

文章编号: 1001-4888(2011)04-0369-08

湍流边界层空间特征尺度的层析 TRPIV 测量^{*}

杨绍琼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: 利用层析 TRPIV 测量得到的平板湍流边界层三维三分量速度场数据库, 计算得到了平板湍流边界层空间耗散尺度、剪切尺度、泰勒微分尺度、积分尺度等典型空间特征尺度分别为 3~5, 40~100, 20~50, 4000 个壁面单位, 发现耗散尺度随法向位置缓慢增加, 剪切尺度在靠近壁面的区域随法向位置变化不明显, 积分尺度已不随法向位置变化。按照局部平均速度空间变形率的概念, 沿流向分解得到了平板湍流边界层速度场分尺度速度空间变形率。利用空间自相关法得到了平板湍流边界层流向不同尺度涡的空间长度, 研究发现小尺度情况下, 涡结构的尺度随法向位置增大, 且在近壁面, 展向尺度与流向尺度相当, 在湍流边界层外边界之外, 涡结构的尺度逐渐趋于相等; 大尺度的情况下, 平板湍流边界层中涡结构的尺度随着法向位置先增加, 然后有一个缓慢增加的过程, 且总是流向尺度大于展向尺度, 法向尺度最小。

关键词: 湍流边界层; 时间解析粒子图像测速; 局部平均速度应变; 空间自相关; 空间尺度

中图分类号: O357.5 **文献标识码:** A

0 引言

湍流是多尺度、多层次、有结构的运动^[1], 在湍流复杂的多尺度系统中, 不同尺度结构的功能是不一样的。其中最大尺度可以与平均运动的特征尺度同量级, 用积分尺度作为其特征尺度。而耗散尺度表征了脉动中的最小尺度, 表示该尺度的脉动动能在分子粘性的作用下转化为热能。根据湍流信号空间关联函数计算得到的 Taylor 微分尺度, 表征了湍流产生的可识别影响的最小尺度涡的长度尺度。另外, 由于剪切湍流平均流场存在梯度, 在平均速度梯度的作用下, 产生的涡结构翻转的尺度定义为剪切尺度。尽管湍流中的结构是多尺度的, 但至今只用量纲分析的方法对湍流中不同尺度的结构进行尺度上的大致量级分析, 而对于湍流中不同时空尺度的测量及其在湍流系统中的功能还缺乏系统的定量研究^[2]。姜楠等人用热线风速仪对湍流边界层中微小尺度流动结构的时间尺度进行了精细实验测量^[3], 研究了时间尺度沿平板湍流边界层法向位置的变化规律。

局部平均速度结构函数的概念, 在物理上和湍流多尺度结构空间变形的概念是十分吻合的, 它可以描述不同尺度的涡结构在不同的空间分辨率下各方向的拉伸、压缩、剪切、旋转等局部空间变形, 它是对流体微元速度空间变形率概念的推广与发展。其中流向脉动速度的流向局部平均结构函数描述了涡结构的拉伸和压缩变形运动^[4-6], 同时也是对流向脉动速度的带通尺度分解。根据 J. L. Lumley (1971)^[7]所设想的涡的概念, 可以用单一尺度涡的脉动速度自相关函数波动的波长(两相邻波峰

^{*} 收稿日期: 2011-04-07; 修回日期: 2011-05-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(批准号: 10832001); 面上项目(批准号: 10872145); 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室对外开放课题; 天津大学科研创新基金项目资助

通讯作者: 姜楠(1968—), 男, 博士生导师, 教授。主要研究领域: 湍流、流动稳定性、实验流体力学。E-mail: nanj@tju.edu.cn

或波谷之间的距离)作为湍涡的尺度。

高速 Tomo-TRPIV (Tomographic time-resolution Particle Image Velocimetry, 层析高时间分辨率粒子成像测速)^[8-9]是新近发展起来的测量流体三维三分量(3D-3C)速度场的先进技术。首先,用立体激光光源照射三维流场中的示踪粒子,使用多个 CCD 照相机从多个角度同时拍摄 t 和 $t+\Delta t$ 时刻的粒子散射图像,再利用多个粒子图像的二维投影中的光强分布重构出粒子散射光强的三维分布。通过相邻时间的两次重构粒子光强分布,用三维互相关技术计算选定的查询窗口中的粒子位移和相应的三分量速度的三维空间分布。

