

文章编号 1004-924X(2016)增-0338-08

双光路光阻法液体颗粒计数器设计

王 灏, 申 晋*, 刘 伟, 王雅静, 尹丽菊

(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要:光阻法液体颗粒计数器已广泛应用于液压、电力、医药和环境等领域,但在实际使用中,对于形状不规则颗粒,由于光以不同方向照射颗粒产生的投影面积不一致,会影响测量结果准确性和重复性。本文设计了一种基于光阻法的双光路液体颗粒计数器,垂直交错的双光路检测结构可以获得颗粒不同方向的粒径信息,改善投影面积不一致的影响。同时,考虑到样品浓度对重合误差的影响,根据最大颗粒浓度和检测范围对传感器传感区尺寸作出限定。此外,针对样品颜色不同影响光电探测器输出基准电压的问题,引入反馈机制以调节光强使基准电压稳定,并通过 $70\ \mu\text{m}$ 球形颗粒脉冲信号的模拟和实测,分析了流速对脉冲信号的影响。

关键词:光阻法;双光路;颗粒计数器;传感器;脉冲波形

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0338

Design of light extinction liquid-borne particle counter with dual optical path

WANG Hao, SHEN Jin*, LIU Wei, WANG Ya-jing, YIN Li-ju

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

* Corresponding author, E-mail: shenjin@sdut.edu.cn

Abstract: Light-blockage liquid particle counter has been widely applied in the field of hydraulic pressure, electric power, medicine and environment etc. In practical application, however, an impact will be exerted on the accuracy and repeatability of measurement due to the phenomenon that particles with irregular shapes, under light irradiation in different directions, will produce different projected area. In this paper, a dual optical-path liquid particle counter based on light blockage is designed. Vertical and interlaced dual optical path detection structure can help to obtain the size information for particles in different directions and improve the result of inconsistent projected area. At the same time, considering the impact of sample concentration on coincidence error, sensing area of the sensor is defined in accordance with the maximum particle concentration and detection range. While in consideration of the problem that different color of the samples will affect output reference voltage of the photoelectric detector, a feedback mechanism is introduced to adjust the light intensity for stabilizing the reference voltage; and an analysis on the impact of flow rate on pulse signal through a simulation and actual measurement in the $70\ \mu\text{m}$ spherical particle.

Key words: Light blockage; dual optical path; particle counter; sensor; impulse waveform

收稿日期: 2016-05-17; 修订日期: 2016-06-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61205194); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014FL027, ZR2015FL034)

1 引 言

光阻法利用颗粒对光束的消减作用实现颗粒测量,具有检测速度快,非接触式测量和操作简便且结果不受人为因素影响等优点,已被广泛应用于液压、电力、医药和环境等领域^[1]。光阻法颗粒检测技术起源于 20 世纪 60 年代^[2],天津大学从 20 世纪 80 年代开始进行光阻式液体颗粒计数器的研究,于 2002 年成功研制了与进口仪器性能相当的国产仪器^[1]。针对该技术在应用中存在的问题,很多学者进行了更为深入的研究,包括颗粒的信号脉冲特性^[3],计数器结构改进^[4],仪器分辨率的提高^[5]和计数效率的提高^[6]等。随着光阻法检测技术在国内的推广应用,我国已制定了满足当前仪器现状的国家标准和相关行业标准^[7-9]。

在实际应用中,颗粒形状不规则、待测样品浓度颜色等因素对检测结果的影响仍未得到很好的解决。针对颗粒形状不规则的问题,本文设计了垂直交错的双光路测量系统以提高检测准确性和重复性;同时,考虑到样品浓度对重合误差的影响,对仪器传感区尺寸作出限定;并引入反馈机制以调节光强使基准电压稳定以减弱样品颜色对测量的影响。

