

# 液压油污染物双线圈多参数阻抗检测传感器\*

曾霖, 张洪朋, 赵旭鹏, 滕怀波, 虞子雷  
(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

**摘要:**提出了一种液压油污染物多参数测量传感器,该传感器在平面型微流体电感传感器基础上增加了一个单层电感线圈,并将两个单层线圈正对排布在直微通道两侧,在电感参数检测的基础上将两个单层电感线圈等效为一对圆环形电容极板,引入了电容参数检测,从而实现了在液压油中铁磁性金属颗粒、非铁磁性金属颗粒、水滴和气泡4种污染物的检测。对该多参数传感器进行了设计,并结合仿真和实验对检测位置进行了优化,电容参数检测实验实现了液压油中180  $\mu\text{m}$ 水滴和240  $\mu\text{m}$ 气泡的区分检测;电感参数检测实验实现了液压油中80  $\mu\text{m}$ 铁颗粒和150  $\mu\text{m}$ 铜颗粒的区分检测。该研究对液压油多污染物的区分检测提供了一种新方法。

**关键词:** 液压油;颗粒污染物;多参数检测;双线圈;微传感器

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

## Double coil multi-parameter impedance sensor for hydraulic oil pollutants detection

Zeng Lin, Zhang Hongpeng, Zhao Xupeng, Teng Huaibo, Yu Zilei

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

**Abstract:** A multi-parameter measurement sensor for hydraulic oil pollutants is proposed. Based on the planar microfluidic inductance sensor, a single layer inductance coil is added in the sensor. Two single-layer coils are arranged on both sides of the straight micro-channel. On the basis of inductance parameter detection, the two single-layer inductor coils are equivalent to a pair of ring shaped capacitor plates, the capacitance parameter detection is introduced, and the multi-parameter sensor achieves the detection of four pollutants (ferromagnetic metal particles, non-ferromagnetic metal particles, water droplets and air bubbles) in the hydraulic oil. The design of multi-parameter sensor was carried out, and the detection position was optimized through simulation and experiments. The capacitance parameter detection experiment realizes the differential detection of 180  $\mu\text{m}$  water droplets and 240  $\mu\text{m}$  air bubbles; and the inductance parameter detection experiment realizes the differential detection of 80  $\mu\text{m}$  iron particles and 150  $\mu\text{m}$  copper particles in hydraulic oil, respectively. The study provides a new approach for the differential detection of multi-pollutants in hydraulic oil.

**Keywords:** hydraulic oil; particle contamination; multi-parameter detection; double coil; micro sensor

## 1 引言

液压系统已广泛应用于各个工程领域。作为液压机械介质,液压油在液压系统中起着重要作用。据统计,超过75%的液压系统机械故障是由于液压油颗粒污染物引起的<sup>[1]</sup>。当液压系统运行时,液压油中的微小颗粒(如金属颗粒、水滴和气泡)富含设备工作状态的重要信息。

在液压设备正常工作状态下,液压油中微粒的浓度保持恒定,且颗粒粒径较小(10~20  $\mu\text{m}$ )。当机械设备发生异常磨损时,颗粒的浓度和尺寸都将迅速增加<sup>[2]</sup>。除了金属颗粒,液压油中的水可加速机械设备的腐蚀过程<sup>[3]</sup>;液压油中的气泡会对液压系统的整体性能产生影响<sup>[4,5]</sup>。液压油污染物检测是保持液压油清洁度的重要手段,对于机械设备的状态监测和故障诊断具有重要意义。

目前对液压油的检测主要通过取样后送实验室进行

分析,实验室虽然能进行较为全面的分析,但所需的仪器设备也比较多<sup>[6]</sup>,且化验分析周期长,难以实现在线检测。为了克服实验室检测的缺点,现已发展了一系列液压油污染物快速检测方法<sup>[7]</sup>,如光学法、声学法、电感法和电容法等。前两种检测方法<sup>[8-9]</sup>检测精度高,但易受环境噪声、油温和油液渗透性的影响。电感方法<sup>[10-12]</sup>可以区分油中的铁磁性和非铁磁性金属颗粒,并且不易受环境因素的影响。但这种方法无法检测液压油中的非金属颗粒,例如气泡、水滴等。此外,与前两种方法相比,该方法的检测精度较低。课题组基于传统的电感法,提出了一种双线圈微流体电感检测传感器,较传统电感法具有更高的检测精度<sup>[13]</sup>。电容法<sup>[14-16]</sup>的优点是可以对液压油中的水滴和气泡进行区分检测,但无法区分检测金属颗粒。上述方法都只能检测一种或两种液压油污染物,最近,Zhu X. L. 等人<sup>[17]</sup>提出了一种油液综合检测系统,该系统集成了油液水分传感器、粘度传感器和电感传感器,可以检测液压油中的金属颗粒、水分和油粘度,但是该系统的搭建和控制较为复杂。

