

湍流边界层均匀动量区统计分形特性的PIV实验研究

陈怡纯, 田海平, 马国祯, 陈纪仲

PIV EXPERIMENTAL STUDY ON STATISTICAL FRACTAL CHARACTERISTICS OF UNIFORM MOMENTUM ZONES IN TURBULENT BOUNDARY LAYER

Chen Yichun, Tian Haiping, Ma Guozhen, and Chen Jizhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-375>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湍流边界层等动量区演化机理的实验研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE EVOLUTION MECHANISM OF UNIFORM MOMENTUM ZONES IN TURBULENT BOUNDARY LAYER

力学学报. 2021, 53(3): 761-772

基于PIV技术分析颗粒在湍流边界层中的行为

PIV EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE BEHAVIOR OF PARTICLES IN THE TURBULENT BOUNDARY LAYER

力学学报. 2019, 51(1): 103-110

激波/湍流边界层干扰压力脉动特性数值研究

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF PRESSURE FLUCTUATION IN SHOCK WAVE AND TURBULENT BOUNDARY LAYER INTERACTION

力学学报. 2021, 53(7): 1829-1841

基于Stereo-PIV技术的三维发卡涡结构定量测量研究

EXPERIMENTAL STUDY ON QUANTITATIVE MEASUREMENT OF THREE-DIMENSIONAL STRUCTURE OF HAIRPIN VORTEX BY STEREO-PIV

力学学报. 2020, 52(6): 1666-1677

固体颗粒对沟槽湍流边界层影响的实验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF SOLID PARTICLES ON RIBLET-PLATE TURBULENT BOUNDARY LAYER

力学学报. 2021, 53(8): 2279-2288

沟槽方向对湍流边界层流动结构影响的实验研究

FLOW STRUCTURE IN THE TURBULENT BOUNDARY LAYER OVER DIRECTIONAL RIBLETS SURFACES

力学学报. 2017, 49(6): 1201-1212



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

湍流边界层均匀动量区统计分形特性的 PIV 实验研究¹⁾

陈怡纯* 田海平*,†,2) 马国祯* 陈纪仲*

* (太原理工大学流体力学科研创新中心, 太原 030024)

† (太原理工大学力学国家级实验教学示范中心, 太原 030024)

摘要 均匀动量区 (UMZs) 作为动量相近的局部区域成为新的湍流拟序结构成员, 研究其统计特性与变化规律、分析其成因和研究其与其他湍流结构的内在关联, 是深入认识壁湍流的重要途径. 通过粒子图像测速系统 (PIV) 测量得到了具有高时空分辨率的湍流边界层法向流场, 对 UMZs 分区和界面位置等进行了统计, 并基于瞬态流场分析了 UMZs 分界线与发卡涡 (包) 为主的湍流结构的位置关联, 结果发现: UMZs 流向速度概率密度函数 (PDF) 和界面厚度的统计分析呈现普适的分形特性, 且不受湍流/非湍流界面 (TNTI) 和雷诺数的影响; 瞬态流场 UMZs 数目在湍流间歇区较大, 而湍流结构发展充分、层次丰富时的瞬态流场 UMZs 数目却较少; 壁湍流涡包结构内多个发卡涡的空间分布规律决定了 UMZs 的统计分形特征; 在近壁 UMZs 分界线向湍流结构存在区域集中靠拢, 在外区 UMZs 分界线穿越展向涡核, 正向涡旋导致 UMZs 分界线在法向上的聚集, 反向涡旋引起 UMZs 分界线在流向上产生分离.

关键词 均匀动量区, 分形特性, 湍流结构, 发卡涡包

中图分类号: O357 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-375

PIV EXPERIMENTAL STUDY ON STATISTICAL FRACTAL CHARACTERISTICS OF UNIFORM MOMENTUM ZONES IN TURBULENT BOUNDARY LAYER¹⁾

Chen Yichun* Tian Haiping*,†,2) Ma Guozhen* Chen Jizhong*

* (Research and Innovation Center of Fluid Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

