

文章编号: 1004-924X(2016)03-0533-07

油液过流速度对船舶液压油检测精度的影响

刘恩辰, 张洪朋*, 吴瑜, 付洪发, 孙玉清, 陈海泉
(大连海事大学轮机工程学院, 辽宁大连 116026)

摘要: 为提高平面电感式微流控检测芯片的检测精度, 研究了油样过流速度与信号幅值大小的关系。介绍了电感式微流控检测芯片的检测原理, 理论分析了油样过流速度对检测信号幅值产生的影响并进行了公式推导, 然后采用控制变量法对其进行了实验验证。选用粒径在80-85 μm 之间的铁颗粒作为待测颗粒, 将油样的过流速度分别设定为0.02-0.10 ml/min进行了实验。结果表明, 随着油样过流速度的增加, 信号幅值逐渐减小, 且呈线性关系; 在其余因素不变, 仅改变油样的过流速度时, 检测信号的幅值最大可增大87.5%。研究表明, 实验结果与理论推导结论相符, 通过减小油样的过流速度可增大检测信号的幅值。该项研究对提高平面电感式微流控检测芯片的精度具有参考价值。

关键词: 颗粒检测; 流速测量; 微流控检测芯片; 船舶液压油; 过流速度

中图分类号: TP212.1; TB 937 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0533

Effect of oil velocity on sensitivity of micron metal particle detection by inductive sensor

LIU En-chen, ZHANG Hong-peng*, WU Yu, FU Hong-fa, SUN Yu-qing, CHEN Hai-quan
(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, 116026, China)

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

Abstract: To improve the sensitivity of a planar inductive microfluidic chip, the relationship between the oil velocity and the signal amplitude was researched. The working principle of the planar inductive microfluidic chip was introduced, the effect of the oil velocity on the detection signal amplitude was analyzed theoretically and the related formula were derived. Then, the experimental verification was performed by the control variable method. The iron particles with diameters from 80-85 μm were used as the samples, the velocity of oil was set from 0.02 ml/min to 0.10 ml/min, an experiment was carried out. The obtained data illustrate that the signal amplitude decreases with the improvement of oil velocity, and the relationship between the oil velocity and signal amplitude is linear after fitting. When other conditions are invariant, the sensitivity has been significantly improved with the velocity decreased, and the maximum can catch about 87.5%. It suggests that the experiment data agree with the theoretical ones well and the signal amplitude can be improved by decreasing the oil velocity. The conclusion is valuable for the sensitivity improvement of microfluidic chips.

Key words: particle detection; flow velocity detection; microfluidic chip; marine hydraulic oil; oil velocity

1 引言

液压系统自诞生以来, 凭借其高效率、大功率、可实现无级变速和远程控制等优点被广泛应

用于工业的各个领域^[1]。液压系统在船舶上同样具有广泛的应用。据相关统计数据显示, 超过75%的液压故障是液压油污染造成的。液压油中的污染

收稿日期: 2015-09-10; 修订日期: 2015-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51205034); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 3132014332)

物主要包括气体污染物、液体污染物和固体颗粒污染物等,其中固体颗粒物造成的危害最大。这些颗粒物包括外界侵入系统的粉尘和液压系统各部件磨损产生的金属磨粒,后者为主要来源^[2,3]。当液压系统正常工作时,油液中的金属颗粒含量维持在较低水平,并且磨粒的粒径均在 20 μm 以下;当液压系统发生异常磨损时,油液中金属颗粒的含量骤增,磨粒的粒径将达到 50~100 μm,甚至更大^[4]。对油液中的污染物进行检测,通过检测到的金属颗粒信息反映机械的运行状态,达到状态监测的目的。在机损事故发生前及时更换液压油,避免发生故障,这对于延长液压系统的工作寿命具有重要意义^[5,6]。

目前,油液中金属颗粒的检测计数方法大致可以分为声学检测法、光学检测法和电磁学检测法^[7]等。光阻法具有检测精度高、速度快等优点,因此光阻法是光学检测法中最常用的方法。但是光阻法具有无法对颗粒的属性进行区分、检测结果易受外界环境的影响、对油液的品质要求较高等缺点,严重影响了基于信号分析的故障诊断和预测理论的发展^[8]。因此目前金属颗粒检测与计数方面更多的研究集中在电磁学检测法。电磁学检测的主要方法为阻抗分析法,不但可以实现金属颗粒的粒径检测与计数,而且可以对金属颗粒的属性进行区分^[9,10],这对于故障诊断技术的发展具有重要意义。微流控芯片具有检测速度快、精度高、便于集成等优点^[11,12],因此在油液中金属颗粒检测领域得到广泛关注。

