

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905360

一种液压油磨粒检测新方法研究*

史皓天,张洪朋,王文琪,王满,曾霖
(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

摘要:液压油中的磨粒含有大量有关液压零部件磨损的重要信息,对磨粒的检测可有效预防液压系统的故障。针对电感式磨粒传感器对非铁磁性金属磨粒的检测能力较弱的缺点,本文提出了一种集成式磨粒检测装置,包括一个电容式传感器和一个电感式传感器。电容式传感器可对液压油中的气泡和金属颗粒实现区分检测,电感传感器可对液压油中的铁磁性和非铁磁性磨粒进行区分检测。通过结合比较电感和电容两个传感单元的检测结果,可实现对液压油中的气泡,铁磁性和非铁磁性金属颗粒的高精度检测。所设计的传感装置能够检测并区分 80 μm 气泡,30 μm 铁颗粒和 45 μm 铜颗粒。电容式传感器和电感式传感器的集成有效地弥补了两种检测方法各自的不足,这种多种传感器融合的方式对提高磨粒检测装置的检测精度具有重要的意义。

关键词: 液压油磨粒;电容式传感器;电感式传感器;微流体芯片

中图分类号: TP212.1 TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on a novel method for detection of wear debris in hydraulic oil

Shi Haotian, Zhang Hongpeng, Wang Wenqi, Wang Man, Zeng Lin
(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Wear debris in the hydraulic oil contains a lot of important information about the wear of hydraulic components. The detection of wear debris can prevent hydraulic system failures effectively. The inductive sensor has the shortcoming of weak ability to detect non-ferromagnetic metal particles. To solve this problem, this paper proposes an integrated wear debris detection device, which consists of a capacitive sensor and an inductive sensor. The capacitive sensor can distinguish the air bubbles and metal particles in hydraulic oil. The inductive sensor can distinguish the ferromagnetic and non-ferromagnetic metal particles in hydraulic oil. By combining the detection results of two sensors, air bubbles, ferromagnetic and non-ferromagnetic metal particles can be detected with a high sensitivity. The designed wear debris detection device in this study can detect and distinguish 80 μm air bubbles, 30 μm iron particles and 45 μm copper particles. The integration of the capacitive sensor and the inductive sensor compensates for the shortcomings of the two detection methods effectively. The combination of multiple types of sensors is of great significance for improving the detection accuracy of the wear debris detection device.

Keywords: wear debris in hydraulic oil; capacitive sensor; inductive sensor; microfluidic chip

0 引言

液压系统中作往复运动的机械部件因受摩擦磨损作用寿命有限。为了预防机器在运行期间发生灾难性零件故障,可通过对液压油中磨粒的检测间接获取零部件的工作状态。研究表明,液压油中磨粒的尺寸和浓度与机械部件磨损程度有直接的关系^[1-2]。当液压油中出现尺

寸大于 20 μm 的磨粒时,表明该设备出现异常磨损,且磨粒的尺寸和浓度也会随设备的运行而持续增加,若不及时维修,便会造成机械故障,带来经济损失。此外,液压元器件的材质也有所差异^[3],因此通过检测磨粒的材质可用于识别和定位磨损部件及位置信息。液压油中的气泡会诱发气穴和气蚀现象,导致液压系统产生振动和噪声,同时还会引起油温升高,加速摩擦表面的氧化^[4-5],因此对液压油中气泡的检测也具有一定的意义。

收稿日期:2019-07-11 Received Date:2019-07-11

* 基金项目: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)、大连市科技创新基金项目(2019J12GX023)资助

近年来,有大量涉及液压油磨粒检测装置被开发^[6]。根据检测原理主要分为光学检测、声学检测、电感检测和电容检测。光学检测法^[7-8]是根据流经检测区域的磨粒对光有阻挡作用,通过检测光强度的变化量判断磨粒的尺寸。声学检测法^[9-10]是通过检测颗粒物所产生反射波的强弱来判断其尺寸大小。电容检测法^[11-12]是基于磨粒通过检测区域时会改变两极板间的介质,通过检测电容的变化量来确定颗粒的尺寸及类型。电感检测法^[13-14]则基于电磁感应,当金属颗粒通过传感器时,金属颗粒将在感应线圈中引起电感变化,根据该变化可对液压油中的铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒区分检测。

