

面阵 CCD 空间滤波技术测量颗粒流速度场分布

王必得, 崔宇, 何国庆, 赵正彪, 李然, 杨晖
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要:为解决线阵 CCD 空间滤波技术无法直接测量滚筒颗粒流速度场的整体分布, 并且难以准确测量颗粒流中具有复杂速度变化的单点区域的问题, 提出了基于面阵 CCD 空间滤波技术的滚筒颗粒流测量方法。通过对采集图片进行分割, 模拟子滤波器, 对每个模拟子滤波器区域分别进行空间滤波测速, 最终得到滚筒颗粒流速度场整体分布。对于滚筒颗粒流中具有复杂速度变化的边壁区域采用正交算法进行速度矢量和运算, 避免了角度测量的误差, 从而提高了对单点位置速度测量的精度。最后, 搭建了实验装置, 对测量方法进行了实验验证, 并分析了方法时空分辨率, 标定了方法精度。研究表明, 该方法能够测量滚筒颗粒流速度场整体分布, 测量误差小于 2%。

关键词: 空间滤波; 面阵 CCD; 颗粒流; 速度分布

中图分类号: TN 29 **文献标志码:** A

Spatial filtering method based on array CCD for granular flow velocity measurement

WANG Bide, CUI Yu, HE Guoqing, ZHAO Zhengbiao, LI Ran, YANG Hui
(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Spatial filtering method (SFM) based on linear CCD cannot directly measure the velocity distribution of granular flow in a rotating drum, meanwhile, it is difficult to measure accurately the velocity at the single-point region with complex velocity in the granular flow. In view of that, a new granular flow measurement method based on array CCD spatial filtering was proposed. Captured images were divided so as to form simulated sub-filters, SFM was performed separately at each sub-filter region, and then, the velocity distribution of granular flow in the rotating drum could be measured. For the end wall region with complex velocity variation in the rotating drum, an orthogonal vector algorithm was used for the velocity vector sum operation, which could avoid errors caused by the angle measurement, thereby improve the accuracy of single-point region velocity measurement. Finally, an experimental rig was set up to verify the method. Resolution and accuracy were analyzed, as well. The results show that array CCD-based SFM can measure the velocity distribution of granular flow in the rotating drum, and the measurement error is lower than 2%.

Keywords: spatial filtering velocimetry; array CCD; granular flow; velocity distribution

颗粒流是颗粒物质存在于自然界和工业界中最常见的一种状态。其中，颗粒流速度作为运动特性中最基本的特征量，对于人们研究颗粒流运动机理具有重要指导意义。在颗粒流运动速度测量方面，实验室通常使用旋转滚筒作为研究颗粒材料一般流动特性的典型研究系统^[1-3]。Pohlman 等^[4]曾使用粒子追踪测速法 (particle tracking velocimetry, PTV) 测量滚筒中颗粒流速度以研究其中的边壁效应影响，但是该方法需要对滚筒进行开口以获取每个颗粒清晰的运动图像，这就导致实验滚筒中的颗粒无法处于连续流状态，限制了系统对于处在连续状态下颗粒流的分析。

空间滤波测速法 (spatial filtering velocimetry, SFV) 是一种可用来测量粗糙固体表面流体速度的方法^[5-6]。SFV 由于不需要追踪示踪粒子并且只需要普通 LED 光源，表现出了强大的环境适应性以及系统简单等优点。20 世纪 60 年代，Ator^[7]首次提出使用 SFV 对空气中的颗粒物质进行测速研究，这项作为此后数十年空间滤波研究工作奠定了基础。随着人们对 SFV 的深入研究^[8-9]，发现电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 可以取代传统结构光栅既作为空间滤波器同时又作为光电接收器件，使 SFV 测速系统更加简化。Uddin 等^[10]在 1998 年首次提出使用线阵 CCD 模拟传统光栅，此后陆续有学者对基于线阵 CCD 的空间滤波测速法进行了深入研究^[11]。近年来，随着越来越多复杂速度场测量的需要，一方面，基于线阵 CCD 的测速方法需要精确测量像素阵列与运动方向的角度，而在实际测量时，由于线阵 CCD 视场的局限性，无法精确像素阵列与运动方向的角度，这就导致测量结果准确性的降低；另一方面，由于面阵 CCD 拥有良好的视场，使得基于面阵 CCD 的 SFV 通过对不同方向的速度分量进行测量，进而根据速度矢量和求得速度，避免了角度测量带来的误差，因此面阵 CCD 已经取代线阵 CCD 成为现代空间滤波系统的主要器件。空间滤波测速领域最新的动态就是 Schaeper 等^[12]利用面阵 CCD 对生物细胞的运动速度进行了测量。

