DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107365

一种液压油多污染物微检测传感器设计及研究*

霍 典,张洪朋,史皓天,陈海泉,李 伟
(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

摘 要:基于微流体芯片技术提出了一种液压油微传感器。微传感器由内嵌硅钢片的平面电感检测线圈与对置硅钢片构成。电感检测模式下对金属颗粒进行检测,电容模式下检测水滴与气泡,实现了对油液中铁磁性颗粒、非铁磁性颗粒、水滴、气泡 4 种污染物的区分检测。通过实验证明新型结构的微传感器在电感模式下对金属颗粒检测精度的提高,并可以检测到油液中 28 μm 的铁颗粒与 85 μm 的铜颗粒;在电容模式下验证了微传感器在激励电压为 2 V、激励频率为 0.9 MHz 时检测效果最好,并能检测到油液中 95 μm 的水滴和 160 μm 的气泡。该研究在对液压系统的故障预测和故障诊断有着十分重要的意义。

关键词: 液压系统;油液污染物;微传感器;多参数检测;故障预测
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

Design and research of a micro-sensor for multi-pollutant detection in hydraulic oil

Huo Dian, Zhang Hongpeng, Shi Haotian, Chen Haiquan, Li Wei
(*Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*)

Abstract: A hydraulic oil micro sensor is designed, which is based on the microfluidic chip technology. The microsensor consists of an inductive sensor embedded in silicon planar coils opposing silicon. Metal particles are detected in the inductance detection mode. Water droplets and bubbles are detected in the capacitance mode. Four kinds of pollutants in the oil can be distinguished, which are ferromagnetic particles, non-ferromagnetic particles, water droplets and bubbles. Experiments verify that the new structure of the micro sensor improves the detection accuracy of metal particles in the inductive mode. It can detect 28 μm iron particles and 85 μm copper particles in the oil. In the capacitance mode, the micro sensor has the best detection effectiveness when the excitation voltage is 2 V and the excitation frequency is 0.9 MHz. In addition, it can detect 95 μm water droplets and 160 μm bubbles in the oil. This research is great significant for failure prediction and diagnosis of hydraulic systems.

Keywords: hydraulic system; oil contaminants; microsensor; multi-parameter detection; failure prediction

0 引 言

液压系统被广泛应用于航空航天[1]、机械制造[2]以及工程技术领域[3]。作为液压系统的“血液”,液压油的作用也不容小觑。液压油在减少各机械部件摩擦、冷却发热部件、带走多余磨粒等方面起到了重要作用。据统计,超过 75%的液压系统机械故障是由液压油颗粒污染物引起[4]。液压油中的颗粒污染物如金属磨粒、水滴、气泡等[5]会直接或间接地反映出液压系统的工作状态:当液压油中金属磨粒尺寸大于 100 μm 时,就认为液压系统中出现了异常磨损[6];水滴会造成液压油乳化变质,加剧液压系统各部件腐蚀[7];气泡不仅会使液压系统动作迟滞,还会导致汽蚀现象影响设备正常运行[8]。对液压油颗粒污染物进行定期检测是保持液压系统清洁的有效手段之一,这对液压系统关键设备的状态监测与故障诊断,实现设备健康评估及智能维护具有重要的意义[9-11]。

针对液压油颗粒污染物检测的途径目前主要包括离线检测与在线检测。离线检测是将油液取出后在实验室进行参数分析[12],它能准确、定性地分析出油液的组分

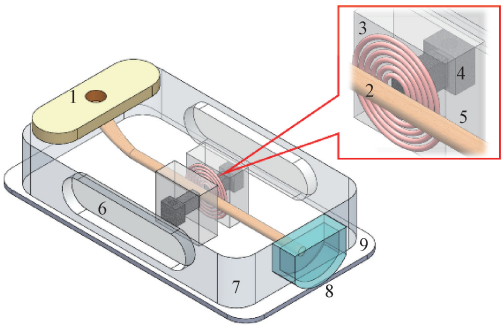
收稿日期:2021-01-11 Received Date: 2021-01-11
*基金项目:国家自然科学基金(51679022)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132019034)、大连市科技创新基金(2019J12GX023)项目资助

结构及理化特性,但需要依赖多种仪器设备,并且仪器体积较大、操作较为复杂、检测周期较长[13]。在线检测法凭借快速有效、适应性强等优势逐渐成为油液检测领域的研究热点[14]。目前,油液在线检测主要有以下几种检测方法:光学检测法、声学检测法、电感检测法、电容检测法。光学检测法检测速度快[15-16],但易受到油液的清洁程度和环境温度的影响;声学检测法检测精度高[17-18],但易受到外界噪声以及震动的影响;电感检测法可以区分出油液中的金属颗粒污染物以及颗粒物的尺寸大小,但无法高精度检测非金属颗粒污染物[19-21];电容检测法可以检测非金属颗粒污染物,但对于金属颗粒污染物无法进行区分检测[22-25]。为了实现金属颗粒污染物、水滴和气泡等污染物的区分检测,本课题组基于传统电感检测技术,引入电容检测,进一步实现油液多污染物区分检测[26-29]。