基于前期双线圈电感式油液检测传感器,本文通过改变绕线形式以及线圈排布方式,设计了一种双线圈多参数阻抗传感器,在原有电感检测的基础上引入了电容检测,不仅能够实现液压油中铁磁与非铁磁金属颗粒的区分检测,还能实现液压油中水滴和气泡的区分检测。

## 2 传感器设计与检测原理

传感器设计如图1所示,该传感器由1个直微通道和2个嵌入通道两侧的单层电感线圈组成,2个单层线圈正对排布在直通道两侧,从而使直通道从2个单层电感线圈中间穿过(微通道径向位置待定)。每个电感线圈由线径为70 μm的漆包线绕制而成,匝数为20匝,缠绕方向相同,微通道直径 $D_1$ 为300 μm,线圈内孔直径 $D_2$ 为900 μm,两个单层线圈之间的距离 $D_3$ 为300 μm。

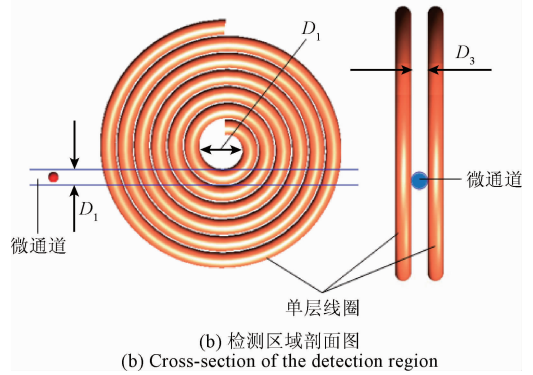


图1 阻抗传感器设计

Fig.1 The design diagram of impedance sensor

该双线圈阻抗传感器不仅能检测油液污染物引起的电感参数变化,同时2个单层线圈还能等效成2个电容极板,从而引入了电容参数检测。

### 2.1 电感参数检测原理

电感参数检测时将2个单层线圈同向并联连接,如图2所示。

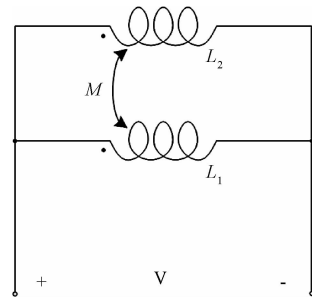


图2 电感参数检测原理

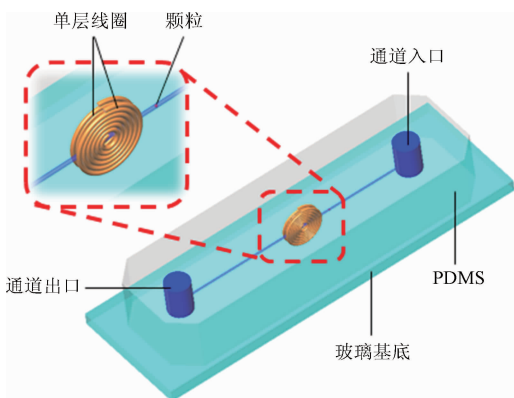
Fig.2 Schematic diagram of inductance parameter detection

电感检测时每个单层线圈相对于微通道都形成了一个平面型电感线圈传感器,与平面型线圈的区别在于,每个线圈除了自感 $L$ 之外,这2个单层线圈之间还存在互感 $M$ 。因为2个单层线圈是完全相同的,即 $L_1 = L_2 = L$ ,所以在交流激励下,同向并联的2个线圈的等效电感为:

$$L_{eq} = 0.5(L + M) = 0.5\left(\frac{\psi}{i} + M\right) \quad (1)$$

式中: $\psi$ 为通过电感线圈的磁通量, $i$ 为经过线圈的电流。

本课题组<sup>[12]</sup>在前期对于单个平面电感线圈的电感变化进行了较为深入的研究,当铁磁性金属颗粒(例如铁颗粒)经过高频激励的平面电感线圈区域时,由于磁化作用会增加线圈的磁通量 $\psi$ ,从而使线圈电感 $L$ 升高,由式(1)可知同向并联的双线圈等效电感 $L_{eq}$ 也会随之升高。反之,当非铁磁性金属颗粒(例如铜颗粒)经过平面线圈检测区域时,则没有磁化作用,同时颗粒内部会产生



