

湍流边界层相干结构时空演化的层析 TRPIV 研究

郑小波¹, 葛文涛¹, 姜楠^{1,2,3}

(1. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072;

2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072;

3. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京, 100190)

摘要: 脉动速度和速度梯度等物理量在时空中的拟序变化反映了相干结构的时空拟序演化。实验在低速水洞中进行, 用层析 TRPIV 系统采集湍流边界层流场示踪粒子图像, 通过图像处理得到 3D-3C 瞬时速度场分布的一个时间序列。依据大尺度相干结构的能量最大准则和局部平均速度结构函数检测条件, 通过多尺度小波分析确定相干结构的尺度并检测到相干结构的位置。对速度矢量、速度梯度以及涡结构辨识指标进行空间相位平均, 提取得到瞬时特征相干结构的拓扑。将特征相干结构空间拓扑与相邻短时间内不同时刻原始流向脉动速度场进行互相关运算, 获得相干结构湍流质点的速度以及短时间内相干结构的拓扑位置和形状变化, 从而反映出相干结构空间拓扑随时间演化的情况。

关键词: 壁湍流; 互相关; 层析 TRPIV; 多尺度小波分析; 局部平均速度结构函数; 相干结构时空演化

0 引言

相干结构是壁湍流边界层起关键作用的大尺度拟序脉动结构, 在时间和空间具有自组织特性^[1-3]。大尺度相干结构诱导产生的喷射和扫掠, 影响快慢斑、高低速条带等其他湍流结构的演化, 促使内外层质量输运、动量交换和能量级串的发生, 对湍流边界层摩阻和传热率等物理性质有重要影响。对相干结构时空演化的研究, 是在理论上提出更加符合相干结构自维持和拟序机理的湍流模式的前提, 也是在工程中更加准确地预报湍流, 并通过控制相干结构有效地控制湍流的基础^[4]。

方兴未艾的层析 TRPIV 技术, 使 3D-3C 速度信号的采集方便可行, 从而使对相干结构的三维空

间拓扑随时间演化的研究成为可能。目前, 壁湍流边界层的层析 TRPIV 实验研究主要有: 从层析 3D-3C 速度场获取壁湍流的统计性质; 根据不同条件事件(如 Q2 和 Q4 事件等)检测壁湍流相干结构; 直接对不同时刻的 3D-3C 速度场进行自相关, 研究壁湍流边界层流场时空演化^[5-6]。但是, 对壁湍流边界层相干结构动力学时空演化的研究还很少。

原始速度场是各尺度相干结构混杂在一起表现出来的速度场。相干结构的时空拟序演化表现为脉动速度矢量和速度梯度张量等物理量的时空拟序演化。对于层析 3D-3C 速度信号, 提取相干结构的拓扑是研究相干结构时空演化的前提, 而对相干结构所处位置的辨识和对相干结构空间尺度的分析则是提取相干结构空间拓扑的前提。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272233), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(NO.2012CB720101), 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(2011)对外开放课题, 天津大学自主创新基金联合资助。

作者简介: 郑小波 (1991), 男, 山西省忻州市五台县, 博士研究生, 研究方向: 实验流体力学. E-mail: xzwtzxb@126.com

由于平板湍流边界层沿流向和展向统计的均匀性和沿法向统计的不均匀性, 只对脉动速度场沿流向和展向进行多尺度小波分析。用一阶 Daubechies 滤波器(Haar 滤波器), 分别沿流向和展向对脉动速度进行滤波, 经下采样得到以结构尺度和法向位置为变量的小波能量函数, 利用能量最大准则就能选定大尺度相干结构的流向和展向的尺度。把流向脉动速度的流向局部平均结构速度函数作为检测条件, 检测流场中的喷射和扫掠事件^[8-11]以确定相干结构位置。以检测到喷射和扫掠事件的位置为中心, 小波能量分析结果为尺度, 对速度、涡量和涡结构辨识指标等物理量进行空间相位平均, 以提取对应物理量的特征相干结构空间拓扑。

对于不同物理量相干结构, 将第一时刻的特征尺度空间拓扑与该时刻原始流场空间流向脉动速度进行互相关运算。互相关系数取最大值时对应的原始流场位置处空间点的速度, 可以认为是特征尺度空间点上相干结构湍流质点的速度。运用同样的方法, 依次对相干结构和之后较短时间段内各瞬时的速度进行互相关运算, 可以得到一个较短时间段内相干结构的位置和形状变化。这样的整个过程就反映出大尺度相干结构空间拓扑随时间演化的情况。

