

文章编号 1004-924X(2018)11-2632-07

## 复杂颗粒流速度场分布的空间滤波测量

侯 鹏, 杨 晖\*, 李 然, 林世昊, 华云松

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:**空间滤波测速法具有结构简单、稳定性好和适用性强等优点,但传统线阵 CCD 空间滤波测速法要求 CCD 阵列方向与待测物体的运动方向一致,因此不适合测量复杂的流场。针对这一问题,本文提出了基于面阵 CCD 相机的空间滤波测速方法。对采集到测量区域的一系列面阵 CCD 输出图像进行处理,在图像水平方向和垂直方向分别进行隔行采样,模拟多狭缝空间滤波特性,实现了对障碍流颗粒速度的光学非接触式测量。针对复杂流场功率谱密度的特点,利用能量重心校正频谱提高了系统测量精度。通过调节传送带速度对本系统进行标定,实现了不同速度下的流速测量,平均误差小于 4%。利用本系统还测量了由玻璃砂模拟的泥石流速度场分布,最后讨论了空间周期和测量时间对测量结果的影响。结果表明,采样时间大于 0.5 s 时,测量结果趋于稳定,空间分辨率最小可达 1.28 mm。

**关键词:**光学测量;空间滤波;面阵 CCD;颗粒流;频谱校正;图像测速

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182611.2632

## Measurement of velocity field distribution of complex particle flow by spatial filter

HOU Peng, YANG Hui\*, LI Ran, LIN Shi-hao, HUA Yun-song

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering,  
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

\* Corresponding author, E-mail: yanghui@usst.edu.cn

**Abstract:** The spatial-filtering velocimetry method has the advantages of having a simple structure, good stability, and strong applicability. However, the traditional linear-array Charged Coupled Device (CCD) spatial-filtering velocity measurement method requires that the direction of the CCD array be the same as the direction of motion of the object whose velocity is to be measured. Therefore, this method is not suitable for measuring complex flow fields. To solve this problem, this study proposes a spatial-filtering velocity-measurement method based on an area-array CCD camera. A series of area-array CCD output images were collected from the measurement area. Interlaced sampling was performed in the horizontal and vertical directions of the image to simulate the multi-slit spatial-filtering characteristics, and an optical non-contact measurement of flow particle velocity around an obstacle was realized. Moreover, regarding the characteristics of the power spectrum density of complex flow fields, using an energy center-of-gravity correction spectrum improves system measurement accuracy. The system was calibrated by adjusting the speed of the conveyor to achieve

收稿日期:2018-04-17;修订日期:2018-05-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11572201)

measurements at different speeds with an average error of less than 4%. In addition, the debris-flow velocity-field distribution simulated with glass sand was also measured using this system. Finally, the influence of spatial period and duration on the measurement results was discussed, which demonstrate that the measured velocity reaches a plateau for sampling over 0.5 s and the spatial resolution is improved to be 1.28 mm.

**Key words:** optical measurement; spatial filtering; area CCD; particle flow; spectrum correction; image speed measurement

## 1 引 言

颗粒材料由单个固体颗粒聚集而成,当受到外力扰动时,颗粒呈现一种类似液体的流动行为,粒状材料的加工广泛应用于化学、矿物、陶瓷、制药和食品加工领域<sup>[1]</sup>。泥石流、滑坡和雪崩等自然现象发生时,其滑落现象通常表现出颗粒流的运动特性,故在实验模拟时,使用颗粒流动来表征和概化这些山地灾害<sup>[2-3]</sup>。设置障碍物是控制颗粒流动过程的有效手段。

