

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905047

双螺线圈式液压油微污染物检测传感器*

白晨朝,张洪朋,曾霖,赵旭鹏,孙广涛
(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

摘要:设计了一种多参数的油液污染物检测传感器,该传感器在单螺线圈电感式传感器的基础上,增加了一个螺线圈,可以进行电感检测和电容检测。电感检测可以区分油液中的铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒;电容检测可以区分油液中水和空气。相对于传统单线圈式传感器,本次设计不仅实现了油液污染物的多参数检测,同时采用线径更小、匝数更多的螺线圈,增加了传感器的检测灵敏度。利用该传感器搭建的实验平台进行检测实验:电感检测时可以检测直径大于 $20\ \mu\text{m}$ 的铁颗粒和直径大于 $80\ \mu\text{m}$ 的铜颗粒;电容检测时可以检测直径大于 $90\sim 100\ \mu\text{m}$ 水滴和直径大于 $160\sim 170\ \mu\text{m}$ 气泡。该设计研究为油液污染物快速检测提供了一种新的方法,对于机械设备故障诊断与寿命预测等领域具有一定的意义。

关键词:液压油污染物;微传感器;电感检测;电容检测;微流控技术

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

Hydraulic oil micro contaminant detection sensor based on double solenoid

Bai Chenzhao, Zhang Hongpeng, Zeng Lin, Zhao Xupeng, Sun Guangtao
(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: A multi-parameter oil contaminant detection sensor is designed. Based on single-spiral inductive sensor, the sensor adds another solenoid coil, which can perform inductance detection and capacitance detection. Inductance detection distinguishes between ferromagnetic particles and non-ferromagnetic particles in oil; capacitance detection distinguishes between water and air in oil. Compared with traditional single-coil sensor, this design not only realizes the multi-parameter detection of oil contaminants, but also adopts the spiral coil with smaller wire diameter and more turns, which increases the detection sensitivity of the sensor. The experiment platform built with the proposed sensor is used to carry out test experiment. The iron particles with diameter greater than $20\ \mu\text{m}$ and the copper particles with diameter greater than $90\ \mu\text{m}$ can be detected during inductance test; the water drops with diameter greater than $90\sim 100\ \mu\text{m}$ and the air bubbles with diameter greater than $160\sim 170\ \mu\text{m}$ can be detected during capacitance detection. This study and design provides a new method for the rapid detection of oil contaminants, which has certain significance for the field of mechanical equipment fault diagnosis and life prediction.

Keywords: hydraulic oil contaminant; micro-sensor; inductance detection; capacitance detection; microfluidic technology

0 引言

液压油是工业润滑油中最大的品类,已广泛应用于各个工程领域。目前,制造企业更加注重提高设备效率,面对不断发展的技术和更严格的操作条件,液压系统向高压高精化、小型化、长换油期方面发展,同时对液压油的性能要求更为苛刻^[1]。根据相关统计,将近有75%的

液压系统机械故障是由于液压油中存在的污染物引起^[2]。液压油污染物的来源决定了污染物的种类,包括系统在加工和装配过程中残留的金属颗粒污染物,设备运行中产生的颗粒以及混杂的空气和水滴等污染物。这些污染物中蕴含设备工作状态信息。当设备正常运转时,存在一些小于 $20\ \mu\text{m}$ 的固体颗粒并保持恒定。当设备发生异常时,污染物颗粒会增加至 $100\ \mu\text{m}$ 以上,加剧液压元件表面磨损^[3]。除了固体颗粒以外,液压油中存

在的水分会腐蚀机械元件,液压油中的气泡会加速液压系统老化,使系统寿命缩减^[4-5]。

目前,对液压油的检测主要是取样送至实验室检测,检测样本大,检测周期长,不利于对液压系统的异常状态做出快速反应。国际上已经开展了一系列快速检测方法的研究^[6]。声波检测法^[7-9]和光学检测法^[10-11]检测精度相对较高,声波检测法受到外界噪声和震动的影响较大,光学检测法易受到环境温度等方面影响。电容检测法^[12]不能检测金属磨损颗粒。电感检测法^[13-15]检测精度较低,但能够区分铁磁性和非铁磁性金属颗粒,受环境影响因素小。

