

文章编号: 1001-3806(2014)02-0214-04

基于轨迹图像的雾滴颗粒运动速度光电测量方法

吴超¹, 王寿松²

(1. 江苏中烟工业有限责任公司 南京卷烟厂 综合管理处, 南京 210094; 2. 南京执锐科技实业有限公司, 南京 210019)

摘要: 为了对双介质喷嘴雾滴颗粒的运动速度分布进行测量, 建立了基于波长为 532nm 连续激光器和工业相机组成的在线测量系统, 并获得了雾滴的轨迹图像。采用 Steger 方法对获得的粒子轨迹图像进行了图像处理, 取得了雾滴颗粒的速度分布的数据。结果表明, 所开发的基于粒子轨迹图像雾滴速度分布光电测试方法可以满足在线测量的要求。

关键词: 激光技术; 轨迹图像; 速度分布; 双介质喷嘴; 图像处理; 烟草加香

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.02.015

Measurement method of the droplet particle velocity based on the trajectory images

WU Chao¹, WANG Shousong²

(1. Integrated Management Office, Nanjing Cigarette Factory, China Tobacco Jiangsu Industrial Co. Ltd., Nanjing 210094, China; 2. Nanjing Zhirui Technology Industrial Co. Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: In order to measure the velocity distribution of dual-media nozzle droplet particles, an on-line measurement system was established based on continuous laser at 532nm wavelength and industrial cameras. The droplet trajectory images were obtained. The Steger method was used to process the particle trajectory images. The velocity distribution of droplet particles was extracted. The results show that the test method for measuring the speed distribution of the droplet particles based on particle trajectory images, meets the requirements of the online measurement.

Key words: laser technique; track image; velocity distribution; dual media nozzle; image processing; tobacco flavoring

引言

烟草制丝加工过程中, 往往需要使用双介质喷嘴对烟草进行加料、增湿和加香处理, 因而对双介质的喷嘴的工作特性进行研究, 可以提高烟草的加料、增湿和加香效果, 对节能增效具有重要的意义。然而, 目前该方面还基本停留在工艺参量优化研究方面, 对直接影响烟草均匀吸收的喷嘴工作状态判断也只停留在经验判断方面。所以, 有必要对喷嘴的工作状态及效果进行定量测试研究, 而其中, 雾滴颗粒的速度分布是送料效果的重要影响因素之一。

对雾滴颗粒速度的测量有多种方法, 如激光多

普勒测速法 (laser Doppler velocimetry, LDV)^[1]、高速摄影^[2]、粒子成像测速 (particle image velocimetry, PIV)^[3-4]、数字全息技术^[5] 等等。然而这些方法都有各自的优缺点, 如 LDV 只能进行单点测量, 而且对测量环境要求高; PIV 设备和数字全息技术设备复杂且昂贵; 高速摄影的图像分辨率低、软件处理速度慢、价格也比较昂贵^[6]。而最近发展起来的一种基于粒子轨迹图像的测试方法, 具有结构简单、成本低、可视化测量的特点。目前国内外不少学者尝试将其用于在线测量。如 2007 年, ZHANG 等人用单帧图像测量汽轮机低压缸内二次水滴的速度和流动角^[7]; 2009 年, CHINNAYYA 在 4MW 煤粉燃烧器实验机组的水平输粉管道上安装了图像探针, 并利用该方法测量了颗粒物的速度^[8]; 2011 年, WU 等人对煤粉颗粒的粒径和速度进行了测量^[9]; 2011 年, ZHANG 等人利用该方法对固相二相流速度场进行了测量, 重点研究了图像处理算法^[4]。目前该方法

作者简介: 吴超 (1972-), 男, 工程硕士, 工程师, 主要研究方向为机械设计、电气控制。

E-mail: wuchao_ny@126.com

收稿日期: 2013-05-20; 收到修改稿日期: 2013-07-10

应用难点在于图像处理算法尚不够完善。常见的光条中心线提取方法有灰度阈值法、极值法和梯度阈值法等，这些方法实现简单，但精度不高。STEGGER 利用 Hessian 矩阵得到图像中的道路和血管等类似条纹的法线方向，然后求法线方向上的极值点得到条纹中心线的亚像素位置^[10-11]。Steger 方法具有精度高、鲁棒性好等优点，广泛应用于航拍图像和医学图像的自动分割。