颗粒流的运动规律研究一直是颗粒研究的重点,而对颗粒流运动速度的准确快速测量对研究颗粒流的运动特征和揭示颗粒流的内在本质具有十分重要的意义<sup>[4]</sup>。数字图像测速和正电子发射颗粒跟踪(PEPT)测量技术是应用最为广泛的密集流颗粒物质速度测量方法<sup>[5]</sup>。其中,数字图像测速主要有粒子图像测速(PIV)和粒子跟踪测速(PTV)<sup>[6]</sup>两种技术,它们在测量颗粒流速场的同时可获得颗粒运动的方向和加速度,但仅适用于测量较大颗粒的二维颗粒流或颗粒流表面速度场。正电子发射颗粒跟踪(PEPT)<sup>[7]</sup>适用于各种形状和大小的颗粒,但时空分辨率较低,只能跟踪少量失踪粒子。

1963年,Ator<sup>[8]</sup>提出了空间滤波测速方法(Spatial Filtering Velocimetry, SFV),可以实现颗粒和物体移动速度的测量。SFV具有测量系统结构简单稳定、数据处理方便等优点<sup>[9]</sup>。随着空间滤波法的不断发展,逐渐用光电器件、CCD代替了传统的光栅器件,CCD图像传感器既作为空间滤波器又作为光电接收器件,使得该方法结构更加简化<sup>[10]</sup>。利用线阵CCD模拟空间滤波器的颗粒测速已有报道<sup>[11]</sup>,但线阵CCD只能测量颗粒流场某一个方向的速度。在已知应用中,王

伟<sup>[12]</sup>等人利用面阵CCD空间滤波器测量了纳米流激光散斑的平均速度,但是散斑速度只能表征纳米流的速度变化情况,并不是实际的颗粒流速度,并且测量的纳米流体速度方向唯一。

本文提出利用面阵CCD的空间滤波特性进行障碍流颗粒速度测量的新方法。该方法解决了线阵CCD只能测一个方向速度的问题,可以测量一些速度方向不唯一的应用场景。本文仅通过对面阵CCD直接采集到颗粒流场的一系列速度图像处理,实现了对颗粒流场速度分布的直接测量。

## 2 实验原理

### 2.1 空间滤波原理

SFV是通过一组平行狭缝或透射光栅来观察运动物体的光学图像,从而计算出物体的运动速度测量方法,其测量系统如图1所示,该系统由光源、物镜、透射光栅、透镜以及光电探测器组成。光源照射在X方向以速度 $V_0$ 运动的物体表面上,物镜将运动物体成像到垂直于运动方向设置的光栅上。运动物体表面某个粒子的像在空间滤波器上运动,该粒子的速度信息被空间滤波器转换成频率与粒子运动速度成正比的光强信号,再通过聚焦透镜将光强信号汇聚在探测器上,被探测器转换成同频率的时域信号。如果物体表面粒子在与光轴垂直的平面上的速度为 $v_0$ ,则物体表面粒子的运动速度 $v_0$ 与时域信号频率 $f_0$ 之间的关系为:

$$v_0 = P \times f_0 / M, \quad (1)$$

其中: $M$ 是成像系统的光学放大倍数, $P$ 为滤波器中平行狭缝之间的间隔,即空间周期。速度 $v_0$ 可通过测量时域信号的尖峰频率获得,速度测量的准确性取决于空间滤波器的性能<sup>[13-14]</sup>。

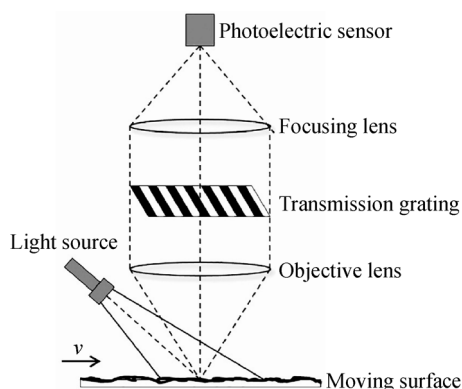


图 1 SFV 测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SFV measurement

传统 SFV 系统带有透射光栅和热电传感器, 结构复杂, 加工难度大, 而且空间周期不稳定, 现已逐渐被线性 CCD/CMOS 阵列相机所取代。图像传感器的使用极大地简化了系统结构, 提高了灵活性和稳定性。

