

文章编号 1004-924X(2015)增-0396-07

## 高精度液压油微小颗粒检测系统

刘恩辰, 张洪朋\*, 曾霖, 王传航, 陈海泉, 孙玉清  
(大连海事大学轮机工程学院, 辽宁大连 116026)

**摘要:**针对液压系统故障预测与诊断的需求,设计了简单有效的油液微小颗粒快速光学检测系统。采用光阻法进行颗粒检测;设计并制作了微流控检测芯片,利用 ANSYS 软件对聚焦区域进行了流体速度和流动轨迹仿真;在所搭建的光学检测系统上进行了颗粒检测计数实验和浓度检测实验,并结合光阻法检测原理对实验所得数据和信号进行了理论分析。实验结果表明:20  $\mu\text{m}$  颗粒的检测信号具有较高的信噪比。结合所编 JAVA 程序完成了相应的颗粒计数;当液压油中颗粒浓度增大时,检测信号也随之增大;颗粒浓度为  $2\ 000 \times 10^{-6}$  的油样通过检测区域所产生的脉冲信号大约是浓度为  $100 \times 10^{-6}$  的油样所产生的脉冲信号的 6 倍。设计的微流控检测芯片及光学检测系统可用于液压油中微小金属颗粒检测,可实现 20  $\mu\text{m}$  以上颗粒的检测与计数,并能够区分含有不同颗粒浓度的油液。

**关键词:**液压油;微流控检测芯片;颗粒检测;故障诊断

**中图分类号:**TH137;TP212.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0396

## Detection system of small particles in hydraulic oil

LIU En-chen, ZHANG Hong-peng\*, ZENG Lin, WANG Chuan-hang, CHEN Hai-quan, SUN Yu-qing

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

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

**Abstract:** To help the fault prediction and diagnosis of a hydraulic system, a simple and effective optical detection system was designed to detect rapidly small particles in hydraulic oil. The light blocking optical method was used in this paper, the microfluidic detection chip for hydraulic oil detection was designed and fabricated, and flow speed and the trajectory of oil in a focus area were simulated by ANSYS software. The experiments of particle detection, counting and particle concentration detection were performed in the optical detection system, the data and signal in the experiments were analyzed with optical detection principle. Experimental results indicate that the signal-to-noise ratio of 20  $\mu\text{m}$  particle is higher, and the counting of particles is realized by JAVA program. The amplitude of signal increases with increasing particle concentration, and the signal amplitude caused by  $2000 \times 10^{-6}$  is 6 times as high as that caused by  $100 \times 10^{-6}$ . The microfluidic chip and the detection system designed in the paper realize the rapid detection of small particles with the diameter larger than 20  $\mu\text{m}$  in hydraulic oil, and the oil with different particle concentrations can be distinguished.

**Key words:** hydraulic oil; microfluidic detection chip; particle detection; fault diagnosis

收稿日期:2015-04-15;修订日期:2015-05-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51205034);交通运输部资助项目(No. 2013329225260);中央高校基本科研业务专项资金(No. 3132014332)

## 1 引言

液压系统以体积小、控制精准、反应灵敏、可实现无级变速等优点被广泛应用于工业生产的各个领域。据相关数据显示,超过 75% 的液压系统故障是由于液压油污染造成的,而固体颗粒污染物的危害最大<sup>[1]</sup>。这些固体颗粒污染物来自于液压系统内部的磨损和外部粉尘的侵入。相关研究表明:当液压系统正常工作时,油液中固体颗粒污染物的浓度较低且维持在稳定的水平,固体磨粒的粒径在 10~20  $\mu\text{m}$  之间;当液压系统发生异常磨损时,油液中固体颗粒的浓度会急剧增加,且固体的磨粒的粒径将增至 50~100  $\mu\text{m}$ ,甚至更大<sup>[2]</sup>。对油液中的固体磨粒的粒径和浓度进行检测,不但可以对液压系统的运行状态进行准确评估,控制油液中固体磨粒的污染度在关键元件的可承受范围内,提高系统的运行稳定性,延长系统的工作寿命,而且可以根据磨粒的性质对系统进行故障诊断,因此,人们越来越重视油液中固体磨粒的检测技术研究<sup>[3-4]</sup>。