2 光阻法的原理

光阻法检测的工作原理如图 1 所示。来自光源的光束经准直滤波形成光能分布均匀的平行光束,在光束与待测液体流道垂直相交处定义一传感区^[8],待测液体中的颗粒在这个区域内与光相互作用,并据此获得颗粒的大小和数量。当没有颗粒流经传感区时,光电探测器输出一恒定电压信号,此恒定电压信号作为基准电压;当有颗粒流经传感区时,由于颗粒对平行光束的消减作用使光强减弱,此时光电探测器输出电压 ΔE ^[1]:

$$\Delta E = -\frac{a}{A} \times E = -\frac{\pi d^2}{4A} \times E, \quad (1)$$

式中: a 为颗粒投影面积, A 为光束的投射面积, E 为无颗粒时的基准电压, d 为颗粒等效直径。

当光电探测器输出电压为 ΔE 时,由式(1)可得出颗粒等效粒径,即脉冲电压幅度对应于颗粒的粒径。足够小的传感区可以尽量保证待测液体

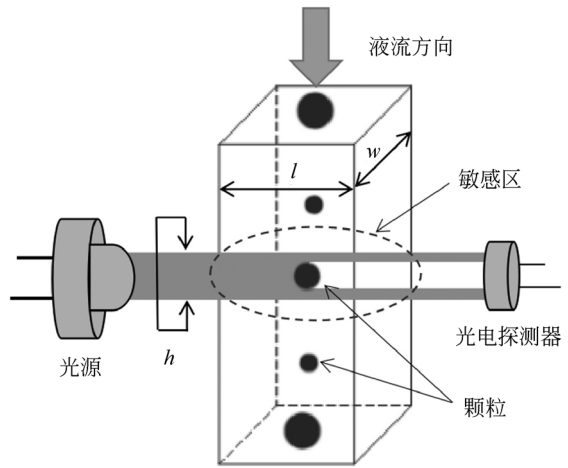


图 1 光阻法原理图

Fig. 1 Principle of light extinction theory

中的颗粒每一瞬间只有一个颗粒通过传感区,这样一个脉冲对应于一个颗粒,即脉冲数就是颗粒数。对全部脉冲信号进行幅度甄别和计数后即可得出待测液体中颗粒的大小和数量。

3 双光路液体颗粒计数器设计

液体颗粒计数器主要由双光路传感器系统、取样计量系统、信号采集处理系统等组成。双光路传感器系统包括光源和双光路系统、光电转换装置。取样计量系统包括流量控制系统、样品计量系统和冲洗系统等。信号采集处理系统包括数据采集电路、信号处理电路以及微处理器控制和显示系统等。系统图如图 2 所示。

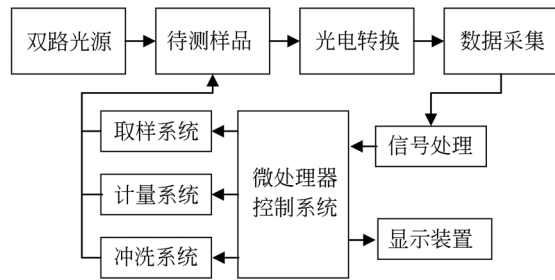


图 2 液体颗粒计数器系统结构图

Fig. 2 Structure of light extinction liquid-borne particle counter

3.1 传感区尺寸设计

由光阻法原理可知,只有当颗粒流经检测系统传感区时光能才发生变化从而检出颗粒。为了

保证仪器能够检测出待测液体中的所有颗粒,则需要颗粒逐一按序通过仪器传感区。为避免多个颗粒同时通过传感区,即为了避免重合现象,传感区容积应该足够小。重合误差的计算公式^[7]:

$$L = [1 - \exp(-qtC_{\max})] \times 100\%, \quad (2)$$

式中: L 为重合误差; q 为流量,单位为毫升每秒 (mL/s); t 为颗粒通过传感区域产生电脉冲的时间,单位为秒 (s); C_{\max} 为最大颗粒数量浓度。

式(2)表示重合误差由流量、颗粒通过传感器传感区产生电脉冲的时间决定,实际上流量与颗粒通过传感器传感区的时间都与传感区容积有关:

$$t = \frac{h}{v} = \frac{h}{q/(l \times \omega)} = \frac{h \times l \times \omega}{q} = \frac{V}{q}, \quad (3)$$

