

文章编号: 1001-4888(2015)01-0051-08

壁面湍流发卡涡包空间模态的 TRPIV 实验研究^{*}

成璐¹, 姜楠^{1,2}

(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)

摘要: 运用高时间分辨率粒子图像测速(Time-resolved PIV 简称 TRPIV), 测量得到平板湍流边界层流向/法向平面内瞬时速度矢量空间分布的时间序列; 采用空间局部平均速度结构函数的概念, 识别和提取湍流边界层中大尺度发卡涡包结构的特征。发现在湍流边界层中不同法向位置多个正负发卡涡包结构同时交替存在。这些分布在不同法向高度的发卡涡包结构之间通过倾斜的涡量剪切层相联系, 构成了湍流边界层中内、外区紧密相连、相互作用的一种稳态的分布方式。

关键词: 湍流边界层; 高时间分辨率粒子图像测速; 空间局部平均速度结构函数; 发卡涡包

中图分类号: O357.5+2

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-121

0 引言

H. L. Grant^[1]、V. A. Sandborn^[2]和 S. J. Kline^[3]从实验中分别发现湍流边界层内不是完全无序的流动, 而是存在着相对有组织的、间歇的、大尺度相干结构, 并发现相干结构伴随着喷射、扫掠等拟序现象, 产生对雷诺应力的主要贡献。

自此, 对壁湍流相干结构的研究不断有新的发现和进展^[4,5], 例如: 已经公认近壁区低速条带的展向平均间距约为 100 个壁面粘性长度单位^[6]; 大尺度等动量条带结构沿流向拉伸占据着对数区^[7]; 发卡涡包结构与低速条带结构总是伴随出现^[8,9], 共同构成了湍流边界层的基本结构^[10,11]。

唐湛棋等^[12]基于 TRPIV 技术, 对旁路转捩末期发卡涡包的结构及特征尺寸进行了实验研究。该文采用 λ_c 准则和线性随机估计方法, 在边界层中发现一系列发卡涡头与壁面构成 17° 的倾角, 低速区域出现在涡包上方的主流区中, 沿流向方向拉伸(流向尺度 3δ , 展向尺度 0.55δ)的低速条带结构出现在法向高度为 $y/\delta=0.2$ 的流向-展向平面中, 并且在该低速条带的两侧对称地出现了反向旋转的流向涡结构。

为了进一步对发卡涡包结构和高低速条带结构在湍流边界层中的空间形态和相互关系进行分析, 本文采用 TRPIV 对湍流边界层流向/法向平面内的瞬时空场进行测量; 运用多尺度空间局部平均速度结构函数的概念, 对大量瞬态流场图像样本进行空间多尺度分析, 得到分尺度涡旋结构强度的空间分布; 对发卡涡包结构进行检测和识别, 用空间锁相平均方法得到发卡涡包结构的特征形态, 对发卡涡包结构的分布及其与高低速条带之间的相互关系有了新的认识。

开展发卡涡包结构的分布及其与高低速条带之间的相互关系的研究有助于深化对湍流边界层相干结构及其发展演化机理的认识^[13], 为探索湍流边界层控制与减阻的有效方法提供指导^[14]。

^{*} 收稿日期: 2014-07-02; 修回日期: 2014-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(11272233)、国家自然科学基金重点项目(11332006)、国家重点基础研究发展计划(973)(NO. 2012CB720101、NO. 2012CB720103)

通讯作者: 姜楠, 教授, 博士生导师。Email: nanj@tju.edu.cn

1 实验方法

实验在低速循环式水槽中进行,水槽实验段长 5m,宽 0.25m,深 0.35m。实验中所使用的平板尺寸为 $200\text{cm} \times 25\text{cm} \times 1\text{cm}$ (长度 $\times$ 宽度 $\times$ 厚度),放置于距离水槽底部 25cm 高度的水平位置。在平板前缘 5cm 的流向下游表面沿展向放置拌线,边界层沿平板的下表面逐渐发展成为充分发展的湍流边界层。本实验对流向位置 $x=160\text{cm}$ 处的湍流边界层流场进行 TRPIV 测量。实验中自由来流速度为 33.9cm/s ,边界层厚度为 4.93cm ,雷诺数为 $Re_\theta = 1838$ (θ 为边界层动量厚度),壁面摩擦速度为 0.0147m/s 。

