

文章编号: 1005-5630(2020)02-0075-05

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.02.013

# 光学互相关测速系统设计与验证

施智雄<sup>1</sup>, 潘科玮<sup>2</sup>, 杨逸璠<sup>1</sup>, 杨 斌<sup>1</sup>, 王占平<sup>1</sup>, 刘津良<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;  
2. 上海航天动力技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 针对两相流颗粒运动速度测量及基于互相关原理设计了双光路激光测速系统。采用搭建的变频电机带动绕丝产生已知旋转线速度的装置开展光学互相关测速验证实验。通过测量绕丝经双光路激光的光强衰减信号, 再对两路信号进行互相关分析, 从而得到测点绕丝旋转线速度。以电机转速计算的测点绕丝线速度作为参考值进行测量精度验证, 得到光学互相关测速方法的测量相对误差在6%以内, 验证了光学互相关测速方法的准确性。

**关键词:** 在线测量; 相关测速法; 光学互相关法; 两相流; 测量误差  
**中图分类号:** TH 824 **文献标志码:** A

## Design and experimental validation of velocity measurement system based on optical cross correlation method

SHI Zhixiong<sup>1</sup>, PAN Kewei<sup>2</sup>, YANG Yifan<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>1</sup>, WANG Zhanping<sup>1</sup>, LIU Jinliang<sup>1</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Aiming at the measurement of the moving velocity of two-phase flow particles, a dual-path laser velocimetry experimental system was designed based on the principle of cross correlation, and an optical cross correlation velocimetry experiment was carried out by using a known rotating linear velocity device driven by a variable frequency motor. By measuring the intensity signal of the dual-path lasers around the rotating wire, rotation line velocity of wire at the measured point was calculated by the cross correlation analysis of the two intensity signals of the dual-path lasers. Compared with the calculated line velocities of wire at the measured point by using the rotate speed of motor, the relative deviations were less than 6%, verifying the accuracy of optical mutual light velocimetry.

收稿日期: 2019-11-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0603204); 国家自然科学基金(51806144); 上海市自然科学基金(19ZR1454500)

作者简介: 施智雄(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多相流在线测量方法及应用。E-mail: 724844862@qq.com

通信作者: 杨 斌(1985—), 男, 副教授, 研究方向为多相流在线测量方法及应用。E-mail: yangbin@usst.edu.cn

**Keywords:** online measurement; correlation velocity measurement method; optical cross correlation method; two phase flow; measurement error

## 引 言

两相流广泛存在于化工、医药、石油、环境等领域，通常是由两种介质组成的流动体系<sup>[1]</sup>。两相流离散颗粒运动参数可以有效表征两相流流动状态，因此，两相流中离散颗粒的运动速度测量对于两相流过程的在线监测与优化控制具有重要参考价值<sup>[2]</sup>。由于各相间存在着物理性质差异，使得两相流的颗粒流动参数检测比单相流的难度更大。目前两相流颗粒运动速度测量技术主要有激光多普勒(laser-doppler anemometry, LDA)<sup>[3]</sup>、相位多普勒颗粒分析(phase doppler particle analyzer, PDPA)<sup>[4]</sup>、粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)<sup>[5]</sup>及相关测速技术<sup>[6-7]</sup>等。其中，LDA、PDPA、PIV等激光测速技术虽然具有测量精度高、空间分辨率高等优点，但在工业环境的应用中受到经济性、可靠性、环境适应性等限制。而相关测速技术基于随机过程中的相关理论，利用两相流内部主动或被动产生的电荷、电容、超声、光等随机信号，将流动速度测量转化为两相流通过相距一定距离的时间测量问题，具有结构简单、可靠性高等优点，更适合各类工业应用<sup>[8-11]</sup>。

光学互相关测速法是典型的相关测速技术<sup>[12]</sup>。蔡小舒等<sup>[13]</sup>利用光学互相关法开展煤粉输运过程中两相流颗粒速度在线监测，为锅炉运行与燃烧优化提供参考。由于两相流中颗粒运动较为复杂，光学互相关测速结果的精度验证常用连续相速度作为参考值作比较，并未考虑两相相移速度，难以准确评判其测量精度。因此本文基于互相关原理设计了双光路激光测速系统，利用变频电机带动绕丝产生已知旋转线速度对光学互相关测速系统进行验证。