(a) 整体设计  
(a) The overall design

反向涡流抵消一部分线圈的磁通量  $\psi$  [18], 使线圈电感  $L$  降低, 从而双线圈等效电感  $L_{eq}$  也会随之降低。对于互感  $M$ , 当没有金属颗粒经过线圈检测区域时,  $M$  只取决于 2 个单层线圈的材料属性、结构参数和相对位置, 当有金属颗粒经过时  $M$  还与颗粒的属性有关。从实测结果可知  $L$  比  $M$  大, 即  $L_{eq}$  的变化主要取决于  $L$  的变化。

因此检测双线圈等效电感的变化可以实现液压油中铁磁性金属颗粒 ( $L_{eq}$  升高) 和非铁磁性金属颗粒 ( $L_{eq}$  降低) 的区分检测。

### 2.2 电容参数检测原理

电容参数检测原理如图 3 所示。

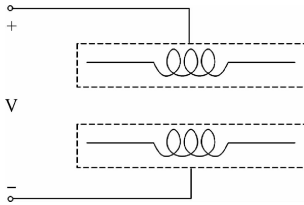


图 3 电容参数检测原理

Fig. 3 Schematic diagram of capacitance parameter detection

电容检测时 2 个对置的单层电感线圈可等效为一个圆环形平行电容器的 2 个极板。在理想状态下 (忽略电容边缘效应), 平行电容器的电场分布如图 4 所示。当没有颗粒经过电容检测区域时, 极板间充满液压油, 其介电常数为  $\epsilon_o$ , 当有颗粒经过电容检测区域时, 极板间颗粒和液压油的混合油液介电常数变为  $\epsilon_{mix}$ , 根据介电常数差异 [19], 电容检测可实现不同非金属颗粒 (例如水滴和气泡) 的区分检测。

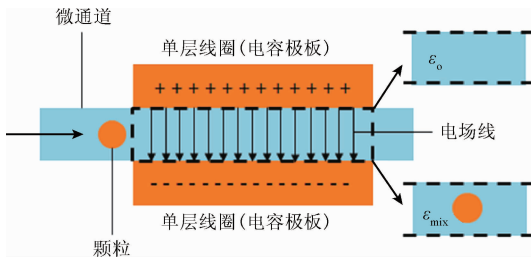


图 4 平行极板电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of parallel plates

在常规静电场 (直流电) 中, 电容器介质的介电常数只取决于介质的属性, 但当电容极板处于电流激励时, 除了介质属性, 其介电常数还与激励频率有关, 因此需要引入复介电常数  $\tilde{\epsilon}$ , 液压油和颗粒的复介电常数分别为:

$$\tilde{\epsilon}_o = \epsilon_o - j \frac{\sigma_o}{\omega} \tag{2}$$

$$\tilde{\epsilon}_p = \epsilon_p - j \frac{\sigma_p}{\omega} \tag{3}$$

式中:  $\epsilon_o$  和  $\epsilon_p$  分别为液压油和颗粒的介电常数,  $\sigma_o$  和  $\sigma_p$  分别为液压油和颗粒的电导率,  $\omega$  为角频率, 即  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为激励频率。

根据麦克斯韦理论, 液压油和颗粒的混合油液复介电常数为 [20]:

$$\tilde{\epsilon}_{mix} = \tilde{\epsilon}_o \frac{1 + 2\Phi \tilde{f}_{CM}}{1 - \Phi \tilde{f}_{CM}} \tag{4}$$

式中:  $\Phi$  为颗粒体积  $V_p$  与电容区域体积  $V_d$  之比。

$$\Phi = \frac{V_p}{V_d} = \frac{4\pi r^3}{3V_d} \tag{5}$$

式中:  $r$  为颗粒半径,  $\tilde{f}_{CM}$  是 Clausius-Mossotti 因子。

$$\tilde{f}_{CM} = \frac{\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_o}{\epsilon_p + 2\tilde{\epsilon}_o} \tag{6}$$

把式 (5) 和 (6) 代入式 (4) 可得:

$$\tilde{\epsilon}_{mix} = \tilde{\epsilon}_o \frac{3V_d(\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_o) + 8\pi r^3(\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_o)}{3V_d(\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_o) - 4\pi r^3(\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_o)} \tag{7}$$

