

doi:10.3788/gzxb20174601.0112003

基于光阻法的小光束截面粒径信息提取方法

王灏, 申晋, 刘伟, 陈文钢, 马立修, 王雅静

(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘 要: 为了实现同时兼顾大、小颗粒测量的液体颗粒计数, 在分析细小光束照射下球形颗粒脉冲信号波形特征的基础上, 提出了一种颗粒粒径信息提取方法, 该方法通过对脉冲信号积分将颗粒脉冲信号的幅度与持续时间结合, 可更加准确地提取颗粒的等效粒径信息. 对理想脉冲信号进行数值模拟, 并采用乳胶微粒标准物质进行实验测试, 结果表明, 该方法能够有效地提取大颗粒和小颗粒的粒径信息, 从而拓宽了仪器检测范围. 同时, 分析了流速和噪声对该方法提取粒径准确性的影响, 结果表明当流速波动小于 10% 时, 测量误差小于 5.41%; 当噪声小于 1% 时, 测量误差小于 0.50%.

关键词: 颗粒计数器; 信息提取; 光阻法; 颗粒粒径; 脉冲信号

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0112003-9

Size Information Extraction of Particles Radiated by the Thin Beam in Light Extinction Particle Sizing

WANG Hao, SHEN Jin, LIU Wei, CHEN Wen-gang, MA Li-xiu, WANG Ya-jing

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

Abstract: In order to measure both large and small particles, based on the analysis of the pulse signal of the spherical particle irradiated by a thin beam, a method for extracting the equivalent particle size information was proposed. This method combines the amplitude and duration of the pulse signal by the integral of the pulse signal, which makes the equivalent particle size information extracted from the pulse signal more accurate. The ideal pulse signal was simulated and experiment was made by using standard polystyrene latex particles. The results show that the method can effectively extract the particle size information of large and small particles, which broaden the detection range. In addition, the effect of flow velocity and noise on the extraction of the particle size was analyzed. When the flow rate is less than 10%, the measurement error is less than 5.4%, and when the noise is less than 1%, the measurement error is less than 0.5%.

Key words: Particle counters; Information extraction; Light extinction; Particle size; Pulse signals

OCIS Codes: 120.4640; 120.5820; 350.4990; 290.2200; 220.4840

0 引言

液体中固体颗粒污染的控制与检测技术在医疗、制药、机械、电力等行业都有着广泛应用^[1-4]. 光阻法颗粒检测技术可以快速、有效地检测液体中的固体颗粒数量, 具有非接触式测量、操作简便且结果不受人为因素影响等优点, 成为国际上通用的颗粒检测技术之一^[5]. 20 世纪 60 年代, 美国 HIAC 公司最早生产出光阻法液体颗粒计数器^[6]. 天津大学在多年研究的基础上, 于 2002 年研制了与进口仪器性能相当的国产光阻法

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205191)和山东省自然科学基金(Nos. ZR2014FL027, ZR2015FL034)资助

第一作者: 王灏(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为颗粒光电测量技术. Email: dianqidianxin@sina.com

导师(通讯作者): 申晋(1962—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电精密测试技术. Email: shenjin@sdu.edu.cn

收稿日期: 2016-07-13; 录用日期: 2016-10-12

<http://www.photon.ac.cn>

智能微粒检测仪^[7]. 随着光阻法检测技术在国内的推广应用,我国已制定了相应的国家标准和相关行业标准^[8-10]. 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^[5]、计数器结构改进^[11]及计数效率的提高等^[12]. 但因大颗粒与小颗粒的信号脉冲差异较大而限制检测范围的问题仍未得到很好解决. 虽然通过配置不同型号的传感器可以扩大粒径检测范围,但是其操作不便且提高了仪器成本.

本文在分析小光束截面下球形颗粒理想脉冲信号的基础上,提出了基于脉冲信号积分的颗粒等效粒径信息提取方法,该方法通过对脉冲信号积分将颗粒脉冲信号的幅度与持续时间有效结合,准确地提取颗粒等效粒径信息,解决因检测范围限制而更换仪器传感器的问题. 同时分析了流速和噪声对该方法提取粒径信息准确性的影响.