实验所用到的激光片光源、高速相机和实验模型的布置示意图如图 1 所示。实验使用的示踪粒子为 Polyamid Seeding Particle (平均直径 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、平均密度 1.03g/cm^3),通过 0.8mm 厚的 Nd:Yag 激光片光照射流场,示踪粒子发出散射光,激光片光源平面处在平板的中心线上垂直平板,在水槽底部用 CMOS 相机对流向长度 105mm 范围内的流场进行拍摄。

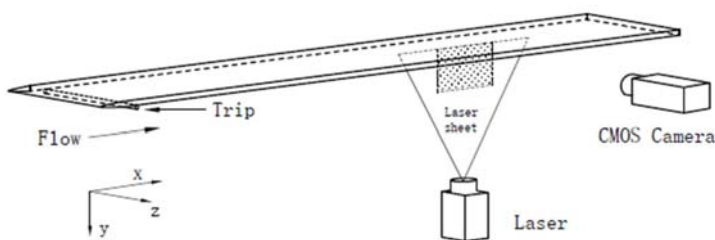


图 1 实验模型及装置示意图

Fig. 1 The schematic of the experimental arrangement

相机拍摄频率为 1000Hz ,每两帧粒子图像之间的位移约小于 4pix ,因此本实验采用单曝光模式,曝光时间为 1ms 。由于相机内存的限制,每次连续记录 6001 幅粒子图像,持续时间为 6s ,实验中进行了 2 次重复测量,共得到 12000 张瞬态流速空间分布的图像样本。图像的分辨率为 $1280\text{pix} \times 1024\text{pix}$,粒子的平均直径约为 2pix ,因此相关峰锁定效应 (peak-locking effect) 可以忽略不计。最后,对原始粒子图像采用 Dantec Dynamic 软件进行处理,运用互相关运算,所选择的最终查询窗口为 $16\text{pix} \times 16\text{pix}$,窗口重叠率为 50% ,速度矢量的空间分辨率为 1.32mm ,在二维平面内得到 159×127 (流向 $\times$ 法向) 个速度矢量,再进行阈值过滤,平均过滤算法,最终得到 12000 个速度矢量,测量的相对误差不超过 1% 。

2 结果分析

图 2 给出了流向时均速度 U 沿法向的分布,时均速度 U 和法向位置 y 分别用摩擦速度 u_τ 和湍流边界层内尺度 y^+ 无量纲化。如图 2 所示, $U^+ (y^+)$ 与 Spalding 速度分布公式^[12] $y^+ = U^+ + e^{-KB} \left[e^{KU^+} - 1 - KU^+ - \frac{(KU^+)^2}{2!} - \frac{(KU^+)^3}{3!} \right]$ 符合较好。其中, $U^+ = U/u_\tau$, $y^+ = y/y^* = yu_\tau/\nu$, 系数 $K = 0.41$, $B = 5.0$ 。

Christensen 和 Adrain^[13] 在湍流边界层中从统计的角度证明了发卡涡包结构是一种普遍存在的相干结构, Tang 和 Jiang^[14] 在转捩边界层中也检测到发卡涡包结构的存在,并进行了统计证明。图 3(a) 给出了湍流边界层减去平移速度 $U_c = 0.85U_0$ 以后的瞬时速度场的空间分布图像以及对瞬时速度场进行空间差分获得的展向瞬时涡量的云图,可以大致看出边界层中存在着具有一定倾斜角的低速区域(如图 3(a)中绿色虚线下方区域所示),以及蓝色负涡量所标记的多个顺时针旋转的涡结构沿着倾角方向分布。但是由于瞬时流场中小尺度脉动的干扰,图 3 所示瞬时大尺度涡包结构并不清晰,同时由于图 3 所示的只是一个瞬时流动图像的样本,不具有典型性,不能显示出大尺度涡包结构的规则性和典型特征。另外,图 3 中瞬时涡量是对瞬时速度场直接进行中心插分,计算速度梯度得到的,而这种基于速度场空间差分直接计算速度梯度的过程会带入局部误差,并且所得到的空间逐点涡量反映的只是涡量场