近十年来,基于微制造技术^[15-16]的微传感器已应用于油液污染物检测,与传统油污监测传感器相比,微流体检测装置可实现颗粒计数,且便于携带,更为经济。在先前的研究中,本团队开发了一种感应脉冲传感器^[17],可以检测和区分 80 μm 的铁颗粒和 150 μm 的铜颗粒。为提升检测效果,通过加入硅钢片的方式^[18]进行优化,从而检测到 33 μm 的铁颗粒和 90 μm 的铜颗粒。Du 等^[19]通过使用 LC 谐振方法,成功检测到了 32 μm 的铁颗粒和 75 μm 的铜颗粒。但是,电感式传感器对非铁磁性金属的检测能力相对较弱,如何提高对液压油中的非铁磁性金属的检测精度,对液压油污染物的检测十分重要。Murali 等^[11]设计了一种微流体电容检测装置,其通道中间设置有间隙为 40 μm 的一对共面电极,该装置可检测 10 μm 的磨损碎片,然而此类基于电容检测原理的传感装置却无法区分金属磨粒的属性。此外,电容检测法能够实现液压油中混有的气泡的检测区分。

为了克服电容式传感器以及电感式传感器的局限性,本文提出了一种集成电容和电感检测原理的磨粒传感器,可通过电感式磨粒传感器对液压油中的铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒实现检测;通过电容式磨粒传感器,可对液压油中的混有的金属颗粒和气泡实现检测;通过比较分析电感式传感器和电容式传感器的检测结果,能够实现液压油中的各类污染物实现高精度的区分检测。

1 传感器设计及检测系统

1.1 传感器设计

传感器整体设计如图 1 所示,该传感器主要由 PDMS 基底,检测通道,电感检测单元和电容检测单元组成。检测通道的直径为 300 μm ,依次通过电感检测单元和电容检测单元;电感检测单元主要为中心孔插有硅钢片的平面电感线圈,检测流道从平面电感线圈表面通过;电容检测区域为一对直径为 500 μm 的圆形电极板,检测流道从两电极之间的区域通过。电感检测单元可对液压油中的铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒进行区分检测,电容检测单元可对液压油中的气泡和金属磨粒进行区分检测。

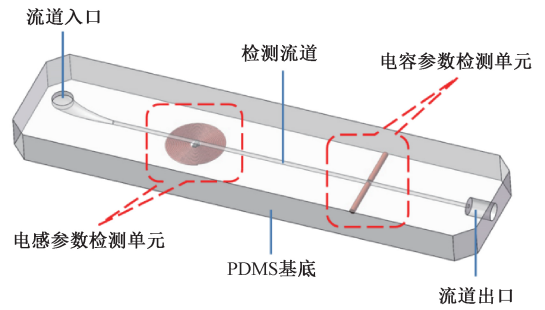


图1 传感器设计

Fig.1 The design of sensor

在电感检测单元中,硅钢片以其长度与流道方向互相垂直的方式放置,相比以长度与流道方向互相平行的放置方式,这种放置方式更有利于形成一高梯度的磁场,缩短磨粒通过检测区域的时间,获得更优的检测效果。同时,该方式也使得传感器的制作更为简便。

1.2 检测系统

本文搭建的检测系统如图 2 所示。该检测系统主要由微量注射泵(Harvard pump 11 plus),电感-电容集成传感器,显微镜(Nikon AZ100),阻抗分析仪(Agilent E4 980 A)和安装有 LabVIEW 和 MATLAB 软件的计算机组成。

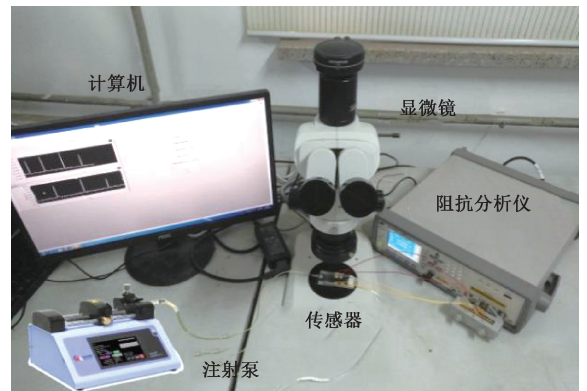


图2 检测系统

Fig.2 The detection system

微量注射泵用来驱动液压油,使其定速通过检测传感器;集成传感器用来检测油液中的颗粒物;显微镜可实时观察检测流道内的颗粒状况;阻抗分析仪既能为传感器施加激励,又能够测取信号,并将数据传输到电脑;LabVIEW 软件可显示和保存采集到的信号,MATLAB 软件对数据进行处理分析,实现对颗粒物的计数。