本文中首先建立了基于激光片光源的在线测试系统，对烟草行业所用的双介质喷嘴的速度分布进行了测量，获得了雾滴的轨迹图像，并采用 Steger 方法进行图像处理，得到了雾滴颗粒轨的速度分布。

1 测量原理

针对运动颗粒的测试中，为了防止颗粒图像的模糊，需要尽量缩短颗粒图像的曝光时间。通常可以采用两种方式，一种是通过加快 CCD 的快门速度；另外一种方式是采用瞬态探测光源照明。由于现有的工业相机曝光时间通常都在数微秒量级，当颗粒具有较高的速度，或者测量系统具有较大的放大率的时候，单纯利用工业相机往往无法避免颗粒图像的模糊，因而测试高速运动物体速度常需要瞬态光源。如 PIV 方法测速，通常采用调 Q 的脉冲激光，即持续时间为纳秒量级的光脉冲作为瞬态照明光源。该光源可以克服拍摄时因颗粒运动引起图像的模糊，然而这样做显著地增加了设备成本。

基于颗粒轨迹图像的方法充分利用相机长曝光的特点，该方法还要适当减缓相机快门速度，使颗粒获得较长的曝光时间。这样获得的颗粒图像实际上是颗粒运动的轨迹。对颗粒轨迹图像进行处理，即可获得颗粒的运动速度。相应的测试系统中采用连续激光器和工业相机各一个，相对于传统的测试方法显著降低了成本。

设相机的曝光时间为 t_e ，该曝光时间可以通过程序设置后自动执行。设颗粒的轨迹长度分别为 L ，设镜头的成像倍率为 β ，则颗粒的粒径 d 可表示为：

$$v = \frac{L - d}{t_e \beta} \quad (1)$$

当 $L \gg d$ 时，则由上式可得到：

$$v \approx \frac{L}{t_e \beta} \quad (2)$$

当运动颗粒在光源照明下的轨迹足够长时，可

以忽略粒径的影响，并由 (2) 式得到颗粒的运动速度。这是本文中涉及的测试系统的测量原理。相机的曝光时间 t_e 可以通过软件设置得到，而镜头的成像倍率 β 也能通过实验测量得到，于是如何通过图像处理的方法获得颗粒轨迹的长度成为该测量方法的关键。

由于存在畸变，因而镜头的成像倍率 β 并不是固定值。因而为了获得更加准确的结果，本文中采用国际象棋盘图案的标定板和开源软件 Open CV 中的标定算法对该测试系统的成像镜头进行标定，标定板尺寸为 20mm × 20mm。由于标定算法比较成熟，这里不再赘述。

另外，相机的真实门宽也与标称值有所偏差，因而也需要对相机的快门的真实曝光时间进行标定。作者采用一个调 Q 的脉冲光源进行标定，测试原理如图 1 所示。

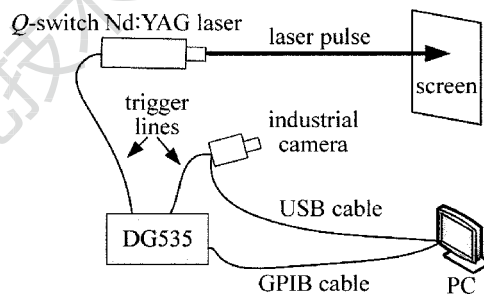


Fig. 1 Schematic diagram of camera gate width calibration setup

通过电脑设置工业相机的门宽 t_w ，并通过数字延时器 DG535 改变调 Q 脉冲激光和工业相机之间的延时时间 t_d 。测试系统中，程序自动以 $t_d \times 1\%$ 的步长扫描 $-2t_w < t_d < 2t_w$ 的延时区间（如果 $t_d \times 1\%$ 大于相机最小可设置的步长，以相机最小步长扫描），在每步延时获取相机采集到的图像，并判断采集图像的曝光亮度。如果曝光亮度超过设定的阈值（系统图像的亮度阈值设为 50，其中相机的最高亮度为 255），则认为激光输出的脉冲光在门宽之内，如果不满足，则说明相机没有采集到脉冲激光。通过程序可以得到一组 t_d ，求得最大值 $t_{d,max}$ 和最小值 $t_{d,min}$ ，两者之差即为工业相机在标称门宽 t_w 的真实门宽 t_e 。