1 光阻法颗粒测量原理

光阻法颗粒测量原理如图1. 采用负压驱动待测液体匀速通过检测光束,平行光束垂直照射待测液流后被

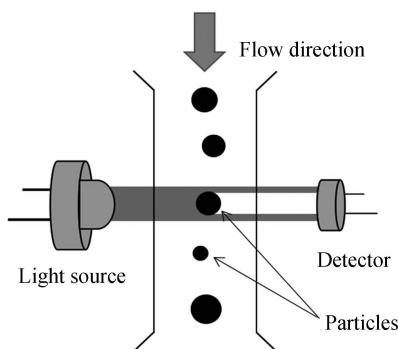


图1 光阻法原理

Fig. 1 Principle of light extinction theory

光电探测器接收,当液流中没有颗粒时,截面面积为 A 的光束完全投射到光电探测器上,经光电转换电路后输出恒定基准电压 E_0 . 液流中有一个投影面积为 a 的颗粒通过时,由于颗粒对平行光束的遮挡作用,使光电探测器接收到的光强减弱,此时在电路上输出一个负脉冲 ΔE ^[6],即

$$\Delta E = -\frac{a}{A} \times E_0 \quad (1)$$

若颗粒为球形或以等效直径 d 描述该颗粒,则^[13]

$$\Delta E = -\frac{\pi d^2}{4A} \times E_0 \quad (2)$$

当光电探测器输出电压为 ΔE 时,由式(2)即可得出颗粒等效粒径,即脉冲幅度对应于颗粒的粒径. 当颗粒逐一通过检测区时,一个脉冲信号对应一个颗粒. 通过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.

2 小光束截面下球形颗粒理想脉冲

光阻法液体颗粒计数器工作过程中,负压驱动待测液体使颗粒匀速通过检测区,当颗粒初始进入检测区时,遮光面积逐渐增加,其对应脉冲幅度也逐渐增大;当颗粒完全进入检测区后,遮光面积达到最大,脉冲幅度也达到最大,并保持不变;当颗粒开始流出检测区时,遮光面积逐渐减小,脉冲幅度也随之减小^[5]. 当颗粒完全处于检测区光束时,光电探测器能获得颗粒整体的遮挡面积,此时才能由式(2)求得其等效粒径. 为保证颗粒能够完全处于检测区光束,光束截面面积 A 需要大于颗粒的最大遮挡面积. 为获得较大的检测上限, A 也需要较大.

然而,较大的光束截面使得颗粒脉冲信号变小,会造成仪器检测下限附近的颗粒信号脉冲微弱,易被噪声淹没,从而影响计数准确性. 减小光束截面可以增大信号脉冲,从而有利于颗粒的检出. 此外,实际应用中的平行光束存在一定发散角,且光能分布并不均匀,如果光束截面积 A 较大,颗粒在不同区域进行遮挡,其产生的脉冲幅度也会有所不同,从而影响检测结果. 如果光束截面面积 A 较小,则能量相对集中,能量分布

也相对均匀^[14].因此,尽可能地减小光束截面可以有效提高仪器的性能.

随着光束截面的减小,当颗粒投影面积大于光束截面时,颗粒等效粒径就不能通过式(2)计算.为得到小光束截面下颗粒粒径信息的提取方法,需要分析颗粒在小光束截面下的理想脉冲情况.液体流过检测区时,其流动为均匀层流^[13],假定光束为长 L 宽 H 截面积为 A 的矩形光束,球形颗粒半径为 R ,液体稳定流速为 v .在小光束截面下由几何光学推导不同粒径球形颗粒的理想脉冲波形可分为如图2所示的3种情况.

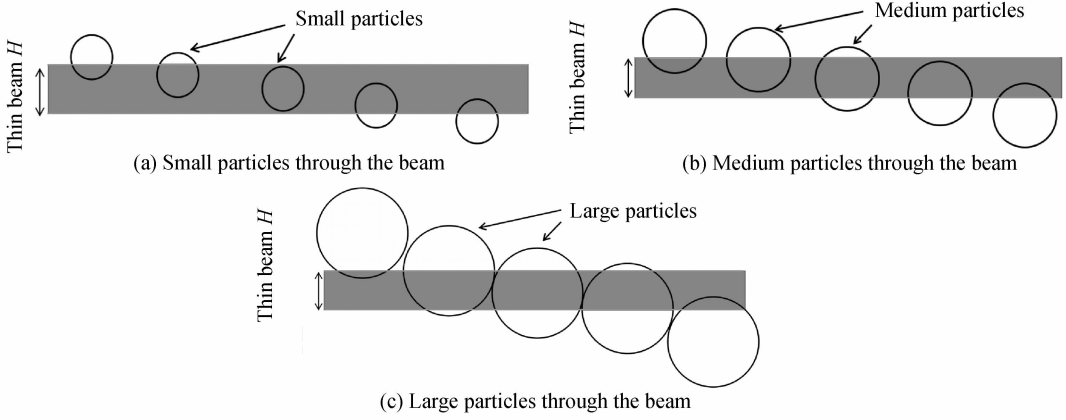


图2 不同颗粒流经光束示意图

Fig. 2 Different particles flowing through the beam

当 $H > 2R$ 时,如图2(a),小颗粒完全处于小光束中,其遮光面积为^[15]

