

文章编号:1000-8055(2012)05-1113-09

湍流边界层相干结构空间拓扑形态的 层析 TRPIV 测量

姜楠, 于培宁, 管新蕾

(天津大学 机械工程学院力学系, 天津 300072)

摘 要: 用层析 TRPIV(time-resolved particle image velocimetry)技术精细测量了水洞中平板湍流边界层三分量速度的时空序列信号,提出了空间局部平均多尺度速度结构函数的新概念描述湍流多尺度涡结构的空问拉伸、压缩、剪切变形和旋转.用空间局部平均多尺度速度结构函数对湍流脉动速度进行了空间多尺度分解.用空间局部平均多尺度速度结构函数的新概念,根据湍流多尺度涡结构在空问流向的拉伸和压缩特征,提出了新的湍流相干结构条件采样方法,检测并提取了层析 TRPIV 数据中相干结构的“喷射”和“扫掠”事件中的速度、涡量等物理量的空问拓扑形态.发现在喷射和扫掠事件中均存在一对反向旋转的准流向“马蹄形”涡结构.

关 键 词: 层析 TRPIV(time-resolved particle image velocimetry); 湍流边界层; 相干结构;
局部平均结构函数; 喷射; 扫掠

中图分类号: O357.5

文献标志码: A

Tomo-TRPIV measurement of coherent structure spatial topology in turbulent boundary layer

JIANG Nan, YU Pei-ning, GUAN Xin-lei

(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The spatial-temporal sequence of 3D-3C (three-dimensional-three-component) simultaneous velocity field in a turbulent boundary layer was finely measured by tomographic TRPIV (time-resolved particle image velocimetry) in a water channel. A new concept of spatial local averaged velocity structure function was introduced to describe the dilation, compression and shear distortion and rotation of multi-scale eddy structures in turbulent flow. The three fluctuating velocity components of TBL (turbulent boundary layer) were decomposed into multi-scale components by spatial local averaged velocity structure function. A new turbulence coherent structure conditional sampling method was proposed based on the dilation and compression features of turbulent multi-scale eddy structures and the new concept of spatial local averaged velocity structure function. The eject and sweep process due to large-scale coherent structure burst was conditionally detected and the characteristic spatial topology modes of physical quantities, such as velocity and vorticity, during coherent structure bursts, were extracted from the tomo-PIV (particle image velocimetry) experimental dataset. A pair of counter-wise quasi-longitudinal horseshoe shaped vortex was discovered during coherent structure eject and sweep process.

收稿日期:2011-08-16; 网络出版地址:www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.1113_022.html

基金项目:国家自然科学基金(10832001); 国家自然科学基金(10872145)

作者简介:姜楠(1968—),男,河南封丘人,教授、博士生导师,博士,主要从事湍流及流动稳定性的实验研究.

Key words: tomographic TRPIV (time-resolved particle image velocimetry);
turbulent boundary layer; coherent structures;
locally averaged velocity structure function; ejection; sweep

相干结构是剪切湍流中的大尺度拟序脉动结构,在时间和空间上具有自组织特性和拟序特性^[1-4].相干结构的发现标志着对湍流本质的认识从完全无序的阶段进入了无序中的有序的新阶段.现在已经公认相干结构是湍流中的重要结构,对湍流的产生、维持、演化和发展起着重要作用.开展相干结构研究的目的在于通过研究相干结构的动力学行为和规律,建立符合相干结构机理的数学模型和湍流模式,在工程中更加准确地预报湍流,探索通过控制相干结构控制湍流的有效途径^[5].相干结构是一个在时间和空间上重复出现的拟序过程,在这个过程中,脉动速度、涡量、拟涡能、雷诺应力、速度变形率、湍流产生项等物理量以一定典型过程在时间和空间上演化,这种可重复出现的典型过程具有准周期性.

1 湍流相干结构的检测

在相干结构的早期实验研究中,由于流体力学实验技术的局限,大多采用流场空间单点的欧拉测量方法,用热线测速技术(HWA)或者激光多普勒测速技术(LDV),测量流场空间一点湍流脉动速度信号的时间序列,根据相干结构脉动速度信号的特征,制定相应的检测准则,检测相干结构,并经过时间相位对齐叠加平均后获得相干结构速度信号的时间相位平均波形.但由于热线测速技术或者激光多普勒测速技术空间单点测量的局限性,不能得到涡量、速度变形率、湍流产生项等空间梯度特征,也不能得到相干结构的上述物理量空间分布特征.广泛使用的检测方法有象限分裂法、VITA(variable interval time average)法、mu-level法^[6-9]等.其中 mu-level 法的检测函数 $D(t)$ 定义如下:

$$D(t) = \begin{cases} 1 & u \leq -Lu' \\ 0 & u \geq -0.25u' \end{cases} \quad (1)$$

其中 L 为门限值,一般取值为 $0.5 \sim 1.3$, u' 是流向脉动速度的均方根.

Mu-level 法的含义是当相干结构经过测量点时,瞬时流向速度远远小于时均流速,从而出现瞬时流速的亏损,这说明底层靠近壁面的低速流体从壁面向外喷射(ejection)到达测点,使测点当地的流速随时间逐渐降低,因此 mu-level 法检测

的是相干结构中的低速流体从近壁区向外喷射的阶段,而 mu-level 法对扫掠事件则没有进行检测.