2 实验装置

雾滴颗粒速度测量装置如图 2 所示。该装置有待测的双介质喷嘴、连续激光器、工业相机和电脑组成。其中连续激光波长为 532nm，输出功率 1.2W，

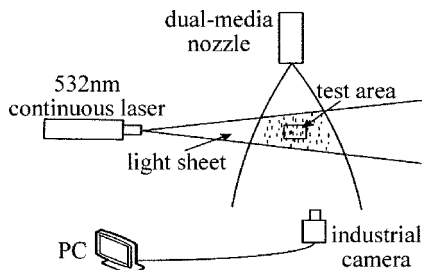


Fig. 2 Schematic diagram of test system

激光片光源厚度约为 1mm。此处的片光源不宜过厚,这样测试区域的雾滴颗粒密度就不会过高,否则严重的重叠会给图像处理带来困难;而片光源太薄的话,颗粒易穿出测试区域,加大了速度测量的误差。综合考虑,本文中采用的厚度为 1mm,而且使片光源穿过了喷射区域的中心轴位置,这样可以基本保证雾滴颗粒能够被片光源照亮。喷嘴采用空气引射水,引射的气压可以调节。

测试区域雾化颗粒的轨迹图像由数字相机实时采集,并传输给电脑进行实时处理。相机的曝光时间最低为 $10\mu\text{s}$,分辨率为 1024×768 。在测量中,需根据雾滴颗粒的轨迹图像改变相机的门宽。这是因为如果相机的门宽太宽,得到的雾滴颗粒的轨迹图像重叠严重,将给图像处理带来困难;如果相机的门宽太窄,一方面会引起雾滴颗粒图像的曝光不足,另外一方面,粒子轨迹会比较短,给测量结果带来误差。

3 测量结果和轨迹图像处理

图 3 所示为压缩空气压力约为 0.25MPa 时的典型图像,测试区域距离喷嘴约 1m 的距离。



Fig. 3 Typical image obtained when compressed air pressure is 0.25MPa

为了获得高精度的测试结果,作者采用 Steger 方法^[10-11]。相对于传统的灰度阈值法、极值法和梯度阈值法等算法,Steger 方法能给出更高精度的测量结果。该方法利用 Hessian 矩阵得到方向,然后求得法线方向上的极值点得到条纹中心线的亚像素位置。Steger 方法具有精度高、鲁棒性好等优点。作者采用与 ZHOU 等人对结构光相类似的处理方法^[12]。具体的操作如下。

首先利用模板高斯卷积计算雾滴颗粒轨迹图像上各点的 Hessian 矩阵确定其法线方向,在法线方向进行泰勒级数展开求得亚像素坐标,并将相邻的中心点连接。如果两个雾滴颗粒过近,得到的中心点可能位于两条直线上,此时可利用直线的交叉点对直线进行拆分。最后对共线中心点进行融合,构成新的直线,通过长度的约束,得到雾滴轨迹对应的中心点,然后进行直线拟合,即可得到雾滴颗粒的轨迹图像。

提取的轨迹如图 4 所示。由图 4 可以看出,该方法基本能够准确获取图中大部分的雾滴颗粒轨迹。结合之前图像定标的结果,即可得到轨迹在世界坐标系中的长度。已知相机的曝光时间,通过简单的计算就可以得到雾滴颗粒的速度。



Fig. 4 Trajectory map extracted with Steger method

基于该算法,本文中开发了实时在线测试的软件。程序运行时,软件自动采集图像,并自动提取颗粒图像进行分析和统计,程序设定统计数量为 5000 个,当统计数量超过 5000 个时,程序就会停止采集图像,并输出结果。