## 2.2 面阵 CCD 测速原理

面阵 CCD 是由离散像素构成的光电探测器阵列。通过选取特定的像素单元模拟传统光栅, 进行空间滤波测量。水平方向面阵 CCD 模拟空间滤波器的示意图如图 2 所示, 空间滤波器的尺寸为计算区域采集图像的大小。假设水平方向上有  $X_n$  个像素点, 垂直方向上有  $Y_n$  个像素点, 颗粒运动水平方向速度为  $v_x$ , 垂直方向速度为  $v_y$ 。以水平方向  $X$  为例, 选取第  $i$  帧图像上待测的区域, 奇数列相当于光栅透光区域, 偶数列相当于光栅遮光区域, 将每一列像素的  $X_n$  个像素值相加, 用所有奇数列的和  $B_{1,i}$  减去偶数列的和  $B_{2,i}$ , 得到一张图像的模拟滤波器的差分输出  $A_i$ 。将每一帧图像重复以上步骤, 可得到一个采样序列  $A=(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n)$ ,  $n$  为采集图像的帧数。将序列  $A$  进行傅里叶变换得到功率谱, 从而确定尖峰频率  $f$ , 便可得到物体水平方向的速度  $v_x$ 。每一个透光区域和遮光区域构成一个空间周期  $P$ , 在图像上表示为相邻的奇数列和偶数列, 空间周期数  $n$  可用总列数除以空间周期  $P$  获得。同样, 用相同的方式可以得到物体垂直方向上的速度  $v_y$ , 对  $v_x$  和  $v_y$  求矢量和, 便可得到物体的实际速度  $v$ 。其中, 光栅的宽度可以随着待测物体的实际情况而改变, 即增加图像上奇数列和偶数列的宽度。

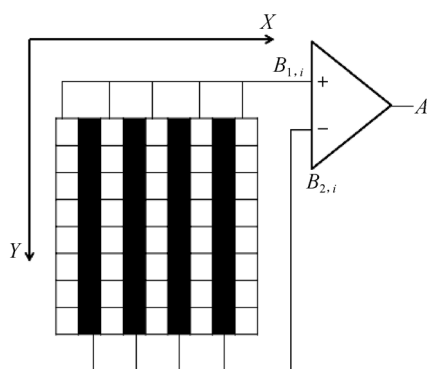


图 2 面阵 CCD 测速原理图

Fig. 2 Principle of area CCD velocimetry

## 2.3 频谱校正

如图 3 所示, 对于匀速运动的物体, 可以从光谱的峰值得到中心频率。然而, 对于粒子系统, 由于测量区域中粒子的速度无序, 频谱被扩大并且混有噪声。在从频谱峰值提取中心频率之前, 需要对 FFT 频谱进行修正。在光谱校正过程中, 采用能量重心修正算法, 以获得更精确的频率值。首先, 使用平均修正方法来获得频谱的趋势。图 3 给出了频谱校正平均方法的结果 (彩图见期刊电子版)。黑色曲线代表校正前的信号频谱, 红色曲线代表校正后的信号频谱。其次, 使用能量重心校正技术来确定平均校正后频谱中的峰值频率范围<sup>[15]</sup>。然后找到峰值频率的最大部分。最后, 计算频谱的质心, 将质心位置设置为校正后的频点, 即时域信号的中心频率。