条件采样方法有两个共同的局限性:一是需要取 $1 \sim 2$ 个门限值才能得到确定的结论.这些门限值虽然有一些经验数据可以参考,但毕竟带有一定的主观臆断性,条件采样的检测结果对检测的门限值有较强的依赖性^[10-14];二是这些检测方法都是针对原始大小尺度混合的脉动速度信号进行检测,对大尺度相干结构的检测结果往往受到小尺度湍流脉动的干扰而带来检测误差^[15].为了克服条件采样方法的上述局限性,Jiang N 等人^[16-18]分别提出了时间和空间局部平均速度结构函数的概念描述一定流向尺度的相干结构的流向强烈变形和相对运动

$$\delta u(a, t_0) = \overline{u(t)}_{t \in [t_0-a, t_0]} - \overline{u(t)}_{t \in [t_0, t_0+a]} = \frac{1}{a} \left[\int_{t_0-a}^{t_0} u(t) dt - \int_{t_0}^{t_0+a} u(t) dt \right] \quad (2)$$

$$\delta u(l, b) = \overline{u(x)}_{x \in [b, b+l]} - \overline{u(x)}_{x \in [b-l, b]} = \frac{1}{l} \left[\int_b^{b+l} u(x) dx - \int_{b-l}^b u(x) dx \right] \quad (3)$$

式(2)、式(3)的物理意义是流向速度沿流向空间变化的局部平均.代表了以空间流向位置 $x = b$ 为中心,在流向空间范围 $x \in [b-l, b]$ 内流体的局部平均速度与在流向空间范围 $x \in [b, b+l]$ 内流体的局部平均速度之差,即空间尺度为 l 的前一半结构 $x \in [b-l, b]$ 与空间尺度 l 为的后一半结构 $x \in [b, b+l]$ 的局部平均相对速度.即在该尺度范围内的流向速度差别引起的相干结构流向拉伸变形.如果 $\left[\int_b^{b+l} u(x) dx - \int_{b-l}^b u(x) dx \right] > 0$,则表示上游结构的平均迁移速度慢于下游结构的平均迁移速度,相干结构正在进行拉伸.如果 $\left[\int_b^{b+l} u(x) dx - \int_{b-l}^b u(x) dx \right] < 0$,则表示上游结构的平均迁移速度快于下游结构的平均迁移速度,相干结构正在进行压缩.由于式(2)、式(3)具有局部平均的低通滤波功能,所以能够克服由于小尺度的湍流脉动带来的对大尺度相干结构检测结果的误差.从式(2)、式(3)还可以看出,式(2)、式(3)的局部平均还对湍流脉动速度的一阶导数具有局部低通滤波的功能.描述脉动速度的一阶导数在一定位置和一定尺度范围内的局部平均,

即脉动速度在一定位置和一定尺度范围内的局部平均变化. 将一维局部平均结构函数的概念向三维扩展即可得到空间不同速度分量在不同方向的局部平均速度结构函数

$$\begin{aligned} \delta u_x(x_0, l) &= \overline{u(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]} - u(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}} \\ \delta v_y(y_0, l) &= \overline{v(x, y, z)_{y \in [y_0, y_0+l]} - v(x, y, z)_{y \in [y_0-l, y_0]}} \\ \delta w_z(z_0, l) &= \overline{w(x, y, z)_{z \in [z_0, z_0+l]} - w(x, y, z)_{z \in [z_0-l, z_0]}} \end{aligned} \quad (4a)$$

式(4a)表示不同尺度的湍流结构在一定空间范围内的沿空间3个方向的拉伸或者压缩变形.

$$\begin{aligned} \delta v_x(x_0, l) &= \overline{v(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]} - v(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}} \\ \delta w_x(x_0, l) &= \overline{w(x, y, z)_{x \in [x_0, x_0+l]} - w(x, y, z)_{x \in [x_0-l, x_0]}} \\ \delta u_y(y_0, l) &= \overline{u(x, y, z)_{y \in [y_0, y_0+l]} - u(x, y, z)_{y \in [y_0-l, y_0]}} \\ \delta w_y(y_0, l) &= \overline{w(x, y, z)_{y \in [y_0, y_0+l]} - w(x, y, z)_{y \in [y_0-l, y_0]}} \\ \delta u_z(z_0, l) &= \overline{u(x, y, z)_{z \in [z_0, z_0+l]} - u(x, y, z)_{z \in [z_0-l, z_0]}} \\ \delta v_z(z_0, l) &= \overline{v(x, y, z)_{z \in [z_0, z_0+l]} - v(x, y, z)_{z \in [z_0-l, z_0]}} \end{aligned} \quad (4b)$$

而式(4b)则表示不同尺度的湍流结构在一定空间范围内的沿空间3个方向的剪切或者旋转. 根据 mu-level 法检测相干结构中的低速流体从近壁区向外喷射的阶段, 当地的流向脉动速度达到瞬时局部极小值, 此时信号低通滤波的一阶导数从负的方向向正的方向变化并经过零点. 因此, 当流向脉动速度达到瞬时局部极小值的检测条件, 可以用局部平均速度结构函数从负的方向向正的方向变化并经过零点代替. 而对于外区高速流体冲向壁面的扫掠事件, 当地的流向脉动速度达到瞬时局部极大值, 此时信号低通滤波的一阶导数从正的方向向负的方向变化并经过零点. 因此, 可以用局部平均速度结构函数从正的方向向负的方向变化并经过零点检测高速流体冲向壁面的扫掠事件. 为此, 湍流脉动速度空间局部平均速度结构函数的特征, 提出新的壁湍流相干结构检测方法.

