

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.015

基于微流控谐振式芯片的金属颗粒检测^{*}

虞子雷 张洪朋 曾霖 滕怀波
(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

摘要: 液压系统中大部分的异常磨损是液压油中的金属颗粒造成的。通过检测这些金属颗粒可以及时预测故障并减少损失。由此设计了一种简单有效的液压油微小金属颗粒快速检测系统。基于 LC 谐振的原理进行金属颗粒检测,通过理论分析了检测的可行性;设计并制作了微流控检测芯片,芯片的流道为 300 μm ;在所搭建的检测系统上进行了金属颗粒计数检测。实验结果表明,在所有参数一致以及颗粒相同的情况下,谐振式芯片的颗粒检测的信噪比优于单线圈式检测芯片的信噪比。当激励频率高于谐振频率时,铁磁性颗粒通过检测区域输出信号的脉冲向上,当激励频率低于谐振频率时,铁磁性颗粒通过检测区域输出信号的脉冲向下,非铁磁性金属颗粒则相反。所设计的微流控检测芯片及其检测系统可实现金属颗粒的区分检测,在实验室条件下,最小可对 50 μm 的铁颗粒和 110 μm 的铜颗粒进行区分检测。

关键词: 金属颗粒检测;微流控芯片;谐振电路;信噪比

中图分类号: TP212.1;TN129 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8030

Detection of metal particles based on micro-fluidic resonant chip

Yu Zilei Zhang Hongpeng Zeng Lin Teng Huaibo
(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Most of the abnormal wear in the hydraulic system is caused by the metal particles in the hydraulic oil. By detecting these metal particles, the fault can be predicted on time and the loss can be reduced. A simple and effective hydraulic oil micro-metal particle rapid detection system is designed. Based on the principle of LC resonance for metal particle detection and the feasibility of experiment is analyzed theoretically. Design and manufacture of micro-fluidic detection chip, the diameter of micro-channel in the experiment is 300 μm . The metal particle counting test is carried out on the detection system. The experiment results show that the signal-to-noise ratio of LC resonance detection chip is better than the single coil detection chip when all parameters are the same. When the excitation frequency is higher than the resonance frequency, the ferromagnetic particles passing the detection area will produce an upward pulse. When the excitation frequency is lower than the resonance frequency, the ferromagnetic particles passing the detection area will produce a downward pulse. And the non-ferromagnetic metal particles are the opposite. The micro-fluidic chip and its system can be achieved to distinguish the detection of metal particles. In the experiment condition, a minimum of 50 μm of iron particle and 110 μm of copper particle can be achieved to distinguish the detection.

Keywords: metal particle detection; micro-fluidic chip; resonance circuit; signal-to-noise ratio

0 引 言

液压系统因其布置灵活、效率高、可实现无级变速等

优点,在工业领域应用十分广泛。在船舶工程领域,液压系统可作为舵机、推进系统、起重机械等主要装置的重要组成部分。因此,对液压系统的保护显得尤为重要。液压油是液压系统的生命血液,超过 75% 的液压系统故障

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

* 基金项目:国家自然科学基金(51679022)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132017013)资助项目

事由于液压油污染引起的^[1]。当液压系统工作时,液压油难免会受到各种各样的污染。其中,固体金属颗粒污染物是液压油污染的主要原因。由数据显示,液压系统正常工作时,油中磨粒的浓度和大小较为恒定,粒径通常为10~20 μm。当异常磨损出现时,油中磨粒的浓度将增加,其粒径将增大至50~100 μm,具有潜在的危害^[2-3]。

常规油液分析技术主要包括光谱分析法、铁谱分析法、磁塞分析法、滤网阻尼法以及颗粒计数法。其中,颗粒计数法是当颗粒通过检测装置时产生脉冲,根据脉冲的数量和幅值的大小对油液中的颗粒进行计数、属性判断和尺寸测量,对液压系统的磨损状况做出准确的分析^[4-6]。颗粒计数法可以实现在线监测,对机械设备的运行状态进行实时预测,避免设备突发性故障,减少停机带来的经济效益损失^[7-8]。

