

# 壁湍流相干结构雷诺应力的空间拓扑特征

姜楠<sup>1,2,3,4</sup>, 管新蕾<sup>1</sup>, 王维<sup>1</sup>, 成璐<sup>1</sup>

(1. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072; 2. 天津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; 4 南开大学天津大学刘徽应用数学中心, 天津 300072)

**摘要:** 利用PIV技术对壁湍流相干结构雷诺应力的特征进行了实验研究。测量了水槽中充分发展的平板湍流边界层瞬时速度场的长时间时空序列数据库。分析了雷诺应力不同分量沿平板湍流边界层法向的平均统计分布。另外, 运用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。对湍流脉动速度信号沿流向进行空问多尺度分解。根据基于空问局部平均多尺度速度结构函数提出的湍流相干结构条件采样方法, 检测并提取了PIV数据中相干结构“喷射”和“扫掠”事件中的平均速度变形率、雷诺应力等物理量的空问拓扑形态。

**关键词:** 壁湍流; 相干结构; 雷诺应力; 空问拓扑; 局部平均速度结构函数

## 0 引言

相干结构是湍流边界层中的大尺度拟序脉动结构, 在时间和空问上具有自组织特性和拟序特性<sup>[1,2]</sup>。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, 为认识湍流的本质开辟出新的途径。现在已经公认, 相干结构是湍流中的重要结构, 是湍流的产生、维持、演化、发展的主要机制, 对湍流中雷诺应力的产生和质量、动量、能量的输运起着非常重要的作用。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, 在工程中更加准确的预报湍流, 探索通过控制相干结构控制湍流的有效途径。

以往流场瞬时速度测量多采用空问单点的欧拉

方法。基于热线测速技术(HWA)或者激光多普勒测速技术(LDV)的空问单点速度时间序列测量, 不能得到相干结构的空问形态<sup>[3,4]</sup>。相对于空问单点的测量数据, 广泛使用的条件采样检测方法有象限分裂法、VITA法、mu-level法<sup>[5]</sup>等。

条件采样方法有两个共同的局限性, 即确定检测门限值的主观经验依赖性和小尺度湍流脉动对检测结果的影响。为了弥补这些缺陷, 姜楠等人<sup>[6]</sup>提出了用局部平均速度结构函数描述特定尺度湍流结构的局部变形和相对运动。一维的局部平均速度结构函数定义为:

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

其中,  $l$  为沿流向的变形尺度范围。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,

基金项目: 国家自然科学基金项目(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国家重点实验室对外开放课题联合资助项目。

作者简介: 姜楠(1968-), 男, 河南开封, 天津大学力学系教授、博导, 主要从事湍流及流动稳定性的实验研究。E-mail: [nanj@tju.edu.cn](mailto:nanj@tju.edu.cn)。

此时流向脉动速度信号下降到局部极小值，其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，mu-level 法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，其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。为此，基于空间局部平均结构函数的壁湍流相干结构检测函数定义为：

$$D(x_0, l) = \begin{cases} 1(\text{ejection}) & \delta u_x(x_0 - \Delta x, l) < 0 \ \& \ \delta u_x(x_0 + \Delta x, l) > 0 \\ -1(\text{sweep}) & \delta u_x(x_0 - \Delta x, l) > 0 \ \& \ \delta u_x(x_0 + \Delta x, l) < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\Delta x$  表示沿流向的网格步长。检测其中的“喷射”和“扫掠”事件后，运用空间条件相位平均方法，即可提取“喷射”和“扫掠”事件各湍流特征量的相位平均波形<sup>[7]</sup>。

最近，杨绍琼等<sup>[8]</sup>基于 Tomo-TRPIV 数据库，利用湍流局部平均结构函数的概念，获得了相干结构的平均速度、速度梯度、涡量、速度变形率等一阶统计平均量的空间形态，但由于该数据库的测量时间太短，样本量不够多，不能得到雷诺应力等二阶统计平均量的空间平均形态。

本文利用 PIV 系统，通过长时间测量水槽中充分发展的平板湍流边界层流场，获得平板湍流边界层流场长时间序列时-空数据库。分析了雷诺应力不同分量沿平板湍流边界层法向的平均统计分布。并用空间局部平均速度结构函数对湍流脉动速度进行了空间多尺度分解。根据湍流多尺度涡结构在流向的拉伸和压缩物理特征，检测并提取了 PIV 数据中相干结构“喷射”和“扫掠”事件中雷诺应力和平

