

DOI: 10.3901/JME.2020.02.020

电感-电容双模式液压油污染物检测传感器^{*}

史皓天 张洪朋 顾长智 马来好 李国宾
(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

摘要: 提出了一种电感-电容双模式液压油多污染物检测新方法, 所设计的传感器由硅钢片和平面电感线圈构成, 通过切换检测模式, 既能作为电感传感器区分检测液压油中的铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒, 也能作为电容传感器区分检测水滴和气泡。较传统的电感式传感器, 该双模式检测传感器不仅可对多种污染物进行检测, 而且硅钢片能够有效增加检测区域磁场强度, 从而提高了电感检测的精度。在搭建的检测系统上, 使用该传感器对油液中的污染物进行检测试验, 在电感模式下成功检测到了 30 μm 铁颗粒和 110 μm 铜颗粒, 在电容模式下可对油液中 130 μm 水滴和 170 μm 气泡进行检测。该研究对液压油液污染物的综合检测提供了技术支持, 对于预防液压系统的故障和延长液压设备工作寿命具有重要的意义。

关键词: 液压油; 双模式; 综合检测; 微流体芯片

中图分类号: TP212; TH73

Inductance-capacitance Dual Mode Sensor for the Detection of Contaminants in Hydraulic Oil

SHI Haotian ZHANG Hongpeng GU Changzhi MA Laihao LI Guobin
(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract: A inductance-capacitance dual-mode sensor is proposed for detection of multi-contaminant in hydraulic oil. The designed sensor is composed of silicon steel sheet and planar coil. By switching the detection mode, it not only detects ferromagnetic and non-ferromagnetic particles as an inductive sensor, but also detects water droplets and air bubbles as a capacitive sensor. Compared with traditional inductive sensors, the dual-mode detection sensor not only detects multiple contaminants, but also the silicon steel sheet can effectively increase the magnetic field strength of the detection region, thereby improving the accuracy of the inductance detection. On the built detection system, the sensor is used to detect various contaminants in the hydraulic oil. In the inductive mode, 30 μm iron particles and 110 μm copper particles are successfully detected. In the capacitive mode, 130 μm water droplets and 170 μm air bubbles are detected. This study provides technical support for the comprehensive detection of hydraulic oil contaminants, which is of great significance for preventing hydraulic system failures and extending the working life of hydraulic equipment.

Key words: hydraulic oil; dual-mode; comprehensive detection; microfluidic chip

0 前言

液压系统正在向大功率、高精度、高性能的方向发展, 因此其元器件也逐渐趋于复杂化, 精密化。为了提高液压系统的可靠性与安全性, 且保证液压系统对于控制命令作出更加有效的响应, 液压油应保持高度清洁。据统计^[1], 液压系统中 70%~80% 的故障是由液压油的污染引起的。液压油中污染物主要为固体颗粒、水分和气泡^[2]。通过对污染物的种类、尺寸和浓度的实时检测, 可以反映机械设备的

的工作状态, 这对于液压系统运行安全及故障诊断具有重要意义。在运行良好的液压设备中, 零部件摩擦产生的金属磨粒尺寸一般维持在 10~20 μm , 且浓度较低, 如若金属磨粒偏大, 浓度过高, 则表明设备出现了异常磨损^[3-4]。水分会加速油液添加剂降解, 使液压油乳化, 减缓液压元器件的响应速度^[5-6]。空气会加速油液氧化, 引起油温升高, 还会诱发气穴、气蚀现象, 导致液压系统产生振动和噪声, 减少液压元件寿命^[7-8]。同时, 水和空气的含量还代表着液压系统各部件的密封状态。

当前对油液污染度的测量主要有铁谱分析法、污染物质量测定法、显微镜比较法、颗粒计数法等。上述方法中除了颗粒计数法可以实现油液颗粒污染度的精确测量外, 其他几种方法都只能对油液污染

^{*} 国家自然科学基金(51679022, 51879020)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132019034)和大连市科技创新基金(2019J12GX023)资助项目。
20190118 收到初稿, 20190718 收到修改稿

度程度的大致估计。颗粒计数方法^[9]是通过检测颗粒产生信号的脉冲幅值和数量来实现对油液中污染物尺寸的测量以及计数的,其要包括光学检测^[10-12],声学检测^[13-15],电感检测^[16-18]和电容检测^[19-20]。然而,上述四种方法可以检测的颗粒性质虽有不同,但都局限于对一种或两种颗粒的检测区分,无法实现多种污染物的检测。电感法可对液压油中的铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒区分检测,电容法可对液压油中的水滴和气泡区分检测,将两种检测方法结合起来,则可实现液压油多种污染物的综合检测。我们小组之前提出了一种用以电感和电容两种参数的阻抗传感器^[21],它可以检测到 80 μm 的铁颗粒、150 μm 的铜颗粒、180 μm 的水滴和 240 μm 的气泡,其检测精度有待提高。