湍流中多尺度结构包含着湍流运动中丰富的信息,将湍流脉动信号分解成不同尺度的运动进行深入研究,可以为湍流大涡模拟网格滤波尺度的选择和亚格子尺度模型的建立提供重要的依据。同时对于理解湍流的多尺度物理机理,发展湍流理论,建立符合湍流物理机理的工程湍流模式具有重要意义。

本文利用层析 PIV 技术测量得到的平板湍流边界层速度矢量场空间分布数据库^[10],根据局部平均速度空间变形率的概念,沿流向分解得到了平板湍流边界层速度场分尺度速度空间变形率。利用空间自相关法得到了平板湍流边界层流向不同尺度湍涡的空间长度。研究了不同尺度的湍涡的空间特征长度随平板湍流边界层法向位置的变化规律以及湍涡的空间特征长度与耗散尺度、剪切尺度、泰勒微分尺度、积分尺度等典型特征尺度的关系。

1 实验设备、技术与基本流场

实验在低速水洞中进行,在平行于来流,垂直于底面的方向插入一块有机玻璃光滑平板,获得自由来流速度为 0.53m/s 的湍流边界层。平板长 250cm ,宽 80cm ,椭圆形前缘,通过调节后缘板达到零压力梯度。在平板观测一面的前缘下游 150mm 处沿展向贴锯齿形条带。实验平板及测量体位置参数如图 1 所示。

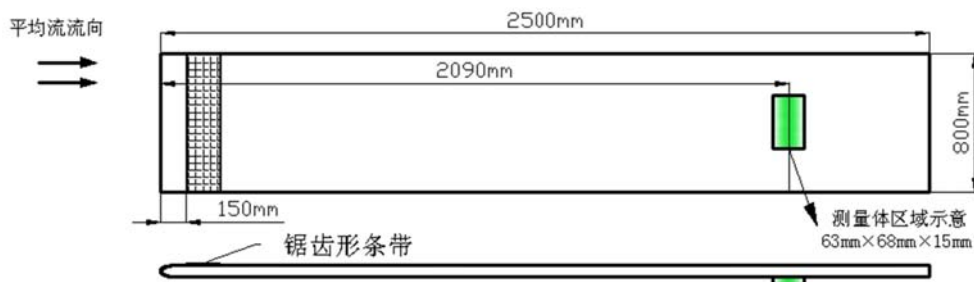


图 1 实验平板及测量体参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental plate and measurement volume parameters

为了在测量点触发厚 38mm 的湍流边界层,对应的动量损失厚度雷诺数 $Re_\theta = 2460$ 。流动的温度控制保持常数,自由来流的湍流度低于 0.5% 。图 2 给出了用壁面摩擦速度无量纲化的半对数时均速度剖面。由于测量技术的限制,线性速度剖面的粘性底层没有被检测到,缓冲层($z^+ = 13 \sim 28$)、对数律层($z^+ = 28 \sim 283$)和尾流层($z^+ = 283$ 以后)可以根据它们各自的特征曲率从速度剖面上分辨。实验第二步使用层析 PIV 系统以平板前缘下游 2090mm 处为中心,以 1kHz 的频率照亮 x 、 y 和 z 方向(x 为壁面流向, y 为展向, z 为法向)大小约为 $63\text{mm} \times 68\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的测量体,相当于 $1380 \times 1490 \times 328$ 壁面单位。以 1kHz 的频率拍摄 2s 得到 2040 幅流动图像。用 DaVis7.3 软件和 MART 层析方法^[8],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 B. Wieneke^[11]提出的方法进行了观测体自标定,最后得到 1023 个瞬时三维速度场,每个瞬时三维速度场包含 $92 \times 99 \times 22$ (200376) 个空间测量点,相邻测量点在每个空间方向步长 0.687mm ,对应 15 个壁面粘性单位。

