

文章编号: 1672-9897(2009)02-0078-05

# LDV 在静态混合器流场测量中的误差放大现象

张春梅<sup>1,2</sup>, 吴剑华<sup>2</sup>, 徐 飞<sup>2</sup>, 龚 斌<sup>2</sup>

(1. 天津大学化工学院, 天津 300072; 2. 沈阳化工学院, 沈阳 110142)

**摘要:** LDV 在静态混合器流场测量中, 测得速度由非正交坐标系向三维笛卡尔坐标系变换时将引起测量原始误差被放大。结合误差传递的原理对该现象进行了理论上的研究, 并通过实验测量和数值模拟对研究结论进行了验证。结果表明: LDV 在测量中的速度方向转换能引起测量原始误差在某方向速度值中被放大; 放大倍数与用来测速的两束光之间夹角有很大关系, 当夹角较小时, 原始误差会被放大十几倍甚至几十倍, 且夹角越小, 放大倍数越大。

**关键词:** 激光多普勒测速仪; 静态混合器; 速度测量; 误差分析

**中图分类号:** TQ051.7 **文献标识码:** A

## Error amplification phenomenon of flow field measured by LDV in static mixer

ZHANG Chun-mei<sup>1,2</sup>, WU Jian-hua<sup>2</sup>, XU Fei<sup>2</sup>, GONG Bin<sup>2</sup>

(1. Chemical Tehnology College, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** The original error will be amplified by transformation from non-orthogonal coordinates of explorers to Cartesian coordinates during velocity measurement of static mixer's flow field by LDV. The phenomenon was studied theoretically based on the error transfer principle. The conclusion was verified by experimental measurement and numerical simulation. The results show that the value of velocity in some direction is amplified based on LDV measurement when velocity direction transformation. There is a direct connection between amplificatory multiple and the angle of two beams. When the angle is small, the original error is magnified more than 10 times or even several tens of times. And as the angle is smaller, the magnification multiple is greater.

**Key words:** Laser Doppler Velocimetry (LDV); static mixer; velocity measurment; error analysis

## 0 引言

静态混合器是由在光滑直管内置入不同形状混合元件构成的一种新型高效混合设备<sup>[1]</sup>, 因具有结构简单、密封性能好、易于连续操作、混合效率高等众多优点而在化工、石油、制药、环保等行业获得广泛应用<sup>[2]</sup>。静态混合器流场特性研究是静态混合技术研究的核心问题之一, 也是其混合性能及传热性能研究的基础。但由于静态混合器的内部结构复杂, 从理论上研究其流场特性非常困难, 实验测量和数值模拟便成为主要研究手段<sup>[3-4]</sup>。

激光多普勒测量技术作为非接触测量技术的代

表, 是研究静态混合器流场特性的主要方法之一, 其在流场测量中的误差大小对混合器流场特性分析结果的准确性有重要影响。由于激光多普勒测量系统涉及到流体力学、光学、电子学、数据采集等多门学科, 因此影响实验测量精度的因素有很多, 沈平等多人曾对激光多普勒测量误差产生原因进行分析, 主要原因可大致归纳为以下几方面<sup>[5-8]</sup>: (1) 激光光束形成的测量体因各种因素导致位置和形状偏离理想状态而产生误差; (2) 信号处理过程中会产生误差; (3) 激光探头的安装会产生误差; (4) 示踪粒子对于所测流体的跟随性的好坏及示踪粒子的浓度会影响实验结果; (5) 测量区域内, 高速流动的粒子一定时间内通过

收稿日期: 2008-04-07; 修订日期: 2008-08-18

基金资助: 辽宁省科技攻关项目(2006223001)

作者简介: 张春梅(1975-), 女, 辽宁台安县人, 副教授, 研究方向: 化工过程强化。

通讯作者: 吴剑华, E-mail: jianhuawu@163.com

的数量比低速粒子多,并且高速粒子被检测到的几率也高,所得的时均速度会高于真实值,造成粒子统计平均模型误差。这些因素形成了激光多普勒测量中的原始误差。

LDV 可同时测量一个测试点 3 个方向上的速度分量,但这 3 个方向不一定是流场特性分析中期望的速度分量方向,需要对速度进行方向转换,在处理过程中发现一种新现象:这种转换本身不会产生新的误差,但可能引起测量原始误差在某方向速度值中被放大。笔者主要对激光多普勒测量中因不同方向速度转换引起测量原始误差被放大的现象进行研究。