本文将电感检测法与电容检测法相结合,提出了一种新的检测方法。如图1所示,2个200匝的螺线圈管线圈对置分布,可以实现电感电容切换检测。设计的优势在于螺线圈管线圈的漆包线线径小,可以采用更多匝数的线圈,提升了电感检测的灵敏度。同时利用2个线圈形成的电容极板进行电容检测,实现了电感-电容的集成检测方法。

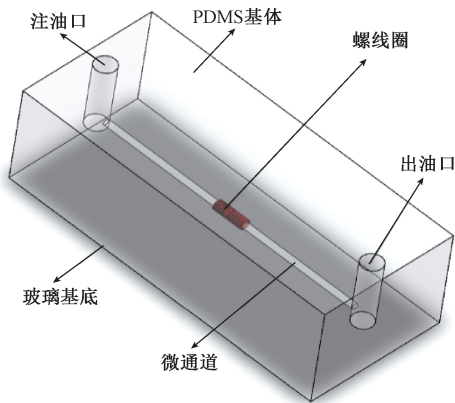


图1 传感器设计
Fig.1 The sensor design

1 传感器的设计与制作

传感器的设计原理,如图1所示,传感单元如图2所示。该传感器由2个平行放置的多层螺线圈线圈和微通道组成。微通道直径300 μm ,穿过2个螺线圈管内孔。螺线圈管线圈由线径30 μm 的漆包线绕制而成,每个线圈匝数为200匝,绕制9层。

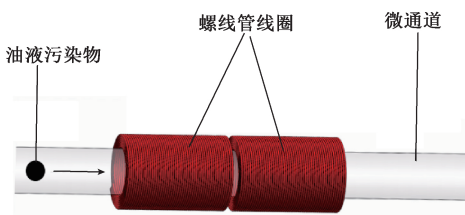


图2 传感单元
Fig.2 Sensing unit

在制作传感器时,首先用精密绕线机(实力SRDZ23-1B型绕线机,绕制螺线圈,绕制好备用,然后将PDMS胶水与凝固剂按照10:1配置待用。接着选取长7 cm,直径为300 μm 的铜棒作为制作微通道的模具,然后将其由传感单元内孔穿过,并固定在玻璃基底上,之后进行导线的连接。最后浇注PDMS胶体,放置80 $^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中进行加热固化,然后抽出铜棒形成300 μm 微通道,打孔入油口和出油口,传感器制作完成。

2 传感器的检测原理

传感器在工作时分为电感检测模式和电容检测模式。如图3所示,当A-B连接到阻抗分析仪时,传感器进行电感检测模式,此时只有1个线圈处于工作当中;当A-C端连接到阻抗分析仪时,传感器进行电容检测,此时是2个线圈同时工作。

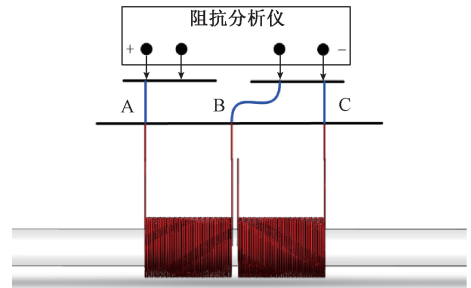


图3 电感-电容模式切换原理
Fig.3 Inductance-capacitor mode switching principle

2.1 电感检测原理

螺线圈管线圈通交流电时,线圈内部会产生交变的电磁场。金属颗粒在交变的电磁场中会产生涡流效应,当铁磁性颗粒通过线圈内部电磁场时,颗粒会被磁化,其磁化效应远大于金属颗粒自身产生的涡流效应。铁磁性颗粒磁化后会产生新的磁场,且磁场方向与原磁场方向相同,增加螺线圈管线圈的等效电感值。非铁磁性颗粒通过时,涡流效应显著,根据楞次定律,感应电流所生的磁场总是阻碍原有磁通量的变化,因此产生与原磁场方向相反的磁场,降低螺线圈管线圈的等效电感值。

在计算螺线圈管线圈电感变化量时,假设一单层空心螺线圈管线圈,轴向长度为 l ,单位长度线圈匝数为 n ,且满足 $\frac{l}{D} \geq 6$,线圈半径为 R ,通入线圈的电流为 I , μ_0 为真空相对磁导率,螺线圈管内部磁场均匀。