2 数据分析与结果

X-Y 水平面内的平均速度为:

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} u(i, j, k)}{N_x \times N_y}, \quad \bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} v(i, j, k)}{N_x \times N_y}, \\ \bar{w} &= \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} w(i, j, k)}{N_x \times N_y}\end{aligned}\quad (1)$$

其中 $u(i, j, k), v(i, j, k), w(i, j, k)$ 为空间三维三分量速度场的瞬时速度; i, j, k 分别对应流向、展向、展向测点; 空间流向测点数 $N_x=92$, 空间法向测点数 $N_y=99$ 。

脉动速度为:

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v}, \quad w' = w - \bar{w} \quad (2)$$

湍流粘性耗散率:

$$\bar{\epsilon}(z^+) = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \epsilon_s}{N_x \times N_y} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_s = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon_{ij}$, $\epsilon_{ij} = \nu \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right] \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right]$, ν 为运动粘性系数。具体计算时用二次中心差分法求脉动速度各个方向的梯度。

通过量纲分析可以将 Kolmogorov 耗散尺度与平均能量耗散率联系起来:

$$\bar{\eta}(z^+) = \left[\frac{\nu^3}{\bar{\epsilon}(z^+)} \right]^{1/4} \quad (4)$$

由于湍流边界层平均流场的非均匀性, 平均流场存在平均剪切率, 它是流向平均速度 $\bar{u}(z^+)$ 沿法向 z^+ 的梯度:

$$S(z^+) = \frac{\partial \bar{u}(z^+)}{\partial z^+} \quad (5)$$

根据文献[2], 可以用 $\bar{\epsilon}(z^+)$ 和 $S(z^+)$ 定义剪切尺度 $L_s(z^+)$:

$$L_s(z^+) = \left[\frac{\bar{\epsilon}(z^+)}{S(z^+)^3} \right]^{1/2} \quad (6)$$

根据文献[2], 泰勒微分尺度定义如下:

$$\lambda = (-f''(0))^{-1/2} = \left[\frac{r^2}{2(1-f(r))} \right]^{1/2} \quad (7)$$

其中 $f(r) = \frac{\overline{(U(x+r) - \bar{U})(U(x) - \bar{U})}}{(\overline{U(x) - \bar{U}})^2}$ 是流向脉动速度的自相关系数。这里取速度 U 对应空间的三个分量 u, v, w 代入公式计算, 即可以得到空间三个方向上的泰勒微分尺度。

湍流积分尺度的计算公式如下:

$$L = \int_0^\infty f(r) dr \quad (8)$$

分别利用公式(4)、(6)、(7)、(8)沿瞬时速度场中每一条流线计算, 并经过 99 条同一瞬时速度场流线和 1023 个瞬时流场平均, 得到耗散尺度、剪切尺度、泰勒微分尺度、积分尺度, 用壁面内尺度粘性单位无量纲化, 如图 3、图 4、图 5、图 6 所示。从图 3 发现, 平板湍流边界层中用粘性尺度无量纲化得到的耗散尺度在 3~4 壁面粘性单位之间, 并随法向位置缓慢增加。图 4 中, 平板湍流边界层中用粘性尺度无量纲化得到的剪切尺度比耗散尺度大一个量级, 在 40~100 壁面粘性单位之间。在对数律区随法向位置缓慢增大。图 5 给出流向、展向和法向三个速度分量的泰勒微分尺度大约为 20~50 个壁面粘性单

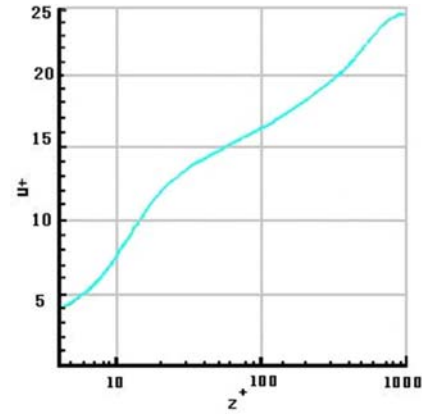


图2 基于动量损失厚度雷诺数为 2460 的湍流边界层时均速度剖面

Fig. 2 Mean velocity profile of turbulent boundary layer at $Re_\theta \sim 2460$ based on momentum thickness

