

文章编号 1004-924X(2017)增-0130-05

电感式油液检测芯片输出信号的提高

吴 瑜, 张洪朋*

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 液压系统发生故障可以通过液压油体现出来, 金属颗粒是非常重要的参数, 对油液中的金属颗粒进行准确的检测, 能够对机械设备进行故障诊断和状态预测, 因此提高检测芯片的精度尤为重要。为提高电感式微流体检测芯片的精度, 对传统的微流体油液检测芯片进行了改进。对聚焦型微流体油液检测芯片的结构进行了设计, 利用 Maxwell 方程对单个倾斜平面线圈的磁场进行理论建模; 最后进行实验验证。通过数据处理可得改进后微流体芯片的基础电感为 $7.894\ 15 \times 10^{-6}$ H, 50 个颗粒经过流道的平均电感脉冲值为 $7.895\ 08 \times 10^{-6}$ H, 因此得到铁颗粒的平均电感增量为 9.3×10^{-10} H。对比传统的平面线圈微流体电感芯片的平均电感增量为 $7.008\ 33 \times 10^{-10}$ H, 改进后的具有聚焦功能的微流体电感脉冲值的增量为 $2.291\ 67 \times 10^{-10}$ H, 提高检测精度达 32.67%。

关键词: 微流体芯片; 电感式传感器; 油液检测; 金属颗粒

中图分类号: TP212.1; TB 937 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0130

Improvement of output characteristic of oil detection chip

WU Yu, ZHANG Hong-peng*

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

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

Abstract: The wear condition of lubrication system can be obtained through the lubrication oil, therefore metal particle is a very important parameter. Accurate detection of the metallic wear particle is vital to avoid catastrophic failure of rotating or reciprocating machine. To improve the sensitivity of inductive microfluidic detection chip, an oil detection microfluidic chip was improved. The structure of the chip was designed, and the electromagnetic model of one tilted planar coil was established by the Maxwell function. Then the experimental verification was performed. The experiment results show that the basic inductance is $7.894\ 15 \times 10^{-6}$ H and the average inductance variation is $7.895\ 08 \times 10^{-6}$ H. The inductance variation of the copper particle is up to 9.3×10^{-10} H, in comparing with $7.008\ 33 \times 10^{-10}$ H in planar coil, with a 32.67% improvement in sensitivity.

Key words: microfluidic chip; inductive sensor; oil detection; metallic wear debris

收稿日期: 2017-05-31; 修订日期: 2017-06-15.

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)

1 引 言

液压机械具有体积小、重量轻、可实现过载保护和无级调速等优点,因此在工业领域得到了广泛应用。据统计数据显示,75%以上的液压系统故障是由于液压油污染造成的,金属颗粒污染是油液污染的主要原因^[1]。当液压系统正常工作时,液压油中的金属磨粒浓度近似恒定不变,粒径维持在 10~20 μm 之间;当液压系统发生异常磨损时,油液中的固体颗粒浓度会急剧增加,粒径可达到 50~100 μm ^[2]。因此,液压系统故障可以通过液压油的浓度和粒径变化体现出来。金属颗粒是非常重要的参数,对液压油中金属颗粒区分检测与计数,不但可以准确反映液压系统的运行状态,实现故障的预防;而且可以根据金属颗粒的属性进行故障诊断与定位,对基于信号分析的故障预防与诊断具有重要的工程应用价值。

根据检测原理,目前颗粒检测计数方法主要可分为光学检测法^[3]、电容检测法^[4]和阻抗分析法^[5-6]等。光学检测法的检测精度较高,但是容易受到油液中气泡和油液清洁度等外界因素的影响,从而不能实现金属颗粒的区分检测。电容检测法根据物质的介电常数进行检测,因此不能实现水分和所有金属的区分。阻抗分析法中的电感检测是常用的金属颗粒检测方法之一,它可以区分颗粒的电磁属性(铁或者非铁磁性),具有结构简单、经济性好、寿命长等^[7]优点。军械工程学院的范洪波^[8-9]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^[10]、上海交通大学的王志娟^[11]等制作了三线圈螺线管型传感器对油液磨粒进行检测,但以上方法因受通道口径与线圈匝数的影响,检测精度都不高。近年来,微流体技术快速发展,利用微流体芯片能够对颗粒进行计数统计和尺寸测量,从而更加精确地判断机械设备的磨损状态^[12-14]。在前期研究工作中,本团队将传统的阻抗分析法与微流体芯片技术相结合,开发了平面电感式和螺线管电感式微流体油液检测芯片实现了金属颗粒的区分检测,并对其性能进行了研究和优化^[15-16]。基于前面的研究,本文对微电感传感器结构进行了改进,用于提高电感式传感器对金属颗粒的检测精度,并指导它在其它领域的应用。