本文在上述内容基础上，创新性地将基于面阵 CCD 空间滤波技术应用于滚筒颗粒流的边壁效

应检测上。不仅解决了现有的 PTV 技术在滚筒研究中的局限性，避免了线阵 CCD 相机视场的局限性导致的无法准确分辨拍摄区域与实际区域是否一致的问题，还可以通过对面阵 CCD 划分子滤波器对颗粒流速度场完成多点测量。本文重点研究了所设计系统参数的变化对于系统分辨率的影响，并据此分析了系统的最佳分辨率；然后，利用对于传送带速度的测量，标定了系统的精度；最后，将该技术应用于滚筒颗粒流表面速度场的测量，根据颗粒流速度场分布，重点研究了滚筒颗粒流表面存在的边壁效应。

1 空间滤波测速技术

1.1 基于面阵 CCD 的空间滤波测速原理

空间滤波测速原理可以通过由透射光栅引起的运动图像的光强变化进行直观阐释。通常情况下，测速系统包括光源、物镜、光栅和光电探测器。通过周期性光栅 (空间滤波器) 观察运动物体所产生的光学图像，产生的周期性信号最终被光电探测器接收。

传统空间滤波测速系统由于结构复杂，光栅周期固定，因此不适合高精度多场景的测量。面阵 CCD 由于具有更大的视场以及更灵活的周期选择，已经被广泛应用于空间滤波测速系统中。其原理由图 1 所示。

如图 1(a) 所示，面阵 CCD 上的像元接收到来自具有速度 v 的运动物体的散射光强信号，并采集了 n 帧图像。对于信号中的横向速度信息，首先将每帧上每列像元所包含的灰度值分别进行累加，将奇数列看作是传统光栅的透光部分，偶数列看作是传统光栅的遮光部分，则可模拟传统光栅进行滤波处理，对所有帧的奇数列和偶数列的灰度值和分别进行模拟处理，即可得到一个信号序列，该序列即包含横向速度信息，在时域上表现为具有周期性的正弦函数。对于纵向信号亦可利用同样的方式获得。图 1(b) 显示了信号的生成过程。由于被测物体具有持续的速度 v 并且周期光栅具有空间周期 P ，因此光电探测器的输出信号具有一个稳定的周期 $T=P/v$ 。

根据信号的周期与频率 f 的关系 $T=1/f$ ，最终

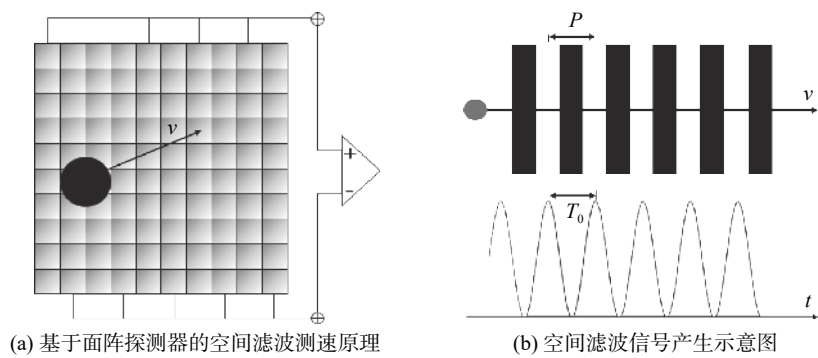


图 1 空间滤波测速原理

Fig.1 Principle of spatial filtering velocimetry

可由式(1)分别获得运动物体横向和纵向的速度分量:

