

文章编号 1004-924X(2017)增-0104-09

## 电感-电容式微流体油液检测芯片设计

张洪朋\*, 滕怀波, 曾霖, 虞子雷

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为了实现对液压油中多种污染物的检测, 设计制作了一种电感-电容式微流体芯片。本文对检测芯片的流道位置、线圈间距和线圈匝数进行了仿真计算, 并在所制作的检测芯片上, 进行了线圈匝数对污染物检测信号影响规律的实验研究。仿真结果表明: 流道位于线圈内孔边缘时电感和电容幅值最大; 两平面线圈间的距离越小电感和电容幅值越大; 平面线圈匝数增加时, 电感幅值逐渐增大, 电容幅值逐渐减小。实验结果表明: 铁颗粒和铜颗粒的检测电感幅值随着线圈匝数的增加而增大, 水和气泡的检测电容幅值随着线圈匝数的增加而减小; 电感和电容检测信噪比都是随着线圈匝数的增加而明显降低。线圈匝数为 20 匝时, 铁颗粒、水和气泡的检测信噪比约为 60 匝时的 3.23, 8.41 和 7.34 倍, 铜颗粒在 60 匝时的检测信噪比为 0。检测芯片的平面线圈匝数为 20 匝时, 对四种污染物的检测信噪比最高。本文设计的微流体检测芯片利用两个平面线圈构成的一个传感器, 实现了液压油中铁磁性金属颗粒、非铁磁性金属颗粒、水和空气的区分检测。

**关键词:** 电感-电容式微流体芯片; 污染物检测; 检测信号幅值; 检测信噪比

**中图分类号:** TP212.1; TH137 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0104

## Design of inductance-capacitance microfluidic oil detection chip

ZHANG Hong-peng\*, TENG Huai-bo, ZENG Lin, YU Zi-lei

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

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

**Abstract:** An inductance-capacitance microfluidic chip was designed and fabricated to detect various pollutants in hydraulic oil. Herein, the position of microchannel, distance of coils and coil turns were simulated. Experiments for studying the influence of coil turns on pollutants detection signal were performed on chip. The results indicate, the inductance and capacitance amplitude are largest when the microchannel is located at the edge of the coil inner hole. The smaller distance between the two coils, the larger inductance and capacitance amplitude are achieved. When coil turns increase, the inductance amplitude increase and the capacitive amplitude decrease gradually. With the increase of coil turns, the inductance amplitude of iron particle and copper particle increase, while the capacitance amplitude of water droplet and air bubble decrease, and inductance and capacitance signal to noise ratio are significantly reduced. When the number of turns is 20, the signal to noise ratio of iron particle, water droplet and air bubble is approximately 3.23, 8.41 and 7.34 times of that of 60 turns respectively. The signal to noise ratio of copper particle is 0 at 60 turns. When the coil turns of the detection chip is 20, the detection signal to noise ratio of the four pollutants reaches the maximum. The mi-

收稿日期: 2017-03-31; 修订日期: 2017-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51679022)

crofluidic chip designed in this paper can detect ferromagnetic, non-ferromagnetic particles, water droplets and air bubbles in oil by using one sensor made up of two planar coils.

**Key words:** inductance-capacitance microfluidic chip; contamination detection; detection signal amplitude; detection signal to noise ratio

## 1 引言

液压系统被广泛应用于工程领域。作为液压系统的关键工质,液压油具有降低相对运动部件间磨损、防止金属表面腐蚀、传递能量、对系统进行冷却和减振等重要作用<sup>[1]</sup>。相关资料表明 75% 以上的液压系统故障是由液压油污染引起的<sup>[2]</sup>。液压油中的污染物主要分为固体、液体和气体 3 类。其中金属颗粒、水分和空气是这三类污染物中的典型代表<sup>[3]</sup>。当液压油中的金属磨粒尺寸和浓度超过一定量时,系统工作部件磨损加剧甚至卡死失效<sup>[4]</sup>;侵入系统中的水分会使液压油乳化变质,降低其润滑性能<sup>[5]</sup>;混入系统的空气会以气泡形式悬浮在油液中,引起气穴现象,使系统产生振动和噪声<sup>[6]</sup>。由此可见,液压油中污染物的存在给系统的稳定运行带来了隐患。因此,有必要对液压油中的污染物进行检测,以提高系统的工作可靠性、延长系统及元件的使用寿命<sup>[7]</sup>。

目前,对油液中污染物的检测主要集中在固体颗粒物和水分检测方面,对油液中的气泡检测则相对较少。Li Du 等人基于电感库尔特计数原理,利用单层平面线圈实现了油液中铁颗粒和铜颗粒的区分检测与计数,这是微流体技术在油液检测方面较早的应用,但是该方法只能对铁磁性金属颗粒和非铁磁性金属颗粒进行区分检测,且检测精度有限<sup>[8]</sup>。张洪朋团队设计了一种双线式螺线管型传感器,利用传感器产生的电感和电阻信号,实现了油液中铁颗粒和铜颗粒的区分检测,具有较高的检测精度,但是该方法在制作传感器时比较困难,且无法实现对油液中水和气泡的检测<sup>[9-10]</sup>。Pelin Kubra Isgor 等人利用在微流体芯片上布置涂有纳米级厚度二氧化硅钝化层的共面电极,实现了乙醇中水分含量的检测,但是该方法在加工微流道和电极时需要使用软光刻等技术,使得芯片制作程序繁琐,成本大大提高<sup>[11]</sup>。Xiaoliang Zhu 等人设计了一种集成式润滑油状态检测传感器,通过利用不同的检测回路实现了油液