基于颗粒计数法的金属颗粒检测在近年来得到了良好的发展,主要包括声光阻检测法、声学检测法、电感式检测、电阻式检测法和电容式检测法。其中,电容检测法^[9]易受到水分子或空气泡的影响,而电阻检测法无法对金属颗粒进行区分检测。光阻检测法^[10]可以对颗粒进行区分检测,且检测精度较高,但对油液的要求也较高,浑浊度较高的油液对检测准确度度受影响很大。声学检测法可以对颗粒计数且对尺寸大小进行判断,但易受环境温度、设备噪声及背景噪声的影响。相比较而言,电感检测法对金属颗粒检测时能够对属性不同的金属颗粒进行区分计数,且不受气泡或水珠等的影响,更适用于金属颗粒的检测。

电子科技大学傅舰艇等人^[10]设计了反向三线圈电感式传感器,但这种传感器主要针对大于100 μm的金属颗粒。军械工程学院的范洪波等人^[11]设计了一种基于电感平衡原理的双线圈式传感器,这种传感器可以检测100 μm以上的铁颗粒和500 μm以上的铜颗粒。基于此,本文叙述了一种低成本的谐振式微流控检测芯片,能够对金属颗粒进行区分检测,在保证所有参数一致以及颗粒相同的情况下,谐振式芯片的铁磁性颗粒检测的信噪比优于单线圈式检测芯片^[12]的信噪比。在实验室条件下,最小可对50 μm的铁颗粒和110 μm的铜颗粒进行区分检测,相比单线圈式芯片,对检测下限有了进一步的提升。

1 理论分析

基于本团队前期的研究成果,在单线圈式微流控油液检测芯片的基础上,增加了一个小电容,与线圈并联组成了检测电路,用模塑法加工出聚二甲甲基硅氧烷(PDMS)微流控芯片,如图1所示。其中,平面线圈部分

为检测区域,当对整个电路通入高频交流电时,线圈会产生磁场。当颗粒经过线圈时,颗粒会被磁化,使原有磁场磁感应强度增大;同时,颗粒内部会产生涡流,涡流效应会抵消部分原有磁场,使原磁场磁感应强度降低。铁磁性颗粒(以铁为例)的相对磁导率 $\gg 1$,因此当铁磁性颗粒经过线圈时会使原磁场的磁感应强度增大,故线圈的电感值会增加;非铁磁性金属颗粒(以铜为例)的相对磁导率约为0.999 1,因此当非铁磁性金属颗粒经过线圈时涡流效应是影响磁场分布的主要因素,磁场的磁感应强度会降低,故线圈的电感值会降低^[13-16]。

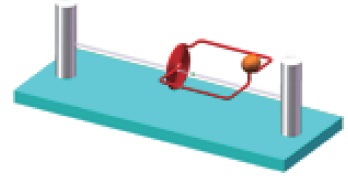


图1 谐振式油液检测芯片

Fig.1 Resonance oil detection chip

此微流控谐振式芯片的等效电路如图2所示,平面线圈等效为一个电阻和电感串联,整个电路由串联支路(R_0 和 L_0)与一个电容 C_0 并联组成。

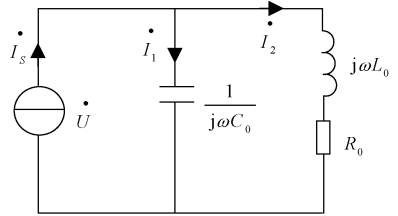


图2 谐振式油液芯片原理

Fig.2 Schematic diagram of resonance oil detection chip

当没有颗粒经过线圈时,整个电路的导纳为:

$$Y(j\omega) = j\omega C_0 + \frac{1}{R_0 + j\omega L_0} \quad (1)$$

式中:角频率 ω 由 $\omega = 2\pi f$ 定义,频率 f 是交流电路的激励频率^[17-18]。当电路的激励频率为谐振频率 f_0 时,则整个电路导纳的虚部为0,此时整个电路的导纳为:

$$Y(j\omega_0) = \frac{R_0}{\omega_0^2 L_0^2 + R_0^2} \quad (2)$$

其中,谐振频率 f_0 为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{1 - \frac{C_0 R_0^2}{L_0}} \quad (3)$$

当颗粒经过线圈时,线圈的电感值和电阻值发生改变,分别变为 L_1 和 R_1 ,而整个电路的激励频率不变,此时整个电路的导纳的虚部为:

$$\text{Im}[Y(j\omega)] = j\omega C_0 - \frac{j\omega L_1}{\omega^2 L_1^2 + R_1^2} \quad (4)$$