2 检测原理

2.1 电容检测原理

图 3 所示为电容参数检测单元的局部示意图,两电

极之间的区域为电容参数检测区域,两电极在施加激励后即可组成以平行板电容器。

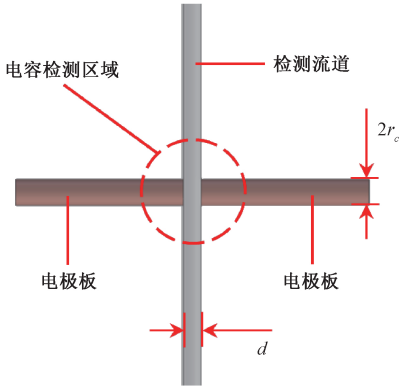


图3 电容参数检测单元

Fig.3 Capacitance parameter detecting unit

本文是通过阻抗分析仪来检测电容检测单元的阻抗值 Z 来获取其等效电容值 C_{eq} , 先前的研究表明^[20]:

$$C_{eq} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\text{Im}(Z)}{[\text{Im}(Z)]^2 + [\text{Re}(Z)]^2} \quad (1)$$

式中: Z 为理想平行电容器的阻抗值。

$$Z = \frac{d}{j\pi r_c^2 \omega \tilde{\varepsilon}} \quad (2)$$

式中: r_c 为圆形极板的半径; d 为两极板之间的距离; ω 是外部激励源的角频率; $\tilde{\varepsilon}$ 为介质的复介电常数; 且 $j^2 = -1$ 。

检测区域油液混合物的复介电常数为:

$$\tilde{\varepsilon}_{mix} = \tilde{\varepsilon}_o \frac{V_d(\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_o) + V_p(\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_o)}{V_d(\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_o) - V_p(\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_o)} \quad (3)$$

式中: $\tilde{\varepsilon}_o$ 为液压油的复介电常数; $\tilde{\varepsilon}_p$ 为颗粒物的复介电常数; V_p 为颗粒体积; V_d 为检测区域体积。

当颗粒污染物经过电容检测区域时,电容器的等效电容变化为:

$$\Delta C_{eq} = \frac{1}{\omega} \cdot \left\{ \frac{\text{Im}(Z_{mix})}{[\text{Im}(Z_{mix})]^2 + [\text{Re}(Z_{mix})]^2} - \frac{\text{Im}(Z_o)}{[\text{Im}(Z_o)]^2 + [\text{Re}(Z_o)]^2} \right\} \quad (4)$$

当电容检测区域中充满液压油时,两极板间介质的介电常数为 $\tilde{\varepsilon}_o$, 电容器的阻抗值为 Z_o ; 而当混在油液中颗粒物流经检测区域时,会排挤出等体积的液压油,从而导致两极板间介质的介电常数变为 $\tilde{\varepsilon}_{mix}$, 以致于电容器的阻抗值变为 Z_{mix} , 形成电容脉冲信号。由式(3)和(4)可知,当电容传感器的结构参数和激励参数确定后,同种颗

粒物体积 V_p 越大时,油液混合物的复介电常数 $\tilde{\varepsilon}_{mix}$ 越大,电容变化值也就越大,从而电容变化量的大小可表征颗粒物的尺寸。

2.2 电感检测原理

如图4所示,平面电感线圈的中心孔插入有一条状硅钢片,检测流道紧贴平面电感线圈表面。平面电感线圈是由 $70 \mu\text{m}$ 的漆包线绕制,共3层,每层20匝,其中心孔直径为 $900 \mu\text{m}$; 条状硅钢片的厚度为 $300 \mu\text{m}$, 宽为 $800 \mu\text{m}$, 长为 3mm 。当对电感线圈施加以交流电激励后,平面电感线圈会产生一交变磁场,而处于该磁场中的硅钢片也会被磁化,从而在电感检测区域内产生一高梯度的磁场。金属颗粒在交变磁场中会同时产生涡流效应和磁化效应,改变原有磁场。而交变磁场的变化会由平面电感线圈捕获,表现于电感线圈的视在电感值的变化。

