

文章编号 1004-924X(2017)增-0144-07

双线圈谐振式微流体油液检测芯片的检测特性

曾霖, 张洪朋*, 虞子雷, 吴瑜

(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微小金属磨粒的高精度检测, 设计并制作了双线圈谐振式微流体检测芯片。对该检测芯片的激励频率与电感变化关系以及金属磨粒检测效果进行研究。根据 LC 谐振原理, 设计了双螺线管电感线圈与电容并联的单通道微流体检测芯片, 并对其检测原理进行了理论分析; 然后在检测芯片的基础上搭建了油液金属磨粒检测系统; 最后, 对液压油中的铁颗粒和铜颗粒在不同激励频率下的电感变化特性进行实验研究, 并在最优激励频率下进行检测实验。实验结果显示: 在低于谐振频率时, 铁颗粒产生正向电感变化脉冲而铜颗粒产生负向电感脉冲; 高于谐振频率时, 铁颗粒产生负向电感变化脉冲而铜颗粒产生正向电感脉冲。在接近谐振频率附近的检测效果达到最佳, 此时双线圈谐振式芯片的检测效果要优于双线圈芯片, 在实验中实现了 $10\ \mu\text{m}$ 铁颗粒和 $50\ \mu\text{m}$ 铜颗粒的检测。结果证明, 检测芯片实现了液压油中金属磨粒的高精度检测, 为液压系统机械故障的预防与诊断提供了技术支持。

关键词: 油液磨粒检测; 微流体芯片; 双线圈; 谐振电路; 故障诊断

中图分类号: TP212.1; TH934.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0144

Characteristics of double-coil resonant microfluidic chip for oil detection

ZENG Lin, ZHANG Hong-peng*, YU Zi-lei, WU Yu

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

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

Abstract: In order to realize the high precision detection of fine metal abrasive grains in hydraulic oil, a double-coil resonant microfluidic detection chip was designed and fabricated. The relationship between the excitation frequency and inductance change of the detection chip and the detection effect of metal abrasive grains were studied. First, according to the principle of LC resonance, a single-channel microfluidic detection chip with double solenoid inductor and capacitor in parallel was designed, and its detection principle was analyzed theoretically. Then based on the detection chip, the detection system for metal abrasive grain in oil was set up. Finally, the experimental study on the inductance change of iron and copper particles in hydraulic oil at different excitation frequencies was carried out, and the detection experiment was carried out under the optimum excitation frequency. The experimental results show that when the frequency is lower than the resonant one, the iron particles produce positive inductance change pulse and the copper particles produce negative inductance pulse. When the frequency is higher than the resonant one, the iron particles produce negative inductance change pulse and the copper particles produce positive inductance pulse. When the frequency is close to the reso-

收稿日期: 2017-06-02; 修订日期: 2017-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51679022); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 3132017013)

nantone, the detection effect is the best. At this moment, the detection effect of double-coil resonant chip is better than that of the double coil chip, and the detection of $10\ \mu\text{m}$ iron particles and $50\ \mu\text{m}$ copper particles is realized in the experiment. The detection chip realizes the high precision detection of the metal abrasive grains in the hydraulic oil, and provides technical support for prevention and diagnosis of mechanical failure of the hydraulic system.

Key words: oil debris detection; microfluidic chip; double coil; resonance circuit; fault diagnosis

1 引言

液压系统在各个工业领域都有着广泛地应用。液压油作为液压机械运行的介质,对液压系统有着至关重要的作用。数据显示,大约有 75% 的液压机械故障是由液压油中的微小颗粒物污染所引起的^[1],其中主要为金属颗粒污染物。这些微小颗粒物包含了重要的液压系统工作状态信息。当液压机械处于正常运行状态时,液压油中的微粒浓度恒定在较低水平,且粒径通常为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$;当液压机械发生异常机械磨损时,微粒的浓度将明显增高、粒径将明显增大^[2]。因此,对液压油中的微小颗粒进行检测对于液压机械的状态监测和故障诊断具有重要意义。

