

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905084

# 双螺线管套管结构的液压油金属颗粒检测传感器\*

马来好,张洪朋,乔卫亮,徐志伟,陈海泉  
(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

**摘要:**提出一种双螺线管套管结构的液压油金属颗粒检测传感器。理论分析表明,套管结构传感器能够耦合外部螺线管线圈磁场强度和利用双螺线管线圈之间的互感,有效增加金属颗粒通过检测区域的电感变化量。选择电感变化量、平均噪声、信噪比作为传感器检测效果评价指标,对比实验的统计结果表明,检测相同粒径的金属颗粒,套管结构传感器不但未增加检测噪声,而且在电感变化量、信噪比方面都要优于单管结构传感器,随着铁颗粒粒径的增加,其检测效果的优越性越明显。检测直径为110~120  $\mu\text{m}$  铁颗粒和铜颗粒时,电感变化量分别提升2.4和1.7倍,其检测信噪比均提升1.8倍。颗粒检测下限实验表明,套管结构传感器能够检测直径大于30  $\mu\text{m}$  的铁颗粒和直径大于90  $\mu\text{m}$  的铜颗粒。研究对提高螺线管型电感检测传感器的检测灵敏度具有参考价值。

**关键词:**螺线管;微流控;传感器;金属颗粒

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

## Hydraulic oil metal particles detecting sensor of dual-solenoid coil with casing structure

Ma Laihao, Zhang Hongpeng, Qiao Weiliang, Xu Zhiwei, Chen Haiquan  
(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** A hydraulic oil metal particle detection sensor based on the dual-solenoid coil with casing structure is proposed. Theoretical analysis shows that the casing structure sensor can couple the magnetic field intensity of external solenoid coil and utilize the mutual inductance between double solenoid coils. In this way, the inductance variation of metal particles through the detection area is increased effectively. Inductance variation, average noise, and signal-to-noise ratio are selected as metrics for measuring the detection sensitivity. Comparative experiments show that the casing structure sensor not only does not increase detection noise, but also is superior to single solenoid structure sensor in terms of inductance variation and signal-to-noise ratio for the detection of same metal particles. With the increase of iron particle size, the superiority of detection ability is more obvious. When it detects iron particles and copper particles ranging from 110 to 120  $\mu\text{m}$ , the inductance variation increases by 2.4 times and 1.7 times respectively. Compared with those of single solenoid structure sensor, the signal-to-noise ratio increases by 1.8 times. The lower limit of particle detection experiments show that the casing structure sensor can detect iron particles with diameter larger than 30  $\mu\text{m}$  and copper particles with diameter larger than 90  $\mu\text{m}$ . The research has reference significance for improving the detection sensitivity of solenoid inductance sensor.

**Keywords:** solenoid; microfluidics; sensors; metal particles

## 0 引言

液压油金属颗粒富含液压元件磨损及系统运行状态的重要信息,对其进行在线检测是实现液压系统健康状

态检测以及故障诊断的重要基础<sup>[1-4]</sup>。目前,用于油液检测的传感器主要包括光学式、声波式、电容式以及电感式等<sup>[5-8]</sup>。其中,光学式传感器受油液颜色及渗透性等影响很难区分检测金属颗粒;声波式传感器容易受到机械设备振动的影响,检测精度较低<sup>[9]</sup>;电容检测利用介电常数