中金属颗粒和油液黏度的检测,但是该装置包含了多个传感器,制作工艺极为复杂<sup>[12]</sup>。Uwe Iben 等人利用光学检测法,使用高速相机对液压系统节流孔后出现的气泡进行检测,但是该方法无法准确测量出气泡的大小<sup>[13]</sup>。

以上方法只能对油液中的一种或者两种污染物进行检测,无法实现对油液中多种污染物的检测。本文将传统的油液检测方法与微流体技术相结合<sup>[14]</sup>,设计制作了一种电感-电容式微流体芯片,利用一个传感器产生的电感和电容信号,实现了油液中铁磁性金属颗粒、非铁磁性金属颗粒、水和气泡的区分检测。

## 2 检测芯片的设计和制作

### 2.1 检测芯片设计

本文设计的检测芯片如图 1 所示。该芯片主要由玻璃基片、PDMS 基体、检测流道和一对平面线圈组成。为了给芯片制作提供理论支持,对流道位置和两个平面线圈间的距离进行了仿真,并在此基础上研究了平面线圈匝数对信号幅值的影响。

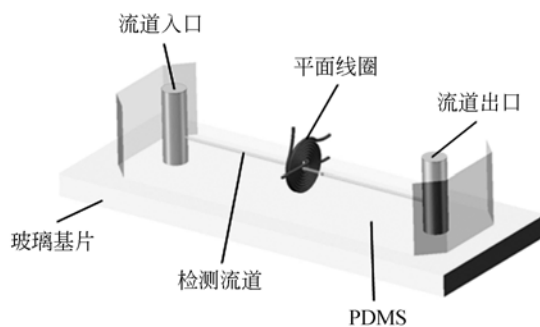


图 1 微流体油液检测芯片结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of microfluidic oil detection chip

#### 2.1.1 检测流道位置仿真

检测流道是芯片的重要组成部分,流道在平面线圈内孔中的位置会对污染物的检测精度和芯

片制作产生影响。运用 COMSOL 软件,以球形铁颗粒和水颗粒为例进行仿真。由于铜颗粒和气泡的仿真结果与铁颗粒和水颗粒的仿真结果趋势相同,这里不再赘述。首先建立模型,平面线圈内孔半径、线径和颗粒半径分别设定为 400,100 和 100  $\mu\text{m}$ ,线圈匝数设定为 20;其次选择物理场,定义各部分的材料并进行网格划分;最后利用求解器求解。在这里设定颗粒中心从线圈内孔  $z = -300 \mu\text{m}$  移动到  $z = 300 \mu\text{m}$ 。铁颗粒的电感幅值  $\Delta L$  和水颗粒的电容幅值  $\Delta C$  与颗粒在线圈内孔中的位置关系仿真结果如图 2 所示。

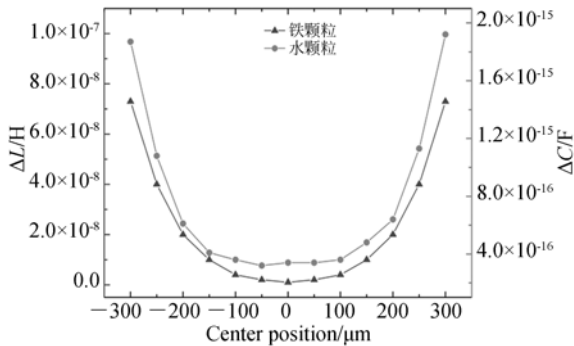


图 2 信号幅值与颗粒中心位置关系曲线

Fig. 2 Relationship between signal amplitudes and particle center position

从图 2 中可以看出,在颗粒从线圈内孔边缘一侧向另一侧移动的过程中,电感和电容信号幅值都是先减小后增大,颗粒在内孔边缘处时信号幅值最大。因此,在芯片制作时应将检测流道布置在线圈内孔边缘处。

### 2.1.2 平面线圈距离仿真

以球形铁颗粒和水颗粒为例进行仿真,平面线圈内孔半径、线径和颗粒半径分别设定为 400,100 和 100  $\mu\text{m}$ ,线圈匝数设定为 20。这里将两个平面线圈间的距离从 10  $\mu\text{m}$  变化到 190  $\mu\text{m}$ ,铁颗粒电感幅值  $\Delta L$  和水颗粒电容信号幅值  $\Delta C$  与线圈距离的关系如图 3 所示。从图中可以看出,随着两线圈间距离的增加,电感幅值  $\Delta L$  和电容幅值  $\Delta C$  都在迅速减小。因此,在芯片制作时应尽可能减小两线圈间的距离。