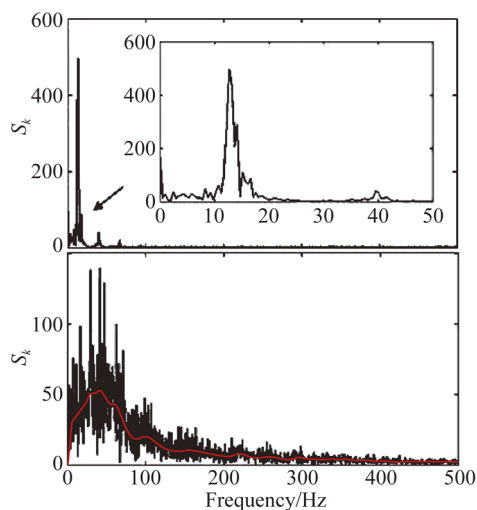


图 3 频谱校正示意图

Fig. 3 Spectrum correction

能量重心法是根据对称窗函数频谱的能量重心特性推导出的一种离散频谱校正方法,是一种适用于加各种对称窗的通用频谱校正方法。能量重心修正方法不依赖于窗口函数,可直接对多级平均功率谱进行修正,算法简单极易实现,修正精度与参与修正的点数有关,点数越多,校正精度越高。能量重心校正比较适合 SFV 的一种方法,因为它具有算法简单、计算量小、误差小的特点。

### 2.4 测速范围

假设 CCD 相机的像素单元长度为  $p_x$ ,空间周期长度为  $p$ ,CCD 采集区域共有  $n$  个空间周期,故 CCD 相机采集区域长度为:

$$l = n \times p \times p_x. \quad (2)$$

若待测物体以速度  $v$  匀速运动,则在每帧图像测量时间  $t$  内,运动物体实际被拍摄到的长度为:

$$L = v \times t. \quad (3)$$

假设焦距为  $f$ ,相机与运动物体表面距离为  $H$ ,帧频为  $f_r$ ,则每帧时间为  $t = \frac{1}{f_r}$ ,根据物像之间的比例关系可以得出:

$$\frac{l}{L} = \frac{f}{H-f}. \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可得:

$$l = \frac{f \times v}{(H-f) \times f_r}. \quad (5)$$

对于面阵 CCD 来说,其单一方向上像素个数  $n$  是固定的,相机拍摄范围一定小于相机采集区域长度,所以可得:

$$l < n \times p \times p_x. \quad (6)$$

结合式(5)与式(6)可得:

$$v < \frac{n \times p \times p_x \times f_r \times (H-f)}{f}. \quad (7)$$

从式(7)可以看出,实际测量速度  $v$  与面阵 CCD 与运动物体测量高度和相机帧频成正比。理论上,测量高度越高可以测量速度更快的物体,但在实际测量中,由于环境光、实验平台的限制等,测量高度不可能无限增高。此外,相机帧频越高,测量范围也会增大,而帧频是面阵 CCD 的特性,也不会无限增加。

## 3 实验及结果

### 3.1 系统标定

为了验证系统算法的有效性 & 精度,首先测

量了一个由高精度、高稳定性直流电机带动的传送带,用作测试系统的标准速度。图 4 是 SFV 系统的传送带验证实验装置。传送带由一个额定电压为 40 V 的电机通过齿轮驱动。系统将面阵 CCD 和镜头固定在一个支架上,调整拍摄角度,保证 CCD 测量像素平面平行于皮带运动平面,并且 CCD 的像素行(或列)的方向与传送带的运动方向产生一个任意的角度,选取适合的拍摄高度与焦距获得皮带的测量图像。

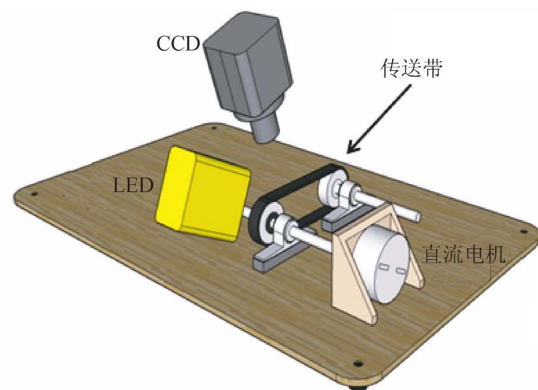
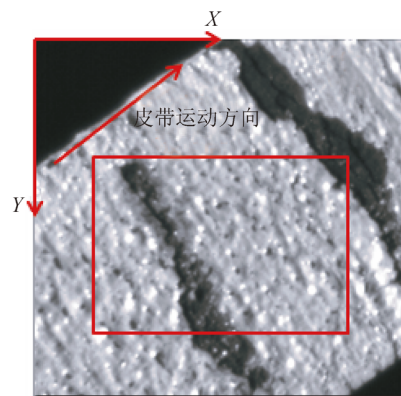


