理和数字滤波来提高该传感器的检测精度;同时还需提升数据采集的抗干扰能力。在完成上述优化后,该传感器可对液压油污染物的在线监测提供技术支持,确保机械设备的安全运行,从而提高经济效益,节约能源。

### 参考文献:

- [1] ASRAR N, NICKERSON W. Failure of drilling tools due to degradation of hydraulic Oils[J]. *Materials Performance*, 2015, 54(4): 60-64.
- [2] 刘银, 曾立文, 喻莉英, 等. 一种液压油污染物净化器的设计与研究[J]. *机床与液压*, 2011, 39(18): 69-71.  
LIU Y, ZENG L W, YU L Y, *et al.*. Design and study of a kind of hydraulic oil purifier[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2011, 39(18): 69-71. (in Chinese)
- [3] ZHU X L, ZHONG C, ZHE J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring - A review[J]. *Tribology International*, 2017, 109: 473-484.
- [4] 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 H B, ZHANG Y T, TAO F H, *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. (in Chinese)
- [5] 董志磊, 潘燕, 王月行, 等. 液压油污染度和水分含量在线检测研究[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(7): 129-132.  
DONG ZH L, PAN Y, WANG Y X, *et al.*. Study on continuous measurements of contaminant level and water content in hydraulic oil[J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40(7): 129-132. (in Chinese)
- [6] GUREEV A A, POPOVA N N, NIZEVA O S, *et al.*. Effect of water contamination on aging of hydraulic oil[J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 1992, 28(12): 674-677.
- [7] 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 X M, ZHANG H P, CHEN H Q, *et al.*. Study on the resolution-frequency characteristic of microfluidic oil detection chip[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(2): 427-433. (in Chinese)
- [8] DU L, ZHE J, CARLETTA J E, *et al.*. Inductive Coulter counting: detection and differentiation of metal wear particles in lubricant[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(5): 057001.
- [9] 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 E CH, ZHANG H P, WU Y, *et al.*. Effect of oil velocity on sensitivity of micron metal particle detection by inductive sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 533-539. (in Chinese)
- [10] 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 H B, ZHANG Y T, TAO F H, *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. (in Chinese)
- [11] 吴瑜, 张洪朋, 王满, 等. 基于空间微螺旋管的金属颗粒检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(3): 698-705.  
WU Y, ZHANG H P, WANG M, *et al.*. Research on the metallic particle detection based on spatial micro coil[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 698-705. (in Chinese)
- [12] 王强, 张洪朋, 张剑锋, 等. 用于微流体油液检测芯片的电阻检测法[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10z): 342-347.  
WANG Q, ZHANG H P, ZHANG J F, *et al.*. Resistance detection method for microfluidic oil detection chip[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10z): 342-347. (in Chinese).
- [13] 殷勇辉, 严新平, 萧汉梁. 光纤油液污染监测传感

- 器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2006(11): 3-4.
- YIN Y H, YAN X P, XIAO H L. Development on optic-fiber transducer in oil contamination monitoring[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006 (11): 3-4. (in Chinese)
- [14] WANG Y S, ZHANG M J, LIU D F. A compact on-line particle counter sensor for hydraulic oil contamination detection [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 130-134: 4198-4201.
- [15] 李钰洁, 王长湖, 田洪祥. 润滑油含水率检测电容传感器的设计及实验研究 [J]. 润滑与密封, 2011, 36(9): 107-110, 113.
- LI Y J, WANG CH H, TIAN H X. The design and experimental study of capacitive sensors for measuring water content in lubricating oil[J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36 (9): 107-110, 113. (in Chinese)
- [16] YANG Z C, DONG T, JENSEN A, *et al.*. Integratable capacitive sensor for identification of microfluidic two-phase flow patterns in lab-on-chip devices[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016, 25(1): 197-206.
- [17] 张洪朋, 滕怀波, 曾霖, 等. 电感-电容式微流体油液检测芯片设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25 (10):104-112.
- ZHANG H P, TENG H B, ZENG L, *et al.*. Design of inductance-capacitance microfluidic oil detection chip[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (10):104-112 (in Chinese).
- [18] ZHU X L, DU L, ZHE J. An integrated lubricant oil conditioning sensor using signal multiplexing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(1): 015006.
- [19] 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.
- [20] DU L, ZHE J. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring[J]. *Tribology International*, 2011, 44(2): 175-179.
- [21] 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.*. Double coil multi-parameter impedance sensor for hydraulic oil pollutants detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(7): 1690-1697. (in Chinese)
- [22] 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 X L, SHI H SH. Research on three-coil inner and outer layer inductive wear particle sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(11): 12-15. (in Chinese)
- [23] ZILEI YU, LIN ZENG, HONGPENG ZHANG. Frequency Characteristic of Resonant Micro Fluidic Chip for Oil Detection Based on Resistance Parameter. 2018, 9(7).
- [24] DU, L, ZHU X L, HAN Y, ZHAO L, *et al.*. Improving sensitivity of an inductive pulse sensor for detection of metallic wear debris in lubricants using parallel LC resonance method. *Measurement & Technology*, 2013, 24(7): 660-664.
- [25] 徐涛, 许琢, 韩娇. 三线圈电感式滑油磨屑传感器检测电路设计[J]. 测控技术, 2016, 35(8): 132-137.
- XU T, XU ZH, HAN J. Detection circuit design for the lubrication debris inductive sensor with three coils[J]. *Measurement & Control Technology*, 2016, 35(8): 132-137. (in Chinese)
- [26] BOZCHALOOI I S, LIANG M. In-line identification of oil debris signals: an adaptive subband filtering approach [J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, 21(1):015104.
- [27] LUO J, YU D, LIANG M. Enhancement of oil particle sensor capability via resonance-based signal decomposition and fractional calculus[J]. *Measurement*, 2015, 76:240-254.
- [28] 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 H T, ZHANG H P, GU CH ZH, *et al.*. Multi-parameter sensor for hydraulic oil pollutant [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 172-179. (in Chinese)
- [29] 张兴明. 时谐磁场金属颗粒磁化特性及微流体油液检测机理研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- ZHANG X M. *Study on Metal Particle Magneti-*

zation in Harmonic Field and Mechanism of Microfluidic Oil Detection[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. (in Chinese)

[30] 高萍. 油液中金属颗粒检测技术研究[D]. 济南:

济南大学, 2016.

GAO P. *Research on Monitoring Technology of Metal Wear Particle in Oil Fluid*[D]. Jinan: University of Jinan, 2016. (in Chinese)

#### 作者简介:



史皓天(1996—),男,甘肃会宁人,博士研究生,2017年于大连海事大学获得学士学位,主要研究方向为机电一体化,液压油污染物检测和微流体检测技术。E-mail: dmu6hao@163.com

#### 导师简介:



张洪朋(1978—),男,辽宁铁岭人,博士,博士生导师,教授,分别在2000年和2005年于大连海事大学获得学士学位和博士学位,主要研究方向为机电一体化,船舶防污染,液压油污染物检测和微流体检测技术。E-mail: zhppeter@163.com