对于壁湍流瞬时脉动速度的空间分布, 检测

函数为

$$D(l, b) = \begin{cases} 1(\text{喷射}) & \delta u(l, b - \Delta x) < 0 \\ & \& \delta u(l, b + \Delta x) > 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5a)$$

$$D(l, b) = \begin{cases} -1(\text{扫掠}) & \delta u(l, b - \Delta x) > 0 \\ & \& \delta u(l, b + \Delta x) < 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5b)$$

本文利用湍流局部平均空间速度结构函数的新概念, 对平板湍流边界层层析 TRPIV (time-resolved particle image velocimetry) 实验数据的流向速度分量沿空间流向进行多尺度分析, 检测其中的“喷射”和“扫掠”事件, 运用空间条件相位平均方法, 提取了“喷射”和“扫掠”事件各脉动速度分量、各涡量分量、雷诺应力分量、湍流产生项的相位平均波形

$$\langle f(l_j, x) \rangle_e = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} f(b_i + x),$$

$$x \in \left[-\frac{l_j}{2}, \frac{l_j}{2}\right], \text{ while } D(l_j, b_i) = 1 \quad (6a)$$

$$\langle f(l_j, x) \rangle_s = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} f(b_i + x),$$

$$x \in \left[-\frac{l_j}{2}, \frac{l_j}{2}\right], \text{ while } D(l_j, b_i) = -1 \quad (6b)$$

其中 $\langle f(l_j, x) \rangle_e$ 和 $\langle f(l_j, x) \rangle_s$ 分别代表“喷射”和“扫掠”事件中各物理量的相位平均波形. $f(l_j, x)$ 代表脉动速度分量、涡量分量等物理量. b_i 代表检测到“喷射”和“扫掠”发生的流向位置, l_j 代表检测到“喷射”和“扫掠”发生的流向空间尺度, N_j 代表检测到“喷射”和“扫掠”发生的次数.

2 实验设备与技术

实验在德国国家航空汇中心 (DLR) 空气动力与流动技术研究所的低速回流式水洞中进行. 平行于来流方向, 垂直于底面插入一块有机玻璃光滑平板, 获得自由来流速度为 0.53 m/s 的湍流边界层. 平板长 250 cm, 宽 80 cm, 前缘为椭圆形. 通过调节后缘板, 得到零压力梯度. 为了在测量点触发厚 38 mm 的湍流边界层, 在平板观测一面的前缘下游 150 mm 处沿展向贴锯齿形条带. 湍流边界层对应的动量损失厚度雷诺数约为 2460. 流体的温度控制为常数. 自由来流的湍流度低于 0.5%. 为了测量边界层的一般性质, 使用焦距为 105 mm 的 Nikon 镜头, 功率为 200 mJ 的 Big Sky

CFR-200 脉冲激光器和 4 M 像素的 LaVision Imager PRO-X 照相机组成低帧率、高空间分辨率的二分量 PIV (particle image velocimetry) 系统. 对 1 000 张统计独立的 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的双曝光粒子图像进行处理, 查询窗口为 8 像素 $\times$ 8 像素, 在 x 和 y 方向的空间分辨率为 4.4 个壁面单位. 用系综互相关模式分析得到的速度矢量场, 获得了高分辨率的边界层平均速度剖面. 从 $y^+ = 44$ 到 $y^+ = 200$ 进行叠代得到壁面摩擦速度 u_τ 约为 0.0219 m/s , 壁面摩擦系数 c_f 为 0.00345 . 由于测量技术的限制, 线性的黏性亚层没有被检测到.

然后使用 Quantronix 公司的半导体泵浦双腔高频 Nd:YLF 激光器, 脉冲能量为 25 mJ , 脉冲频率为 1 kHz , 以及 6 个 Photron 公司的 $1024\text{ 像素} \times 1024\text{ 像素}$ 的全帧 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 照相机, 构成了高时间分辨的层析 PIV 系统. 其中 5 个相机用 Scheimpflug 放置法按照一定的几何视角进行布置, 另一个相机与平均来流平行. 通过引导激光束通过两个球面透镜 (焦距分别为 -100 mm 和 200 mm)、两个柱面透镜 (焦距分别为 -90 mm 和 300 mm) 和一个刀口光栅形成长方体的测量体. 引入的光线平行于平板, 垂直于平均流方向. 平均直径 $56\text{ }\mu\text{m}$ 的聚酰胺示踪粒子产生了足够强的散射光. 以平板前缘下游 $2\,090\text{ mm}$ 处为中心, 以 1 kHz 和 3 kHz 的频率照射 x , y 和 z 方向 (x 为流向, y 为壁面法向) 大小约为 $63\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 68\text{ mm}$ 的测量体, 约合 $734 \times 176 \times 793$ 体素, 相当于 $1380 \times 328 \times 1490$ 壁面单位. 以 1 kHz 的频率拍摄 2 s 得到 2040 幅流动图像, 一共拍 5 次. 系统采用 DaVis 7.3 软件控制的 La Vision Programmable Timing Unit (PTU9) 同步控制. 用同一软件, 用 PIV 专用的 MART (multiplicative algebraic reconstruction technique) 层析方法 (Elsinga et al.^[19] 2006), 计算重构了三维粒子光强分布, 得到了三维数字存储的光强的体素阵列. 在最后重构出粒子图像之前, 根据 Wieneke^[20] (2008) 进行了观测体自标定. 用局部三维互相关和多重体变形网格迭代最后获得 323 体素的查询箱. 为了尽量减少互相关坏粒子数, 同时提高湍流脉动速度的动力学范围, 用互相关重构粒子图像的两个重构体的时间间隔选择为 2 ms (图像时间重叠约 50%). 坏粒子是使用 MART 方法产生的统计结果, 对于给定的粒子播撒浓度 (本文大约 $0.05\text{ particles per pixel}$), 坏粒子出现的概率随着不同

角度的相机的数目增加而减小. 两帧中的坏粒子随着时间步长的加大而变得不相关. 每体素对应 $85.9\text{ }\mu\text{m}$, 323 体素的查询窗口则相应于 $2.75\text{ mm} \times 2.75\text{ mm} \times 2.75\text{ mm}$ 的空间分辨率, 75% 的窗口重叠, 可以得到 $92 \times 99 \times 22$ (200,376) 个空间测量点的瞬时三维速度矢量空间分布, 时间序列步长为 2 ms , 每个方向 0.687 mm 对应 15 个壁面单位.