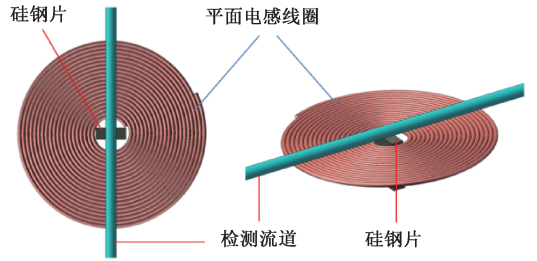


图4 电感参数检测单元

Fig.4 Inductance parameter detecting unit

根据先前的研究^[21],当金属颗粒通过检测区域时,会引起平面电感线圈的阻抗变化,金属颗粒通过线圈内孔中心的阻抗变化峰值为:

$$\Delta Z_{max} = 0.5j\mu_0\omega K_p \left[\sum_{m=1}^M \frac{P_m(z_0)}{w^2} \right]^2 \quad (5)$$

式: μ_0 是真空的磁导率; ω 是激励交流电的角频率; w 为漆包线的直径; K_p 是磁化因子。

$$K_p = \frac{r^3}{2}$$

$$\frac{(-r^2k^2 + 2\mu_r + 1)\sin(2\mu_r + 1) - rk(2\mu_r + 1)\cos(rk)}{(r^2k^2 + \mu_r - 1)\sin(rk) - rk(\mu_r - 1)\cos(rk)} \quad (6)$$

式中: $k = \sqrt{-j\omega\mu_0\mu_r\sigma}$, r 是金属颗粒半径; μ_r 是金属颗粒的相对磁导率; σ 为金属颗粒的电导率。 $P_m(z_0)$ 为线圈的几何特征和颗粒的位置函数。

$$P_m(z_0) = z_0 \lg \left(\frac{d_m + \sqrt{d_m^2 + 4z_0^2}}{D_m + \sqrt{D_m^2 + 4z_0^2}} \right) - (z_0 + w) \lg \left[\frac{d_m + \sqrt{d_m^2 + 4(z_0 + w)^2}}{D_m + \sqrt{D_m^2 + 4(z_0 + w)^2}} \right] \quad (7)$$

式中: z_0 为颗粒的几何中心到平面电感线圈表面的距离; d_m 为第 m 匝线圈的内半径, D_m 为第 m 匝线圈的外半径。

$$d_m = \frac{e}{2} + (m - 1)w \quad (8)$$

$$D_m = \frac{e}{2} + mw \quad (9)$$

金属颗粒通过线圈内孔中心引起的电感变化为:

$$\Delta L = \text{Im}\left(\frac{\Delta Z_{\max}}{\omega}\right) = 0.5\mu_0 \left[\sum_{m=1}^M \frac{P_m(z_0)}{w^2} \right]^2 \text{Re}(K_p) \quad (10)$$

当在平面电感线圈的内孔中添加以硅钢片后,处于交变磁场中的硅钢片被磁化,会产生新的磁场,从而改善平面电感线圈内孔磁场的分布以及增强检测区域的磁场强度。在新的磁场强度下,金属颗粒所伴随的涡流效应和磁化效应都更加剧烈,使得平面电感线圈的阻抗变化更为明显,继而提高了检测精度。

3 检测实验

3.1 电容检测

将电容检测单元与阻抗分析仪连接,激励设置为0.5 MHz,2 V,微量注射泵的流量设为50 $\mu\text{L}/\text{min}$ 进行电容检测实验。为了制备电容检测实验所需的含有金属颗粒的液压油样品,首先使用不同目数的筛子筛取所需尺寸的铁颗粒和铜铁颗粒,然后采用电子天平(Precisa XS225 A)称取3 mg的金属颗粒,将其与100 mL的液压油的液压油混合均匀即可。采用震荡液压油和空气的混合物的方法来制备实验所需的含有气泡的液压油样品,通过改变液压油和空气的体积比以及振荡时间的方式来控制气泡的大小。最后各取1 mL的液压油样品用于实验。如图5所示,对85~95 μm 的铁颗粒,85~95 μm 的铜颗粒以及155~165 μm 气泡进行了检测,获得了相应的电容信号图。