目前对液压油的主要检测方式是送入实验室进行分析检测,这种检测方法虽然分析较为全面,但周期长、价格高且对分析人员有着较高要求,难以实现在线检测^[3]。现已有一系列对液压油污染物进行快速检测^[4]的方法,如声学法、光学法、电容法和电感法等。其中声学法^[5]和光学法^[6-7]虽然检测精度较高,但易受环境噪声、油液透光度等的影响;电容检测法^[8]具有较高的检测精度,但易受水分子或气泡的影响且不能区分金属颗粒的属性。相比而言,电感法的优点在于可以对铁磁性与非铁磁性颗粒进行区分,且不易受环境噪声的影响。军械工程学院的范洪波^[9-10]提出用单线圈螺线管式传感器对铁磁性与非铁磁性颗粒进行研究,电子科技大学的傅舰艇、上海交通大学的王志娟^[11-12]等制作了三线圈螺线管型传感器对油液磨粒进行检测研究,但以上方法因受到通道口径与线圈匝数的影响,检测精度并不高。美国阿克伦大学的 Li Du 近些年对电感检测法进行了一些研究^[13-15],他们运用 LC 谐振的方法通过单线圈螺线管型传感器测得非铁磁性颗粒的粒径为 $55\ \mu\text{m}$,铁磁性颗粒的粒径为 $20\ \mu\text{m}$ 。本课题组前期

应用微流体芯片检测技术对通道口径和线圈匝数做了改进^[16-19],用单线圈微流体检测芯片可检测到 $90\ \mu\text{m}$ 的铜颗粒和 $20\ \mu\text{m}$ 的铁颗粒,并且在此基础上提出的双线圈螺线管型磨粒传感器,研究表明其检测信号的信噪比明显优于单线圈螺线管型磨粒传感器。

本文在前期的研究基础上提出了双线圈谐振式微流体油液检测芯片,在双线圈微流体检测芯片中嵌入电容模块,并对其进行了理论分析和实验研究,基于 LC 谐振原理进一步提高了液压油中金属颗粒的检测精度。

2 检测芯片设计与检测原理

2.1 双线圈谐振式微流体芯片设计

双电感线圈谐振式微流体芯片的设计如图 1 所示。该芯片由一个直微通道、缠绕在微通道上的双电感线圈以及与电感线圈并联的电容组成。微通道直径为 $300\ \mu\text{m}$,线圈线径为 $25\ \mu\text{m}$,匝数为 200,电容为 $10\ \text{nF}$ 的瓷片电容(可根据激励频率更换不同规格的电容)。

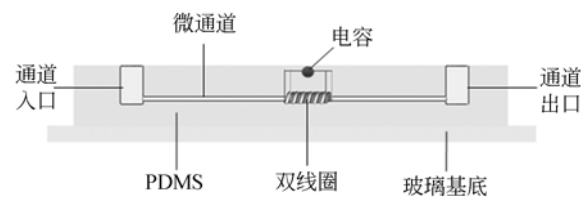


图 1 检测芯片设计图
Fig. 1 Design of detection chip

2.2 双线圈 LC 谐振检测原理

芯片的传感检测区域为双线圈螺线管缠绕覆盖的直通道区域,当双线圈与电容并联后其等效电路原理如图 2 所示。双线圈可等效为两个并联的电感与一个电阻串联。

与单线圈相比,双线圈除了自感 L_1 和 L_2 外,两个线圈之间还存在互感 M ,因此双线圈的电感

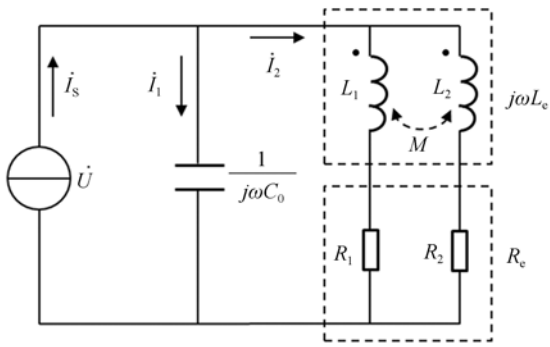


图 2 双线圈谐振检测原理图

Fig. 2 Schematic diagram of double coil resonance detection

与单线圈式的电感在计算上有所区别,对于两个相同的螺线管线圈, $L_1 = L_2 = L$, 在高频交流电激励时,双线圈的等效电感 L_e 为:

$$L_e = \frac{L + M}{2}. \quad (1)$$

另一方面,根据课题组前期的研究成果^[20],金属颗粒引起单个螺线管线圈的电感和电阻变化分别为:

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

和

$$\Delta R = -\frac{8\pi^2\mu_0 f N^2}{W^2 + d^2} \text{Im}(K_p), \quad (3)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, N 为线圈匝数, d 为线圈直径(与微通道直径相等), W 为线圈轴向宽度, K_p 为复磁化系数,与金属颗粒的尺寸、相对磁导率、电导率以及电源激励频率有关。

根据公式(1),金属颗粒引起双线圈的等效电感变化量为:

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

其中互感 M 与电感线圈的结构和材料以及颗粒的相对磁导率有关。另外,因为 $R_1 = R_2 = R$, 并联双线圈的等效电阻变化为:

$$\Delta R_e = \frac{\Delta R}{2} = -\frac{4\pi^2\mu_0 f N^2}{W^2 + d^2} \text{Im}(K_p). \quad (5)$$

当铁磁性颗粒(铁颗粒)经过双线圈检测区域时,由于其相对磁导率远大于 1,颗粒磁化作用占主导,因此将增加线圈的磁感应强度,使线圈等效电感增加。而当非铁磁性颗粒(铜颗粒)经过检测

区域时,颗粒内部产生的涡流将会起主导作用,因此将会降低线圈的磁感应强度,使线圈等效电感降低。

在进行油液检测时,本文是利用精密 LCR 表对整个电路的电感变化进行测量,在对双线圈的电感变化机理进行分析并得到了其变化量 ΔL_e 之后,接下来将双线圈等效为一个单螺线管线圈对整个 LC 电路进行分析。

当没有颗粒经过线圈时,整个电路的电抗为:

$$Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega C_0 + \frac{1}{R_e + j\omega L_e}} = \frac{R_e - j\omega C_0 R_e^2 + j\omega L_e - j\omega^3 L_e^2 C_0}{1 - 2\omega^2 L_e C_0 + \omega^2 C_0^2 R_e^2 + \omega^4 L_e^2 C_0^2}, \quad (6)$$

其中, ω 为角频率,即 $\omega = 2\pi f$, f 为交流电路的激励频率, C_0 为电容值, L_e 和 R_e 分别为基础等效电感和等效电阻。当电路的激励频率为谐振频率 f_0 时,整个电路电抗的虚部为 0,此时电路感抗无变化,因此由公式(6)可得谐振频率 f_0 为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_e C_0}} \sqrt{1 - \frac{C_0 R_e^2}{L_e}}. \quad (7)$$

当激励频率处于电路谐振频率附近,金属颗粒经过双线圈检测区域时,线圈的等效电感和电阻都将发生改变,分别变为 L_1 和 R_1 , 根据公式(4)和(5)可知:

$$L_1 = L_e + \Delta L_e, \quad (8)$$

以及

$$R_1 = R_e + \Delta R_e, \quad (9)$$

此时电路电抗的虚部,即感抗部分为:

$$\text{Im}[Z(j\omega)] = \frac{\omega L_1 - \omega C_0 R_1^2 - j\omega^3 L_1^2 C_0}{1 - 2\omega^2 L_1 C_0 + \omega^2 C_0^2 R_1^2 + \omega^4 L_1^2 C_0^2}. \quad (10)$$