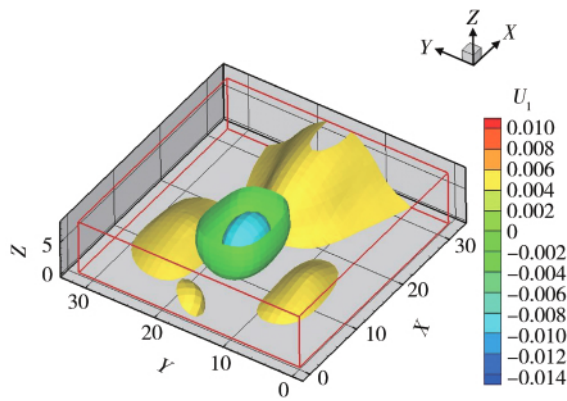
3 实验结果分析

本文分 4 个尺度对原始速度场进行空间局部平均多尺度结构分析, 即得到 4 个尺度的空间局部平均多尺度结构函数 $\delta u(l; b, y, z)$, 从中选取满足条件 (5a) 的空间位置, 并以这些点为中心分别切出尺寸为 $33 \times 33 \times 9$ (个数据点) 的长方体, 将这些长方体上的对应湍流物理量分别进行空间相位对齐叠加平均, 得到喷射事件的空间条件相位平均拓扑. 选取满足条件 (5b) 的空间位置, 并以这些点为中心分别切出尺寸为 $33 \times 33 \times 9$ (个数据点) 的长方体, 将这些长方体进行叠加平均, 得到扫掠事件的空间条件相位平均拓扑. 根据子波分析检测相干结构的能量最大准则, 本文仅就能量最大尺度对应的第四尺度进行分析. 第四尺度对应 2^4 个网格长度, 折合 240 个黏性壁面单位, 空间长度约为 10.992 mm .

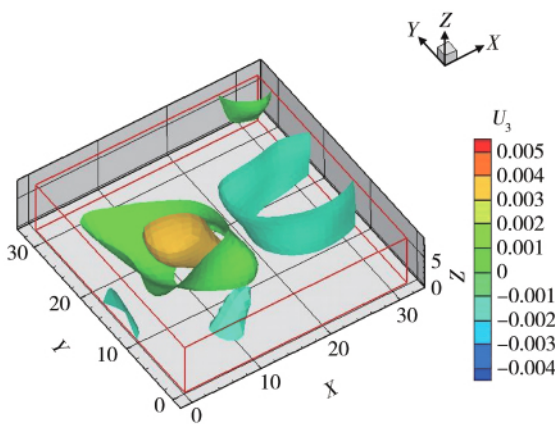
3.1 喷射事件检测结果

图 1 为“喷射”条件相位平均后流向脉动速度的空间等值面分布, 其中流场的主流方向为 X 轴的正向, 即宏观上流体沿 X 轴的正向流动; 法向为 Z 轴的正向, 即 $Z=0$ 的数据点处于靠近壁面的位置. 图 1 中 (a) 与 (b) 分别为第四尺度的流向脉动速度和法向脉动速度的等值面图. 可以看出低速流体被流向的高速流体所包围, 低速流体的法向速度向上远离壁面, 周围的高速流体的法向速度向下冲向壁面. 高速流体在低速流体的左右对称分布, 中间低速流体的法向位置较高, 符合低速流体从近壁面位置抬升的特点. 图 2 为喷射第四尺度中展向中心截面上脉动速度矢量图, 从中可以清晰的看出低速流体在高速流层中逆流向上游喷射的特征^[21-22].

图 3 为喷射过程中第四尺度各涡量分量的空间相位平均分布, 其中图 3(a) 为流向涡量 ω_1 的等值面分布; 图 3(b) 为流向涡量的 X 方向中心截面云图和该面上的速度矢量分布; 图 3(c) 为法向涡



(a) 流向速度分量



(b) 法向速度分量

图1 喷射阶段流向脉动速度和法向脉动速度的等值面图

Fig. 1 Spatial isosurface contour of the longitudinal and wall-normal fluctuating velocity for the fourth scale during eject

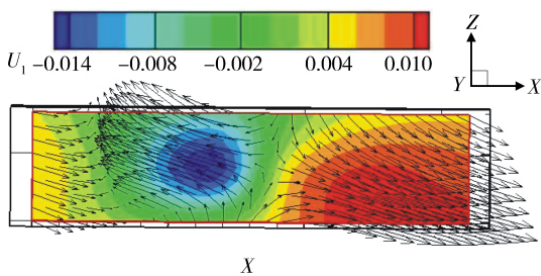
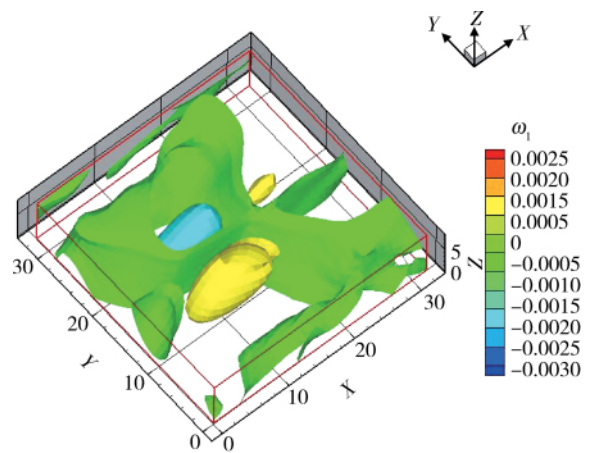