的局部特征,这些因素都给涡包结构整体的捕获和描述增加了不准确性。

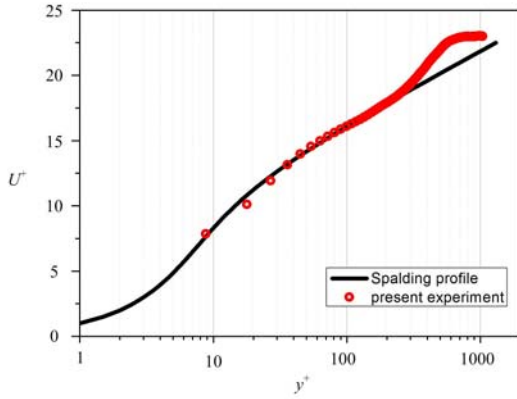


图 2 平板湍流边界层流向平均速度剖面分布

Fig. 2 The distribution of the mean streamwise velocity profile of turbulent boundary over a smooth flat plate

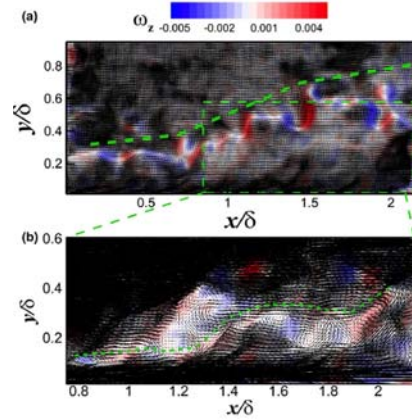


图 3 瞬时速度矢量的分布和涡量分布 (a)减去平移速度 $U_c=0.85U_0$; (b)减去平移速度 $U_c=0.75U_0$

Fig. 3 Galilean-decomposed instantaneous velocity fields with the constant convection velocity (a) $U_c=0.85U_0$ and (b) $U_c=0.75U_0$ removed. The contours of the vorticity are shown in the background

为了研究大尺度发卡涡包结构的典型特征,需要按照一定的检测准则,对所有瞬时速度场图像进行检测,获得多个相同尺度发卡涡包结构的流场和涡量场样本,按照空间相位对齐原则进行空间锁相平均,获得大尺度发卡涡包结构的速度场和涡量场的空间典型特征。

为了消除瞬时流场中小尺度脉动的干扰以及基于速度场差分直接计算速度梯度过程产生的局部误差,本文引入了局部平均速度结构函数的概念对所得到的二维速度场进行分尺度的分析。对于二维 PIV 平面流场图像,沿流向空间方向局部平均速度结构函数可以定义为:

$$a_1 = \delta u_x(x_0, a_x) = \overline{u(x, y)}_{x \in [x_0, x_0+a_x]} - \overline{u(x, y)}_{x \in [x_0, x_0-a_x]} \quad (1)$$

$$a_2 = \delta v_x(x_0, a_x) = \overline{v(x, y)}_{x \in [x_0, x_0+a_x]} - \overline{v(x, y)}_{x \in [x_0, x_0-a_x]} \quad (2)$$

其中, $2a_x$ 为计算局部平均速度应变的空间尺度; $\overline{u(x, y)}_{x \in [x_0, x_0+a_x]}$ 和 $\overline{v(x, y)}_{x \in [x_0, x_0+a_x]}$ 为各自在尺度 a_x 下沿流向的空间局部平均速度,通过空间局部平均运算的空间低通滤波,可以消除尺度小于 a_x 的小尺度脉动干扰。

相应地,沿法向方向的空间局部平均速度结构函数为:

$$a_3 = \delta u_y(y_0, a_y) = \overline{u(x, y)}_{y \in [y_0, y_0+a_y]} - \overline{u(x, y)}_{y \in [y_0, y_0-a_y]} \quad (3)$$

$$a_4 = \delta v_y(y_0, a_y) = \overline{v(x, y)}_{y \in [y_0, y_0+a_y]} - \overline{v(x, y)}_{y \in [y_0, y_0-a_y]} \quad (4)$$