目前对于电感检测的研究主要着力于提高检测精度。ZHU 等^[22]通过在线圈中间增加铁氧体磁芯的方式,提高检测区域的磁场,从而提高了检测精度。WEI 等^[23]通过设置激励线圈的方式,且激励线圈和检测线圈共用一环形铁芯,以来提高检测精度。上述方法都是通过增强检测区域磁场的方法来提高检测精度的。此外,傅舰艇等^[24]设计了一种三线圈电感式磨粒传感器,其通过由交流电源驱动的两个外侧激励线圈,产生两个反向的磁场,使得处于中央位置的感应线圈处于零磁场中,从而对电感检测精度有一定的提高。刘恩辰等团队^[25]设计了一种双线式螺线管型传感器,利用两线圈之间的互感,巧妙地提高了检测精度。

为了实现液压油多种污染物的综合检测,本文结合电容检测法和电感检测法设计了一种新型的油液污染物检测传感器。该传感器分为电感检测和电容检测两种模式。我们在平面电感线圈的旁边设置了一条形硅钢板,检测微通道沿硅钢板和平面电感线圈之间通过。硅钢片可以与平面电感线圈组成一对电容极板,引入电容参数检测。当对电感线圈施加以交流电激励后,处于交变磁场中的硅钢片会被磁化,增强原有磁场,从而提高电感检测的精度。通过对两种检测模式的转换,在同一芯片上可对液压油中的铁磁性颗粒、非铁磁性颗粒、水滴和气泡等多种污染物进行检测区分。

1 芯片设计及制作

如图 1 所示,为传感器的整体设计图。该传感器由 1 个平面电感线圈,1 个条形硅钢片以及 1 个直微通道组成。平面电感线圈和硅钢片正对排布在微通道两侧,微通道紧贴贴在平面电感线圈表面和硅

钢片端面。平面电感线圈是由线径 70 μm 的漆包线绕制,匝数为 60 匝,线圈内孔直径为 500 μm 。硅钢片正对线圈端的端面长为 1 mm,宽为 0.2 mm;硅钢片部分尺寸如图 2 所示,且在硅钢片远离平面电感线圈的一端设置有一直径为 0.2 mm 的绝缘导线接孔。微通道直径为 300 μm ,平面电感线圈和硅钢片的距离则为 300 μm 。

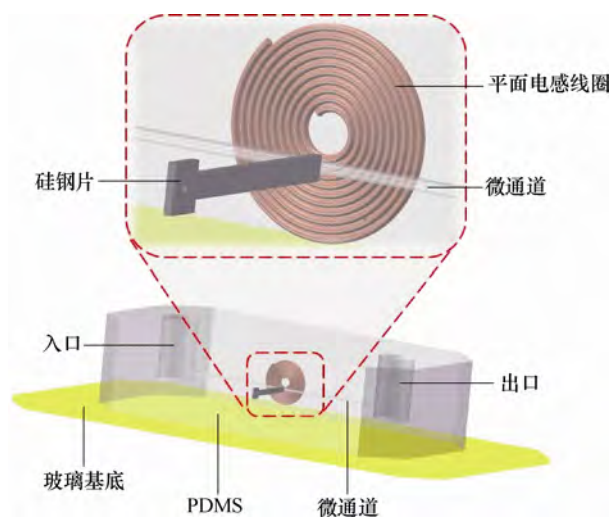


图 1 芯片设计图

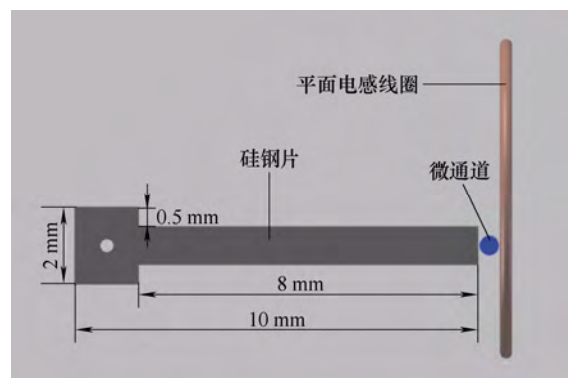


图 2 检测区域侧剖图

文献[26]表明,线圈内孔边缘处的磁场强度最强,因而颗粒在内孔边缘处所得信号幅值最大。为此,本文所设计芯片的检测流道从线圈内孔边缘处通过,以确保具有更强的原有磁场来磁化硅钢片,从而使得传感器检测区域内拥有最强的磁场,以便达到更好的电感检测效果。