位。从图 6 中可以看见,湍流边界层中用粘性尺度无量纲化积分尺度大致在 4000 壁面粘性单位的量级,是平板湍流边界层中的最大尺度,已不再随法向位置变化。

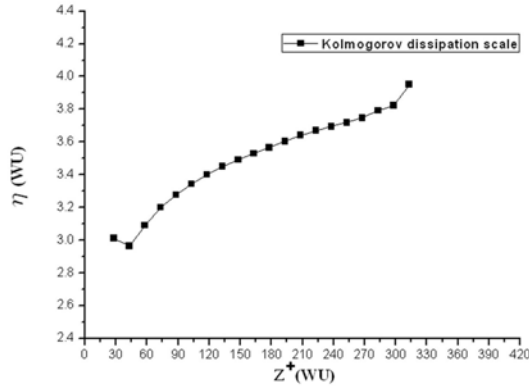


图 3 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化耗散尺度与法向位置 z^+ 的关系

Fig. 3 Relationship between dimensionless dissipation scale by viscous scale with z^+ in turbulence boundary layer

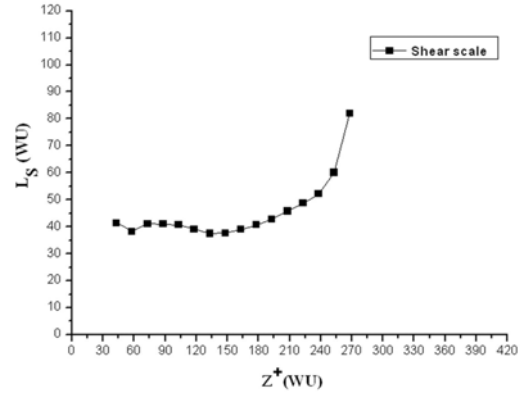


图 4 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化剪切尺度与法向位置 z^+ 的关系

Fig. 4 Relationship between dimensionless shear scale by viscous scale with z^+ in turbulence boundary layer

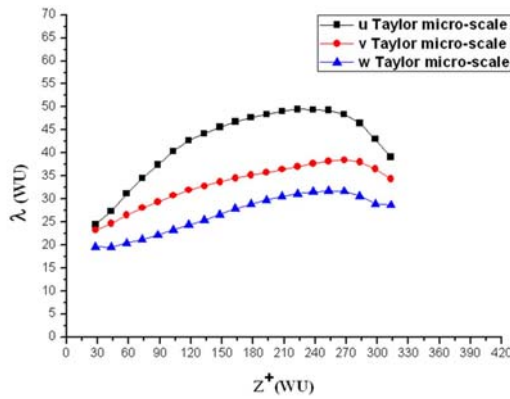


图 5 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化泰勒微分尺度与法向位置 z^+ 的关系

Fig. 5 Relationship between dimensionless Taylor micro-scale by viscous scale with z^+ in turbulence boundary layer for three velocity components

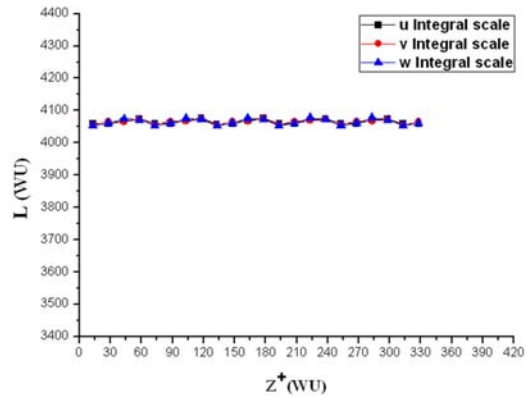


图 6 湍流边界层中用粘性尺度无量纲化积分尺度与法向位置 z^+ 的关系

Fig. 6 Relationship between dimensionless integral scale by viscous scale with z^+ in turbulence boundary layer for three velocity components