$$v = \frac{P}{M} f \tag{1}$$

式中, M 为测速系统放大倍数。通过正交矢量求和, 最终可求得物体的实际运动速度。

1.2 空间滤波效应

图 1 从结构上直观描述了空间滤波测速原理, 根据分析, CCD 是整个测速系统中最重要的一部分, 以下将重点分析光栅结构的滤波特性^[13]。

这里假设光栅透过率函数为 $t(x, y)$, 面阵 CCD 相机上的光强分布为 $d(x, y)$, 输出信号 $g(x, y)$ 的功率谱密度函数 $G_P(\mu, \gamma)$ 可由下式得到:

$$G_P(\mu, \gamma) = D_P(\mu, \gamma) T_P(\mu, \gamma) \tag{2}$$

式中: $D_P(\mu, \gamma)$ 和 $T_P(\mu, \gamma)$ 分别为光强分布 $d(x, y)$ 和光栅透过率函数 $t(x, y)$ 的功率谱密度函数; $\mu = f/v$ 。

为简化对于信号分析的描述, 假设运动物体以速度 v 在 x 方向上运动。对式(2)进行积分, 可以最终得到输出信号在时域上的功率谱密度函数:

$$G_P(f) = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{\infty} D_P(f/v, \gamma) T_P(f/v, \gamma) d\gamma \tag{3}$$

根据文献[14]可知, $G_P(f)$ 包含了一个尖峰频率, 通过寻找这个尖峰频率, 物体最终的运动速度可根据式(1)获得。

1.3 实验系统搭建

根据空间滤波测速原理以及实际测量需求, 构建如图 2 所示的滚筒颗粒流测速系统。实验装置主要由白光光源、CCD 相机、滚筒装置和精密转台组成。将装有镜头的相机固定于支架上, 调整拍摄角度使镜头垂直于滚筒颗粒的坡面。实验系统中光源为白色 LED 灯, 面阵 CCD 型号为千眼

狼 3F04M 高速相机, 拥有 $2\,320 \times 1\,720$ 像素, 单个像素尺寸为 $7 \times 7\ \mu\text{m}$ 。镜头型号为 NIKON 公司的定焦镜头, 镜头焦距 35 mm。装有颗粒的滚筒放置于水平转台, 面阵 CCD 对滚筒颗粒流表面进行连续拍摄, 拍摄图像通过计算机进行采集。

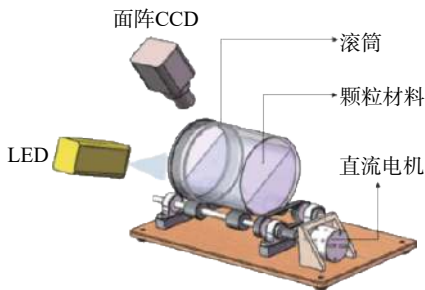


图 2 滚筒颗粒流动层测速系统

Fig.2 Velocity measurement system of granular flow in the rotating drum

本文将结合上述基于面阵 CCD 的空间滤波测速法对滚筒颗粒流速度场进行测量, 并据此对表面边壁效应作出进一步分析。实验所使用的滚筒为有机玻璃材质, 直径为 140 mm, 长度为 200 mm, 通过直流电机驱动; 使用的颗粒为直径 1 mm 的玻璃球。