1 实验设置和流场验证

1.1 实验设置

实验在低速水洞中进行, 所用示踪粒子是直径约 $56\mu\text{m}$ 的聚丙烯酰胺球。用双腔高频激光器照亮前缘加拌线、后缘装尾扑有机玻璃平板一侧的流场区域, 用按 Scheimpflug 放置法摆放的 6 个 CMOS 相机拍摄流场示踪粒子散射光信息(图 1)。测量系统用层析 PIV 乘积代数重构(MART)方法^[7]重构三维粒

子光强分布, 运用局部三维互相关和多重体变形网格迭代, 选取 32^3 体素查询箱, 最后得到 1023 个时刻流向*展向*法向($x*y*z$) $92*99*22$ 个空间测点的瞬时速度矢量三维空间分布。流场空间分辨率为 $dx=dy=dz=0.687\text{mm}$, 对应 15 个粘性内尺度单位, 两瞬时时间间隔 2ms, 自由来流速度 0.53m/s , 流场壁面摩擦速度 0.0219m/s 。

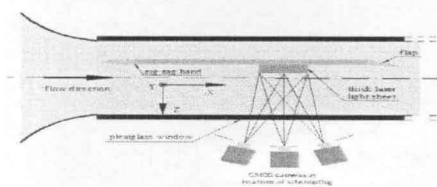


图 1 实验装置示意图

Fig.1 schematic of experimental set-up

由于反演空间粒子分布的层析重构算法内在的缺陷^[7], 从层析 PIV 系统输出的流向*展向*法向为 $92*99*22$ 的速度场中截取 $73*82*19$ 的区域作为要研究的平板湍流边界层流场区域。对截得流场的流向速度做时间和空间流向展向平均, 得到表征整个研究区域一阶统计性质的湍流边界层内对数律区平均速度剖面(图 2), 在粘性内尺度单位下的速度剖面与充分发展的湍流边界层 Spalding 曲线相符。

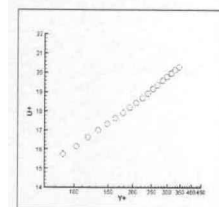


图 2 粘性内尺度单位下的速度剖面

Fig.2 the velocity profile in inner viscous unit

2 实验数据处理和结果分析

2.1 相干结构空间尺度的确定

层析 TRPIV 技术继承二维 TRPIV 无接触测量的优点, 通过查询窗的选择得到高空间分辨率瞬时速度场, 在反映相干结构空间多尺度性质上具有优势。由于实验流场空间有限, 而小波分析有物理和

波数空间的双局部特性，因此对流场进行空间小波分析是确定相干结构空间尺度的有效手段。

自上而下的小波分析能从第 n 尺度的尺度系数 $\bar{c}(n)$ 求得 $n-1$ 尺度的尺度系数 $\bar{d}(n-1)$ 和小波系数 $\bar{d}(n-1)$ 。将脉动速度作为最上层尺度系数，通过滤波器 $\{H_0, H_1\}$ 下采样，得到下一层尺度系数和小波系数，依此类推得到最下层尺度系数和小波系数。

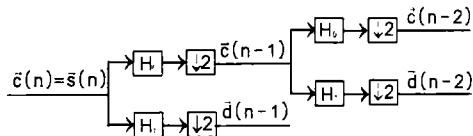


图 3 小波分解流程图

Fig.3 flow-process diagram of wavelet decomposition

Haar 滤波器是一阶 Daubechies 滤波器，

$$H_0 = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对脉动速度进行流向小波分解，得到以尺度、展向法向位置为变量的小波系数 $\bar{d}(n, y, z)$ 和能量 $E(n, y, z)$,

$$E(n, y, z) = \|\bar{d}(n, y, z)\|_2^2 \quad (3)$$

进行空间展向平均，获得流向小波分析的最终结果 $E(n, z)$ 。展向小波分析过程类似。

图 4 是脉动速度 u' 、 v' 和 w' 经流向和展向小波分析的 $E(n, z)$ 。 u' 的能量比 v' 和 w' 大一个量级，说明流向脉动在湍流边界层速度脉动的主要地位。 u' 流向小波分析的能量在靠近壁面位置 ($z/dz \leq 6$) 主要分布于第一尺度上，表明大尺度结构在湍流边界层近壁区的主要作用，在距壁面 $z/dz > 6$ 的法向位置能量主要分布在第二尺度上，表明该区域主要结构比近壁区小一个尺度。 u' 展向小波分解的能量在不同法向法向位置主要集中在第三尺度。

