

采用去模糊图像处理的气/固两相流固体颗粒速度测量方法*

宋 鼎, 彭黎辉, 陆 耿, 杨士元

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要: 在燃煤火力发电站的煤粉输送系统中, 为了提高煤粉的燃烧效率, 获得煤粉与空气混合物的参数就显得至关重要。本文提出一种基于图像处理技术的气/固两相流固体颗粒速度测量方法。通过控制 CCD 照相机的曝光时间获得颗粒的运动模糊图像, 在此基础上利用图像处理技术估计出模糊图像的扩展函数(PSF), 并利用透镜成像原理建立运动模糊长度与颗粒运动速度之间的联系, 最终获得颗粒的运动速度。在此理论分析的基础上, 本文利用该方法对颗粒自由落体形成的运动模糊图像进行了处理, 仿真及实验结果表明该方法适用于气/固两相流颗粒速度的测量。

关键词: 气/固两相流; 颗粒速度测量; 运动模糊; 点扩散函数

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Particle velocity measurement of particle solids in gas/solid two phase flow through image deblurring

Song Ding, Peng Lihui, Lu Geng, Yang Shiyuan

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper demonstrates a digital imaging based method for the velocity measurement of pneumatically conveyed particles in coal-fired power station. By controlling the exposure time of a CCD camera, blurred images of moving particles are captured. The motion blur parameters are first estimated from the acquired images and then used to establish the relationship between the 2-D motion blurred image and the velocity of moving particles. This method was used to process the motion blurred image of free falling particles. Simulation and experimental results indicate that the proposed method is feasible for particle velocity measurement.

Key words: gas/solid two phase flow; particle velocity measurement; motion blur; PSF (point spread function)

1 引 言

气/固两相流是指由气体和固体两种组分构成的混合流动情况, 广泛应用于管道气力输送工艺来输送煤粉、水泥、矿石、盐以及面粉等工业现场, 气/固两相流在科学研究和工农业生产的很多领域有极其重要的地位。随着二十一世纪的到来人类所面临的人口、资源、环境等的挑战, 气/固两相流研究领域越来越受到重视^[1]。然而, 气/固两相流流动特性复杂, 两相界面之间在空间和时间上

都是随机可变的。因此, 对于气/固两相流参数的检测难度相当大, 是一个公认的难题。

国内外从事气/固两相流检测技术的专家们做了大量的研究工作。目前, 在颗粒速度测量方面, 主要有基于电容^[2]、静电感应^[3]、 γ -射线等检测原理的相关测速方法, 基于超声、微波^[4]、光学等原理的多普勒测速方法及空间滤波方法等等。但迄今为止, 这些已有检测技术和方法大都还处于实验室应用研究阶段, 已商品化可在线检测的工业型仪表为数还很少, 且仅适用于某些特定的场合和较窄的范围, 其应用在很大程度上受现场工况条

收稿日期: 2007-08 Received Date: 2007-08

* 基金项目: 国家自然科学基金“两个基地”项目(60440430641)、清华大学基础研究基金(JC2007026)资助项目

件的制约而无法普及。

近年来,数字电子技术及 CCD 数字成像器件技术的快速发展为气/固两相流的测量提供了一种新的方法。与其他气/固两相流的参数测量方法相比,图像方法有非侵入、不受静电、湿度等因素影响的优点^[5],是一种非常前景的气/固两相流参数测量手段。

2 测量原理

本课题的设计的测量系统由逐行扫描 CCD 照相机和半导体激光片光源以及一台用于采集图像的 PC 机构成。半导体激光片光源平面平行于管道轴线,垂直于 CCD 照相机镜头的光轴。传感器结构如图 1 所示。

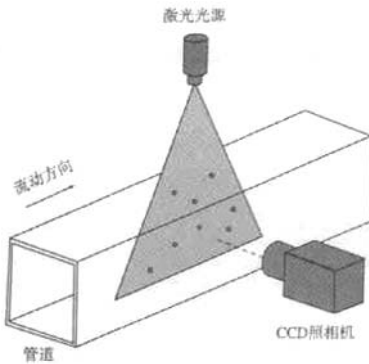


图1 测量系统结构图

Fig.1 Structure of the measurement system

CCD 照相机获取图像的过程是在曝光时间内对投射到 CCD 感光器件上的光强进行积分的过程。当用图像传感器拍摄物体图像时,如果在曝光时间内物体与图像传感器之间发生相对位移,则在所获得的图像中会出现运动模糊(motion blur)^[6]。由于运动模糊会造成图像质量的下降,所以在大多数图像及视频系统中要尽量避免上述情况的出现。但从另一角度看,运动模糊图像中包含了物体运动的信息,如何从模糊图像中提取出颗粒运动的参数是本文要解决的问题。