其中, $\overline{u(x, y)}_{y \in [y_0, y_0+a_y]}$ 和 $\overline{v(x, y)}_{y \in [y_0, y_0+a_y]}$ 为在尺度 a_y 下沿法向的空间局部平均速度。结合局部平均速度结构函数的概念,可以将低通滤波后的展向涡量表示为:

$$\overline{\omega_z}(a_x, a_y, x_0, y_0) = a_2 - a_3 \quad (5)$$

公式(5)由于采用了空间局部平均低通滤波技术,可以避免湍流小尺度脉动的干扰以及对瞬时速度场直接进行中心插分,计算速度梯度和涡量带入的局部误差,可以比较准确地扑捉大尺度涡结构。

对本实验所获得的流向/法向平面内的瞬时速度空间分布图像(流向、法向脉动速度),分别沿着流向和法向方向进行局部平均速度结构函数的分析,所得到的多尺度空间局部平均速度结构函数云图分布如图 4 所示。图 4(a)、(b)、(c)和(d)均明显呈现出速度应变的分布随尺度增大而表现出连续性。对比流向、法向脉动速度沿流向方向的局部平均速度应变(图 4(a)、(b))和沿 y 方向的局部平均速度应变(图 4(c)、(d)),可以看出,流向脉动速度在流向的局部平均应变空间含能尺度最大,而流向脉动速度在法向上的局部平均结构函数含能尺度与法向脉动速度在流向上的局部平均结构函数的含能尺度相当。

而这样的分布状态也与湍流边界层中沿流向拉伸的等动量条带结构的流向尺度大于其法向尺度相一致。

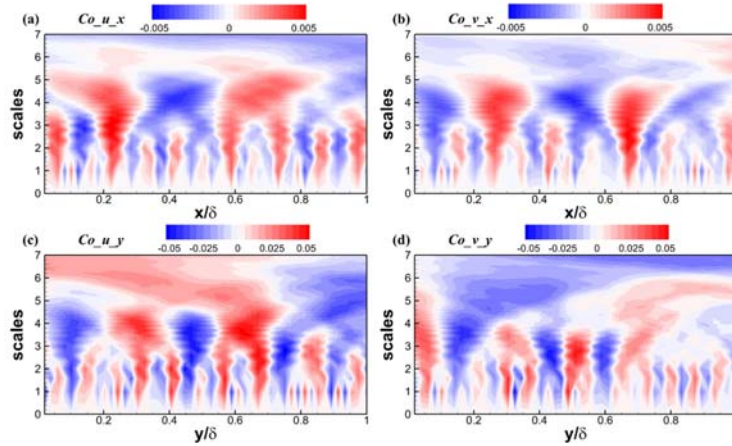


图 4 流向、法向脉动速度分别沿流向、法向方向平均速度应变的云图分布:

- (a) 流向脉动速度沿流向; (b) 法向脉动速度沿流向;
(c) 流向脉动速度沿法向; (d) 法向脉动速度沿法向。

Fig. 4 The contours of the local-averaging velocity (streamwise and wall-normal) strain along the streamwise and wall-normal wise direction, respectively.

- (a) u along streamwise direction; (b) v along streamwise direction;
(c) u along wall-normal wise direction; (d) v along wall-normal wise direction

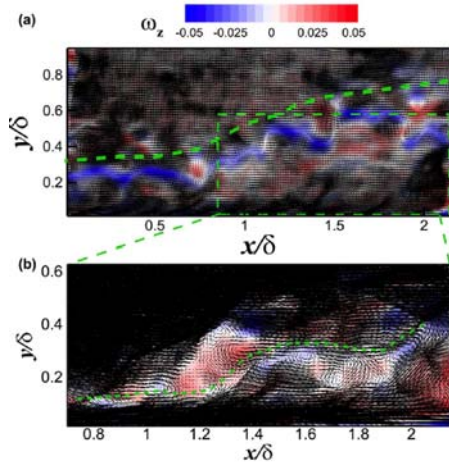


图 5 瞬时速度矢量的分布和运用平均速度结构函数得到的分尺度涡量分布 (a) 外区减去迁移速度 $0.85U_0$; (b) 近壁区减去迁移速度 $0.75U_0$