$$\Delta a = \begin{cases} mR^2 - n & 0 \leq vt < R \\ \pi R^2 - (m_2 R^2 - n_2) & R \leq vt < 2R \\ \pi R^2 & 2R \leq vt < H \\ \pi R^2 - (m_1 R^2 - n_1) & H \leq vt < H + R \\ m_3 R^2 - n_3 & H + R \leq vt < H + 2R \end{cases} \quad (3)$$

当 $R < H < 2R$ 时,如图2(b),中等颗粒的整体投影面积略大于光束截面,其遮光面积为

$$\Delta a = \begin{cases} mR^2 - n & 0 \leq vt < R \\ \pi R^2 - (m_2 R^2 - n_2) & R \leq vt < H \\ \pi R^2 - (m_1 R^2 - n_1) - (m_2 R^2 - n_2) & H \leq vt < 2R \\ \pi R^2 - (m_1 R^2 - n_1) & 2R \leq vt < R + H \\ m_3 R^2 - n_3 & R + H \leq vt < 2R + H \end{cases} \quad (4)$$

当 $H < R$ 时,如图2(c),大颗粒的整体投影面积远大于光束截面,其遮光面积为

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

式中, $m = \arccos\left(\frac{R-vt}{R}\right)$, $n = (R-vt)\sqrt{R^2-(R-vt)^2}$, $m_1 = \arccos\left(\frac{R-(vt-H)}{R}\right)$, $n_1 = [R-(vt-H)]$

$\sqrt{R^2-[R-(vt-H)]^2}$, $m_2 = \arccos\left(\frac{vt-R}{R}\right)$, $n_2 = (vt-R)\sqrt{R^2-(vt-R)^2}$, $m_3 = \arccos\left(\frac{vt-R-H}{R}\right)$,

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

小光束截面下颗粒对应的信号脉冲为

$$\Delta E = \frac{\Delta a}{A} \times E_0 \quad (6)$$

式中, Δa 为颗粒处于光束中的部分遮光面积,即图2中颗粒与光束重叠部分.

颗粒直径等于光束宽度($H=2R$)时的理想脉冲可以由式(3)求得,此时需舍弃分段函数的第三段;颗粒

半径等于光束宽度($H=R$)时的理想脉冲可以由式(4)求得,此时需舍弃分段函数的第二段和第四段.实际上中等颗粒与大颗粒信号脉冲波形相似,为了便于利用几何光学计算颗粒的投影面积而分开表述.在大光束截面下,即颗粒能够完全进入检测光束时,颗粒的遮光面积表达式在形式上与式(3)相同,但式中 H 在数值上不同.假定 $E_0=1$,图3为 $10\ \mu\text{m}$, $25\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ 颗粒在小光束截面($H=15\ \mu\text{m}$, $L=150\ \mu\text{m}$)和大光束截面($H=150\ \mu\text{m}$, $L=150\ \mu\text{m}$)下脉冲信号示意图.由图3可见,中等颗粒和大颗粒在小光束截面下的脉冲波形相似,小颗粒在小光束和大光束截面下的脉冲波形相似,小光束截面下颗粒的脉冲信号比大光束截面下的脉冲信号更明显,更有利于颗粒的检测.