### 2.1.3 平面线圈匝数对信号幅值影响的仿真

以球形铁颗粒和水颗粒为例进行仿真,将平面线圈内孔半径、线径和颗粒半径分别设定为

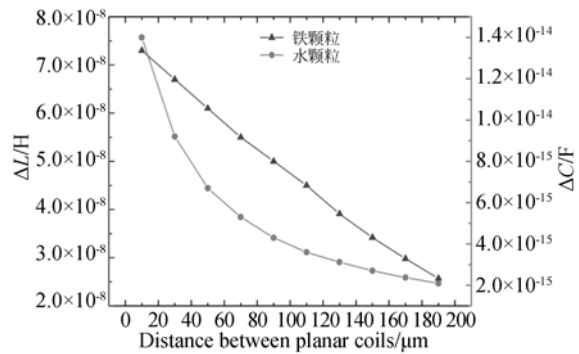


图 3 信号幅值与线圈距离关系曲线

Fig. 3 Relationship between signal amplitudes and planar coil distance

400,100 和 150  $\mu\text{m}$ ,两平面线圈间的距离设定为 10  $\mu\text{m}$ 。铁颗粒电感幅值  $\Delta L$  和水颗粒电容幅值  $\Delta C$  与线圈匝数间关系的仿真结果如图 4 所示。

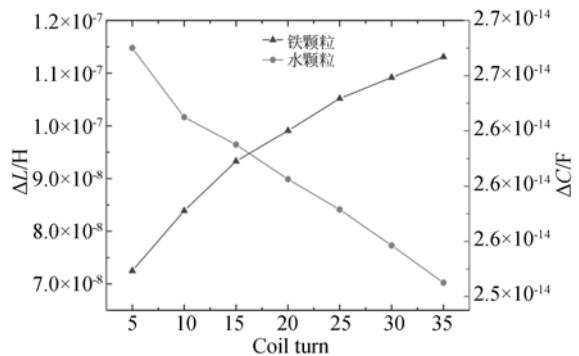


图 4 信号幅值与线圈匝数关系曲线

Fig. 4 Relationship between signal amplitudes and coil turns

从图 4 中可以看出,平面线圈匝数增加时,电感幅值逐渐增大,电容幅值逐渐减小。在实际检测过程中,为了提高检测信噪比,通常需要增大检测信号幅值,降低检测噪声。但是在计算机仿真时,无法对检测噪声进行模拟。因此单从仿真结果来看,在检测噪声不变的情况下,对铁颗粒进行检测时,采用具有较多线圈匝数的芯片能够提高检测电感幅值;对水颗粒进行检测时,采用具有较少线圈匝数的芯片能够提高检测电容幅值,从而提高检测信噪比。

## 2.2 检测芯片制作

检测芯片的制作步骤如下:

(1)将具有黏性的漆包线按照要求装配到绕线机的模具上,设定工作参数并启动绕线机,根据

需要绕制出不同匝数的平面线圈;

(2)取两个匝数相同的平面线圈,在其表面涂抹微量的强力胶,让线圈内孔重合,然后将它们粘合在一起并固定在玻璃基片上;接着将平面线圈的 4 个出线端焊接在玻璃基片上,并用 4 根引线接出;

(3)取一根直径为  $300\ \mu\text{m}$  的金属杆作为流动模具,让金属杆紧贴线圈内孔下缘穿过,并将金属杆的两端固定;

(4)配置 15 g PDMS(聚二甲基硅氧烷),抽气后浇筑在玻璃基片上,并放入恒温箱中加热 1 h 使之固化;

(5)将成型的 PDMS 中的金属杆抽出,形成检测所需的流道,并用打孔器在流道两端打孔。由此便完成了检测芯片的制作。

### 3 检测原理

图 5 是检测区域的局部示意图。从图中可以看到,每个平面线圈都有两个接头,这些接头能够以任意方式与激励源连接。

#### 3.1 电感检测原理

将接头 A、C 与激励源正极相接,接头 B、D

$$K_p = \frac{r^3}{2} \cdot \frac{(-r^2 k^2 + 2\mu_r + 1)\sin(rk) - rk(2\mu_r + 1)\cos(rk)}{(r^2 k^2 + \mu_r - 1)\sin(rk) - rk(\mu_r - 1)\cos(rk)}, \quad (3)$$

其中: $r$ 是球形金属颗粒的半径, $\mu_r$ 是金属颗粒的相对磁导率。

当两个线圈的电感值  $L_1 = L_2 = L$  时,代入式(1)和式(2),得到金属颗粒通过线圈时的等效电感变化量为:

$$\Delta L_{\text{eq}} = \frac{\Delta L + \Delta M}{2} = \frac{\frac{4\pi\mu_0 N^2}{\omega^2 + d^2} \text{Re}(K_p) + \Delta M}{2}. \quad (4)$$

当铁磁性金属颗粒通过线圈内孔时,颗粒磁化产生新的磁场使原有磁场被加强,这样线圈的磁通量增加,从而使线圈的等效电感值增大,产生正向的电感脉冲信号。当非铁磁性金属颗粒通过线圈内孔时,颗粒的涡流效应会削弱原有磁场,使线圈的磁通量降低,等效电感值减小,从而产生负向的电感脉冲信号。通过对脉冲信号方向的判断,可以实现对铁磁性金属颗粒和非铁磁性金属