经测量,电感线圈的原电感值为 $1.3 \mu\text{H}$,原电阻值为 0.80Ω ,贴片电容的大小为 $1 \times 10^5 \text{ pF}$ 故谐振频率的大小约为 0.43 MHz 。当有颗粒经过时,导纳虚部的变化为:

$$\Delta \text{Im} [Y(j\omega)] = \frac{j\omega L_1}{\omega^2 L_1^2 + R_1^2} - \frac{j\omega L_0}{\omega^2 L_0^2 + R_0^2} \quad (5)$$

可简化为:

$$\Delta_1 = \omega \Delta L + \frac{(R_0 + \Delta R)^2}{\omega(L_0 + \Delta L)} - \frac{R_0^2}{\omega L_0} \quad (6)$$

判断式(6)是否大于 0 可以判断出整个电路的导纳值的变化。一般 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ 的金属磁性颗粒经过时,电阻的变化量的数量级为 10^{-5} ,电感的变化量的数量级为 10^{-10} ,由计算易知,当 $\Delta_1 > 0$ 时, $\omega > \omega_0$ 时,铁磁性颗粒通过线圈时,会使整个电路的导纳值减小;当 $\Delta_1 < 0$ 时, $\omega < \omega_0$ 时,铁磁性颗粒通过线圈时,会使整个电路的导纳值增大。同理,当非铁磁性金属颗粒经过时,与铁磁性颗粒的现象刚好相反。

2 实验介绍

2.1 微流控芯片的制作

在实验中,本文选择了线径为 0.1 mm 、匝数为 20 匝的平面电感线圈。经检测,电感线圈在高频激励电压下,其电感值为 $1.3 \mu\text{H}$ 、电阻值为 0.80Ω 。

芯片的制作过程如图 3 所示。首先将 $300 \mu\text{m}$ 铁丝穿过两个线圈的中心,且这两个线圈与电容片并联焊接在玻璃基片上。然后将 PDMS 胶与固化剂按照一定的比例混合,在完成抽气操作后,将混合液体倒在基片上且覆盖过铁丝、线圈和电容。之后,将倒上混合液的基片放入烤箱中烘烤固化。最后,将固化好的芯片中的铁丝抽出且在芯片尾部开一个小口以方便油液流出,芯片即制作完毕。

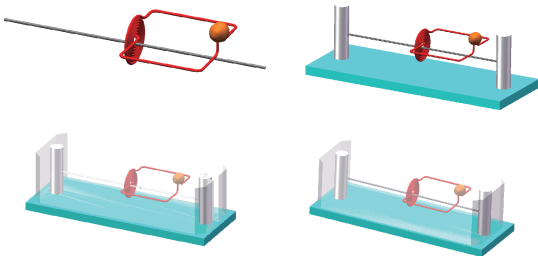


图 3 谐振式检测芯片制作过程

Fig. 3 Manufacturing process of resonance oil detection chip

2.2 实验设备

完整的实验系统如图 4 所示。主要由微流控检测芯片、阻抗分析仪 (Agilent E4980A)、微量注射泵 (Harvard pump 11 plus) 以及计算机等实验设备组成。

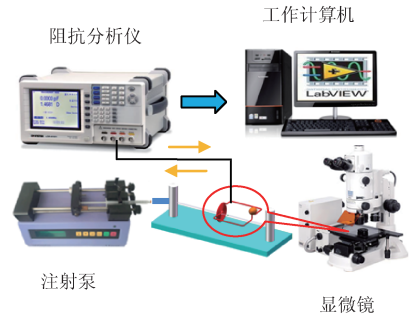


图 4 检测系统

Fig. 4 The detection system

作为检测颗粒通过线圈的传感器,微流控芯片是整个实验的核心。阻抗分析仪不仅可以输出低电压高频交流电,使线圈产生交变磁场,而且可以实时监控电路的等效阻抗变化,并将数据通过模数转换器传输到电脑。微量注射泵以一定的速率推动注射器,将混着颗粒的油液推入芯片,当颗粒经过芯片的检测区域时,在颗粒的涡流和磁导率的组合作用下,线圈的复合磁通量变化,线圈的阻抗特性也发生变化,整个并联电路的阻抗值也随之改变,由阻抗分析仪检测采集。采集到的数据经阻抗分析仪处理后传输到电脑,通过 LabVIEW 软件将整个电路的阻抗变化值进行显示,形成的脉冲的方向和大小分别与颗粒的属性和尺寸相关。