本文所采用的阻抗参数测量仪器为精密 LCR 表 (Keysight E4980A), 其测量原理是通过所测得的阻抗值  $Z$  计算被测单元对应的等效电容值  $C$ , 阻抗与电容的关系如下 [21-22]:

$$Z = \frac{RX_C^2}{R^2 + X_C^2} + j \frac{RX_C}{R^2 + X_C^2} \tag{8}$$

其中,  $X_C$  的表达式为:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \tag{9}$$

记  $Z$  的实部为  $Z_{Re}$ , 虚部为  $Z_{Im}$ , 则联立式 (2) 和 (3) 可得  $C$  为:

$$C = \frac{1}{2\pi f} \times \frac{Z_{Im}}{(Z_{Re})^2 + (Z_{Im})^2} \tag{10}$$

另一方面, 理想平行电容器的阻抗可由下式计算:

$$Z = \frac{1}{j\omega \tilde{\epsilon} G_f} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{j\tilde{\epsilon} G_f} \tag{11}$$

式中:  $\tilde{\epsilon}$  为电容极板间介质的复介电常数,  $G_f$  为电容器结构常数。理想圆环形电容器的  $G_f$  可简化为环形极板面积  $S$  与极板间距  $D$  的比值:

$$G_f = \frac{S}{D} = \frac{\pi R_{outer}^2 - \pi R_{inner}^2}{D} \tag{12}$$

式中:  $R_{outer}$  为圆环形极板外径,  $R_{inner}$  为圆环形极板内径。因为该圆环极板是由漆包线绕制紧密而成, 所以  $R_{outer}$  为:

$$R_{outer} = R_{inner} + Nd \tag{13}$$

式中:  $N$  为线圈匝数,  $d$  为漆包线直径。将式 (13) 代入式 (12) 可得:

$$G_f = \frac{2\pi NdR_{inner} + \pi N^2 d^2}{D} \tag{14}$$

因此,将式(2)和(7)分别代入式(11)可得纯液压油时双线圈的阻抗为:

$$Z_o = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{j\epsilon_o G_f} \quad (15)$$

颗粒和液压油混合时双线圈的阻抗为:

$$Z_{mix} = \frac{1}{2\pi f} \times \frac{1}{j\epsilon_{mix} G_f} \quad (16)$$

联立式(10)、(15)和(16)可得颗粒污染物经过电容检测区域时双线圈的电容变化为:

$$\Delta C = C_{mix} - C_o = \frac{1}{2\pi f} \cdot \left[ \frac{Z_{mix, Im}}{(Z_{mix, Re})^2 + (Z_{mix, Im})^2} - \frac{Z_{o, Im}}{(Z_{o, Re})^2 + (Z_{o, Im})^2} \right] \quad (17)$$

由于气泡的介电常数比液压油的小而水的介电常数比液压油的大,因此气泡和水滴将使双线圈产生不同方向的电容变化,从而可以对液压油中的气泡和水滴进行区分检测。

### 3 检测通道位置优化

本文设计的多参数传感器检测区域为单层线圈所覆盖的圆形区域,检测区域范围较广,本节将通过仿真找出最佳检测位置,从而确定微通道的最佳布置位置。对于电感检测而言,该双线圈结构可等效为两个平面电感线圈的叠加,对于平面电感线圈的电感检测位置优化前期已经进行了相关研究<sup>[23]</sup>,研究表明,电感的最佳检测位置位于线圈内孔边缘,并非经过电感线圈中心处。下面将通过仿真对电容参数检测位置进行优化研究。

首先用 Comsol 建立检测区域的模型,模型结构参数与传感器结构设计参数一致(详见第2节),其中直微通道穿过线圈圆心处,线圈材质设为铜,直通道内充满油液,然后建立 180 μm 的水滴模型和 240 μm 的气泡模型,并让水滴和气泡分别沿微通道方向(x轴方向)流过双线圈检测区域,同时计算每个位置所对应的双线圈电容值。模型及仿真结果如图5所示。

从仿真结果可以看出,无论是水滴还是气泡,在接近线圈时电容变化幅值(绝对值)都增大,完全进入线圈区域时幅值达到最大,但经过线圈内孔区域时会有所减小,所以当1个颗粒经过线圈圆心横穿电容检测区域时,会产生2个峰值,这将会对颗粒的计数产生影响。根据前期对电感检测位置的研究,图5中圆圈区域是电感检测的最佳位置,从图5也能看出,圆圈处所对应的电容变化也达到了最大,并且因为不会穿过电感线圈内孔区域,所以电容不会产生2个峰值,因此圆圈区域也是电容检测的最佳区域。优化后的微通道位置剖面如图6所示。