† (National Demonstration Center for Experimental Mechanics Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract Uniform momentum zones (UMZs), as local regions with similar momentum, become a new member of turbulent coherent structures. To study statistical characteristics, variation rules, its root causes and internal relationship with other turbulent structures about UMZs are an important way to understand wall turbulence. In this paper, the streamwise and wall-normal flow field of turbulent boundary with high spatio-temporal resolution was measured by time-resolved particle image velocimetry (TRPIV) system, statistical analysis was conducted on the partition and interface position of the UMZs. The position correlation between the UMZs boundary and the turbulent structure dominated by hairpin vortices (packets) was analyzed as well. The results revealed that the statistical analysis of streamwise velocity

2023-08-03 收稿, 2023-09-17 录用, 2023-09-18 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (12172242, 12332017, 12302289) 和山西省基础研究计划 (202203021222106) 资助项目.

2) 通讯作者: 田海平, 副教授, 主要研究方向为实验流体力学、湍流结构及流动控制. E-mail: tianhaiping@tyut.edu.cn

引用格式: 陈怡纯, 田海平, 马国祯, 陈纪仲. 湍流边界层均匀动量区统计分形特性的 PIV 实验研究. 力学学报, 2024, 56(1): 34-44

Chen Yichun, Tian Haiping, Ma Guozhen, Chen Jizhong. PIV experimental study on statistical fractal characteristics of uniform momentum zones in turbulent boundary layer. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(1): 34-44

PDF and interface thickness of UMZs showed universal fractal characteristic, not affected by TNTI interfaces and Reynolds numbers. There are more UMZs number in the turbulent intermittent zone, and less UMZs number in instantaneous flow fields with well-developed turbulent structures with rich layers. The spatial distribution law of hairpin vortex packet determines the statistical fractal characteristics of the UMZs. The UMZs boundary near the wall converges towards the turbulent structure, while the UMZs boundary crosses the spanwise vortex core in the outer region. Forward spanwise vortex caused the aggregation of UMZs boundary in the wall-normal direction, while reverse spanwise vortex produced separation of UMZs boundary in the streamwise direction.

Key words uniform momentum zones, fractal characteristics, turbulent structures, hairpin vortex packets

引言

均匀动量区 (uniform momentum zones, UMZs) 是湍流边界层瞬时流场中流向速度或动量近似相等^[1] 的局部区域, 流向长度可达 $n\delta$ (δ 为边界层厚度), 是湍流大尺度拟序结构的一种形式, 研究其生成原因及统计特性是深入了解湍流边界层动力学行为的重要途径。

根据 UMZs 分界线上流向速度梯度较大的特点, UMZs 的划分有两种方法: 其一, 依据流向速度概率密度函数 (PDF)^[2-3] 进行划分; 其二, 依据内部剪切层进行划分^[4-5]。后者需要人为设定剪切强度的阈值^[4,6], 而前者则不需要给定参数且不受流场流向长度的影响^[7], 更适合对瞬态流场 UMZs 的划分。因此, UMZs 作为湍流边界层流向速度相近的区域^[8], 瞬态流场流向速度 PDF 分析得到的局部峰值的个数便是 UMZs 的数目, 局部峰值便对应区域内的模态速度, 且不同瞬态流场呈现出 UMZs 数目差异^[7]。需要注意的是, 非湍流区存在着高速流体, 会对 UMZs 的划分产生影响^[9-11]。只有最大程度上削弱非湍流区高速流体带来的影响, 有关 UMZs 的分析和统计才更准确。湍流/非湍流界面 (TNTI) 是区分湍流区域与非湍流区域的一个界面薄层, 为剔除非湍流区高速流体提供了方法途径。TNTI 界面的识别通常是设定涡量^[12-13] 或湍动能^[14-15] 的阈值进而提取等值面。鉴于 PIV 流场数据涡量计算不够精准及背景噪声的影响, 选取合适的局部湍动能阈值成为识别 TNTI 界面的经验方法^[16-17], 而适当提高湍动能阈值意味着湍流区判定条件的严苛, 有利于 UMZs 的统计分析。

基于 PDF 的统计研究发现, UMZs 的平均数目与摩擦雷诺数 (Re_τ) 呈现对数线性规律^[7] 且与瞬态流场的摩擦阻力有直接关系: 当瞬态流场的 UMZs 数目小于平均数目时, 瞬态流场壁面具有相对较高