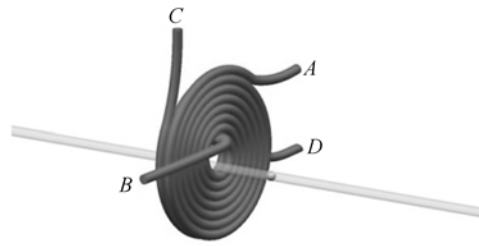


图 5 检测区域局部示意图

Fig. 5 Local diagram of detection area

与激励源负极相接,便形成了电感检测模式,此时两平面线圈以并联方式连接,线圈中通有同向的交流电,因此两线圈中产生了方向相同的磁场。在考虑到互感  $M$  时,两线圈间的等效电感可以表示为:

$$L_{\text{eq}} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}. \quad (1)$$

根据之前的研究结论,当金属颗粒通过单层线圈时引起的线圈等效电感变化量可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$\Delta L = \frac{4\pi\mu_0 N^2}{\omega^2 + d^2} \text{Re}(K_p), \quad (2)$$

其中: $\mu_0$ 是真空中的磁导率, $N$ 是线圈匝数, $\omega$ 是线圈漆包线直径, $d$ 为线圈内孔直径, $K_p$ 是金属颗粒的磁化因子。由式(2)得出:

颗粒的区分检测。

#### 3.2 电容检测原理

将接头 A、B 与激励源正极相接,接头 C、D 与激励源负极相接,便形成了电容检测模式,这时由于线圈外层绝缘漆的存在,两个通电线圈相当于电容器的两个极板。在考虑到边缘效应的情况下,线圈内孔边缘处也存在电荷,但此时的电荷分布是不均匀的,也就是说电荷密度不是一个常数。此外,两个平面线圈等效成的平板电容器并不是理想的平行板电容器,这就使得该模型中电容地计算变得十分复杂。目前,对此类电容地计算得到的都是一般的经验公式。对于一对圆环形平面组成的平行盘式电容器,Hitoshi Nishiyama 等人利用边界元素法,将圆盘分成  $m$  个同心圆环,通过计算得到了一个经验公式<sup>[16]</sup>:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\pi \epsilon t}{m^2} \sum_{i=1}^m [(2i-1)t + 2mR]q_i, \quad (5)$$

其中:  $\epsilon$  为被测物质的介电常数,  $U$  为电容器加载的电压,  $R$  为圆环内孔半径,  $t$  为圆环直径,  $q$  为电荷密度。

由式(5)可知,等效电容值不仅与线圈的几何参数有关,还取决于通过测量区域物质的介电常数  $\epsilon$ 。引入复介电常数<sup>[17-18]</sup>:

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

其中:  $\epsilon$  是介电常数,  $j^2 = -1$ ,  $\sigma$  是介质的电导率,  $\omega$  是外部激励源的角频率。

根据麦克斯韦方程组,检测区域内液压油和颗粒混合物的复介电常数为:

$$\tilde{\epsilon}_{\text{mix}} = \tilde{\epsilon}_o \frac{1 + 2\Phi \tilde{f}_{\text{CM}}}{1 - \Phi \tilde{f}_{\text{CM}}}, \quad (7)$$

其中:  $\Phi$  是体积分数,为颗粒体积  $V_p$  与检测区域体积  $V_d$  之比,  $r$  是颗粒半径:

$$\Phi = \frac{V_p}{V_d} = \frac{4\pi r^3}{3V_d}. \quad (8)$$

$\tilde{f}_{\text{CM}}$  是克劳修斯-莫索提因子,由式(9)给出:

$$\tilde{f}_{\text{CM}} = \frac{\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_o}{\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_o}. \quad (9)$$

其中:  $\tilde{\epsilon}_o$  和  $\tilde{\epsilon}_p$  分别是液压油和颗粒的复介电常数。

将式(8)和式(9)代入式(7),得到混合物的复介电常数:

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

由式(10)可知,当水颗粒通过线圈内孔时,由于水的介电常数(约为 80)大于液压油的介电常数(约为 2.6),输出的电容值增大,从而产生正向的脉冲信号。当气泡通过线圈内孔时,由于空气的介电常数(约为 1)小于液压油的介电常数(约为 2.6),输出的电容值减小,从而产生负向的脉冲信号。通过对脉冲信号方向的判断,可以实现水和空气的区分检测。

## 4 检测系统的搭建

本文采用如图 6 所示的检测系统进行实验<sup>[19]</sup>。该系统由动力单元、传感单元、数据采集

与显示单元和观察单元四部分组成。微量注射泵(HARVARD70-2212)是该系统的动力单元,它能够驱动油样以一定的速度通过检测流道。传感单元为本文制作的微流体检测芯片,两个平面线圈构成了检测区域。数据采集与显示单元由阻抗分析仪(Agilent E4980A)和计算机两部分组成,阻抗分析仪可以为线圈加载特定电压和频率的交流信号,同时又能够对电感和电容值进行实时测量;计算机上的 Labview 软件可以将采集到的信号保存并显示出来。显微镜(Nikon A2100)是实验的观察单元,可以对芯片的检测区域进行实时观察,从而确保实验的准确性。