2 实验系统参数分析

2.1 系统标定

为了验证所搭建实验系统算法的有效性, 评估采用面阵 CCD 测量系统的精度。首先, 使用空间滤波测速系统对匀速运动的传送带进行测量。系统将面阵 CCD 和镜头固定在一个支架上, 调整拍摄角度, 保证面阵 CCD 测量像素平面平行于皮带运动平面, 选取合适的拍摄高度与焦距获得皮带的测量图像。图 3 为面阵 CCD 拍摄到的传送带

的原始图像。为验证面阵 CCD 测速不受摆放角度影响，首先调整传送带与面阵 CCD 的角度 θ ，分别以不同角度拍摄图像，进行测速；为同时验证将面阵 CCD 分割为多个子滤波器实验多点测量方案的合理性，选取 S1，S2，S3 这 3 个区域作为子滤波器，分别进行测速。

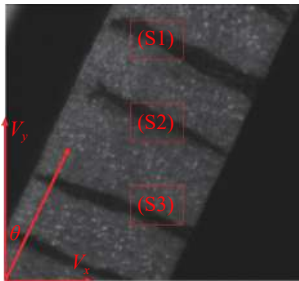


图3 面阵 CCD 采集传送带原始图像

Fig.3 Original image collected by array CCD for the conveyor belt

实验设定传送带速度 V 为 1~9 cm/s，以 1 cm/s 的步进值共计 9 个速度值， θ 取 30°，45°，60°，3 个不同角度进行测量。以下所有数据均为多次测量的平均值。测量误差的计算公式为 $Error=(V_x-V)/V$ ，其中， V_x 是速度测量值， V 为传送带标准速度值。表 1 为对 S1 区域分别取 30°，45°，60°，3 个不同角度计算出的速度的对比数据。可以看出 3 组数据最大误差小于 2%，优于传统线阵 CCD 测量结果^[11]。表 2 为 30°时，S1，S2，S3，3 个区域测量结果对比。根据测量数据发现 3 个区域测量速度大小基本一致，证明了面阵 CCD 空间

表 1 多角度测速对比结果（S1 区域）

Tab.1 Comparison results of several angle velocity measurements (area S1)

$V/$ (cm·s ⁻¹)	$V_{30}/$ (cm·s ⁻¹)	Error/ %	$V_{45}/$ (cm·s ⁻¹)	Error/ %	$V_{60}/$ (cm·s ⁻¹)	Error/ %
1	1.01	1.00	1.00	0.00	0.99	1.00
2	1.99	0.50	1.98	1.00	2.02	1.00
3	3.00	0.00	3.05	1.70	3.02	0.67
4	4.03	0.75	3.96	1.00	4.01	0.25
5	5.01	0.20	5.04	0.80	4.98	0.40
6	5.96	0.67	5.99	0.20	6.12	2.00
7	7.11	1.60	7.03	0.43	6.95	0.71
8	7.98	0.25	8.01	0.13	8.07	0.88
9	9.04	0.44	9.08	0.89	8.92	0.89

表 2 多个子滤波器实验多点测量方案结果（30°）

Tab.2 Comparison results of multi-point velocity measurement (angle 30°)

$V/$ (cm·s ⁻¹)	$V_{S1}/$ (cm·s ⁻¹)	Error/ %	$V_{S2}/$ (cm·s ⁻¹)	Error/ %	$V_{S3}/$ (cm·s ⁻¹)	Error/ %
1	1.01	1.00	0.99	1.00	1.00	0.00
2	1.99	0.50	1.99	0.50	2.03	1.50
3	3.00	0.00	3.04	1.30	2.96	1.30
4	4.03	0.75	3.98	0.50	4.05	1.30
5	5.01	0.20	5.06	1.20	5.02	0.40
6	5.96	0.67	6.03	0.50	6.02	0.33
7	7.02	0.29	7.05	0.71	6.97	0.43
8	7.98	0.25	7.96	0.50	8.06	0.75
9	9.04	0.44	8.98	0.22	9.02	0.22