2 传感器检测原理

2.1 电感参数检测原理

当对电感线圈施加以交流电激励后,平面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,涡流产生的磁通量会反抗原有磁通量的变化;同时金属颗粒也会被磁化,

对周边磁感应强度具有增强作用。铁磁性颗粒的磁化效应占主导地位, 会提高检测区域磁场的磁通密度; 非铁磁金属颗粒内的涡流效应占主导地位, 会降低磁场的磁通密度。检测区域中的磁场变化可以由平面电感线圈捕获, 线圈的视在电感会有相应的增减, 以此来区分铁磁性和非铁磁性金属颗粒。

根据先前的研究^[27], 将平面电感线圈等效为线形线圈, 通过的磁感应强度矢量 B_0 的通量为

$$\varphi_0 = \phi_0 = \int_S B_0 dS \quad (1)$$

式中, S 为磁场分布面积, 其与平面电感线圈的形状有关。

由于硅钢具有高的相对磁导率, 处于交变磁场中的硅钢片也会被磁化, 磁化后的硅钢片会产生新的磁感应强度矢量 B_s 来增强检测区域的磁感应强度。此时磁通量为

$$\varphi = \phi = \int_S (B_0 + B_s) dS \quad (2)$$

式中, B_s 与硅钢片的形状参数、结构参数、材质以及平面电感线圈的相对位置有关。

根据定义可得到自感系数

$$L = \frac{\varphi}{i} \quad (3)$$

式中, i 为经过线圈的电流。

当铁磁性颗粒经过线圈上方时增加线圈的磁通量, 使得线圈自感系数增加, 形成正向脉冲; 而非铁磁性金属会减小线圈的磁通量, 使线圈自感系数会减少, 形成负向脉冲。添加硅钢片后, 检测区域分布着更强的磁场。此时, 当金属颗粒流经检测区域时, 其伴有的磁化效应和涡流效应也更加强烈, 对检测区域磁场的改变量更大, 从而使得线圈的自感系数变化更为明显, 继而提高了检测精度。

2.2 电容参数检测原理

本文电容式传感器的等效电路如图 3 所示。其中 R_p 为并联损耗电阻, R_s 为串联损耗电阻, L_s 为电容器极板及其外部引线电感。忽略 R_p 和 R_s , 电容传感器在检测时的等效电容变化量 ΔC_e 为

$$\Delta C_e = \frac{\Delta C}{(1 - \omega^2 L_s C)^2} \quad (4)$$

式中, ΔC 为电容变化量, ω 外部激励电压的角频率。

电容模式时, 对置的平面电感线圈和硅钢板可等效为平行电容器的 2 个极板。忽略电容的边缘效应, 平行极板电容器的电场分布如图 4 所示。硅钢板的长 a 为 1 mm, 宽 b 为 0.2 mm, 两极板之间的距离 d 为 300 μm , 根据平行电容器电容的计算公式, 有

$$C = \varepsilon \frac{ab}{d} \quad (5)$$

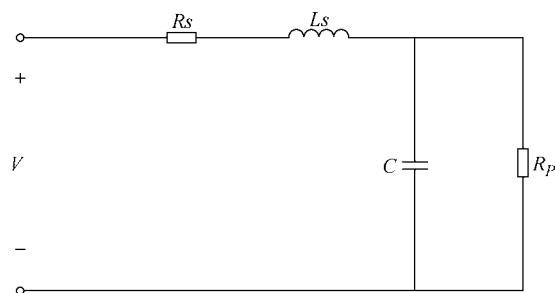


图 3 等效电路图

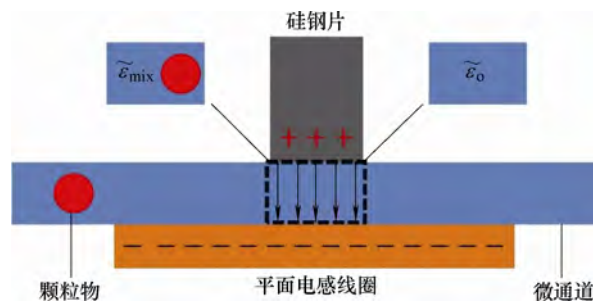


图 4 理想化检测区域电场分布图

在交流电场中, 极板间的电介质存在弛豫极化现象, 其介电常数不仅与物质本身属性有关, 同时也与激励频率有关, 为此引入了复介电常数

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (6)$$

式中, σ 是介质的电导率, ω 是外部激励源的角频率, 且 $j^2 = -1$ 。

根据先前的研究^[21], 可得检测区域油液混合物的复介电常数为

$$\tilde{\varepsilon}_{mix} = \tilde{\varepsilon}_o \frac{V_d (\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_o) + V_p (\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_o)}{V_d (\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_o) - V_p (\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_o)} \quad (7)$$