本文设计了一种内嵌硅钢片的平面线圈与对置硅钢片的新型检测结构,在电感模式下通过内嵌硅钢片的平面线圈与对置硅钢片实现了油液中铁磁性金属颗粒、非铁磁性金属颗粒的区分检测,进一步提高微传感器的检测灵敏度;在电容模式下采用对置硅钢片作为平行板电容器实现了油液中水滴和气泡的区分检测。

1　微传感器设计及检测原理

微传感器的设计如图 1 所示。该传感器由内嵌硅钢片的平面线圈与对置硅钢片构成。检测微通道从硅钢片与平面线圈所对置的中心穿过,确保微传感器的检测精度。平面线圈由 70 μm 线径的漆包线绕成,缠绕方向相同,匝数为 80 匝,内孔直径为 900 μm,线圈末端连接导线保证在电感模式下检测金属颗粒的电感变化;硅钢片长度为 0.8 mm,宽度 4 mm,厚度 0.2 mm,末端有 1 mm 圆孔用于电容模式下连接导线;通过改变接入导线的方式可以对检测模式进行切换。检测通道的大小为 300 μm。



1. 进油口 2. 检测通道 3. 平面线圈 4. 硅钢片 5. 亚克力块
6. 位置卡槽 7. PDMS 8. 集油口 9. 玻璃基底

图 1　微传感器结构

Fig. 1　Microsensor structure

1.1　电感检测原理

当处于电感检测模式时,电感检测原理如图 2 所示。平面线圈在外界电源激励的情况下形成了一个平面型电感线圈传感器。检测线圈的阻抗包括电感和电阻,分别由 Z 和 L 表示。当颗粒经过线圈检测区域时,检测线圈阻抗变化量可以表示为:

$$Z = \mathrm{j}\omega \sum_{i=1}^{N} \iint_{U_i} \Delta B \mathrm{d}u \tag{1}$$

式中:ΔB 为磁场的变化量,即 $\Delta B = B - B_0$;ω 为角频率;U_i 为线圈在第 i 圈的截面积;N 为线圈匝数;j 为虚数单位,即 $\mathrm{j}^2 = -1$。

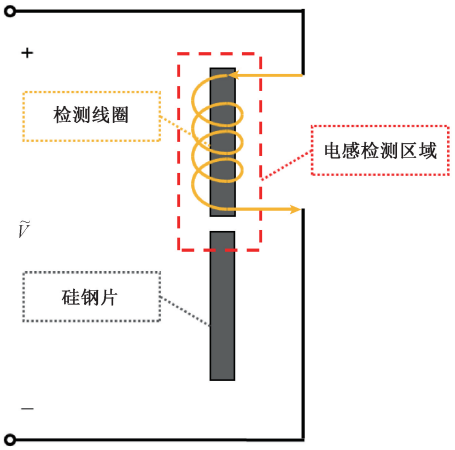


图 2　电感检测原理

Fig. 2　Principle of inductance detection

当铁磁性颗粒经过检测区域时,由于磁化效应被磁化使得原有磁场呈现向上变化的趋势,即 ΔB 为正,此时线圈的电感会呈现一个向上的脉冲式尖峰,表明其电感值是增加的;当非铁磁性颗粒经过检测区域时,会产生涡流效应,即 ΔB 为负,此时线圈的电感会呈现一个向下的脉冲式尖峰,表明其电感值是减少的。线圈电感变化值 ΔL 为:

$$\Delta L = \frac{\mathrm{Im}(\Delta Z)}{\omega} = \sum_{i=1}^{N} \iint_{U_i} \Delta B \mathrm{d}u \tag{2}$$

1.2　电容检测原理

当处于电容检测模式时,电容检测原理如图 3 所示。两枚硅钢片在交流电源的激励下形成平面型电容传感器。流道中充满油液时,其介电常数为 ε_i;流道中经过带有污染物的混合油液后,其介电常数变为 ε_m。由平行板电容器的计算公式可知:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \tag{3}$$

式中:ε 为电容极板之间的介电常数;S 为单个电容极板的表面积;d 为两极板之间的实际距离。

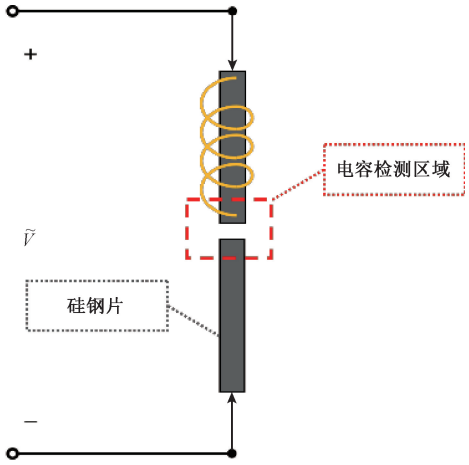


图 3 电容检测原理

Fig. 3 Principle of capacitance detection

在本实验中,电容模式下的激励电源为交流电源,因此,电容值的变化不仅由其中的介电常数决定,还与激励电源的激励频率有关。因此需要引入复介电常数 $\tilde{\varepsilon}$ 进行计算。

