

文章编号 1004-924X(2018)09-2236-09

高通量微型多参数油液污染物检测传感器

张洪朋*, 白晨朝, 孙广涛, 曾霖

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:为了缩短检测液压油污染物的相对时间、提升对固体污染物的检测精度。设计了一种内置玻璃管的高通量环形流道检测传感器,玻璃管内置一对硅钢片,聚合检测区磁场用以提升检测精度。流道穿过双层平面线圈内孔,通过改变平面线圈电路的连接方式,传感器可以切换两种不同的工作模式:电感检测和电容检测。电感检测可以区分铁磁性和非铁磁性固体颗粒,电容检测可以区分水滴和气泡。分别对电感检测和电容检测进行理论分析和实验验证,并且对有无硅钢片的电感检测进行仿真和实验对比。实验结果表明,环形流道设计缩短了检测时间,硅钢片的聚磁场效果可以提升对固体污染物的检测精度,铁磁性(铁颗粒)检测下限 $40\ \mu\text{m}$,非铁磁性(铜颗粒)检测下限 $130\ \mu\text{m}$,电容检测时,检测到 $200\ \mu\text{m}$ 水滴和 $270\ \mu\text{m}$ 气泡。该研究为实验液压油污染物快速区分检测提出了一种新方法。

关键词:微流控;传感器;液压油;污染物检测

中图分类号:TP212.1;TH73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182609.2236

High-throughput miniature multi-parameter oil contamination detection sensor

ZHANG Hong-peng*, BAI Chen-zhao, SUN Guang-tao, ZENG Lin

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

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

Abstract: To shorten the relative time required for detecting hydraulic oil contaminants and improving detection accuracies of solid contaminants, a high-throughput annular flow channel sensor with a built-in glass tube was designed. A pair of silicon steel plates was embedded in the glass tube to polymerize the magnetic field in the detection zone to improve the detection accuracy. The flow path passed through the inner bore of the double planar coil. By changing the manner in which the planar coil connects to the circuit, the sensor can switch between two different modes of operation: inductance detection and capacitance detection. Inductance detection can distinguish between ferromagnetic and non-ferromagnetic solid particles. Capacitance detection can distinguish between droplets and bubbles. Theoretical analyses and experimental verifications of the inductance and capacitance detection were conducted, respectively, and the simulation and experimental comparison of the silicon steel sheets for inductance detection was performed. The experimental results show that the design of the annular flow channel shortens the detection time, and the effect of the magnetic field of the silicon steel plate can improve the detection accuracy of solid pollutants. The detection limit of

收稿日期:2018-05-16;修订日期:2018-06-29.

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(No. 3132017013)

ferromagnetic particles (iron particles) was found to be $40\ \mu\text{m}$, and the lower limit of detection of non-ferromagnetic particles (copper particles) was $130\ \mu\text{m}$. When capacitance was used for detection, $200\ \mu\text{m}$ droplets and $270\ \mu\text{m}$ bubbles were detected. This study thus proposes a new method for rapid differential detection of experimental hydraulic oil contaminants.

Key words: microfluidics; sensors; hydraulic fluids; contaminant detection

1 引言

液压油是液压系统的“血液”,可以起到传递能量,减小相对摩擦,控制系统温升以及防止工作原件表面氧化的作用^[1]。液压系统是现代机械工程中的主要组成部分,尤其是在船舶海运方面,甲板上的舵机、起货机、锚机及绞缆机等都采用液压系统来提供动力。液压油质量的优劣对船机能否正常地工作有直接影响。因此,油液需要满足相应的性能指标^[2],才能保证液压设备正常工作。据统计,在液压系统故障中,75%以上的故障是由液压油失效引起的^[3]。液压油中的污染物来源包括内部生成污染物和外界入侵污染物,污染物主要包括固体颗粒、水以及空气等^[4]。液压油污染物反映整个液压系统的工作状态,固体颗粒污染物粒径在 $20\ \mu\text{m}$ 以下,是在正常允许的污染范围,一旦机械发生异常磨损,产生的固体颗粒粒径迅速增大,甚至达到 $100\ \mu\text{m}$ 以上,易产生危险工况,造成系统瘫痪^[5-7]。水污染物对设备的工作表面进行腐蚀,气泡污染物会在工作表面产生气穴和气蚀,这会对整个液压系统的整体性和稳定性造成破坏^[8-9]。因此,污染物检测是辨别液压油系统整体性能的重要方法,根据检测结果及时更换油液,可使损失最小化,节约经济成本。