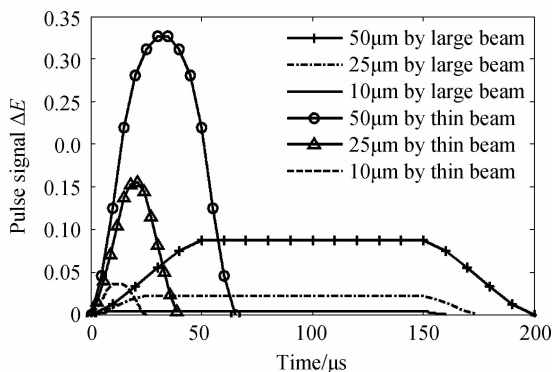


图3 小光束截面和大光束截面下颗粒脉冲信号示意图
Fig. 3 Pulse signal by the thin beam and the large beam

3 小光束截面下粒径信息提取

图4是 $5\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$, $25\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ 球形颗粒在小光束截面下的理想脉冲示意图.数值模拟表明,不同粒径的球形颗粒在小光束截面下的脉冲幅值各不相同,且脉冲幅值随着颗粒粒径增大而增大.然而,实际测试颗粒形状复杂^[16],非球形颗粒的脉冲幅值可能小于其对应等效球形颗粒的脉冲幅值.如图5,假设一棒状颗粒的投影为长 $25\ \mu\text{m}$,宽 $\pi\ \mu\text{m}$ 的长条,当其通过小光束截面($H=15\ \mu\text{m}$)时,最大遮光面积为 $15\pi\ \mu\text{m}^2$,由此遮光面积对应求得等效粒径约为 $7.75\ \mu\text{m}$,然而其实际等效粒径为 $10\ \mu\text{m}$.所以,在小光束截面下并不能简单通过其脉冲幅值求得其等效粒径.

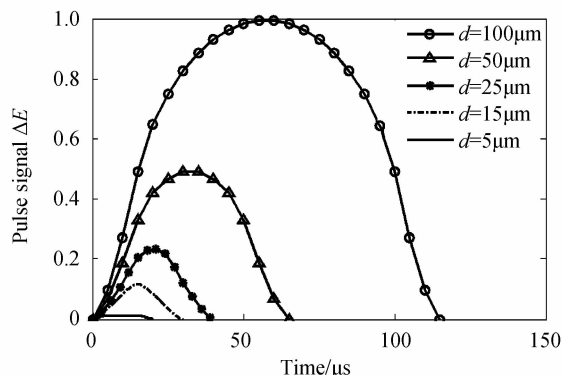


图4 小光束截面下不同颗粒脉冲信号示意图
Fig. 4 Pulse signal of different particles by the thin beam

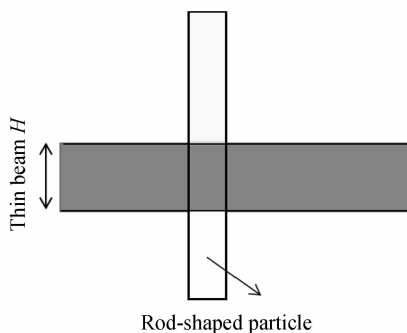


图5 棒状颗粒遮光面积示意图
Fig. 5 The light shading area of the rod-shaped particle

由图4可以看出,不同粒径的颗粒脉冲持续时间不同,所以脉冲持续时间在某种程度上也可以作为颗粒粒径的度量参考.通常情况下,较小颗粒的脉冲持续时间较短,较大颗粒的脉冲持续时间较长.但非球形颗粒脉冲持续时间也有可能大于其等效球形颗粒脉冲持续时间.仍假设一棒状颗粒的投影为长 $25\ \mu\text{m}$,宽 $\pi\ \mu\text{m}$ 的长条,当其如图5通过小光束截面时,其脉冲持续时间与 $25\ \mu\text{m}$ 的球形颗粒脉冲时间一致,大于实际等效粒径为 $10\ \mu\text{m}$ 的球形颗粒的脉冲持续时间.

虽然脉冲信号的幅度与脉冲持续时间不能单独反映颗粒等效粒径,但是脉冲信号幅度与时间包含颗粒等效粒径的重要信息.对脉冲信号进行时域积分能够有效地将脉冲信号幅度和脉冲时间结合起来,从而为提

取颗粒等效粒径提供更加准确的信息.

为考察由脉冲信号时域积分提取颗粒等效粒径的可行性,首先以球形颗粒作为研究对象进行数值模拟.为方便讨论令 $E_0/A=1$,即颗粒遮光面积在数值上等价于实际信号脉冲.对于一个确定的系统,通常光束宽度 H 已定,因此,在模拟过程中先假定光束宽度 H 为定值,然后考察颗粒粒径、信号积分和流速之间的关系.对 $5\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 球形颗粒在不同流速下的理想脉冲进行数值积分,结果见表 1.表 1 中, d 为模拟设定的球形颗粒粒径, a 为颗粒整体投影面积, v 是颗粒流经检测光束的速度, S_t 是脉冲信号的时域积分.