## 1 光学互相关法测速原理

图 1 为光学互相关测速原理示意图，该测速

方法是以两相流流动引起上下游随机变化的光信号为对象，通过互相关分析得到两相流流动速度。

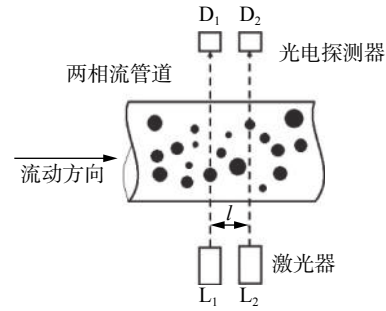


图 1 光学互相关测速原理示意图

Fig. 1 Schematic of velocity measurement based on optical cross correlation method

相距  $l$  的两个激光器  $L_1$ 、 $L_2$  发出两互相平行的激光束，两激光束穿过两相流介质后，因受到两相流中颗粒的散射作用，使两透射激光束的光强发生衰减，其光强信号则由对应的两个探测器  $D_1$ 、 $D_2$  接收。透射光强与入射光强的关系符合 Beer-Lambert 定律，即满足关系

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{\pi}{4}LND^2E(\lambda, m, D) \quad (1)$$

式中： $I$  为透射光强； $I_0$  为入射光强； $L$  为光束在测量区内的行程； $N$  为两相流颗粒的体积分数； $D$  为颗粒的平均粒径； $E$  为消光系数； $\lambda$  为入射光波长； $m$  为颗粒相对折射率。 $E$  是  $\lambda$ 、 $D$ 、 $m$  的复杂函数，可由 Mie 理论计算得到。

由于两相流中颗粒随机通过光束，两个探测器  $D_1$  和  $D_2$  测量的透射光强信号  $y_1$  和  $y_2$  可认为是随机波动信号，并且具有相似性，对光强时间序列信号  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$  进行互相关分析，即

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y_1(t-\tau)y_2(t) dt \quad (2)$$

式中： $R_{12}$  为两个随机信号  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$  的互相关系数； $T$  为积分平均时间。当  $\tau=\tau_0$  时， $R_{12}$  为最大值，则  $\tau_0$  为两随机波动信号的时滞。

因此，根据时滞  $\tau_0$  以及两探测器之间的距离  $l$  可求得两相流流动速度  $v$ ，即

$$v = l/\tau_0 \quad (3)$$

为评价光学互相关测速结果精度, 需要开展不确定度评定。不确定度是建立在概率论和统计学基础上, 表征由于测量误差的影响而对测量结果的不可信程度或有效性的怀疑程度, 可以反映某个测量结果的质量<sup>[14]</sup>。

标准不确定度的 A 类评定方法是用统计方法获得的。在同一条件下, 对被测量  $X$  进行  $n$  次测量, 测量值为  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 样本算术平均值  $\bar{x}$  为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

$X$  的实验标准偏差可用贝塞尔公式计算得到, 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{v} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中自由度  $v = n - 1$ 。

算术平均值测量结果的 A 类标准不确定度为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

取算术平均值标准差作为测量重复性引起的标准不确定度分量  $\mu$ , 其可表示为  $\mu = \sigma_{\bar{x}}$ 。因此, 扩展不确定度  $U$  为

$$U = k \cdot \mu \quad (7)$$

式中  $k$  为包含因子。

## 2 光学互相关测速系统

图 2 为光学互相关测速装置, 将细铁丝缠绕于直流电机的旋转轴上, 并在绕丝测点的垂直方向布置相距为  $l$  的两束激光。当电机工作时, 缠绕的铁丝随着旋转轴运动, 绕丝测点先后穿过两束激光。通过测量两个光电探测器接受的透射光强信号, 由互相关分析便可获得绕丝测点的旋转线速度。该装置直流电机以每 3 V 间隔为一个测量工况, 在 6~24 V 电压范围内开展 10 次测量, 并对测量结果进行不确定度分析。由于直流电机的转动频率由供电电压控制, 由此可通过理论计算获得相应绕丝测点的线速度, 以此作为参考值, 可对比分析通过光学互相关测速方法测量结果的准确性。