Fig. 5 Galilean-decomposed instantaneous velocity fields with the constant convection velocity (a) $U_c = 0.85U_0$ and (b) $U_c = 0.75U_0$ removed, as similar as Fig. 3. The contours of the vorticity calculated from the local-averaging velocity strain are shown in the background

出,分尺度的涡量分布和速度矢量分布表明了湍流边界层不同法向高度的区域中都存在发卡涡包结构。

从图 5 瞬时低通滤波涡量及速度场还可以看出,湍流边界层中在远离壁面和近壁的发卡涡包之间存在着红色区域所示的带有正涡量的逆时针旋转的速度矢量分布(如图 5 所示),因此,本文进一步通过

结合局部平均速度结构函数的概念,对图 3 所示的速度场按照公式(5)计算不同空间尺度低通滤波后的展向涡量。图 5 给出了对应于图 4(b)(c)中能量最大的第三尺度(对应空间尺度 8 个速度矢量网格,相当于 72.4 个壁面粘性长度单位,该尺度当地流向速度平均值在外区约为 $U_c = 0.85U_0$,在近壁区约为 $U_c = 0.75U_0$)低通滤波涡量轮廓的瞬时分布情况。对比图 3 中瞬时展向涡量的分布,可以看出低通滤波的涡量轮廓能够更好地识别和捕获发卡涡包中各个顺时针旋转的发卡涡头结构的位置,如图 5(a)中蓝色所代表的负涡量所示,与顺时针旋转的速度矢量基本上完全匹配。这些顺时针旋转的带负涡量的速度矢量基本上呈现闭合趋势,同时可以看出在左下方的矢量均表现出了低速流体以负的脉动速度向左上方运动的喷射事件的特征,进一步证明了发卡涡包结构在湍流边界层中的存在性。而对于减去平移速度 $0.75U_0$ 的情况,基于空间低通滤波的涡量分布也与近壁区域的发卡涡包的涡头相吻合,对涡头结构有很好的识别和提取,如图 5(b)中绿色短划线下方区域所示,这也证明了发卡涡包结构在近壁位置的存在性。从瞬时流场的结果可以看出

空间条件检测和锁相平均的方法来对湍流边界层中的发卡涡包空间拓扑形态进行统计描述. 检测准则如下：

$$D(a_x, a_y, x_0, y_0) = \begin{cases} 1 & \overline{\omega_z} > 0 \text{ 且达到流向局部极大值} \\ -1 & \overline{\omega_z} < 0 \text{ 且达到流向局部极小值} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

分别选取法向高度分别为 $y^+ = 54$ 和 $y^+ = 181$ 的四种检测结果: 1) 法向高度为 $y^+ = 54$, 低通滤波后的展向涡量为负值且达到流向局部极小值; 2) 法向高度为 $y^+ = 181$, 低通滤波后的展向涡量为负值且达到流向局部极小值; 3) 法向高度为 $y^+ = 54$, 低通滤波后的展向涡量为正值且达到流向局部极大值; 4) 法向高度为 $y^+ = 181$, 低通滤波后的展向涡量为正值且达到流向局部极大值。分别进行空间条件锁相平均得到正负发卡涡包结构的统计特征。对于以上四类条件事件检测样本, 以检测中心为坐标原点, 对流向 $-0.4\delta \sim 1.08\delta$ 法向 $0 \sim 0.8\delta$ 的区域进行空间锁相条件平均(检测点不在图的对称中心)。

首先, 选取法向高度为 $y^+ = 54$ 的近壁区低通滤波负涡量达到流向局部极小值进行条件相位平均, 得到的条件平均速度矢量分布如图 6 所示, 可以看出沿着蓝色短划线分布着发卡涡包结构, 包含着多个顺时针旋转(负涡量)的发卡涡头结构(如图 6(a)中蓝色涡量分布所示), 而在发卡涡包结构上方分布着正涡量的, 基本上与发卡涡包有相同倾角的逆时针旋转的涡结构(如图 6(a)中红色涡量分布所示); 其次, 从条件平均的流向脉动速度分布(图 6(b))也能够看出发卡涡包下方压制着相对比较稳定的蓝色所示的低速流体(图 6(b)蓝线下方)。而上方逆时针旋转的涡头结构也卷起了向外区的低速流体(图 6(b)红线上方), 中间的空隙由上游冲下来的高速流体填充。