油液与颗粒的复介电常数为 $\tilde{\varepsilon}_i$ 与 $\tilde{\varepsilon}_p$,则:

$$\tilde{\varepsilon}_i = \varepsilon_i - \mathrm{j}\frac{\sigma_i}{\omega} \tag{4}$$

$$\tilde{\varepsilon}_p = \varepsilon_p - \mathrm{j}\frac{\sigma_p}{\omega} \tag{5}$$

式中:ε_i 为油液的介电常数;ε_p 为颗粒的介电常数;σ_i 为油液的电导率;σ_p 为颗粒的电导率;ω 为角频率,其表达式为:

$$\omega = 2\pi f \tag{6}$$

式中:f 为激励频率。

由麦克斯韦理论可知[30],当油液和颗粒物的混合物的混合油液的复介电常数 $\tilde{\varepsilon}_m$ 可以表示为:

$$\tilde{\varepsilon}_m = \tilde{\varepsilon}_i \frac{1 + 2\Gamma\tilde{f}_{CM}}{1 - \Gamma\tilde{f}_{CM}} \tag{7}$$

式中:Γ 为颗粒体积 V_p 与电容检测区域体积 V_a 之比,即:

$$\Gamma = \frac{V_p}{V_a} = \frac{4\pi r^3}{3V_d} \tag{8}$$

式中:r 为颗粒的半径;$\tilde{f}_{CM}$ 为 Clausius-Mossotti 因子:

$$\tilde{f}_{CM} = \frac{\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_i}{\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_i} \tag{9}$$

将式(7)、(8)代入式(6)中得到 $\tilde{\varepsilon}_m$ 的最终表达式为:

$$\tilde{\varepsilon}_m = \tilde{\varepsilon}_i \frac{3V_a(\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_i) + 8\pi r^3(\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_i)}{3V_a(\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_i) - 4\pi r^3(\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_i)} \tag{10}$$

水滴的介电常数 $\varepsilon_w = 80$,气泡的介电常数 $\varepsilon_a = 1$,油液的介电常数 $\varepsilon_i = 2.6$。电容模式下的电容变化是经过检测区域的颗粒的介电常数发生变化所呈现的结果:当水滴经过检测区域时,微电容传感器的电容呈现一个向上的脉冲,此时表明其电容值是增加的;当气泡经过检测区域时,微电容传感器的电容呈现一个向下的脉冲,此时证明其电容值是减小的。通过电感值 C 的变化可以判断非金属颗粒物的种类,实现水滴和气泡的区分检测。

2 检测芯片制作与实验结果

2.1 微传感器制作

首先,选取 PDMS 胶(聚二甲基硅氧烷)和固化剂,按照 10∶1的比例进行混合,搅拌后放入真空箱进行抽真空处理,时间设定为 40 min;对平面线圈接线处进行预处理,固定检测线圈、硅钢片;从真空箱取出所配置好的溶液浇筑在载玻片上,放入干燥箱中进行固化处理,温度设置为 80℃、时间设置为 90 min;最后取出检测芯片,抽出微流道模型完成制作。

2.2 检测系统搭建

检测系统主要包括以下设备:微传感器检测芯片、阻抗分析仪(型号:Keysight E4 980A)、LabVIEW 数据采集单元、显微镜(型号:Nikon AZ100)及微量注射泵(型号:Harvard apparatus B-85259)。检测系统如图 4 所示。

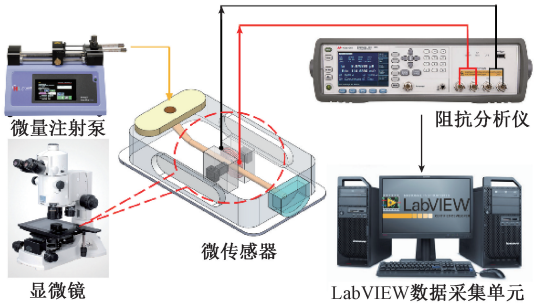


图 4 检测系统

Fig. 4 Detection system

2.3 电感检测模式

在实验前先配置检测油样。用精密天平称取 2 mg 的铁颗粒和 2 mg 铜颗粒,铁颗粒尺寸为 60~75 μm,铜颗粒尺寸为 150~165 μm,用振荡器将铁颗粒、铜颗粒分别与 100 mL 的耐磨液压油均匀混合;选取含有铁颗粒与铜颗粒的油液混合物各 1 mL;最后使用激励电压 2 V、激励

频率 2 MHz 对检测线圈进行交流激励。

1)铁磁性颗粒检测结果分析

选取大小为 70 μm 铁颗粒经过微传感器检测区域,观察检测线圈的电感信号变化。如图 5 所示,当油液经过检测区域时,单位时间内所产生的电感信号变化。图 5(a)代表未添加任何硅钢片的检测线圈的电感变化;图 5(b)是内嵌一枚硅钢片的检测线圈的电感变化;图 5(c)是检测线圈内嵌一枚硅钢片和对侧添加一枚硅钢片的电感变化。结果表明,未添加硅钢片及内嵌一枚硅钢片的检测线圈的电感变化值远小于在检测线圈两侧各加一枚硅钢片的检测线圈。表 1 所示为不同结构的检测线圈的信噪比变化。选取 70 μm 的铁颗粒在不同结构下电感变化的平均峰值以及电感平均噪声值,将二者进行除法运算,最终得到对应结构的信噪比大小;信噪比越大表明检测的灵敏度越高,电感检测效果越好。从表 1 中可知:添加两枚硅钢片的检测芯片的信噪比远远大于只添加一枚硅钢片与未添加硅钢片的检测线圈。从而得出结论:新型结构的检测芯片检测铁颗粒时检测效果有明显提高。