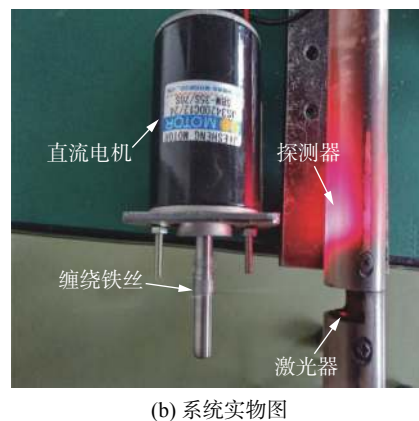
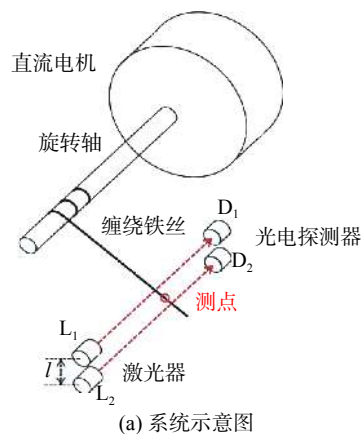


图 2 光学互相关测速实验系统

Fig. 2 Experimental system of velocity measurement based on optical cross correlation method

## 3 测量结果与分析

### 3.1 典型信号的互相关分析

直流电机以每 3 V 间隔为一个测量工况, 在

6~24 V 电压范围内测得了在不同电压下电机上的铁丝依次经过双光路时的信号值, 以此作为原始数据验证测速系统的精度。在实验过程中, 保持电机电压以及整个实验装置的稳定是保证实验可靠性的前提, 因而可以对信号接收器接收到的双光路信号波动相关性进行比对

分析。

取电压为 15 V 时的光路信号进行信号分析, 双光路探测器电压信号如图 3 所示, 可见两路信号波动具有非常好的相似性和稳定性, 细铁丝经过双光路时光强衰减信号呈良好的周期性变化。

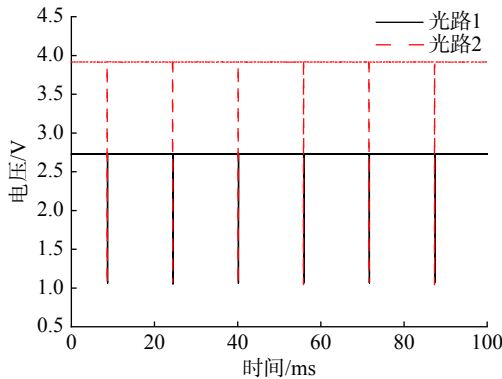


图 3 典型探测器光强信号

Fig. 3 Typical light intensities of detectors

对图 3 双光路透射光强信号进行互相关分析, 得到的互相关系数如图 4 所示。当时滞为 0.104 ms 时, 互相关系数最大值达到 0.998 2, 由此得到互相关测速结果为 23.927 m/s。根据直流电机 15 V 工况转速计算, 得到绕丝测点的线速度为 23.969 m/s, 以此作为参考值, 测得结果的相对偏差为 0.18%, 由此验证了该实验装置具有良好的准确性。

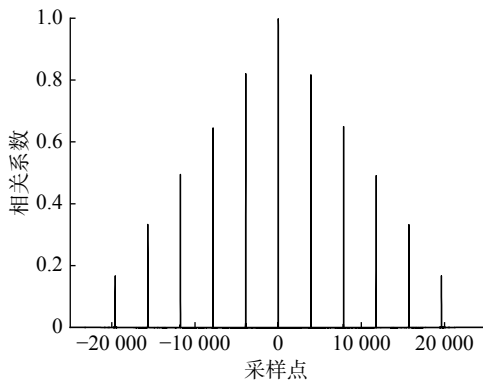


图 4 典型光强信号的互相关分析结果

Fig. 4 Cross correlation coefficient of typical light intensities

### 3.2 测量不确定度评定

对双光路透射光强信号进行互相关分析,

可得到测点处绕丝运动的线速度测量结果。由于影响测量精度的主要因素是电机电压的不稳定引起的标准不确定度分量, 因此, 按照前述测量不确定度分析方法: 计算每种单一电压工况下的 10 次信号测量结果的算数平均值; 按式(5)计算单次测量的标准差; 按式(6)计算算术平均值测量结果的 A 类标准不确定度; 取算术平均值标准差作为测量重复性引起的标准不确定度分量, 即  $\mu = \sigma_{\bar{x}}$ , 其自由度为 4; 取置信概率为 99%, 查  $t$  分布表得  $t_{99}(v) = 4.60$ , 取包含因子  $k = t_{99}(v) = 4.60$ , 该速度测量结果的扩展不确定度按式(7)计算。利用互相关分析测速法可得到不同电压下的绕丝速度测量结果, 如表 1 所示。由此可见, 基于互相关法的缠绕铁丝运动速度测量方法具有较好的测量重复性。