油液检测技术在国内外已存在相关研究,主要在实验室进行检测,检测时效性低,尤其是在海船方面,实现跟船检测较为困难。为了实现在线检测,目前已经有一系列污染物快速检测方法,基于其原理不同,有如下多种方法。例如声波检测法、光学检测法、电感检测法和电容检测法等^[10]。声波检测法^[11]和光学检测法^[12-13]检测精度高,前者易受到噪声和震动等条件影响,后者易受到温度和油液渗透性等环境影响。电感检测法^[14-16]可以区分铁磁性和非铁磁性颗粒,受环境影响因素小,但不能检测水和气泡,检测精度较低,课题组在此基础上设计微小平面线圈和微通道结构的

微流控检测传感器^[17],微通道直径为 $300\ \mu\text{m}$,对检测精度有了较大提升。电容检测法^[18]对气泡和水具有较好的检测效果,但不能区分金属颗粒。上述方法都只能检测一种或两种污染物,对此,课题组采用平面线圈结构,提出一种双线圈多参数阻抗传感器^[19],该传感器可以同时检测上述4种污染物。

上述方式检测精度和检测污染物种类都有较大提升,但在检测时,油液通过微通道的流量较小,对于给定容量的样本检测时,检测时间较长。本文在实验室团队的基础上,设计一种大通量的环形微通道,同时在通道内部玻璃管添加硅钢片材料使内部磁场聚集在通道周围,达到提升检测精度的目的。本文还通过改变线圈排列方式,采用通道穿过双层平面线圈内径的方式,实现了铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒,气泡和水等污染物的多参数检测。

2 微通道和传感器的设计与制作

2.1 环形微通道的设计

环形微通道的设计如下图1所示,该流道直径为 $1\ 500\ \mu\text{m}$,中间部分是直径为 $900\ \mu\text{m}$,单头封死的毛细玻璃管,毛细玻璃管内径为 $800\ \mu\text{m}$,厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 。芯片做好后,毛细玻璃管插入流道并固定。毛细管与流道内壁之间形成直径为 $300\ \mu\text{m}$ 的环形流道。该流道和团队之前所设计的流道直径相同,但流道截面显著增大。

根据实验室前期理论可知^[20],当颗粒贴近流道内壁时,检测效果明显。该新型流道的设计,不仅将污染物分割在圆形内壁四周,使其具有更好的检测效果。还增加了流道的截面积,其截面积 S_2 为 $\pi R_1^2 - \pi R_2^2 = 0.36\pi$,相比与团队之前设计的 $300\ \mu\text{m}$ 微通道^[17],其截面积 S_1 为 $0.022\ 5\pi$,两个流道面积比 $S_1/S_2 = 16$,所以本文设计的环形微通道相比于团队前期微通道结构,流量在理想情况下增大了16倍,缩短了检测所需要的时间。

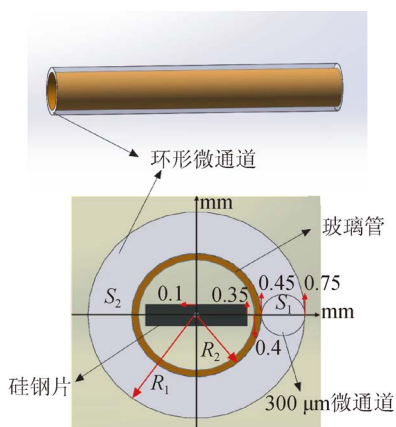


图 1 环形微通道设计图

Fig. 1 Circular micro-channel design

2.2 传感器的设计

传感器的整体设计如图 2 所示,该传感器的两个平面线圈贴合在一起,流道由线圈内孔穿过与线圈垂直,平面线圈由精密绕线机(中山实力,SRDZ23-1B,中国)绕制,使用直径 $70 \mu\text{m}$ 漆包线,绕制匝数经测量和对比,30 匝的线圈基础噪声值在 $3.2\text{E-}11$,噪声值相对较低,检测信号相对较高,信噪比较大,因此绕制 30 匝的平面线圈,单层平面线圈匝数和起绕点均相同。平面线圈内径 $1\,500 \mu\text{m}$ 。

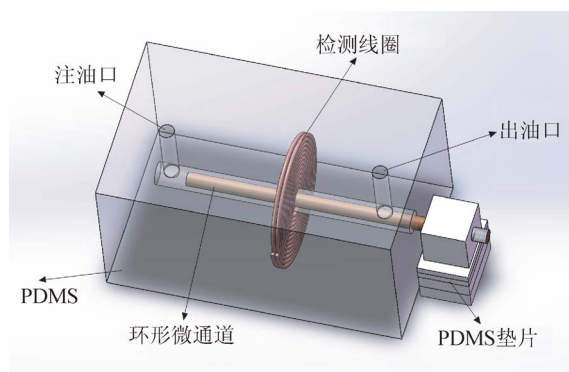


图 2 传感器整体设计

Fig. 2 Sensor overall design

图 3 所示为玻璃管内部硅钢片与平面线圈的位置剖面图,硅钢片固定在毛细玻璃管内部,与玻璃管内壁贴合,两块硅钢片分别在各自对应线圈中心且留有微小间隙,这可以将每一层线圈的磁场聚合在对应硅钢片的顶端,使磁场叠加在一起。