根据检测原理的不同,颗粒检测方法可分为电磁学检测法、声学检测法、光学检测法<sup>[5]</sup>。光学检测法具有检测灵敏度高、速度快等优点,因此在颗粒检测方面应用较为广泛,其中最主要的方法便是光阻法<sup>[6]</sup>。光阻法的检测原理为:当固体磨粒经过光学检测区域时,磨粒会遮挡住部分本应照射在光电传感器上的光,光电传感器会将光强度信号转换为电信号,并最终以电信号的形式输出和显示,供人们进行结果分析<sup>[7]</sup>。电信号的大小取决于颗粒在迎光面的投影面积,因此,可以通过电信号的大小判断颗粒的粒径。同理,当磨粒的浓度增大时,光强度变化较大,电信号也会相应增大<sup>[8]</sup>。目前,基于微流体技术的光阻检测装置已经广泛应用在生物细胞、细菌检测等领域<sup>[9,10]</sup>。

本文采用光阻法,在微流体芯片内进行液压油中微小金属颗粒的单个检测与计数和微小金属颗粒浓度检测。通过搭建的光学检测系统,成功实现了液压油中微小金属颗粒(粒径在 20~40  $\mu\text{m}$  之间)的快速检测,通过所编写的 JAVA 程序完成了颗粒计数,并实现了 10  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  两种

粒径铁粉所配置的不同浓度油样的检测。

## 2 检测芯片的设计、仿真及制作

### 2.1 检测芯片的设计

微流控检测技术是在微尺度下完成相关的检测操作,具有微型化、效率高、精度高、易于集成等优点<sup>[10]</sup>。用于颗粒检测的微流体芯片应满足下述几点要求<sup>[11]</sup>:(1)所设计的微流体检测芯片制作过程简单,并且具有较高的可靠性;(2)可对微流道内的流体进行简单的控制;(3)可实现聚焦功能,使颗粒在检测区域中心流过,以提高检测的灵敏度。微流体检测芯片结构设计图如图 1 所示。

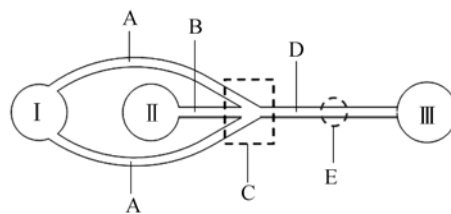


图 1 检测芯片设计图

Fig. 1 Design diagram of detection chip

图中 I 为鞘液池, II 为样液池, III 为废液池, A 为鞘液流道, B 为样液流道, C 为样液与鞘液聚焦区域, D 为检测流道, E 为光学检测区域。其中,流道 A、B、D 的宽度为 100  $\mu\text{m}$ ,且流道高度均为 100  $\mu\text{m}$ 。在聚焦区域,流道 A、B 之间的夹角为 30 度。通过负压驱动,使得鞘液池 I 和样液池 II 中的油液向废液池 III 处流动。在 C 处进行压力聚焦,样液在两侧鞘液的夹流作用下实现聚焦,使得样液在检测流道的中央通过检测区域。聚焦在单个颗粒检测过程中,可以保证颗粒呈单排依次地通过检测区域,避免了颗粒同时经过检测区域时产生的计数错误和流道堵塞;在颗粒浓度检测过程中,聚焦可以将颗粒集中在流道中心两侧,使遮光效果更明显,检测更加准确。