式中, $\tilde{\varepsilon}_{mix}$ 和 $\tilde{\varepsilon}_p$ 分别为液压油和颗粒的复介电常数, V_p 为颗粒体积, V_d 为检测区域体积。

将其代入式(4)、(5)中, 可得电容的等效变化量为

$$\Delta C_{eq} = \frac{ab [R_e (\tilde{\varepsilon}_{mix}) - \tilde{\varepsilon}_o]}{d (1 - \omega^2 LC)^2} \quad (8)$$

如图 4 所示, 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 $\tilde{\varepsilon}_o$, 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 $\tilde{\varepsilon}_{mix}$, 根据介电常数差异, 电容检测可实现对液压油中非金属材料颗粒的区分检测。

3 多参数检测试验及结果分析

3.1 检测芯片的制作

首先使用绕线机将线径 70 μm 的漆包线绕制成

匝数为 60, 内孔直径为 $500\ \mu\text{m}$ 且层数为 3 层的平面电感线圈; 然后将硅钢片和平面电感线圈按既定的位置正对排列固定在玻璃基底上, 并将线圈的 2 个出线端和硅钢片的出线端焊接在玻璃基片上; 接着将直径 $300\ \mu\text{m}$ 的铜棒垂直穿过平面电感线圈和硅钢片的正对区域, 并固定; 随后将 PDMS 胶与固化剂按照 10:1 的比例混合并抽真空, 接着将混合液体浇筑在玻璃基片上且放入干燥箱中烘烤固化; 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钻出流道入口和出口, 至此油液检测芯片制作完成。

为了形成试验对比, 与上述方法相似, 我们制作了不含硅钢片的检测芯片。

3.2 多参数检测系统的搭建

本文搭建的多参数检测系统如图 5 所示, 主要有驱动单元, 传感单元, 观测单元, 激励单元, 数据采集单元和数据处理单元。



图 5 多参数检测系统

微量注射泵(Harvard pump 11 plus)作为驱动单元, 用以定速驱动待测油液通过芯片; 显微镜(Nikon AZ100)作为观测单元, 可实时观测芯片检测状况; 文中制作的微流体检测芯片作为传感单元, 可对待测油样进行检测; 阻抗分析仪(Agilent E4980A)作为激励单元, 可对检测芯片施加激励; 安装有 LabVIEW 采集系统的计算机作为数据采集单元实时读取检测, 安装有 Matlab 处理程序的计算机作为数据处理单元可对所得数据进行分析统计。

3.3 电感参数检测试验

电感检测主要可以区分液压油中的铁磁性和非铁磁性颗粒。而水和空气属于非金属, 不具有磁化效应和涡流效应, 因而电感模式无法检测水滴和气泡。我们选取铁颗粒和铜颗粒进行试验。首先是含硅钢片芯片和不含硅钢片芯片的对比试验, 接着是含硅钢片芯片的检测下限试验。

我们使用先前制作好的含硅钢片芯片与不含硅钢片芯片对 $90\sim100\ \mu\text{m}$ 的铁颗粒和 $190\sim200\ \mu\text{m}$

的铜颗粒进行检测。首先用电子天平(英衡精密电子天平)称取 $3\ \text{mg}$ 粒径为 $90\sim100\ \mu\text{m}$ 的铁颗粒, 将其混入 $100\ \text{mL}$ 液压油(长城 L-HM 46)中并摇匀。以相同的方法将 $3\ \text{mg}$ 粒径为 $190\sim200\ \mu\text{m}$ 的铜颗粒与 $100\ \text{mL}$ 液压油均匀混合。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 $2\ \text{V}$ 、 $2\ \text{MHz}$, 此为电感检测模式。然后将微量注射泵的流量设为 $40\ \mu\text{L}/\text{min}$ 。摘取部分铁颗粒和铜颗粒检测信号片段如图 6、7 所示。