在前期的研究工作中,本团队将经典电磁学检测原理与微流控检测芯片技术相结合,设计并制作了平面电感式微流控油液检测芯片,可实现油液中磁性金属颗粒和非磁性金属颗粒的区分检测与计数,并通过理论和实验分析了平面线圈匝数、线径、线间距、激励电压等因素对该检测芯片检测精度的影响^[4,13,16]。在实验中发现:同一金属颗粒以不同的过流速度通过微流控检测芯片中的检测区域时,会产生不同幅值的脉冲信号。为进一步提高电感式微流控检测芯片的检测精度,本文将深入探讨油液过流速度对检测信号幅值的影响,为电感式微流控检测芯片的优化提供新的方法。

本文首先介绍了电感式微流控检测芯片的工作原理;通过理论推导,分析油样过流速度对检测

芯片的灵敏度产生影响的原因;并进行了检测实验,验证理论分析的准确性;结合实验数据和理论分析,总结了速度对检测信号产生影响的一般规律。

2 理论分析

2.1 微电感传感器检测原理

电感式微流控检测芯片结构如图 1 所示,当平面电感线圈中通入高频交流电时,在与平面电感线圈垂直的方向上会产生交变的磁场。当金属颗粒经过该交变磁场区域时,金属颗粒会被磁化,使原有磁场的磁感应强度增大,增大的程度与金属颗粒的相对磁导率有关;另一方面,根据楞次定律,金属颗粒内部会产生涡流,涡流的磁场会抵消部分原有的磁场,使磁感应强度降低^[13]。铁磁性金属颗粒(以铁为例)的相对磁导率远大于 1,因此当铁磁性金属经过检测区域时,磁场的磁感应强度会增大;非铁磁性金属颗粒(以铜为例)的相对磁导率约为 0.99991,因此当非铁磁性金属颗粒经过检测区域时,涡流作用为影响磁场分布的主要因素,磁场的磁感应强度会降低^[14]。

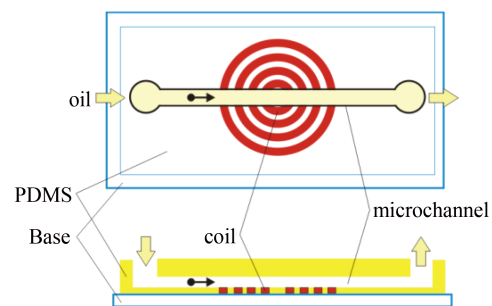


图 1 电感式微流控检测芯片结构示意图

Fig. 1 Design diagram of detection chip

当铁颗粒经过检测区域时,微电感传感器会产生正的与颗粒粒径相关的脉冲信号;当铜颗粒经过检测区域时,微电感传感器会产生负的与颗粒粒径相关的脉冲信号。

2.2 速度对磁场的影响

由法拉第电磁感应定律可知:

$$\begin{aligned} \oint_C E_i \cdot dl &= - \frac{d}{dt} \int_S B \cdot dS \\ &= - \int_S \left(\frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS + B \cdot \frac{\partial}{\partial t} dS \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$ 为磁场强度变化引起电动势变化的微元, 由此产生的电动势称为感生电动势; $B \cdot \frac{\partial}{\partial t} dS$ 为闭合回路做切割磁感线运动引起电动势变化的微元, 由此产生的电动势称为动生电动势^[15]。在建立模型前, 假设电感线圈产生的交变磁场满足准静态场的条件, 因此感生电动势为0, 微电感传感器检测到的信号变化主要是动生电动势引起的。