根据毕奥-萨戈尔德定律计算得出螺线圈管线圈内平均磁感应强度为:

$$B = \frac{1}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} B_z dz = \frac{\mu_0 n I}{l} (\sqrt{l^2 + R^2} - R) \quad (1)$$

式中: B_z 为在 Z 轴方向上的磁感应强度,螺线管线圈的电感量为:

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{NBS}{I} = \mu_0 n^2 \pi R^2 (\sqrt{l^2 + R^2} - R) \quad (2)$$

式中: ψ 为线圈的总磁通量。当线圈内充满相对导磁率为 u_m 的液压油时,电感量为:

$$L = \mu_0 \mu_m n^2 \pi R^2 (\sqrt{l^2 + R^2} - R) \quad (3)$$

当半径为 r_1 , 轴向长度 $l_1 = 2r_1$, 相对导磁率为 u_r 的金属颗粒经过磁场区域时,电感变化量为:

$$\Delta L = 1.236 \mu_0 (\mu_r - \mu_m) n^2 \pi r_1^3 \quad (4)$$

多层线圈时,线圈层数为 m , 总匝数为 N , 由式(3)得总电感值为:

$$L = u_0 u_m n^2 \sum_{i=0}^{m-1} \pi \left(R \frac{i}{n} \right)^2 \quad (5)$$

$$\left[\sqrt{l^2 + \left(R + \frac{i}{n} \right)^2} - \left(R + \frac{i}{n} \right) \right]$$

线径 $d = \frac{l}{n}$, 由式(4)、(5)得出多层线圈电感变化量:

$$\Delta L = 1.236 \mu_0 (\mu_r - \mu_m) \frac{N}{l} \pi r_1^3 \quad (6)$$

由式(6)可知,金属颗粒在螺线管空间磁场中的电感变化量与颗粒粒径和线圈参数有关:线圈线径越小,电感变化量越大;线圈匝数越多,电感变化量越大。

2.2 电容检测原理

A-C 端连接进行电容检测,电容检测可以区分水和空气。2个螺线管线圈一端分别连接到电路中,等效电路如图4所示。

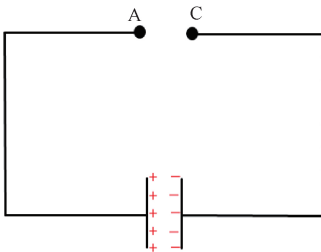


图4 等效电容电路

Fig.4 Equivalent capacitor circuit

2个螺线管等效2个环形的电容极板,如图5所示,极板两端分别加正极和负极,形成闭路电容。电场线在电容极板的两端是弯曲的,存在电容的边缘效应。当液压油中混入水滴和空气时,混合液体有不同的介电常数,根据不同的介电常数得到不同的电容值^[16-17]。

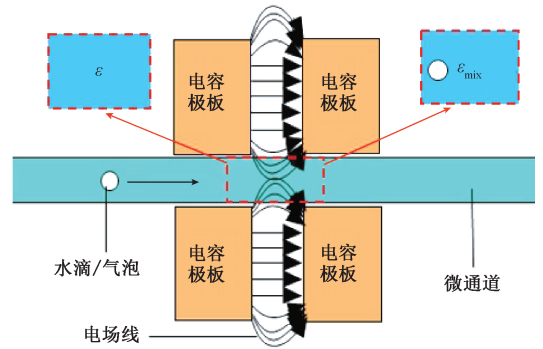


图5 电容检测原理

Fig.5 Capacitance detection principle

平板电容计算如式(7)所示。

$$C = \frac{S}{d} \quad \varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (7)$$

图5为环形平板电容,有经验公式^[18]:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\pi \varepsilon t}{V m^2} \sum_{i=1}^m [(2i-1)t + 2mR] q_i \quad (8)$$

式中: ε_0 为真空相对介电常数,其值为 $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/M}$; ε_r 为介质的相对介电常数; d 为两电容极板之间的距离; S 为电容极板面积; R 圆环内径; t 为圆环厚度; v 为极板间电压; m 为单元格数; q 为电容单元电荷个数。根据式(7)、(8)可以得出计算电容值和介电常数有关。电容检测时微通道内部会充满液压油,此时它的介电常数 ε_o ,当水和空气通过时会和液压油形成混合介电常数 ε_{mix} 。