将湍流局部平均速度结构函数的概念向三维扩展,即可得到湍流场的空间局部平均应变:

$$\begin{aligned}\partial u_x(x_0, l) &= \overline{u(x, y, z)}_{x \in [x_0, x_0+l]} - \overline{u(x, y, z)}_{x \in [x_0-l, x_0]} \\ \partial v_x(x_0, l) &= \overline{v(x, y, z)}_{x \in [x_0, x_0+l]} - \overline{v(x, y, z)}_{x \in [x_0-l, x_0]} \\ \partial w_x(x_0, l) &= \overline{w(x, y, z)}_{x \in [x_0, x_0+l]} - \overline{w(x, y, z)}_{x \in [x_0-l, x_0]}\end{aligned}\quad (9)$$

公式(9)表示各速度分量沿流向的带通滤波。公式中第一项 $\overline{u(x, y, z)}_{x \in [x_0, x_0+l]}$ 是以流向坐标为 $x_0 + \frac{l}{2}$ 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,表示该处流向尺度为 l 的湍涡的流向平均迁移速度;第二项 $\overline{u(x, y, z)}_{x \in [x_0-l, x_0]}$ 则是对以流向坐标为 $x_0 - \frac{l}{2}$ 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,表示该处流向尺度为 l 的湍涡的流向平均迁移速

度。 $\partial u_x(x_0, l)$ 的物理意义即为沿流向尺度为 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。第二式 $\partial v_x(x_0, l)$ 表示尺度为 l 的两个流向相邻湍涡沿展向的相对运动引起的变形,第三式 $\partial w_x(x_0, l)$ 表示尺度为 l 的两个流向相邻湍涡沿法向的相对运动引起的变形。

根据脉动速度流向空间自相关函数,将沿流向进行尺度分解得到的分尺度速度分量进行空间自相关分析,得到流向自相关函数曲线的波长(两相邻波峰或波谷之间的距离)作为湍涡的流向空间长度。对1023个瞬时速度场空间样本进行平均,得到了三个速度分量6个尺度随法向位置的变化,如图7(a)(b)(c)所示。从图7(a)(b)(c)可以看出,平板湍流边界层中湍涡结构三个速度分量的流向长度都随着分解尺度的增大而逐渐增大。