收稿日期:2019-05-01 Received Date:2019-05-01

\* 基金项目: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(3132017013)资助

的不同可以区分检测油液水滴和汽包,但很难区分检测金属颗粒<sup>[10]</sup>;电感式传感器根据颗粒通过线圈时的磁场变化,能够区分油液中的铁磁性金属颗粒和非铁磁性金属颗粒,并具有较高的线性度<sup>[11-15]</sup>。Flanagan等<sup>[16]</sup>较早地开展基于电感线圈的油液颗粒检测,成功检测到100 μm铁颗粒和200 μm铜颗粒。严宏志等<sup>[17]</sup>设计了一种三螺线管形式的金属颗粒检测传感器,能够实现粒径125 μm以上大颗粒的检测。范洪波等<sup>[18]</sup>在对线圈磁场中铁磁性金属颗粒以及非磁性金属颗粒的磁场特性分析基础上,设计了一款双线圈结构的金属颗粒检测传感器,能够实现100 μm以上的铁颗粒和500 μm以上的铜颗粒。受制于油液流道尺寸和线圈磁场强度的限制,上述传感器检测精度以及灵敏度较低。随着微流体技术的快速发展,基于微流体和微线圈的应用有效提高了油液金属颗粒的在线检测灵敏度。Du等在电感线圈的基础上并联电容,利用LC谐振方式实现32 μm铁颗粒和75 μm铜颗粒的在线区分检测<sup>[19-21]</sup>。Zhu等<sup>[22]</sup>采用电感线圈内嵌一对铁氧体的结构形式,实现了11 μm铁磁性金属颗粒的检测<sup>[23]</sup>。上述研究需要借助外部电路或铁磁性材料,来提高电感线圈的金属颗粒检测灵敏度。本文基于电感检测原理,采用微流控技术设计了系列微平面线圈和微螺线管线圈检测传感器,并提出了双线式螺线管型传感器,在不借助外力下实现金属颗粒检测灵敏度的大幅提升,但制作工艺较为复杂<sup>[23]</sup>。本团队在前期研究基础上,提出双螺线管套管结构的电感检测传感器,制作工艺简单,利用外部螺线管,有效增强内部螺线管检测区域的磁感应强度,提高对油液金属颗粒的检测灵敏度。

## 1 传感器设计与检测原理

### 1.1 传感器设计

双螺线管套管结构传感器设计如图1所示,主要由1个微流道和位于微流道外部的检测单元组成。其中,检测单元由2个相同匝数的同轴螺线管线圈构成,2个螺线管线圈径向贴紧,形成套管结构。2个螺线管线圈顺接串联,能够充分将外部螺线管线圈产生磁场充分聚焦于内部螺线管线圈的检测区域,提高内部螺线管线圈检测区域的磁感应强度。当金属颗粒经过检测区域时,由于交变磁场的磁化以及颗粒内部产生电涡流效应的共同作用,改变颗粒外部磁场的变化,进而影响螺线管线圈电感的变化。

### 1.2 双螺线管套管结构电感检测原理

假设内、外部螺线管线圈的半径分别为 $r_1$ 、 $r_2$ ,线圈轴向长度为 $l$ ,匝数为 $n$ 。取螺线管轴线中点为坐标原点 $o$ ,建立如图2所示的二维坐标系。

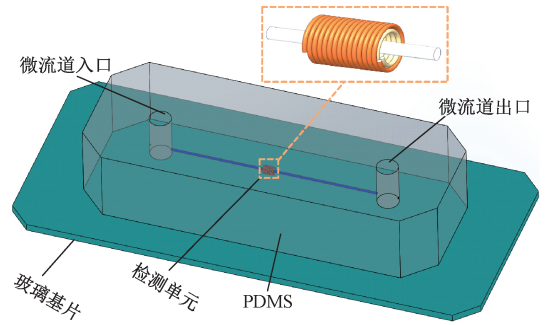


图1 传感器设计

Fig.1 Diagram of sensor design

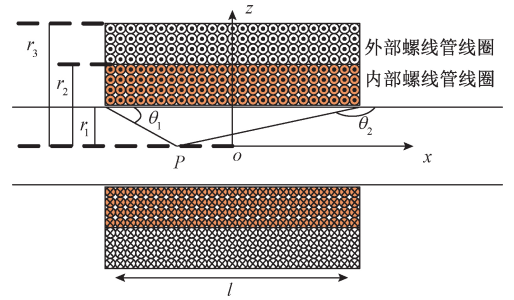


图2 二维坐标系

Fig.2 Two-dimensional coordinate system

对于单层螺线管线圈,根据毕奥-萨伐尔定律可得其中心轴线上的任意 $P$ 点的磁场磁感应强度<sup>[24]</sup>:

$$B = \frac{\mu_0}{2} n I (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (1)$$

式中: $\mu_0$ 为真空磁导率; $I$ 为线圈电流; $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 分别为 $P$ 点与单层螺线管线圈两端的夹角。其中,

$$\cos\theta_1 = \frac{x + \frac{l}{2}}{\sqrt{r_i^2 + \left(x + \frac{l}{2}\right)^2}}, \cos\theta_2 = \frac{x - \frac{l}{2}}{\sqrt{r_i^2 + \left(x - \frac{l}{2}\right)^2}}.$$