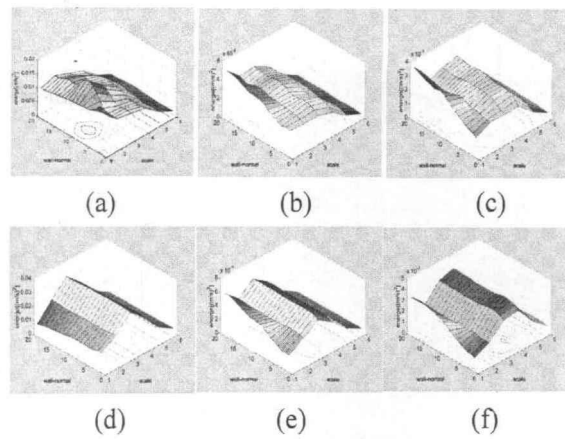


图 3 (a)(b)(c)脉动速度三分量 $u' / v' / w'$ 流向小波分析的能量分布;(d) (e) (f)脉动速度三分量 $u' / v' / w'$ 展向小波分析的能量分布

Fig.3 (a)(b)(c) energy distribution based on stream-wise wavelet analysis of three fluctuating velocity component $u' / v' / w'$; (d) (e) (f) energy distribution based on span-wise wavelet analysis of three fluctuating velocity component $u' / v' / w'$

依据能量最大准则，选取含能最大的大尺度特征相干结构，流向 32 个 x/dx (第二尺度，约 480 个 $y+$)，展向 16 个 y/dy (第三尺度，约 240 个 $y+$)。

2.2 相干结构位置检测和空间相位平局

通过检测喷射扫掠两种猝发事件，可以检测到相干结构的瞬时位置。考虑到相干结构尺度分析结果中流向脉动的主要地位，选取检测示性函数

$$f(\tau) = \begin{cases} 1 & \delta u(\tau) < 0 \ \& \ \delta u(\tau+1) > 0 \ \& \ \delta u < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \\ -1 & \delta u(\tau) > 0 \ \& \ \delta u(\tau+1) > 0 \ \& \ \delta u > 0 \end{cases} \quad (4)$$

流向脉动速度局部平均结构函数^[10] (第二尺度)

$$u(\tau) = \overline{u(\tau)}_{\tau \in [\tau-n, \tau+n]} = \frac{1}{2n+1} \sum_{i=\tau-n}^{\tau+n} u(i) \quad (5)$$

负的最小值处，即

$$\begin{aligned} \delta u(\tau) &= u(\tau) - u(\tau-1) < 0 \ \& \ \delta u(\tau+1) \\ &= u(\tau+1) - u(\tau) > 0 \ \& \ u(\tau) < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

为喷射事件位置；而正的最大值处，即

$$\begin{aligned} \delta u(\tau) &= u(\tau) - u(\tau-1) > 0 \ \& \ \delta u(\tau+1) \\ &= u(\tau+1) - u(\tau) < 0 \ \& \ u(\tau) > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

为扫掠事件位置。

瞬时相干结构自相似地分布在平板湍流边界层流向展向不同位置，通过空间相位平均能提取特征

相干结构。以检测的喷射扫掠事件位置为中心，流向第二尺度展向第三尺度为特征空间长度尺度，对速度和涡量等物理量 f 进行空间相位平均，

$$\langle \vec{f} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i \in I} \vec{f}_i \quad (8)$$

其中, I 是检测到的喷射或者扫掠事件集合, n 是参与空间相位平均的事件总数。由于湍流边界层法向统计性质和相干结构特征尺度对法向的依赖性, 在法向每 9 个位置为一层进行分层空间相位平均。