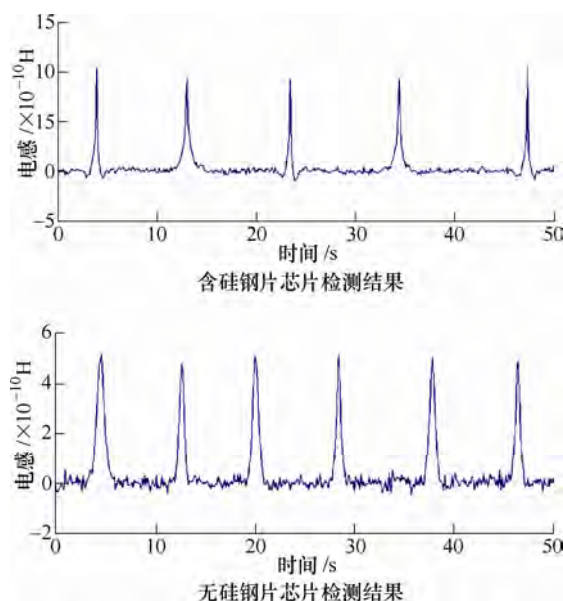


图 6 $90\sim100\ \mu\text{m}$ 铁颗粒的检测信号

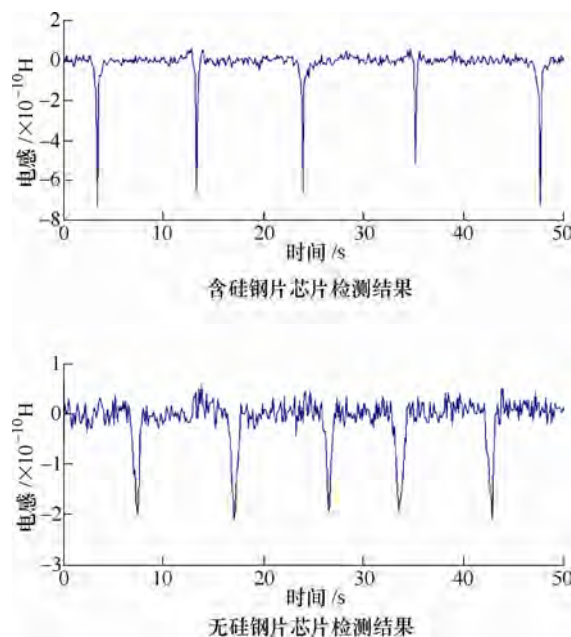


图 7 $190\sim200\ \mu\text{m}$ 铜颗粒的检测信号图

如表 1 所示, 我们对所得检测结果进行了对比。统计结果表明, 硅钢片的加入使得芯片的检测精度有明显的提高。对于 $90\sim100\ \mu\text{m}$ 的铁颗粒, 含硅钢

片芯片的检测信号幅值($9.864\ 83 \times 10^{-10}\text{ H}$)是不含硅钢片芯片检测信号幅值($4.976\ 19 \times 10^{-10}\text{ H}$)的 1.98 倍;对于 $190 \sim 200\ \mu\text{m}$ 的铜颗粒,含硅钢片芯片的检测信号幅值($9.864\ 83 \times 10^{-10}\text{ H}$)是不含硅钢片芯片检测信号幅值($4.976\ 19 \times 10^{-10}\text{ H}$)的 3.31 倍;对于铁颗粒而言,含硅钢片芯片所得信号的信噪比较不含硅钢片芯片的信噪比提高了 98.39%;对于铜颗粒而言,含硅钢片芯片所得信号的信噪比较不含硅钢片芯片的信噪比提高了 231.45%。这是由于对电感线圈施加以交流电激励后,平面电感线圈周围会产生一个原有磁场,首先由于硅钢片为软磁性材料,其

磁阻较低,因而对于原有磁场具有一定的集中作用;其次,硅钢片在外磁场的作用下被强烈的磁化,对于检测区域的磁场具有增强作用,从而提高了检测精度。就线圈的基础电感而言,含硅钢片芯片为 $5.693\ 75 \times 10^{-6}\text{ H}$,而不含硅钢片的为 $5.331\ 93 \times 10^{-6}\text{ H}$,两者相差 $3.618\ 2 \times 10^{-7}\text{ H}$,从而证明了硅钢片的加入使得检测区域的磁场有所增强。同时,经过试验我们注意到铁颗粒和铜颗粒所得信号幅值以及信噪比的提升倍数并不会保持为一定值,其随颗粒的属性和尺寸大小而变化,其原因是铁磁性物质的磁化随磁场的强弱呈非线性变化。