对于内部线圈,由于是多层螺线管线圈,其轴向磁场强度可视为单层螺线管线圈在轴线的磁场强度的叠加。内部螺线管线圈厚度 $r_2 - r_1$ ,假设单位厚度上的螺线管线圈层数为 $a$ ,对式(1)沿线圈厚度进行积分,可得考虑厚度的内部螺线管线圈的磁感应强度为:

$$B_1 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_0}{2} n I (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) dr \quad (2)$$

整理得到:

$$B_1 = \frac{\mu_0 a n I}{2} \left(x + \frac{l}{2}\right) \left[ \ln \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(x + \frac{l}{2}\right)^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(x + \frac{l}{2}\right)^2}} - \right.$$

$$\left(x - \frac{l}{2}\right) \ln \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(x - \frac{l}{2}\right)^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(x - \frac{l}{2}\right)^2}} \quad (3)$$

针对式(3),取 $x=0$ ,得到内部螺线管线圈轴线中心处的磁感应强度为:

$$B_1 = \frac{\mu_0 anI}{2} \ln \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} \quad (4)$$

结合线圈电感定义,可得内部螺线管线圈的空心电感:

$$L_1 = \frac{n\Phi_1}{I} = \frac{\mu_0 an^2 \pi r_1^2}{2} \ln \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} \quad (5)$$

同理,可以得到外部螺线管线圈轴线中心处的磁感应强度以及空心电感:

$$B_2 = \frac{\mu_0 anI}{2} \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{r_3 + \sqrt{r_3^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 an^2 \pi r_2^2}{2} \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{r_3 + \sqrt{r_3^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} \quad (7)$$

当金属磨粒进入检测区域时,会对螺线管内部磁场产生影响,可认为被其覆盖的那部分线圈局部电感发生变化<sup>[25]</sup>。假设金属颗粒为半径 $r_c$ 的规则球体进入检测区域,则对于内部螺线管,其电感变化量为:

$$\Delta L_1 = \frac{(\mu_r - 1)\mu_0 an_c^2 \pi r_c^2}{2} \ln \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l_c}{2}\right)^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l_c}{2}\right)^2}} \quad (8)$$

式中: $l_c$ 为金属颗粒在螺线管线圈轴向上的长度,由于金属颗粒为球体, $l_c = 2r_c$ ;  $\mu_r$ 为其相对磁导率; $n_c$ 为金属颗粒覆盖的线圈匝数; $n_c = \frac{n}{l} l_c$ 。因此可以得到:

$$\Delta L_1 = \frac{2(\mu_r - 1)\mu_0 an^2 \pi r_c^2}{l^2} \ln \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + r_c^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + r_c^2}} \quad (9)$$

同理,可以得到外部螺线管线圈的电感变化量为:

$$\Delta L_2 = \frac{2(\mu_r - 1)\mu_0 an^2 \pi r_c^2}{l^2} \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + r_c^2}}{r_3 + \sqrt{r_3^2 + r_c^2}} \quad (10)$$

对于螺线管线圈顺接串联,根据基尔霍夫定律可以得到其等效电感为:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M \quad (11)$$

进而得到金属颗粒经过套管结构线圈时的等效电感变化量:

$$\Delta L_{eq} = \frac{2(\mu_r - 1)\mu_0 an^2 \pi r_c^2}{l^2} \left[ \ln \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + r_c^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + r_c^2}} + \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + r_c^2}}{r_3 + \sqrt{r_3^2 + r_c^2}} \right] + 2\Delta M \quad (12)$$

式中: $M$ 为2螺线管线圈之间的互感系数,主要由螺线管线圈结构、材料以及颗粒的相对磁导率所决定。当铁磁性颗粒经过套管结构线圈时,由于其相对磁导率远大于1,线圈等效电感增加,而当非铁磁性颗粒经过套管结构线圈时,颗粒内部产生的涡流占据主导作用,会降低线圈磁感应强度,使线圈等效电感降低。与式(9)、(10)相比,可以发现金属颗粒经过套管结构线圈时,由于增加了外部螺线管线圈的磁感应强度和二者的互感,因此,电感变化量相比单螺线管结构能够得到大幅提高。