滤波测速系统多点测量的可能性。

2.2 系统分辨率

根据空间滤波测速实际要求，首先确定测速系统分辨率。系统分辨率具体包括时间分辨率 R_t 与空间分辨率 R_s 。时间分辨率与相机帧速率 F 成反比关系，即 $R_t=1/F$ ，空间分辨率的主要影响因素包括空间周期 P 与光栅个数 n ，三者关系为 $R_s=nP$ 。

帧速率为实验所用相机的可调参数。帧速率越高，两帧图片时间间隔越短，输出信号连续性越好，最终所得滚筒颗粒流表面速度场越精确，可测的速度范围也更大。但是一方面，绝大部分 CCD 相机帧速提高的代价是画幅大小，考虑到本文待测颗粒流速度场的面积以及实时性的测量需求，不可能使用相机理论上的最大帧速；另一方面，通过对 40% 填充度、3 r/min 转速的颗粒流速度场进行测算发现，当帧速率达到 1 000 fps 时，已经可以准确观察到输出信号的频谱图的峰值频率，如图 4 所示。此时即实验系统的最佳时间分辨率，为 0.001 s。

理论来说，当光栅间隔大小约等于所测区域特征点(光斑)大小时，输出光强信号周期性最好^[15]。在滚筒颗粒流测速系统中，由于不存在实际光栅，而是使用面阵探测器模拟传统光栅，这就给设定空间周期提供了便利。分析本次实验实际所拍图像，观察特征点大小在 50~60 μm。因此将空间周期设定为 100~120 μm(狭缝间隔为 50~60 μm)可输出较理想的波形。当空间周期 P 一定时，模拟光栅条纹越多，光敏感区域就越大，光敏感区

