

文章编号:1001-4888(2018)03-0359-07

# 用 Tomo-TRPIV 测量湍流边界层 及拟序结构的时空模态<sup>\*</sup>

庄茜<sup>1,2</sup>, 姜楠<sup>3,4</sup>

(1. 天津大学水利工程安全与仿真重点实验室, 天津 300354; 2. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384;  
3. 天津大学机械工程学院, 天津 300354; 4. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300354)

**摘要:**层析时间分辨粒子图像测速(Tomographic Time-Resolved Particle Image Velocimetry, 简称 Tomo-TRPIV)技术是新近发展起来的一种先进的流体无接触测速技术,能够无干扰地测量流场的三个速度分量的三维空间分布。本文简要介绍了 Tomo-TRPIV 技术的基本原理、测量系统的主要组成和测量的主要步骤以及水槽中平板湍流边界层及其拟序结构的测量结果。实验证明,Tomo-TRPIV 技术能够很好地测量平板湍流边界层对数律区的瞬时及平均流场,实验发现,在对数律区,平板湍流边界层中的拟序结构的涡量场主要以空间四极子的形式存在,四极子涡旋相互诱导,产生喷射和下扫等猝发事件,维持湍流边界层的发展演化。

**关键词:**层析时间分辨粒子图像测速技术;湍流边界层;拟序结构;四极子;喷射;下扫;猝发  
**中图分类号:** O357.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-017

## 0 引言

粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, 简称 PIV)是 20 世纪 80 年代发展起来的一种基于光学图像处理的流体无干扰测速技术。经过三十多年的发展,PIV 技术已经成为实验流体力学广泛采用的流速测量技术。特别是进入 21 世纪以后,随着数字图像采集和处理技术、激光技术和计算机技术的发展,PIV 技术已经进入三维空间体测量、高时空分辨率、超大/超微流场测量的新阶段<sup>[1]</sup>。

2005 年,荷兰 Delft 技术大学的 Elsinga 等<sup>[2]</sup>发明了层析粒子图像测速技术,这是 PIV 技术具有里程碑的重大进步,标志着 PIV 技术从面测量进入到体测量的阶段,此后层析粒子图像测速技术在湍流测量中获得巨大成功。Elsinga 等<sup>[3]</sup>2007 年用层析粒子图像测速技术测量了低雷诺数人工触发湍流边界层,Schröder 等<sup>[4,5]</sup>、Jodai 等<sup>[6]</sup>分别用高时间分辨率层析粒子图像测速技术(Tomo-TRPIV)测量了湍流边界层中的拟序结构,Gao 等<sup>[7]</sup>用移动的层析粒子图像测速技术研究了湍流边界层中拟序结构的发展演化,Humble 等<sup>[8]</sup>用层析粒子图像测速技术研究了激波与湍流边界层相互作用的瞬时流动结构,Elsinga 等<sup>[9,10]</sup>用层析粒子图像测速技术研究了高雷诺数超声速湍流边界层中三维涡结构的有序特性。TANG<sup>[11]</sup>用随机线性估计和时空相关对 Tomo-TRPIV 测量的湍流边界层中的发卡涡结构的发展演化进行了分析,YANG 等<sup>[12]</sup>对沟槽壁面湍流边界层中的减阻特性和发卡涡结构特征进行了实验研究。

## 1 Tomo-TRPIV 技术

### 1.1 Tomo-TRPIV 技术原理

Tomo-TRPIV 技术是一个基于多相机系统、三维体激光束以及三维空间粒子场重构的流体力学实

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-02-05;修回日期:2017-03-29

基金项目:国家自然科学基金(11572221)、(11332006)、(11411130150)联合资助

通讯作者:庄茜(1980—),女,讲师,博士研究生。主要研究领域:水力学与流体力学。

验测量新技术。这个技术是利用多个相机来记录不同视角下的被照亮的粒子场,然后通过光学层析算法来产生离散的三维粒子光强场,再将一对重构出的三维粒子场通过三维互相关技术计算得到三维三分量的空间速度场。