一幅清晰图像 $f(x,y)$ (在曝光时间趋于 0 的条件下)与相应的运动模糊图像 $g(x,y)$ 之间存在如下关系^[7-8]:

$$g(x,y) = f(x,y) \otimes h(x,y) \quad (1)$$

式中: \otimes 表示卷积运算, $h(x,y)$ 为点扩展函数(point spread function),可以由下式给出:

$$h(x,y) = \begin{cases} 1/L, & |x| \leq L \cos \theta/2, y = x \tan \theta \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 和 L 分别表示运动方向与水平方向的夹角以及运动模糊长度。式(1)的卷积形式可以表示为:

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) \quad (3)$$

式中: $G(u,v)$ 、 $H(u,v)$ 和 $F(u,v)$ 分别表示 $g(m,n)$ 、 $h(m,n)$ 和 $f(m,n)$ 的二维 Fourier 变换。为了简化问题,假设物体的运动方向为水平方向。这时:

$$H(u) = \sum_{m=0}^N h(m) e^{-j2\pi um/N} = \sum_{m=0}^{L-1} \frac{1}{L} e^{-j2\pi um/N} \quad (4)$$

若 $u \neq 0$, $H(u)$ 可以写成:

$$H(u) = \frac{1}{L} \frac{1 - e^{-j2\pi uL/N}}{1 - e^{-j2\pi u/N}} \quad (5)$$

可以看到:当 u_k 满足 $Lu_k\pi/N = k\pi$, $k = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm L/2$ 时 $H(u)$ 会周期性的出现零点,或者说当 $u = N/L, 2N/L, \dots, (L-1)N/L$ 时, $H(u) = 0$ 。因此 $G(u,v)$ 上会出现 $(L-1)$ 个零点,且零点之间等距。因此模糊长度 L 可以通过计算 $G(u,v)$ 零点的个数确定。

图像的模糊长度 L 与运动颗粒的速度之间的关系与 CCD 照相机所使用的镜头特性有关,因此建立二者之间的函数关系是非常必要的,图 2 给出了照相机镜头的简化模型。

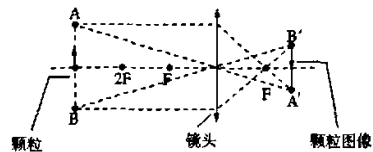


图2 CCD相机镜头成像模型

Fig.2 Imaging model of a CCD camera

透镜成像模型可以用以下公式表示:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

式中: u 、 v 以及 f 分别代表成像系统的物距,相距和焦距。图 2 表明,颗粒的实际运动长度 D 与模糊图像中的运动模糊长度 L ,以及相机的曝光时间 t 之间的关系可以描述为:

$$\frac{v}{u} = \frac{L}{D} = \frac{Le}{V \cdot t} \quad (7)$$

式中: t 表示 CCD 照相机的曝光时间, e 表示相机 CCD 图像传感器的像素尺寸。根据式(6)和式(7),颗粒运动速度 V 可以表示为:

$$V = \frac{(u-f)Le}{f \cdot t} \quad (8)$$

在实际的测量系统中,焦距 f , CCD 图像传感器像素尺寸 e 由相机以及镜头确定,而物距 u 取决于传感器的布置,曝光时间 t 可以手动设置。 L 则可以由估计运动模糊图像的 PSF 得到。