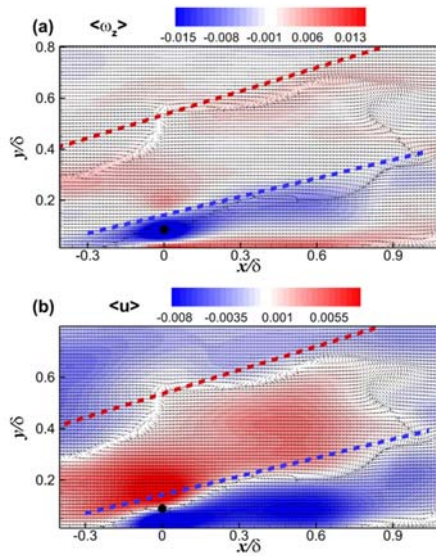


图 6 以法向高度为 $y^+ = 54$ 的负涡量为条件的相位平均矢量分布和(a)涡量;(b)流向脉动速度的分布, 图中黑色圆点为条件事件的位置

Fig. 6 The distribution of the conditional averaged velocity. The locations at $y^+ = 54$ within negative vorticity as conditional event are indicated by solid circles. The contours of conditionally averaged (a) vorticity and (b) streamwise fluctuating velocity are in the background

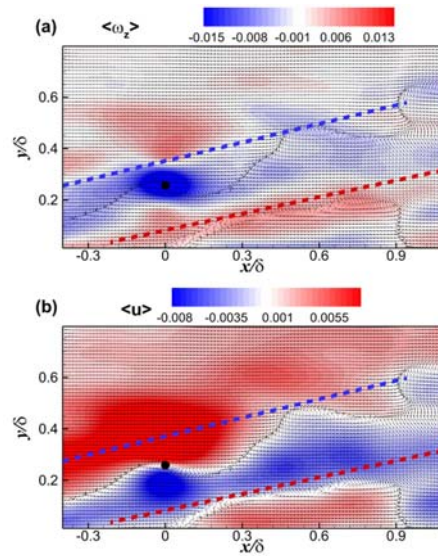


图 7 以法向高度为 $y^+ = 181$ 的负涡量为条件的相位平均矢量分布和(a)涡量;(b)流向脉动速度的分布, 图中黑色圆点为条件事件的位置

Fig. 7 The distribution of the conditional averaged velocity. The location at $y^+ = 181$ within negative vorticity as conditional event are indicated by solid circles. The contours of conditionally averaged (a) vorticity and (b) streamwise fluctuating velocity are in the background

图 7(a)给出了外区 $y^+ = 181$ 以低通滤波负涡量为条件所得到的条件平均的结果。与图 6 不同, 可以看到沿法向多层正负间隔的发卡涡包结构。蓝色短划线所示的负涡量发卡涡包下方还存在带正涡量

的涡包结构(如图 7(a)中红线),该正涡量的发卡涡包下方还存在一个更弱小的带负涡量的涡包结构。负正涡量的涡包之间夹带着低速流体(图 7(b)中的红线上方和蓝线下方),正负涡量的涡包之间夹带着高速流体(图 7(b)中的红线下方和蓝线上方)。

另一方面,基于不同法向高度($y^+ = 54, 181$)的正涡量所得到的空间锁相平均结果如图 8 和图 9 所示。对于近壁位置($y^+ = 54$)的正涡量涡包,得到了如红色短划线所示的倾斜逆时针旋转的正涡包结构(如图 8(a)红线下方所示),另一方面在其上方得到了带负涡量的发卡涡包结构(如图 8(a)蓝线所示),其间夹带着相对比较稳定的低速流体。图 9 给出了基于法向高度 $y^+ = 181$ 正涡量所得到的相位平均结果,与图 7 结果正好相反,在远离壁面的检测位置出现了带正涡量的涡包结构,而在其下方蓝线所在位置出现了携带负涡量的发卡涡包结构,其间夹带着高速流体。负涡量的发卡涡包结构下面还有更弱小的正涡包结构,其间夹带着相对比较稳定的低速流体。