## 2 传感器制作与检测系统搭建

### 2.1 传感器制作

根据本文浇筑法检测传感器制作程序,传感器制作包括线圈绕制和微流道制作<sup>[26-28]</sup>。首先采用绕线机(实力,SRDZ23-1B)将线径90  $\mu\text{m}$ 的漆包线(铜线芯直径为70  $\mu\text{m}$ ,线芯表面绝缘漆厚度为10  $\mu\text{m}$ ,绕制成2个相同(匝数为150,内半径为350  $\mu\text{m}$ ,外半径为650  $\mu\text{m}$ )的螺线管线圈以及1个匝数为150匝、内半径为670  $\mu\text{m}$ 的螺线管线圈。将内半径为350  $\mu\text{m}$ 的螺线管线圈和内半径为670  $\mu\text{m}$ 的螺线管线圈进行套接,然后用直径500  $\mu\text{m}$ 的铜棒直接穿过套管结构的内部螺线管线圈。接着将配好的PDMS胶(聚二甲基硅氧烷,胶体与固化剂配置比例1:10)进行抽真空,浇筑在微流道模具,并将其放入80  $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中烘烤1 h进行固化,固化后将铜棒从PDMS胶中抽出形成微流道,至此完成双螺线管套管结构传感器的制作。为更好地研判套管结构传感器的金属颗粒检测性能,将套管结构和单管结构制作在一个微流控检测传感器中,以便进行对比分析。

### 2.2 检测系统搭建

搭建油液检测系统,如图3所示。包括所制作的检测传感器、Lab-view数据采集单元、阻抗分析仪(Key sight E4 980 A)、显微镜(Nikon AZ100)以及微量注射泵(Harvard apparatus B-85259)。其中,阻抗分析仪能够实时记录检测传感器线圈的等效电感,同时,利用显微镜可

以辅助判断信号波动是否由颗粒引起,如图 4 所示为显微镜观测颗粒通过线圈情况。

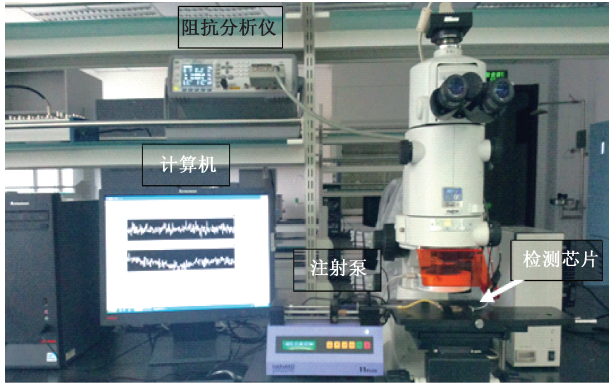


图 3 微流体油液检测系统

Fig.3 Microfluidic fluid detection system

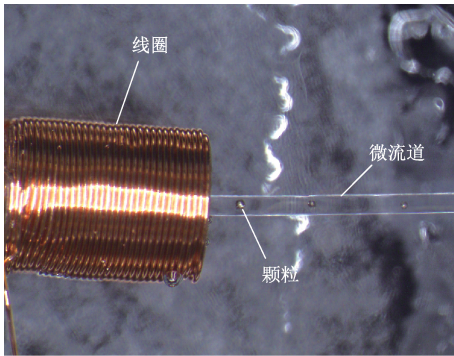


图 4 显微镜观测结果

Fig.4 Results of microscopic observation

### 3 实验分析

为评价套管结构线圈对液压油金属颗粒的检测效果,分别选择铁颗粒和铜颗粒作为代表颗粒进行实验,并选择电感变化量、平均噪声以及信噪比作为检测效果的评价指标。首先进行套管结构线圈与单管结构线圈的检测对比实验,然后进行套管结构线圈的检测下限实验。

#### 3.1 对比检测实验

实验之前,制备含有不同大小铁颗粒、铜颗粒的液压油样品。首先使用不同目数的筛子筛取 50~60 μm 的铁颗粒、70~80 μm 的铁颗粒、90~100 μm 的铁颗粒以及 110~120 μm 的铁颗粒,用电子天平分别量取 3 mg 上述颗粒,同时分别与 100 mL 液压油(长城 L-HM 46)进行混合,通过振荡器(IKA S25)振荡均匀,分别取含有上述颗粒的 1 mL 混合油液备用。同理制备分别含有 110~120 μm 颗粒、130~140 μm 铜颗粒、150~160 μm 铜颗粒以及 170~180 μm 铜颗粒的混合油液,根据上述实验采