3 仿真及实验结果

利用上述算法对文献[9]中的颗粒图像进行仿真研究。图 3(a)给出了颗粒原始图像,3(b)是 3(a)对应的二值图。

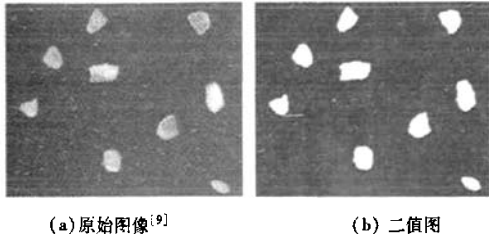


图 3 原始图像及其二值图

Fig. 3 Original image and its thresholded image

图 4(a)、(b)、(c) 分别是原始图像模糊了 9、29 和 59 个像素后得到的图像,也可以认为是曝光时间相同的条件下,3 副图像中的颗粒速度比为 9:29:59。图 5(a)、(b)、(c) 给出了图 4(a)、(b)、(c) 的频率响应。通过对比图 5 中的 3 幅图像不难发现,频率响应中零点的个数随着模糊长度的增大而增加。

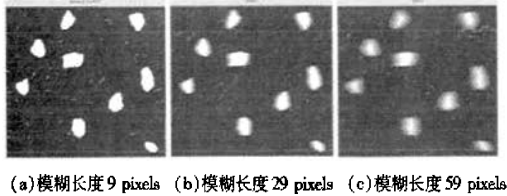
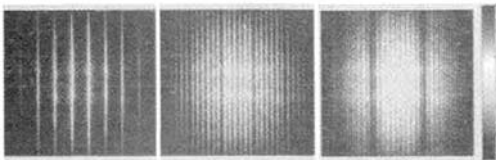


图 4 运动模糊图像

Fig. 4 Motion blurred images

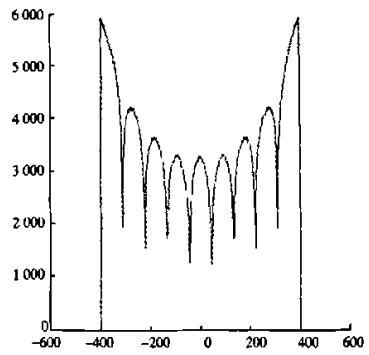


(a) 模糊长度 9 pixels (b) 模糊长度 29 pixels (c) 模糊长度 59 pixels

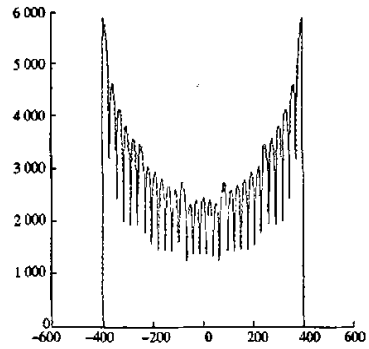
图 5 运动模糊图像的频率响应。

Fig. 5 Frequency responses of motion blurred images

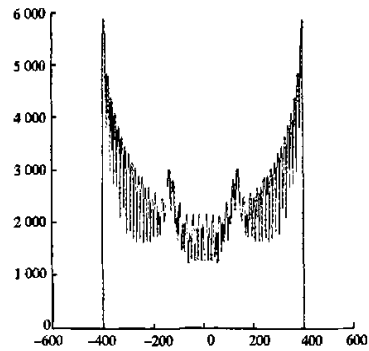
图 6(a)、(b)、(c) 给出了图 5(a)、(b)、(c) 的频率响应 $G_a(u,v)$ 、 $G_b(u,v)$ 和 $G_c(u,v)$ 在水平方向的投影。假设用 K 表示图 6(a)、(b)、(c) 中极小值的个数,则 $K_a = 8$, $K_b = 28$, $K_c = 58$, 因此可以估计出运动模糊长度分别为: $\hat{L}_a = 9$, $\hat{L}_b = 29$, $\hat{L}_c = 59$ 。这与设定值完全吻合。



(a) 模糊长度 9 pixels



(b) 模糊长度 29 pixels



(c) 模糊长度 59 pixels

图 6 频率响应在水平方向上的投影

Fig. 6 Projection of the frequency responses in horizontal axis

在大多数工业现场中,图像噪声是不可避免的,尤其是当 CCD 相机工作在高感光度的条件下。当所获得的图像中出现噪声时,图像的频率响应中的暗线就会模糊甚至会部分消失,但是由于理论推导出暗线之间是等距的,因此只需要频率响应中部分暗线就可以确定颗粒的运动模糊长度。图 7 给出了不同信噪比(SNR)水平下(65.2 dB, 32.9 dB 和 19.3 dB)实际模糊长度与估计值之间的误差曲线。可以看到:随着噪声的增大,运动模糊长度的估计值与设定值会增大;当运动模糊长度大于 100 pixel 时,误差会急剧增大。