图 5 中给出了雾滴颗粒速率分布,从图中可以看出,其速率主要分布在 $1\text{m/s} \sim 3\text{m/s}$ 之间,个别速率接近 5m/s 。作者认为这是由于压缩空气气压不稳定造成的,也可能是由于雾化不充分,存在的较大的颗粒具有较高的速度,这需要进一步的研究。另外,仔细观察图 4 可以发现,图中有两个的雾滴颗粒具有较高的速度,这与测试的结果相符。

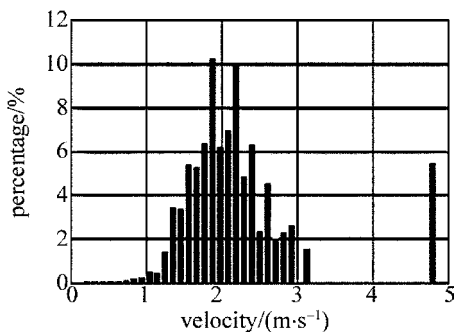


Fig. 5 Droplet particle velocity distribution

系统的测试误差主要来源于两个方面:一个方

面是成像镜头不可避免地存在一些失真,系统采用的镜头标称失真率约为0.1%,该失真也会造成一些误差;另一个方面,系统忽略了雾滴粒径的影响,当雾滴颗粒的运动轨迹足够长时,该误差可忽略不计。

另外需要指出的是,当雾滴的浓度过高时,将有大量的雾滴轨迹重叠,虽然本文中的算法能够区别一定的重叠,但是若发生大量的重叠,特别是雾滴轨迹首尾相连的情况发生概率提高时,就会给系统带来显著的误差,此时可通过提高测试系统的放大率,同时缩短相机的快门来避免雾滴轨迹图像的大量重叠,进而提高测量误差。

4 结 论

针对烟草行业所用的双介质喷头喷雾颗粒速度分布测量的问题,本文中开发了基于轨迹图像处理的在线测试系统,其测量原理简单、价格低廉。对系统获得的图像以 Steger 方法为基础,实现了其亚像素精度的提取相关信息。由于 Steger 方法具有较好的鲁棒性,以该方法为基础开发的程序,实现了轨迹图像的在线实时测量,并获得了理想的结果,为烟草行业所用的双介质喷嘴的雾化状态的表征提供了技术手段。

参 考 文 献

- [1] TSUJI Y, MORIKAWA Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 120(1): 385-409.
- [2] WANG D Zh, HUANG Zh, TONG Ch J, *et al.* Characteristics of diesel sprays by high speed video camera [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(4): 453-457(in Chinese).
- [3] ANGARITA-JAIMES D, TOWERS C E, TOWERS D P. Three-component multi-phase velocimetry measurements on a GDI spray using optically efficient fluorescent tracers [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(4): 949-962.
- [4] ZHANG Y Y, ZHANG G M, XU M. Laser diagnostics for spray of spark ignition direct injection (SIDI) combustion system [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2011, 2(4): 294-307 (in Chinese).
- [5] XU Q, CAO N, CAO L, *et al.* Experimental research of electrostatic spray with digital holography [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 143-146 (in Chinese).
- [6] ZHANG J J, FAN X L, CAI X Sh. Measurement for the velocity vector field of gas-solid two phase flow using single frame and single exposure imaging [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(1): 79-82 (in Chinese).
- [7] ZHANG H, CAI X Sh, SHANG Zh T, *et al.* The measurement of size, velocity and flow angle of coarse water with xingle image method [J]. *Thermal Turbine*, 2008, 37(1): 26-29 (in Chinese).
- [8] CHINNAYYA A, CHTAB A, SHAO J Q, *et al.* Characterization of pneumatic transportation of pulverised coal in a horizontal pipeline through measurement and computational modelling [J]. *Fuel*, 2009, 88(12): 2348-2356.
- [9] WU X Ch, WANG H, HU Q, *et al.* Velocity and size measurement of coal particle by trajectory imaging [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition)*, 2011, 45(8): 1458-1462 (in Chinese).
- [10] STEGER C. Extraction of curved lines from images [C]//In 13th International Conference on Pattern Recognition. Vienna, Austria: IEEE, 1996: 251-255.
- [11] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [12] ZHOU F Q, WANG F, ZHANG G J. Three-step extraction method for line-stripe in structured light vision [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(11): 215-219 (in Chinese).