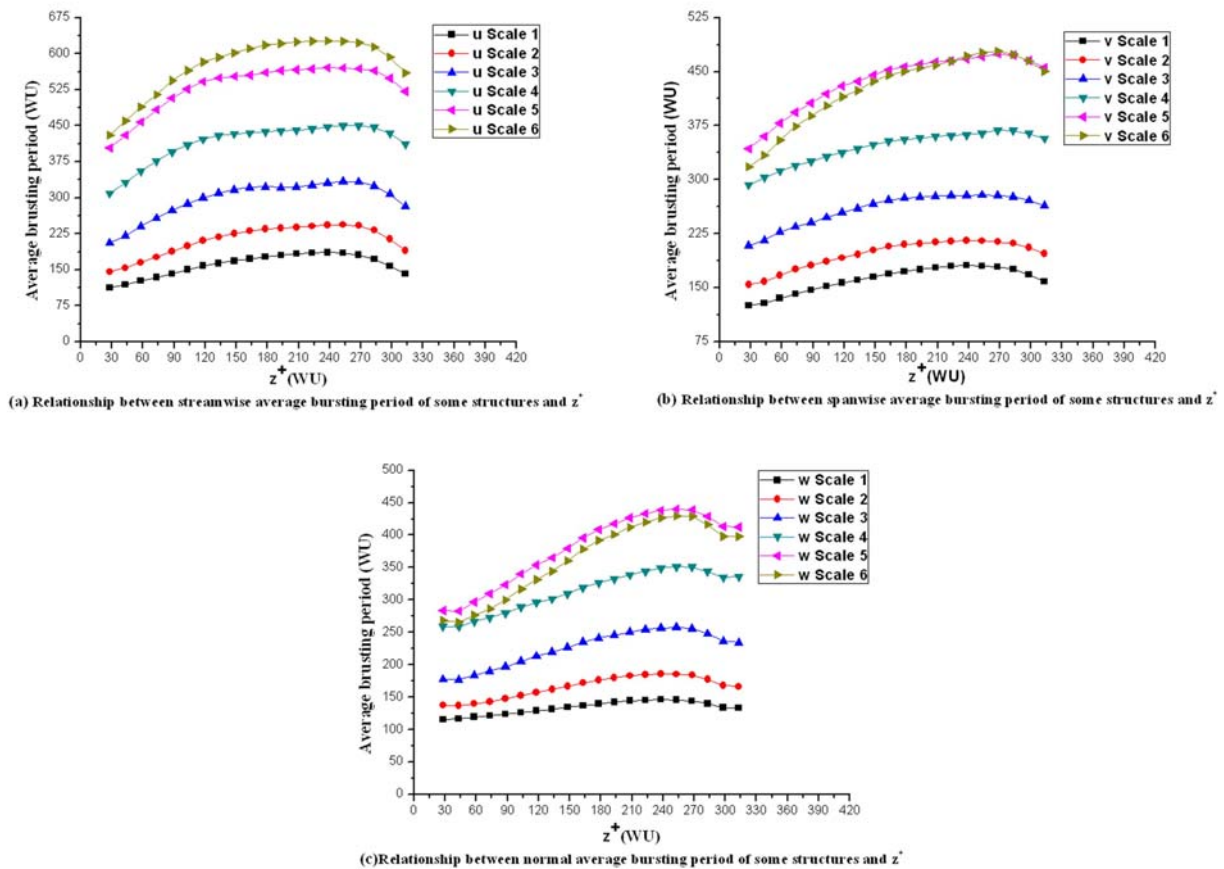


图7 平板湍流边界层中的涡结构分尺度空间长度随法向位置 z^+ 的关系

Fig.7 Relationship between spatial length for multi-scale eddy from three velocity components with z^+ in turbulent boundary layer

为了进一步研究平板湍流边界层中各速度分量流向分解尺度随平板湍流边界层法向位置的变化规律,以及不同速度分量变化规律的差异,图8给出各速度分量流向长度随边界层法向的变化规律。从图8(a)(b)可以看出,在第1,2小尺度,湍涡结构的尺度在近壁缓冲区和大部对数律区随法向的增加而增大,流向速度尺度增长快,展向和法向速度的尺度增长慢;在出了湍流边界层外边界以后,湍涡结构逐渐趋于各向同性,空间尺度逐渐趋于相等,这与剪切逐渐减弱,湍流逐渐趋于均匀各向同性有关。而且还可以看出在近壁缓冲区,展向尺度与流向尺度相当,说明近壁区涡结构的展向运动比较剧烈,这主要是由于近壁区域的相干结构的展向剧烈脉动引起的。