由公式(10)可知,在谐振频率附近,当金属颗粒经过双线圈检测区域时,颗粒能引起双线圈的阻抗变化,进而使电路感抗发生变化,因此通过检测电路的感抗变化即能检测到油液中的金属颗粒。除了双线圈阻抗,整个电路的感抗的变化还与激励频率有密切关系,下面将通过实验进行研究。

3 检测实验与结果分析

3.1 检测芯片制作与检测系统搭建

双线圈微流体检测芯片的制作采用模塑法,

第一步为模具制作,用绕线机(实力,SRDZ23-1B,中国)同时 2 根漆包铜线(直径 $25\ \mu\text{m}$)同向缠绕在一根长 7 cm,直径 $300\ \mu\text{m}$ 的铜棒上,匝数为 200,该铜棒即为微流道模具(铜棒直径即为微流道的直径),接着将瓷片电容($10\ \text{nH}$)与两个线圈并联固定在玻璃基底上就完成了模具的制作,然后将配制好的聚二甲基硅氧烷(PDMS,胶体与固化剂质量比为 1:10)浇注在双线圈模具上,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 中抽出,就完成双线圈谐振式微流体检测芯片的制作。

基于双线圈谐振式检测芯片的电感检测系统如图 3 所示。该检测系统包括检测芯片,LabVIEW 数据采集单元,阻抗分析仪(Keysight E4980A),显微镜(Nikon AZ100)以及微量注射泵(Harvard Apparatus B-85259)。

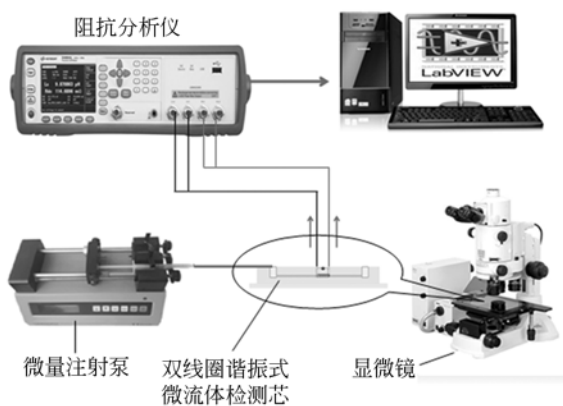


图 3 检测系统图

Fig. 3 Diagram of detection system

3.2 激励频率与电感检测特性实验

实验所用的液压油为船用耐磨液压油(长城 L-HM 46),铜颗粒和铁颗粒分别用不同目数的筛子筛选出所需要的尺寸,用精密天平(Precisa XS225A)分别称取 3 mg 的铁颗粒和铜颗粒,接着量取两份 100 mL 的液压油,将铁颗粒和铜颗粒分别加入到两份液压油中并用振荡器(IKA S25)将油液颗粒混合均匀,然后取铁颗粒油液 1 mL 和铜颗粒油液 1 mL 备用。

为了更好地得到电感输出特性与激励频率的关系,此处用 $38\sim 40\ \mu\text{m}$ 的铁颗粒和 $120\sim 125\ \mu\text{m}$ 的铜颗粒进行实验。本文所用的双线圈等效基础电感用阻抗分析仪实测值为 $8.96\ \mu\text{H}$,等效电阻实测值为 $11.37\ \Omega$,由公式(7)可计算出检测

电路的谐振频率为 $491.82\ \text{KHz}$,因此本实验将在谐振频率附近通过改变激励频率对金属颗粒进行检测。实验中发现各个激励频率下信号噪声基本保持恒定($1.25\times 10^{-10}\ \text{H}$),所以在此只看电感幅值的变化,每个频率取 10 个电感值取平均,实验结果如图 4 所示。