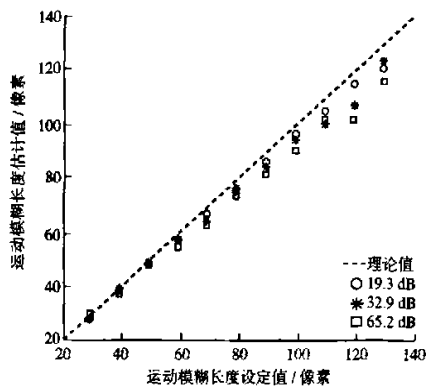


图7 运动模糊长度的设定值与估计值对比

Fig. 7 Comparison between the preset and estimated motion blur lengths

为了验证测量系统的有效性,本文设计了测量颗粒的自由落体速度的实验,实验装置如图8所示,实验装置包括一段透明的有机玻璃管道,像素为1.3M的逐行扫描CCD照相机和一个波长为650 nm的半导体激光光源。PC通过IEEE1394接口从CCD照相机获取图像。

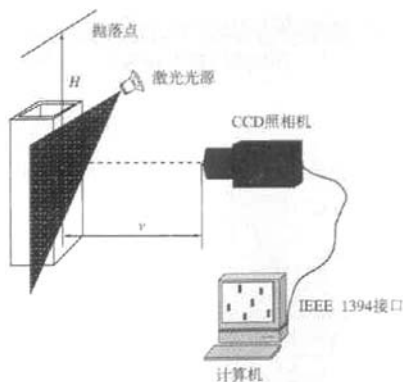


图8 实验装置原理图

Fig. 8 Principle diagram of free falling experiment

实验中,通过改变的抛落高度 H 达到改变测量点颗粒的运动速度的目的, H 分别被设定为0.3 m、0.5 m和0.8 m,相应的,颗粒在测量点处的自由落体理论速度分别为2.42 m/s、3.13 m/s和3.96 m/s。图9给出了 $H=0.8$ m,曝光时间 $t=2$ ms情况下,CCD照相机所获得的颗粒运动模糊图像,而图10给出了理论速度和实测速度(10幅图像取平均)的对比情况。

图9 颗粒运动模糊图像($H=0.2$ m, $t=2$ ms)Fig. 9 A typical example of motion blurred image captured by CCD camera with an exposure time ($H=0.2$ m, $t=2$ ms)

可以看到,在3种不同的高度下颗粒运动速度均低于理论速度,其原因有二:一为颗粒运动受到空气阻力的影响;二是颗粒在下落过程中与管壁发生碰撞导致速度降低。

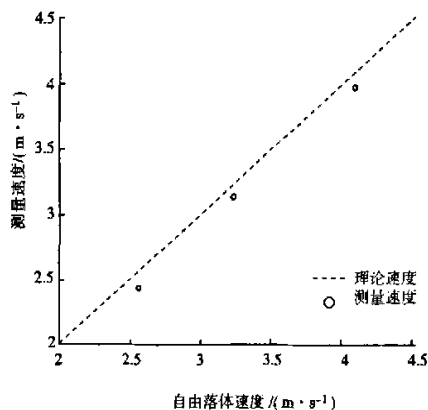


图10 颗粒运动速度理论值与测量值的对比

Fig. 10 Comparison between the estimated particle velocity and free falling velocity

4 结 论

本文提出一种基于图像处理技术的气/固两相流速度测量方法。通过控制CCD照相机的曝光时间获得颗粒的运动模糊图像,在此基础上利用图像处理方法估计出模糊图像的点扩展函数并且建立运动模糊图像与颗粒运动速度之间的联系,从而得到颗粒的运动速度。仿真结果及初步试验表明该方法适用于气/固两相流颗粒速度的测量。