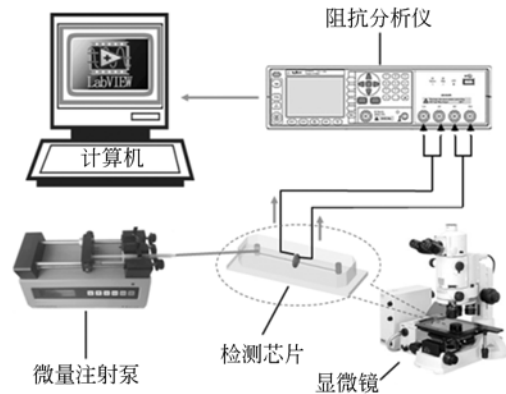


图 6 微流体油液检测系统示意图

Fig. 6 Schematic of microfluidic oil detection system

## 5 线圈匝数对检测信号影响的实验研究

线圈匝数是检测芯片的一个重要参数,通过实验研究可以确定匝数对检测信号的具体影响。按照 2.2 中的步骤,制作匝数为 20, 30, 40, 50, 60, 线圈内孔直径为 0.9 mm、线径为 0.07 mm、流道直径为 0.3 mm 的检测芯片。

### 5.1 线圈匝数对铁颗粒检测信号的影响

将粒径大小为 90~100  $\mu\text{m}$  的铁颗粒加入装有一定量液压油(长城 L-HM 46)的密封管中,并用振荡器(IKA S25)使之混合均匀。连接好检测系统,使线圈连接方式为电感检测模式,将阻抗分析仪的激励频率和激励电压分别设定为 2 MHz、2 V。抽取密封管中的油液加入芯片中,设定微量注射泵的流量为 50  $\mu\text{L}/\text{min}$  进行实验。为了

保证实验的准确性,进行多次实验并求出其中 10 个电感幅值  $\Delta L$  的平均值。图 7 是线圈匝数分别为 20 和 60 时铁颗粒的检测信号图。图 8 是铁颗粒检测电感幅值和信噪比与线圈匝数的关系曲线。

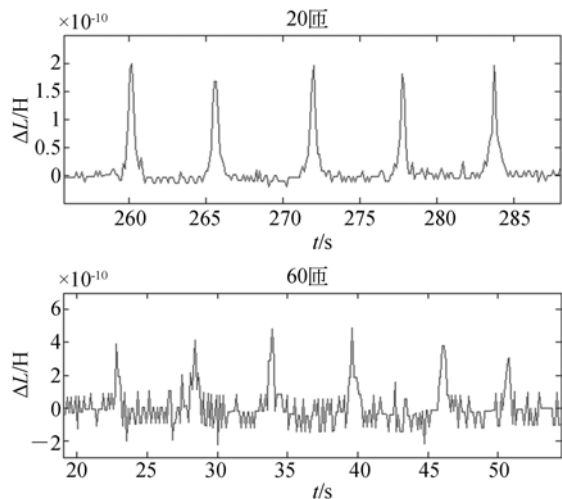


图 7 不同线圈匝数时铁颗粒的检测信号

Fig. 7 Iron particle detection signal with different coil turns

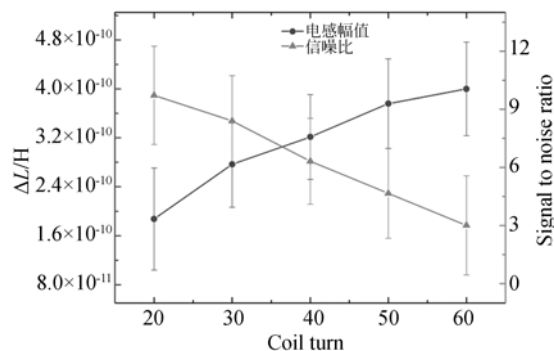


图 8 铁颗粒检测信号与线圈匝数的关系曲线

Fig. 8 Relationship between iron particle detection signal and coil turns

从图 8 中可以看出,随着线圈匝数的增加,铁颗粒检测电感幅值向坐标轴正方向逐步增大,但增长率逐渐变缓。这是由于线圈匝数增加时,外侧线圈的等效半径增大,对铁颗粒的磁化作用逐渐减小,从而导致电感幅值增量逐渐变小。此外,随着线圈匝数的增加,检测噪声迅速增大,线圈匝数为 20 匝时的检测信号信噪比约是 60 匝时的 3.23 倍。

### 5.2 线圈匝数对铜颗粒检测信号的影响

本次实验使用的铜颗粒粒径大小为 170~

180  $\mu\text{m}$ ,激励频率和激励电压分别设定为 2 MHz 和 2 V。进行多次实验并求出其中 10 个电感幅值  $\Delta L$  的平均值。图 9 是线圈匝数分别为 20 和 60 时铜颗粒的检测信号图。图 10 是铜颗粒检测电感幅值和信噪比与线圈匝数的关系曲线。