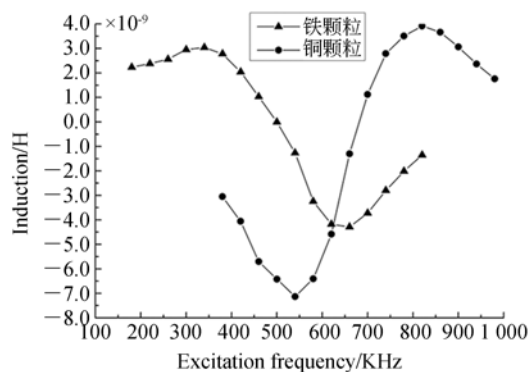


图 4 不同频率下的检测结果

Fig. 4 Detection results at different excitation frequencies

从实验结果可以看出,当激励频率低于谐振频率时,铁颗粒将会使电感增加而铜颗粒将使电感降低;当激励频率高于谐振频率时,铁颗粒将使电感降低而铜颗粒将使电感增加。当频率处于 $660\ \text{KHz}$ 时铁颗粒引起的电感变化达到最大值,频率处于 $540\ \text{KHz}$ 时铜颗粒引起的电感变化达到最大值。但从实验结果可以看出,当铁颗粒和铜颗粒经过检测区域时,会对电路的谐振频率产生影响,铁颗粒会增加双线圈电感,因此当铁颗粒经过双线圈时会使电路的谐振频率略微降低,而铜颗粒正好相反,将会使谐振频率略微增加。

3.3 双线圈谐振与双线圈的对比实验

从上一节的实验结果可知,对于双线圈谐振式检测而言,铁颗粒检测的最佳激励频率是 $660\ \text{KHz}$,铜颗粒检测的最佳激励频率是 $540\ \text{KHz}$ 。另一方面,根据前期的研究成果,单纯的双线圈检测效果随频率的增加而增加,由于受到阻抗分析仪的最大激励频率限制,本节将用 $2\ \text{MHz}$ 的频率给单纯的双线圈进行激励,并用 $23\sim 25\ \mu\text{m}$ 的铁颗粒和 $90\sim 96\ \mu\text{m}$ 的铜颗粒进行检测实验,从而对比有谐振和没有谐振时的检测效果。对比实验检测结果如图 5 所示。

从对比结果可以看出,双线圈谐振式检测和

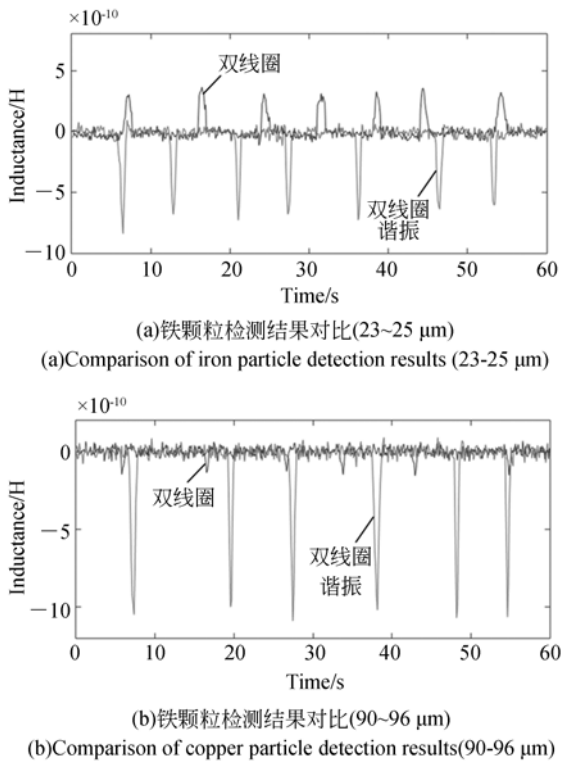


图 5 双线圈谐振与双线圈检测结果对比

Fig. 5 Comparison of double coil resonance and double coil detection results

双线圈检测噪声相近,但对于同尺寸的金属颗粒,双线圈谐振式检测幅值明显高于双线圈检测,尤其对于铜颗粒,双线圈谐振式检测幅值较双线圈检测增大了 6 倍。由此可以得出,双线圈谐振式检测芯片具有更好的检测效果。