### 2.2 聚焦效果仿真

为验证所设计的检测芯片的聚焦效果,利用 ANSYS CFX 对芯片结构 C(汇集聚焦区域)内部流体的聚焦效果进行模拟仿真。

经过后处理的流速仿真结果如图 2 所示。其中不同的速度对应不同的颜色,蓝色表示速度慢,

红色表示速度快。从图中可以看出检测流道内部的速度明显较其他区域高,这是由于油液被聚焦之后,油液流经区域宽度减小,在流量不变的情况下,聚焦之后的流速较聚焦前要快。

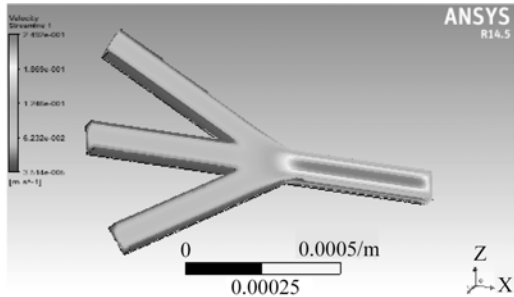


图 2 流速仿真结果图

Fig. 2 Velocity diagram of simulation results

为了更直观地反映聚焦效果,在后处理时将油液和鞘液都设为常量,图 3 所示为油液和鞘液在流道内的流动轨迹图,其中深蓝色为鞘液,黄色为油液,流动方向为从左到右。被聚焦之后的油液宽度大概为  $35 \mu\text{m}$ ,由此可知,油液中的固体颗粒也将被聚焦在  $35 \mu\text{m}$  内,从而在颗粒检测计数过程中实现颗粒呈单排依次通过流道的检测区域,在浓度检测过程中,样液聚集在流道中心两侧通过,使得检测结果更加准确。

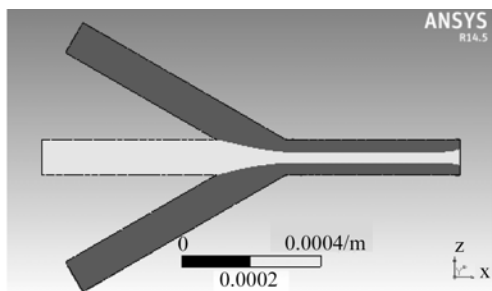


图 3 流体轨迹图

Fig. 3 Trajectory figure of fluid

从以上两幅仿真结果图中可以看出,芯片结构对油液中颗粒的聚焦效果良好,能够保证样液在流道的中央附近通过检测区域,而不出现颗粒并排,遮光效果不明显,或堵塞流道的现象。

### 2.3 微流控检测芯片的制作

目前微流控芯片的制作方法主要包括:激光烧蚀法、模塑法、软光刻法等<sup>[12]</sup>。与其他制作方法相比,软光刻法的精度更为准确,采用软光刻法

进行微流控检测芯片的制作,主要过程为:①打印检测芯片掩膜;②制作微流控检测芯片模具;③浇注 PDMS,固化成型;④等离子清洗与封接<sup>[11]</sup>。制作完成的微流控检测芯片实物如图 4 所示。

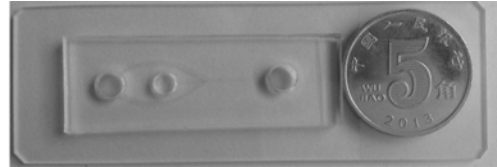


图 4 检测芯片实物图

Fig. 4 Picture of detection chip

## 3 检测系统的设计与搭建

液压油中金属颗粒检测系统主要由激光源(上海熙隆公司生产的 488 nm 圆光蓝光斑半导体激光器)、微流体芯片、光电二极管(北京敏光科技有限公司生产的 0.5mm 硅 PIN 光电探测器二极管)、信号放大电路、数据采集卡(美国国家仪器公司(NI)生产的 USB6259BNC 型号数据采集卡)、微量注射泵等部分组成,颗粒检测系统如图 5 所示。

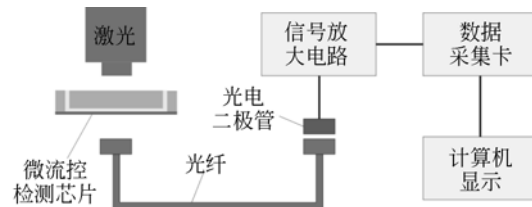


图 5 检测系统总图

Fig. 5 Detection system diagram

检测计数系统在搭建过程中,通过 Solidworks 软件绘制出三维图形,并使用 3D 打印机打印出实验所需的激光器支架、带有光纤插口检测芯片托盘以及整个光路系统的支架。激光器通过检测流道照射在光纤的一端,光纤的另一端与光电二极管连接。这种光路设计方式使得在今后利用光电倍增管作为感光传感器时,该支架仍可以使用,避免了实验材料的浪费。

检测系统如图 6 所示。通过胶管将微泵和废液池连接,形成了负压驱动聚集。光纤的另一头正对着光电二极管的感应端。将光电二极管连接在放大电路中,信号放大电路将光电二极管产生