## 1 LDV 测量中不同方向速度的转换

图 1(a)为静态混合器流场测量时的速度转化示意图。测量时由氩离子激光器产生的激光束经光分离器分成三色六束单色光:波长为 476nm 的一对紫光、波长为 488nm 的一对蓝光、波长为 514.5nm 的一对绿光。在每对光中有一束光加有  $f_0=40\text{MHz}$  频移,

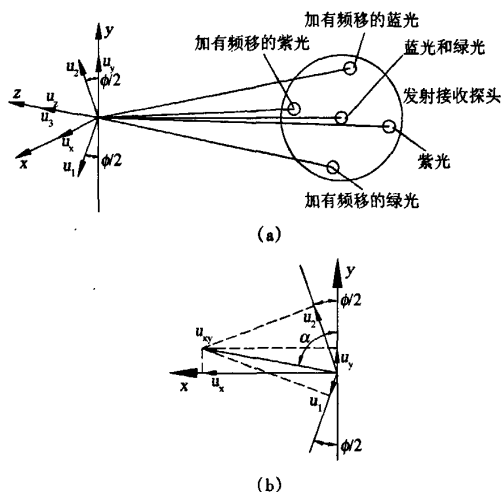


图 1 坐标转换示意图

Fig.1 Schematic of coordinate conversion

以确定流动方向,在速度测量中由两束绿光测得  $u_1$ ; 两束蓝光测得  $u_2$ ; 两束紫光测得  $u_3$ ,  $u_1$  与  $u_2$  在  $xoy$  平面内,  $u_1$  与  $y$  轴的负方向及  $u_2$  与  $y$  轴的夹角均为  $\varphi/2$ ,  $u_3$  与  $z$  轴的夹角为  $0^\circ$ , 设直角坐标系下沿各坐标轴方向的速度分量分别为  $u_x, u_y, u_z$ , 图 1(b)为  $xoy$  平面内速度转化示意图,  $u_{xy}$  为速度在  $xoy$  平面内投影,则由坐标转换有

$$\begin{bmatrix} u_y \\ u_z \\ u_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2\cos \varphi/2} & \frac{1}{2\cos \varphi/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2\sin \varphi/2} & \frac{1}{2\sin \varphi/2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\varphi$  角的大小是由镜头的焦距决定的,显然,焦距越大,即测量点距激光探头的距离越远,  $\varphi$  角就越小。

## 2 转换中的误差放大

受多种因素影响,测得的  $u_1, u_2, u_3$  会有一定原始误差,以  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  分别表示这三个方向的测量误差,根据误差传递的原理<sup>[9]</sup>,直角坐标系下沿各坐标轴方向速度误差  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  为

$$\begin{cases} \Delta_x = \frac{\partial u_x}{\partial u_1} \Delta_1 + \frac{\partial u_x}{\partial u_2} \Delta_2 \\ \Delta_y = \frac{\partial u_y}{\partial u_1} \Delta_1 + \frac{\partial u_y}{\partial u_2} \Delta_2 \\ \Delta_z = \frac{\partial u_z}{\partial u_3} \Delta_3 \end{cases} \quad (2)$$

若  $u_1, u_2, u_3$  测量误差相差不大,即近似有:  $\Delta_1 \approx \Delta_2 \approx \Delta_3 \approx \Delta_u$ , 将式(1)代入式(2)可得  $\Delta_x =$

$\frac{\Delta_u}{\sin \varphi/2}, \Delta_y = 0, \Delta_z = \Delta_u$ 。可见,经不同方向速度转换,  $u_x$  的误差为原始测量误差的  $\frac{1}{\sin \frac{\varphi}{2}}$  倍。当  $\varphi$  角为

$0^\circ$  时,  $\Delta_x$  理论上为无穷大,实际上这种情况时,两束光是平行或重合的,无法得到  $u_x$  值,在实际测量中,当  $\varphi$  角较小时,即测量点距激光探头的距离较远时,测量误差会被放大十几倍甚至几十倍。