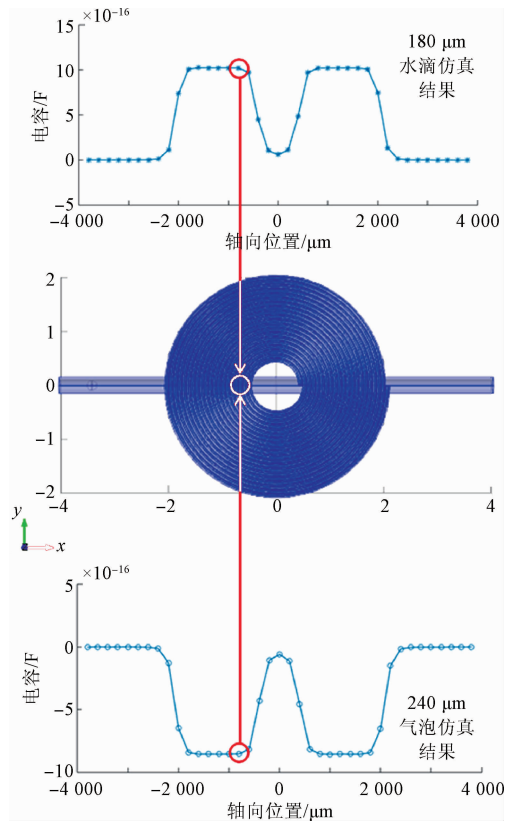


图5 轴向位置仿真结果

Fig.5 Simulation result for axial position

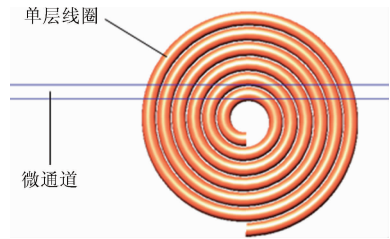


图6 最佳微通道位置剖面

Fig.6 Cross-section of the optimal micro-channel position

### 4 多参数检测实验

首先制作多参数传感器,传感器的制作包括单层线圈制作和微通道的制作。单层线圈用线径为 70 μm 的漆包线通过绕线机(实力,SRDZ23-1B,中国)绕制而成,匝数为20匝,2个单层线圈同向缠绕。微通道模具是一根长为7cm,直径为300 μm的铜棒,将绕制好的单层线圈正对排布固定在铜棒两侧并尽量靠近铜棒,接着将铜棒和两侧的单层线圈一起固定在载玻片上。然后按胶体与固化剂质量比为1:10配制聚二甲基硅氧烷

(Polydimethylsiloxane, PDMS, 常用的固化成型材料), 并将配置好的 PDMS 浇注在微通道模具上, 并将模具放入 80℃ 恒温箱中烘烤 1 h 进行固化, 固化后将铜棒从 PDMS 胶中抽出, 就完成了整个多参数传感器的制作。

然后搭建多参数检测系统, 如图 7 所示。该系统包括传感器驱动单元: 微量注射泵 (Harvard Apparatus B-85259); 观察单元: 显微镜 (Nikon AZ100); 阻抗参数检测单元: 精密 LCR 表 (Keysight E4980A) 以及数据采集显示单元: LabVIEW 采集系统。

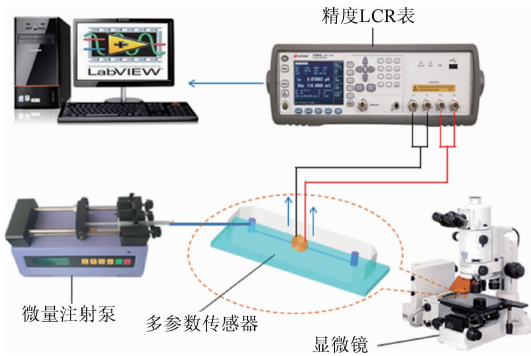


图 7 多参数检测系统

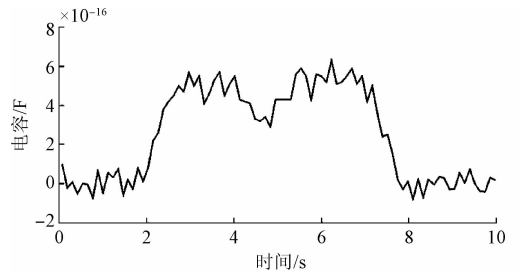
Fig. 7 The multi-parameter detection system