3.4 粒径与检测幅值的关系实验

从上两节的实验结果可知双线圈谐振式检测芯片具有更高的检测精度,并且分别得到了铁颗粒

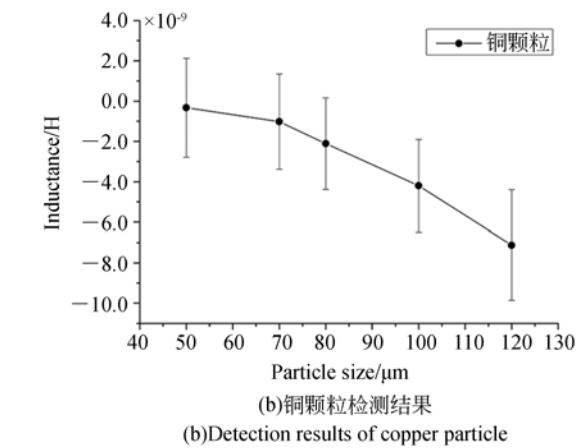
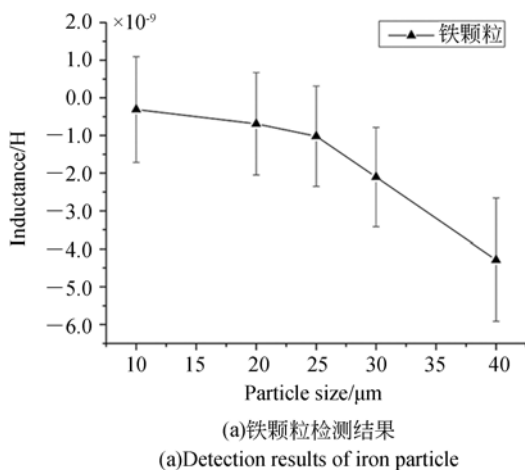


图 6 不同金属粒径的检测结果

Fig. 6 Detection results at different metal particle size

粒检测和铜颗粒检测的最佳激励频率,下面将对不同粒径的铁颗粒和铜颗粒在其最优激励频率下进行检测。检测结果如图 6 所示。

从检测结果可以看出,随着颗粒粒径的增加,电感检测幅值也随之增大,并且在各自的最优激励频率下成功检测到了 10 μm 铁的颗粒和 50 μm 的铜颗粒,检测结果如图 7 所示。