圆形电容极板处于高频激励源当中,复合介电常数代替传统的介电常数:

$$\tilde{\varepsilon}_o = \varepsilon_o - j \frac{\sigma_o}{2\pi f} \quad (9)$$

式中: σ_o 油液电导率; f 为激励频率; $j^2 = -1$, 则有 $\tilde{\varepsilon}_{\text{mix}}^{\sim}$ ^[19]:

$$\tilde{\varepsilon}_{\text{mix}}^{\sim} = \frac{3V_d(\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_o) + 8\pi r^3(\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_o)}{3V_d(\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_o) - 4\pi r^3(\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_o)} \quad (10)$$

式中: $\tilde{\varepsilon}_p$ 为油液中空气或水滴的介电常数,将式(10)代入(8)得出:

$$\Delta C = \frac{\pi t [\text{Re}(\tilde{\varepsilon}_{\text{mix}}^{\sim}) - \varepsilon_o]}{2 m^2} \sum_{i=1}^m [(2i-1)t + 2mR] q_i \quad (11)$$

式(11)中的混合介电常数值,可以根据污染物介电常数得出(水的介电常数为80,油的介电常数为2.6,空气的介电常数为1),由于污染物介电常数值相差较大,可以得到不同的检测结果。

3 实验及数据分析

搭建实验系统的仪器包括精密 LCR 表 (Keysight E4

980 A)、微量注射泵 (Harvard Apparatus B-85259)、观察显微镜 (Nikon AZ100)、数据采集单元 LabVIEW 和文中所设计的微流控芯片传感器。实验仪器连接如图 6 所示连接。

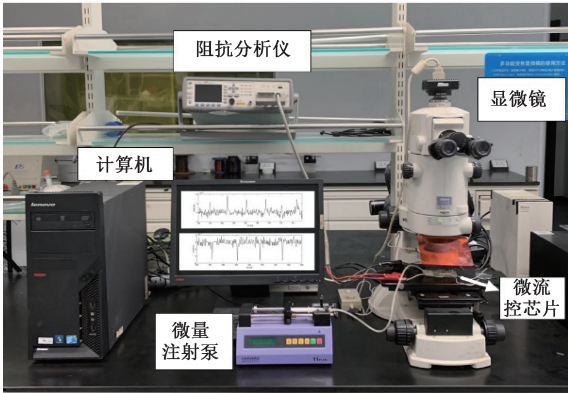


图 6 实验系统
Fig.6 Experiment system

3.1 电感检测实验

精密 LCR 表在实验前预热 30 min 后,设定检测电压 2 V,检测频率 2 MHz。实验前制备所需的金属颗粒污染物,将准备好的不同尺寸的金属颗粒放置标准筛中筛选多次直至颗粒尺寸均匀,选取粒径为 20~70 μm 的铁颗粒和 80~140 μm 的铜颗粒各 5 mg,分别与 200 ml 液压油混合。然后调试 LabVIEW 数据采集单元,微量注射泵流速为 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ 。实验时,先将不混合颗粒溶液注入微量注射泵中,然后在显微镜下观测微通道内的颗粒流动的情况,颗粒经过传感单元时,等效电感值由 LabVIEW 数据采集单元得出。

铁颗粒检测时,由大粒径颗粒向小粒径检测,先检测 70 μm 铁颗粒,其信号如图 7 所示。70 μm 铁颗粒检测效果较好,表示该传感器对于大粒径颗粒具有明显的检测能力。图 8 所示为检测 20 μm 的铁颗粒,其信号值较为清晰,能够通过波动判断有颗粒经过,但是其效果明显低于大粒径颗粒。

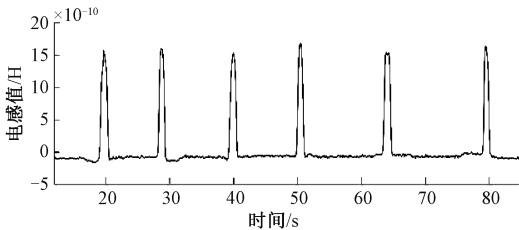


图 7 70 μm 铁颗粒信号
Fig.7 The 70 μm iron particle signal

信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 是信号值与噪声值的比值,SNR 反映了传感器的检测能力,SNR 越大,检