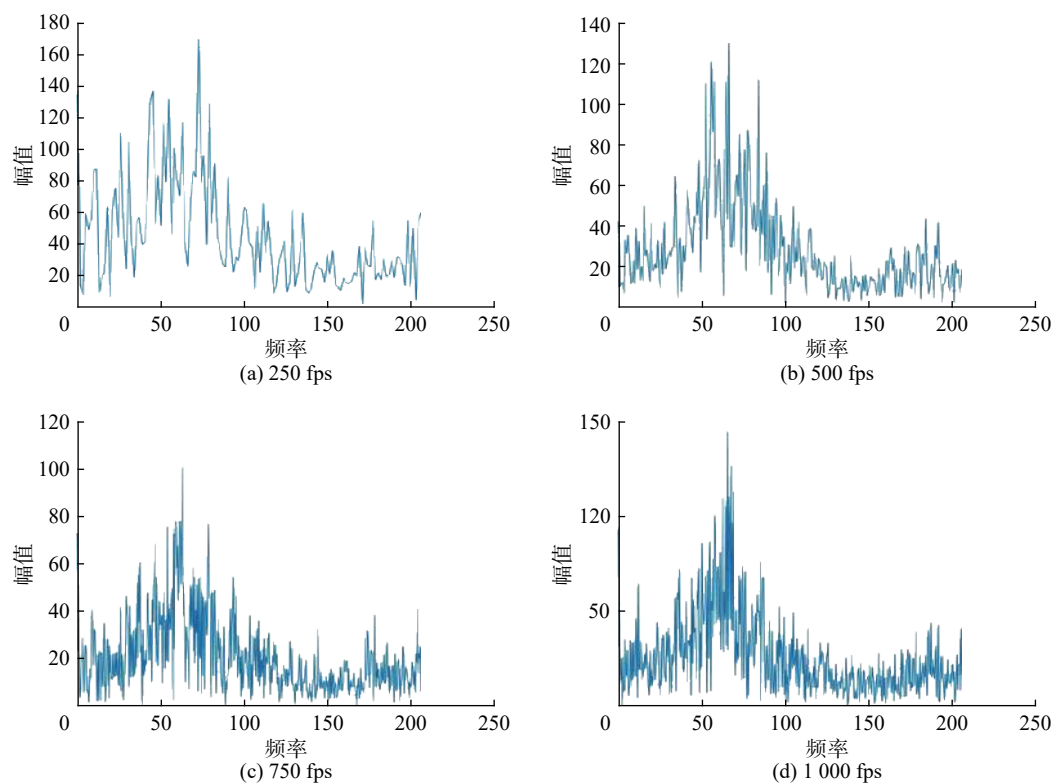


图 4 不同帧速下输出信号频谱

Fig.4 Output signal spectrum at different frame rates

域的大小直接影响空间滤波器的滤波效果，主要表现在空间滤波后信号的幅值与主峰带宽上： n 越大，滤波后信号主峰幅值就越大，易于寻峰；同时， n 越大，信号主峰的带宽也越窄，分辨率就越高。但随着 n 的增大，单次测量区域就越大，可测量点减少，空间分辨率降低，同时测量精度降低。对滚筒同一位置，取相同的空间周期，对不同的狭缝个数进行多次实验。如图 5 所示，在狭缝个数较少时，测量值与真实值偏差较大，随着狭缝个数的增多，测量值趋于平稳。综合上述因素，本文设定 $n=10$ 较为合适。此时，系统的空间分辨率为 1 mm。

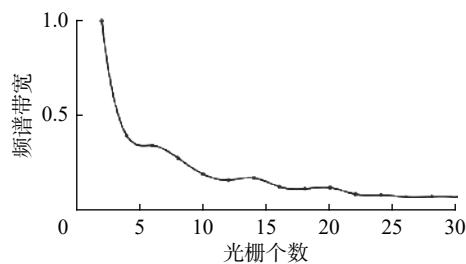


图 5 不同光栅个数下信号主峰频谱带宽

Fig.5 Spectral bandwidth of output signals under different grating numbers

3 实验结果与讨论

在滚筒颗粒流处于连续流状态下，颗粒流的横向速度相对于纵向速度几乎可以忽略不计，因此，后续所有实验均统计纵向速度。

3.1 滚筒中颗粒流速度场分布与边壁效应

图 6 为滚筒颗粒流动层的速度场分布，为直观观测颗粒流表面轴向区域速度分布变化，图中已经通过每一轴向的最大速度对所有轴向区域进行了归一化处理。当装有颗粒的三维滚筒保持连续流持续旋转时，其靠近端壁区域的颗粒流会产生一个向滚筒中心区域凹陷的运动轨迹，滚筒端壁对颗粒的摩擦力在这里产生了巨大的影响。观察颗粒流速度场分布可以发现：轴向速度分布并不均匀，端壁区域颗粒流速度明显小于远离端壁区域颗粒流速度；轴向区域的峰值速度也没有出现在滚筒中心区域，而是出现在距两端壁稍远的位置。

为研究滚筒颗粒流速度沿轴向变化情况，选取图 6 黑色方框典型速度分布区域对边壁效应进行分析，提取速度曲线如图 7 所示。根据曲线，颗粒流表面轴向区域分为三个部分。滚筒端壁区

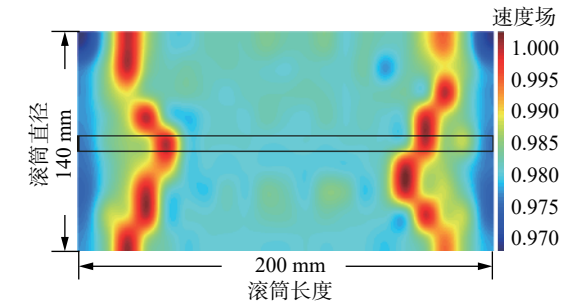


图6 2.5 r/min 转速、40% 填充度下，滚筒颗粒流表面速度场分布

Fig.6 Granular flow velocity distribution in the rotating drum at 2.5 r/min, 40% filling degree