### 4.1 电容检测

为了验证电容参数检测效果, 本文将对液压油中的水滴和气泡进行检测。

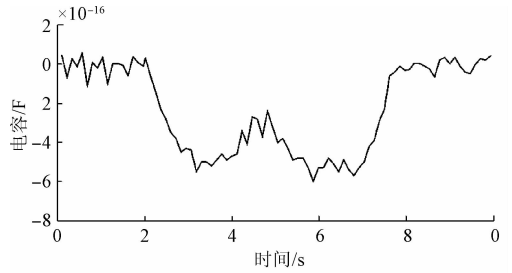
本文将用振动器和超声波振荡器来制备不同尺寸的水滴和气泡。为了制备 180 ~ 190 μm 的水滴, 将 5 μl 纯水与 995 μl 液压油 (长城 L-HM 46) 混合, 将混合油液密封在 1 ml 塑料管中。接着将装有混合物的密封塑料管置于振动器中 1 min, 然后使用超声波 (DSA200-SK, 中国) 振荡 1.5 min。与制备水滴类似, 为了制备 240 ~ 260 μm 的气泡, 将 10 μl 空气和 990 μl 液压油密封在 1 ml 塑料管中。然后将充满液压油和空气的塑料管放入振动器振动中 1 min 后接着用超声波振荡 2 min 即可。

为了对第 3 节的仿真进行实验验证, 首先用微通道位置处于线圈中心的多参数传感器进行实验, 并且为了更好地观察各个位置的电容变化, 微量注射泵的流量将设置为较小值: 10 μl/min, 精密 LCR 表激励电压为 2 V, 频率为 0.3 MHz。将各部分按检测系统连接后便可开始实验。在慢流速下 180 μm 水滴和 240 μm 气泡的电容检测结果如图 8 所示。



(a) 180 μm 水滴电容检测结果

(a) The capacitance detection result of 180 μm water droplets



(b) 240 μm 气泡电容检测结果

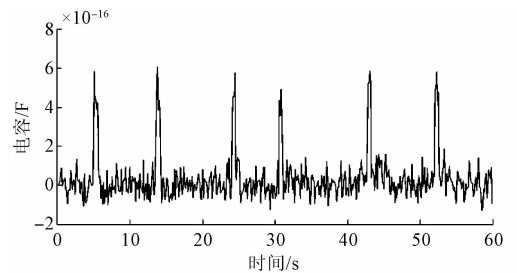
(b) The capacitance detection result of 240 μm air bubbles

图 8 水滴和气泡电容检测结果 (微通道经过圆心)

Fig. 8 The capacitance detection results of water droplets and air bubbles (the micro-channel passes through the center of the coil)

从图 8 中可以看出, 当微通道经过电感线圈的圆心时, 电容幅值变化会产生 2 个峰值, 在经过线圈中间的内孔时电容幅值会减小, 这与仿真结果是一致的。但实验所测得的峰值比仿真计算所得的要小, 这主要是由于仿真是在理想状态下进行计算的, 而实验中传感器的制作会有一定误差, 例如实际中电感线圈与微通道之间是存在一定间距的, 并且间距越大会检测灵敏度越小, 所以在传感器制作时要尽量使单层电感线圈靠近微通道。

接着采用最佳微通道位置的传感器对油液中的水滴和气泡进行检测, 并将驱动流量调为 40 μl/min, 其电容检测结果如图 9 所示。



(a) 180~190 μm 水滴电容检测结果

(a) The capacitance detection result of 180~190 μm water droplets

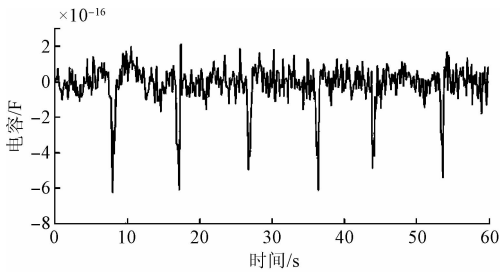
(b) 240~260  $\mu\text{m}$  气泡电容检测结果(b) The capacitance detection result of 240~260  $\mu\text{m}$  air bubbles图9 水滴和气泡电容检测结果  
(微通道位于线圈内孔边缘)

Fig. 9 The capacitance detection results of water droplets and air bubbles (the micro-channel is located at the edge of the coil inner hole)