表 1 不同电压下绕丝速度测量结果

Tab. 1 Velocity measurement results of the rotating wire under diffract voltages

电机电压/V	速度测量结果/(m·s <sup>-1</sup> )	标准偏差/(m·s <sup>-1</sup> )
6	8.526	0.016
9	13.406	0.013
12	18.607	0.024
15	23.492	0.013
18	28.511	0.010
21	33.457	0.005
24	38.275	0.004

### 3.3 测量误差分析

直流电机的转动频率由供电电压控制, 已知各电压工况下直流电机的转动频率, 由此可通过理论计算获得相应绕丝测点的线速度, 以此作为参考值, 可分析得到测量结果与标准速度的测量误差, 如表 2 所示。由此可见, 利用光学互相关测速装置对绕丝经双光路引起的透射光强信号进行互相关分析, 得到的速度测量结果与标准参考速度的相对偏差不超过 6%, 具有较高的测量准确性。

表 2 不同电压下绕丝速度测量误差  
Tab. 2 Velocity measurement errors of the rotating wire under diffract voltages

电机电压/ V	速度测量结果/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	标准参考速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	相对偏差/ %
6	8.526	8.440	1.01
9	13.406	13.710	2.27
12	18.607	18.730	0.66
15	23.492	23.000	2.09
18	28.511	28.510	0.01
21	33.457	33.120	1.01
24	38.275	36.040	5.84

## 4 结 论

基于光学互相关测速原理设计了双光路光学互相关测速系统, 通过变频电机带动绕丝运动模拟两相流中颗粒运动, 通过分析绕丝经双光路造成的衰减信号直接测量绕丝运动线速度, 进而验证光学互相关对两相流颗粒运动速度测量的准确性。通过对双光路透射光强信号进行互相关分析可得测点处绕丝运动线速度, 与电机转动频率计算所得线速度对比, 可得测量结果的相对偏差小于 6%。

### 参考文献:

- [1] 李海青. 两相流参数检测及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.
- [2] 李海青, 黄志尧. 特种检测技术及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [3] IBSEN C H, SOLBERG T, HJERTAGER B H, et al. Laser Doppler anemometry measurements in a circulating fluidized bed of metal particles[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26(6/7): 851 – 859.
- [4] LIU X H, GAO S Q, LI J H. Characterizing particle clustering behavior by PDPA measurement for dilute gas–solid flow[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 108(3): 193 – 202.
- [5] 阮晓东, 刘志皓, 瞿建武. 粒子图像测速技术在两相流测量中的应用研究 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2005, 39(6): 785 – 788.
- [6] 王池, 王自和, 张宝珠, 等. 流量测量技术全书 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [7] 徐苓安. 相关流量测量技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1998.
- [8] 蒋泰毅, 熊友辉. 气固两相流速度及质量流量的静电测量法研究 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2005, 33(1): 93 – 95.
- [9] 赵安, 韩云峰, 翟路生, 等. 气液两相流电容传感器相浓度测量特性 [J]. *化工学报*, 2015, 66(7): 2402 – 2410.
- [10] 柴继河. 超声相关流量计的设计 [D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- [11] 周洁, 袁镇福, 岑可法, 等. 光信号互相关测量两相流中颗粒流动速度的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(1): 185 – 188.
- [12] 蔡小舒, 苏明旭, 沈建琪. 颗粒粒度测量技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [13] CAI X S, LI J F, OUYANG X, et al. In-line measurement of pneumatically conveyed particles by a light transmission fluctuation method[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2005, 16(5): 315 – 320.
- [14] 倪育才. 实用测量不确定度评定 [M]. 5 版. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2016.

(编辑: 刘铁英)