为了保证每一个相机的焦距都能覆盖目标粒子场空间,每一相机都是按照 Scheimpug 原理布置安装的,成像平面都是与在照亮的粒子场中的目标平面相对应的,这样目标区域的粒子就能够保证在成像焦距内成像了。相机的位置与视角可以通过在测量目标区域内放置标定板来进行标定得到。为了使重构算法能够尽可能定位住粒子位置,就要保证标定实验高度准确。Tomo-TRPIV 已经比任何其他 3-D 测速技术有着更广泛的应用。

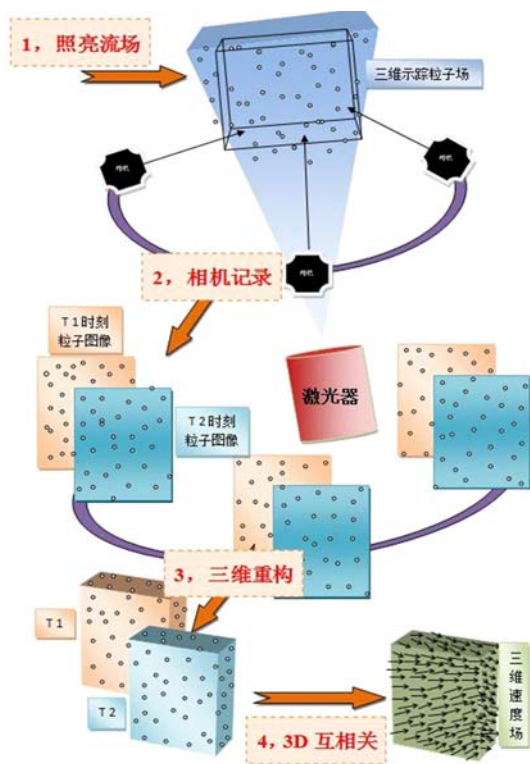


图 1 Tomo-TRPIV 技术原理示意图

Fig. 1 Schematic of Tomo-TRPIV technique principle

三维空间中所有的二维层析平面进行重构便得到三维空间场。

在二维重构过程中,每一个相机记录的每一层二维粒子散射光强对应一条直线像阵列,通过多个相机记录的同一层二维粒子散射光强的直线像阵列,反演计算出该层二维粒子散射光强的分布(如图 2 所示)。

(4) 三维互相关:将重构出的两个三维空间粒子散射光强分布做三维互相关,得出三维空间速度场。

首先将很短时间间隔的两个三维粒子散射光强体划分成对应的体查询小区域对,计算每一对体查询区域体素的散射光强在不同空间位移下的互相关系数。将第一个时刻的体查询区域每一个体素都人为加上同一个三维坐标位移,再计算这一对体查询区域对应体素散射光强的互相关系数。当第一个时刻的体查询区域加上的三维位移正好是真实位移时,加上三维位移的第一个时刻的体查询区域散射光强分布与第二时刻对应的体查询区域散射光强分布最相近,其互相关系数达到最大值,这时第一个时刻的体查询区域加上的三维位移就是真实位移,除以对应的时间间隔,就得到该查询区域对应的三维速度矢量。通过计算不同的体查询区域对之间的三维速度矢量,就可以确定出三维空间的速度矢量场分布。

Tomo-TRPIV 原理如图 1 所示,大致可以分成四个步骤:

(1) 照亮流场:通过三维空间激光束照亮播撒在流场中的粒子来作为示踪。

Tomo-TRPIV 中用立体激光束照亮被测流场区域,流场三维空间的每一个粒子都对三维散射光强分布有贡献。

(2) 相机记录:用多个 CCD 相机同时从多视角对流场中示踪粒子进行拍摄记录。

流场被照亮后,用多个(通常三个以上)相机系统从不同角度同时拍摄记录下流场。多个高空间分辨率、高时间分辨率的 CCD 相机能测量出更精细的粒子散射光强图像。

(3) 三维重构:从多个 CCD 相机阵列二维投影图像中重构出三维空间粒子场。

多相机系统从不同角度同时拍摄的照片通过三维层析重构技术可以重构出三维空间粒子的散射光强分布。层析方法就是应用层析离散方式将三维空间粒子场离散成多个二维平面,把一个三维重构问题简化成二维重构的降维简化模型。然后按照这种简化方式再经过一层层重构后,将三