图2 喷射阶段第四尺度展向中心截面上的脉动速度矢量

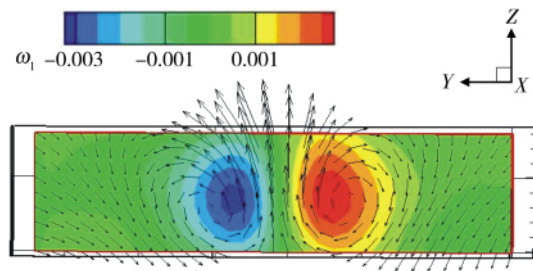
Fig. 2 Slice of fluctuating velocity vector field during eject in the central cross-section for the forth scale

量 ω_3 的等值面分布;图 3(d)为法向涡量 Z 方向中心截面云图和该平面上的速度矢量分布。图 3(a)喷射中心的两侧各分布有一对反向旋转的旋涡,图 3(c)法向涡量 ω_3 也有类似的分布。由此可

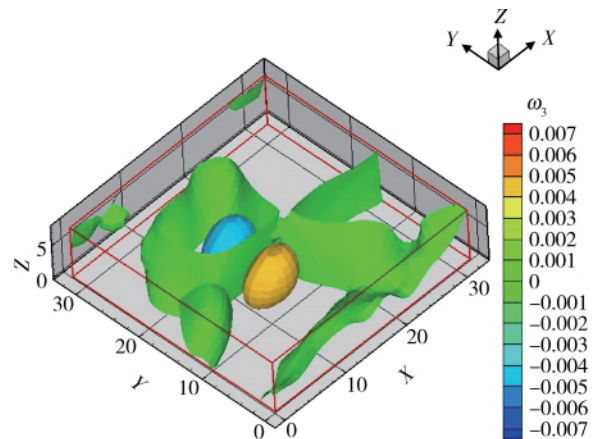
知,在喷射事件中存在一对沿流向法向倾斜的“ Δ 涡”准流向涡结构,其涡腿分布在喷射中心两侧。从图 3(c)、图 3(d)截面图中可以清楚地看到由于两个反向的流向涡的作用,处于靠近壁面的低速流体被带动向远离壁面的方向运动。图 3(e)为喷射阶段展向涡量 ω_2 的等值面分布,可以看出在喷射中心上方有一个展向的正向涡量,这个位置就是“ Δ 涡”的涡头的位置,强烈的正向涡旋也是喷射发生的重要影响因素。同时也注意到在正展向涡的下方出现了一片负展向涡旋区域,这是由于上方正涡量的诱导作用所引起的^[23-24]。



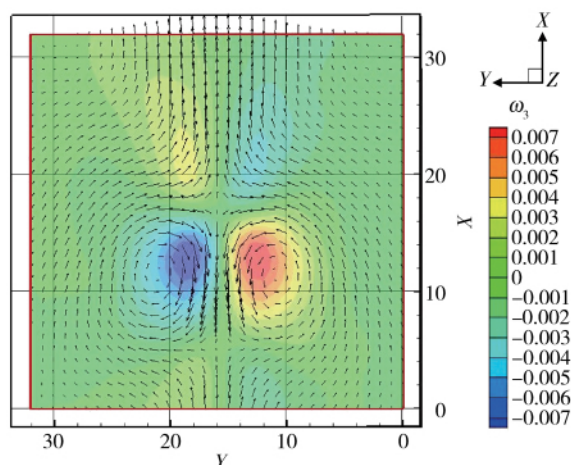
(a) 流向涡量空间等值面分布



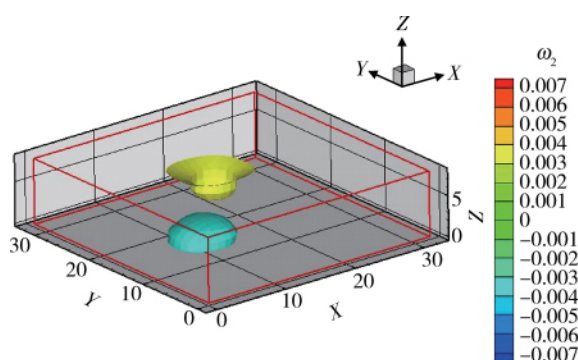
(b) Y-Z横截面流向涡量等值面分布



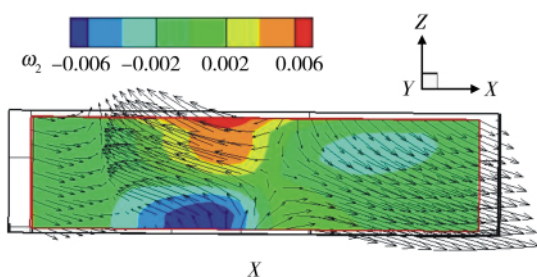
(c) 法向涡量空间等值面分布



(d) X-Y横截面法向涡量等值面分布



(e) 展向涡量空间等值面分布



(f) X-Z截面展向涡量等值面分布

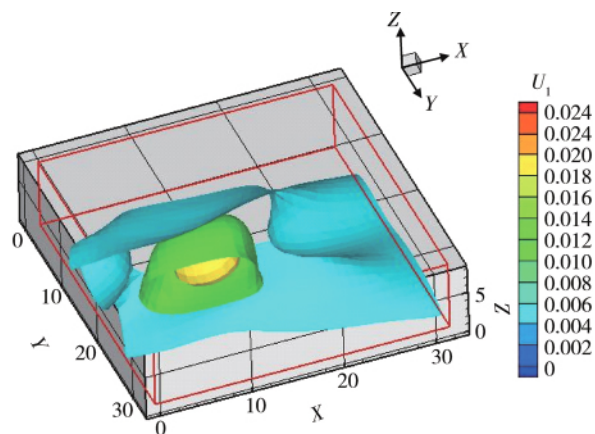
图 3 喷射过程中各涡量分量的空间相位平均分布

Fig. 3 Spatial iso-surface contour of the vorticity components for the fourth scale during eject