域的颗粒流速度要小于远离端壁区域颗粒流的速度，这是由于端壁摩擦力导致该区域颗粒流速度减小，而远离滚筒区域颗粒流并未受到摩擦力影响，速度明显大于端壁附近颗粒流速度。该部分区域为边壁摩擦区域。在距离滚筒端壁稍远位置区域有一个峰值速度 v_{max} 出现，这是由于滚筒端壁的摩擦力导致端壁区域颗粒流速度小于远离端

壁区域的颗粒流速度。根据质量守恒定律，端壁附近颗粒流将补偿远离端壁的流速较快的颗粒流，端壁附近颗粒流从而会产生一个轴向速度，轴向速度与径向速度的和速度将会使得端壁区域颗粒流斜向滚筒中心区域运动，该运动速度与颗粒流原本运动速度产生叠加，从而导致了峰值速度 v_{max} 的出现。该峰值速度所在区域为峰值速度区域。在距离端壁更远处轴向速度将趋于平缓，该部分区域受到边壁效应影响程度很小，速度介于端壁附近速度与峰值速度之间，为平稳区域。

3.2 不同填充度下的颗粒流边壁效应

对于填充度变化对于边壁效应的影响，实验考虑 30%，40%，50% 这 3 种不同填充度下的中心轴向区域的纵向速度对比。如图 8 所示，改变填充度将显著影响峰值速度的位置，当填充度变大时，峰值速度点 Lv_{max} 将更加靠近中心位置。这是由于当填充度增大时，颗粒流动层与筒壁的接触面积随之增加，使得筒壁对于边壁区域颗粒流的