式中: V 为传感区体积, h 、 l 、 ω 为传感区尺寸,如图 1 所示。将式(3)代入式(2)得:

$$L = [1 - \exp(-V \times C_{\max})] \times 100\%. \quad (4)$$

通常当重合误差小于 10% 时可以略去重合影响不计^[10]。由式(4)的单调性可知,当最大颗粒数量浓度确定时,减小传感区尺寸可以减小重合误差。颗粒计数器传感区的大小可以根据重合误差由最大颗粒数量浓度决定,而传感区实际尺寸由流道截面和光束截面组成。流道截面影响检测系统单位时间的工作量,在不影响性能的前提下应越大越好。而光束截面影响检测系统检测范围,在检测范围允许条件下越小越好。当待测液体中最大颗粒数量浓度为 $10^4/\text{mL}$,重合误差小于 10% 时,传感区容积约为 $V = 10^{-5} \text{ cm}^3$ 。若检测粒径上限为 $150 \mu\text{m}$,则可以考虑使光束截面宽度 h 为 $150 \mu\text{m}$,从而得到流道截面积进而确定整个传感区具体尺寸。所以检测系统的传感区尺寸的确定需要综合考虑检测系统的工作效率、检测范围和最大颗粒数量浓度等方面,合理的传感区尺寸能够有效减小重合误差提高仪器性能。随着微机电技术的发展,微流控芯片等新技术开始应用于传感区制作^[11]。

3.2 光路设计

早期颗粒计数器多采用白炽灯光源,随着激光的出现和发展,因其稳定性好、亮度高和方向性好使其在颗粒检测中得到广泛应用。现在用于颗粒计数器的激光光源多为激光二极管,当激光二极管流过阈值以上的电流时会产生激光。在其正常工作条件下,激光光强随着电流的增大而增强。

合适的激光控制器能够显著提高激光性能和寿命,理想的激光驱动器应该是线性、无噪声且精确的恒流源。模块化的激光二极管驱动电路使得光强的调节更加灵活有效,尤其当待测样品颜色不一致时,通过引入反馈调节光强以保持光电探测器输出基准电压的恒定,可以保证仪器检测的灵敏度和准确度^[12]。其反馈调节如图 3 所示,该反馈控制电路由光电探测器、反馈调整电路、激光管驱动电路 3 个部分组成。当待测液体颜色较深时,光电探测器输出基准降低,此时通过反馈调整电路调节光电二极管驱动电流使光强增大,从而使光电探测器输出电压升高,维持基准恒定。

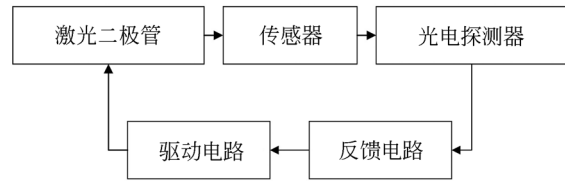


图 3 激光二极管反馈调节电路

Fig. 3 Feedback control circuitry of laser diode

仪器检测准确性受到光源和光路的影响。如图 4(a) 所示,当颗粒流经准直性较差光束时,同等颗粒产生的投影面积不同,使得检测到的脉冲信号不同,从而得出错误的粒径信息^[13]。如图 4(b) 所示,如果光路与流道不垂直,则颗粒的遮挡面积相对增大,使得颗粒测量粒径 d_m 大于其真实粒径 d_r 。但是光路与管道垂直会使大量反射光回射激光器,影响激光器稳定,通过放置光隔离器消除反射光的影响。光束截面光能分布不均同样会导致测量误差,影响仪器灵敏度。如图 4(c) 所示,当颗粒处于光能分布不均的光束不同位置时,同等大小的颗粒阻挡的光量不同,从而产生尺寸误差。适当减小传感区容积,同时对激光光束进行匀化处理可以有效改善光束质量。

实际测量中颗粒形状差异较大,同一颗粒以不同角度通过光束时的投影面积各有不同,这影响了检测系统的准确性和重复性。目前使用的颗粒计数器一般采用多次测量取均值的方式,这需要较多的待测样品,且多次测量影响检测效率。为解决这个问题,本检测系统设计了如图 5 所示的双光路结构。两束激光分别从两个垂直方向交错照射检测区域,与之对应的信号采集处理系统