用的配置油样方法,样品油样的颗粒浓度为 0.03 mg/mL。由于电感检测为颗粒计数法,需要保证颗粒逐个依次通过线圈,因此对于实际油品可进行倍率稀释,采用注射泵控制颗粒依次通过线圈进行颗粒计数,然后将检测得到稀释后的油液颗粒数折算为实际油品的颗粒浓度,实际油液的污染等级可根据美国宇航标准 NAS1638 和液压油清洁度标准 ISO4406 进行确定<sup>[29]</sup>。颗粒的逐个通过已尽量避免颗粒叠加的情形,对于颗粒叠加在一起的情形,被认为是一个大颗粒。由于流道直径一定,通过显微镜测量流道直径和颗粒直径进行比对,作为颗粒大小检定的方法。

实验时,采用微量注射泵将样品油液注入传感器的微流道,Lab-view 数据采集单元能够实时采集和显示线圈的等效电感信号,通过置于检测区域的显微镜观察微流道内的颗粒尺寸和通过情况。摘取部分颗粒检测信号如图 5~8 所示,图 5、6 为 2 种结构传感器对直径为 70~80 μm 铁颗粒的检测结果,图 7、8 为 2 种结构传感器对直径为 130~140 μm 铜颗粒的检测效果。图中所示的脉冲表示检测颗粒的信号,可以看出,无论是套管结构线圈还是单管结构线圈,铁颗粒和铜颗粒引起的电感脉冲方向是相反的,验证了推导的检测原理。同时,也能看出铁颗粒的检测幅值和信噪比都要优于铜颗粒。其中,电感变化量与颗粒的直径相关,颗粒直径越大,电感变化量越大,如图 9、10 所示。

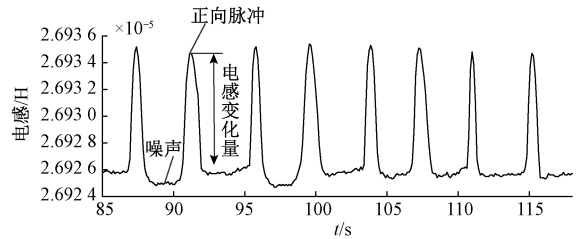


图 5 套管结构传感器检测 70~80 μm 铁颗粒  
Fig.5 Casing structure sensor detects iron particles of 70~80 μm

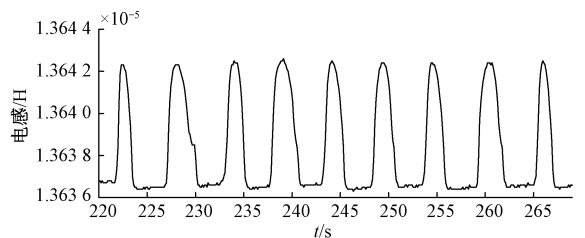


图 6 单管结构传感器检测 70~80 μm 铁颗粒  
Fig.6 Single solenoid sensor detects iron particles of 70~80 μm



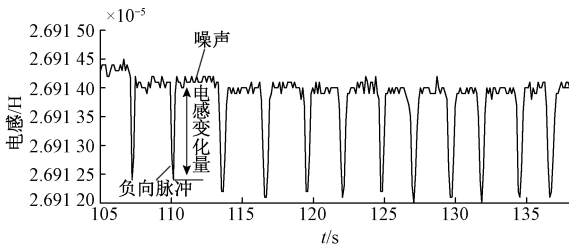


图7 套管结构传感器检测 130~140 μm 铜颗粒  
Fig.7 Casing structure sensor detects copper particles of 130~140 μm

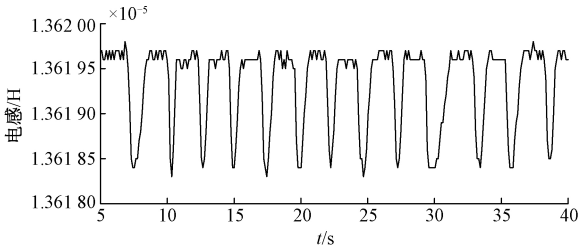


图8 单管结构传感器检测 130~140 μm 铜颗粒  
Fig.8 Single solenoid sensor detects copper particles of 130~140 μm