表 1 不同流速下球形颗粒信号积分 ($H=15\ \mu\text{m}$)
Table 1 The integral of the spherical particle under different velocity ($H=15\ \mu\text{m}$)

S_t	$d/\mu\text{m}$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				
		5 ($a=19.6$)	15 ($a=176.7$)	25 ($a=490.9$)	50 ($a=1\ 963.5$)	100 ($a=7\ 854.0$)
1		294.5	2 650.7	7 363.1	29 452.4	117 809.7
5		58.9	530.1	1 472.6	5 890.5	23 561.9
10		29.5	265.1	736.3	2 945.2	11 780.9
15		19.6	176.7	490.9	1 963.3	7 853.3
20		14.7	132.5	368.2	1 472.2	5 889.8
25		11.8	106.0	294.5	1 178.1	4 712.4

表 1 中的每行数据为同一流速下不同颗粒的信号积分,每列数据为同一颗粒在不同流速的信号积分.对各行数据拟合可得

$$S_t = k \times a = k \times \frac{\pi d^2}{4} \tag{7}$$

式中 k 为拟合系数,在不同的流速 v 下各不相同,其值见表 2.

表 2 不同流速下拟合系数 k 值 ($H=15\ \mu\text{m}$)
Table 2 The coefficient k under different velocity ($H=15\ \mu\text{m}$)

Velocity $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Coefficient k
1	15.00
5	3.00
10	1.50
15	1.00
20	0.75
25	0.60

对表 2 中 v 和 k 数据拟合可得

$$k = \frac{15}{v} \tag{8}$$

考虑到脉冲波形与光束宽度 H 有关,而式(8)系数在数值上恰好等于 H ,所以可以假定

$$k = \frac{15}{v} = \frac{H}{v} \tag{9}$$

此时将式(9)代入式(7)可得

$$S_t = k \times a = \frac{H}{v} \times a = \frac{H}{v} \times \frac{\pi d^2}{4} \tag{10}$$

即

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{v \times S_t}{H \times \pi}} \tag{11}$$

为考察式(9)~(11)的准确性,对 $5\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 球形颗粒在相同流速 ($v=10\ \text{m/s}$) 下不同光束宽度 H 的理想脉冲进行数值积分,其结果见表 3.

表 3 每行数据为同一光束宽度下不同颗粒的信号积分,而每列数据为同一颗粒在不同光束宽度的信号积分.参照表 1 和表 2 数据拟合过程对表 3 数据处理仍可得到式(9)~(11).同时,表 3 中积分数值 S_t 是通过颗粒信号积分得出,这与通过式(10)计算的结果一致.

在已知流速 v 、光束宽度 H 和信号积分 S_t 时,通过式(11)对表 1 和表 3 数据处理求得粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$,与设定粒径一致.对长为 l 、宽为 w 的棒状颗粒进行数值模拟同样符合式(11),结果如表 4.表中, d_0 是与棒状颗粒投影面积相同的圆的直径, d_c 为通过式(11)求得的等效粒径.

表 3 不同光束宽度下球形颗粒信号积分 ($v=10\ \text{m/s}$)

Table 3 The integral of the spherical particle under different beam width ($v=10\ \text{m/s}$)

S_t	$d/\mu\text{m}$	5	15	25	50	100
		($a=19.6$)	($a=176.7$)	($a=490.9$)	($a=1\ 963.5$)	($a=7\ 854.0$)
$H/\mu\text{m}$	15	29.5	265.1	736.3	2\ 945.2	11\ 780.9
	20	39.3	353.4	981.7	3\ 927.0	15\ 708.0
	25	49.1	441.8	1\ 227.2	4\ 908.7	19\ 635.0
	30	58.9	530.1	1\ 472.6	5\ 890.5	23\ 561.9
	35	68.7	618.5	1\ 718.1	6\ 872.2	27\ 488.9
	40	78.5	706.9	1\ 963.5	7\ 854.0	31\ 415.9

表 4 $H=15\ \mu\text{m}$, $v=10\ \text{m/s}$ 时棒状颗粒数值模拟结果

Table 4 The simulation result of the rod-shaped particle ($H=15\ \mu\text{m}$, $v=10\ \text{m/s}$)

Length $l/\mu\text{m}$	Width $w/\mu\text{m}$	Projection area $a/\mu\text{m}^2$	Integral S_t	Equivalent grain size $d_0/\mu\text{m}$	Solution value $d_c/\mu\text{m}$
5	5	25	37.5	5.6	5.6
15	5	75	112.5	9.8	9.8
25	5	125	187.5	12.6	12.6
50	10	500	750.0	25.2	25.2
100	10	1\ 000	1\ 500.0	35.7	35.7

实际上分析图 6 所示的颗粒流经检测光束过程可知,当颗粒在 $t_0 \sim t_5$ 时,若每隔 $\Delta t = H/v$ 对小光束下颗粒的投影面积进行累加即可得到颗粒整体的投影面积 a .当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,有积分 $S_t = \Delta t \times a$,即为式(10).