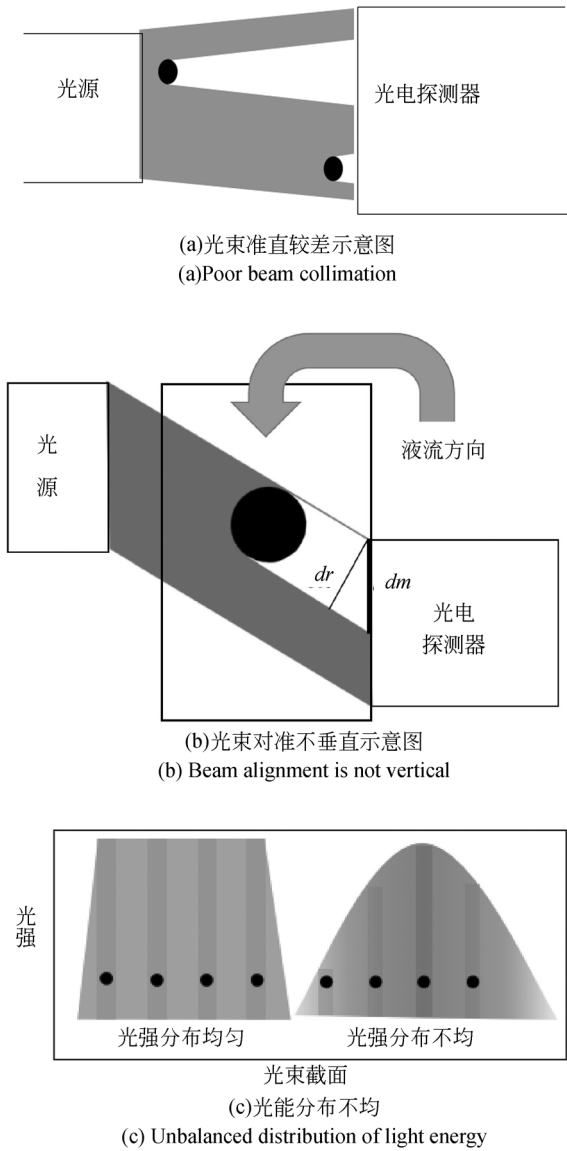


图 4 光源光路对测量影响
Fig. 4 Influence by light source and light path

分别对颗粒消减光强作出响应进行计数,最后由微处理器将两组数据整合修正得到测量结果。垂直交错的双光路结构从两个维度获得了复杂颗粒的不同投影面积,又避免了光束相交对另一路测量的影响,一次测量可以获得传统单光束仪器 2 次测量地数据,尤其适用于待测样品不足的情况。

3.3 光电转换电路设计

为实现对光强变化的检测,设计了如图 6 所示的光电转换电路,跨阻放大器的负输入端直接和光电二极管相连,理想状态下光电二极管的全部电流经过反馈电阻 R_f 转变为电压^[14]。实际设

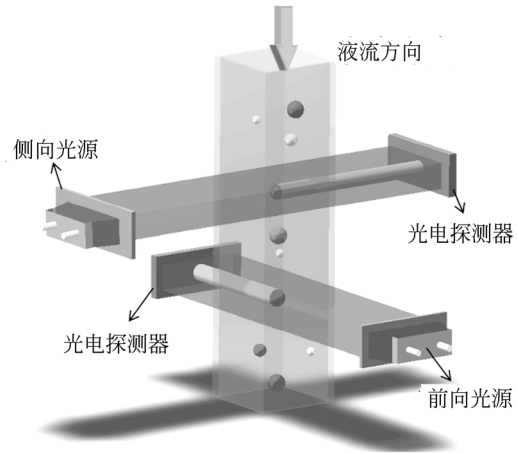


图 5 双光路液体颗粒计数器传感区示意图
Fig. 5 Light extinction liquid-borne particle counter with dual optical path

计电路应注意选用低输入电流低噪声的高输入阻抗高带宽的场效应管放大器,同时注意抑制运放电源线上噪声耦合。为获得较高增益 R_f 取值一般较大,但是较大的 R_f 会影响系统频率响应,可以考略使用 T 型网络代替反馈电阻 R_f 。组成与 R_f 等效的 T 型网络所用电阻阻值较小,而且 T 型网络还可以实现更好的阻抗匹配。电容 C_f 的作用是使电路更加稳定,避免产生振铃现象,但是 C_f 过大又会导致响应速度变慢。电阻 R_c 通常作为补偿电阻,以此来减小运放输入电流引起的偏置效应,其旁路电容可以有效分流电阻的噪声,但添加 R_c 容易导致引入新的漏电流。