表 1 含硅钢片芯片和不含硅钢片芯片的检测结果对比

颗粒属性	芯片类型	基础电感值/H	平均幅值/H	噪声/H	信噪比	信噪比提升(%)
铁颗粒 (90~100 μm)	含硅钢片	$5.693\ 75 \times 10^{-6}$	$9.864\ 83 \times 10^{-10}$	1.0×10^{-10}	9.864 83	98.39
	无硅钢片	$5.331\ 93 \times 10^{-6}$	$4.976\ 19 \times 10^{-10}$	1.0×10^{-10}	4.976 19	
铜颗粒 (190~200 μm)	含硅钢片	$5.693\ 75 \times 10^{-6}$	$-7.060\ 38 \times 10^{-10}$	1.0×10^{-10}	7.060 38	231.45
	无硅钢片	$5.331\ 93 \times 10^{-6}$	$-2.132\ 24 \times 10^{-10}$	1.0×10^{-10}	2.132 24	

试验发现,电感检测试验中所得信号的噪声值都稳定在 $1.0 \times 10^{-10}\text{ H}$,若所得信号脉冲大于噪声,则表明检测到了金属颗粒物。为此,我们使用所制作的含硅钢片的检测芯片对其电感模式的检测下限进行测试。可以在显微镜下观察到,当 $30 \sim 40\ \mu\text{m}$ 的铁颗粒和 $90 \sim 100\ \mu\text{m}$ 的铜颗粒通过检测区域时,会产生相应的信号幅值,如图 8、9 所示为试验所得信号图,表 2 为电感模式检测下限统计表。对于尺

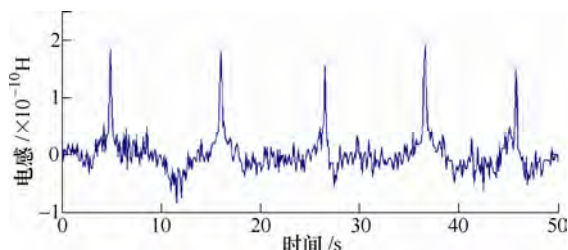


图 8 30~40 μm 铁颗粒的检测信号图

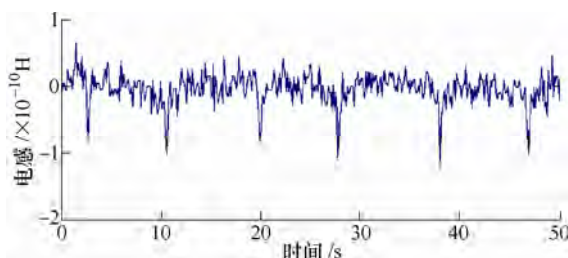


图 9 110~120 μm 铜颗粒的检测信号图

表 2 电感模式检测下限统计表

颗粒属性	平均幅值/H	噪声/H	信噪比
铁颗粒 (30~40 μm)	$1.722\ 51 \times 10^{-10}$	1.0×10^{-10}	1.722 51
铜颗粒 (110~120 μm)	$-1.114\ 04 \times 10^{-10}$	1.0×10^{-10}	1.114 04

寸更小的铁颗粒和铜颗粒,所得信号幅值会淹没于噪声中,无法检测判断。

3.4 电容参数检测试验

我们用振荡油水或油气混合物的方法来制取试验所需大小的水滴和气泡,通过振荡时间来控制所得颗粒尺寸的大小。为制取含 $160 \sim 170\ \mu\text{m}$ 气泡的油样,可直接将 $990\ \mu\text{L}$ 液压油(长城 L-HM 46)装入容量为 1 mL 的塑料管中密封(此时管中已含有 $10\ \mu\text{L}$ 的空气),并将塑料管置于振动器(IKA S25,德国)中振动 1.5 min ,再用超声波振荡器(DSA200-SK, 200 W , 40 kHz ,中国)振荡 3 min 。为获得 $130 \sim 140\ \mu\text{m}$ 的水滴,首先将 $5\ \mu\text{L}$ 蒸馏水和 $995\ \mu\text{L}$ 液压油装入容量为 1 mL 的塑料密封管中,将密封管放置在振动器上振动 2 min 后用超声波振荡器振荡 4 min 即可。

将平面电感线圈的一个接线端和硅钢片的接线端与阻抗分析仪连接,且将阻抗分析仪的激励电压和频率分别调为 2 V 、 0.3 MHz ,即为电容模式。接着将微量注射泵的流量设为 $40\ \mu\text{L}/\text{min}$,并启动注射泵将含有水滴和气泡的样品油注入检测芯片。我们成功检测到了油液中 $130\ \mu\text{m}$ 的水滴和 $160\ \mu\text{m}$ 的气泡,检测结果如图 10、11 所示。