3 实验分析

通过实验对谐振式芯片的工作性质进行了探究。在实验中,铁磁性颗粒选铁颗粒为代表性颗粒,非铁磁性金属颗粒选铜颗粒为代表性颗粒。

实验首先设置阻抗分析仪的激励电压为 2 V ,根据之前的工作,激励频率变化对铁磁性颗粒的影响不大,激励频率越大则铜颗粒的输出效果越佳^[14]。故对铁颗粒,设置阻抗分析仪的激励频率为 0.45 MHz ;对铜颗粒,经过单线圈式芯片的激励频率为 2 MHz ,经过谐振式芯片的谐振频率为 0.65 MHz 。针对同一颗粒,保证其他参数一致,将单线圈芯片的电压信号的电感参数输出的信噪比与谐振式芯片的电压信号的电感参数输出的信噪比进行对比。然后保证其他参数不变的情况下,改变谐振式芯片的激励频率,对谐振式芯片的频率特性进行研究。最后对该芯片的检测下限进行了探究。

3.1 不同芯片的检测信号比较

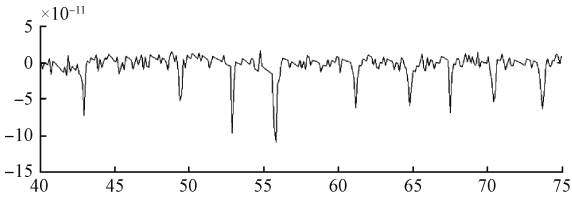
首先,对同一颗粒经过谐振式芯片和单线圈式芯片的电感变化进行了检测 and 数据处理,实验结果如表 1 所示。由实验结果可以看出,谐振式芯片检测的信号信噪比要优于单线圈式芯片的检测信号的信噪比,且随着颗

粒大小的增大,检测信号的信噪比也会变得更好。实际信号以 65 μm 铁颗粒为例如图 5 所示。

表 1 不同芯片下不同颗粒的信噪比

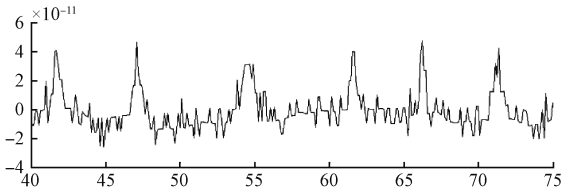
Table 1 Different particle's signal-to-noise ratio under different chip

颗粒性质	颗粒大小/μm	谐振式芯片信噪比	单线圈式芯片信噪比
铁颗粒	65	4.03	2.72
铁颗粒	120	5.55	4.75
铁颗粒	150	6.70	5.80
铜颗粒	120	2.58	1.00
铜颗粒	150	2.81	2.29
铜颗粒	180	3.32	2.76



(a) 谐振式芯片检测65 μm铁颗粒的输出信号

(a) 65 μm iron particle output signal of resonance detection chip



(b)单线圈式芯片检测65 μm铁颗粒的输出信号

(b) 65 μm iron particle output signal of single coil detection chip

图 5 谐振式芯片与单线圈芯片的输出信号对比

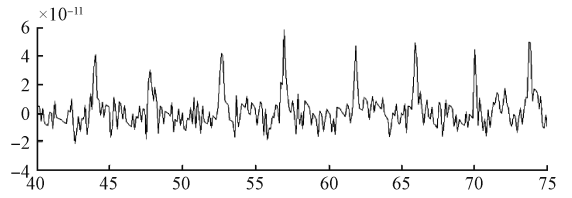
Fig. 5 Comparison between resonance detection chip and single coil detection chip

3.2 不同频率对芯片检测的影响

然后,实验以频率为变化参数,对谐振式芯片进行研究。经实验发现,对于铁颗粒,当激励频率高于芯片的谐振频率时,铁颗粒通过检测区域输出信号为向上的脉冲;当激励频率低于谐振频率时,铁颗粒通过检测区域输出信号为向下的脉冲,如图 6 所示。对于铜颗粒则恰好相反,信号脉冲如图 7 所示。