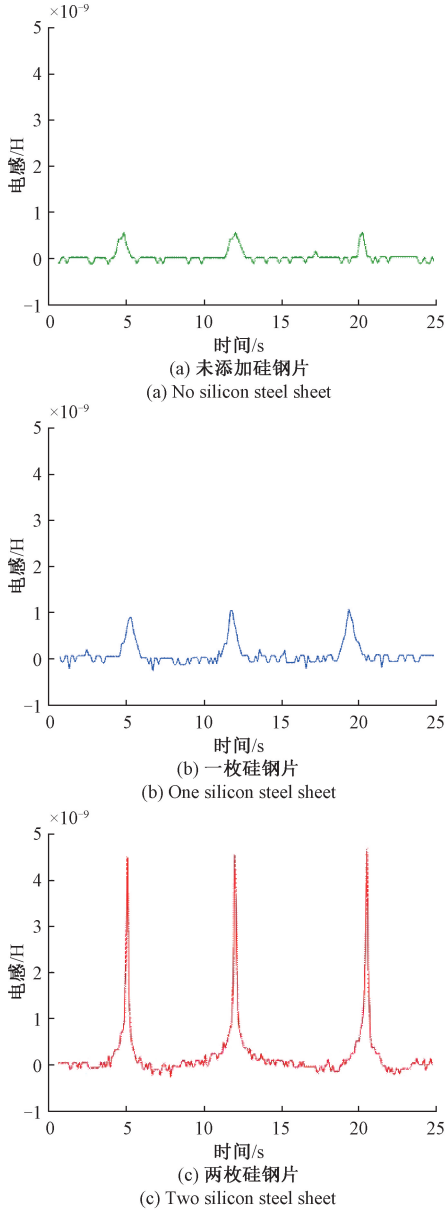


图 5　70 μm 铁颗粒检测结果

Fig. 5　70 μm iron particles test results

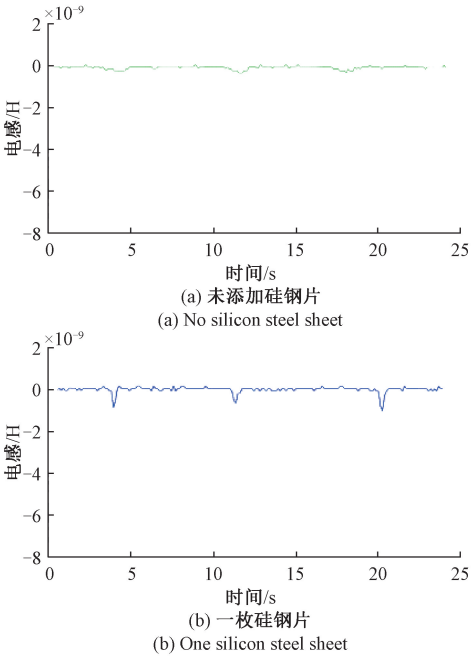
表 1　不同结构下 70 μm 铁颗粒检测结果

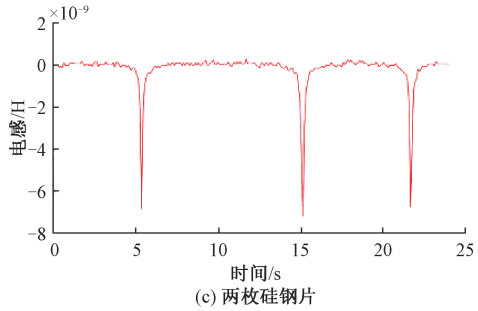
Table 1　Test results of 70 μm iron particles with different structures

颗粒物种类	颗粒大小/μm	传感器结构	电感变化值/H	平均噪声值/H	信噪比
铁颗粒	70	未加硅钢片	4.98×10^{-10}	9.90×10^{-11}	5.03
		一枚硅钢片	8.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}	7.85
		两枚硅钢片	3.69×10^{-9}	1.02×10^{-10}	36.18

2)非铁磁性颗粒检测结果分析

选取 155 μm 的铜颗粒通过检测区域,观察电感变化的情况。如图 6 所示,当油液经过检测区域时,单位时间内所产生的电感信号变化。图 6(a)代表未添加任何硅钢片的检测线圈的电感变化;图 6(b)表示内嵌一枚硅钢片的检测线圈的电感变化;图 6(c)是在检测线圈对侧以及同侧都添加一枚硅钢片的检测线圈。结果表明,添加两枚硅钢片的检测线圈电感变化值明显高于内嵌一枚硅钢片以及未添加硅钢片的检测线圈的电感变化值。表 2 所示为不同结构的检测线圈的信噪比变化。从表 2 中可以看到新型结构的检测传感器检测效果要更好。综上所述,新型结构微传感器在检测铜颗粒时检测效果得到了大幅度提升。