的表面摩擦阻力, 反之摩擦降低^[18]。此外, 湍流边界层内的“上抛”和“下扫”事件影响着瞬态流场 UMZs 数目, UMZs 数目的增大往往伴随着下扫事件的减少和上抛事件的增加^[2,19], 这也说明 UMZs 的数量变化同其内部区域上的湍流结构密切相关^[20]。同时, 作为湍流边界层的内部分界线, 无论是 TNTI 还是 UMZs 的分界线, 两者表现出相似的特性^[21-22], UMZs 的分界线特性也与湍流事件与结构相关联。通过对上抛、下扫事件的识别分析可以揭示两事件存在于分界线周围^[23]; 基于条件平均方法的统计分析也证明了 UMZs 分界线与漩涡强度共存的现象^[24]; UMZs 的分界线与内部高剪切区表现为高度重合^[6,25]。可见, UMZs 作为研究湍流边界层的新视角, 深化了对湍流的认识, 但有关于 UMZs 分区及界面的统计规律、同湍流结构的内在关联、UMZs 产生的实质等问题仍需要进一步研究探讨。

本文设计双相机高时间分辨率的 PIV 实验来分别获得湍流边界层超高/高分辨率流场数据, 通过宏观统计、瞬时流场判别等手段探究有关 UMZs 的一般规律及内在实质。本文第 1 部分介绍了 PIV 实验技术和基本流场情况; 第 2 部分介绍了 UMZs 的检测方法和湍流结构识别与显示方法, 后者创造性地融合了 POD 降阶重构流场方法^[26-27]、有限时间李雅普诺夫指数 (FTLE) 方法^[28-29]、涡核定位方法^[30-31] 等用以显示湍流结构与 UMZs 的分界关系; 第 3 部分给出并讨论了 UMZs 的统计分形特性及瞬态流场的物理解释, 并讨论了 UMZs 界面如何受湍流结构的影响。

1 实验设备与技术

1.1 实验设施及流场处理

实验在太原理工大学流体力学实验室中进行,

水槽为低速低湍流回流式水槽 (型号: LTWC-TYUT-01), 如图 1 示意. 主要由稳流段、收缩段、试验段、下游储水箱、水泵和回流管道等组成, 总长 13.6 m, 收缩比 9:1. 实验段横截面积 $0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ (宽 \times 高), 长 6.0 m, 最大单跨 3 m, 侧壁和底壁为高透钢化玻璃. 通过对水泵的变频控制, 可实现来流速度 $U_\infty = 0.05 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 的连续调节.

实验中使用的具有高时间分辨率的 PIV 系统, 即 TRPIV 系统, 由激光器光源系统、图像采集系统、粒子图像处理系统及同步控制系统等 4 部分组成, 并由 Lavision 公司实现软硬件集成. 激光器为镭宝公司双腔高频激光器, 型号 Beamtech Vlite-Hi-527-30, 波长 527 nm, 最大单次脉冲能量 30 mJ, 频率 0.1~20 kHz; 两台相机型号均为 Phantom VEO E-340 L, 分辨率为 $2560 \text{ pixel} \times 1600 \text{ pixel}$, 满幅采样频率 800 Hz, 内存 36 G, 配用 100 mm 的定焦镜头.

实验用湍流边界层平板为高透有机玻璃板, 尺寸为 $2.5 \text{ m} \times 0.38 \text{ m} \times 0.015 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 厚), 前缘进行了 4:1 椭圆形修型. 边界层平板在水槽中采用“倒扣”布置, 平行于水槽底面, 距底面 0.4 m. 为使实验测量区域湍流边界层发展充分, 拌线 ($d = 8 \text{ mm}$) 于平板前缘下游 0.2 m 处沿展向固定布置, 测量区域前端位于拌线下游 1.2 m 处. 激光片光源自下而上穿过水槽的底部照亮边界层流法向平面, 激光经示踪粒子 (空心玻璃微珠, 直径 $d = 20 \mu\text{m}$, 密度 $\rho_p = 1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) 散射后由 2 台相机共同记录. 实验布局如图 2 所示.