此传感器的设计,不仅实现了检测“大”通量,并利用了硅钢片的聚磁场效应,在电感检测时,能

够提升对铁磁性和非铁性颗粒的检测精度。通过改变电路的连接方式,切换电容检测,能够检测出油液中的水和气泡。

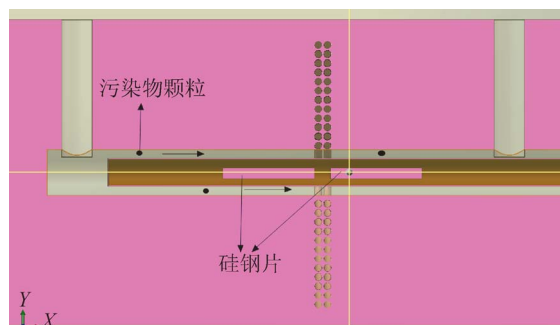


图 3 检测区域剖面图

Fig. 3 Detection area profile

2.3 传感器的制作

设计好传感器后进行制作,首先绕制平面线圈,采用绕线机(中山实力,SRDZ23-1B,中国)绕制平面线圈 5 对,将每对线圈贴合,用金属胶水固定。制作微通道的模具采用 $1\,500 \mu\text{m}$ 直径的铜丝,制备 5 根。将 PDMS(聚二甲基硅氧烷)按照胶体与固化剂 $10:1$ 比例融合,放着真空箱抽出气泡。准备 5 根单头封死的直径为 $900 \mu\text{m}$,壁厚为 $100 \mu\text{m}$,内径为 $800 \mu\text{m}$ 的毛细玻璃管和 10 片长 $2\,000 \mu\text{m}$,宽为 $70 \mu\text{m}$,厚度为 $200 \mu\text{m}$ 的硅钢片。接下来将直径为 $1\,500 \mu\text{m}$ 的铜棒插入内径为 $1\,500 \mu\text{m}$ 的平面线圈中,然后在载玻片上焊接,浇注 PDMS 后放置 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烤箱中,恒温固化 1 h 后抽出铜棒,此时铜棒被抽出,由于 PDMS 已经固化,将会形成 $1\,500 \mu\text{m}$ 的通道。取两根直径为 $300 \mu\text{m}$ 毛细玻璃管,在上下两侧定住两片硅钢片,如图 4 所示。

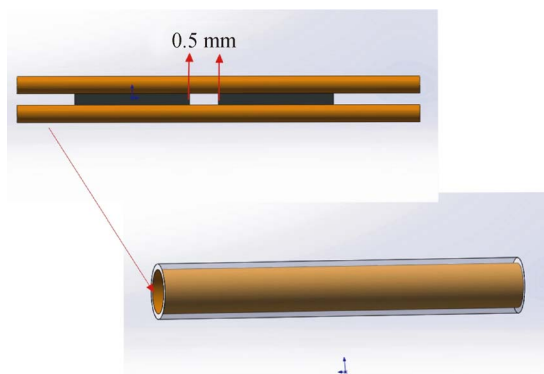


图 4 工艺流程

Fig. 4 Process flow

图 4 中,硅钢片与两根玻璃管采用少量胶水固定,两片硅钢片之间预留出相应间隙 0.5 mm,将制作好的部件插入内径为 800 μm 毛细玻璃管中,并向毛细玻璃管内部浇灌 PDMS,将硅钢片和两根支架毛细管一同固定在 800 μm 毛细管中,最后将带有硅钢片的毛细玻璃管推入通道中,硅钢片间隙与平面线圈对应,用制作好的 PDMS 垫片将毛细玻璃管固定并调节位置,芯片制作完成。为了验证实验的准确性,选出制备完整性最接近的 5 块芯片,每块材料方法都相同,实验时进行对比,取平均值计算数据。

3 原理分析与 COMSOL 仿真

3.1 电感检测原理

将两个平面线圈并联在一起,接入电路中,等效电路如图 5 所示。

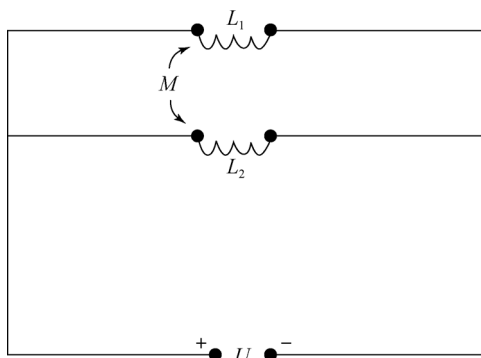


图 5 并联等效电路图

Fig. 5 Parallel equivalent circuit diagram

如图 5 所示,在并联电路中,电感 $L_1 = L_2 = L$,电压,电流相等,他们之间存在着相同的互感 M ,两线圈并联存在电感耦合,耦合电感为:

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}, \quad (1)$$

整理得:

$$L_T = \frac{1}{2}(L + M). \quad (2)$$

当颗粒流经交变的电磁场时,铁磁性颗粒由于自身的磁化作用大于产生的电涡流效应,会产生与检测脉冲相同方向的内感信号。非铁磁性颗粒通过时,根据楞次定律,颗粒内部会产生涡流,其产生的电涡流磁场抵消部分原有的磁场,使磁感应强度降低,因此会产生相反的信号,根据产生

信号的方向判断颗粒铁磁性和非铁磁性。

根据磁化理论^[17]可知,设 B_0 为初使线圈磁感应强度分布, H_0 为磁场强度分布, B_1 为磁化时颗粒内部磁感应强度分布, H_1 为磁化后的场强分布, M 为磁化强度, K 为退磁因子, χ_M 为材料的磁化系数, μ_0, μ_R 分别为真空磁导率和颗粒的相对磁导率。当颗粒流经检测区域时有磁化公式:

$$B_0 = \mu_0 H_0, \quad (3)$$

$$B_1 = \mu_0 \mu_R H_1, \quad (4)$$

$$H_1 = H_0 - KM, \quad (5)$$

$$M = \chi_M H_1, \quad (6)$$

$$\chi_M = \mu_R - 1, \quad (7)$$

整理得:

$$B_1 = \frac{\mu_R}{1 + K\chi_M} B_0. \quad (8)$$

颗粒磁化后的磁感应强度 B_1 , 取决于初始磁感应强度, 因此, 在玻璃管内部加入硅钢片聚磁场, 可以加强颗粒的磁化作用, 达到提高精度的目的。利用 COMSOL 多物理场耦合软件进行聚磁场仿真, 判断聚磁场效果及硅钢片的最优位置, 如图 6 所示, 图 6 为二维轴对称模型, 图 7 以二维轴对称模型为基础延伸到三维立体空间磁场模型。

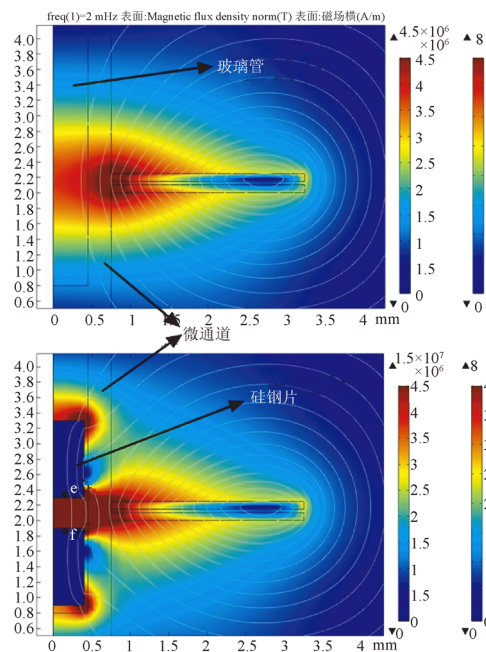


图 6 二维模型对比

Fig. 6 Comparison of 2-D models

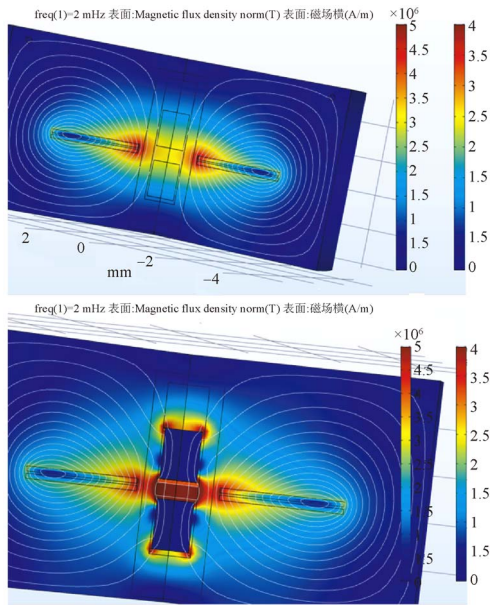


图 7 三维模型对比

Fig. 7 Comparison of 3-D models

所建立的二维模型,能直观地反映物理场在某个剖面的磁场情况,模拟了芯片检测区域的物理场情况,考虑到所使用漆包线具有绝缘层且所有工艺均为人工操作,会产生误差,所以流道外壁与检测线圈之间在仿真时假设误差量为 0.1 mm。硅钢片的相对导磁率值设为 7 000,两层线圈的材质均为铜,流道内充满液压油,其余均为空气,经有无硅钢片的仿真模型对比,确定了硅钢片材质具有良好的聚磁场作用。