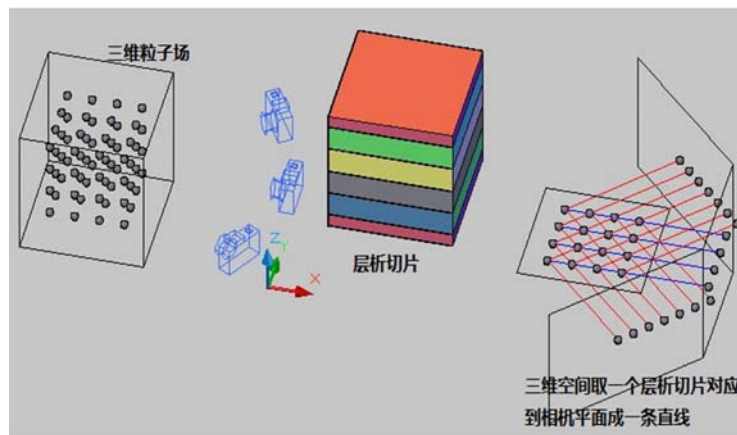


图2 层析重构原理示意图

Fig. 2 Schematic of tomographic reconstruction principle

### 1.2 Tomo-TRPIV 的实验系统组成

Tomo-TRPIV 实验系统的构成与一般 2D-TRPIV (Two-Dimensional Time-Resolved Particle Image Velocimetry)、Stereo-TRPIV (Stereoscopic Time-Resolved Particle Image Velocimetry) 系统最大的不同是实验时需要至少三台 CCD/CMOS 高速相机同时工作,而激光光源也由平面二维的片光源变为体光源。而三台以上的相机可以保证实验更高的准确性要求。Tomo-TRPIV 实验系统的硬件主要分为:(1)光源系统;(2)图像采集系统;(3)同步控制系统;(4)示踪粒子;(5)数据分析及可视化系统等五个功能子系统。光源系统由双腔脉冲激光器、导光臂、体光源透镜组等构成,其作用是根据实验需要,照亮某一体空间流场中的示踪粒子。图像采集系统则主要由多个 CCD/CMOS 高速相机组成,并与高精度时序同步控制器同步工作,其作用是捕捉时间序列的示踪粒子图像并记录存储。Tomo-TRPIV 系统的数据分析及可视化系统为 DynamicStudio 软件包及其升级包,用以获取 3D-3C 速度矢量场数据库。

### 1.3 Tomo-TRPIV 的实验设备与实验装置

图 3 是 Tomo-TRPIV 系统的布置图,图 4 是 Tomo-TRPIV 系统实验装置图。投入到水槽中的示踪粒子被体激光照亮,使用三个高速相机从三个方向同时记录图像对。使用一个 Scheimpflug 相机角度调节器及其附件保证图像平面、镜头平面及物象平面满足 Scheimpflug 条件,一个独立的多相机标定过程用来确认图像坐标与测量体物理空间坐标的对应关系。基于第二步中得到的映射关系,采用层析算法将第一步中记录得到的三组图像对被重构成体像素图像对进而可以得到粒子位移的三维信息。最后因为粒子图像对具有双曝光下三维光强分布阵列信息,对重构得到三维粒子图像对直接采用互相关分析技术(LSM)就可以获取目标流场的三维三分量速度矢量场信息。