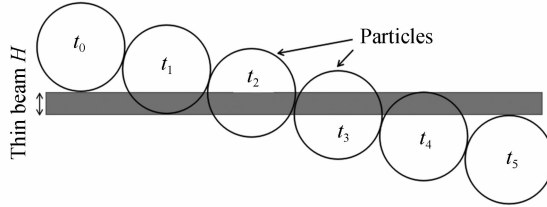


图 6 颗粒间隔遮光面积示意图

Fig. 6 The particle shading area of interval time

4 流速和噪声对测量准确性影响

式(11)是在假定流速恒定的情况下得出的,但在实际检测系统中流速是有波动的.若设定流速和实际流速都为 v 时信号的积分值为 S_t ,由式(11)可得在速度 v 下粒径 d_v 为

$$d_v = 2 \times \sqrt{\frac{v \times S_t}{H \times \pi}} \tag{12}$$

当实际流速变动为设定流速 n 倍时,实际的信号积分值变为 S_t/n ,而粒径求解过程中流速仍按照设定值 v 计算,由此可求得流速波动时的粒径 d_n 为

$$d_n = 2 \times \sqrt{\frac{v \times S_t}{H \times \pi \times n}} \tag{13}$$

此时粒径求解值与真实值的相对误差为

$$\epsilon_v = \left| \frac{d_n - d_v}{d_v} \right| = \left| \sqrt{\frac{1}{n}} - 1 \right| \times 100\% \tag{14}$$

由式(14)可得,流速增大 1%、5%、10%,粒径相对误差分别为 0.50%、2.41%、4.65%;流速减小 1%、5%、10%,粒径相对误差分别为 0.50%、2.60%、5.41%.通常液流驱动装置的流速波动可以控制在 10%以内^[17],高性能的恒压驱动装置流速波动可以控制在 1%以下.

同时,实际电路的噪声也会影响测量准确性.为得到随机噪声引起的测量误差,假定添加幅值均为确定值 Δn 的噪声,此时信号的积分为 $(1 + \Delta n)S_i$,将此值代入式(11),按照式(14)的推导过程可得噪声相对误差为

$$\epsilon_n = \left| \sqrt{1 + \Delta n} - 1 \right| \times 100\% \quad (15)$$

当脉冲信号所带噪声分别为 0.1%、0.5%、1% 时,由式(15)可得粒径相对误差小于 0.05%、0.25%、0.50%. 对理想脉冲信号添加对应噪声水平的随机噪声,所得误差分别小于 0.05%、0.25%、0.50%. 当基准电压 E_0 为 10 V 时,容易实现噪声抑制在 1% 以下^[18]. 随着噪声的增大,设定值与求解值的误差逐渐增大. 但从整个粒径范围来说,噪声对粒径信息提取的影响较小.

5 实验验证

采用波长为 532 nm 的半导体激光器、哈佛 PHD 2000 微量注射泵和滨松硅光电探测器 S1133 等搭建实验装置对 25 μm 和 90 μm 两种乳胶微粒标准物质进行实测. 实验中激光器发出的光束经光阑限制后形成检测光束,待测液体在微量注射泵驱动下匀速通过检测光束,待测液体中的微粒对光束产生遮挡作用使光电探测器输出脉冲信号,用 RIGOL DS1102E 数字示波器显示微粒光电脉冲信号. 通过对脉冲信号等间隔采样后以复合梯形公式求得其信号积分,然后应用式(11)即可求得等效粒径.

当光束宽度 H 为 50 μm ,流速为 0.33 m/s 时,两种微粒脉冲波形(波形反向)和实测结果分别如图 7 和表 5 所示,其测量粒径均值分别为 25.61 μm 和 93.87 μm ,相对误差分别小于 3.44% 和 5.39%. 当光束宽度 H 为 50 μm ,流速为 0.50 m/s 时,两种微粒脉冲波形(波形反向)和实测结果分别如图 8 和表 6 所示,测量粒径均值分别为 25.62 μm 和 93.88 μm ,相对误差分别小于 3.16% 和 5.40%. 当光束宽度 H 为 70 μm ,流速为