均速度变形率等物理量的空间拓扑形态。

## 1 实验设备与测量技术

实验在 SZ-2 型开口式循环水槽中进行，如图 1 所示。水槽实验段长 130cm，宽 14cm，深 15cm。平板尺寸 100cm×13cm×1cm，水平放置于水槽底部，边界层在的平板上表面发展，平板前缘按 4:1 的半椭圆修形。为确保观测处的湍流已充分发展，在平板前缘下游安置了拌线。实验时水槽自由来流速度为 24cm/s，测点当地的边界层厚度 27.3mm，基于边界层名义厚度的雷诺数  $Re_\delta = 6510$ 。

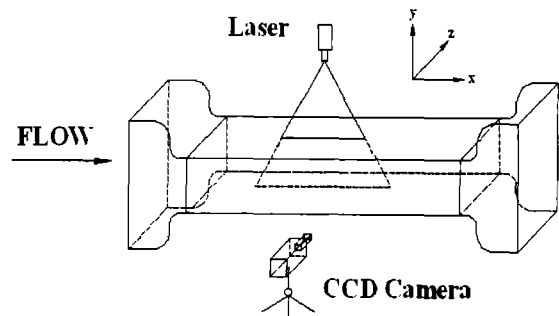


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental set-up

实验使用立方天地 PIV 系统对流向-法向瞬时速度场进行测量，该系统由激光片光源和 Kodak's KAI-0340 Interline transfer CCD 高速相机组成。激光片光源从水槽上方沿流向照亮流场，厚度为 1mm，光平面处于水槽中心。在流场中布撒粒径为 10 $\mu$ m 的空心玻璃微珠作为示踪粒子散射激光。测量区域位于前缘下游 0.9m 处。CCD 相机从水槽侧面记录粒子图像。镜头的分辨率 640×480，拍摄速度 200fps，拍摄了 40000 个时间样本，测量时间为 200 秒。图像的可视范围为 43.23mm×33.14mm（流向×法向）。对原始粒子图像进行处理时所选择的查询窗口为 32×16pix<sup>2</sup>，迭代步长为 8pix，最终在所

测的二维平面内得到的  $77 \times 53$  个速度信息。

## 2 实验结果分析

图2所示为流场的流向平均速度的剖面, 拟合的规律为经典的对数律分布  $u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B$ , 其中  $u^+ = \frac{u}{u_*}$ ,  $y^+ = \frac{y u_*}{\nu}$ ,  $u_*$  为壁面摩擦速度,  $\nu$  为常温下水的运动粘度,  $\kappa$  取0.41,  $B$  取4.9。通过拟合得到的壁面摩擦速度为1.22cm/s, 为来流速度的5.1%左右。由图可见, 测量得到的无量纲剖面与对数律符合较好。

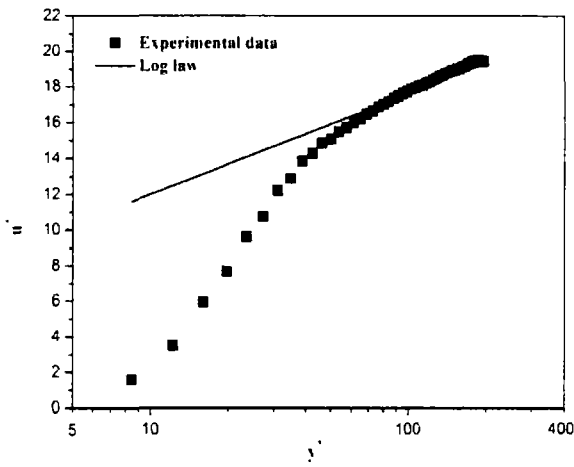


图2 平均速度剖面

Fig. 2 Mean velocity profile

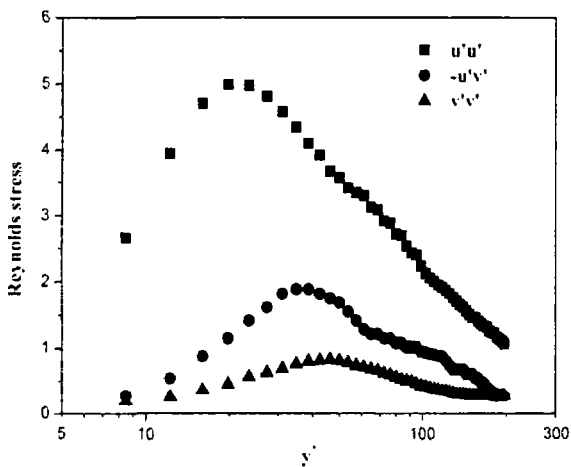


图3 雷诺应力的法向分布

Fig. 3 Distribution of Reynolds stress in wall-normal direction

对瞬时速度进行统计分析可得三个雷诺应力分量沿平板湍流边界层法向的分布, 如图3所示。图中流向位置与图2相同。壁面坐标用无量纲坐标  $y^+$  表示, 雷诺应力用壁面摩擦速度  $u_*$  的平方无量纲化。