## 3 激光多普勒测量实验与数值模拟

为检验这一测量误差被放大的现象,以 SK 型静态混合器为测量对象进行了实验验证。实验由泵、变频器、水箱、流量计、阀门、静态混合器及管线等构成介质循环系统,采用丹麦 DANTEC 公司生产的三维五光束激光多普勒测速仪(LDV)进行速度测量。测量静态混合器管内径  $D$  为 40mm,元件长径比为 1.25,混合管及混合元件材料为有机玻璃,每管中布置 5 对 10 个混合元件,厚约 4mm。实验以水为介质,示踪粒子为 DANTEC 公司推荐的比重与水接近,主要成分为二氧化硅,粒径为  $8 \sim 12\mu\text{m}$  的空心玻璃球。为了避免因光线直接穿过有机玻璃的弧形壁面,由折射导致实际测点与设定测点不一致,实验中在静态混合管外加一个充满水的有机玻璃槽,使光线从空气中垂直射入水槽壁面,再射入圆弧壁面,由于水的折射率与有机玻璃相近,从而大大减小由折射引起的测点偏离<sup>[10]</sup>。

实验采用镜头焦距  $f$  为 310mm, 激光发射探头上的两束蓝光(两束绿光)的距离  $r_L$  为 37mm, 则两束蓝光(两束绿光)的夹角  $\varphi = \arctan \frac{r_L}{f} = 6.806^\circ$ , 此时  $\frac{1}{\sin \varphi/2} = 16.86$ . 实验时水的宏观平均流速为 0.3m/s, 以  $A(-8, 8)$ 、 $B(-12, 4)$  两点为代表点, 考查代表点沿  $z$  轴方向直线上的速度分布情况. 实验共进行两次测量, 第二次测量时将混合管绕中心轴(即  $z$  轴)沿逆时针方向旋转  $90^\circ$  以与第一次测量结果对比, 如图 2 所示.

对两代表点两次测量结果的对比如图 3 所示. 由图 3 可以看出两次测量结果中  $u_x$  与  $u_y$  差别较大而  $u_z$  的重复性较好. 为了确定两次测量中的  $u_x$  与  $u_y$  谁更接近于真值, 采用 FLUENT 流体力学计算软件对静态混合器内的流速场进行数值模拟与实验的结

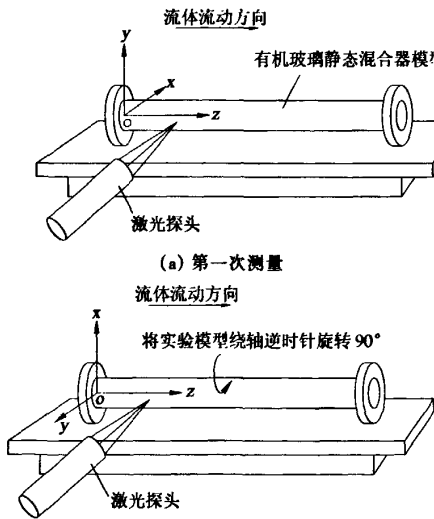
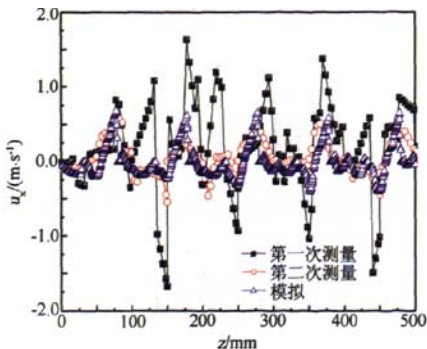
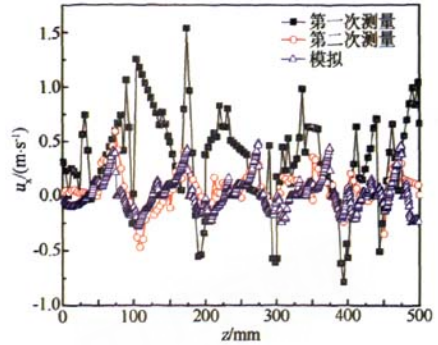