图5(a)所示为85~95 μm 铁颗粒的脉冲信号,图5(b)所示为85~95 μm 铜颗粒的脉冲信号。85~95 μm 铁颗粒的平均脉冲信号幅值为 4.39×10^{-16} F,信噪比为12.54;85~95 μm 铜颗粒的平均脉冲信号幅值为 4.26×10^{-16} F,信噪比为12.17。相同尺寸的铁颗粒和铜颗粒所得的电容脉冲信号十分相近,并且铁颗粒和铜颗粒所得的脉冲信号都为正向,因此无法判别金属颗粒种类,这是由于铁和铜的电导率都趋于无穷,同体积的铁颗粒和铜颗粒通过电容检测区域时对极板之间的介质的介电常数的改变量几乎一致。实验所得的85~95 μm 铜颗粒和铁颗粒的信号相差 1.3×10^{-17} F,该差别可能是由实验所测铁颗粒和铜颗粒的尺寸存在一定差异所致。图5(c)所示为155~165 μm 气泡的脉冲信号,其平均脉冲信号幅值为 4.81×10^{-16} F,信噪比为13.74;气泡产生

的信号脉冲为负向,这是由于气泡的介电常数(约为1)小于液压油的介电常数(2.6),当气泡通过电容检测区域时,会使得检测区域介质的介电常数降低,从减小电容传感器的电容值。通过电容脉冲的方向,可实现对金属磨粒和气泡的区分。

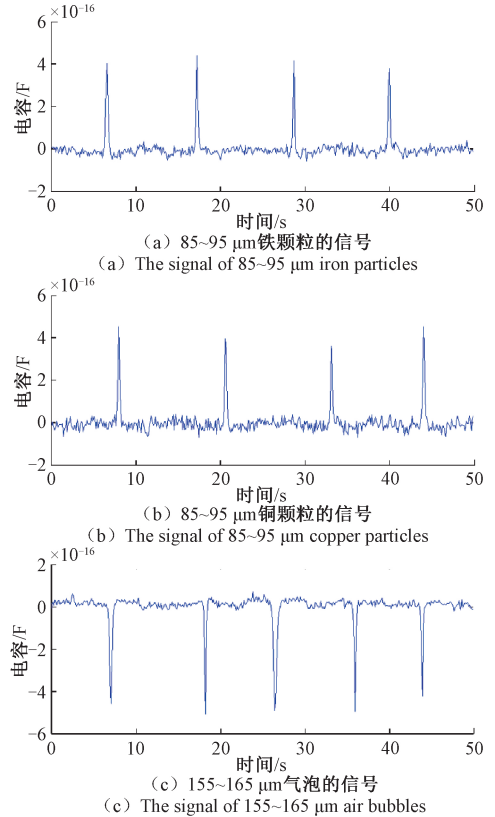
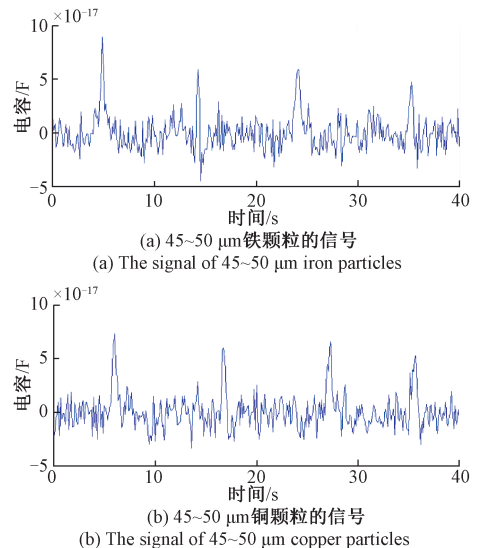