为更为直观地对比2种结构线圈的检测效果,从电感变化量、平均噪声以及信噪比方面对上述检测结果进行统计。为保证指标对比的准确性,取5组检测结果的平均值作为上述指标值,统计对比结果如图9、10所示。

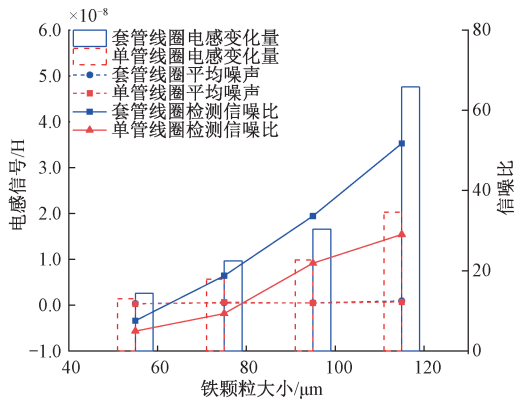


图9 50~120 μm 铁颗粒检测结果对比  
Fig.9 Comparison of detection results of 50~120 μm iron particles

图9为套管结构线圈和单管结构线圈分别检测直径为50~60 μm、70~80 μm、90~100 μm以及110~120 μm铁颗粒的指标对比。可以看出,对于2种结构线圈检测铁颗粒时,其电感变化量、信噪比均随着颗粒粒径的增加,而平均噪声基本不变,稳定在0.4 Nh。其中,对于检测相同粒径尺寸的铁颗粒,套管结构线圈在电感变化量、

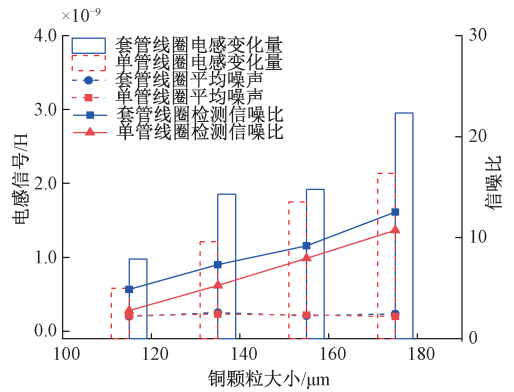


图10 110~180 μm 铜颗粒检测结果对比  
Fig.10 Comparison of detection results of 110~180 μm copper particles

信噪比都要优于单管线圈,并且表现出随着铁颗粒粒径的增加,优越性越明显。在检测直径为110~120 μm铁颗粒时,相比单管结构线圈,套管结构线圈的电感变化量和信噪比分别提高了2.4和1.8倍。

图10为套管结构线圈和单管结构线圈分别检测110~120 μm、130~140 μm、150~160 μm以及170~180 μm铜颗粒的指标对比,可以看出,与铁颗粒检测对比特点类似,2种结构线圈检测铜颗粒时,其电感变化量、信噪比也随着颗粒粒径的增加,而平均噪声在0.2 nH上下小幅度变动,也可视为基本不变。其中,套管结构线圈在检测不同粒径铜颗粒时,其电感变化量、信噪比也优于单管线圈,但并未随着铜颗粒粒径的增加出现大幅增加的现象。其中,检测直径为110~120 μm铜颗粒时指标提升效果最大,套管结构线圈的电感变化量和信噪比分别提高了1.7和1.8倍。

### 3.2 检测下限

针对套管结构线圈的颗粒检测下限,其颗粒油液样品制备程序与上述方法相同。采用50 μm粒径以下铁颗粒以及110 μm粒径以下铜颗粒进行多次试验,成功检测到30 μm的铁颗粒以及90 μm的铜颗粒,检测结果如图11、12所示。

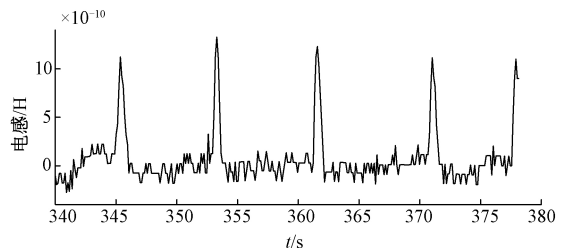


图11 套管结构传感器检测 30 μm 铜颗粒  
Fig.11 Casing structure sensor detects copper particles of 30 μm