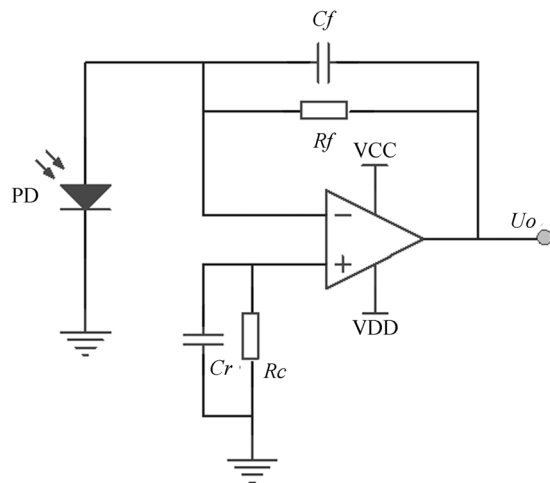


图 6 光电转换电路
Fig. 6 Photoelectric transformation circuit

3.4 取样计量系统设计

液流控制系统原理如图 7 所示。检测开始时,系统控制液体驱动装置产生负压,抽取样品池中的待测液体,使得待测液体匀速通过传感区,随后再将废液排除。负压可以使负压泵(包括负压瓶),也可以是柱塞泵,目前多用柱塞泵^[1]。检测结束时,系统启动正反向脉冲式冲洗系统,产生断续的水气脉冲,使附着在管路中的残留物发生振动,迅速清洁管路。柱塞泵不仅能够产生负压,还能保证体积计量的准确性。流量流速的变化将影响颗粒脉冲信号的持续时间和幅度,合理的控制策略和精密的电机驱动柱塞泵,使其匀速运动工作平稳无脉动,同时使得待测液体流经传感区时处于层流状态。搅拌器可以使待测液体中的颗粒均匀分布,避免聚集沉降。但是搅拌速度不能过高,否则容易产生气泡。若待测液体粘度过大可以使用热水浴降低粘度。缩短液流管路能减小压力损失,同时避免颗粒淤积也避免积液过多。所有液体测量都应该在规定的温度压力下,避免待测液体凝结或产生气泡,影响测量结果。

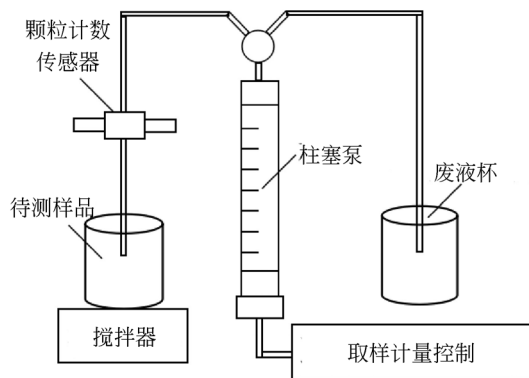


图 7 取样控制系统示意图

Fig. 7 Sample control system schematic diagram

4 颗粒脉冲波形分析

分析颗粒随待测液体匀速流经传感区光束过程可知,当颗粒开始进入光束时,投影面积逐渐增加,脉冲幅度逐渐增大;当颗粒完全进入光束后,投影面积达到最大,脉冲幅度达到最大,并保持不变;当颗粒开始流出光束时,投影面积逐渐减小,脉冲幅度也随之减小^[15]。其投影面积变化如图 8 所示。