图5 电容参数检测结果

Fig.5 The detection result of capacitance parameter

如图6所示,成功检测到了45~50 μm 铁颗粒,45~50 μm 铜颗粒,80~90 μm 气泡。



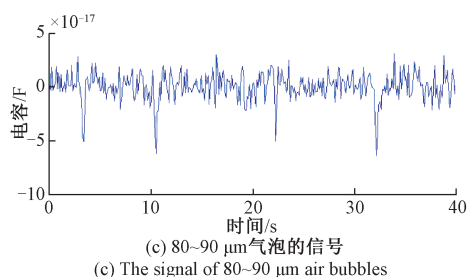
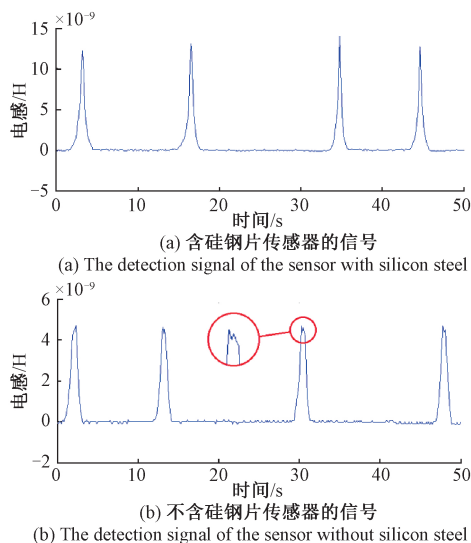


图6 电容检测下限

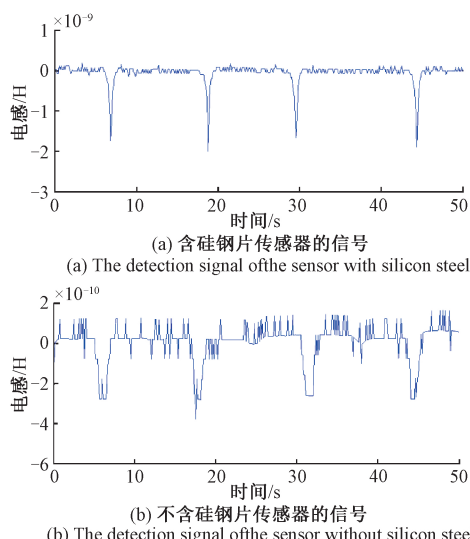
Fig.6 The floor levels of capacitance detection

3.2 电感检测

将电感检测单元与阻抗分析仪连接,阻抗分析仪的激励设置为 2 V、2 MHz,微量注射泵的流量设为 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ 进行电感检测实验。处于交变磁场中的硅钢片受磁化作用会产生新的磁场,该磁场的强度与磁化场(原有交变磁场)的强弱有关;磁化场越强,硅钢片的磁化效应越剧烈,产生的磁场越强^[22]。但平面电感线圈所产生的磁场分布并不均匀,所以硅钢片与电感线圈的相对位置影响着电感检测结果。为验证本文所设计的电感检测单元的检测效果,使用加硅钢片的电感传感器和不加硅钢片的电感传感器进行对比试验。检测结果如图7和8所示。

图7 120~130 μm 铁颗粒的电感检测结果Fig.7 The inductance detection result of 120~130 μm iron particles

统计表明,在添加硅钢片前后,120~130 μm 铁颗粒的电感脉冲幅值增加 8.44×10^{-9} H,信噪比提升了 180.19%;160~170 μm 铜颗粒的电感脉冲幅值增加 1.42×10^{-9} H,信噪比提升 435.37%。其原因为随着检测区域磁场的增强,金属颗粒所伴有的磁化效应和涡流效应随磁场强度呈非线性增长,从而使得电感检测精度显著提升。

图8 160~170 μm 铜颗粒的电感检测结果Fig.8 The inductance detection result of 160~170 μm copper particles

不加硅钢片时,120~130 μm 铁颗粒和 160~170 μm 铜颗粒所得的电感信号脉冲并不尖锐,且都会出现双峰值的现象。这是由于平面电感线圈内孔中的磁场的分布并不均匀,内孔中心处的磁场较内孔边缘处的磁场强度低^[23-24],而金属颗粒在经过检测区域时,是从平面电感线圈的外表面通过,其两次经过平面电感线圈内孔边缘,以致同一脉冲信号产生了两个峰值。而在添加硅钢片之后,所有的电感脉冲都只有一个峰值,从而表明硅钢片改善了平面电感线圈内孔的磁场分布。

如图9所示,所设计的电感传感器最小可测得 30~40 μm 铁颗粒和 130~140 μm 铜颗粒。铁颗粒产生正向脉冲信号,铜颗粒产生负向脉冲信号,因此可根据所得脉冲信号方向的不同,对铁磁性和非铁磁性金属颗粒进行区分。