(c) 两枚硅钢片
(c) Two silicon steel sheet

图 6 155 μm 铜颗粒检测效果

Fig. 6 Detection effectiveness of 155 μm copper particles

表 2 不同结构下 155 μm 铜颗粒检测结果

Table 2 Test results of 155 μm copper particles with different structures

颗粒物种类	颗粒大小/μm	传感器结构	电感变化值/H	平均噪声值/H	信噪比
铜颗粒	155	未加硅钢片	3.01×10^{-10}	9.73×10^{-11}	3.09
		一枚硅钢片	8.96×10^{-10}	1.00×10^{-10}	8.96
		两枚硅钢片	5.59×10^{-9}	9.99×10^{-11}	55.96

3) 电感模式检测下限

在探究电感模式检测下限前先配置检测油样。首先用筛子筛取 20~30 μm 的铁颗粒和 80~85 μm 的铜颗粒;使用电子天平分别称取 2 mg 上述颗粒,量取两份 100 mL 的液压油,将两种颗粒分别加入到两份液压油中;用振荡器将油液和颗粒混合均匀,然后各取 1 mL 的混合油液备用。使用微量注射泵驱动待测油样通过线圈检测区域,观察电感变化情况。如图 7 所示,当待测油样通过检测区域时,单位时间内所产生的电感信号变化。图 7(a)为 28 μm 铁颗粒的电感变化,图 7(b)为 85 μm 铜颗粒的电感变化。表 3 所示为两种颗粒检测结果的数据统计表,经过计算发现信噪比依旧明显。因此得出结论:在电感模式下新型结构传感器可以有效检测到 28 μm 的铁颗粒与 85 μm 的铜颗粒。

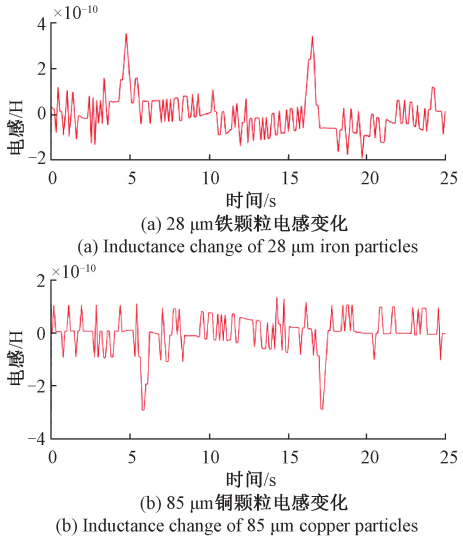
表 3 电感模式检测结果

Table 3 The detection results in the inductance mode

颗粒物种类	颗粒大小/μm	电感变化值/H	平均噪声值/H	信噪比
铁颗粒	28	3.94×10^{-10}	1.01×10^{-10}	3.90
铜颗粒	85	3.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	3.00

2.4 电容检测模式

选取 0.1 mL 的水与 20 mL 的油液在密封试管中通过振荡器充分混合,制取 220~250 μm 的水滴作为待测样品;制备气泡时,先将 20 mL 油液倒入封闭试管中,使用超声波震荡器对封闭试管内的油液进行振荡,选取 240~270 μm 的气泡作为待检样品。激励电压设为 2 V,使两枚硅钢片形成平行板电容器,通过改变激励频率大小,探究最佳检测频率。



(a) 28 μm铁颗粒电感变化
(a) Inductance change of 28 μm iron particles
(b) 85 μm铜颗粒电感变化
(b) Inductance change of 85 μm copper particles

图 7 28 μm 铁颗粒与 85 μm 铜颗粒检测结果

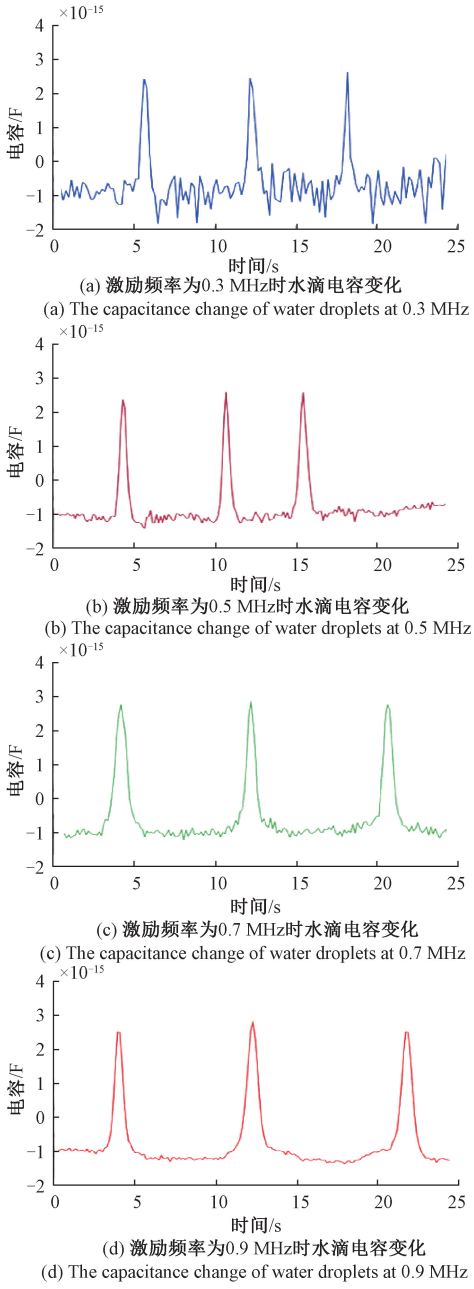
Fig. 7 Detection results of 28 μm iron particles and 85 μm copper particles