2 检测原理与芯片设计

2.1 电感检测原理

如图 1 所示,线圈通入高频交流电,这样在线圈周围就会有感应磁场产生,而金属颗粒在磁场范围内会受到影响,一方面是磁化的影响,令一方面是涡流的影响,两个方面相互影响,最终令颗粒外的磁场产生变化,从而对线圈的阻抗产生影响。

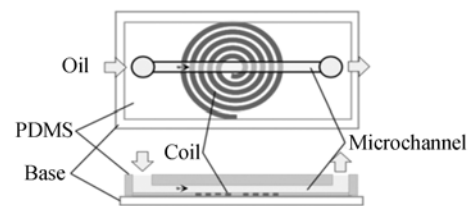


图 1 微流体芯片油液检测传感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of microfluidic chip sensor

2.2 芯片结构设计

前期研究得到了与普遍认识相反的结论,即当微流道在平面电感线圈中央时电感式微流体检测芯片的灵敏度最低;当微流道远离平面电感线圈中央时,电感式微流体检测芯片的灵敏度明显增加,即线圈边缘处的磁场最大。因此,两个平面线圈以一定角度展开,在线圈下面相交的地方布置流道,让两个线圈的磁场在流道处聚焦。本文利用这个原理对检测芯片结构进行了改进,如图 2 所示。

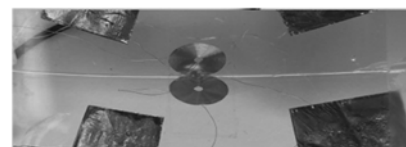
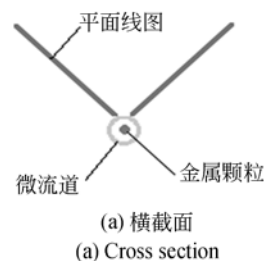


图 2 具有聚焦作用的微流体芯片

Fig. 2 Microfluidic chip used for oil detection

3 理论研究

以平面线圈中的单个圆环线圈为研究对象,建立单个平面线圈的数学模型,如图 3 所示。建立 $o-xyz$ 直角坐标系,取 y 轴与微流体芯片的流道方向平行, z 轴穿过线圈的几何中心,线圈几何中心到微流道中心的距离为 a ,取圆环法线与 z 轴的夹角为 Φ 。为了求解倾斜线圈的数学模型,将倾斜圆环表示为两个面的交线,这两个面分别为平面 m 和柱面 q ,其中 $m(x, z)=0$,表示圆环所在平面的方程; $q(x, y, z)=0$,表示对称轴穿过圆环几何中心的圆柱面。

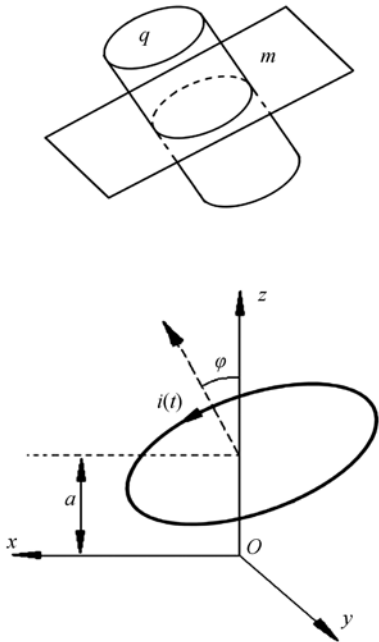


图 3 单个平面线圈的数学模型

Fig. 3 Mathematical model of single planar coil

两个面 m 和 q 可以表示为:

$$m(x, z) = x \sin \varphi - (z - a) \cos \varphi, \quad (1)$$

$$q(x, y, z) =$$

$$\sqrt{[x \cos \varphi + (z - a) \sin \varphi]^2 + y^2} - R. \quad (2)$$

式中 R 为圆环半径。设圆环的电流方向为 $\theta_i(x, y, z)$, 则其电流密度可表示为 $J_i = I \delta(m) \delta(q) \theta_i(x, y, z)$ 。