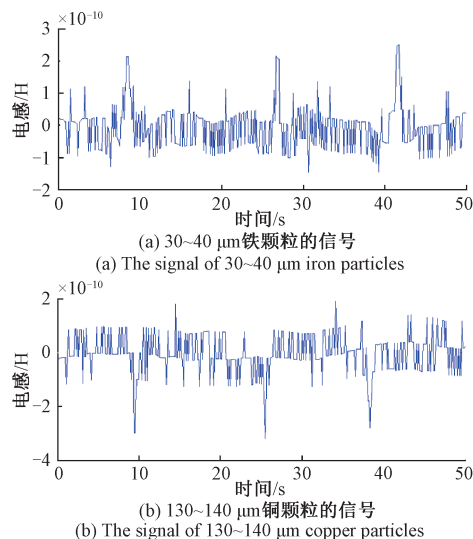


图9 电感检测下限

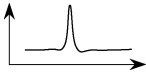
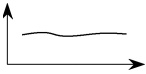
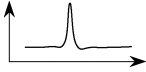
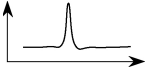
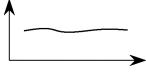
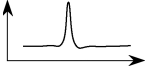
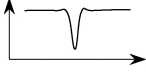
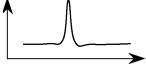
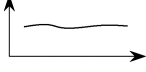
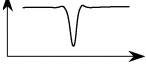
Fig.9 The floor levels of inductance detection

4 讨 论

所设计的检测装置集成了电感传感器和电容传感器,油液中的金属磨粒会通过电感和电容两个检测单元,因此可综合电感脉冲信号和电容脉冲信号对所测得的金属磨粒进行区分测量。表1所示为不同尺寸颗粒物所对应的电感和电容信号特征。

表1 电感和电容信号特征

Table 1 The signal characteristics of inductance and capacitance detection

颗粒类型	电感信号特征	电容信号特征
铁颗粒 (30~45 μm)		
铁颗粒 (>45 μm)		
铜颗粒 (45~130 μm)		
铜颗粒 (>130 μm)		
气泡 (>80 μm)		

由于电感参数对铁颗粒的检测下限为30 μm,为正向的脉冲信号;对铜颗粒的检测下限为130 μm,为负向的脉冲信号,可根据信号方向有效区分金属颗粒属性。电容参数对铁颗粒的检测能力弱于电感参数,因而可直接根据电感信号幅值判断铁颗粒的尺寸。电容参数对同体积的铁颗粒和铜颗粒的检测脉冲幅值一致,因而电容参数所得的检测结果为金属颗粒的尺寸,其中包含有铁颗粒和铜颗粒。在电容检测结果中去除电感参数检测结果中所得尺寸大于45 μm的铁颗粒,则剩余电容检测结果为尺寸大于45 μm的铜颗粒。并且,电感检测对液压油中的气泡无法实现检测,而电容检测对气泡的检测下限为80 μm,具有负向的脉冲信号。综合电感参数检测和电容参数检测所得的结果,本文所设计的检测装置可实现对液压油中30 μm铁颗粒,45 μm铜颗粒和80 μm气泡的区分检测。

5 结 论

本文设计了一种集成电感传感器和电容传感器的检测装置,并提出了高精度区分检测液压油中的铁磁性磨粒、非铁磁性磨粒和气泡的方法。实验结果表明,电容式传感器可对液压油中的金属磨粒和气泡区分测量,其可检测80 μm的气泡和45 μm的金属磨粒;电感式传感器可对液压油中的铁磁性磨粒和非铁磁性磨粒区分测量,其可检测30 μm的铁颗粒和130 μm的铜颗粒;因此,可直接根据电感检测结果来区分铁质磨粒,而根据电容检测结果可区分气泡;综合分析电感检测结果和电容检测结果,则可区分液压油中45 μm的铜颗粒。并且,电容式传感器和电感式传感器的集成不但解决了电容式传感器不能区分金属磨粒属性的缺点,也有效弥补了传统的电感式磨粒传感器对于非铁磁性金属磨粒的检测能较弱的缺点,该研究对如何提高液压油磨粒检测装置的检测精度提供了一种新的方法。本文所设计的检测装置是基于微流体技术,具有体积小、成本低、检测精度高的优点,可用于液压油污染物的在线和便携式检测,该研究为液压油污染物快速检测提供了技术支持。

参考文献

- [1] ZHU J, YOON J M, HE D, et al. Online particle-contaminated lubrication oil condition monitoring and remaining useful life prediction for wind turbines [J]. Wind Energy, 2015, 18(6):1131-1149.
- [2] 吴瑜,张洪朋,王满,等. 金属颗粒形态对电感式传感器输出特性影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10):2283-2289.
WU Y, ZHANG H P, WANG M, et al. Research on the influence of metal particle morphology on the output characteristic of micro solenoid inductive sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10):2283-2289.
- [3] 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. Review of on-line detection for wear particles in lubricating oil of aviation engine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7):1561-1569.