综合图 6、图 7、图 8 和图 9 的结果,发现在湍流边界层中,沿法向分布着多层正负间隔的倾斜发卡涡包结构,负正涡量的涡包之间夹带着低速流体,正负涡量的涡包之间夹带着高速流体。近壁和外区的发卡涡包结构不是孤立存在的,近壁的发卡涡包和外区的发卡涡包及其所夹带的高低速条带流体构成紧密联系的湍流边界层整体。

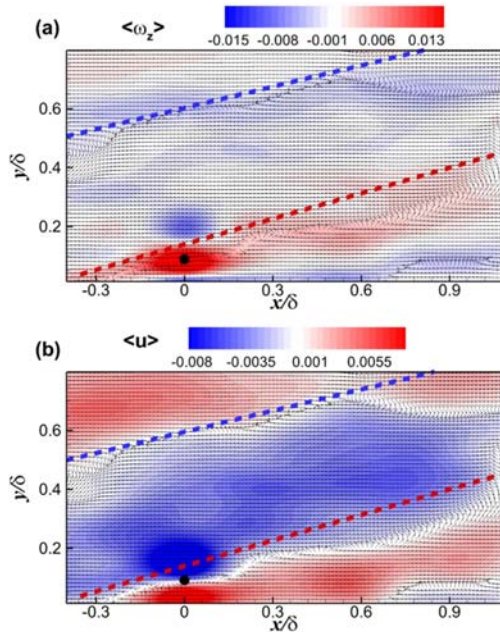


图 8 以法向高度为 $y^+ = 54$ 的正涡量为条件的相位平均矢量分布和(a)涡量;(b)流向脉动速度的分布,图中黑色圆点为条件事件的位置

Fig. 8 The distribution of the conditional averaged velocity. The location at $y^+ = 54$ within positive vorticity as conditional event are indicated by solid circles. The contours of conditionally averaged (a) vorticity and (b) streamwise fluctuating velocity are in the background

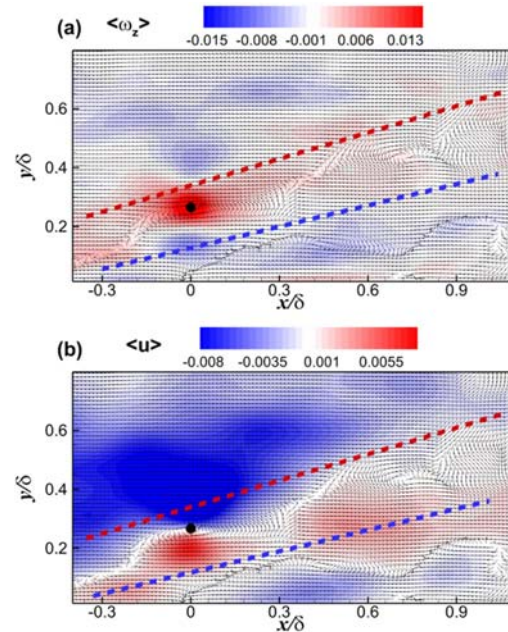


图 9 以法向高度为 $y^+ = 181$ 的正涡量为条件的相位平均矢量分布和(a)涡量;(b)流向脉动速度的分布,图中黑色圆点为条件事件的位置

Fig. 9 The distribution of the conditional averaged velocity. The location at $y^+ = 181$ within positive vorticity as conditional event are indicated by solid circles. The contours of conditionally averaged (a) vorticity and (b) streamwise fluctuating velocity are in the background

4 结论

本文利用 TRPIV 系统,运用空间局部平均速度结构函数的概念,对大量湍流边界层流向/法向平面内的瞬时速度矢量空间分布图像样本进行检测分析,对湍流边界层中占有能量最大的发卡涡包结构进行了识别和提取。并通过空间条件锁相平均的方法,发现在湍流边界层中正负交替的多层发卡涡包

结构同时分布在湍流边界层内不同的法向高度上。负正涡量的涡包之间夹带着低速流体, 正负涡量的涡包之间夹带着高速流体。这些正负交替发卡涡包结构之间通过倾斜的剪切层联系起来, 正负交替的多层发卡涡包结构及其所夹带的高低速条带流体共同构成了湍流边界层中内、外区紧密相连、相互作用的湍流边界层整体。