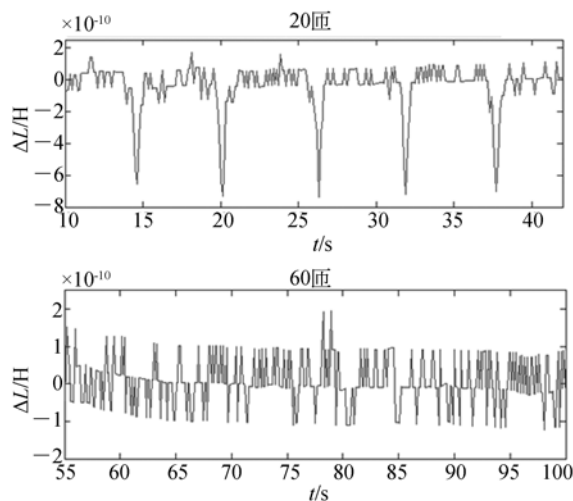


图 9 不同线圈匝数时铜颗粒的检测信号

Fig. 9 Copper particle detection signal with different coil turns

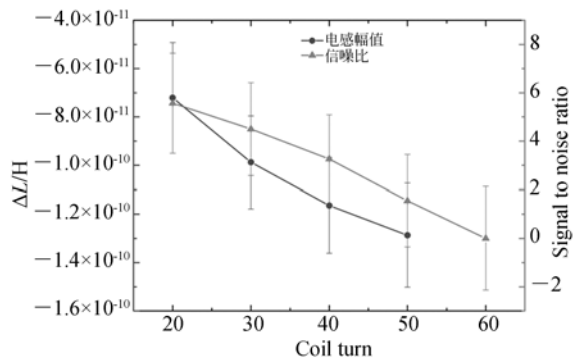


图 10 铜颗粒检测信号与线圈匝数的关系曲线

Fig. 10 Relationship between copper particle detection signal and coil turns

从图 10 中可以看出,随着线圈匝数的增加,铜颗粒检测电感幅值向坐标轴负方向逐步增大,但增长速率逐渐变缓。检测噪声也随着线圈匝数的增加而明显增大。在线圈匝数为 60 时,本底噪声值大于电感幅值,已经无法观察到信号,检测信号的信噪比是 0;而在匝数为 20 时,检测信号的信噪比是 5.57。

### 5.3 线圈匝数对水颗粒检测信号的影响

首先在容量为 1 mL 的密封管中加入 990  $\mu\text{L}$

液压油和 10  $\mu\text{L}$  的蒸馏水, 将其在振动器上振动 1 min 后放入超声波振荡器 (DSA200-SK) 中再振荡 3 min 便可产生粒径为 200~220  $\mu\text{m}$  的水颗粒; 其次将线圈连接方式变为电容检测模式, 将阻抗分析仪的激励频率和激励电压分别设定为 0.5 MHz 和 2 V。最后抽取密封管中的油液加入芯片中, 设定微量注射泵的流量为 50  $\mu\text{L}/\text{min}$  进行实验。为了保证实验的准确性, 进行多次实验并求出其中 10 个电容幅值  $\Delta C$  的平均值。图 11 是线圈匝数分别为 20 和 60 时的水颗粒检测信号。图 12 是水颗粒检测电容幅值和信噪比与线圈匝数的关系曲线。

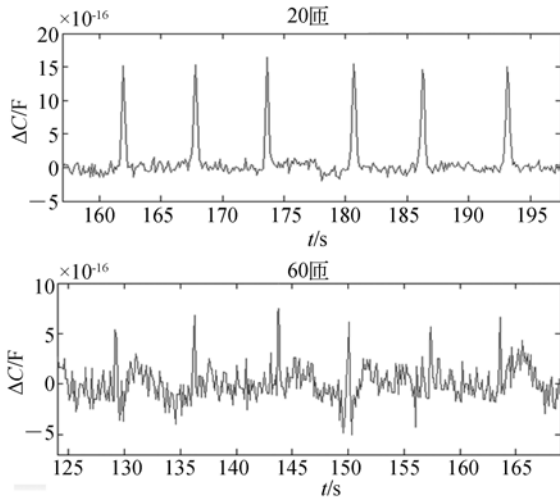


图 11 不同线圈匝数时水颗粒检测信号

Fig. 11 Water droplet detection signal with different coil turns

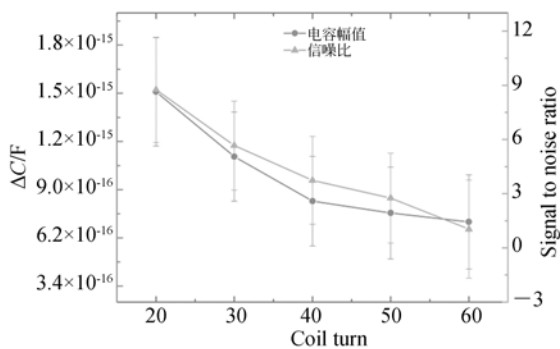


图 12 水颗粒检测信号与线圈匝数的关系曲线

Fig. 12 Relationship between water droplet detection signal and coil turns

从图中可以看出, 在激励电压不变的情况下, 线圈匝数增加导致线圈内孔处的分布电荷逐渐减

少, 从而使检测到的电容幅值逐渐降低。由于水的介电常数大于液压油的介电常数, 检测信号脉冲向上。但是线圈匝数增多时检测噪声明显增大, 线圈匝数为 20 时检测信号的信噪比约是 60 时的 8.41 倍。

#### 5.4 线圈匝数对气泡检测信号的影响

在容量为 1 mL 的密封管中加入 990  $\mu\text{L}$  液压油, 这时管内含有 10  $\mu\text{m}$  空气, 将密封管在振动器上振动 1 min 后放入超声波振荡器中震荡 2 min 便可产生粒径大小为 240~260  $\mu\text{m}$  的气泡; 按照 5.3 中所述的方式进行实验。图 13 是线圈匝数分别为 20 和 60 时的气泡检测信号图。图 14 是气泡检测电容幅值和信噪比与线圈匝数的关系曲线。