图 2 两次测量示意图

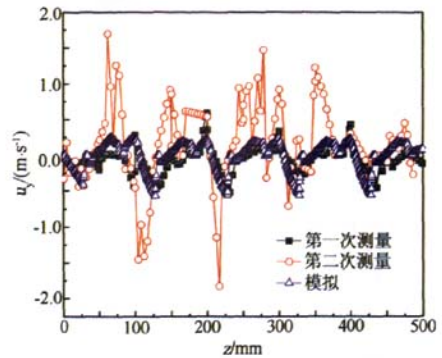
Fig.2 Schematic of two measurements



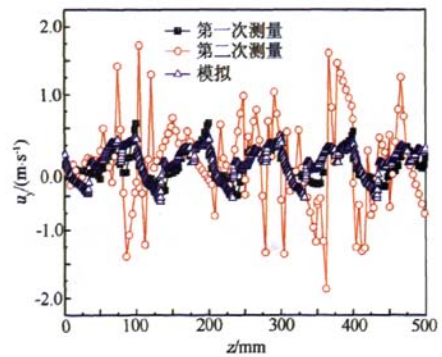
(a) A 点  $u_x$  对比



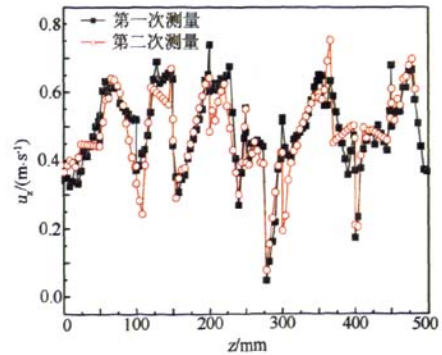
(b) B 点  $u_x$  对比



(c) A 点  $u_y$  对比



(d) B 点  $u_y$  对比



(e) A 点  $u_x$  对比

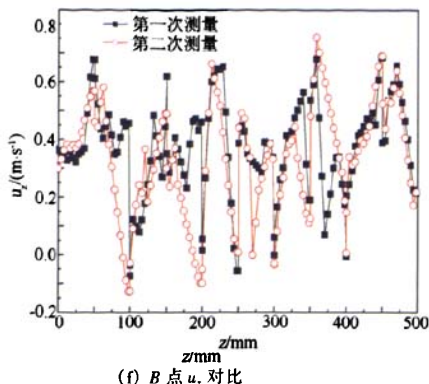


图3 两次测量与数值模拟结果对比图

Fig.3 Comparison of measurement results and numerical simulation results

果进行对比。数值模拟的物理模型与实验测量混合器的结构和尺寸一致,计算条件与实验条件一致,假设介质不可压缩,静态混合器内的流动为稳态过程。在 FLUENT 的前处理软件 GAMBIT 中进行网格划分,网格模型如图4所示,采用四面体网格,共有675404个



图4 静态混合器网格划分示意图(截取一段)

Fig.4 Mesh of partial static mixer

单元网格。数值计算采用雷诺应力模型,压力—应变项用 SSG 模型进行封闭。计算的入口边界条件为速度入口;出口边界条件为自由流出口,其它未设置的面默认为固壁无滑移光滑界面。求解流体流动的控制方程可以表示为<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varphi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\varphi) + S \quad (3)$$

其中: $\rho$ 为流体密度, $\varphi$ 为通用变量, $\Gamma$ 为广义扩散系数; $S$ 为广义源项。两代表点实验测量与数值模拟的对比结果如图3(a)~(d)所示,显然第一次测得的 $u_y$ 与第二次测得的 $u_x$ 与数值模拟结果比较接近,可以认为这两个测量结果比较接近于真实结果,而第一次测得的 $u_x$ 第二次测得的 $u_y$ 与真实结果偏离较远,这是由于速度方向转换中原始误差被放大的结果。为对这种误差放大进行定量分析,定义第一次测量 $u_x$ 、第二次测量 $u_y$ 及两次测量 $u_z$ 的相对误差分别为

$$\begin{cases} \delta_{1x} = \int_0^L |u_{1x}(z) - u_{2x}(z)| dz / \int_0^L |u_{2x}(z)| dz \\ \delta_{2y} = \int_0^L |u_{1y}(z) - u_{2y}(z)| dz / \int_0^L |u_{1y}(z)| dz \\ \delta_z = 2 \int_0^L |u_{1z}(z) - u_{2z}(z)| dz / \int_0^L |u_{1z}(z)| dz \\ \quad + \int_0^L |u_{2z}(z)| dz \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\delta_{1x}$ 、 $\delta_{2y}$ 、 $\delta_z$ 分别表示3个相对误差, $L$ 表示方向测量总长, $u_{1x}(z)$ 至 $u_{2z}(z)$ 依次表示两次测量代表点3个方向速度与 $z$ 的关系函数。为便于计算结果处理,将式(4)进行离散化表示为

$$\begin{cases} \delta_{1x} = \sum_{i=1}^N |u_{1xn}(z) - u_{2xn}(z)| / \sum_{i=1}^N |u_{2xn}(z)| \\ \delta_{2y} = \sum_{i=1}^N |u_{1yn}(z) - u_{2yn}(z)| / \sum_{i=1}^N |u_{1yn}(z)| \\ \delta_z = 2 \sum_{i=1}^N |u_{1zn}(z) - u_{2zn}(z)| / \sum_{i=1}^N |u_{1zn}(z)| + \sum_{i=1}^N |u_{2zn}(z)| \end{cases} \quad (5)$$