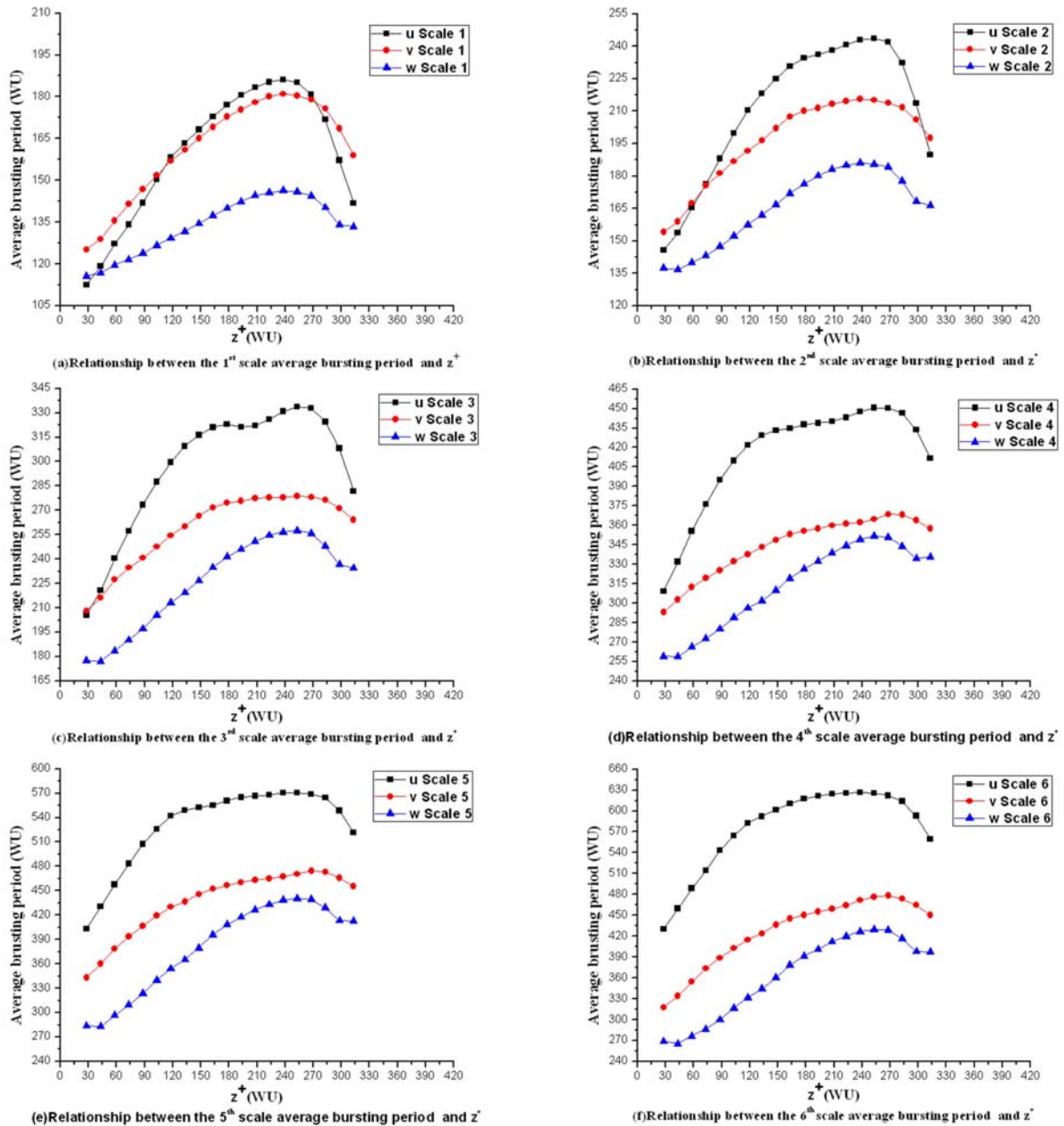


图 8 平板湍流边界层中涡结构的分尺度空间长度随法向位置 z^+ 的关系

Fig. 8 Relationship between spatial length for multi-scale eddy from three velocity components with z^+ in turbulent boundary layer

3 结论

本文使用平板湍流边界层 Tomo-TRPIV 数据库,对低速水槽中零压力梯度平板湍流边界层中湍流结构的流向空间尺度进行了定量研究,得到了不同尺度湍流结构的流向长度随平板湍流边界层法向的变化规律,以及平板湍流边界层空间耗散尺度、剪切尺度、泰勒微分尺度、积分尺度随平板湍流边界层法向位置的变化规律,并有如下结论:

1) 平板湍流边界层中耗散尺度大约相当于 3~5 个壁面粘性单位,随法向位置缓慢增加,它是湍流边界层中的最小尺度;平板湍流边界层中剪切尺度比耗散尺度大一个量级,大约为 40~100 个壁面粘性单位,代表由于平均速度梯度引起的湍流展向旋转的直径,在靠近壁面的区域随法向位置变化不明显;

泰勒微分尺度大约为 20~50 个壁面粘性单位;湍流边界层积分尺度是平板湍流边界层中的最大尺度,大约相当于 4000 个壁面粘性单位,是粘性耗散尺度的 1000 倍,不随法向变化。