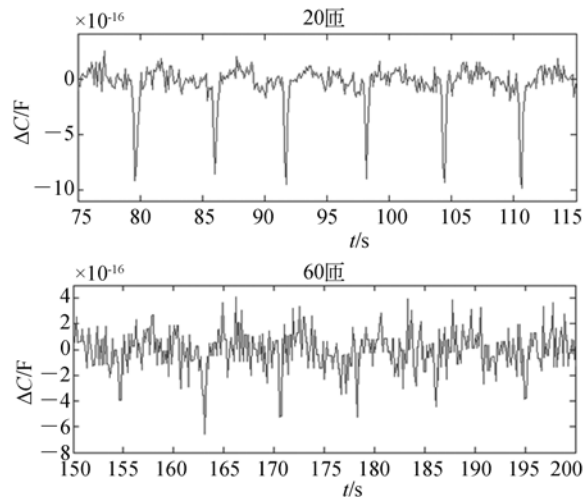


图 13 不同线圈匝数时气泡检测信号

Fig. 13 Air bubble detection signal with different coil turns

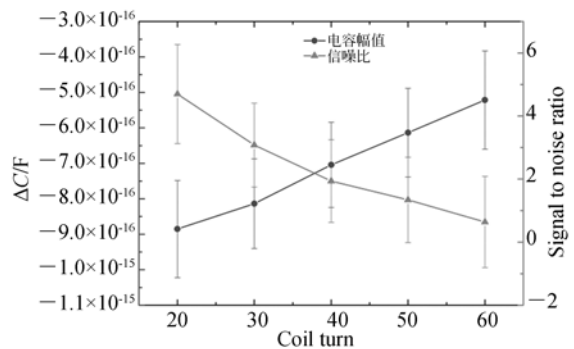


图 14 气泡检测信号与线圈匝数的关系曲线

Fig. 14 Relationship between air bubble detection signal and coil turns

线圈匝数增加时,气泡检测电容幅值逐渐降低。由于空气的介电常数小于液压油的介电常数,检测信号脉冲向下。检测噪声同样随着线圈匝数的增加而增大,线圈匝数为 20 时的检测信号信噪比约是 60 时的 7.34 倍。

在电容检测模式时,为了排除液压油中的铁颗粒和铜颗粒对水和气泡的检测效果产生影响,进行一组验证实验。将粒径为 200~220  $\mu\text{m}$  的铁颗粒和铜颗粒加入装有一定量液压油的密封管中,在振动器上充分震荡使之混合均匀。将阻抗分析仪的激励频率和激励电压分别设定为 0.5 MHz 和 2 V,设定微量注射泵的流量为 50  $\mu\text{L}/\text{min}$ ,使用线圈匝数为 20 的芯片进行实验。图 15 是在电容检测模式下铁颗粒和铜颗粒的检测信号。

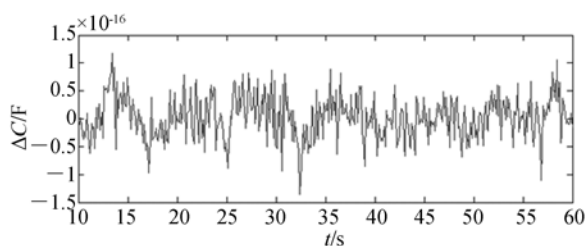


图 15 电容检测模式下铁颗粒和铜颗粒的检测信号

Fig. 15 Iron and copper particle detection signal in capacitance mode

从图中可以看出,在电容检测模式下,铁颗粒和铜颗粒通过线圈时几乎检测不到有效的电容信号。由此可知,铁颗粒和铜颗粒的存在不会对水和气泡的检测产生影响。

## 6 结 论

本文利用 COMSOL 软件对芯片流道位置和

线圈间距进行了仿真计算,根据仿真结果设计制作了一种电感-电容式微流体芯片,并在该芯片上进行了线圈匝数对检测信号影响的实验研究。仿真结果表明:检测流道位于线圈内孔边缘处时的电感和电容信号幅值最大;两平面线圈间的距离越小,电感和电容信号幅值越大;平面线圈匝数增加时,电感信号幅值逐渐增大,电容信号幅值逐渐减小。实验结果表明:铁颗粒和铜颗粒的电感信号幅值随匝数的增加而增大,水和气泡的电容信号幅值随匝数的增加而减小。电感和电容检测信号的信噪比都是随着线圈匝数的增加而明显降低。采用线圈匝数为 20 时,铁颗粒、水和气泡的检测信号信噪比约为 60 时的 3.23, 8.41 和 7.34 倍,铜颗粒在 60 匝时的检测信号信噪比为 0。

从线圈匝数对电感和电容幅值影响的仿真结果来看,增大线圈匝数能够提高检测电感幅值,减少线圈匝数能够提高检测电容幅值,在检测噪声不变的情况下,可以提高检测信噪比。但是由于仿真过程无法对检测噪声值进行模拟,而在实际实验中,检测噪声随着芯片线圈匝数的增加而迅速增大,电感和电容检测信噪比都迅速降低。因此在实验中,应尽量减少检测芯片的线圈匝数,这样可以有效地提高检测信噪比。由于在平面线圈绕制过程中,受到模具精度的限制,目前所能绕制的平面线圈的最小匝数为 20。从实验结果来看,由 20 匝平面线圈制作的检测芯片在两种检测模式下的检测信噪比都是最大的。