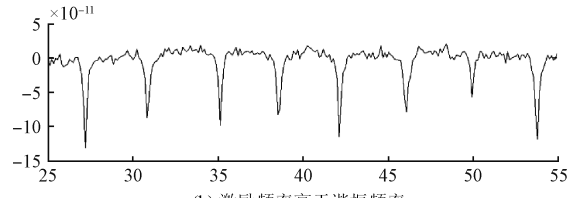
3.3 谐振式芯片的检测下限

最后,通过实验测得谐振式芯片的检测下限。其中,在实验室条件下,最小可对 50 μm 的铁颗粒和 110 μm 的铜颗粒进行区分检测。检测的输出信号图如图 8 所示。



(a) 激励频率低于谐振频率

(a) The excitation frequency lower than resonance frequency

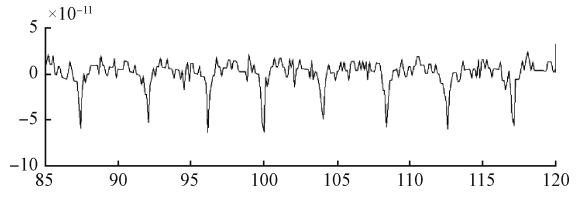


(b) 激励频率高于谐振频率

(b) The excitation frequency higher than resonance frequency

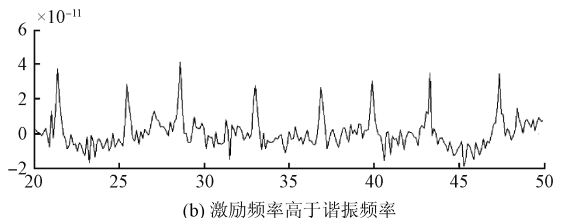
图 6 铁颗粒不同频率下的输出信号

Fig. 6 Output signal of iron particle under different frequency



(a) 激励频率低于谐振频率

(a) The excitation frequency lower than resonance frequency

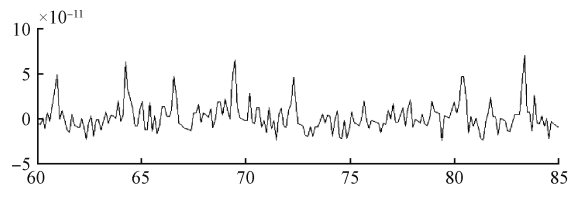


(b) 激励频率高于谐振频率

(b) The excitation frequency higher than resonance frequency

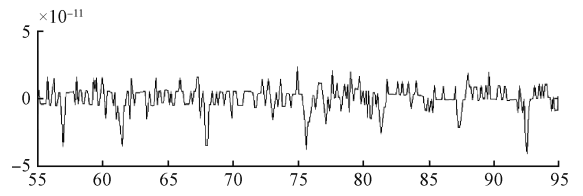
图 7 铜颗粒不同频率下的输出信号

Fig. 7 Output signal of copper particle under different frequency



(a) 50 μm铁颗粒输出信号

(a) 50 μm iron particle output signal



(a) 110 μm铜颗粒输出信号

(a) 110 μm copper particle output signal

图 8 谐振式芯片的检测下限

Fig. 8 The floor level of resonance chip detection

4 结 论

本文介绍了一种新型的基于谐振式微流控技术的油液检测芯片。相比于同样参数的传统的单线圈式检测芯片,谐振式芯片拥有更好的检测信噪比和检测精度。谐振式芯片在不同的激励频率下均能够实现金属颗粒的区分检测,最小可检测到 50 μm 的铁颗粒和 110 μm 的铜颗粒,具有较好的检测能力。