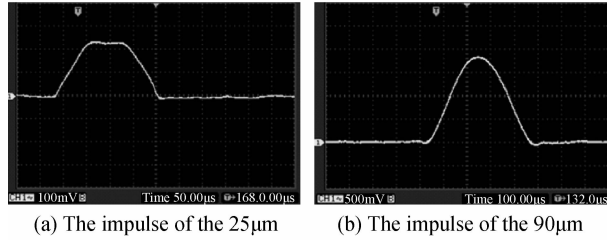


图 7 球形颗粒脉冲 ($v=0.33$ m/s, $H=50$ μm)

Fig. 7 The impulse of the particle ($v=0.33$ m/s, $H=50$ μm)

表 5 25 μm 和 90 μm 颗粒的实测结果 ($v=0.33$ m/s, $H=50$ μm)

Table 5 The result of the 25 μm and 90 μm particle ($v=0.33$ m/s, $H=50$ μm)

Experiment times	25 μm		90 μm	
	Solution value $d_c/\mu\text{m}$	Relative error/%	Solution value $d_c/\mu\text{m}$	Relative error/%
1	25.48	1.92	94.12	4.58
2	25.45	1.80	93.45	3.83
3	25.86	3.44	94.85	5.39
4	25.73	2.92	92.80	3.11
5	25.64	2.56	93.46	3.84
6	25.52	2.08	94.55	5.06
Average value	25.61	2.44	93.87	4.30

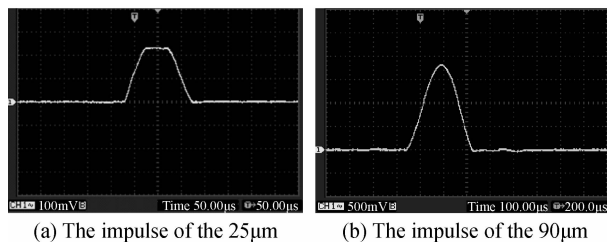


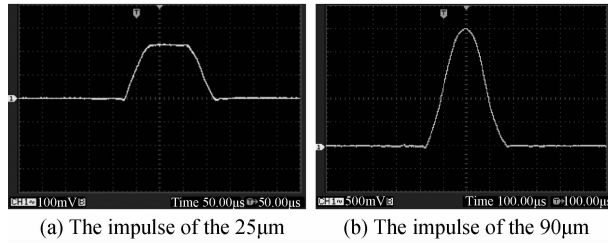
图 8 球形颗粒脉冲 ($v=0.50$ m/s, $H=70$ μm)

Fig. 8 The impulse of the particle ($v=0.50$ m/s, $H=70$ μm)

表 6 25 μm 和 90 μm 颗粒的实测结果 ($v=0.50\text{ m/s}$, $H=50\text{ }\mu\text{m}$)Table 6 The result of the 25 μm and 90 μm particle ($v=0.50\text{ m/s}$, $H=50\text{ }\mu\text{m}$)

Experiment times	25 μm		90 μm	
	Solution value $d_c/\mu\text{m}$	Relative error/%	Solution value $d_c/\mu\text{m}$	Relative error/%
1	25.52	2.08	93.92	4.36
2	25.43	1.72	93.62	4.02
3	25.68	2.72	94.32	4.80
4	25.79	3.16	94.20	4.67
5	25.70	2.80	92.38	2.64
6	25.62	2.48	94.86	5.40
Average value	25.62	2.48	93.88	4.31

0.50 m/s时,两种微粒脉冲波形(波形反向)和实测结果分别如图 9 和表 7 所示,其测量粒径均值分别为 25.68 μm 和 94.36 μm ,相对误差分别小于 3.52%和 5.59%。其中图 7(a)、图 8(a)和图 9(a)为 25 μm 微粒脉冲信号示意图,其脉冲波形与小颗粒能完全进入光束时的脉冲波形相似;图 7(b)、图 8(b)和图 9(b)为 90 μm 微粒脉冲信号示意图,其脉冲波形与大颗粒和中等颗粒流经光束时的脉冲信号相似。

图 9 球形颗粒脉冲 ($v=0.50\text{ m/s}$, $H=70\text{ }\mu\text{m}$)Fig. 9 The impulse of the particle ($v=0.50\text{ m/s}$, $H=70\text{ }\mu\text{m}$)表 7 25 μm 和 90 μm 颗粒的实测结果 ($v=0.50\text{ m/s}$, $H=70\text{ }\mu\text{m}$)Table 7 The result of the 25 μm and 90 μm particle ($v=0.50\text{ m/s}$, $H=70\text{ }\mu\text{m}$)