### 1.4 实验参数与平均流场

实验在低速回流式水槽内完成。水槽实验段长 532cm,宽 25cm,高 38cm。采用潜水泵为水流提供动力,潜水泵转速连续可调,流速由变频器控制(0~50Hz),其对应最大流速 0.3m/s,水槽中心背景湍流度小于 5%,流场不均匀度小于 1%。湍流边界层流场在有机玻璃光滑平板上充分发展。平板尺寸为 15mm×245mm×2400mm(厚×宽×长),平板前缘下游 115mm 处布置直径为 6mm 的绊线触发流场转换为充分发展湍流。实验拍摄位置大约位于绊线下游流向 575mm 处,湍流边界层自由来流速度为 0.155m/s,实验时温控为  $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ,压强为  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,此时水的运动黏性系数  $\nu$  和密度  $\rho$  分别取  $9.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  和  $997.8 \text{ kg/m}^3$ 。

为了验证基本流场,首先使用 Tomo-TRPIV 系统三个相机中的相机 1 进行 2D-TRPIV 验证性实验。实验时相机采用单帧模式,拍摄频率设为 500Hz 记录 X-Y 平面 8001 张粒子图像。经过二维相机标定,2D-TRPIV 测量区域大小为  $86.2 \text{ mm} \times 53 \text{ mm}$  ( $x \times y$ )。