本文设计的电感-电容式微流体芯片利用两个平面线圈构成的一个传感器,实现了液压油中铁磁性金属颗粒、非铁磁性金属颗粒、水和气泡的区分检测。该检测芯片为便携式油液检测设备的开发提供了技术支持,同时也为液压系统的故障诊断与预测提供了一种新思路。

## 参考文献:

- [1] 蔡祖光. 液压油的性能,作用,污染与防护[J]. 液压与气动,1997(2):15-18.  
CAI Z G. Performance, function, pollution and protection of hydraulic oil [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*,1997(2):15-18. (in Chinese)
- [2] ZENG L, ZHANG H P, LIU E C, et al.. Research on rapid detection and accounting of small

particles in marine hydraulic oil [C]. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, 2015, 645: 687-692.

- [3] 笪靖. 浅谈船舶液压系统的油液监测分析[J]. 交通节能与环保,2016(2):46-48,96.  
DA J. Oil monitoring analysis in ship hydraulic system [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation*, 2016(2): 46-48, 96. (in Chinese)

- [4] 孙成杰,丁冬梅,陆沁莹,等. 油液污染度分析在油液监测技术中的应用[J]. 润滑油,2017(1):36-38.  
SUN CH J, DING D M, LU Q Y, *et al.*. Application of oil contamination analysis in oil monitoring techniques [J]. *Lubricating Oil*, 2017(1):36-38. (in Chinese)
- [5] 董志磊,潘燕,王月行,等. 液压油污染度和水分含量在线检测研究[J]. 润滑与密封,2015,40(7):129-132.  
DONG ZH L, PAN Y, WANG Y X, *et al.*. Study on continuous measurements of contaminant level and water content in hydraulic oil[J]. *Lubrication Engineering*, 2015,40(7):129-132. (in Chinese)
- [6] 许毅. 液压系统气泡的危害与防治浅析[J]. 液压与气动,2008(3):71-73.  
XU Y. Superficially analyzing harm and prevention of hydraulic system's air-bubble[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2008(3):71-73. (in Chinese)
- [7] 王革,刘东风,石新发. 船舶液压油监测技术研究现状[J]. 润滑油,2013(4):38-41.  
WANG G, LIU D, SH X F. Research status of marine hydraulic oil monitoring technology[J]. *Lubricating Oil*, 2013(4):38-41. (in Chinese)
- [8] DU L, ZHE J, CARLETTA J, *et al.*. Real-time monitoring of wear debris in lubrication oil using a microfluidic inductive coulter counting device[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 9(6):1241-1245.
- [9] 刘思辰,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(2):102-106,116.  
LIU E CH, ZHANG H P, ZHANG X R, *et al.*. Dual-coil solenoid sensor design and its experimental study for wear particles detection[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2016(2):102-106, 116. (in Chinese)
- [10] 王强. 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(10z):342-347.  
WANG Q. Resistance detection method for microfluidic oil detection chip[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(10z):342-347.
- [11] ISGOR P K, MARCALI M, KESER M, *et al.*. Microfluidic droplet content detection using integrated capacitive sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 210: 669-675.
- [12] Xiaoliang Z, DU L, ZHE J. An integrated lubricant oil conditioning sensor using signal multiplexing[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(1): 1-1.
- [13] IBEN U, WOLF F, FREUDIGMANN H A, *et al.*. Optical measurements of gas bubbles in oil behind a cavitating micro-orifice flow[J]. *Experiments in Fluids*, 2015, 56(6): 114.
- [14] ZHANG H, CHON C H, PAN X, *et al.*. Methods for counting particles in microfluidic applications[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 7(6): 739.
- [15] 张兴明. 时谐磁场金属颗粒磁化特性及微流体油液检测机理研究[D]. 大连:大连海事大学,2014.  
ZHANG X M. *Study on Metal Particle Magnetization in Harmonic Field and Mechanism of Microfluidic Oil Detection*[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. (in Chinese)
- [16] NISHIYAMA H, NAKAMURA M. Capacitance of disk capacitors[J]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1993, 16(3): 360-366.
- [17] MORGAN H, SUN T, HOLMES D, *et al.*. Single cell dielectric spectroscopy [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(1): 61.
- [18] SUN T, MORGAN H. Single-cell microfluidic impedance cytometry: a review [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 8(4): 423-444.
- [19] 刘思辰. 高精度液压油微小颗粒检测系统[J]. 光学精密工程,2015,23(10z):396-402.  
LIU E CH. Detection system of small particles in hydraulic oil[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(10z):396-402. (in Chinese)

#### 作者简介:



张洪朋(1978—),男,辽宁铁岭人,教授,博士生导师,2000年、2005年于大连海事大学分别获得学士、博士学位(硕博连读),主要从事轮机工程、机电一体化、微流体芯片技术等研究。E-mail: Zhppeter@163.com



滕怀波(1989—),男,安徽淮南人,硕士研究生,2012年于重庆交通大学获得学士学位,主要从事微流控芯片技术、机电一体化等技术的研究。E-mail: 1021759049@qq.com