由仿真模型中,可以看出在整个仿真区域内,硅钢片将磁场聚集在顶端,如图 6 点 e 和点 f 处所示,其最磁场强度最大值由 4.5×10^6 (T) 增加至 1.5×10^7 (T),两层线圈的磁场相互叠加效果明显,可以保证颗粒流过时,检测区域会有更高的磁场聚集度。结合上述推导公式(8),为提升精度实验提供了理论与仿真依据。

3.2 电容检测原理

电容检测时,两层平面线圈等效两个圆形电容极板,环绕在微通道周围,如图 8 所示,电容极板间存在的边缘效应,在极板两侧的电场线是弯曲的,由于流道贴合线圈内壁,因此,水和气泡经过时,由于介电常数的不同,会引起电容幅值的改变。

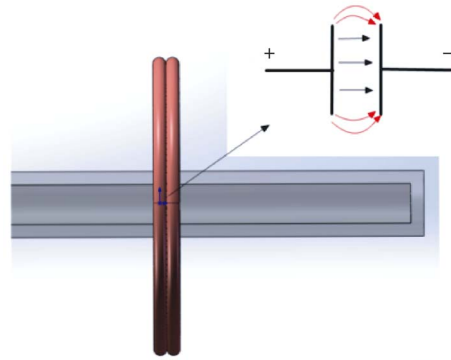


图 8 等效电容极板

Fig. 8 Equivalent capacitor plate

平板电容计算公式:

$$C = \epsilon \frac{S}{d}, \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0. \quad (9)$$

图 8 所示为环形平板电容,有经验公式^[21]:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\pi \epsilon t}{V m^2} \sum_{i=1}^m [(2i-1)t + 2mR] q_i, \quad (10)$$

其中: ϵ_0 为真空介电常数 8.854×10^{-12} F/M, ϵ_r 为电容极板间介质的介电常数, S 为极板面积, d 为极板间距, V 为极板电压, R 圆环内径, t 为圆环厚度, m 为单元格数, q 为单元电荷个数。由式(9),式(10)可得,电容值的大小取决于介电常数,当微通道内充满油液时,有介电常数 ϵ_0 ,气泡或水滴通过时,混合介电常数 ϵ_{mix} 。因圆形电容极板处于高频激励源当中,传统介电常数不再适应,引入复介电常数:

$$\tilde{\epsilon}_0 = \epsilon_0 - j \frac{\sigma_0}{2\pi f}, \quad (11)$$

其中: σ_0 油液电导率, f 为激励频率, $j^2 = -1$ 团队对于混合介电常数 $\tilde{\epsilon}_{\text{mix}}$ ^[22]进行了丰富的理论推导和建模,直接引用推导公式:

$$\tilde{\epsilon}_{\text{mix}} = \tilde{\epsilon}_0 \frac{3V_d(\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_0) + 8\pi r^3(\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_0)}{3V_d(\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_0) - 4\pi r^3(\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_0)}, \quad (12)$$

其中: $\tilde{\epsilon}_p$ 为油液中空气或水滴的介电常数,由公式(12)得出混合介电常数和油液及污染物介电常数之间的关系,根据污染物介电常数的不同(水 $\epsilon_w = 80$,油 $\epsilon_o = 2.6$,空气 $\epsilon_a = 1$),混合介电常数值不同,获得不同的电容幅值,得到检测结果。

4 实验及数据分析

实验所用到的仪器包括阻抗分析仪(Keysight

E4980A)、显微镜 (Nikon AZ100)、微量注射泵 (Harvard Apparatus B-85259)、带有 LabVIEW 数据采集单元的计算机和传感器。实验前将各部分依次连接,试验台系统如图 9 所示。