- [4] 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.
- [5] SCHMITZ K, MURRENHOFF H. Modelling of the influence of entrained and dissolved air on the performance of an oil-hydraulic capacity[J]. International Journal of Fluid Power, 2015, 16(3): 9.
- [6] ZHU X, ZHONG C, ZHE J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring-A review[J]. Tribology International, 2017, 109: 473-484.
- [7] 龚小龙, 田洪祥, 孙云岭, 等. 遮光法颗粒计数器测量结果的影响因素研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(8): 133-135.
- GONG X L, TIAN H X, SUN Y L, et al. Influencing factors on measurement results of light extinction particle counters[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(8): 133-135.
- [8] LASSEN M, HARDER D B, BRUSCH A, et al. Photo-acoustic sensor for detection of oil contamination in compressed air systems[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 1806.
- [9] WHITSEL H K, NORDLING D A, NEMARICH C P. Online wear-particle monitoring based on ultrasonic detection[J]. Intech, 1986, 33(6): 53-57.
- [10] 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 and Signal Processing, 2015, 60-61: 301-315.
- [11] MURALI S, XIA X, JAGTIANI A V, et al. Capacitive Coulter counting: detection of metal wear particles in lubricant using a microfluidic device[J]. Smart Materials & Structures, 2009, 18(3): 037001.
- [12] HAN ZH B, WANG Y SH, OING X L. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2851.
- [13] 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 C Z, et al. Multi-parameter sensor for hydraulic oil pollutant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 172-179.
- [14] DU L, ZHE J. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring[J]. Tribology International, 2011, 44(2): 175-179.
- [15] 张洪朋, 张兴明, 郭力, 等. 微流体油液检测芯片设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 762-767.
- ZHANG H P, ZHANG X M, GUO L, et al. Design of the oil detection microfluidic chip[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 762-767.
- [16] 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.
- [17] ZHANG H P, ZENG L, TENG H B, et al. A novel on-chip impedance sensor for the detection of particle contamination in hydraulic oil[J]. Micromachines, 2017, 8(8): 249.
- [18] ZENG L, YU Z L, ZHANG H P, et al. A high sensitive multi-parameter micro sensor for the detection of multi-contamination in hydraulic oil[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 282: 197-205.
- [19] 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): 075106-075106.
- [20] 曾霖, 张洪朋, 赵旭鹏, 等. 液压油污染物双线圈多参数阻抗抗检测传感器[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.
- [21] 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 magnetization in harmonic field[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [22] 范红波, 张英堂, 李志宁, 等. 电感式磨粒传感器中

铁磁质磨粒的磁特性研究[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(5):452-457.

FAN H B, ZHANG Y T, LI ZH N, et al. Study on magnetic characteristic of ferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor [J]. Tribology, 2009, 29(5):452-457.

- [23] 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]. Optics & Precision Engineering, 2017, 25(10):104-112.

- [24] 范红波, 张英堂, 程远, 等. 磨粒径向分布对电感式磨粒传感器测试结果的影响[J]. 传感技术学报, 2010, 23(7):958-962.

FAN H B, ZHANG Y T, CHENG Y, et al. Effect of the radial distribution of the wear debris position on the testing results of inductive wear debris sensor [J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2010, 23(7):958-962.

作者简介



史皓天, 2017年于大连海事大学获得工学学士学位, 现为大连海事大学博士研究生, 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

Shi Haotian received his B. Eng. degree from Dalian Maritime University in 2017. He is currently a Ph. D. student at Dalian Maritime University. His main research interests include marine engineering, mechatronics and microfluidic technology.



张洪朋(通信作者), 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, 现为大连海事大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机电一体化和微流体检测技术。

E-mail: zhppeter@163.com

Zhang Hongpeng (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Dalian Maritime University in 2000 and 2005, respectively. He is currently a professor and Ph. D. candidate supervisor at Dalian Maritime University. His main research interests include marine engineering, mechatronics and microfluidic technology.