式中: $N$ 为将代表点所在轴向直线在 $0 \sim L$ 范围内离散的点数,按式(5)得到两代表点3个相对误差分别为238%、313%、10.5%与310%、256%、30.9%, $\delta_{1x}$ 与 $\delta_{2y}$ 平均为 $\delta_z$ 的13.3倍与13.7倍。 $\delta_z$ 比文献[12]给出的LDV全场测速综合误差小于4%大较多,分析其主要原因如下:两次测量的流场不可能完全一致,存在一定程度偏差;两次测量的代表点也不可能完全重合,也存在一定程度偏差。

## 4 结 论

综合以上分析,可得出如下结论:

(1) LDV在静态混合器流场测量中,进行速度方向转换时,能引起测量原始误差在某方向速度值中被放大;

(下转第99页)

- [9] THOMAS W, HOPPE C. Comparison of angle of attack measurements for wind tunnel testing[R]. AIAA-2001-0559.
- [10] BURNER A W, RADEZTSKY, LIU T. Videometric model deformation measurement technique[R]. AIAA C-9667.
- [11] THOMAS W, CHARLES B. Design and development of a real-time model attitude measurement system for hypersonic facilities[R]. AIAA-2005-1411.
- [12] WIM RUYTEN. Model attitude measurement with an eight-camera pressure-sensitive paint system[R]. AIAA-2000-0831.
- [13] RUYTEM W. Toward an integrated optical data system for wind tunnel testing[R]. AIAA-96-2253.
- [14] FRASER C S. Photogrammetric camera component calibration 3/4 a review of analytical techniques[C]. Workshop on Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision (TU-1), XVII Congress, International Society of Photogrammetry & Remote Sensing, Washington, DC, 1992.
- [15] LIU T, CATTAFESTA L, RADEZSKY R, et al. Photogrammetry applied to wind-tunnel testing[J]. AIAA J. 2000, 38(6): 964-971.
- [16] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[C] // Proc. ASP/UI Symp. on Close-Range Photogrammetry, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 1971: 1-18.
- [17] RONALD N M. Reduction and analysis of phosphor thermography data with the IHEAT software package[R]. AIAA-98-0712.
- [18] LOESER T, BERGMANN, ANDREAS. Development of the dynamic wind tunnel testing capabilities at DNW-NWB[R]. AIAA-2003-453.

(上接第81页)

(2)放大倍数与用来测速的两束光之间夹角有很大关系。夹角越小,放大倍数越大,对于文中实验使用镜头,夹角为 $6.806^\circ$ ,经坐标转换,放大倍数可达十几倍。

#### 参考文献:

- [1] 陆振民,徐斌.静态混合器的设置[J].化学工程,1994,22:(5) 59-69.
- [2] 刘仁昇,程铎.静态混合器设计及应用[J].化学反应工程与工艺,1986,2(4):81-91.
- [3] 赵建华,黄次浩,郑学岭.静态混合器气液两相流压降的数值模拟及实验研究[J].精细化工,2003,20(5):317-320.
- [4] 张鸿雁,陈晓春,王元.内置翼片管式静态混合器混合效果的大涡模拟[J].西安交通大学学报,2005,39(7):673-676.
- [5] 沈平,尹军飞.激光多普勒测速误差分析[J].宇航计量技术,1993,12(5):76-80.
- [6] 邹泓,赵洋.激光多普勒测量中信号的误差分析[J].光学技术,2000,26(3):235-240.
- [7] McLAUGHLIN D K, TIEDERMANN W G. Bias correction for individual realization laser Doppler measurements in turbulent flows[J]. Phys of Fluids, 1973, 16: 2082-2088.
- [8] 爻伟群,吕进.激光多普勒测速仪测量误差的估计和修正[J].计量学报,2002,23(2):118-121.
- [9] 张志贤,龚晓.分析测定中的误差传递[J].化工标准化与质量监督,1998,(9):22-27.
- [10] 毛德明,冯连芳,许国军,等.光速穿过搅拌槽圆形壁面时对LDV控制体和测点的影响[J].实验力学,1996,11(1):12-17.
- [11] 王福军.计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [12] 刘应征.LDV/PIV全场速度测量的误差分析[J].上海交通大学学报,2002,36(10):1044-1047.