三个雷诺应力分量  $\overline{u'^2}$ 、 $-\overline{u'v'}$ 、 $\overline{v'^2}$  在数值上均先取得最大值后逐渐减小, 但其峰值依次减小, 并依次远离壁面。

用空间局部平均多尺度速度结构函数对湍流流向脉动速度图像进行了空间多尺度分解, 共分解 4 个尺度, 即得到 4 个尺度的空间局部平均多尺度结构函数  $\delta u_x(x_0, l)$ 。从中选取满足条件(2)的空间位置, 检测的区域为  $21 \times 21$  个网格长度。将这些矩形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、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, 空间长度约为 9.102mm。

图4是相干结构喷射时雷诺应力和平均速度变形率各分量的等值面图。图中物理量  $R_{ij}$  分别表示雷诺应力分量  $\langle u'_i u'_j \rangle$ , 与之相对应的速度变形率为  $\frac{1}{2} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)$ 。从图中可以看到相干结构猝发时, 平均速度变形率和雷诺应力具有相似但又不完全相同的空间形态。平均速度变形率多表现为空间四极子结构, 且符号有正负之区分; 雷诺应力表现为二极子结构, 符号一致。对于喷射和扫掠过程, 这类反对称的空间拓扑结构在脉动速度、速度梯度和涡量等湍流特征量中均普遍存在。