金属磨粒通过平面电感式传感器时, 金属磨粒可以视为无数个平面闭合回路的集合, 这些回路做切割磁感线运动, 对金属颗粒内的一个横截面进行分析, 该截面在磁场中的示意如图2所示。在 t 时刻该截面处于 $C(t)$ 位置, 此时闭合回路的面积为 S_1 , 该截面以速度 V 在与磁场垂直的方向移动, 在 $t+dt$ 时刻到达 $C(t+dt)$ 位置, 此时闭合回路的面积为 S_2 。对金属颗粒内部的闭合回路进行分析时, 本文做以下假设: (1) 电感线圈产生的交变磁场满足准静态; (2) 流道内部磁场均匀。由于颗粒经过检测区域时磁场分布均匀, 且 $S_1=S_2$, 因此回路 C 移动引起的磁通变化量 $d\phi$ 与穿过 S_3 的磁通量的负值相等, 其中 $S_3 = dl \times vdt$ 。该闭合回路以速度 v 移动 tS , 引起的磁通变化量为:

$$d\phi = - \int_c B \cdot (dl \times v) dt, \quad (2)$$

回路 C 运动所引起的感应电动势为:

$$-\frac{d\phi}{dt} = - \oint_c B \cdot (dl \times v) = \oint_c (v \times B) \cdot dl. \quad (3)$$

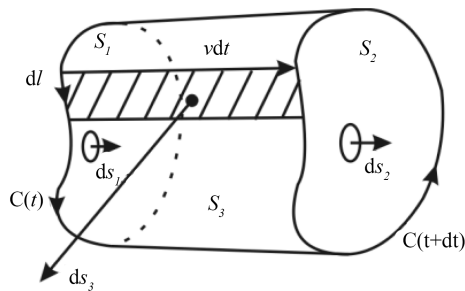


图2 金属颗粒某一截面在磁场中的示意图

Fig. 2 Diagram of a loop inside the particle in the magnetic field

从而得到当磁感应强度 B 随时间变化, 且回路 C 相对于磁场以速度 v 运动时的感应电动势 E' 为:

$$\oint_c E' \cdot dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds + \oint_c (v \times B) \cdot dl. \quad (4)$$

应用斯托克斯定理, 将闭合曲线积分转化为面积分:

$$\iint_s \nabla \times E' \cdot dS = \iint_s - \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS + \iint_s \nabla \times (v \times B) \cdot dS. \quad (5)$$

对于任意 S 是成立的, 所以两边被积函数相同:

$$\nabla \times E' = - \frac{\partial B}{\partial t} + \nabla \times (v \times B). \quad (6)$$

假设线圈的参考系与金属颗粒的参考系是以伽利略变换相关联, 设 v 为金属颗粒相对于线圈的相对速度, 则位置 r 、时间 t 的伽利略变换分别为 $r' = r - vt$, $t' = t$, 则运动对颗粒内部磁场 B' 的影响为:

$$B'(r, t) = B(r - vt, t). \quad (7)$$

根据麦克斯韦方程:

$$\nabla \times (B \times v) = B(\nabla \cdot v) - v(\nabla \cdot B_0) + (v \cdot \nabla)B - (B \cdot \nabla)v \quad (8)$$

根据数学变换, 式(7)可以表示为:

$$\begin{aligned} - \frac{\partial B'}{\partial t} &= - \frac{\partial B}{\partial t} + v \frac{\partial B}{\partial r} = - \frac{\partial B}{\partial t} + (v \cdot \nabla)B \\ &= - \frac{\partial B}{\partial t} - \nabla \times (B \times v) \end{aligned} \quad (9)$$

通过麦克斯韦方程最终求得^[15]:

$$E' = E + v \times B. \quad (10)$$

当颗粒进入磁场区域时, 磁场方向与颗粒运动方向垂直, 通过式(10)可以看出, 颗粒内部产生的电动势 E' 随着 v 的增大而增大。根据楞次定律可知, 颗粒内部的感应电流会阻碍由于铁颗粒进入磁场引起的磁场强度增大, 且颗粒内部的感应电流越大, 阻碍作用越明显。因此, 当颗粒经过检测区域时, 颗粒的过流速度越大, 产生的信号幅值越小。

3 检测芯片的设计与制作

目前针对微电感传感器检测信号的理论还不完善, 尚无包括所有影响因素的检测信号理论计算公式。通过2.2节的理论推导, 证明速度对检测信号幅值具有影响。为验证理论推导的准确性, 及探讨速度对磁场变化影响规律, 本文使用平面电感式微传感器进行检测实验。在前期研究中发现: 对于平面微电感传感器而言, 检测灵敏度随着匝数的增加, 线径、线间距和流道直径的减小而增大^[4,13,16]。采用密绕的方式制作微电感传感器, 线间距极其微小近似为0。考虑到实际加工工艺的因素, 本文所用平面电感式微传感器的匝数为33, 线径为80 μm , 内孔径为1 mm, 外径为6 mm, 流道直径为270 μm 。