1) 水滴激励频率选取

为了探究激励频率对油液中水滴检测效果的影响,实验采用控制变量法来选取最佳检测频率。当硅钢片通电后,使用微量注射泵驱动 245 μm 的水滴经过电容检测区域,在单位时间内其电容变化如图 8 所示。图 8(a)~(d)分别代表激励频率为 0.3、0.5、0.7、0.9 MHz 时水滴经过检测区域的电容信号变化。表 4 所示为不同激励频率下水滴的信噪比变化。选取 245 μm 的水滴在不同激励频率下电容变化的平均峰值以及电容平均噪声值后,将二者进行除法运算,最终得到对应结构的信噪比大小;信噪比越大,检测的灵敏度越高,电容检测效果越好。由图 8 与表 4 可知,当激励频率在 0.3 MHz 时,平均噪声较大;随着激励频率的升高,平均噪声逐渐减小,有利于信噪比的提升。因此得出结论:在电容模式下水滴的最佳检测频率为 0.9 MHz。

2) 气泡激励频率选取

当硅钢片通电后,选取 253 μm 的气泡进行检测,得到在单位时间内气泡的电容变化如图 9 所示。图 9(a)~(d)分别代表激励频率为 0.3、0.5、0.7、0.9 MHz 时气泡经过检测区域的电容信号变化。表 5 所示为不同激励频率下气泡的信噪比变化。由图 9 和表 5 可知,当激励频率为 0.3 MHz 时,平均噪声较大;随着激励频率的升高,



(a) 激励频率为0.3 MHz时水滴电容变化
(a) The capacitance change of water droplets at 0.3 MHz

(b) 激励频率为0.5 MHz时水滴电容变化
(b) The capacitance change of water droplets at 0.5 MHz

(c) 激励频率为0.7 MHz时水滴电容变化
(c) The capacitance change of water droplets at 0.7 MHz

(d) 激励频率为0.9 MHz时水滴电容变化
(d) The capacitance change of water droplets at 0.9 MHz

图 8　不同激励频率下 245 μm 水滴电容变化

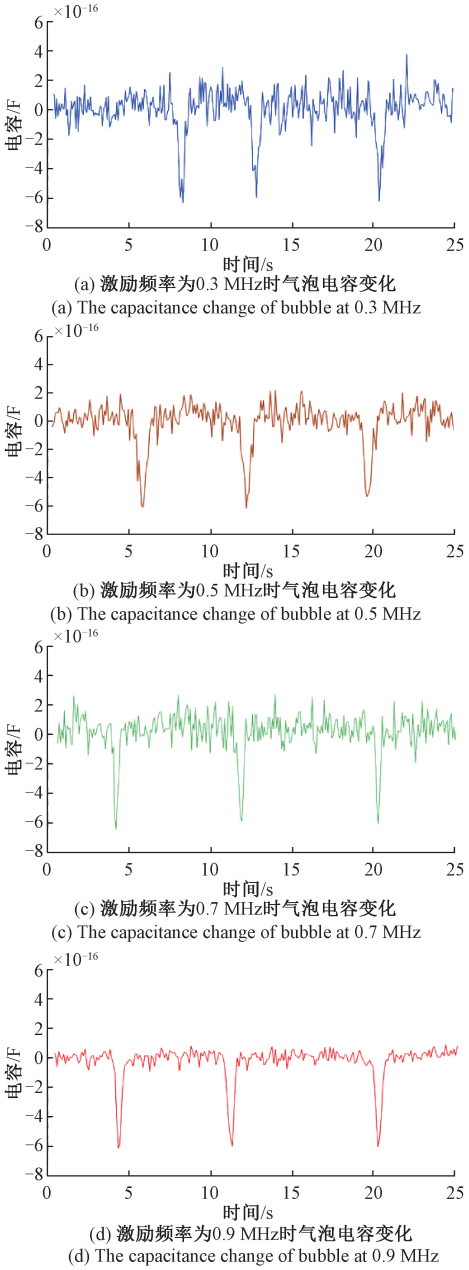
Fig. 8　245 μm droplets capacitance change at different excitation frequencies

表 4　不同激励频率下 245 μm 水滴检测结果

Table 4　Detection results of 245 μm droplets at different excitation frequencies

颗粒物种类	颗粒大小/μm	激励频率/MHz	电容变化值/F	平均噪声值/F	信噪比
水滴	245	0.3	2.78×10^{-15}	3.88×10^{-16}	7.16
		0.5	2.85×10^{-15}	2.31×10^{-16}	12.34
		0.7	3.05×10^{-15}	2.02×10^{-16}	15.10
		0.9	2.92×10^{-15}	1.14×10^{-16}	25.61