2) 小尺度的情况下,湍流结构的尺度总体上沿法向增大;在离壁面较近的地方,展向尺度与流向尺度相当;在出了湍流边界层外边界以后,湍流结构逐渐趋于各向同性,空间尺度逐渐趋于相等。在大尺度的情况下,平板湍流边界层中湍流结构的尺度随着法向位置先增加,然后有一个缓慢增加的过程,流向速度尺度增长快,展向和法向速度的尺度增长慢,并且总是流向尺度大于展向尺度,法向尺度最小。

致谢: 德国国家航空中心(DLR)空气动力与流动技术研究所(Institute of Aerodynamics and Flow Technology)为本文的工作提供了实验数据和实验技术上的指导和帮助,特此致谢。

参考文献:

- [1] 舒玮,姜楠. 湍流中涡的尺度分析[J]. 空气动力学报, 2000, 18(增刊): 89—95 (SHU Wei, JIANG Nan. Eddy Scale Analysis in Turbulence[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(supplement): 89—95(in Chinese))
- [2] LANDAU L D, LIFSHITZ E M. Fluid Mechanics [M]. London: Pergamon Press, 1963.
- [3] 姜楠,王瑞新. 湍流边界层中微小尺度流动结构的精细实验测量[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(5): 644—648 (JIANG Nan, WANG Rui-xin. Finely experimental measurement of micro-scale flow structures in turbulent boundary layer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(5): 644—648 (in Chinese))
- [4] JIANG Nan, LIU Wei, LIU Jian-hua, 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.
- [5] LIU Wei, JIANG Nan. Three kinds of velocity structure function in turbulent flows[J]. Chinese Physics Letter, 2004, 21(10): 1989—1992.
- [6] LIU Jian-hua, JIANG Nan, WANG Zhen-dong, 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.
- [7] Tennekes H, Lumley J L. A First Course in Turbulence [M]. M. I. T. Press Cambridge, Massachusetts and London, England, 1972.
- [8] Elsinga G E, Scarano F, Wieneke B, et al. Tomographic particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2006, 41: 933—947.
- [9] Elsinga G E, Wieneke B, Scarano F, et al. Assessment of Tomo-PIV for three-dimensional flows[C]//Proceedings of 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry Pasadena, California, USA, September 21-23, 2005.
- [10] Schroder A, Geisler R, Staack K, et al. Lagrangian and Eulerian views into a turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV[C]//14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, June 7-10, 2008.
- [11] Wieneke B. Volume self-calibration for Stereo PIV and Tomographic PIV[C]//Proceedings of PIV'07, Rome, September 11-14, 2007.

On the Measurement of Spatial Characteristic Scale in Turbulent Boundary Layer Based on Tomographic Time-resolved PIV

YANG Shao-qiong¹, JIANG Nan^{1,2}

(1. Dept. of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

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

Abstract: Typical characteristic spatial scales, such as dissipation scale, shear scale, Taylor micro-scale and integral scale etc. in turbulent boundary layer at $3 \sim 5$, $40 \sim 100$, $20 \sim 50$ and 4000 wall-units, respectively, were calculated by using the 3D-3C database of time series of spatial velocity field measured by tomographic time-resolved PIV. Results show that dissipation scale slowly increases along the wall normal position upwards; while the shear scale in the near wall region does not change significantly with the normal position; the integral scales do not change with the normal position. Multi-scale velocity spatial strain rates along streamwise direction in the velocity field of turbulent boundary layer were obtained according to the concept of spatial strain rates of local average velocity. The spatial lengths in streamwise direction of multi-scale eddies were acquired by using method of spatial auto-correlation. In terms of the small-scale cases, the spatial characteristic lengths of multi-scale eddies are roughly equal along the streamwise and spanwise direction near the flat plate. Then these spatial lengths of eddies increase in general along the wall normal position upwards. However, at outer region of turbulent boundary layer, these spatial lengths gradually become equal. In the large-scale cases, these spatial lengths of eddies increase firstly along the normal position, and then there is a slower increase trend. Furthermore, the streamwise lengths are always greater than spanwise lengths, with the normal lengths minimum.

Keywords: turbulent boundary layer; tomographic time-resolved PIV; locally average velocity strain; spatial auto-correlation; spatial scale