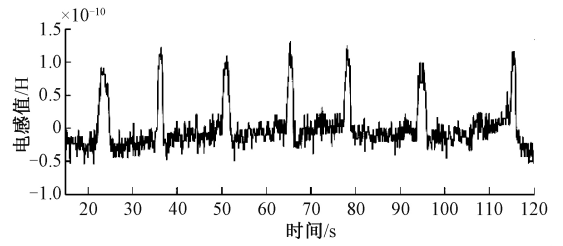


图 8 20 μm 铁颗粒信号
Fig.8 The 20 μm iron particle signal

测污染物的效果越明显。对于不同粒径的颗粒,有不同的信号值和 SNR。如图 9 所示,为 20~80 μm 粒径的铁颗粒信号值与 SNR,图中可以得出,粒径越大,SNR 越高,粒径越小,SNR 越低。对于 20 μm 以下的颗粒,传感器能够检测出,但是检测效果差,误差大,实验不予考虑。

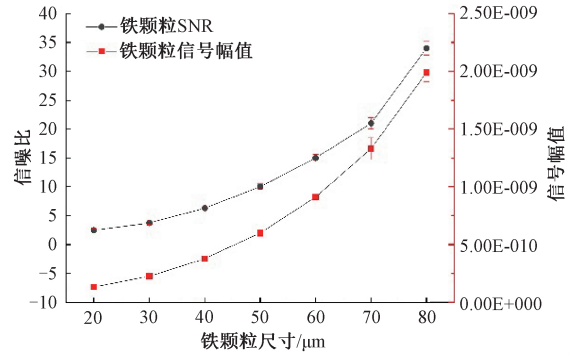


图 9 铁颗粒信噪比与信号值
Fig.9 The SNR and signal value of iron particle

铜颗粒检测时,由于非铁磁性颗粒通过时,感应电流所生的磁场总是阻碍原有磁通量的变化,因此产生与原磁场方向相反的磁场,产生的信号值向下。对于 140 μm 的铜颗粒经过检测区域时,其信号明显,如图 10 所示。当 80 μm 铜颗粒经过检测区域时,其信号较弱,如图 11 所示。

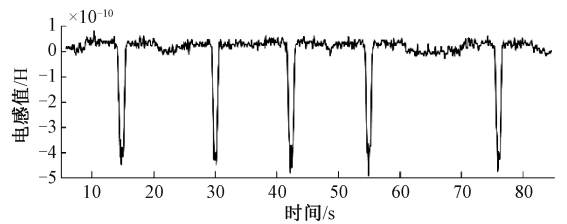


图 10 140 μm 铜颗粒信号
Fig.10 The 140 μm copper particle signal

铜颗粒与铁颗粒类似,颗粒的粒径越大,信号越强,图 12 所示为 80~140 μm 铜颗粒的 SNR 与信号图。实验得到铜颗粒检测下限为 80 μm 。

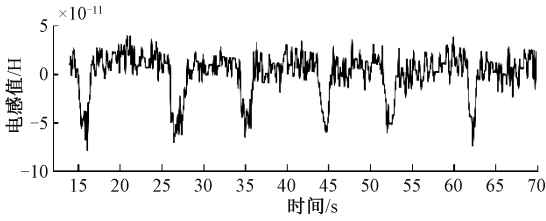


图 11 80 μm 铜颗粒信号

Fig.11 80 μm copper particle signal

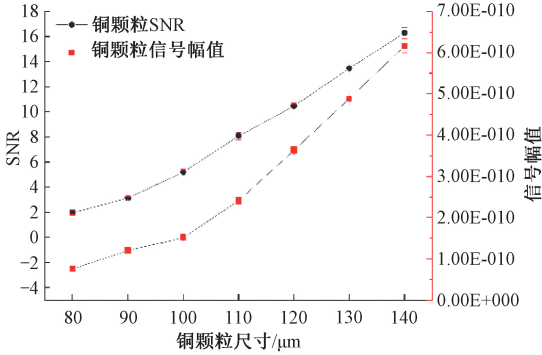


图 12 铜颗粒 SNR 与信号值

Fig.12 The SNR and signal value of copper particle

3.2 电容检测实验

通过改变传感器线圈的接线方式可以转换成电容检测,电容检测油液中的水和空气。实验前,0.05 ml 水和 10 ml 液压油混合在 10 ml 容器中,然后将其放在超声振荡器中震荡 2 min。0.05 ml 空气与 10 ml 液压油混合,装入 10 ml 容器中后放在超声振荡器中震荡 2 min。水滴和气泡制备完成。实验时,微量注射泵的流量调到 40 μl/min,精密 LCR 表提供检测电压为 2 V,检测频率为 0.3 MHz。