平面电感式微流控检测芯片的制作过程主要包括：微电感式传感器的制作、传感器接头的焊接、PDMS的浇注、芯片固化成型、流道成型、芯片检查等。微流控检测芯片实物如图 3 所示。

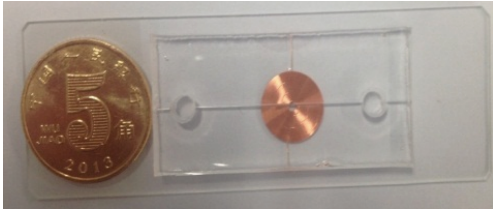


图 3 微流控检测芯片实物图
Fig. 3 Picture of detection chip

4 实验及结果分析

4.1 检测系统的搭建

检测系统包括激励单元、检测单元、动力单元、观察单元、显示单元等。使用安捷伦阻抗分析仪(Agilent E4980A)作为信号的激励源,产生频率为 2 MHz、电压为 2 V 的激励信号,同时该设备还可以对微电感传感器的电感值进行实时检测。微量注射泵作为动力单元,推动注射器,使油液以预定的不同速度通过微流控检测芯片。在显微镜下观察颗粒在微流控检测芯片中的流动状态,并通过软件在计算机上显示。安捷伦阻抗分析仪采集到的电感信号经过 LABVIEW 软件处理后,以实时曲线的形式在计算机上显示。检测系统如图 4 所示。

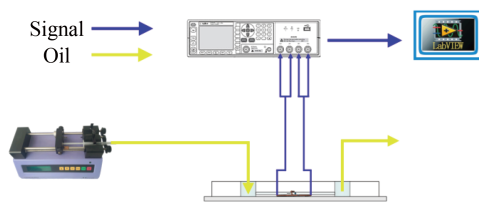


图 4 检测系统实物图
Fig. 4 Detection system diagram

4.2 实验

选用粒径 80~85 μm 的铁颗粒作为待测颗粒。将少量的铁颗粒加入到液压油中,配置实验所需的检测油样。用注射器吸取部分检测油样,并将注射器与微量注射泵相连。通过微量注射泵控制油

液的流动速度,将油液的流动速度分别设置为 0.02 mL/min、0.04 mL/min、0.06 mL/min、0.08 mL/min 和 0.10 mL/min。为防止偶然因素对实验数据产生偏差,以相同的速度进行 4 次油液检测,每次检测时间为 60 s。

4.3 结果分析

计算不同速度下油样通过检测区域产生的脉冲幅值的平均值,并绘制在表中,对 4 次实验所得的平均值再求平均值,以减少偶然因素的影响,同时计算脉冲幅值的误差。

通过表 1 和图 5 可以看出,当油液的流动速度为 0.02 mL/min 时,粒径在 80~85 μm 的铁颗粒产生的电感信号幅值约为 0.8 nh。

表 1 当油液的流动速度为 0.02 mL/min 时,检测粒径在 80~85 μm 的铁颗粒所得的信号值

Tab.1 Measured amplitude value when 80~85 μm iron particles with the velocity of 0.02 mL/min

实验次数	1	2	3	4
基础电感值/ μh	4.293 57	4.293 57	4.293 57	4.293 57
脉冲信号值/ μh	4.294 39	4.294 36	4.294 39	4.294 38
变化量/nh	0.817 86	0.787 86	0.817 86	0.807 86
变化平均值/nh	0.807 857			
误差/ E^{-5}	1.414 214			

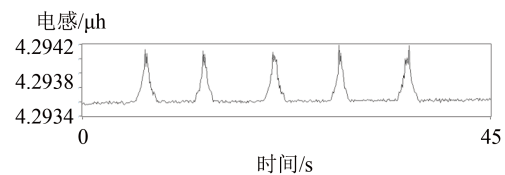


图 5 当油液的流动速度为 0.02 mL/min 时,粒径在 80~85 μm 的铁颗粒产生的电感信号

Fig. 5 Measured signal figure when 80~85 μm iron particles with the velocity of 0.02 mL/min