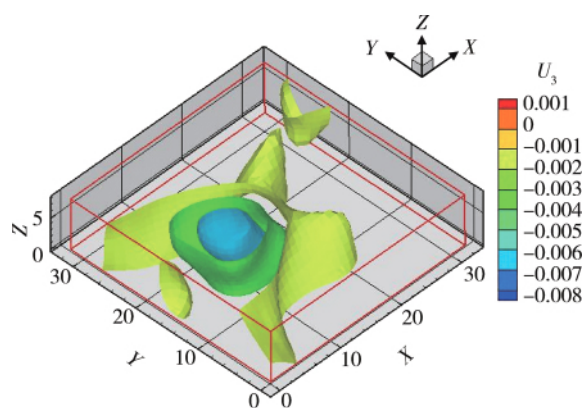
3.2 扫掠事件检测结果

图 4 为扫掠事件的空间条件相位平均后脉动速度矢量的空间等值线分布. 图 4(a)与图 4(b)分别为第四尺度的流向脉动速度和法向脉动速度的等值面图. 可以看出两者的检测中心均为高速流体, 且都被周围的低速流体所包围. 图 5 为扫掠第四尺度中展向的中心截面上脉动速度矢量图, 从中可以看出高速流体向下扫掠的特征.

图 6 为扫掠事件过程中第四尺度涡量的空间相位平均分布, 其中图 6(a)为流向涡量 ω_1 的空间



(a) 流向速度分量



(b) 法向速度分量

图 4 扫掠阶段流向脉动速度和法向脉动速度的等值面图

Fig. 4 Spatial iso-surface contour of the longitudinal and wall-normal fluctuating velocity for the fourth scale during sweep

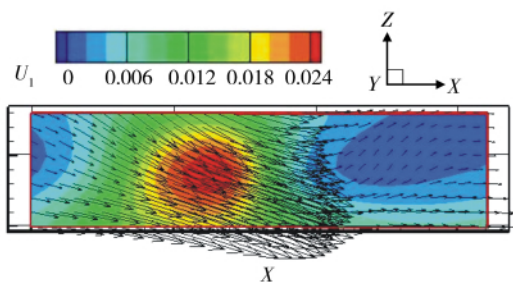
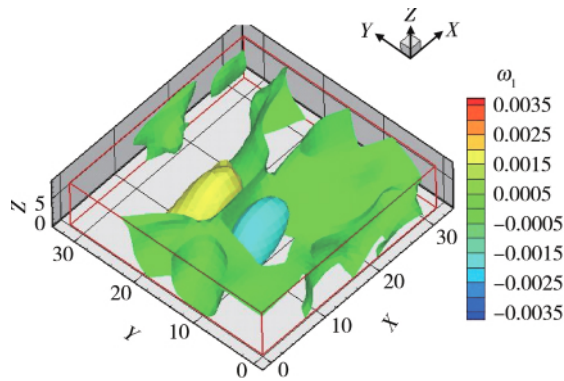


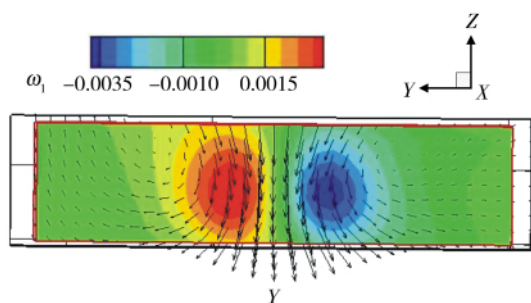
图 5 第四尺度扫掠展向中心截面上的脉动速度矢量

Fig. 5 Slice of fluctuating velocity vector field during sweep in the central cross-section for the fourth scale

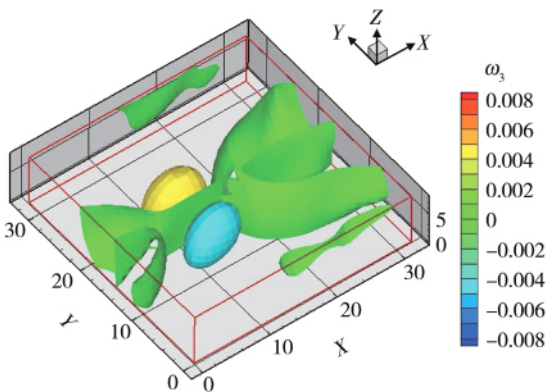
等值面分布; 图 6(b)为流向涡量 ω_1 的 X 方向中心横截面云图和该面上的速度矢量分布; 图 6(c)为法向涡量 ω_3 的空间等值面分布; 图 6(d)为法