图 4 皮带测量系统

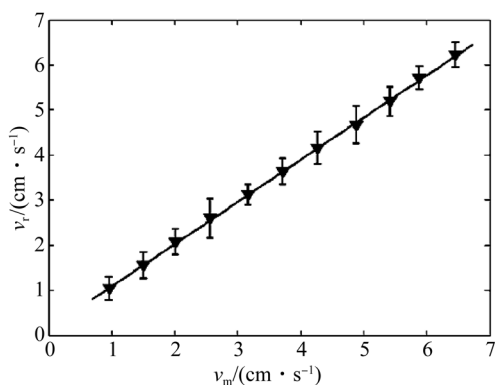
Fig. 4 Belt measurement system

图 5(a)为面阵 CCD 以  $f_r = 500$  Hz 的频率测到的传送带的原始图像,其中长方形区域为实际测量时的采样区域。实验共测得传送带速度从 1.037~6.22 cm/s 之间 11 个速度的图像,每组分别测量 10 次。图 5(b)为同一速度下 10 次测量的平均速度,其中空间周期  $p = 8$ ,横轴  $v_m$  为实际测量值,纵轴  $v_r$  为实际值。实际测量平均误差值与标准差值见表 1。



(a)原始图像

(a)Original image



(b)测速结果

(b) Speed measurement result

图 5 传送带实验验证

Fig. 5 Conveyor belt verification

表 1 传送带速度的实际值、测量值及标准差

Tab. 1 Actual value, standard deviation and measured value of conveyor belt speeds

传送带实际速度	传送带十次测量 平均误差值	传送带十次 测量标准差
1.037 0	0.025 4	0.25
1.550 1	0.043 5	0.30
2.073 3	0.060 1	0.28
2.591 7	0.029 0	0.43
3.110 0	0.054 9	0.22
3.628 3	0.085 9	0.29
4.146 7	0.124 5	0.36
4.665 0	0.215 3	0.42
5.183 3	0.237 0	0.32
5.701 7	0.182 9	0.26
6.220 0	0.240 0	0.27

### 3.2 障碍流测速

图 6 所示为模拟泥石流等在有障碍情况下滑落速度测量的实验装置示意图。装置下半部分倾斜物体是由透明有机玻璃构成的长方体箱,长宽高分别为 50, 2 和 120 cm,它与地面的角度  $\alpha$  可以调节。玻璃箱中放置一个三角体障碍物,三角体的厚度与玻璃箱相等,确保三角体在颗粒下落时受到影响而发生水平方向上的位移。玻璃箱上端由一个扁长型的漏斗构成,漏斗和玻璃箱之间由一个抽板分割。抽板上端放置了密集堆积的直径为 1~1.5 mm 的玻璃砂。光源为白光 LED,面阵 CCD 使用千眼狼 3F 系列高速摄像机,全幅共有  $2\,320 \times 1\,720$  pixel 单元,单个像素尺寸为  $7\ \mu\text{m}$ ,行频输入范围最大为 36 kHz,镜头焦距可以手动调整。图 6 中长方形区域为实验测量区

域,将面阵 CCD 用支架放置在与三角体相同高度的位置,并且确保 CCD 镜头与斜面保持平行。

实验开始前,将抽板关闭,颗粒填充在漏斗中。LED 光源均匀照射在待测区域。实验开始时,将抽板打开使颗粒受重力的作用自然下落,同时用面阵 CCD 相机捕获测量区域的图像,提取图像中颗粒流动区域计算颗粒流速度。