平均噪声逐渐减小,有利于信噪比的提升。综上所述,在激励频率为 0.9 MHz 时,气泡在电容模式下检测效果最佳。



(a) 激励频率为0.3 MHz时气泡电容变化
(a) The capacitance change of bubble at 0.3 MHz

(b) 激励频率为0.5 MHz时气泡电容变化
(b) The capacitance change of bubble at 0.5 MHz

(c) 激励频率为0.7 MHz时气泡电容变化
(c) The capacitance change of bubble at 0.7 MHz

(d) 激励频率为0.9 MHz时气泡电容变化
(d) The capacitance change of bubble at 0.9 MHz

图 9　不同激励频率下 253 μm 气泡电容变化

Fig. 9　253 μm bubble capacitance change at different excitation frequencies

3)电容模式检测下限

将激励电压设为 2 V、激励频率设为 0.9 MHz,探究电容模式下微传感器的检测下限。将 0.05 mL 的水与 20 mL 的油液在密封试管中通过振荡器充分混合,制取后得到 90~100 μm 的水滴作为待测样品;制备气泡时,先将 20 mL 油液倒入封闭试管中,使用超声波震荡器

表 5 不同激励频率下 253 μm 气泡检测结果

Table 5 Detection results of 253 μm bubble at different excitation frequencies

颗粒物种类	颗粒大小/μm	激励频率/MHz	电容变化值/F	平均噪声值/F	信噪比
气泡	253	0.3	7.68×10^{-16}	3.72×10^{-16}	2.06
		0.5	7.62×10^{-16}	3.11×10^{-16}	2.45
		0.7	7.61×10^{-16}	2.08×10^{-16}	3.66
		0.9	7.62×10^{-16}	1.12×10^{-16}	6.80

对封闭试管内的油液进行振荡,选取 160~170 μm 的气泡作为待检样品。油样通过微量注射泵的驱动经过检测区域,观察两者在单位时间内的电容变化如图 10 所示。图 10(a)表示 95 μm 水滴经过检测区域时的电容信号变化;图 10(b)表示 160 μm 气泡经过检测区域时的电容信号变化。表 6 所示为两种颗粒检测结果的数据统计,经过计算发现信噪比依旧明显。最终得出结论:新型结构的检测芯片可以有效检测到 95 μm 的水滴与 160 μm 的气泡。

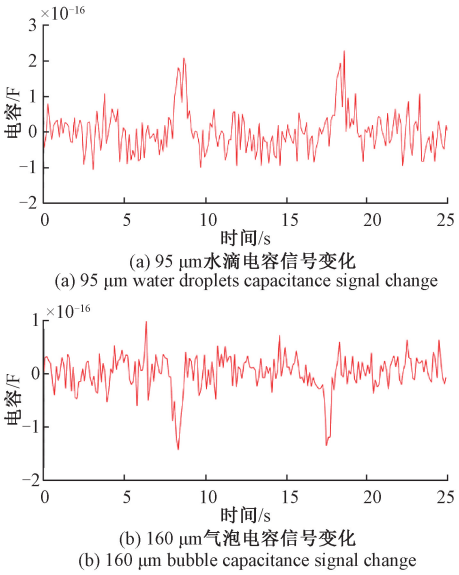


图 10 95 μm 水滴与 160 μm 气泡检测结果

Fig. 10 Detection results of 95 μm water droplets and 160 μm bubble

表 6 电容模式检测结果

Table 6 Detection results in the capacitance mode

颗粒物种类	颗粒大小/μm	电容变化值/F	平均噪声值/F	信噪比
水滴	95	3.09×10^{-16}	1.13×10^{-16}	2.73
气泡	160	2.22×10^{-16}	1.10×10^{-16}	2.02

3 结 论

本文基于电感检测原理与电容检测原理提出了一种新型结构的多参数微传感器。该传感器由内嵌硅钢片的平面线圈与对置硅钢片构成。该传感器的检测微通道从对置硅钢片与线圈中间穿过,通过改变接线方式即可实现对电感模式及电容模式的切换。电感模式下,检测线圈可对两种金属颗粒污染物(铁颗粒、铜颗粒)进行区分检测;电容模式下,两枚硅钢片等效为平行板电容器,可用于对两种非金属颗粒污染物(水滴、气泡)的区分检测。该微传感器在电感模式下对金属颗粒污染物的检测效果有了进一步提升,同时可以检测到 28 μm 的铁颗粒与 85 μm 的铜颗粒;电容模式下通过实验证明了激励电压为 2 V 时,激励频率 0.9 MHz 是检测水滴和气泡电容变化的最佳激励频率,同时有效地检测到了 95 μm 的水滴与 160 μm 的气泡。本文的实验研究对于油液多污染物的区分检测提供了一种新的可行性方案,在液压系统故障诊断方面拥有广阔的应用前景。

参考文献

[1] LI Z, GAO P, ZHAO D, et al. Fault diagnosis and location of the aero-engine hydraulic pipeline based on Kalman filter[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(12):168781401774281.

[2] LI Y M, LIU Z H, WANG D, et al. Analysis on the shifting performance of the hydraulic system of a transmission for construction machinery[J]. Advanced Materials Research, 2011, 201-203:2206-2211.