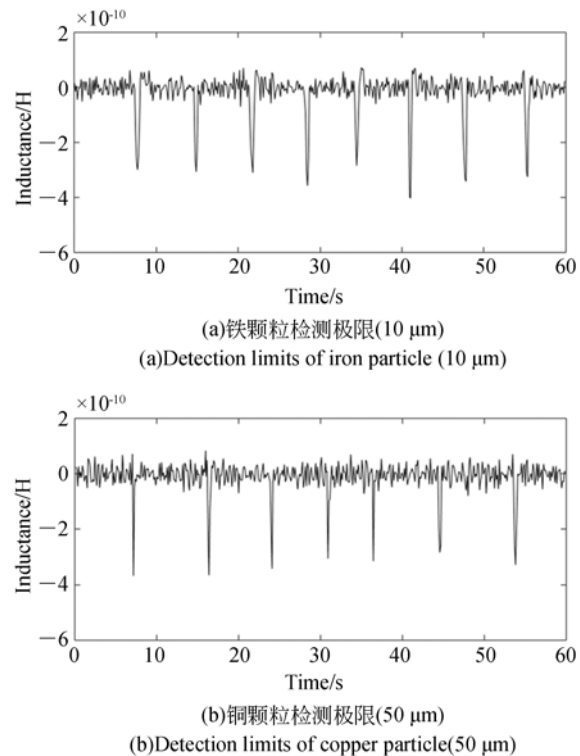


图 7 检测极限结果

Fig. 7 Results of detection limits

从铁颗粒和铜颗粒的检测结果可以看出,即使在检测小粒径的颗粒时,检测信号依然具有良好的信噪比,证明了双线圈谐振式微流体油液检测芯片油液检测芯片的可行性和良好性能。

5 结 论

本文基于双线圈电感微流体油液检测芯片提出了双线圈谐振式微流体检测芯片,该芯片由缠

绕在微通道中的一个双螺线管线圈以及与之并联的瓷片电容组成,首先从理论上分析了其检测可行性,然后用该芯片搭建检测系统进行油液金属颗粒检测实验。实验结果证明:双线圈谐振式检测芯片在激励频率接近电路谐振频率附近时检测效果达到最佳,并且检测效果要优于双线圈检测芯片,在最优频率下成功检测到 $10\ \mu\text{m}$ 铁颗粒和 $50\ \mu\text{m}$ 铜颗粒。该研究将对液压油金属磨粒的高精度检测提供行之有效的方法,从而为液压系统故障预防与诊断提供技术支持。

参考文献:

- [1] ZHANG H P, HUANG W, ZHANG Y D, *et al.*. Design of the microfluidic chip of oil detection [J]. *Appl. Mech. Mater.*, 2012, 117: 517-520.
- [2] EDMONDS J, RESNER M S, SHKARLET K. Detection of precursor wear debris in lubrication systems [C]. *Aerospace Conference Proceedings, IEEE*, 2000, 6: 73-77.
- [3] SUN W B. Quantitative estimation technique for wear amounts by real time measurement of wear debris in lubricating oil [C]. *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications*, 2011, 308: 647-650.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 刘恩辰,张洪朋,曾霖,等.高精度液压油中微小颗粒的检测系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 10(23): 151-157.
LIU E CH, ZHANG H P, ZENG L, *et al.*. Detection system of small particles in hydraulic oil [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 10(23): 151-157. (in Chinese)
- [8] 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, 03: 42-46.
- [9] 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, (05): 452-457.
- [10] 范红波,张英堂,陶凤和,等.电感式磨粒传感器中非铁磁质磨粒的磁场特性[J]. *传感器与微系统*, 2010, (02): 35-37+41.
- [11] 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, (02): 5-7.
- [12] 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, (02): 154-159.
- [13] DU L, ZHE J, CARLETTA J, *et al.*. Real-time monitoring of wear debris in lubrication oil using a microfluidic capacitance sensor for detecting metal wear debris in lubrication oil [J]. *Dalian Haishi Daxue Xuebao*, 2013, 39(3): 42-46. (in Chinese)
- [14] 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, (05): 452-457. (in Chinese)
- [15] FAN H B, ZHANG Y T, TAO F H, *et al.*. Magnetic characteristic of unferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, (02): 35-37+41.

- microfluidic inductive Coulter counting device [J]. *Microfluidics and nanofluidics*, 2010, 9(6): 1241-1245.
- [14] DU L, ZHU X, HAN Y, *et al.*. Improving sensitivity of an inductive pulse sensor for detection of metallic wear debris in lubricants using parallel LC resonance method [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(7): 075106.
- [15] ZHU X, DU L, ZHE J. A 3×3 wear debris sensor array for real time lubricant oil conditioning monitoring using synchronized sampling [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 83: 296-304.
- [16] 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]. *Yiqi Yibiao Xuebao*, 2013, 34(4): 762-767. (in Chinese)
- [17] 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, 725246.
- [18] 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[J]. 光学精密工程, 2015, 10(23):96-102.
WANG Q, ZHANG H P, ZHANG J F, *et al.*. Resistance detection method for microfluidic oil detection chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 10(23): 96-102. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] 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. (in Chinese)

作者简介:



曾霖(1991—),男,江西赣州人,博士研究生,2015年于大连海事大学获得硕士学位,主要从微流体检测技术与机电一体化方面的研究。E-mail: bob666zl@126.com

导师简介:



张洪朋(1978—),男,辽宁铁岭人,教授,博士生导师,2005年于大连海事大学获得博士学位,主要从事船舶机电一体化和微流体检测技术研究。E-mail: zhppeter@163.com

(本栏目编辑:严寒)