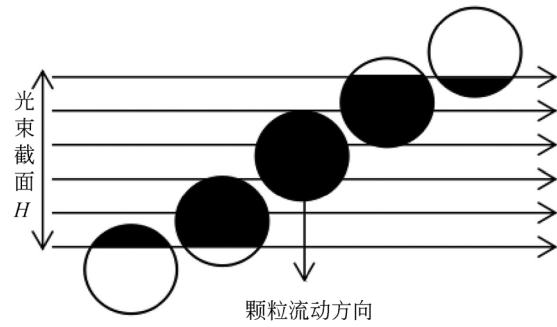


图 8 颗粒流经光束示意图

Fig. 8 Particle entering the beam

其投影面积可以由几何学得出:

$$a = \begin{cases} mR^2 - n & 0 \leq vt < R \\ \pi R^2 - (m_1 R^2 - n_1) & R \leq vt < 2R \\ \pi R^2 & 2R \leq vt < H \\ \pi R^2 - (m_2 R^2 - n_2) & H \leq vt < H + R \\ m_3 R^2 - n_3 & H + R \leq vt < H + 2R \end{cases}, \quad (5)$$

$$m = \arccos \left\{ \frac{R - vt}{R} \right\}$$

$$n = (R - vt) \sqrt{R^2 - (R - vt)^2}$$

$$m_1 = \arccos \left\{ \frac{vt - R}{R} \right\}$$

$$n_1 = (vt - R) \sqrt{R^2 - (vt - R)^2}$$

$$m_2 = \arccos \left\{ \frac{R - (vt - H)}{R} \right\}$$

$$n_2 = [R - (vt - H)] \sqrt{R^2 - [R - (vt - H)]^2}$$

$$m_3 = \arccos \left\{ \frac{vt - R - H}{R} \right\}$$

$$n_3 = (vt - R - H) \sqrt{R^2 - (vt - R - H)^2}$$

式中: a 为颗粒投影面积, R 为颗粒半径, H 为光束截面宽度, v 为待测液体流速, t 为时间。以 $H = 100 \mu\text{m}$, $R = 35 \mu\text{m}$, $v = 1 \mu\text{m}/\mu\text{s}$ 进行模拟, 仿真波形如图 9 所示。在 $0 \sim 70 \mu\text{s}$ 颗粒开始进入光束, 投影面积逐渐增加; 在 $70 \sim 100 \mu\text{s}$ 颗粒完全进入光束, 投影面积达到最大, 并保持不变; 在 $100 \sim 170 \mu\text{s}$ 颗粒开始流出光束, 投影面积逐渐减小。图 10 是在同等条件下实测脉冲波形, 实测脉冲波形与理论波形吻合, 符合前文所述脉冲变化过程, 其脉冲上升、持续、下降时间与光束截面和流速有关。流速对脉冲影响如图 11 所示, 流速过快时脉冲变化剧烈, 信号保持时间过短, 这对后续光电响应采集速度要求较高; 流速过慢时脉冲