脉动速度空间相位平均的结果见图 5。流向脉动速度相干结构等值面表征其空间拓扑; 流向截面矢量图是速度矢量。喷射事件处沿流向延伸的低速流体上抬; 扫掠事件处沿流向延伸的高速流体下扫。不同法向位置特征空间的相干结构有相似性, 表明喷射和扫掠事件检测的相干结构确实具有特征性。

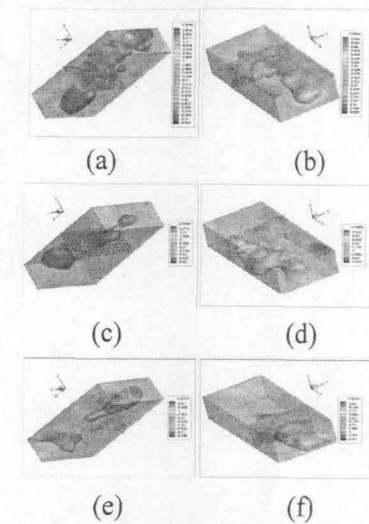


图 5 流向脉动速度相干结构云图和速度矢量切面图。其中, (a)(c)(e)基于 $z/dz=5/10/15$ 处喷射事件, (b)(d)(f)基于 $z/dz=5/10/15$ 处扫掠事件

Fig.5 the contours of u' CS and the sections of velocity vector, thereinto (a)(c)(e) based on eject events at $z/dz=5/10/15$ and (b)(d)(f) based on sweep events at $z/dz=5/10/15$

涡结构是重要的湍流相干结构, 很小空间里集中很强的涡量会诱导产生剧烈湍流脉动。图 6 是瞬时中心在 $z/dz=10$ 特征空间的涡量相干结构云图和矢量图。检测事件附近的涡量分量存在方向相反

的涡对, 且在喷射扫掠两种情况下涡对正负涡包分布的相对位置大致相反, 在喷射和扫掠事件法向涡量相干结构的对比中体现尤为明显。在两种检测事件涡量分量相干结构云图中, 涡量相干结构矢量图, 反映涡结构的涡旋方向, 但其旋转方向比较复杂。

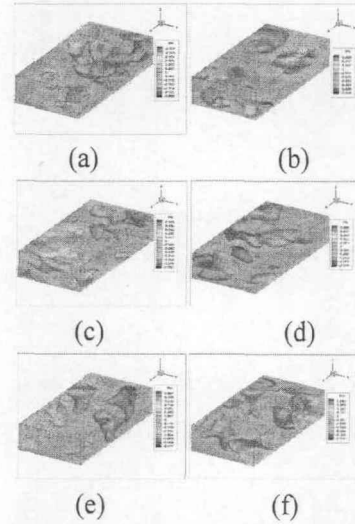


图 6 (a)(c)(e)喷射事件 ω_x/ω_y 和 ω_z 相干结构云图; (b)(d)(f)扫掠事件 ω_x 、 ω_y 和 ω_z 相干结构云图, 其中的矢量图是涡量矢量相干结构

Fig.6 (a)(c)(e)the contours of $\omega_x/\omega_y/\omega_z$ CS based on eject events; (b)(d)(f)the contours of $\omega_x/\omega_y/\omega_z$ CS based on sweep events. Thereinto, the vectors are vorticity CS

除了涡量, λ_{ci} 准则^[12]和 Q 准则^[13]也是判定涡结构涡核位置的常用方法。图 7 是瞬时中心在 $z/dz=10$ 特征空间的 λ_{ci} 和 Q 相干结构云图。喷射和扫掠事件中, λ_{ci} 准则和 Q 准则辨识到的相干涡结构涡核位置大体一致。 Q 准则比 λ_{ci} 准则辨识到的涡结构拓扑更饱满, 且对较小尺度涡结构过滤效果好。对于不可压缩流体,

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (8)$$

是流体涡旋强度相对于变形强度的差, 具有较好的连续性; λ_{ci} 是速度梯度张量复特征值虚部, 表现流体质点在垂直于应变轴涡旋平面的局部回旋强度, 不可避免地辨识到了尺度较小的相干涡结构。