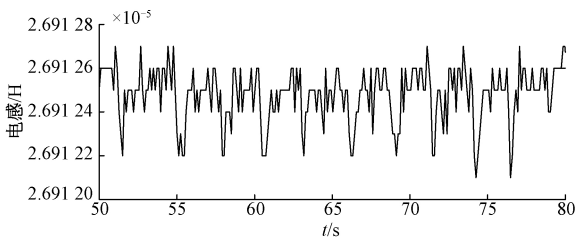


图12 套管结构传感器检测90  $\mu\text{m}$  铜颗粒

Fig.12 Casing structure sensor detects copper particles of 90  $\mu\text{m}$

## 4 结 论

本文设计了一种双螺线管线圈套管结构传感器,采用500  $\mu\text{m}$  直径的微流道进行传感器制作,一方面有益于减轻金属颗粒通过流道时的堵塞现象,另一方面可提高检测油液的通量,相比之前研究<sup>[7]</sup>,检测效率得到了66%的提升。首先从理论上论证了该传感器能够利用外部螺线管线圈的磁场提高内部螺线管线圈检测区域的磁通,有效增加金属颗粒通过检测区域的电感变化量。然后通过搭建微流体油液检测系统进行实验验证,证实了理论分析的准确性,在检测直径为50~120  $\mu\text{m}$  铁颗粒以及直径为110~180  $\mu\text{m}$  铜颗粒时,套管结构传感器不仅没有增加检测噪声,并在电感变化量、信噪比等检测指标方面得到了可观的提升,能够实现直径30  $\mu\text{m}$  以上铁颗粒和直径90  $\mu\text{m}$  以上铜颗粒的区分检测。相比声学传感器,设计传感器能够实现区分检测铁颗粒和铜颗粒;相比之前研究实现直径40  $\mu\text{m}$  以上铁颗粒和直径90  $\mu\text{m}$  以上铜颗粒的检测<sup>[7]</sup>,设计传感器实现了检测精度的提高。不同大小颗粒引起的电感变化量不同,由于颗粒的磁化是非线性的,并且不同流速以及不同位置时的同种大小颗粒也会引起不同的电感变化量。因此准确界定颗粒大小和电感变化量的数值关系难度较大。接下来,将着手开展实验数据的统计分析,研究电感变化量和不同颗粒直径的数学关系。

## 参考文献

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

[2] 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.

- [3] 张洪朋,白晨朝,孙广涛,等.高通量微型多参数油液污染物检测传感器[J].光学精密工程,2018, 26(9):110-118.
- ZHANG H P, BAI CH ZH, SUN G T, et al. High-throughput miniature multi-parameter oil contamination detection sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(9): 2237-2244.
- [4] CAO W, DONG G N, XIE Y B, et al. Prediction of wear trend of engines via on-line wear debris monitoring[J]. Tribology International, 2018, 120: 510-519.
- [5] 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.
- ZEN 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.
- [6] HAN ZH B, WANG Y SH, QING X L. Characteristics study of In-Situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris[J]. Sensors, 2017, 17(12):2851-2864.
- [7] 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 L, ZHANG H P, TENG H B, et al. Novel method for the detection of multi-contaminants in marine lubricants[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 125-132.
- [8] DU L, ZHE J. On-Line wear debris detection in lubricating oil for condition based health monitoring of rotary machinery[J]. Recent Patents on Electrical Engineering, 2011, 4(1):1-9.
- [9] 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[C].光学精密工程论坛.2015, 23(10):96-102.
- WANG Q, ZHANG H P, ZHANG J F, et al. Resistance detection method for microfluidic oil detection chip[C]. Opt.Precision Eng., 2015, 23(10):96-102.
- [10] 刘恩辰,张洪朋,曾霖,等.高精度液压油微小颗粒检测系统[C].光学精密工程论坛,2015,23(10):