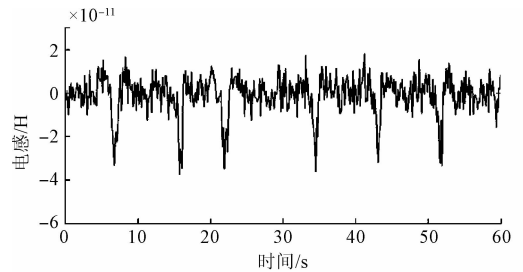
(b) 150~160  $\mu\text{m}$  铜颗粒电感检测结果(b) The inductance detection result of 150~160  $\mu\text{m}$  copper particles图10 铁颗粒和铜颗粒电感检测结果  
(微通道位于线圈内孔边缘)

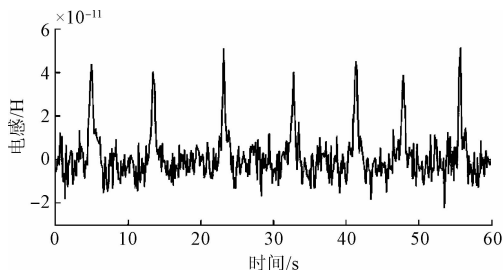
Fig. 10 The inductance detection results of iron particles and copper particles (the micro-channel is located at the edge of the coil inner hole)

从图9可以看出,电容参数变化出现2个峰值的情况有所改善,但由于检测区域较长,电容变化过程中还是会有些波动。由于液压油的介电常数为2.6,水的介电常数为80(大于液压油),空气的介电常数为1(小于液压油),因此水滴经过检测区域时会使电容升高,而气泡经过则会使电容降低,这与检测原理是一致的。从检测结果还可以看出,气泡的粒径比水滴要大,但测得的电容幅值却比较接近,这说明该电容检测对水滴更灵敏,这是由于水和油液介电常数的差异要比空气和油液的介电常数大。

电容检测结果表明本文设计的双线圈多参数传感器能实现油液电容参数的测量,并能对液压油中的水滴和气泡进行区分检测。

#### 4.2 电感检测

电感检测主要针对液压油中的金属颗粒,在此选取铁颗粒和铜颗粒进行检测。首先称取8 mg 粒径为80~90  $\mu\text{m}$  的铁颗粒(北京兴荣源科技有限公司),然后加入200 ml 的液压油中并混合均匀备用,接着以同样的方法称取8 mg 粒径为150~160  $\mu\text{m}$  的铜颗粒并与200 ml 液压油混合备用。最后按检测系统图连接好各个部分,微量注射泵的驱动流量设置为40  $\mu\text{l}/\text{min}$ ,精密LCR表设置激励电压为2 V、频率为2 MHz<sup>[24]</sup>。电感参数检测结果如图10所示。

(a) 80~90  $\mu\text{m}$  铁颗粒电感检测结果(a) The inductance detection result of 80~90  $\mu\text{m}$  iron particles

由图10可以看出铁颗粒和铜颗粒引起多参数传感器电感变化的方向是相反的,这与检测原理一致,从而可以实现液压油中铁磁性和非铁磁性金属颗粒的区分检测。同时通过电感检测结果可以看出,铁颗粒的粒径比铜颗粒小,电感参数的变化幅值要比铜颗粒的大,这说明电感检测对铁磁性金属颗粒比较灵敏。

在电容和电感实验中,由于颗粒的粒径在一定范围内是有所不同的,所以参数变化的幅值也在一定范围内有所波动,并且检测结果中所测得的参数变化个数代表了经过检测区域的颗粒污染物的个数,因此该多参数传感器还实现了液压油中颗粒污染的计数。