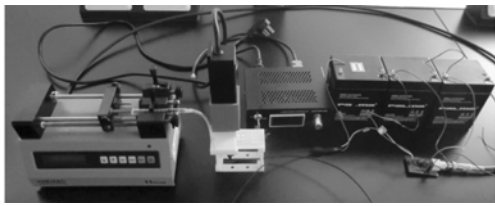


图 6 检测系统实物图

Fig. 6 Picture of detection system

的电流信号转换成电压信号,并对电压信号进行放大到 100 mV 以上,放大后的电压信号经过数据采集卡采集后,被送入计算机内,通过 LabVIEW 数据处理软件对数据信号进行处理、分析并显示。

## 4 检测计数实验与数据分析

### 4.1 检测计数实验

为避免外界光源对实验准确性产生影响,实验在暗室中进行的。将激光固定在支架上,激光器的中心和光纤插头的中心在同一条轴线上,保证光纤能接收到激光器发射出来的光源。在托盘上放置检测芯片,前后移动芯片的位置使激光器发出的光正好经过检测流道。

颗粒检测与计数实验用的铁颗粒最大粒径为 38  $\mu\text{m}$ 。将少量的铁颗粒放入纯净的液压油中,配置成待测油样。在所有准备工作完成后,使用数字移液器量取一定量的待测油样并注入样液池中,由微量注射泵驱动油样缓慢(0.5 ml/min)通过微流控检测芯片。

### 4.2 检测结果与数据分析

检测到的信号如图 7 所示。信号幅值最大的为 0.4 V 左右,最小的约为 0.15 V。由于铁颗粒是用 400 目和 500 目的筛子筛选出来的,其中最大的铁颗粒粒径为 38  $\mu\text{m}$ ,同时不可避免的存在一些粒径小于 38  $\mu\text{m}$  的铁颗粒,所以检测的信号幅值大小不一。信号图中的信号脉冲数量即为铁颗粒数量。

用光阻法检测微小颗粒时,微粒尺寸与表征光能变化的电脉冲幅度之间的关系一般由传统公式<sup>[13]</sup>:

$$E = \frac{s}{A} E_0 = \frac{E_0}{A} \cdot \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

式中: $E$ 代表当微粒经过检测流道时产生的电压

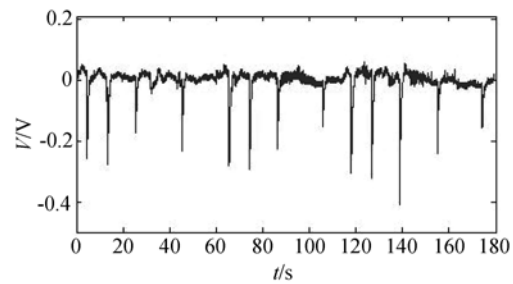


图 7 信号检测图

Fig. 7 Detection signal figure

脉冲幅值; $S$ 为检测颗粒在光束方向上的投影面积; $A$ 为光电感应元件的有效接收面积;为当没有颗粒通过检测流道时产生的电压脉冲幅值。若颗粒为球形,则  $d$  为颗粒的直径。

当液压油中出现粒径大于 20  $\mu\text{m}$  的颗粒时,即表示液压系统很有可能发生了异常磨损<sup>[14]</sup>,因此有必要对粒径大于 20  $\mu\text{m}$  的固体颗粒进行计数,以达到机械运行状态检测的目的。

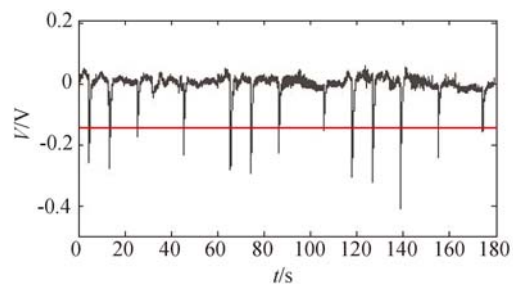


图 8 信号检测图

Fig. 8 Detection signal figure

由信号图可知,38  $\mu\text{m}$  颗粒的信号幅值约为 0.4 V,通过式(1)计算可得,20  $\mu\text{m}$  颗粒的信号幅值约为 0.11 V,选取 0.1 V 为最低基准信号幅值,所有信号幅值都跟 0.1 V 进行对比,如图 8 所示,红线所示幅值即为 0.1 V。通过 JAVA 编程,对幅值大于 0.1 V 的信号脉冲进行计数。

程序运行后所得的脉冲数量与所得到的波形图中的有效脉冲数相符,并给出了相应的脉冲幅值,证明了程序的可行性。通过脉冲幅值就可以估算出通过检测流道的固体颗粒的粒径大小,实现了油液中微小颗粒的检测与计数。