描述该模型电磁场的麦克斯韦方程如下:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (6)$$

此外,各场量之间还满足下关系:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (8)$$

根据麦克斯韦方程组,引入矢量磁位 \mathbf{A} ,满足 $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$,忽略位移电流 \mathbf{D} ,建立矢量磁位 \mathbf{A} 所满足的约束方程。

设 \mathbf{A}_i 为斜置圆环在无限大真空中所产生的场,则可得到其磁场方程为:

$$\nabla^2 \mathbf{A}_i = -\mu_0 I \delta(m) \delta(q) \theta_i(x, y, z). \quad (9)$$

通过求解方程(9)得到单个斜置线圈在流道处的磁场,然后求出另一个线圈的磁场进行叠加,即可在已知磁场的情况下求得金属颗粒经过时线圈电感的变化。

4 检测实验与结果分析

4.1 检测芯片制作与检测系统搭建

本实验设计和制作的平面线圈由直径为 $70 \mu\text{m}$ 的铜线绕制而成,一共 40 匝,单层,内径为 0.9 mm ,两个平面线圈成 60° 展开,芯片中的微流道由直径为 $300 \mu\text{m}$ 的铜丝制作而成。金属颗粒检测系统如图 4 所示,系统分为 3 个部分:(1)油液驱动部分,采用微量注射泵(HARVARL 70-2212),取 10 mg 粒径为 $100 \sim 108 \mu\text{m}$ 的铁颗粒混入到 50 mL 液压油(Hyspin AWS10)中均匀混合放置到注射泵中,将微量注射泵的速度设置为 1 mL/min ;(2)检测部分,采用阻抗分析仪(Agilent E4980A, Santa Clara, CA),将其频率设置为 2 MHz ,电压设置为 2 V ,检测方式设置为 Ls-Rs;(3)数据处理部分,使用中低通滤波器和插值拟合法滤除高频噪声并使基线回零,最终通过 LABVIEW 在计算机上显示出来。

4.2 实验结果分析

为了使实验数据可靠,检测了 50 个铁颗粒流经检测区域,截取信号片段如图 5 所示。把实验数据导入电脑中处理,得到新型微流体芯片的基础电感为 $7.89415 \times 10^{-6} \text{ H}$,50 个颗粒经过流道的平均电感脉冲值为 $7.89508 \times 10^{-6} \text{ H}$,因此得到铁颗粒的平均电感增量为 $9.3 \times 10^{-10} \text{ H}$ 。

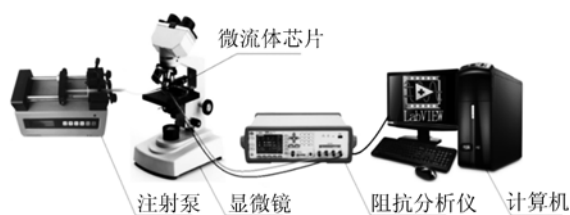


图 4 油液检测系统示意图

Fig. 4 Devices of oil detection system based on microfluidic chip

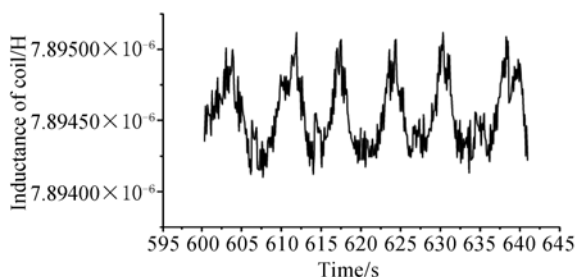


图 5 铁颗粒流经改进后的微流体芯片时产生的电感脉冲信号片段图

Fig. 5 Pulse signal segment measured when iron particles passed microfluidic chip

为了对比,对图 1 所示的单个平面线圈进行实验测量,同样检测 50 个铁颗粒流经检测区域,截取的信号片段如图 6 所示。

通过数据处理可得其基础电感为 $4.293\ 80 \times 10^{-6}$ H,平均电感脉冲值为 $4.294\ 505 \times 10^{-6}$ H,因此得到颗粒经过传统平面线圈微流体芯片的平均电感增量为 $7.008\ 33 \times 10^{-10}$ H。对比传统平面线圈微流体芯片,微流体电感脉冲值的增量为

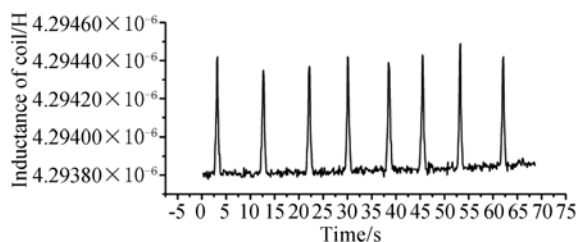


图 6 铁颗粒流经平面电感线圈微流体芯片时产生的电感脉冲信号片段图

Fig. 6 Pulse signal segment measured when iron particles passed through planar coil