对检测芯片信号输出规律的研究结果有助于优化芯片的设计,提高芯片的检测精度,对制作便携式的油液金属磨粒计数设备及推动故障诊断技术发展具有积极意义。

参考文献

- [1] ZHANG X M, ZHANG H P, SUN Y Q, et al. Effects of eddy current within particles on the 3D solenoid microfluidic detection chip [C]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 385: 546-549.
- [2] ZHANG H P, HUANG W, ZHANG Y D, et al. Design of the microfluidic chip of oil detection [C]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 117: 517-520.
- [3] 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.
- [4] KUMAR M, MUKHERJEE P S, MISRA N M. Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: A review [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2013, 65(1): 3-11.
- [5] WU T, PENG Y, WU H, et al. Full-life dynamic identification of wear state based on on-line wear debris image features [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 42(1): 404-414.
- [6] WANG J, WANG X. A wear particle identification method by combining principal component analysis and grey relational analysis [J]. Wear, 2013, 304(1): 96-102.
- [7] 曾如文, 万登攀, 李玉忠. 液压油固体颗粒污染度检测误差分析及控制 [J]. 液压气动与密封, 2015(7): 66-69.
ZENG R W, WAN D P, LI Y ZH. Error Analysis and control of hydraulic fluid solid particle contamination inspection [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2015(7): 66-69.
- [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(3): 42-46.
LI M Q, ZHAO K, SONG Y X, et al. Microfluidic capacitance sensor for detecting metal wear debris in lubrication oil [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013(3): 42-46.
- [9] 曾霖, 张洪朋, 刘恩辰, 等. 船舶液压油中微小颗粒的快速检测与计数研究 [J]. 机床与液压, 2015, 43(17): 20-23.
ZENG L, ZHANG H P, LIU EN CH, et al. Research on rapid detection and accounting of small particles in marine hydraulic oil [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(17): 20-23.
- [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, (02): 5-7.
FU J J, ZHAN H Q, GU J. Detection Circuit Design of Three-coil Inductive Particle Sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2012, (02): 5-7.
- [11] 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.
- [12] ZHANG X, ZHANG H, SUN Y, et al. Research on the output characteristics of microfluidic inductive sensor [J]. Journal of Nanomaterials, 2014(15): 1-7.
- [13] 刘秉安. 铁芯和铁氧体饱和和电感量的测量 [J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 63-66.
LIU B AN. Measuring core and ferrite saturable inductance [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(8): 63-66.
- [14] 周德强. 铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测传感机理研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 989-995.
ZHOU D Q. Research on sensing mechanism of ferromagnetic component flaw using pulsed eddy current testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 989-995.
- [15] 许成文, 梁步猛, 舒亮, 等. 智能交流接触器动态电感测量及合闸位移预测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 1050-1056.
XU CH W, LIANG B M, SHU L, et al. Dynamic inductance measurement and closing displacement prediction for intelligent AC contactor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 1050-1056.
- [16] 王博, 董威. 高频无极灯谐振电路的建模和仿真分析 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 27-30.
WANG B, DONG W. Modeling and simulation analysis of resonant circuit of high frequency electrodeless lamp [J].

Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(5): 27-30.

[17] 姜春燕,周洁敏,周迪,等. 基于Maxwell的半桥LLC谐振变换器平面磁元件优化设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(3): 25-30,44.

JIANG CH Y, ZHOU J M, ZHOU D, et al. Optical design of magnetic components in half bridge LLC resonant converter based on Maxwell [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(3):25-30,44.

[18] 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, 35(2): 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, 35(2):427-423.

作者简介



虞子雷, 2016年于大连海事大学获得工学学士学位,现为大连海事大学硕士研究生,主要从事微流控芯片技术、机电一体化等。

E-mail: yzl950417@126.com

Yu Zilei received B. Sc. from Dalian Maritime University in 2016. He is now a M. Sc. candidate in Dalian Maritime University. His main research interest includes mechatronics and microfluidics.

张洪朋(通讯作者),2005年于大连海事大学获得博士学位,教授、博士生导师,主要从事轮机工程、机电一体化、微流体芯片技术等。



E-mail: Zhppeter@163.com

Zhang Hongpeng (Corresponding author) received Ph. D. from Dalian Maritime University in 2005. He is now a professor and Ph. D. supervisor in Dalian Maritime University. His main research interests include marine engineering, mechatronics and microfluidics.

曾霖,2013年于大连海事大学获得理学学士学位,博士研究生,主要从事微流控芯片技术、机电一体化等。



E-mail: bob666zl@126.com

Zeng Lin received B. Sc. from Dalian Maritime University in 2013. He is now a Ph. D. candidate in Dalian Maritime University. His main research interest includes mechatronics and microfluidics.

滕怀波,2012年于重庆交通大学获得工学学士学位,硕士研究生,主要从事微流控芯片技术、机电一体化等。



E-mail: 1021759049@qq.com

Teng Huaibo received B. Sc. from Chongqing Jiaotong University in 2013. He is now a M. Sc. candidate in Dalian Maritime University. His main research interest includes mechatronics and microfluidics.