## 5 结论

本文基于传统电感式液压油传感器提出了一种多参数测量传感器,该传感器将2个单层电感线圈正对排布在直径为300  $\mu\text{m}$  的微通道两侧并用PDMS胶固化,从而使两个单层电感线圈等效为一对圆环形电容极板,在原有电感参数检测的基础上从而引入了电容参数检测。对该多参数传感器的微通道位置进行了优化研究,得出最佳的检测通道位于单层线圈的内孔边缘处。实验中基于该优化后的多参数传感器实现了液压油中铁磁性金属颗粒、非铁磁性金属颗粒、水滴和气泡4种污染物的区分检测及计数。其中电容参数检测实验实现了液压油中180  $\mu\text{m}$  水滴和240  $\mu\text{m}$  气泡的区分检测;电感参数检测实验实现了液压油中80  $\mu\text{m}$  铁颗粒和150  $\mu\text{m}$  铜颗粒的区分检测。本文的研究对液压油多污染物的快速区分检测提供了一种新方法,在液压系统的故障预防与诊断方面具有应用的可能性。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] EDMONDS J, RESNER M S, SHKARLET K. Detection of precursor wear debris in lubrication systems [C]. *Aerospace Conference Proceedings*, 2000:73-77.
- [3] TOMS A, TOMS L. Oil analysis and condition monitoring [M]. Springer Netherlands: Chemistry and technology of lubricants, 2010:459-495.
- [4] ABOUEL A, ALTURKI F A, AHMED S M. Fractal analysis of cavitation eroded surface in dilute emulsions [J]. *Journal of Tribology*, 2011, 133(4): 041403.
- [5] 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.
- [6] SUN W B. Quantitative estimation technique for wear amounts by real time measurement of wear debris in lubricating oil [C]. *Advanced Materials Research*, 2011, 308-310(8):647-650.
- [7] 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.
- [8] KWON O K, KONG H S, HAN H G, et al. On-line measurement of contaminant level in lubricating oil: U. S. Patent 6,151,108 [P]. 2000-11-21.
- [9] ZHANG J, DRINGKWATER B W, DWYER R S. Monitoring of lubricant film failure in a ball bearing using ultrasound [J]. *Journal of Tribology*, 2006, 128(3): 612-618.
- [10] 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.
- [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] ZHANG X M, ZHANG H P, SUN Y Q, et al. Research on the output characteristics of microfluidic inductive sensor [J]. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 2014(15): 725246.
- [13] WU Y, ZHANG H P, ZENG L, et al. Determination of metal particles in oil using a microfluidic chip-based inductive sensor [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2016, 44(3):259-269.
- [14] 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 and Structures*, 2009, 18(3):037001.
- [15] ZHENG Y, SHOJAEI E, WANG CH, et al. Microfluidic characterization of specific membrane capacitance and cytoplasm conductivity of single cells [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 42(1):496-502.
- [16] 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.
- [17] ZHU X L, LI D, JIANG Z. An integrated lubricant oil conditioning sensor using signal multiplexing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 25(1):015006.
- [18] 吕春峰, 朱建平, 匡兴红, 等. 变面积式电涡流传感器线圈阻抗理论计算模型 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(12):1907-1914.  
LV CH F, ZHU J P, KUANG X H, et al. Calculation model for coil impedance of area-variable eddy current sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(12):1907-1914.
- [19] 林海军, 李松辉, 汪鲁才, 等. 基于交流阻抗的掺杂煤炭快速识别方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(4):577-583.  
LIN H J, LI S H, WANG L C, et al. Fast recognition method for doped coal based on AC impedance [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(4):577-583.
- [20] MORGAN H, SUN T, HOLMES D, et al. Single cell dielectric spectroscopy [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 40(1):61-70.
- [21] 李梦琪. 基于微流控芯片的颗粒电容检测技术研究[D]. 大连:大连海事大学, 2014.  
LI M Q. Capacitive particle detection in a microfluidic chip [D]. Dalian:Dalian Maritime University, 2014.

- [22] HARUTA H. The impedance measurement handbook: A guide to measurement technology and techniques [M]. Agilent Technologies, 2000.
- [23] LIU E C, ZHANG H P, WANG Q, et al. Research on the influence of different microchannel position on the sensitivity of inductive sensor [C]. 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2015: 1443-1447.
- [24] 吴瑜, 张洪朋, 王满, 等. 基于空间微螺线管的金属颗粒检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 698-705.
- WU Y, ZHANG H P, WANG M, et al. Research on the metallic particle detection based on spatial micro coil [J]. Instrumentation Science & Technology, 2016, 37(3): 698-705.

### 作者简介



曾霖, 分别在 2013 年和 2015 年于大连海事大学获得学士学位和硕士学位, 现为大连海事大学博士研究生, 主要研究方向为微流体检测技术。

E-mail: bob666zl@126.com

**Zeng Lin** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Dalian Maritime University in 2013 and 2015, respectively. Now he is a Ph. D. student in Dalian Maritime University. His main research interest includes mechatronics and microfluidic technology.



张洪朋(通讯作者), 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. Now he is a professor and Ph. D. candidate supervisor in Dalian Maritime University. His main research interest includes marine engineering, mechatronics and microfluidic technology.