电容检测时,液压油,水和空气的介电常不同,会得到不同的检测结果。当油液和水混在一起时,检测电容瞬间增大,信号向上,如图 13 所示为检测 80~90 μm 水滴信号。图 14 所示为不同尺寸水滴检测时的 SNR 和信号。水的相对介电常数 80 远大于空气的相对介电常数 1,所以当油液中含有水时检测效果更佳。

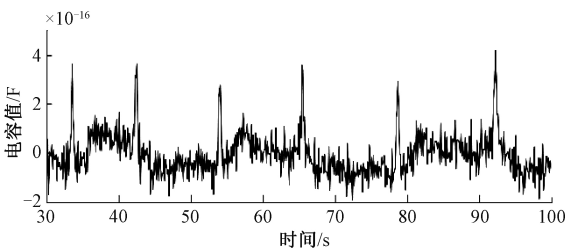


图 13 80~90 μm 水滴检测信号

Fig.13 The 80~90 μm water droplet detection signal

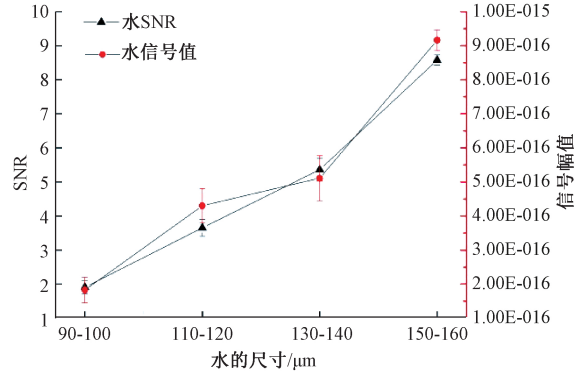


图 14 水滴 SNR 与信号值

Fig.14 The SNR and signal of water droplets value

空气的相对介电常数 1 小于液压油相对介电常数 2.6,检测时会引起信号向下,如图 15 所示为检测 160~170 μm 气泡信号,图 16 为不同尺寸的气泡检测 SNR 与信号值。

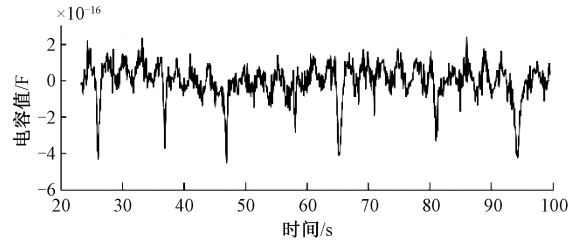


图 15 160~170 μm 气泡信号

Fig.15 The 160~170 μm air bubble signal

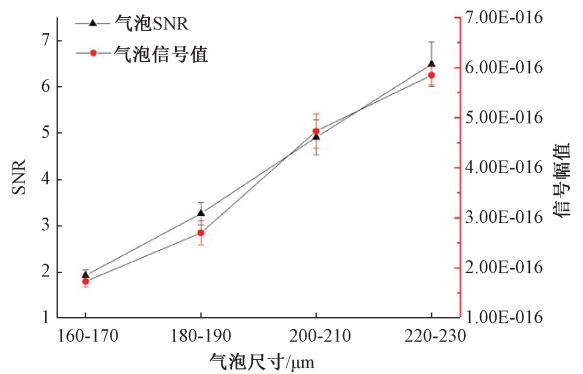


图 16 气泡 SNR 与信号值

Fig.16 The SNR and signal value of air bubbles

4 结 论

本文基于微流控油液检测技术,设计了一种双螺线圈式的油液检测传感器,该传感器集成电感检测法和电容检测法,通过不同的接线方式,2 种检测可以相

互切换。电感检测时可以检测直径大于 20 μm 的铁颗粒和直径大于 80 μm 的铜颗粒;电容检测时可以检测直径大于 90~100 μm 水滴和直径大于 160~170 μm 空气。该设计研究为油液污染物快速检测提供了一种新的方法,对于机械设备故障诊断与寿命预测等领域具有一定的意义。