[3] 李洁,程珩,权龙,等. 纯电驱液压挖掘机复合动作电液能量回收再利用系统研究[J]. 液压与气动, 2020, 352(12):49-55.
LI J, CHENG H, QUAN L, et al. Research on the electro-hydraulic energy recovery and reuse system in compound operation of pure electro-hydraulic excavator[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, 352(12):49-55.

[4] ZHANG H P, HUANG W, ZHANG Y D, et al. Design of the microfluidic chip of oil detection[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 117-119:517-520.

[5] ZHU X, ZHONG C, ZHE J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring-A review[J]. Tribology International, 2017, 109:473-484.

[6] EDMONDS J, RESNER M S, SHKARLET K. Detection of precursor wear debris in lubrication systems[J]. 2000 IEEE Aerospace Confterence Proceedings, 2000, 6:

73-77.

[7] REINTJE S J, TUCKER. Lasernet fines wear debris analysis technology: Application to mechanical fault detection[J]. AIP Conference Proceedings, 2003, 657(1):1590-1590.

[8] 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.

[9] VASQUEZ S, KINNAERT M, PINTELON R. Active fault diagnosis on a hydraulic pitch system based on frequency-domain identification[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017(99):1-16.

[10] LIU X. Study on knowledge-based intelligent fault diagnosis of hydraulic system[J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2012, 10(8), DOI: 10.11591.

[11] LI G P, ZHANG Q W. Hydraulic fault diagnosis expert system of excavator based on fault tree[J]. Advanced Materials Research, 2011, 228-229:439-446.

[12] 沈长青. 旋转机械设备关键部件故障诊断与预测方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.
SHEN CH Q. Research on fault diagnosis and prognosis for key components of rotating machinery[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2014.

[13] WANG J, WANG X. A wear particle identification method by combining principal component analysis and grey relational analysis[J]. Wear, 2013, 304(1-2): 96-102.

[14] SUN W B. Quantitative estimation technique for wear amounts by real time measurement of wear debris in lubricating oil[J]. Advanced Materials Research, 2011, 308-310:647-650.

[15] 孙广涛, 张洪朋, 顾长智,等. 高精度微流体多参数液压油检测芯片设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2):59-66.
SUN G T, ZHANG H P, GU CH ZH, et al. High precision microfluidic multi-parameter hydraulic oil detection chip design[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2):59-66.

[16] MABE J, ZUBIA J, GORRITXATEGI E. Photonic low cost micro-sensor for in-line wear particle detection in flowing lube oils[J]. Sensors, 2017, 17(3):586.

[17] BORDATCHEV E, AGHAYAN H, YANG J. Object shape-based optical sensing methodology and system for condition monitoring of contaminated engine lubricants[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 54:128-138.

[18] WESER R, WÖCKEL S, STEINMANN U, et al. Particle characterization in highly concentrated suspensions by ultrasound scattering method[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 202(1):30-36.

[19] 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, 35(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, 2015,35(1):90-95.

[20] 刘秉安. 铁芯和铁氧体饱和电感量的测量[J]. 国外电子测量技术, 2013,32(8):63-66.
LIU B AN. Measuring core and ferrite saturable inductance [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013,32(8):63-66.

[21] 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.

[22] HAN L, HONG W, WANG S. The key points of inductive wear debris sensor [C]. International Conference on Fluid Power & Mechatronics, 2011: 809-815.

[23] ISLAM T, YOUSUF M, NAUMAN M. A highly precise cross-capacitive sensor for metal debris detection in insulating oil[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(2):025005.

[24] QIAN M, ZHAO G, REN Y, et al. Triple-coil inductive debris sensor with special shielded coils for depressing interference of dielectric components [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 39:1279-1288.

[25] DUC T C, QUANG L D. Differential capacitively coupled contactless conductivity detection (DC4D) sensor for detection of object in microfluidic channel[C]. 2015 IEEE Sensors, 2015: 1-4.

[26] ZHANG X, ZHANG H, SUN Y, et al. Research on the output characteristics of microfluidic inductive sensor[J]. Journal of Nanomaterials, 2014, 2014(2):1-7.

[27] 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.

[28] SHI H, ZHANG H, MA L, et al. An impedance debris sensor based on a high-gradient magnetic field for high sensitivity and high throughput[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020(99):1-1.

[29] 白晨朝,张洪朋,曾霖,等. 双螺线圈式液压油微污染物检测传感器[J]. 仪器仪表学报,2019,40(6):16-22.
BAI CH ZH, ZHANG H P, ZENG L, et al. Hydraulic oil micro contaminant detection sensor based on double solenoid[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6):16-22.

[30] MORGAN H, SUN T, HOLMES D, et al. Single cell dielectric spectroscopy[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2007, 40:61-70.

作者简介

霍典,2018 年于大连海事大学获得工学学士学位,现为大连海事大学硕士研究生,主要研究方向为机电一体化和微流体检测技术。

E-mail: hd116026@163.com

Huo Dian received his B. Sc. degree from Dalian Maritime University in 2018. He is currently a master 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 a Ph. D. advisor at Dalian Maritime University. His main research interests include marine engineering, mechatronics and microfluidic technology.