参考文献

- [1] 张玉平, 金锋, 张岩, 等. 两相流相浓度检测技术的研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(3): 383-386.
ZHANG Y P, JIN F, ZHANG Y, et al. Phase concentration measurement for two-phase flows[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(3): 383-386.
- [2] 范卫东, 章明川, 何磊, 等. 管道内气/固两相流颗粒浓度和风速测量方法的试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(1): 13-18.
FAN W D, ZHANG M CH, HE L, et al. Experimental study on measurement method of solid concentration and air velocity in pneumatic conveying pipes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(1): 13-18.
- [3] YAN Y, BYRNE B, WOODHEAD S G, et al. Velocity measurement of pneumatically conveyed solids using electrodynamic sensors[J]. Meas. Sci. Technol, 1995, 6(5): 515-537.
- [4] LINN J M, SAMPLE D G. Radiometric mass flow measurement of solids/gas stream using radiometric technique [C]. Instrumentation and Control of Fossil Energy Processes, Houston, 1982: 12-20.
- [5] YAN Y. Mass flow measurement of bulk solid in pneumatic pipelines [J]. Meas. Sci. Technol, 1996, 7(12): 1687-1760.
- [6] POTMESIL M, CHAKRAVARTY I. Modeling motion blur in computer-generated images [J]. Computer Graphics, 1983, 7(3): 389-399.
- [7] LIN H Y, LI K J. Motion blur removal and its application to vehicle speed detection [C]. International Conference on Image Processing (ICIP) 2004: 3407-3410.
- [8] YITZHAKEY Y, KOPEIKA N S. Identification of blur parameters from motion blurred images [J]. Graphical Models and Image Processing, 1997 59(5): 310-320.
- [9] CARTER R M, YAN Y. On-line particle sizing of pulverized and granular fuels using digital imaging techniques [J]. Meas. Sci. Technol. 2003, 14 (7): 1099-1109.

作者简介



宋鼎,男,1978年8月出生,1999年于天津大学获得学士学位,2002年于天津大学获得硕士学位,现为清华大学自动化系博士研究生,主要研究方向为气/固两相流检测方法。
E-mail: songd03@mails.thu.edu.cn

Song Ding, male, was born in 1978. He got his B. Eng. and M. Sc. degrees from Tianjin University in 1999 and 2002 respectively. Now he is a PhD candidate in Tsinghua University. His research fields in-

clude gas/solid two-phase flow measurement.

E-mail: songd03@mails.thu.edu.cn



彭黎辉, 1968年9月出生, 1990年于清华大学获得工学学士学位, 1995年于清华大学获得工学硕士学位, 1998年于清华大学获得工学博士学位, 现为清华大学副教授, 主要研究方向为先进传感技术、成像技术、多相流参数检测技术、多传感器数据融合等。

E-mail: lihuipeng@tsinghua.edu.cn

Peng Libui, was born in September 1968. He received the B. Eng., M. Sc. and Ph. D. degrees in Measurement Science and Electronics from Tsinghua University, Beijing, China, in 1990, 1995, 1998, respectively. He is currently an associate professor in Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, China. He started his academic career in 1990 as an assistant lecturer in Tsinghua University. His current research interests include measurement techniques for multiphase flow, process tomography, multi-sensor data fusion, flow measurement and instrumentation.

E-mail: lihuipeng@tsinghua.edu.cn



陆耿,男,1977年4月出生,1999年于清华大学获得学士学位,2002年于清华大学获得硕士学位,2004年于清华大学获得博士学位,现为清华大学助理研究员,主要研究方向为两相流检测、过程成像。

E-mail: lug@tsinghua.edu.cn

Lu Geng, male, was born in Apr. 1977. He got B. Eng., M. Sc. and Ph. D. degrees from Tsinghua University in 1999, 2002 and 2004 respectively. He is working in Tsinghua University as an assistant research fellow, his research interests focus on detection of two-phase flow and progress tomography.

E-mail: lug@tsinhua.edu.cn



杨士元,男,1945年11月出生,1970年于清华大学获得学士学位,1981年于清华大学获得硕士学位,现为清华大学自动化系教授,博士生导师,主要研究方向为电子系统和设备的测试与故障诊断、数字社区与智能家庭网络技术和消费电子技术。

E-mail: ysy-dau@tsinghua.edu.cn

Yang Shiyuan, male, was born in Apr. 1945. He got B. Eng. and M. Sc degrees in 1970 and 1981 from Tsinghua University respectively. He is a professor and PhD supervisor in Tsinghua University, his research interests focus on circuit test and fault diagnosis, intelligent home and consumer electronics.

E-mail: ysy-dau@tsinghua.edu.cn