在相同实验流场条件下使用三相机 Tomo-TRPIV 系统分别记录 2500 对光滑板及沟槽板上目标流

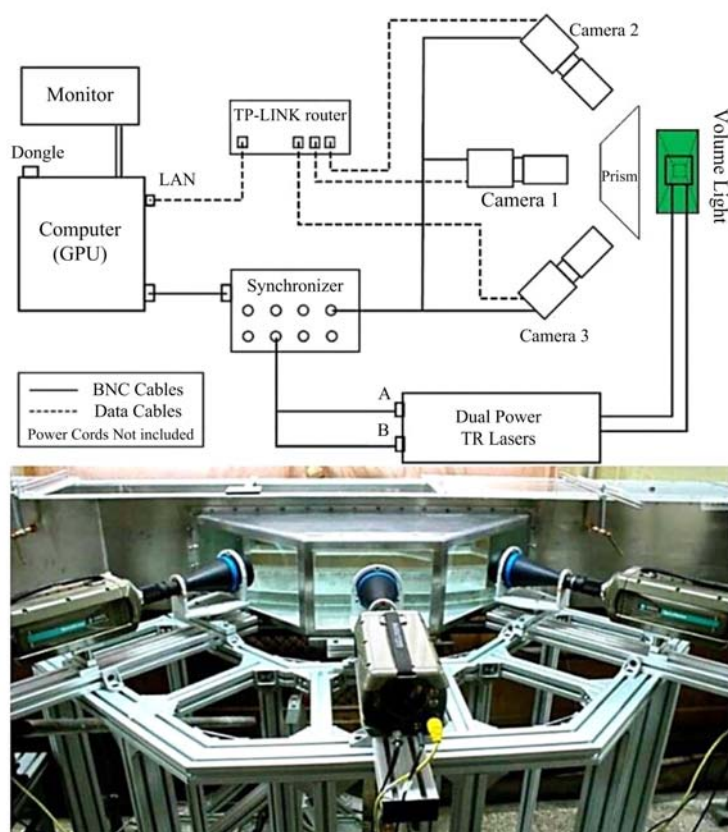


图 3 Tomo-TRPIV 系统布置图

Fig. 3 Arrangement of Tomo-TRPIV system

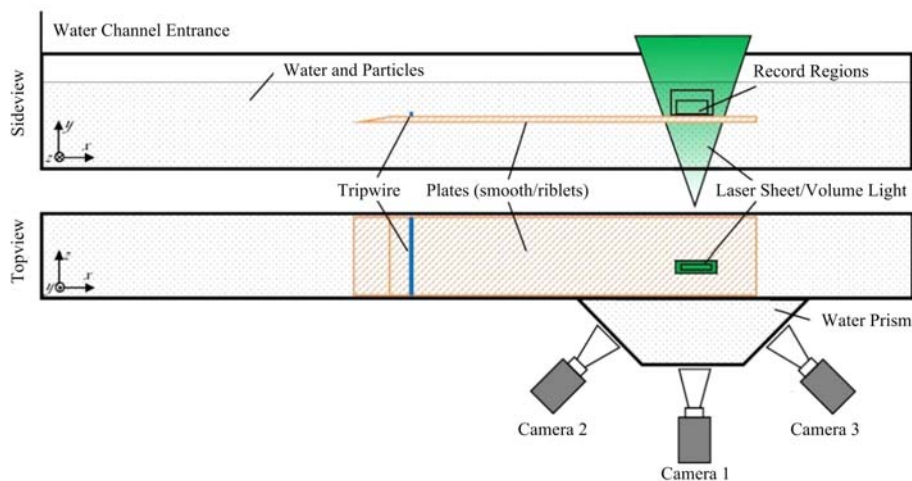


图 4 实验装置图

Fig. 4 The experimental arrangement

场粒子图像。相机采样频率都为 500Hz。然后三组来自不同角度相机记录的 2500 个图像对被重构回 2500 对体粒子图像,最后采用 LSM 方法计算得到 2500 个瞬时 3D-3C 速度矢量场时间序列。三维重构后的测量体空间为  $60\text{mm} \times 45\text{mm} \times 30\text{mm}$  ( $x \times y \times z$ ),且每一个 3D-3C 速度场包含  $51 \times 16 \times 37$  ( $x \times y \times z$ ) 个矢量(即网格点),对应网格展向物理间距为 1.44mm,流向和法向间距为 1.08mm,对应于展向分辨率为 13WU(WU 为无量纲粘性长度单位),流向和法向分辨率为 9.75WU。

将层析重构的光滑和纵向微沟槽两种壁面湍流边界层各 2500 个 3D-3C 瞬时速度矢量先分别按照

时间进行平均得到其时均流向速度的三维空间分布,然后再把时均流向速度沿着空间流向及展向做空间平均,得到两种壁面边界层时-空平均的流向平均速度剖面,图5给出 Tomo-TRPIV 与 2D TRPIV 测量光滑壁面平板湍流边界层流向平均速度剖面的比较,表明 3D-3C 瞬时速度矢量场时间序列的测量结果是可靠的,可用于更进一步的分析。

## 2 用脉动速度空间局部平均结构函数检测壁湍流拟序结构猝发的空间模态

### 2.1 湍流脉动速度的空间局部平均结构函数

湍流场流向速度的空间局部平均结构函数:

$$u_x = (x_0, y, z, l) = \overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]}} - \overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}} \quad (1)$$

公式(1)表示流向速度分量沿空间流向的局部平均速度差。公式中第一项  $\overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]}}$  表示以流向坐标  $x_0 + \frac{l}{2}$  处为中心,对流向尺度为  $l$  范围内的流体质点的流向速度分量的局部平均,即该处流向尺

度为  $l$  的湍流的流向平均迁移速度;第二项  $\overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}}$  表示对以流向坐标  $x_0 - \frac{l}{2}$  处为中心,对流向尺度为  $l$  范围内的流体质点的流向速度分量的局部平均,即该处流向尺度为  $l$  的湍流的流向平均迁移速度。 $\delta u_x(x_0, y, z, l)$  的物理意义为沿流向尺度为  $l$  的前后两个湍涡之间的流向相对迁移速度,即它们沿流向相对运动引起的拉伸与压缩变形。

如果  $\delta u_x(x_0, y, z, l) = \overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]}} - \overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}} > 0$ , 说明下游湍涡的局部平均迁移速度  $\overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]}}$  大于上游湍涡的局部平均迁移速度  $\overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}}$ , 两个湍涡处于拉伸变形。特别地,  $\delta u_x(x_0, y, z, l) > 0$  且达到正的极大值时,表明拉伸处于最强烈的时刻,这是由于高速流体下扫造成的下游流体快速迁移。因此  $\delta u_x(x_0, y, z, l) > 0$  且达到正的极大值时代表高速流体下扫事件发生的位置。