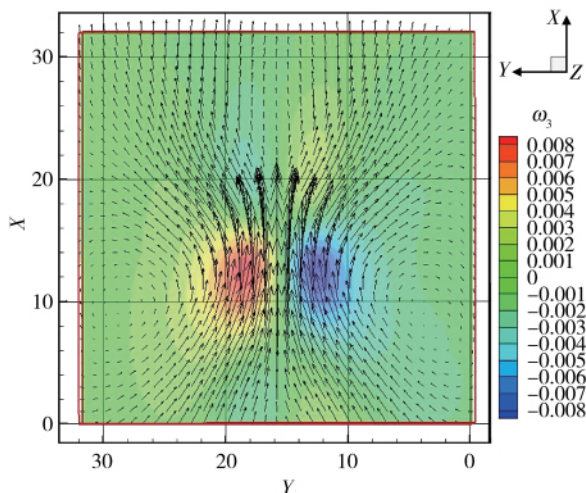
(a) 流向涡量空间等值面分布



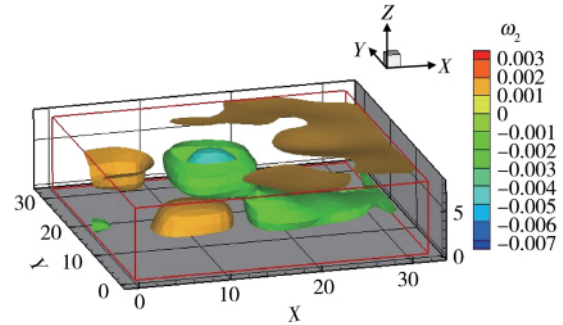
(b) Y-Z横截面流向涡量等值面分布



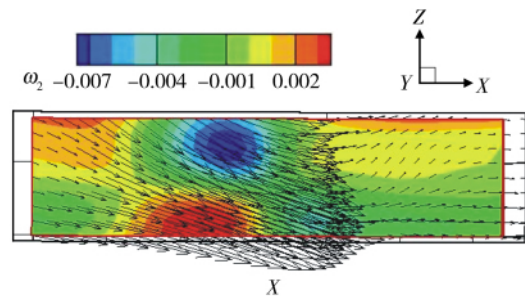
(c) 法向涡量空间等值面分布



(d) X-Y横截面法向涡量等值面分布



(e) 展向涡量空间等值面分布



(f) X-Z截面展向涡量等值面分布

图6 扫掠过程中各涡量分量的空间相位平均分布

Fig. 6 Spatial iso-surface contour of the vorticity components for the fourth scale during sweep

向涡量 ω_3 在 Z 方向中心截面云图和该平面上的速度矢量分布. 图6与图3相比, 涡旋的位置几乎相同, 而涡量值却相互异号, 形成了鲜明的对比. 图6(a)和图6(c)中均有一对相互反向的涡量区域, 从图6(b)和图6(d)的截面图中可以看出在扫掠中心两侧同时存在一对反向的准流向涡结构. 因此可以推断在扫掠事件旁也存在一倾斜的“ Δ 涡”, 它的两条“涡腿”导致了准流向涡的形成. 图6(e)为扫掠事件中展向涡量的空间等值面分布, 可以清晰地看出, 在扫掠中心上方有一个展向的负向涡量, 而在其下方和上游位置均出现了由于其诱导而产生的正向涡量区域. 从图6(f)的展向涡中心截面等值线云图中也可以看出正负涡量区域分布在扫掠中心的上下, 两者均对扫掠事件有影响. 这些都与图3中的情形相反. 因此可以推断扫掠事件中存在的“ Δ 涡”与喷射事件中的形态类似, 只是涡量方向正好相反^[25-26].

4 讨论与结论

在湍流相干结构各种条件采样方法中, μ -level 法是一种重要的条件采样方法, 在相干结构的检测中得到了广泛的使用. 但是, 传统的 μ -level 法也存在着一定的局限性, 主要有以下几个

方面:

1) 适用范围有限,传统的基于热线测量技术的 μ -level 法只能基于欧拉观点,测量流场空间一点的湍流脉动速度一维时间序列信号,对于三维的 PIV 空间速度场分布无法进行检测。

2) μ -level 法需要一个门限值才能得出确定的结论,门限值的选取对检测结果有很大的影响。门限值较小时,会增加相干结构的误判;门限值较大时,会增加相干结构的漏判,现在对门限的选取只要依靠以往的经验,导致实验结果具有主观经验依赖性,且差异较大。

3) 传统的 μ -level 法所检测壁湍流猝发只以低速流体的喷射事件为代表,而对高速流体的“扫掠”事件却没有提及,因此检测效果还不够完善。

4) 传统的 μ -level 法是针对原始测量得到的大小尺度混合的脉动速度信号进行检测,没有考虑小尺度湍流脉动对大尺度相干结构检测的影响,对大尺度相干结构的检测结果往往受到小尺度湍流脉动的干扰而带来检测误差。

本文基于湍流边界层 Tomo-TRPIV 空间数据库,提出了空间多方向、多尺度局部平均速度结构函数的新概念,对湍流脉动速度进行了空间多尺度分解,分析了湍流多尺度涡结构在空间各方向的拉伸、压缩、剪切和旋转等局部特征,在大尺度结构的尺度范围内对小尺度结构的脉动进行了局部平均,避免了小尺度脉动对大尺度相干结构检测结果的干扰。提出了基于流向空间局部平均速度结构函数的 μ -level 相干结构检测方法,检测并提取了相干结构的“喷射”和“扫掠”事件中的速度、涡量等物理量的空间拓扑形态。新的检测方法拓展了 μ -level 法的使用,并使其检测湍流边界层相干结构空间拓扑特征的性能更加优越。