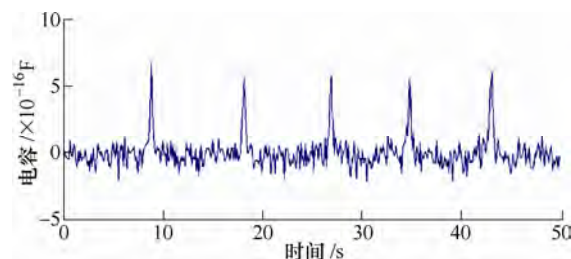
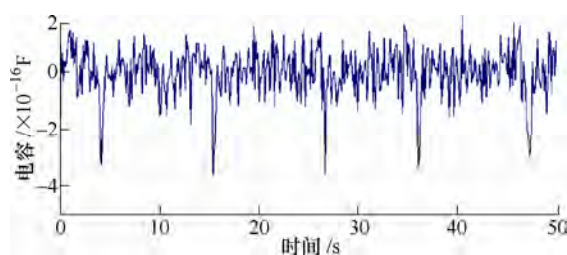


图 10 130~140 μm 水滴的检测信号图

图 11 160~170 μm 气泡的检测信号图

在图 10 和图 11 中, 水滴和气泡所引起的电容变化方向相反, 这是由于水的介电常数约为 80, 大于液压油的介电常数(2.6); 而气泡的介电常数约为 1, 小于液压油的介电常数。如表 3 所示, 130~140 μm 水滴产生的 5 个电容信号的平均脉冲幅值($6.061\ 64 \times 10^{-16}\text{ F}$)相较 160~170 μm 气泡产生的 5 个电容信号的平均脉冲幅值($3.569\ 31 \times 10^{-16}\text{ F}$)大出 $2.492\ 33 \times 10^{-16}\text{ F}$ 。这是由于水与液压油介电常数的差值较空气与液压油的介电常数差值大出 75.8, 从而电容检测对水滴更灵敏。相比先前设计的传感器^[21], 本文的所提出的检测芯片具有更高的电容检测精度, 这是由于两极板的正对面积相比原先有大幅度的降低, 从而导致相同大小颗粒物对于电容检测区域的介电常数的改变比例增加。

表 3 电容模式检测结果统计表

颗粒属性	平均幅值/F	噪声/F	信噪比
水滴 (130~140 μm)	$6.061\ 64 \times 10^{-16}$	2.5×10^{-16}	2.424 65
气泡 (160~170 μm)	$-3.569\ 31 \times 10^{-16}$	2.5×10^{-16}	1.427 724

电容检测试验中所得信号的噪声值都稳定在 $2.5 \times 10^{-16}\text{ F}$, 因此, 对所得脉冲信号的幅值判断并无影响。由于制得的液压油样品中所含的颗粒尺寸并非一致; 同时, 颗粒物通过检测区域时的径向分布位置并不相同, 而颗粒离极板距离越近, 所引发的电容变化量越大^[28], 从而导致试验所得信号脉冲存在一定的波动。

4 结论

本文提出了一种电感-电容双模式液压油多污染物综合检测新方法, 所设计的传感器是由硅钢片和平面电感线圈对置构成, 既能作为电感传感器实现电感参数检测, 也能作为电容传感器实现电容参数检测。芯片中流道的设计可确保电感检测时金属颗粒物流经检测最为敏感的区域; 硅钢片和平面电感线圈的相对位置的设计可确保一更强的原有磁场来磁化硅钢片, 达到更好的电感检测效果; 通过对

比试验表明, 硅钢片可通过增加检测区域磁场强度的方式有效地提高电感检测的精度。试验中用 60 匝的平面电感线圈传感器实现了对液压油中 30 μm 铁颗粒和 110 μm 铜颗粒的区分检测; 在电容模式下用该传感器可对液压油中 130 μm 水滴和 160 μm 气泡进行区分检测。本文提出的双模式油液检测传感器基于微流体技术, 具有体积小、检测精度高、可实现便携式检测的优点, 接下来可以对传感器的测量电路进行优化设计, 提高传感器数据采集的抗干扰能力, 这对液压油污染物的实时综合检测提供了技术支持, 从而达到预防液压系统的故障和延长液压设备工作寿命的目的。