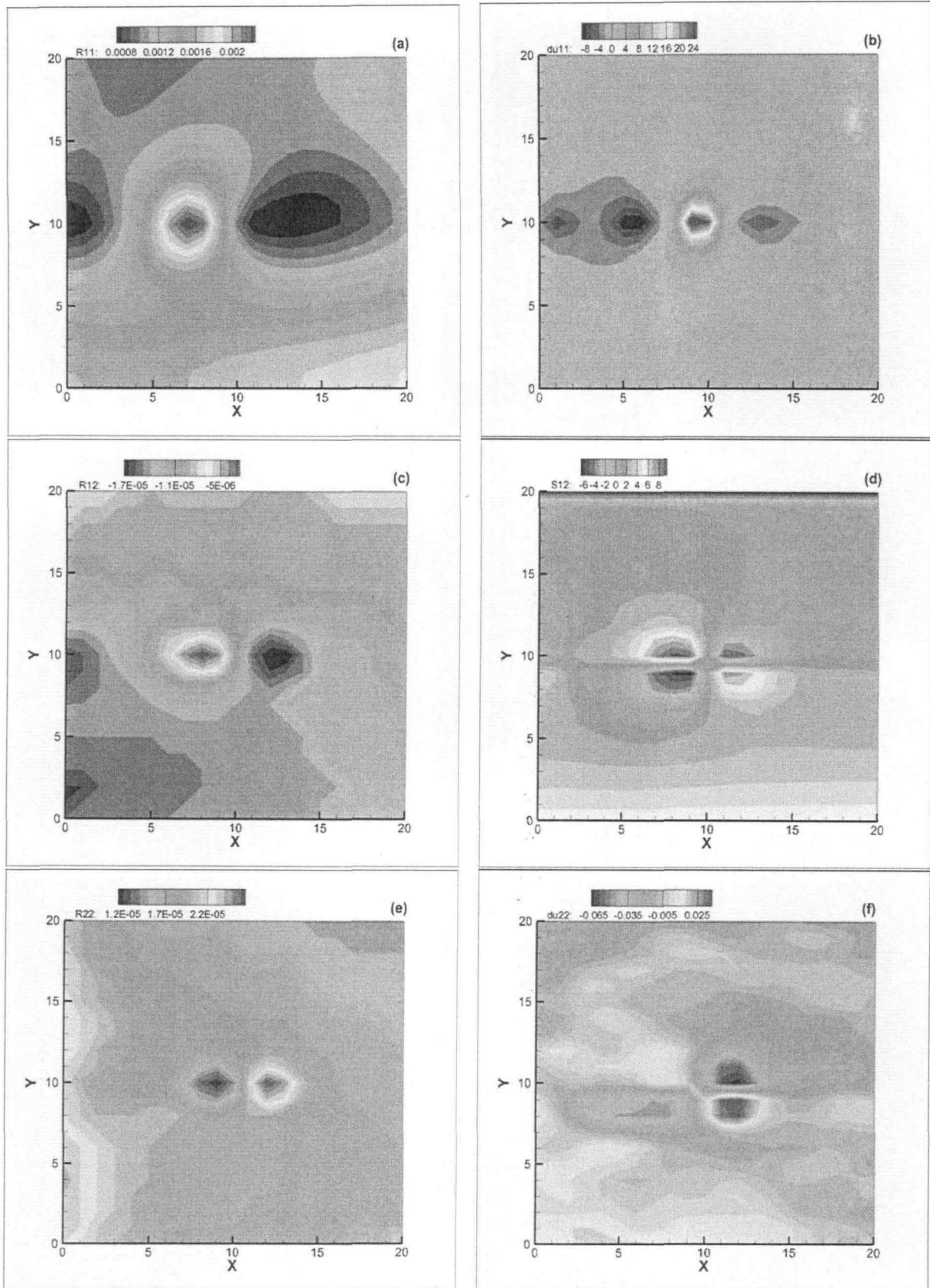


图4 喷射过程雷诺应力和平均速度变形率各分量的空间相位分布

Fig.4 Spatial distribution of Reynolds stress and mean velocity strain rate components during ejection

### 3 结 论

本文对水槽中充分发展的平板湍流边界层流场进行 PIV 测量研究。所得到的流向速度剖面与对数率符合的很好。分析了雷诺应力三分量沿边界层法向的分布, 三者的趋势相同, 但其峰值的数值与位置不同。并且利用多尺度空间局部平均速度结构函数的新概念, 检测并提取了相干结构喷射和扫掠的平均速度变形率、雷诺应力的空间拓扑结构。雷诺应力和平均速度变形率都呈现出反对称的结构但又不完全相同。雷诺应力表现为二极子结构, 符号一致; 平均速度变形率多表现为空间四极子结构, 且符号有正负的区别。

#### 参 考 文 献:

[1] Elsinga G. E. and Marusic I. Evolution and lifetimes of flow topology in a turbulent boundary layer [J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22: 015102.

- [2] Schroder A., Geisler R., Staack K. Eulerian and Lagrangian views of a turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV. *Experiments in Fluids*, 2011, 50: 1071-1091.
- [3] JIA Yong Xia, TANG Zhan Qi, JIANG Nan. Experimental investigation of Reynolds stress complex eddy viscosity model for coherent structure dynamics [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2011, 54(7): 1319-1327.
- [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 China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2008, 51(7): 857-866.
- [5] Luchik T. S., Tiederman W. G. Time scale and the structure of ejections and bursts in turbulent channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 174: 529-577.
- [6] 郭爱东, 姜楠. 壁湍流多尺度相干结构复涡黏模型的实验研究 [J]. *力学学报*, 2010, 42(2): 159-168.
- [7] 姜楠, 于培宁, 管新蕾. 湍流边界层相干结构空间拓扑形态的层析 TRPIV 测量 [J]. *航空动力学报*, 2012, 27(5): 1113-1121.
- [8] YANG Shao Qiong, JIANG Nan. Tomographic TRPIV measurement of coherent structure spatial topology utilizing an improved quadrant splitting method [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, 55(10): 1863-1872.

# The spatial topologic characteristics of Reynolds stress for the coherent structure in wall turbulence

Jiang Nan<sup>1,2,3,4</sup>, Guan Xin-Lei<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Cheng Lu<sup>1</sup>

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

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

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

4. *Nankai University-Tianjin University Center for LiuHui Applied Mathematics, Tianjin 300072, China)*

**Abstract:** An experimental measurement was performed using PIV (particle image velocimetry) to investigate the spatial topological character of Reynolds stress for the coherent structures in wall turbulence. The long-time spatial sequences dataset of fully developed turbulent boundary layer (TBL) of flat plate was measured in a water channel. A new concept of spatial local averaged velocity structure function is applied to describe the dilation, compression, shear distortion and rotation of multi-scale eddy structures in turbulent flow. The fluctuating velocity components of TBL are decomposed into multi-scale components by spatial local averaged velocity structure function. Based on the stretch and compression features of multi-scale eddy structures, a new coherent structure conditional sampling method is used to extract the spatial topology of physical quantities, such as velocity, mean velocity strain rate and Reynolds stress, during the process of coherent structure burst.

**Key words:** wall-bounded turbulence; coherent structure; Reynolds stress; spatial topological feature; locally averaged velocity structure function

---

1) The project jointly supported by the National Natural Science Foundation of China (NO. 11272233), National key basic research and development program (plan 973) (NO. 2012CB720101) and 2012 opening subjects of the State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences.

2) E-mail: [nanj@tju.edu.cn](mailto:nanj@tju.edu.cn).