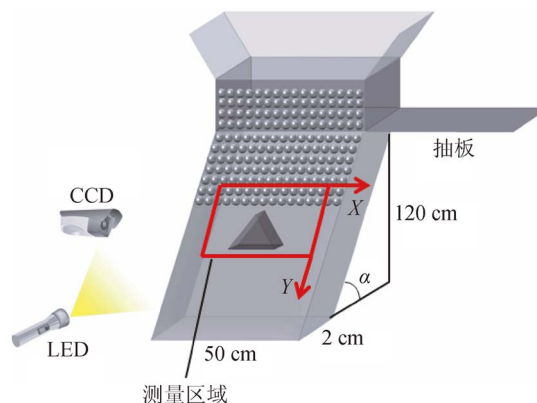


图 6 有障碍情况下泥石流滑落速度测量实验装置示意图

Fig. 6 Experimental setup for velocity measurement of debris flow with obstacle

令玻璃箱倾斜角  $\alpha=40^\circ$ ,三角形为障碍物,其倾斜角为  $41.0^\circ$  的等腰三角形时,颗粒自由下落的速度分布如图 7 所示。由于颗粒流运动沿着三角形障碍物中线左右对称,分布图中仅画出了左半部的分布结果。其中拍摄图像大小为  $1\,100\ \text{pixel} \times 1\,500\ \text{pixel}$ ,颗粒流运动区域为  $210\ \text{pixel} \times 210\ \text{pixel}$  的矩形。测量空间周期  $p=52$ ,X 方向空间周期数  $n=7$ ,Y 方向空间周期数  $n=5$ 。图中标注的角度为该区域颗粒运动方向与 X 方向的夹角,箭头表示运动方向,长度为运动速度。从结果图中可以看出,颗粒受重力影响向下运动,当颗粒流接近障碍物时,运动速度减小且产生水平方向的位移。由于障碍物的影响,颗粒在接近障碍物时会产生一定的堆积影响,即在障碍物上方,颗粒运动速度减缓,运动方向产生较小的变化,与 X 方向的夹角为  $70^\circ$  左右。颗粒运动越接近障碍物表面,颗粒运动方向与障碍物倾斜角越相似,且速度越小。如图 7 所示,在障碍物末端的颗粒运动方向与 X 方向的夹角为  $45.26^\circ$ ,此时颗粒运动方向与障碍物夹角最为接近。边侧颗粒由于受到玻璃箱侧边的影响,基本沿着 Y 方向运动,没有 X 方向上的位移。颗粒初始进入玻璃箱的速度为  $109.582\,3\ \text{cm/s}$ ,当完全离开障碍

物时,速度为 95.31 cm/s。障碍物的加入,使得最终颗粒的运动速度得以减小。

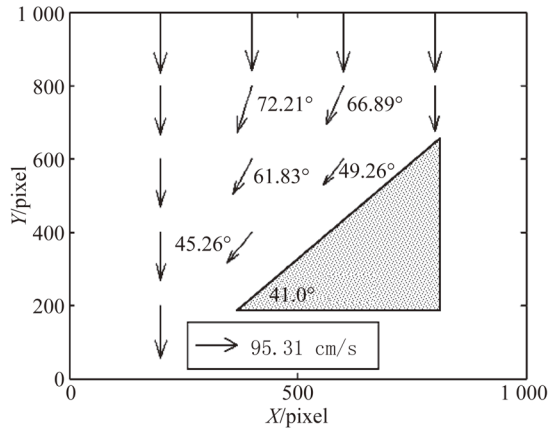


图 7 障碍流颗粒速度结果图

Fig. 7 Particle velocity of debris flow with obstacle

## 4 系统实验参数讨论

### 4.1 空间周期 $P$

为了研究空间周期  $P$  对测量速度结果的影响,在采样频率为 300 Hz、放大倍数为 0.046 的条件下采集了一系列在重力作用下没有三角形障碍物阻挡的颗粒流图像,此时颗粒竖直向下滑落,水平方向没有速度分量。如图 8 所示,通过分析不同空间周期  $P$  以及不同的空间周期数量  $n$ ,计算不同情况下的颗粒流速度。由于此方法是计算颗粒流一个区域内一定时间的平均速度,故需要分割成尽量小的区域测量或加大测量的放大倍数。