通过表 2 及图 6 可知,当油液的流动速度为 0.04 mL/min 时,粒径在 80~85 μm 的铁颗粒产生的电感信号幅值大约为 0.7 nh。

通过表 3 及图 7 可知,当油液的流动速度为 0.06 mL/min 时,粒径在 80~85 μm 的铁颗粒产生的电感信号幅值大约为 0.6 nh。

通过表 4 及图 8 可知,当油液的流动速度为

表 2 当油液的流动速度为0.04 mL/min时, 检测粒径在80~85 μm的铁颗粒所得的信号值

Tab.2 Measured amplitude value when 80~85 μm iron particles with the velocity of 0.04 mL/min

实验次数	1	2	3	4
基础电感值/μh	4.293 80	4.293 80	4.293 80	4.293 80
脉冲信号值/μh	4.294 51	4.294 5	4.294 52	4.294 49
变化量/nh	0.705 83	0.695 83	0.715 83	0.685 83
变化平均值/nh	0.700 833			
误差/E ⁻⁵	1.290 99			

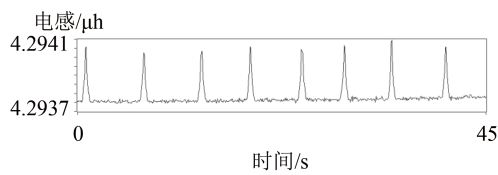


图 6 当油液的流动速度为0.04 mL/min时, 粒径在80~85 μm的铁颗粒产生的电感信号

Fig. 6 Measured signal figure when 80~85 μm iron particles with the velocity of 0.04 mL/min

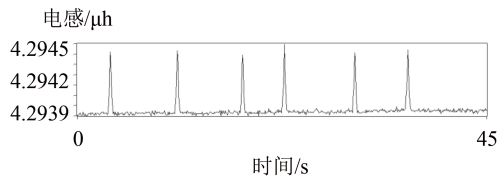


图 7 当油液的流动速度为0.06 mL/min时, 粒径在80~85 μm的铁颗粒产生的电感信号

Fig. 7 Measured signal figure when 80~85 μm iron particles with the velocity of 0.06 mL/min

表 4 当油液的流动速度为0.08 mL/min时, 检测粒径在80~85 μm的铁颗粒所得的信号值

Tab.4 Measured amplitude value when 80-85 μm iron particles with the velocity of 0.08 mL/min

实验次数	1	2	3	4
基础电感值/μh	4.294 02	4.294 02	4.294 02	4.294 02
脉冲信号值/μh	4.294 48	4.294 55	4.294 51	4.294 59
变化量/nh	0.455 385	0.525 385	0.485 385	0.565 385
变化平均值/nh	0.507 885			
误差/E ⁻⁵	4.787 14			

0.08 mL/min时, 粒径在80~85 μm的铁颗粒产生的电感信号幅值约为0.5 nh。

通过表 5 及图 9 可知, 当油液的流动速度为 0.10 mL/min时, 粒径在80~85 μm的铁颗粒产生的电

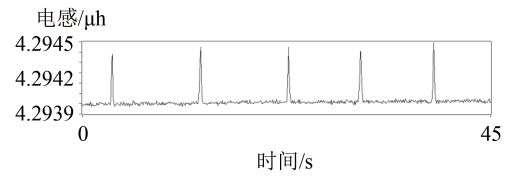


图 8 当油液的流动速度为0.08 mL/min时, 粒径在80~85 μm的铁颗粒产生的电感信号

Fig. 8 Measured signal figure when 80~85 μm iron particles with the velocity of 0.08 mL/min

表 5 当油液的流动速度为0.10 mL/min时, 检测粒径在80~85 μm的铁颗粒所得的信号值

Tab.5 Measured amplitude value when 80~85 μm iron particles with the velocity of 0.10 mL/min

实验次数	1	2	3	4
基础电感值/μh	4.294 79	4.294 79	4.294 79	4.294 79
脉冲信号值/μh	4.295 19	4.295 19	4.295 19	4.295 19
变化量/nh	0.395 789	0.465 789	0.465 789	0.395 789
变化平均值/nh	0.430 789			
误差/E ⁻⁵	4.041 5			

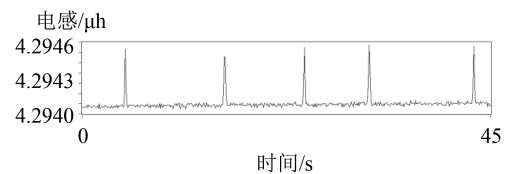


图 9 当油液的流动速度为0.10 mL/min时, 粒径在80~85 μm的铁颗粒产生的电感信号

Fig. 9 Measured signal figure when 80~85 μm iron particles with the velocity of 0.10 mL/min