图 9 程序运行结果

Fig. 9 Program running result

## 5 浓度检测实验与数据分析

当颗粒并排经过检测区域时,根据光阻法的检测原理,只产生一个检测信号,且该信号的大小与颗粒在光线传播方向的投影面积有关。当颗粒的粒径较小时(通常小于  $15\ \mu\text{m}$  时),即使在聚焦的作用下,仍然很难保证颗粒单个依次通过检测区域,因此检测结果会产生较大误差。而此时对颗粒的浓度进行检测,便会避免这种误差,达到在线监测与故障预防的目的。

选取粒径为  $10\ \mu\text{m}$  和  $20\ \mu\text{m}$  的铁粉、纯净液压油配制检测油样。使用 XS225A 型精密天平分别称量出质量为  $0.001\ \text{g}$ 、 $0.005\ \text{g}$ 、 $0.01\ \text{g}$ 、 $0.015\ \text{g}$ 、 $0.02\ \text{g}$  的  $10\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$  铁粉,置于塑料杯中。然后通过数字移液器将纯净液压油滴入杯中,每次滴入  $1\ \text{ml}$ ,滴入 10 次,在配置油样过程中移液器内不能有气泡,否则会增大误差。

浓度检测实验与颗粒检测计数实验的操作相似。在该实验过程中,为防止油液中金属颗粒分布不均对实验结果产生偏差,对于同种粒径和浓度的样液进行 3 次检测。

### 5.2 检测结果与数据分析

记录每种油样经过检测区域时产生的电信号脉冲值,并按照粒径的不同绘制在表 1 和表 2(表中的单位为 V),最后将脉冲的平均值汇总,以折

线图的形式将脉冲信号幅值、颗粒直径以及颗粒浓度三者的关系反映在图中。

表 1 含有  $10\ \mu\text{m}$  铁颗粒的油样通过检测区域时电压变化量

Tab.1 Test data of voltage value when  $10\ \mu\text{m}$  particle pass the detection area

| 实验<br>次数 | 浓度/ppm |      |       |        |       |
|----------|--------|------|-------|--------|-------|
|          | 100    | 500  | 1 000 | 1 500  | 2 000 |
| 1        | 0.36   | 0.51 | 0.61  | 0.92   | 1.8   |
| 2        | 0.38   | 0.45 | 0.64  | 0.95 V | 1.4   |
| 3        | 0.37   | 0.48 | 0.64  | 0.95   | 1.6   |
| 平均值      | 0.36   | 0.48 | 0.63  | 0.94   | 1.6   |

表 2 含有  $20\ \mu\text{m}$  铁颗粒的油样通过检测区域时电压变化量

Tab.2 Test data of voltage value when  $20\ \mu\text{m}$  particle pass the detection area

| 实验<br>次数 | 浓度/ppm |      |       |       |       |
|----------|--------|------|-------|-------|-------|
|          | 100    | 500  | 1 000 | 1 500 | 2 000 |
| 1        | 0.41   | 0.59 | 0.71  | 0.96  | 2.3   |
| 2        | 0.38   | 0.63 | 0.81  | 0.97  | 1.6   |
| 3        | 0.44   | 0.55 | 0.73  | 1.1   | 2.4   |
| 平均值      | 0.41   | 0.59 | 0.75  | 1.01  | 2.1   |

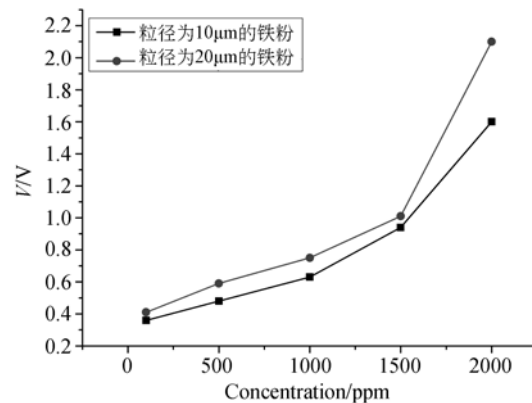


图 10 脉冲幅值与颗粒浓度、粒径关系图

Fig. 10 Measured relationship between the signal amplitude、concentration and particle diameter