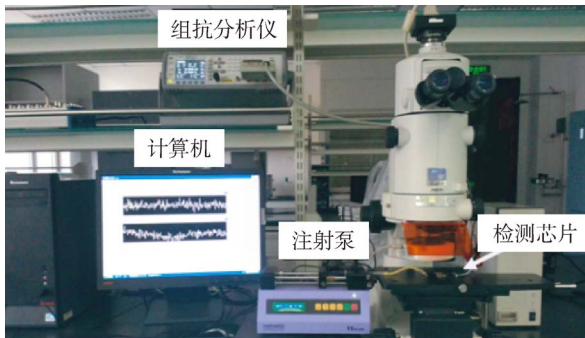


图 9 实验台系统

Fig. 9 Experiment bench system

4.1 电感检测

实验前,先将阻抗分析仪预热 30 min 后,调试输入检测电压 2 V,频率 2 MHz。实验前先准备好不同粒径尺寸的铁颗粒和铜颗粒,每种规格颗粒都是以 5 μm 为一个数量级,为了保证颗粒大小分布均匀,将准备好的颗粒放置标准筛中继续筛选 2~3 次,然后取出粒径为 30~70 μm 的铁颗粒和 120~180 μm 的铜颗粒各 5 mg,分别与 200 mL 液压油混合备用,将计算机与电脑连接,打开 LabVIEW 数据采集单元进行调试,将微量注射泵调到 200 $\mu\text{L}/\text{min}$ 。实验时,将不同尺寸的颗粒溶液注入其中,将检测区域放置在显微镜下观察微通道内的颗粒通过情况,在计算机上观察等效电感值的变化。

先对铁颗粒进行检测,检测将对有无硅钢片的芯片进行对比,经多组数据分析和尺寸测量结果,发现无硅钢片的检测传感器检测下限为 65 μm ,信噪比为 1.55,当信噪比接近 1 时,电感峰值与噪声不能明显区分,认为其失去了检测能力。图 10 为无硅钢片检测 65 μm 信号图。

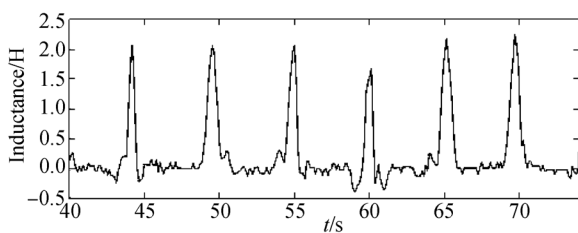


图 10 无硅钢片芯片检测 65 μm 铁

Fig. 10 Non-silicon steel chip detection 65 μm iron

同样的方法检测有硅钢片的传感器芯片,经多次检测 65 μm 铁颗粒,计算出其平均信噪比为 5.50,检测信号值明显大于无硅钢片的传感器信号值,如图 11 所示,并由此确定了其检测下限为 40 μm ,信噪比为 1.65,如图 12 所示。通过检测信号值进行对比,得出结论,有硅钢片的检测传感器检测能力更强,精度更高。

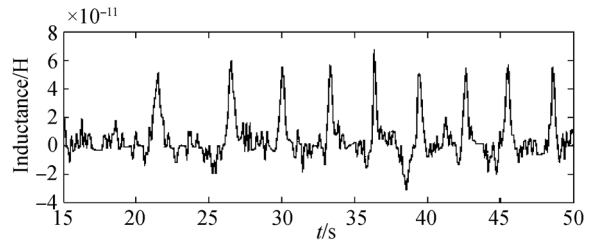


图 11 硅钢片传感器检测 65 μm 铁

Fig. 11 Silicon steel sensor detects 65 μm iron

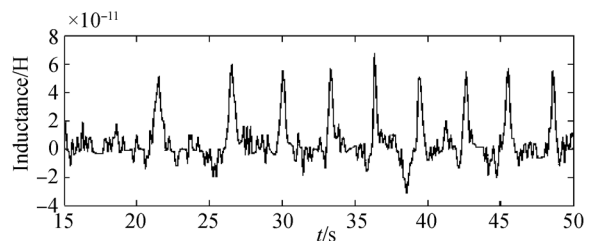


图 12 硅钢片传感器检测 40 μm 铁

Fig. 12 Silicon sensor detects 40 μm iron

对于非铁磁性颗粒以铜颗粒为代表,当铜颗粒通过检测区域时,由于电涡流作用会产生向下的脉冲信号。将配置好不同尺寸的颗粒油液分别置于微量注射泵,经多次检测后,无硅钢片检测传感器检测 170 μm 铜颗粒,计算出其信噪比为 2.30,如图 13 所示。取 170 μm 铜颗粒,经硅钢片检测传感器检测,其信噪比为 9.08,如图 14 所示,经过多次测量 170 μm 铜颗粒对比,发现硅钢片检测传感器对于非铁磁性颗粒具有更好的检测效果。最后测得有硅钢片检测传感器对于铜颗粒的检测下限 130 μm ,信噪比 1.35,如图 15 所示。