同样,如果  $\delta u_x(x_0, y, z, l) = \overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]}} - \overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}} < 0$ , 说明下游湍涡的局部平均迁移速度  $\overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]}}$  小于上游湍涡的局部平均迁移速度  $\overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}}$ , 上游湍涡推动下游湍涡前进,两个湍涡处于压缩变形。特别地,  $\delta u_x(x_0, y, z, l) < 0$  且达到负的极小值时,表明压缩处于最强烈的时刻,这是由于下游低速流体上喷造成的。因此  $\delta u_x(x_0, y, z, l) < 0$  且达到负的极小值时代表低速流体喷射事件发生的位置。

为此,制定检测拟序结构喷射和下扫的检测函数:

$$D(x_0, y, z, l_x) = \begin{cases} 1 & \text{下扫, } \delta u_x(x_0, y, z, l_x) > 0 \text{ 且达到正的极大值} \\ -1 & \text{喷射, } \delta u_x(x_0, y, z, l_x) < 0 \text{ 且达到负的极大值} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 拟序结构喷射和下扫的空间相位平均模态

利用湍流空间局部平均速度结构函数的概念,对壁湍流在固定法向位置的流向速度分量沿流向进行多尺度分析,沿流向和法向检测其中的“喷射”和“下扫”事件,运用空间条件相位平均方法,提取“喷射”和“下扫”事件脉动速度分量、脉动速度梯度、脉动速度变形率、脉动涡量等物理量的空间相位平均模态:

$$\langle f(\xi, \eta, \zeta; y, l_x, l_y, l_z) \rangle_e = \frac{1}{E_{xz}} \sum_{x_0} \sum_z f(\xi, \eta, \zeta) \quad (3)$$

$$\xi \in (x_0 - l_x, x_0 + l_x), \eta \in (y - l_y, y + l_y), \eta \in (z - l_z, z + l_z) \text{ 当 } D(x_0, y, z, l_x) = -1$$

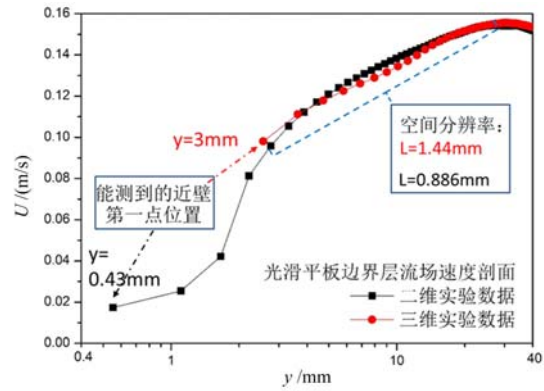


图5 光滑壁面平板湍流边界层平均速度剖面

Fig. 5 Mean velocity profile of turbulent boundary layer on a smooth plate

$$\langle f(\xi, \eta, \zeta; y, l_x, l_y, l_z) \rangle_s = \frac{1}{S_{xz}} \sum_{x_0} \sum_z f(\xi, \eta, \zeta) \quad (4)$$

$\xi \in (x_0 - l_x, x_0 + l_x)$ ,  $\eta \in (y - l_y, y + l_y)$ ,  $\eta \in (z - l_z, z + l_z)$  当  $D(x_0, y, z, l_x) = 1$  式中  $\langle f(\xi, \eta, \zeta; y, l_x, l_y, l_z) \rangle_e$  表示喷射事件的脉动速度、脉动速度梯度、脉动速度变形率、脉动涡量等任一物理量在法向位置  $y$  和空间尺度  $l_x, l_y, l_z$  条件下, 经过时间和空间流向一展向检测的空间相位平均模态;  $E_{xz}$  为在法向位置  $y$  检测到的喷射事件总次数;  $\langle f(\xi, \eta, \zeta; y, l_x, l_y, l_z) \rangle_s$  表示下扫事件的脉动速度、脉动速度梯度、脉动速度变形率、脉动涡量等任一物理量在法向位置  $y$  和空间尺度  $l_x, l_y, l_z$  条件下, 经过时间和空间流向一展向检测的空间相位平均模态;  $S_{xz}$  为在法向位置  $y$  检测到的下扫事件总次数。