首先,本文基于湍流边界层 Tomo-TRPIV 实验测量空间数据库,提出了空间多方向局部平均速度结构函数的新概念,对湍流脉动速度进行了空间多尺度、多方向分解,在大尺度结构的尺度范围内对小尺度结构的脉动进行了局部平均,避免了小尺度脉动对大尺度相干结构检测结果的干扰;其次,使用基于局部平均速度结构函数的 μ -level 法,使该检测方法的使用范围得到扩展,由于改进后 μ -level 法检测的是局部平均速度结构函数,无需采用门限值,避免了 μ -level 法对检测门限值的主观经验依赖性,使得检测结果

更加客观准确;再次,在检测条件上将“喷射”事件与“扫掠”事件加以区别,分别提取了“喷射”与“扫掠”事件的特征进行空间相位平均;最后,基于湍流边界层 Tomo-TRPIV 空间数据库,分别得到了“喷射”与“扫掠”事件的空间三维脉动速度分量和涡量分量的空间相位平均拓扑,并发现在喷射和扫掠事件中均伴随有“ Δ 涡”的存在,且两种条件下的涡量相反。

致谢

德国国家航空中心空气动力与流动技术研究所为本文提供了湍流边界层 Tomo-TRPIV 实验数据库,特此致谢。

参考文献:

- [1] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F H, et al. The structure of turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanicals, 1967, 30(4): 741-774.
- [2] Kim H T, Kline S J, Reynolds W C. The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanicals, 1971, 50(1): 133-160.
- [3] Blackwelder R F, Eckelmann H. Streamwise vortices associated with the bursting phenomenon[J]. Journal of Fluid Mechanicals, 1979, 94(3): 577-594.
- [4] 张强, 周济福, 李家春. 基于槽道流 LES 数据库的湍流猝发检测[J]. 中国科学 G 辑: 物理学力学天文学, 2005, 35(3): 292-307.
ZHANG Qiang, ZHOU Jifu, LI Jiachun. Detecting burst based on LES database of channel flow in turbulence[J]. Science in China Series G-Physics Mechanics & Astronomy, 2005, 35(3): 292-307. (in Chinese)
- [5] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 走近湍流[J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 1-8.
ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Chunxiao. Approach to turbulence[J]. Mechanics in Engineering, 2002, 24(1): 1-8. (in Chinese)
- [6] Luchik T S, Tiedermann W G. Time scale and the structure of ejections and bursts in turbulent channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanicals, 1987, 174: 529-552.
- [7] Blackwelder R F, Kaplan R E. On the wall structure of the turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanicals, 1976, 76(1): 89-112.
- [8] Alfredsson P H, Johansson A V. On the detection of turbulence generating events[J]. Journal of Fluid Mechanicals, 1989, 139: 325-345.
- [9] Lu S S, Willmarth W W. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanicals, 1973, 60(3): 481-511.
- [10] 孙葵花, 舒玮. 湍流猝发的检测方法[J]. 力学学报, 1994, 26(4): 488-493.
SUN Kuihua, SHU Wei. On the burst detection techniques in wall turbulence[J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 26

- (4):488-493. (in Chinese)
- [11] Blackwelder R F, Haritonidis J H. Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanicals*, 1983, 132(1):87-103.
- [12] Shu W, Tang N. Burst frequency in turbulent boundary layers[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1988, 4(4):291-303.
- [13] Bogard D G, Tiederman W G. Burst detection with single-point velocity measurements[J]. *Journal of Fluid Mechanicals*, 1986, 162(1):389-413.
- [14] 姜楠, 舒玮. 壁湍流相干结构的辨识[J]. *实验力学*, 1996, 11(4):494-500.
JIANG Nan, SHU Wei. The identification of coherent structure in wall turbulence[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1996, 11(4):494-500. (in Chinese)
- [15] 汪健生, 张金钟, 舒玮. 提取壁湍流相干结构的数字滤波法[J]. *力学学报*, 1995, 27(4):398-405.
WANG Jiansheng, ZHANG Jinzhong, SHU Wei. The digital filter method of extracting the coherent structure in wall turbulence[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1995, 27(4):398-405. (in Chinese)
- [16] Jiang N, Liu W, Liu J H, et al. Phase-averaged waveforms of Reynolds stress in wall turbulence during the burst events of coherent structures[J]. *Science in China Series G-Physics Mechanics & Astronomy*, 2008, 51(7):857-866.
- [17] LIU Jianhua, JIANG Nan. Two phase of coherent structure motions in turbulent boundary layer[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(9):2617-2620.
- [18] LIU Jianhua, JIANG Nan, WANG Zhendong, et al. Multi-scale coherent structures in turbulent boundary layer detected by locally averaged velocity structure functions[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2005, 26(4):456-464.
- [19] Elsinga G E, Scarano F, Wieneke B, et al. Tomographic particle image velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 41(6):933-947.
- [20] Wieneke B. Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry[J]. *Experiment of Fluids*, 2008, 45(4):549-556.
- [21] 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[R]. *AIAA* 2007-1305, 2007.
- [22] Schröder A, Geisler R, Staack K, et al. Eulerian and Lagrangian views of a turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV[J]. *Experiment of Fluids*, 2011, 50(4):1071-1091.
- [23] Adrian R J, Meinhardt C D, Tomkins C D. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanicals*, 2000, 422(1):1-54.
- [24] Tomkins C D, Adrian R J. Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanicals*, 2003, 490:37-74.
- [25] Biferale L, Boffetta G, Celani A, et al. Lagrangian statistics in fully developed turbulence[J]. *Journal of Turbulence*, 2006, 7(6):1-12.
- [26] Stanislas M, Perret L, Foucaut J M. Vortical structures in the turbulent boundary layer: a possible route to a universal representation[J]. *Journal of Fluid Mechanicals*, 2008, 602:327-382.