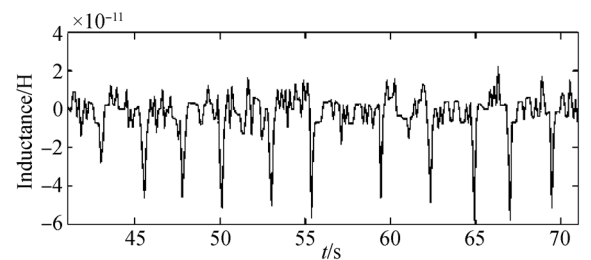


图 13 无硅钢片芯片检测 170 μm 铜

Fig. 13 Non-silicon steel chip detection 170 μm copper

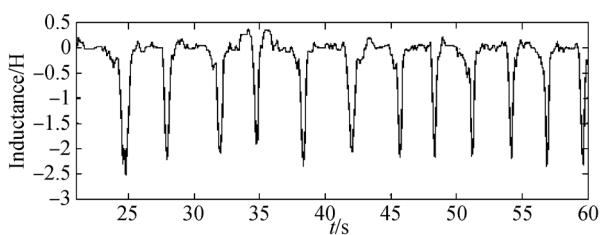


图 14 硅钢片芯片检测 170 μm 铜
Fig. 14 Silicon sensor detects 170 μm copper

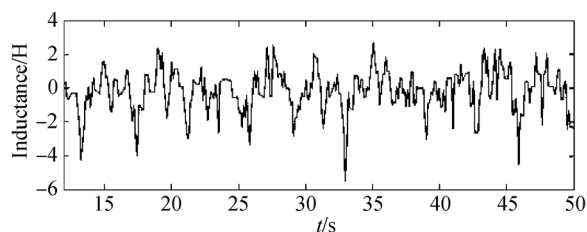


图 15 硅钢片芯片检测 130 μm 铜
Fig. 15 Silicon sensor detects 130 μm copper

4.2 电容检测

通过改变线圈的接线方式,切换电容检测方式检测油液中的水滴和气泡。取 0.05 mL 水和 10 mL 液压油混合,装入 10 mL 塑料管密封后,放置超声振荡器(DSA200-KS,中国)中充分震荡 2 min。取 0.05 mL 空气与 10 mL 液压油混合,装入塑料管密封后放置超声振荡器中充分震荡 2 min。水滴和气泡制备完成。实验开始前,先将微量注射泵的流量调整到 100 $\mu\text{L}/\text{min}$,精密 LCR 表激励电压为 2 V,频率为 0.3 MHz。

电容检测时,由于液压油的介电常数 2.6,水的介电常数是 80,空气的介电常数是 1,所以,当油液中混入水滴时,会引起电容瞬间增大,检测的电容信号值,如图 16 所示,为检测 200 μm 水滴信号。空气的介电常数比液压油小,会引起向下的信号值,如图 17 所示,为检测到 270 μm 气泡信号,因为水滴的介电常数远大于空气,所以,水滴的检测效果更好。

参考文献:

- [1] 吴世友,王淑芳. 液压油污染的来源、危害及其控制措施[J]. 装备制造技术,2008(3):80-82
WU SH Y, WANG SH F. The source, harm and control measures of hydraulic oil pollution [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2008(3):80-82. (in Chinese)

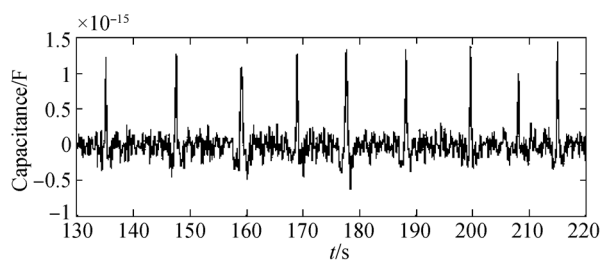


图 16 电容检测 200 μm 水滴
Fig. 16 Capacitance detection 200 μm drops

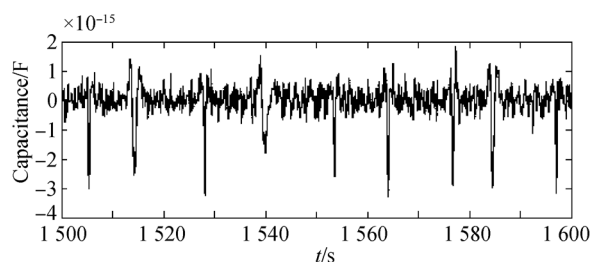


图 17 电容检测 270 μm 气泡
Fig. 17 Capacitance detection 270 μm bubbles

5 结论

本文基于微流控油液检测芯片,设计了一种新的大通量环形流道,缩短检测所需要的时间,并通过环形流道中内置一对硅钢片聚合检测区域磁场,理论推导、仿真与实验结果相一致,提高了电感检测对固体污染物的检测精度,确定了铁磁性颗粒(铁颗粒)检测下限 40 μm ,非铁磁性(铜颗粒)检测下限 130 μm 。通过改变双层线圈接入电路的方式,引入电容检测,由于水(80)、空气(1)、液压油(2.6)介电常数的不同,当他们混合通过检测区域时会引起电容的变化,利用电容极板间边缘效应,成功检测到 200 μm 水滴和 270 μm 气泡。本文的研究为液压油污染物快速检测提供了一种新的方法。