- 396-402.
- LIU EN CH, ZHANG H P, ZENG L, et al. Detection system of small particles in hydraulic oil [ C ]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10) :396-402.
- [ 11 ] ZENG L, YU Z, ZHANG H, et al. A high sensitive multi-parameter micro sensor for the detection of multi-contamination in hydraulic oil [ J ]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 282:197-205.
- [ 12 ] JUN R Y, WEI L, FENG Z G, et al. Inductive debris sensor using one energizing coil with multiple sensing coils for sensitivity improvement and high throughput [ J ]. *Tribology International*, 2018, 128:96-103.
- [ 13 ] ZHANG X M, ZHANG H P, BO Z, et al. Study on magnetization and detection the metal particle in harmonic magnetic field [ J ]. *Key Engineering Materials*, 2015, 645-646:790-795.
- [ 14 ] 范红波,张英堂,任国全,等.新型磨粒在线监测传感器及其试验研究 [ J ]. *摩擦学学报*, 2010, 30(4) : 338-343.
- FAN H B, ZHANG Y T, REN G Q, et al. Experimental study of an on-line monitoring sensor for wear particles in oil [ J ]. *Tribology*, 2010, 30(4) :338-343.
- [ 15 ] 王志娟,赵军红,丁桂甫.新型三线圈式滑油磨粒在线监测传感器 [ J ]. *纳米技术与精密工程*, 2015(2) : 154-159.
- WANG ZH J, ZHAO J H, DING G F. A novel online oil debris monitoring sensor with three coils [ J ]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015(2) : 154-159.
- [ 16 ] FLANAGAN J M, JORDAN J R, WHITTINGTON H W. Wear-debris detection and analysis techniques for lubricant-based condition monitoring [ J ]. *Journal of Physics E Scientific Instruments*, 1988, 21(11) :1011.
- [ 17 ] 严宏志,张亦军.一种磨粒在线监测传感器的设计及其特性分析 [ J ]. *传感技术学报*, 2002(4) :333-338.
- YAN H ZH, ZHANG Y J. The design of an on-line monitoring sensor of wear mental particals and the analysis of its characteristic [ J ]. *Journal of Translucation Technology*, 2002(4) :333-338.
- [ 18 ] 范红波,张英堂,李志宁,等.电感式磨粒传感器中铁磁质磨粒的磁特性研究 [ J ]. *摩擦学学报*, 2009, 29(5) :452-457.
- FAN H B, ZHANG Y T, LI ZH N, et al. Study on magnetic characteristic of ferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor [ J ]. *Tribology*, 2009, 29(5) :452-457.
- [ 19 ] 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
- [ 20 ] DU L, ZHE J. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring [ J ]. *Tribology International*, 2011, 44(2) :175-179.
- [ 21 ] DU L, ZHE J. Parallel sensing of metallic wear debris in lubricants using undersampling data processing [ J ]. *Tribology International*, 2012, 53(9) :28-34.
- [ 22 ] ZHU X L, ZHONG C H, ZHE J. A high sensitivity wear debris sensor using ferrite cores for online oil condition monitoring [ J ]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(7) :075102.
- [ 23 ] 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) :102-106,116
- LIU EN 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, 42(2) :102-106,116
- [ 24 ] 雷银照.时谐电磁场解析方法 [ M ]. 科学出版社, 2000.
- LEI Y ZH. Analytical method of time harmonic electromagnetic field [ M ]. Science Press, 2000.
- [ 25 ] 李宝玺.电磁式金属磨粒传感器理论与实验研究 [ D ]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
- LI B X. Theoretical and experimental research on electromagnetic metallic wear debris sensor [ D ]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [ 26 ] 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.
- [ 27 ] 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 EN CH. Research on the detection of various pollutants in marine hydraulic oil in an integrated chip

[D].Dalian:Dalian Maritime University, 2017.

- [28] 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[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [29] ZHANG H, ZENG L, TENG H, et al. A novel on-chip impedance sensor for the detection of particle contamination in hydraulic oil[J]. *Micromachines*, 2017, 8(8):249.

## 作者简介



马来好,分别在2012年和2014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: malaihao@dlmu.edu.cn

**Ma Laihao** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Dalian Maritime University in 2012 and 2014, respectively. He is currently a Ph. D. student at Dalian Maritime University. His main research interests include 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. degree and Ph. D. degree both from Dalian Maritime University in 2000 and 2005, respectively. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Dalian Maritime University. His main research interests include marine engineering, mechatronics and microfluidic technology.