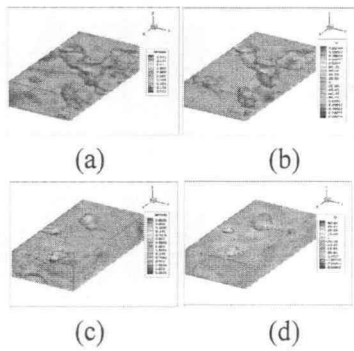


图 7 (a)(b)喷射事件的 λ_{cri} 和 Q 相干结构云图;
(c)(d)扫掠事件的 λ_{cri} 和 Q 相干结构云图

Fig.7 (a)(b)the contours of λ_{cri} and Q coherent structures based on the eject events; (c)(d) the contours of λ_{cri} and Q coherent structures based on the eject events:

Q 和 λ_{cri} 都是从速度梯度张量出发表征涡旋的物理量, 辨识涡结构位置的一致性是必然的, 两者与涡量辨识结果在一定程度上也是一致的。Q 准则和 λ_{cri} 准则都是通过标量场辨识涡结构位置的, 不能表现涡结构涡旋方向。考虑到 Q 准则在涡旋强度辨识上的优势以及涡量矢量的方向性, 两者结合运用是一种尽可能多获取相干涡结构信息的辨识方法。

2.3 通过互相关分析相干结构时空演化

将图 9(d)提取的 $33 \times 17 \times 9$ (流向*展向*法向)特征空间相干涡结构 $Q(x,y,z;t)$ 和相邻时间段内不同瞬时 $72 \times 83 \times 19$ 流向脉动速度 $u'(x,y,z,t+\Delta t)$ 做互相关,

$$R_{Q,u'}(\Delta x, \Delta y, \Delta t) = \frac{\langle Q(x,y,z;t)u'(x+\Delta x,y+\Delta y,z;t+\Delta t) \rangle}{\left(\langle Q^2(x,y,z;t) \rangle \langle u'^2(x+\Delta x,y+\Delta y,z;t+\Delta t) \rangle \right)^{1/2}} \quad (9)$$

由于特征空间中心法向位置 $z/dz=10$ 固定, 互相关系数有三个自变量($\Delta x, \Delta y, \Delta t$).

图 8 是 Q 和 u' 的互相关结果。在不同时刻位置相空间($\Delta x, \Delta y$)内, 互相关系数等值线呈带状分布: 互相关系数极大极小值位置在 $\Delta y/dy$ 方向交替出现: 不同时刻极值位置随时间向 $\Delta x/dx$ 方向下游迁移。由于互相关系数极值位置表征 Q 相干涡结构核心位置, 可知 Q 相干涡结构在展向交替出现而且以

迁移速度 $U=dx/dt \approx 0.339m/s$ 向流场下游运动。

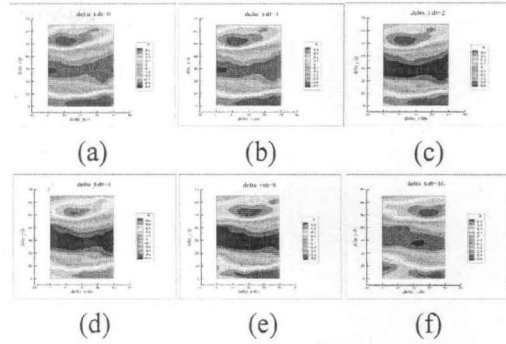


图 8 Q 相干结构和不同时刻流向速度 u' 的互相关结果, 其中 $dt=2ms$

Fig.8 the contours of cross-correlation coefficients between Q coherent structures and stream-wise instantaneous velocity u' , thereinto $dt=2ms$

根据互相关系数正极大值位置($\Delta x, \Delta y, \Delta t$)得到 Q 相干涡结构特征空间中心所在的原始流场时空位置($x+\Delta x, y+\Delta y, z; t+\Delta t$), 以特征尺度为大小截取原始脉动速度场, 就是该瞬时相干涡结构质点的速度场。图 9 是据图 10(a)(b)结果得到的 Q 相干涡结构在相邻两瞬时的速度矢量。在 $dt=2ms$ 时间里相干涡结构速度变化很小, 满足迁移性质的泰勒假设。

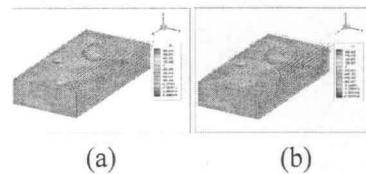


图 9 Q 相干涡结构在相隔 $dt=2ms$ 两时刻的速度矢量场的演化情况

Fig.11 the evolution of the velocity vector of Q coherent structures at two moments whose $dt=2ms$