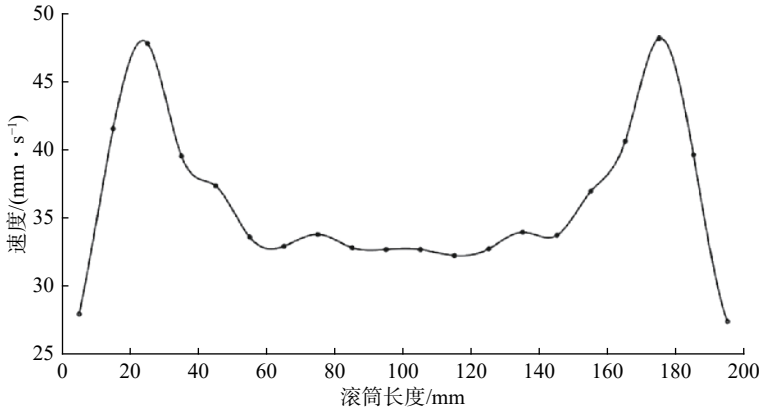


图7 图6 黑色方框区域滚筒颗粒流的速度分布

Fig.7 Velocity distribution of granular flow in the black square area in fig.6

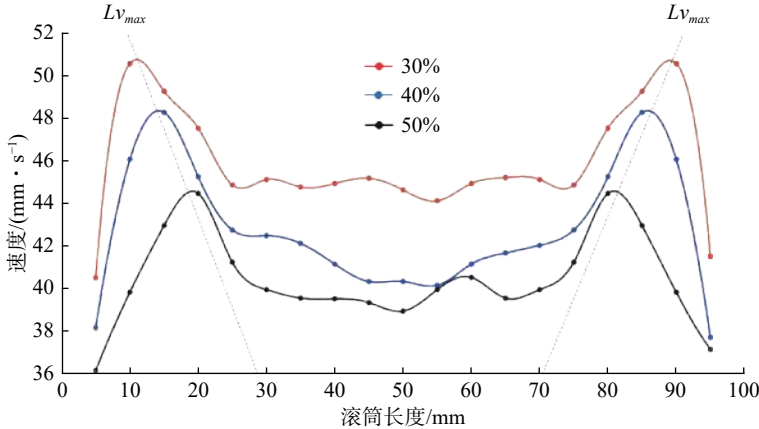


图8 3.5 r/min、不同填充度条件下滚筒中轴区域颗粒流的速度分布

Fig.8 Velocity distribution for different filling degrees at 3.5 r/min

摩擦力增大, 从而使得颗粒流产生了更大的横向速度, 横向速度和纵向速度的叠加最终导致了峰值速度区域位置的移动。

4 结 论

在现有的一些非接触式测速方法中, 空间滤波法由于具有精度高、采用非相干光源、结构简单等优点成为了当下滚筒颗粒流速度场测量的主要方法, 本文从结构装置和数学原理两方面深入分析了空间滤波测速原理, 对现有线阵 CCD 空间滤波测速法进行了改进, 提出了基于面阵 CCD 空间滤波的滚筒颗粒流测速方法, 得出以下结论:

a. 通过实验数据结合理论分析发现, 本文所设计的面阵 CCD 空间滤波系统的最佳时间分辨率为 0.001 s, 最佳空间分辨率为 1 mm。根据传送带速度测量对系统进行标定, 发现误差小于 2%, 优于线阵 CCD 空间滤波法。

b. 面阵 CCD 良好的视场使得对滚筒颗粒流整个表面测量成为可能, 所采用的正交算法避免了传统线阵 CCD 空间滤波法的角度测量带来的误差。

c. 根据所测的滚筒颗粒流表面速度场分布, 结合归一化处理, 发现由于边壁效应的存在, 滚筒颗粒流表面横向区域根据速度不同分为边壁摩擦、峰值速度、平稳 3 种区域。当滚筒内填充度变大时, 峰值速度位置相应地更加靠近滚筒中心位置。

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] CHEN H, ZHAO X Q, XIAO Y G, et al. Radial mixing and segregation of granular bed bi-dispersed both in particle size and density within horizontal rotating drum[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(2): 527–535.
- [3] HUNG C Y, STARK C P, CAPART H. Granular flow regimes in rotating drums from depth-integrated theory[J]. *Physical Review E*, 2016, 93(3): 030902.

- [4] POHLMAN N A, OTTINO J M, LUEPTOW R M. End-wall effects in granular tumblers: from quasi-two-dimensional flow to three-dimensional flow[J]. *Physical Review E*, 2006, 74(3): 031305.
- [5] JAKOBSEN M L, HANSON S G. Lenticular array for spatial filtering velocimetry of laser speckles from solid surfaces[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(24): 4643–4651.
- [6] BURGGRAEVE A, VAN DEN KERKHOFF T, HELLINGS M, et al. Batch statistical process control of a fluid bed granulation process using in-line spatial filter velocimetry and product temperature measurements[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2011, 42(5): 584–592.
- [7] ATOR J T. Image-velocity sensing with parallel-slit reticles[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53(12): 1416–1422.
- [8] 董正超, MICHEL K, BERGELER S, et al. CCD 器件空间滤波在微粒运动速度检测上的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2000, 21(2): 211–214.
- [9] LIN S H, YANG H, LI R, et al. Velocities of irregular particles in a continuously avalanching surface flow within a rotating drum[J]. *Powder Technology*, 2018, 338: 376–382.
- [10] UDDIN M S, INABA H, ITAKURA Y, et al. Estimation of the surface velocity of debris flow with computer-based spatial filtering[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(26): 6234–6239.
- [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: 76–84.
- [12] SCHAEFER M, SCHMIDT R, KOSTBADE R, et al. Optical high-resolution analysis of rotational movement: testing circular spatial filter velocimetry (CSFV) with rotating biological cells[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(26): 265402.
- [13] 郑丽娜. 空间滤波测速的发展及滤波效应研究[J]. *数字技术与应用*, 2013(10): 78–79, 81.
- [14] AIZU Y, ASAKURA T. Spatial filtering velocimetry: fundamentals and applications[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [15] 罗娜, 欧攀, 张春熹, 等. 用于梳状结构光学测速系统的周期优化方法[J]. *激光技术*, 2015, 39(1): 71–75.

(编辑: 丁红艺)