参考文献

- [1] 陈惠卿. 工程机械用液压袖的选择[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(12): 46-51.
CHEN H Q. Selection of hydraulic sleeves for engineering machine maple [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32(12): 46-51.
- [2] ZHANG H P, HUANG W, ZHANG Y D, et al. Design of the microfluidic chip of oil detection [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 117-119(11): 517-520.
- [3] WILLIAMS J A. Wear and wear particles—Some fundamentals [J]. Tribology International, 2005, 38: 863-870.
- [4] HUNT, T. M. Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids [M]. Berlin: Kluwer Academic Publishers Group, 1993.
- [5] 刘鹏鹏, 左洪福, 孙见忠, 等. 涡喷发动机气路滑油泄露故障在线监测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2601-2607.
LIU P P, ZUO H F, SUN J ZH, et al. Study of online monitoring of lubrication oil leakage in turbojet engine gas path [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2601-2607.
- [6] 严中毅, 李凯. 测量仪器与现代微电子、计算机和软件技术的融合 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 631-637.
YAN ZH Y, LI K. Fusion of measurement equipment and modern microelectronics computer and software technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(5): 631-637.
- [7] 徐超, 张培林, 任国全, 等. 新型超声磨粒传感器输出特性研究 [J]. 摩擦学学报, 2015, 1: 90-95.
XU CH, ZHANG P L, REN G Q, et al. Output characteristic of a novel online ultrasonic wear debris sensor [J]. Tribology, 2015, 1: 90-95.
- [8] ZAREPOUR H, YEO S H. Single abrasive particle impingements as a benchmark to determine material removal modes in micro ultrasonic machining [J]. Wear, 2012, 288(3): 1-8.
- [9] HADI M. Influence of size of abrasive Particles in conveyor liquid on ultrasonic cavitation machining process [J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 87(1): 155-158.
- [10] ZHANG H P, CHON C H, PAN X X, et al. Methods for counting particles in microfluidic applications [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2009, 7(6): 739-749.
- [11] 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.
- [12] MURALI S, XIA X G, JAGTIANI A V, et al. Capacitive coulter counting: detection of metal wear particles in lubricant using a microfluidic device [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(3): 037001.
- [13] 周德强, 王俊, 张秋菊, 等. 铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测传感机理研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 989-995.
ZHOU D Q, WANG J, ZHANG Q J, et al. Research on sensing mechanism of ferromagnetic component flaw using pulsed eddy current testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 989-995.
- [14] Du L, Zhu X L, Han Y, et al. High throughput wear debris detection in lubricants using a resonance frequency division multiplexed sensor [J]. Tribology Letters, 2013, 51(3): 453-460.
- [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] 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): 1690-1996.

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):1690-1996.

- [17] 张洪朋,白晨朝,曾霖,等. 高通量微型多参数油液污染物检测传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2237-2245.

ZHANG H P, BAI CH ZH, ZENG L, et al. High-throughput miniature multi-parameter Oil contamination detection sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(9):2237-2245.

- [18] NISHIYAMA H, NAKAMURA M. Capacitance of disk capacitors [J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1993, 16(3): 360-366.

- [19] 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 L, ZHANG H P, TENG H B, et al. A novel method for the detection of multi-contaminants in marine lubricants[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12):125-132.

作者简介



白晨朝,2016年于大连海事大学获得学士学位,现为大连海事大学博士研究生,主要研究方向为轮机工程、机电一体化和微流体检测技术。

E-mail: baichenz@163.com

Bai Chenzhao received his B. Sc. degree from Dalian Maritime University in 2016. Now he is a Ph. D. student in Dalian Maritime University. His main research interests include marine engineering, mechatronics and microfluidic detection 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,主要研究方向为轮机工程、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. Now he is a professor and Ph. D. candidate supervisor in Dalian Maritime University. His main research interests include marine engineering, mechatronics and microfluidic detection technology.