感信号幅值约为0.4 nh。

计算每次检测所得的脉冲幅值的平均值, 并将所得的平均值按照速度汇总, 计算出不同速度下检测颗粒产生的脉冲信号值平均值和相应的误差, 将计算所得的数据汇总在表6中。根据表6中数据绘制粒径在80~85 μm之间的铁颗粒通过检测区域时产生的脉冲幅值与油样过流速度之间的关系, 如图10所示。将油样流动速度为0.10 mL/min时, 粒径在80~85 μm铁颗粒产生的脉冲信号为基准值, 计算出相同粒径范围内的铁颗粒不同速度通过检测区域产生的信号相对该基准值的增加量, 并推导出对应的变化率, 将计算所得的相对变化率汇总在表6中。根据相对变化率的数据, 绘制粒径在80~85 μm的铁颗粒通过检测区域时, 脉冲幅值相对

表6 实验数据汇总表

Tab.6 Summary sheet of experiment data

速度(ml/min)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
幅值平均值(nh)	0.807 857	0.700 833	0.609 8	0.507 885	0.430 789
相对变化率(%)	87.529 45	62.685 81	41.554 06	17.896 25	0
误差/E ⁻⁵	1.414 21	1.290 99	1.290 99	4.787 14	4.041 45

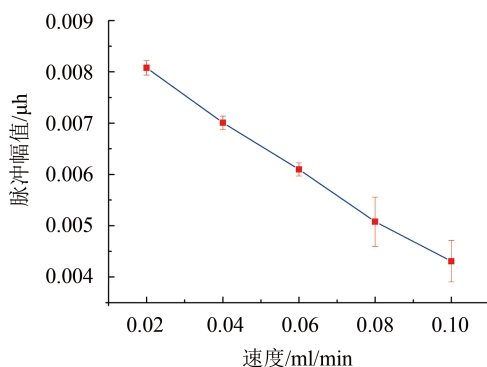


图10 检测信号幅值与过流速度关系图

Fig. 10 Measured relationship between signal amplitude and oil velocity

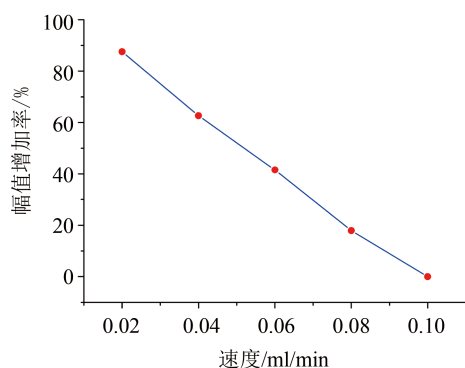


图11 速度引起检测信号幅值增加率关系图

Fig. 11 Relationship between signal amplitude increment rate

变化率与油样过流速度之间的关系如图11所示。

通过表6中幅值平均值的数据及图10, 可以明显看出: 当控制其他外在因素(如温度、油液粘度等因素)不变时, 检测形同粒径范围内的铁颗粒, 随着速度的增大, 脉冲信号的幅值逐渐减小。通

过Origin软件对数据进行拟合, 拟合结果显示线性相关系数为0.996, 说明脉冲信号幅值的大小与速度呈线性关系, 而且线性关系较强, 这与理论分析所得结论相符。分析表6中的数据和图11得出, 与油样过流速度为0.10 ml/min时产生的脉冲信号相比, 当油样过流速度减小时, 脉冲幅值均会相应的增大, 且增大的百分比与速度呈线性关系。当检测同一粒径范围内的铁颗粒时, 油样过流速度为0.02 ml/min时产生的脉冲信号幅值与油样过流速度为0.10 ml/min时相比, 可增加87.5%。

通过上述的分析可知, 当只减小油液的过流速度, 检测信号的幅值便可得到相应的增大, 且最大可增加87.5%, 这对于提高电感式微流控检测芯片的检测精度具有重要意义。因此, 在使用电感式微流控检测芯片进行金属颗粒检测时, 在通量要求的范围内, 可以通过适当的减小油样的过流速度, 以增大检测信号的幅值。