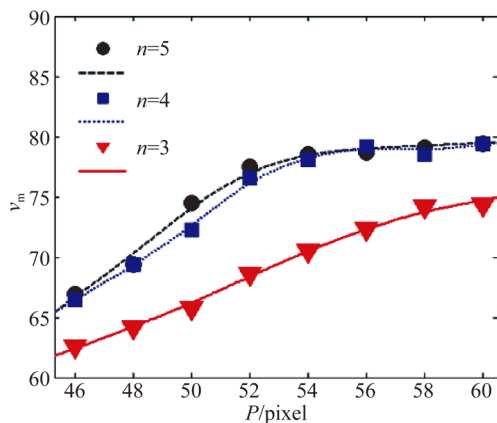


图 8 不同空间周期下的速度测量结果

Fig. 8 Measurement results of flow velocity in different space cycles

如图 8 所示,当  $n=4,5$ ,且空间周期  $P \geq 52$  时,计算出的颗粒流速度  $v_m$  基本平稳且吻合;而当  $n=3$  时,误差过大。由于空间周期的增大会导致空间分辨率的减小,故本实验当结果稳定时,就不需要继续增大空间周期与空间周期数。通过计算,此实验的空间分辨率为 1.28 mm。

### 4.2 测量时间

在实际应用中,需要将测量时间尽量缩短从而提高测量效率。为了研究测量时间对速度测量结果的影响,在与 4.1 所述相同的实验条件下,采集了一系列颗粒流运动图像。在原始图像时截取了  $260 \times 210$  pixel 单元的区域,空间周期  $P=52$ ,分别计算不同测量时长下的颗粒流速度,结果如图 9 所示。从最终结果可以看出,当测量时间超过 0.5 s 时,测量结果趋于稳定;测量时间小于 0.5 s 时,具有较大的误差。

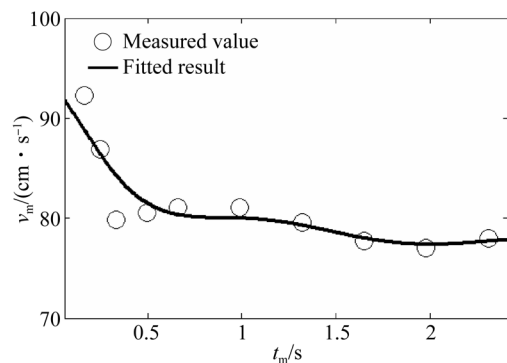


图 9 测量时间对速度测量结果的影响

Fig. 9 Effect of measurement time on velocity measurement results

## 5 结 论

本文将面阵 CCD 与空间滤波速度测量方法相结合,提出了一种基于面阵 CCD 空间滤波器的障碍流颗粒流场速度测量方法。搭建了利用面阵 CCD 测量传送带速度的实验装置,通过对已知传送带速度的测量计算进行系统标定,计算出的传送带速度误差维持在 4% 以内。进一步搭建了障碍流颗粒流速测量的实验装置,通过对采集到的颗粒运动图像进行隔行采样、频谱分析和频谱校正得到信号尖峰频率,最终测量出颗粒流场速度。最后分析了空间周期、测量时间对速度测量结果的影响。结果表明,当测量采样时间大于 0.5 s 时,结果趋于稳定,且空间分辨率最小可达到 1.28 mm。