- [2] 王孝霖,许历,韩星星,等. 船用舵机液压系统分析及典型故障处理[J]. 机床与液压,2015,43(22):187-189.
WANG X L, XU L, HAN X X, *et al.*. Marine servo hydraulic system analysis and typical troubleshooting [J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2015, 43(22):187-189. (in Chinese)

- [3] 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.
- [4] 徐小涛,赵建民,田毓. 工程机械液压系统油液污染控制[J]. 流体传动与控制, 2005, 13(6): 34-36.
XU X T, ZHAO J M, TIAN CH. Contamination control of hydraulic system in mobile machinery [J]. *Instrument Technique and sensor*, 2005, 13(6) 34-36. (in Chinese)
- [5] 周涛,刘亚龙,郭静英,等. 液压油污染实验与在线监测模型[J]. 液压与气动, 2017, 11:72-75.
ZHOU T, LIU Y L, GUO J Y, *et al.*. Experiments of hydraulic oil contamination and on-line monitoring models [J]. *Hydraulic and Pneumatic*, 2017, 11:72-75. (in Chinese)
- [6] 张勇,司二伟,李国盛,等. 润滑油金属磨粒传感器设计及试验研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(4): 89-94.
ZHANG Y, SI E W, LI G SH, *et al.*. Design and Experimental Study of Metal Particle Sensors for Lubricating Oils [J]. *Lubrication Engineering*, 2017, 42(4):89-94. (in Chinese)
- [7] TUCKER J E, GALIE T R, SCHULTZ A, *et al.*. LASERNET fines optical wear debris monitor: a Navy shipboard evaluation of CBM enabling technology[J]. *54th Mach Fail Prev Technol Proc*, 2000: 191.
- [8] TOMS A, ALTURKI F A, AHMED S M. Fractal analysis of cavitation eroded surface in dilute emulsions [J]. *Journal of Tribology*, 2011, 133(4):041403.
- [9] 邹俊,王陈向,傅新. 液压油在线除气装置设计与试验[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(8):53-55.
ZOU J, WANG CH X, FU X. Design and experiment of on-line bubble elimination valve for hydraulic oil [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2012, 32(8):53-55. (in Chinese)
- [10] WU T H, WU H K, DU Y, *et al.*. Progress and trend of sensor technology for on-line oil monitoring [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(12):2914-2926.
- [11] 吕纯,张培林,吴定海,等. 基于超声传感器的油液磨粒在线监测系统的研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(7):73-75.
LÜ CH, ZHANG P L, WU D H, *et al.*. Research on on-line monitoring system of oil grinder based on ultrasonic sensor[J]. *MACHINE TOOL&HYDRAULICS*, 2016, 44(7):73-75. (in Chinese)
- [12] ZHANG H, CHON C H, PAN X, *et al.*. Methods for counting particles in microfluidic applications [J]. *Microfluidics and nanofluidics*, 2009, 7(6): 739-749.
- [13] 李绍成,左洪福,张艳彬. 油液在线检测系统中的磨粒识别[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 589-595.
LI SH CH, ZUO H F, ZHANG Y B. Wear debris recognition for oil on-line monitoring system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 589-595. (in Chinese)
- [14] 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):534-539.
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):534-539. (in Chinese)
- [15] DU L, ZHU X, 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.
- [16] 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(10):96-102.
WANG Q, ZHANG H P, ZHANG J F, *et al.*. Resistance detection method for microfluidic oil detection chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 96-102. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 李梦琪,赵凯,宋永欣,等. 微流控芯片上油液磨粒电容检测[J]. 大连海事大学学报, 2013, 39(3): 42-46.
LI M Q, ZHAO K, SONG Y X, *et al.*. Microfluidic capacitance sensor for detecting metal wear debris in lubrication oil [J]. *Dalian Haishi Daxue Xuebao*, 2013, 39(3):42-46. (in Chinese)
- [19] 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)

- [20] 刘恩辰. 船用液压油多种污染物一体化检测研究[D]. 大连:大连海事大学, 2017.
LIU E CH. *Research on Integrated Detection of Various Pollutants in Marine Hydraulic Oil* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)

[21] NISHIYAMA H, NAKAMURA M. Capacitance of diskcapacitors [J]. *IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*, 1993, 16(3): 360-366.

[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*, 2013, 49(6): 49-96.

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*, 2013, 49(6):49-96. (in Chinese)

导师简介:



张洪朋(1979—),男,辽宁铁岭人,教授,博士生导师,2005年于大连海事大学获得博士学位,主要从事轮机工程、机电一体化、微流控芯片技术等研究。E-mail: Zhppeter@163.com

作者简介:



白晨朝(1993—),男,天津蓟州人,硕士研究生,2016年于大连海事大学获得学士学位,主要从事机电一体化、微流控芯片技术等研究。E-mail: baichenz@163.com