图 6 给出了在对数律区  $y^+ = 68$  喷射事件(图 6(a))和下扫事件图 6(b)脉动流速和脉动涡量的空间相位平均模态。可以发现, 不论是喷射事件还是下扫事件, 其展向涡量总表现为法向和流向正负交替分布的四极子涡旋结构。

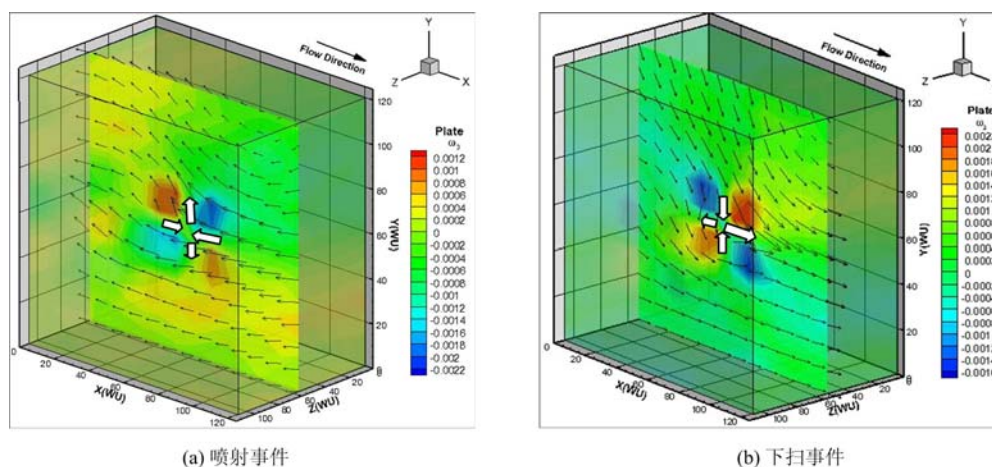


图 6 脉动速度和脉动流速的空间相位平均模态

Fig. 6 Spatial phase average mode of fluctuating velocities and fluctuating vorticity

在图 6(a)的四极子结构中, 右下正向涡逆时针旋转, 右上负向涡顺时针旋转, 共同诱导流体从其中间向左(向上游)流过; 左上正向涡逆时针旋转, 左下负向涡顺时针旋转, 共同诱导流体从其中间向右(向下游)流过; 两股流体在四极子中心相遇, 在左上逆时针旋转正向涡和右上顺时针旋转负向涡的共同诱导下从其中间向上喷出, 而左下和右下的两个涡相对较弱, 其诱导的向下的流体相对较少, 从而形成向上的喷射事件(如图 6(a)中箭头所示)。

相反, 在图 6(b)的四极子结构中, 外区高速流体在左上顺时针旋转负向涡和右上逆时针旋转正向涡的共同诱导下从其中间下扫, 而右上正向涡逆时针旋转, 右下负向涡顺时针旋转, 共同诱导高速流体从其中间向右(向下游)扫掠; 形成扫掠事件(如图 6(b)中箭头所示)。

喷射事件和扫掠事件不断地发生, 形成准周期的猝发事件, 这是壁湍流能够维持和发展的根本原因。

### 3 结论

本文简要介绍了层析粒子图像测速技术的基本原理、测量系统的主要组成、测量的主要步骤以及水槽中平板湍流边界层及其拟序结构的测量结果。实验结果表明, 层析粒子图像测速技术能够很好地测量平板湍流边界层对数律区的瞬时及平均流场。实验发现在对数律区, 平板湍流边界层中的拟序结构涡量场主要以空间四极子的形式存在, 四极子涡相互诱导, 产生喷射和下扫等猝发事件, 维持湍流边界层的发展演化。

#### 参考文献:

- [1] Westerweel J, Elsinga G E, Adrian R J. Particle image velocimetry for complex and turbulent flows[J]. Annu.