## 参考文献:

- [1] YANG H, ZHANG B F, LI R, *et al.*. Particle dynamics in avalanche flow of irregular sand particles in the slumping regime of a rotating drum [J]. *Powder Technology*, 2017, 311:439-448.
- [2] CHOU S H, HSIAU S S. Experimental analysis of the dynamic properties of wet granular matter in a rotating drum [J]. *Powder Technology*, 2011, 214(3):491-499.
- [3] 樊贻贻, 王思敬, 王思志. 障碍物的设置对颗粒流动过程的影响 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(5):35-40.  
FAN Y Y, WANG S J, WANG E ZH. Influence of obstacles on granular flows [J]. *Civil and Environmental Engineering*, 2010, 32(5):35-40. (in Chinese)
- [4] GENNES P G D. *Granular Matter: A Tentative View* [M]. More Things in Heaven and Earth. New York:Springer, 1999:S374-S382.
- [5] 杨晖, 张国华, 王宇杰, 等. 密集颗粒体系的颗粒运动及结构测量技术 [J]. *力学进展*, 2018, 48: 201812  
YANG H, ZHANG G H, WANG Y J, *et al.*. Measurement techniques of grain motion and inter-grain structures in dense granular materials [J]. *Advances in Mechanics*, 2018, 48: 201812. (in Chinese)
- [6] 王希麟, 张大力, 常轶, 等. 两相流场粒子成像测速技术 (PTV-PIV) 初探 [J]. *力学学报*, 1998, 30(1):121-125.  
WANG X L, ZHANG D L, CHANG ZH, *et al.*. Preliminary study on two-phase flow field particle imaging velocimetry (PTV-PIV) [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechani*, 1998, 30(1):121-125. (in Chinese)
- [7] CHAN C W, BREMS A, MAHMOUDI S, *et al.*. PEPT study of particle motion for different riser exit geometries [J]. *Particuology*, 2010, 8(6):623-630.
- [8] ATOR J T. Image-velocity sensing with parallel-slit reticles [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1963, 53(12):1416-1419.
- [9] HOSOKAWA S, TOMIYAMA A. Spatial filter velocimetry based on time-series particle images [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(6):1361-1372.
- [10] WANG C X S, YAN Y. Spatial selectivity of linear electrostatic sensor arrays [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2013, 62(1):167-176.
- [11] GONG J M, YANG H, LIN S H, *et al.*. Spatial filtering velocimetry for surface velocity measurement of granular flow [J]. *Powder Technology*, 2018, 324(15): 76-84.
- [12] 王伟, 林介东, 钟万里, 等. 基于 CCD 空间滤波器的纳米流体平均速度测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(11):2495-2501.  
WANG W, LING J D, ZHONG W L, *et al.*. Spatial filtering method for nanofluid velocity measurement based on the area CCD [J]. *Journal of Instrumental and Scientific Research*, 2015, 36(11):2495-2501. (in Chinese)
- [13] 何鑫, 周健, 聂晓明, 等. 基于线阵图像传感器的新型空间滤波测速仪 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12):4117-4122.  
HE X, ZHOU J, NIE X M, *et al.*. Novel spatial filtering velocimeter based on a linear image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4117-4122. (in Chinese)
- [14] 郑丽娜, 张涛, 匡海鹏, 等. 基于线阵 CCD 空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11):101-107.  
ZHENG L N, ZHANG T, KUANG H P, *et al.*. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11):101-107. (in Chinese)
- [15] 丁康, 江利旗. 离散频谱的能量重心校正法 [J]. *振动工程学报*, 2001, 14(3):354-358.  
DING K, JIANG L Q. Energy center correction method for discrete spectrum [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2001, 14(3):354-358. (in Chinese)

## 作者简介:



侯 鹏(1994—),男,甘肃兰州人,博士研究生,2016年于河海大学获得学士学位,主要从事颗粒测量技术等方面的研究。E-mail:15051981215@163.com

## 导师简介:



杨 晖(1981—),男,上海人,博士,教授,博士生导师,2003年、2006年、2009年于上海理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光电精密测试技术、激光测量、颗粒技术等方面的研究。E-mail: yanghui@usst.edu.cn