参考文献:

- [1] Grant H L. The large eddies of turbulent motion[J]. J. Fluid Mech., 1958, 4(2):149—190.
- [2] Sandborn V A. Measurements of intermittency of turbulent motion in a boundary layer[J]. J. Fluid Mech., 1959, 6(2):221—240.
- [3] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F H, Runstadler P W. The structure of turbulent boundary layer[J]. J. Fluid Mech., 1967, 30(4):741—774.
- [4] Brian J Cantwell. Organized motion in turbulent flow[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1981, 13:457—515.
- [5] Robinson S K. Coherent motions in the turbulent boundary layer[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23:601—639.
- [6] Smith C R, Metzler S P. The characteristics of low speed streaks in the near wall region of a turbulent boundary layer [J]. J. Fluid Mech., 1983, 129:27—54.
- [7] Adrian R J. Hairpin vortex organization in wall turbulence[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(4s):041301.
- [8] Ganapathisubramani B, Longmire E K, Marusic I. Characteristics of vortex packets in turbulent boundary layers [J]. J. Fluid Mech., 2003, 478:35—46.
- [9] Marusic I, Hutchins N. Experimental study of wall turbulence: Implications for control[C]. Paper presented at: Transition and Turbulence Control, 2006, Singapore.
- [10] Tomkins C D, Adrian R J. Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers[J]. J. Fluid Mech., 2003, 490:37—74.
- [11] David J C Dennis, Timothy B Nickels. Experimental measurement of large-scale three-dimensional structures in a turbulent boundary layer. Part 1. Vortex packets[J]. J. Fluid Mech, 2011, 673:180—217.
- [12] 唐湛棋, 姜楠. 圆柱尾迹影响旁路转捩末期发卡涡包的研究[J]. 力学学报, 2011, 43(6):1037—1042 (TANG Zhanqi, JIANG Nan. Experimental investigation on hairpin vortex packets in the later stage of bypass transition induced by cylinder wake [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(6):1037—1042(in Chinese))
- [13] 杨绍琼, 姜楠. 湍流边界层空间特征尺度的层析 TRPIV 测量[J]. 实验力学, 2011, 26(4):369—376 (YANG Shaoqiong, JIANG Nan. On the measurement of spatial characteristic scale in turbulent boundary layer based on tomographic time-resolved PIV[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(4):369—376(in Chinese))
- [14] 蒋营营, 管新蕾, 姜楠. 高分子溶液壁湍流减阻机理的 TRPIV 实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4):422—430 (JIANG Yingying, GUAN Xinlei, JIANG Nan. TRPIV experimental investigation on drag-reduction mechanism of polymer solution wall turbulence[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(4):422—430(in Chinese))
- [15] White F M. Viscous Fluid Flow[M]. Washington: McGraw-Hill Press, 1974.
- [16] Christensen K T, Adrian R J. Statistical evidence of hairpin vortex packets in wall turbulence[J]. J. Fluid Mech., 2001, 431:433—443.
- [17] Tang Z Q, Jiang N. Statistical scale of hairpin packets in the later stage of bypass transition induced by cylinder wake[J]. Experiments in Fluids, 2012, 53(2):343—351.

TRPIV Experimental Study of Hairpin Vortex Packet Spatial Mode in Turbulent Boundary Layer

CHENG Lu¹, JIANG Nan^{1,2}

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

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

Abstract: Time series of instantaneous velocity vector spatial distribution in both streamline plane/normal plane of flat plate turbulent boundary layer were measured, respectively, by using high time resolution particle image velocimetry (TRPIV). Space characteristics of large-scale hairpin vortex packets in turbulent boundary layer were identified and extracted based on the concept of space locally averaged velocity structure function. It is found that along different normal positions in turbulent boundary layer from near-wall area to outer layer, multiple positive and negative hairpin vortex packets alternately coexist. These hairpin vortex packet structures distributed in different heights along normal direction are connected each other through tilted vortex shear layer, which enables the middle and inner layer to closely connect with the outer region in turbulent boundary layer and to constitute an interactional steady-state.

Keywords: turbulent boundary layer; high time resolution particle image velocimetry (TRPIV); space locally averaged velocity structure function; hairpin vortex packets