3 讨论与结论

层析 TRPIV 技术为相干结构时空演化研究提供了可能。多尺度小波分析是对流场的空间尺度分解结果表明流向脉动速度比展向法向大一个量级。根据大尺度相干结构能量最大准则, 相干结构特征空间在流向约占 480 个 y^+ ; 展向约占 240 个 y^+ , 比流向小一个尺度。随着对相干结构运动性质认识的深入, 基于喷射扫掠事件的相干结构位置检测函

数形式会越来越复杂。由于相干结构空间分布的不规则,通过空间相位平均可以提取特征的相干结构。速度特征相干结构与喷射扫掠事件引起的高低速条带有明显相关性。提取特征相干涡结构需综合运用Q准则的强度检测和涡量矢量方向检测。特征相干结构和瞬时脉动速度互相关结果表明在 $z/dz=10$ 的迁移速度是来流速度的64%。依据互相关意义建立了相干结构时空演化和瞬时速度场的对应关系。

参考文献:

- [1] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F H and Runstadler P W. The structure of turbulent boundary layer[J]. J. F. M., 1967, 30: 741-774.
- [2] Kim H T, Kline S J *et al.* The Production of Turbulence Near a Smooth Wall in a Turbulent Boundary Layer[J]. J. F. M., 1971, 50: 133-160.
- [3] Blackwelder R F and Eckelmann H. Streamwise Vortices Associated With the Bursting Phenomenon[J]. J. F. M., 1979, 94: 577-594.
- [4] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 走近湍流[J]. 力学与实践, 2002, 24(1):1-8.
- [5] Schröder A, Geisler R and Elsinga G E *et al.* Investigation of a turbulent spot and a tripped turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV[J]. Experiments in Fluids, 2008, 44: 305-316.
- [6] Schröder A, Geisler R and Elsinga G E *et al.* Eulerian and Lagrangian views of a turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50: 1071-1091.
- [7] Elsinga G E, Scarano F and Wieneke B *et al.* Tomographic particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2006, 41: 933-947.
- [8] 姜楠, 舒玮. 湍流中涡的尺度分析[J]. 空气动力学学报, 2000, 18: 89-95.
- [9] Luchik T S, Tiedermann W G. Time scale and the structure of ejections and bursts in turbulent channel flow [J]. J. F. M., 1987,174: 529-577.
- [10] Liu Jianhua, Jiang Nan, Wang Zhendong and Shu Wei. Multi-scale Coherent Structures in Turbulent Velocity Structure Functions[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(4): 456-464.
- [11] 姜楠, 舒玮. 壁湍流相干结构的辨识[J]. 实验力学, 1996, 11(4): 494-500.
- [12] Zhou J, Adrian R J, Balachandar S *et al.* Mechanism for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow[J]. J. F. M., 1999, 387: 353-396.
- [13] Hunt J C R, Wray A A, Moin P. Eddies, stream and convergence zones in turbulent flows[A]. In: Technical Report CTR-S88[C]. US, 1988. 193-208.

Tomographic TRPIV experimental research on the spatial-temporal evolution of coherent structures in turbulent boundary layer

Zheng Xiaobo¹, Ge Wentao¹, Jiang nan^{1,2,3}

1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China;

3. The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The spatial-temporal evolution of the coherent structure(CS) manifests as the spatial-temporal developing of the fluctuating velocity, the velocity gradient, etc. The temporal sequence of 3D-3C velocity field in a turbulent boundary layer is finely measured by tomographic TRPIV in a low-speed water tunnel. According to the criterion of energy maximization and the concept of local averaged velocity structure function, the multi-scale wavelet analysis makes the location and size of the large-scale CS clear. To extract the spatial topology of CS, the fluctuating velocity, the velocity gradient and the indicators to identify the eddy are averaged by their spatial phases. The velocities of turbulent CS` particles are given by the cross-correlation between CS and original stream-wise fluctuating velocity at different moments in a neighbour period, which can show the spatial-temporal evolution of CS.

Key words: wall turbulence; cross-correlation; tomographic TRPIV; multi-scale wavelet analysis;

locally averaged velocity structure function; spatial-temporal evolution of coherent structures