- Rev. Fluid Mech. , 2013, 45(1):409–436.
- [2] Elsinga G E, Scarano F, Wieneke B, et al. Tomographic particle image velocimetry[J]. Exp. Fluids, 2006, 41(6):933–947.
- [3] Elsinga G E, Kuik D J, Oudheusden B W, et al. Investigation of the three-dimensional coherent structures in a turbulent boundary layer with Tomographic-PIV, AIAA 2007-1305[C]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 8-11 January, 2007.
- [4] Schröder A, Geisler R, Elsinga G E, et al. Investigation of a turbulent spot and a tripped turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV[J]. Exp. Fluids, 2008, 44(2):305–316.
- [5] Schröder A, Geisler R, Staack K, et al. Eulerian and lagrangian views of a turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV[J]. Exp. Fluids, 2011, 50(4):1071–1091.
- [6] Jodai Y, Elsinga G E. Experimental observation of hairpin auto-generation events in a turbulent boundary layer[J]. J. Fluid Mech. , 2016, 795:611–633.
- [7] Gao Q, Ortiz-Duenas C, Longmire E K. Evolution of coherent structures in turbulent boundary layers based on moving tomographic PIV[J]. Exp. Fluids, 2013, 54(12):1625.
- [8] Humble R A, Elsinga G E, Scarano F. Three-dimensional instantaneous structure of a shock wave/turbulent boundary layer interaction[J]. J. Fluid Mech. , 2009, 622:33–62.
- [9] Elsinga G E, Adrian R J, VAN Oudheusden B W, et al. , Three-dimensional vortex organization in a high-reynolds-number supersonic turbulent boundary layer[J]. J. Fluid Mech. , 2010, 644:35–60.
- [10] Elsinga G E, Poelma C, Schröder A, et al. Tracking of vortices in a turbulent boundary layer[J]. J. Fluid Mech. , 2012, 697:273–295.
- [11] Tang Z Q, Jiang N. Tomographic PIV investigation of coherent structures in a turbulent boundary layer flow[J]. Acta Mech. Sin. , 2012, 28(3):572–582.
- [12] Yang S Q, Jiang N. Tomographic PIV investigation on coherent vortex structures over shark-skin-inspired drag-reducing riblets[J]. Acta Mech. Sin. , 2016, 32(2):284–294.

## Measurement of turbulent boundary layer and coherent structure spatial mode based on Tomo-TRPIV

ZHUANG Qian<sup>1,2</sup>, JIANG Nan<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin 300354, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300084, China; 3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300354, China)

**Abstract:** Tomographic time-resolved particle image velocimetry (abbreviated as TRTomo-PIV) is a newly-developed advanced non-intrusive 3D-3C fluid velocimetry. It can measure the distribution of 3 velocity components in 3-dimensional velocity field without interference. The fundamental principle of Tomo-TRPIV, the main components of measurement system, the main measuring steps as well as measurement results of turbulent boundary layer and its coherent structure of flat plate turbulence in a flume are presented in this paper. Experimental results indicate that Tomo-TRPIV can measure the instantaneous and mean flow field in logarithmic-law region of turbulent boundary layer. Experiment reveals that in logarithmic-law region, the vorticity field of coherent structure in turbulent boundary layer exists mainly in the form of the space quadrupole. Quadrupole vortices are induced by each other, and generate burst events such as ejection and sweeping, which maintain the evolution of turbulent boundary layer.

**Keywords:** tomographic time-resolved particle image velocimetry technique; turbulent boundary layer; coherent structure; quadrupole; ejection; sweep; burst