参 考 文 献

- [1] PENG Z, KESSISSOGLOU N. An integrated approach to fault diagnosis of machinery using wear debris and vibration analysis[J]. *Wear*, 2003, 255(7): 1221-1232.
- [2] ASRAR N, NICKERSON W. Failure of drilling tools due to degradation of hydraulic oils[J]. *Materials Performance*, 2015, 54(4): 60-64.
- [3] EDMONDS J, RESNER M S, SHKARLET K. Detection of precursor wear debris in lubrication systems[C]// *Aerospace Conference*. IEEE, 2000.
- [4] WANG Ziping, XUE Xian, YIN He, et al. Research progress on monitoring and separating suspension particles for lubricating oil[J]. *Complexity*, 2018, 5: 1-9.
- [5] GUREEV A A, POPOVA N N, NIZ'EVA O S, et al. Effect of water contamination on aging of hydraulic oil[J]. *Chemistry & Technology of Fuels & Oils*, 1992, 28(12): 674-677.
- [6] TOMS A, TOMS L. Oil analysis and condition monitoring[M]// *Chemistry and Technology of Lubricants*. Netherlands: Springer, 2010.
- [7] SCHRANK K, MERRENHOFF H, STAMMEN C. Investigation of different methods to measure the entrained air content in hydraulic oils[C]// *ASME/BATH*. 2014. Symposium on Fluid Power and Motion Control.
- [8] ABOUEL-KASEM A, ALTURKI F A, AHMED S M, Fractal analysis of cavitation eroded surface in dilute emulsions[J]. *Journal of Tribology*, 2011, 133(4): 41403-41412.
- [9] ZHU Junda, 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.
- [10] 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.

- [11] BORDATCHEV E, AGHAYAN H, YANG J. Object shape-based optical sensing methodology and system for condition monitoring of contaminated engine lubricants[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 128-138.
- [12] 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 Xiaolong, TIAN Hongxiang, SUN Yunling, et al. Influencing factors on measurement results of light extinction particle counters[J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(8): 133-135.
- [13] WHITSEL H K, NORDLING D A, NEMARICH C P. Online wear-particle monitoring based on ultrasonic detection[J]. *Intech*, 1986, 33(6): 53-57.
- [14] ZHANG Jie, DRINKWATER B W, DWYER-JOYCE R S. Monitoring of lubricant film failure in a ball bearing using ultrasound[J]. *Journal of Tribology*, 2006, 128(3): 612-618.
- [15] WANG Yanshan, ZHANG Meiju, LIU Defeng. A compact on-line particle counter sensor for hydraulic oil contamination detection[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 130-134: 4198-4201.
- [16] MILLER J L, KITALEVICH D. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment[C]// *Aerospace Conference Proceedings*, 2000 IEEE. IEEE, 2000.
- [17] 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 Lin, ZHANG Hongpeng, TENG Huaibo, et al. Novel method for the detection of multi-contaminants in marine lubricants[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(12): 125-132.
- [18] LI Du, ZHU Xiaoliang, JIANG Zhe. An inductive sensor for real time measurement of plantar normal and shear forces distribution[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, 62(5): 1316-1323.
- [19] HAN Zhibin, WANG Yishou, QING Xinlin. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2851.
- [20] MURALI S, XIA Xingao, 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.
- [21] ZENG Lin, ZHANG Hongpeng, ZHAO Xupeng, et al. A novel inductance/capacitance microfluidic chip for the multi-contamination detection in marine hydraulic oil[C]// *Prognostics and System Health Management Conference*. Phm-harbin. 2017.
- [22] ZHU Xiaoliang, ZHONG Chong, JIANG Zhe. A high sensitivity wear debris sensor using ferrite cores for online oil condition monitoring[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(7): 075102.
- [23] WEI Hong, WANG Shaoping, TOMOVIC M, et al. Radial inductive debris detection sensor and performance analysis[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(12): 125103.
- [24] 傅舰艇, 詹惠琴, 古军. 三线圈电感式磨粒传感器的检测电路[J]. *仪表技术与传感器*, 2012(2): 5-7.
- FU Jianting, ZHAN Huiqin, GU Jun. Detection circuit design of three-Coil inductive particle sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012(2): 5-7.
- [25] 刘恩辰, 张洪朋, 张鑫睿, 等. 双线式螺线管型磨粒传感器设计及其实验研究[J]. *大连海事大学学报*, 2016, 42(2): 102-106.
- Liu Enchen, ZHANG Hongpeng, ZHANG Xinrui, et al. Dual-coil solenoid sensor design and its experimental study for wear particles detection [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2016, 42(2): 102-106.
- [26] 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 Hongbo, ZHANG Yingtang, CHENG Yuan, 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.
- [27] 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 Hongpeng, ZHANG Xinming, GUO Li, et al. Design of the oil detection microfluidic chip[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4): 762-767.
- [28] 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 Enchen. Research on the detection of various pollutants in marine hydraulic oil in an integrated chip[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.

作者简介: 史皓天, 男, 1996 年出生, 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

张洪朋(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为船舶机电一体化、船舶液压系统与微流体芯片检测技术。

E-mail: zhppeter@163.com