Experiment times	25 μm		90 μm	
	Solution value $d_c/\mu\text{m}$	Relative error/%	Solution value $d_c/\mu\text{m}$	Relative error/%
1	25.60	2.40	92.78	3.09
2	25.56	2.24	94.82	5.36
3	25.66	2.64	94.96	5.51
4	25.81	3.24	93.88	4.31
5	25.88	3.52	95.03	5.59
6	25.58	2.32	94.66	5.18
Average value	25.68	2.73	94.36	4.83

6 结论

本文提出了一种基于脉冲信号积分的颗粒等效粒径提取方法。对流速和噪声对测量准确性的影响进行了分析,结果表明:当流速波动小于 10%时,测量误差小于 5.41%;当噪声小于 1%时,其测量误差小于 0.50%。采用标准颗粒验证了该方法提取颗粒粒径信息的有效性。与传统方法相比,使用小光束截面可以增强颗粒的信号脉冲特征,该方法能够有效地提取大颗粒和小颗粒的粒径信息,解决因检测范围限制而更换仪器传感器的问题,且提高了复杂形体颗粒测量的准确性。

参考文献

- [1] ZENG L, ZHANG H P, LIU E C, *et al.* Research on rapid detection and accounting of small particles in marine hydraulic oil[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, **645-646**: 687-692.
- [2] HU Z, RIPPLE D C. The use of index-matched beads in optical particle counters[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2014, **119**: 674-682.
- [3] LIU S, LIU B. Particle measurement with a liquid-borne particle counter; analytical figures of merit[J]. *Solid State Phenomena*, 2014, **219**: 157-160.
- [4] PHILLIPS W D, STANIEWSKI J W G. The origin, measurement and control of fine particles in non-aqueous hydraulic

- fluids and their effect on fluid and system performance[J]. *Lubrication Science*, 2016, **28**(1): 43-64.
- [5] XU Tao, GAO Yu-cheng, WU Xing. Study of the photoimpact character in the light-blockage particle size measurement [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2004, **18**(3): 49-53.
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.
- [6] CARVER L D. Light blockage by particles as a measurement tool[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1969, **158**(3):710-721.
- [7] QU Dan-dan, LUO Shi-jin, XUE Jian-ying, *et al.* The Development of particle detector based on the light-blocking theory[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, **24**(z2): 156-158.
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.
- [8] GB/T 18854-2002. Hydraulic fluid power-Calibration of liquid automatic particle counters[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
GB/T 18854-2002. 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]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [9] DL/T432-2007. Determination of particulate contamination in oil[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
DL/T432-2007. 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]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [10] GB/T 29024.3-2012. Determination of particle size distribution. Single particle light interaction methods. Part 3; light extinction liquid-borne particle counter[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
GB/T 29024.3-2012. 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]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [11] HUANG Ting-lei, LI Min, ZHENG Gang, *et al.* An Improved sensor of extinction particle counter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(6): 749-751.
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.
- [12] WANG Chen-yan. The underlying hardware and software system of liquid particle counter based on light blocking and its calibration[D]. Suzhou: Soochow University, 2012.
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.
- [13] KANG Zhan-xiang, WANG Yan-shan, HU Fei, *et al.* Research on hydraulic system contamination level sensor based on optoelectronic theory[J]. *Measurement & Control Technology*, 2013, **32**(12): 1-3.
康占祥, 王燕山, 胡飞, 等. 基于光电原理的液压系统污染度检测传感器研究[J]. 测控技术, 2013, **32**(12): 1-3.
- [14] CAO Fang, ZHANG Li-ping. Design and implementation of high-performance light-blockage particle counter [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, **37**(4): 130-133.
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.
- [15] LIANG Ming-liang, HUANG Mei-zhen, SUN Zhen-hua, *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.
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.
- [16] CAVICCHIR E, CARRIER M J, COHEN J B, *et al.* Particle shape effects on subvisible particle sizing measurements [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2015, **104**(3): 971-987.
- [17] ZHOU Qiang, YU Feng-xin, YU Shou-qian. Study on the flowrate control of intelligent infusion pump [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(10): 2163-2167.
周强, 于凤新, 于守谦. 新型智能输液泵流速控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, **29**(10): 2163-2167.
- [18] ZHOU Yu-jiao, REN Kan, QIAN Wei-xian, *et al.* Noise analysis of photoelectric detection circuit based on photodiode reverse bias[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(1): 252-257.
周玉蛟, 任侃, 钱惟贤, 等. 基于光电二极管反偏的光电检测电路的噪声分析[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(1): 252-257.