通过表 1、表 2 及图 10 可以看出,当铁粉浓度为  $100\ \text{ppm}$  时信号幅值最小,接近于 0;随着浓度的逐渐增大,幅值呈上升趋势,当浓度达到  $2\ 000\ \text{ppm}$  时,其幅值约为  $100\ \text{ppm}$  时的 6 倍;此

外,当铁粉浓度相同时,铁粉粒径为  $20\ \mu\text{m}$  的油样经过检测区域时产生的检测信号幅值,总大于铁粉粒径为  $10\ \mu\text{m}$  的油样经过检测区域时产生的检测信号幅值。可以总结为:当铁粉粒径大小以及其他环境条件相同时,脉冲的幅值随着液压油中铁粉浓度的增大而增大;当铁粉浓度相同时,铁粉直径越大,脉冲的幅值也越大。

运用光阻法检测原理,由实验结果可知,当颗粒的粒径相同时,液压油中颗粒的浓度越大,同时经过检测区域的颗粒越多,光强度削减的程度越大,因此脉冲幅值越大;当液压油中颗粒的浓度相同时,颗粒的粒径越小,颗粒间的间隙越大,颗粒迎光面的截面积相对越小,因此脉冲幅值越小。

## 6 结 论

本文根据工程上液压油检测结果准确、检测效率高、检测系统便携可用于现场检测等要求,将具有高检测精度的光阻法和便于集成携带微流控

芯片结合,设计并制作了微流控检测芯片,搭建了简单有效的检测系统,并进行了大量的检测实验。在检测计数实验中,结合所编 JAVA 程序,实现了  $20\ \mu\text{m}$  铁颗粒的检测与计数;在含有不同浓度铁颗粒的油样检测试验中,当浓度增大时,检测信号也随之增大,颗粒浓度为  $2\ 000\ \text{ppm}$  的油样通过检测区域所产生的脉冲信号大约是浓度为  $100\ \text{ppm}$  的油样所产生的脉冲信号的 6 倍,因此证明了浓度检测的可行性。实验结果表明:本文提出的检测系统在油液中颗粒较大时可实现粒径大于  $20\ \mu\text{m}$  颗粒的检测与计数,当颗粒较小时,通过颗粒浓度检测同样可以达到油液污染度检测的效果,并且具有良好的检测效果和较高的检测效率;此外,本文所用的微流控检测芯片具有体积小、效率高、所需样液少等优点,为可用于工程上便携式现场快速油液检测设备的研发提供了坚实的研究基础和有力的技术支持,为基于信号分析的故障诊断与预防提供了依据。

## 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[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 385: 546-549.
- [2] 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)
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] CUI L, ZHANG T, MORGAN H. Optical particle detection integrated in a dielectrophoretic lab-on-a-chip[J]. *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, 2002, 12(1): 7.
- [7] 曹放,张立平. 高性能光阻式颗粒计数仪的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2014, 04:130-133.  
CAO F, ZHANG L P. Design and implementation of high performance light-blockage particle counter[J]. *Chinese Journal of Electronic Measurement Technology*, 2014, 04:130-133. (in Chinese)
- [8] DITTRICH P S, SCHWILLE P. An integrated microfluidic system for reaction, high-sensitivity detection, and sorting of fluorescent cells and particles[J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75(21): 5767-5774.
- [9] ROY P, BAL A, CHAKRABORTY T, *et al.*. Optical detection in Biochips: A fuzzy based detection analyzer for homogeneous samples in DMFBs [C]//*Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2014 IEEE 4th Annual International Conference on. IEEE, 2014: 551-556.

- [10] 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,2013,12:3141-3151.  
FAN W ZH, JIAO W L, CHANG H L. System level design of microfluidics[J]. *Chinese Journal of Optical and Precision Engineering*, 2013,12: 3141-3151. (in Chinese)
- [11] 林炳承,秦建华. 微流控芯片实验室[J]. 色谱. 2005(9):456-463.  
LIN B CH, QIN J H. Laboratory on a Microfluidic Chip[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2005(9):456-463.
- [12] 徐征,王继章,杨铎,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(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(2):321-328. (in Chinese)
- [13] 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(1):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(1):13-16+22.
- [14] 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 Li, *et al.*. Design of the oil detection microfluidic chip [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013(04):762-767.

#### 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。E-mail: Zhppeter@163.com