5 结论

本文对前期实验中发现的速度对检测信号幅值影响进行了深入的分析。首先对电感式微流控检测芯片的检测原理进行了介绍, 并通过理论推导, 得到了油样过流速度与检测信号幅值之间的理论关系式。采用控制变量的方法设计实验, 将油样的过流速度设置为变量(分别设置为0.02 mL/min、0.04 mL/min、0.06 mL/min、0.08 mL/min和0.10 mL/min), 其余因素(包括检测颗粒的粒径范围、油液的黏度等)不改变。实验结果显示, 随着油样过流速度的减小, 检测信号幅值逐渐增大, 油样过流速度为0.02 ml/min时产生的脉冲信号幅值与油样过流速度为0.10 ml/min时相比, 可增加87.5%。通过Origin软件对数据拟合处理后, 得到检测信号的幅值与油液的过流速度呈线性关系, 实验结果与理论分析所得结论相符。在使用电感式微流控检测芯片进行金属颗粒检测时, 可以通过适当地减小油样的过流速度, 以增强检测信号的幅值。对提高平面电感式微流控检测芯片的精度具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张兴明, 张洪朋, 陈海泉, 等. 微流体油液检测芯片分辨率-频率特性研究[J]. 仪器仪表学报. 2014(02): 427-433.

- ZHANG X M, ZHANG H P, CHEN H Q, *et al.*. Study on the resolution-frequency characteristic of microfluidic oil detection chip[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*,

- 2014(02): 427-433.(in Chinese)
- [2] 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(04): 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(04): 338-343.(in Chinese)
- [3] ZHANG X M, ZHANG H P, SUN Y Q, *et al.*. Effects of eddy current within particles on the 3D solenoid microfluidic detection chip [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 385: 546-549.
- [4] ZHANG H P, HUANG W, ZHANG Y D, *et al.* Design of the microfluidic chip of oil detection [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 117: 517-520.
- [5] 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 Z, ZHANG Y J. The design of an on-line monitoring sensor of wear particle and the analysis of its Characteristic [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2002(4): 333-338. (in Chinese)
- [6] DU L, ZHU X, 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.
- [7] ZHANG H, CHON C H, PAN X, *et al.*. Methods for counting particles in microfluidic applications [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 7(6): 739-749.
- [8] 徐涛, 高玉成, 武星. 对于光阻法在对小粒径微粒检测时的原理分析[J]. 仪器仪表学报, 2005, 01: 13-16+22.
XU T, GAO Y C, WU X. Analysis of light-blockage principle in small particle size measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 01: 13-16+22. (in Chinese)
- [9] DU L, ZHE J. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring [J]. *Tribology International*, 2011, 44(2): 175-179.
- [10] ZHU X, DU L, ZHE J. An integrated lubricant oil conditioning sensor using signal multiplexing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(1): 015006.
- [11] 苑伟政, 焦文龙, 常洪龙. 微流控的系统级设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12):3141-3151.
FAN W ZH, JIAO W L, CHANG H L. System level design of microfluidics[J]. *Chinese Journal of Optical and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 3141-3151. (in Chinese)
- [12] 徐征, 王继章, 杨锋, 等. 辅助溶剂对PMMA微流控芯片模内键合的影响[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 321-328.
XU ZH, WANG J ZH, YANG D, *et al.*. Effect of assistant solvent on in-mold bonding of PMMA microfluidic chips[J]. *Chinese Journal of Optical and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 321-328. (in Chinese)
- [13] 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: 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(04): 762-767. (in Chinese)
- [14] 郭力. 微流体油液检测芯片的优化及信号分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
GUO L. *Optimization and signal analysis of microfluidic oil detection chip*[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [15] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 高等教育出版社, 2006
XIE CH F, RAO K J. *Electromagnetic Fields and Magnetic Waves*[M]. Higher Education Press, 2006
- [16] 张春花. 基于微流体芯片的液压油金属颗粒检测研究[D]. 大连海事大学, 2012.
ZHANG CH H. *Study on the metal particle detection in hydraulic oil based on microfluidic chip*[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)

作者简介:



刘恩辰 (1991-), 男, 吉林长春人, 2014年于大连海事大学获得工学学士学位, 主要从事微流控芯片技术、机电一体化等。E-mail: liuenchen1992@163.com

导师简介:



张洪朋 (1978-), 男, 辽宁铁岭人, 教授、博士生导师, 2000年于大连海事大学获得学士学位, 2005年于大连海事大学获得博士学位, 主要从事轮机工程、机电一体化、微流体芯片技术等。Email: Zhppeter@163.com