持续时间较长,影响检测系统的效率。

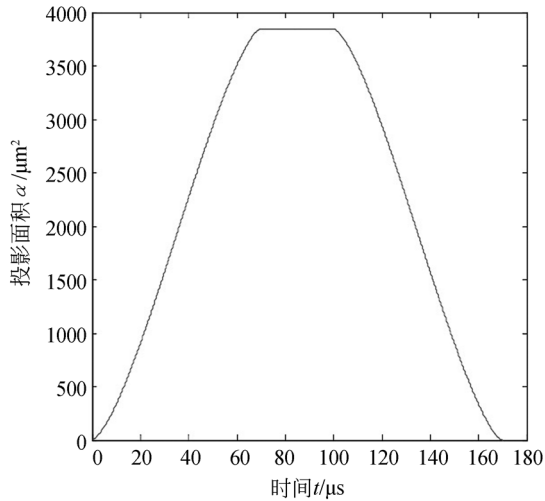


图 9 70 μm 颗粒模拟波形

Fig. 9 70 μm particle simulation waveform

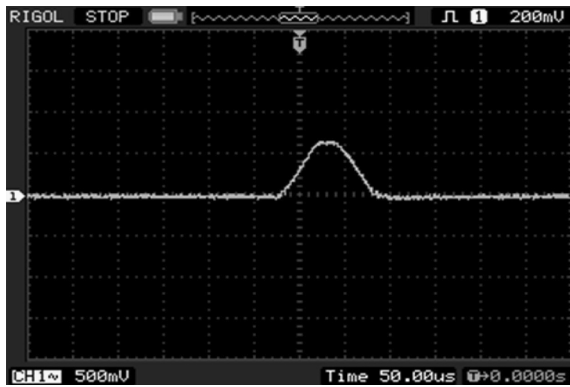


图 10 70 μm 颗粒实验波形

Fig. 10 70 μm particle measured waveform

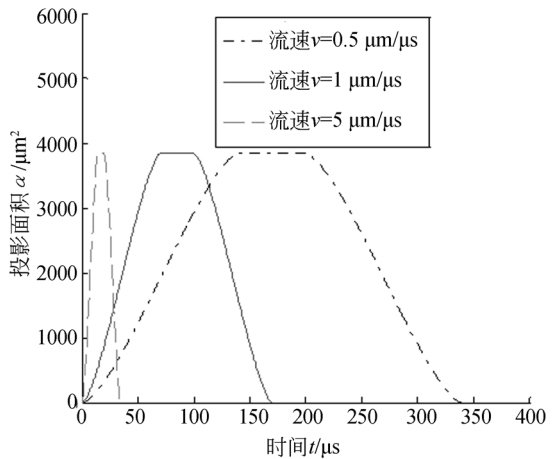


图 11 不同流速对脉冲影响

Fig. 11 Influence of particle pulse signal on different velocity

5 仪器的标定

液体颗粒计数器计数方式是首先设定各粒径等级的脉冲幅度阈值电压,当实际脉冲信号超过某一粒径等级阈值电压时,则增加该粒径等级颗粒数目。粒径等级的阈值电压通常采用标定方式得到。图 12 所示是仪器使用标准颗粒标定时通过示波器获得的脉冲信号,由信号图可以看出同种标准颗粒物的信号脉冲幅度基本一致,但由于标准颗粒物本身不确定度、光源光能不均、液流流速波动等因素的影响造成信号幅度略有差异,这给阈值电压标定带来了困难。最后经过实验得到 15 μm 的粒径大小对应的基准电压为 100 mV,70 μm 的粒径大小对应的基准电压为 680 mV。后续将对更多不同粒径标准颗粒进行标定,以获得仪器的校准曲线。

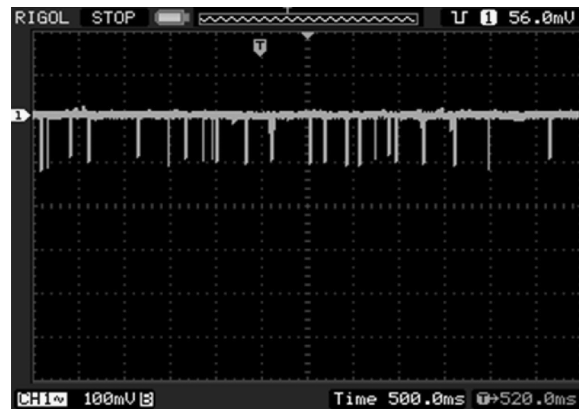


图 12 颗粒阈值电压

Fig. 12 Particles threshold voltage

6 结 论

为改善测量准确性和重复性,本文设计了一种基于光阻法的双光路反馈式液体颗粒计数器。合理的传感区尺寸可以有效减小重合误差,通过反馈调节光强可以保证基准电压的稳定,而垂直交错的双光路结构从两个维度获取了复杂颗粒的不同投影面积,一次测量可以获得传统单光束仪器两次测量的数据,充分利用待测样品获取更多的检测数据,从而提高了样品检测准确性和重复性。同时对 70 μm 球形颗粒脉冲信号变化进行

模拟和实验,分析了流速对脉冲波形的影响。最后在所搭建的检测平台上对 15 μm 和 70 μm 标准颗粒的阈值电压进行了标定,后续将通过更多不同粒径标准颗粒的标定获取校准曲线。随着

微流控技术和微机电技术的不断发展创新,有望使微流控芯片与光源、探测器高度集成,通过配置多检测通道实现颗粒的分级检测,以拓宽粒径检测范围提高仪器性能。

参考文献:

- [1] 曲丹丹, 罗诗金, 薛剑英, 等. 光阻法智能微粒检测仪的设计与研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(z2):156-158.
Qu D D, LUO SH J, Xue J Y, *et al.*. The development of particle detector based on the light-blocking theory [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* 2003, 24(z2):156-158. (in Chinese)
- [2] CARVER L D. Light blockage by particles as a measurement tool [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1969, 158:710-721.
- [3] 徐涛, 高玉成, 武星. 基于光阻法原理的微粒检测中光电脉冲特性的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(3):49-53.
XU T, GAO Y CH, WU X. Study of the photoimpact character in the light-blockage particle size measurement [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2004, 18(3):49-53. (in Chinese)
- [4] 黄廷磊, 李敏, 郑刚, 等. 一种改进的消光式颗粒计数传感器[J]. 中国激光, 2004, 31(6):749-751.
HUANG T L, LI M, ZHENG G, *et al.*. An improved sensor of extinction particle counter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(6):749-751. (in Chinese)
- [5] 杜威, 宋启敏, 殷建. 基于 DSP 技术的在线颗粒计数器[J]. 中国测试技术, 2005, 31(2):121-123.
DU W, SONG Q M, YIN J. Online particle counter based on DSP [J]. *China Measurement & Test*, 2005, 31(2):121-123. (in Chinese)
- [6] 王陈燕. 基于光阻法的液体粒子计数器底层软硬件系统及其标定方法的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
WANG C Y. *The Underlying Hardware and Software System of Liquid Particle Counter Based on Light Blocking and its Calibration* [D]. Soochow: Soochow University, 2012. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国国家标准. 粒度分析 单颗粒的光学测量方法: 第 3 部分: 液体颗粒计数器光阻法 [S]. GB/T 29024. 3-2012.
Determination of particle size distribution. Single particle light interaction methods. Part 3: Light extinction liquid-borne particle counter [S]. GB/T 29024. 3-2012. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家标准. 液压传动 液体自动颗粒计数器的校准[S]. GB/T 18854-2002.
Hydraulic fluid power-Calibration of liquid automatic particle counters. [S]. GB/T 18854-2002. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国电力行业标准. 电力用油中颗粒污染度测量方法[S]. DL/T432-2007.
Determination of particulate contamination in oil [S]. DL/T432-2007. (in Chinese)
- [10] Reasch J and Umbaruer H. Fortschritt der VDI-Zeitschrift R. 31984, Nr. 96.
- [11] 刘恩辰, 张洪朋, 曾霖, 等. 高精度液压油微小颗粒检测系统[C]. 光学 精密工程, 2015, 23(10z): 396-402.
LIU E C, ZHANG H P, ZENG L, *et al.*. Detection system of small particles in hydraulic oil [C]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10z): 396-402 (in Chinese)
- [12] 付艳, 李寅辉, 胡子平. 颗粒计数器的自适应电路设计[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(1):109-111.
FU Y, LI Y H, HU Z P. Design of control circuit of self-adjustability on particle counter [J]. *China Powder Science and Technology*, 2016, 22(1): 109-111. (in Chinese)
- [13] 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, 37(4):130-133.
CAO F, ZHANG L P. Design and implementation of high-performance light-blockage particle counter [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(4):130-133. (in Chinese)
- [14] 黄敏松, 雷恒池, 陈家田, 等. 光阻法成像仪的前端信号调理电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(4):28-30.
HUANG M S, LEI H C, CHEN J T, *et al.*. Front-end signal conditioning circuit designed for light-

blockage imaging probe [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(4):28-30. (in Chinese)

- [15] 梁明亮, 黄梅珍, 孙振华, 等. 基于光阻法的药液中异物信号分析及光路优化[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(10):1357-1361.

LIANG M L, HUANG M ZH, SUN H, *et al.*. Analysis of photo-electronic signal characteristics and optical optimization for detection of impurities in ampoules[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong university*, 2014, 48(10):1357-1361. (in Chinese)

作者简介:



王 灏(1990—),男,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事光学颗粒检测方面的研究。E-mail:dianqidianxin@sina.com



申 晋(1962—),男,山西晋城人,教授,博士生导师,1985年于东北重型机械学院获学士学位,1996年于中国农业大学获硕士学位,2004年于上海理工大学获博士学位,主要从事光电精密测试技术方面的研究。E-mail:shenjin@sdut.edu.cn