$2.291\ 67 \times 10^{-10}$ H,检测精度提高了 32.67%。

5 结 论

本文利用两个平面电感线圈的聚焦,对传统的微流体油液检测芯片进行了改进。首先改进了芯片传感器的结构,利用 Maxwell 方程对单个倾斜平面线圈的磁场进行理论建模;最后进行了实验验证。实验结果表明,通过数据处理可得改进后的微流体芯片的基础电感为 $7.894\ 15 \times 10^{-6}$ H,50 个颗粒经过流道的平均电感脉冲为 $7.895\ 08 \times 10^{-6}$ H,因此得到铁颗粒的平均电感增量为 9.3×10^{-10} H。对比传统的平面线圈,微流体电感芯片的平均电感增量为 $7.008\ 33 \times 10^{-10}$ H,可得具有聚焦功能的微流体电感脉冲值的增量为 $2.291\ 67 \times 10^{-10}$ H,检测精度提高了 32.67%。本文提出的微电感传感器对金属颗粒的检测精度较高,并有望应用于其它领域。

参考文献:

- [1] 刘恩辰,张洪朋,吴瑜,等. 油液过流速度对船舶液压油检测精度的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 533-539.
LIU E C, ZHANG H P, WU Y, et al.. Effect of oil velocity on sensitivity of micron metal particle detection by inductive sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 533-539. (in Chinese)
- [2] DU L, ZHE J. 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.

- [3] KWON O K, KONG H S, HAN H G. On-line measurement of contaminant level in lubricating oil: U. S. Patent 6, 151, 108 [P]. 2000-11-21.
- [4] 李梦琪,赵凯,宋永欣. 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. Microfluidic capacitance sensor for detecting metal wear debris in lubrication oil [J]. *Dalian Haishi Daxue Xuebao*, 2013, 39(3): 42-46. (in Chinese)
- [5] 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 Mari-

- time University, 2014. (in Chinese)
- [6] 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,2015,23(10):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, 23(10): 96-102. (in Chinese)
- [7] 吴瑜,张洪朋. 基于空间微螺线管的金属磨粒检测研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(3):67-74.
WU Y, ZHANG H P. Research on the detection of metallic particle based on spatial micro coil [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 67-74. (in Chinese)
- [8] 范红波,张英堂,李志宁. 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 Y. Study on magnetic characteristic of ferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor [J]. *Tribology*, 2009, 29(5): 452-457. (in Chinese)
- [9] 范红波,张英堂,陶凤和. 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,2010,29(2):35-37,41.
FAN H B, ZHANG Y T, TAO F H. Magnetic characteristic of unferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(2): 35-37, 41. (in Chinese)
- [10] 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 J T, ZHAN H Q, GU J. Detection circuit design of three-coil inductive particle sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012, 2: 5-7. (in Chinese)
- [11] 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,2015,13(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, 13(2): 154-159. (in Chinese)
- [12] DU L, ZHE J. Parallel sensing of metallic wear debris in lubricants using undersampling data processing [J]. *Tribology International*, 2012, 53: 28-34.
- [13] ZHANG H P, CHON C H, PAN X, *et al.*. Methods for counting particles in microfluidic applications [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 7(6): 739-749.
- [14] 刘思辰,张洪朋,曾霖,等. 高精度液压油微小颗粒检测系统[J]. 光学精密工程,2015,23(10):396-402.
LIU E CH, ZHANG H P, ZENG L, *et al.*. Detection system of small particles in hydraulic oil [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 396-402. (in Chinese)
- [15] WU Y, ZHANG H P, *et al.*. Determination of metal particles in oil using a microfluidic chip-based inductive sensor [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2016, 44(3): 259-269.
- [16] 张洪朋,张兴明,郭力. 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. Design of the oil detection microfluidic chip [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4): 762-767. (in Chinese)

作者简介:



吴瑜(1986—),女,重庆人,博士研究生,2009年于江苏科技大学获得学士学位,2011年于大连海事大学获得硕士学位,主要从事轮机工程、机电一体化、微流体芯片等技术的研究。E-mail: wuyu314159262@163.com

导师简介:



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,主要从事轮机工程、机电一体化、微流体芯片等技术的研究。E-mail: zhp-peter@163.com