2 台相机分别位于水槽异侧, 用于同步拍摄大小两个视场. 实验设置了 3 种不同的自由来流速度 U_∞ , 在连续模式下, 采样频率 500 Hz, 每组工况每台相机分别采集了 6000 张粒子图像, 经由 Davis 10.2 软件处理后各得到 5999 个连续瞬时速度矢量场. 图

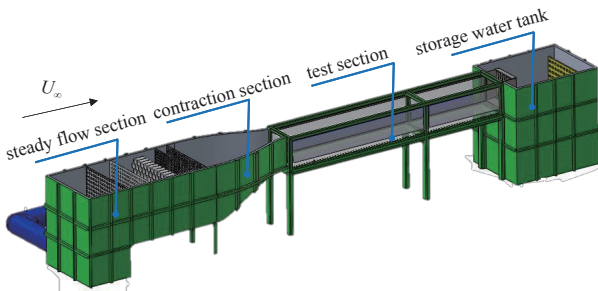


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

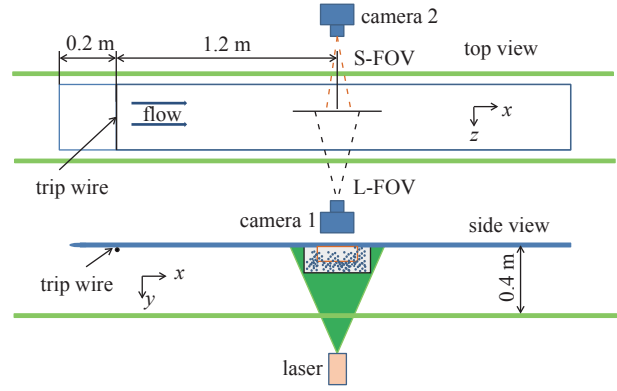


图 2 实验布局示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental layout

像处理时, 查询窗口的大小为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$, 窗口重叠率为 75%, 得到的 2D-2C 流场共有 320×200 (流向 \times 法向) 个数据点. 大视场 (L-FOV) 物理空间大小为 $99.21 \text{ mm} \times 62 \text{ mm}$, 相邻数据点间距为 0.31 mm. 小视场 (S-FOV) 物理空间大小为 $52.64 \text{ mm} \times 32.9 \text{ mm}$, 相邻数据点间距 0.1645 mm. S-FOV 流向长度和法向长度约是 L-FOV 的 0.5 倍, 所得近壁流场具有更高的精度. 在黏性底层区域 ($y^+ < 10$) 的流向速度线性分布规律由单行互相关算法 (SRCC) [32] 处理 $2 < y^+ < 5$ 区间的 S-FOV 图像得到, 依据 $\tau = \mu du/dy$ 和 $\tau = \rho u_\tau^2$, 可求得壁面摩擦速度 $u_\tau^2 = (\mu/\rho)(du/dy)$, du/dy 为黏性底层速度线性分布的流向速度梯度.

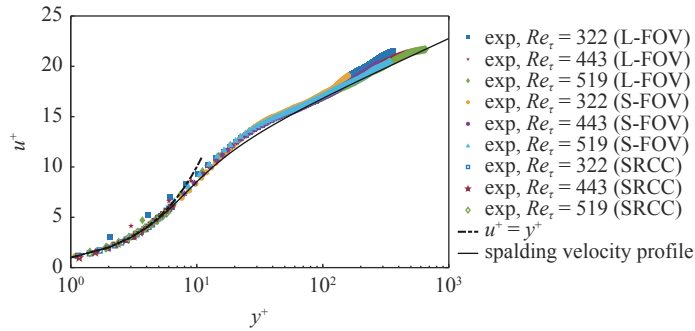
1.2 基本流场

表 1 展示了 3 种不同工况下湍流边界层的基本流场参数, 其中 U_∞ 为自由来流速度, δ 是以 0.99 倍自由来流速度确定的名义边界层厚度, u_τ 为壁面摩擦速度. 不同自由来流速度下流场内尺度无量纲化后的平均速度剖面 and 流法向湍流强度的分布见图 3,

表 1 湍流边界层的基本流动参数

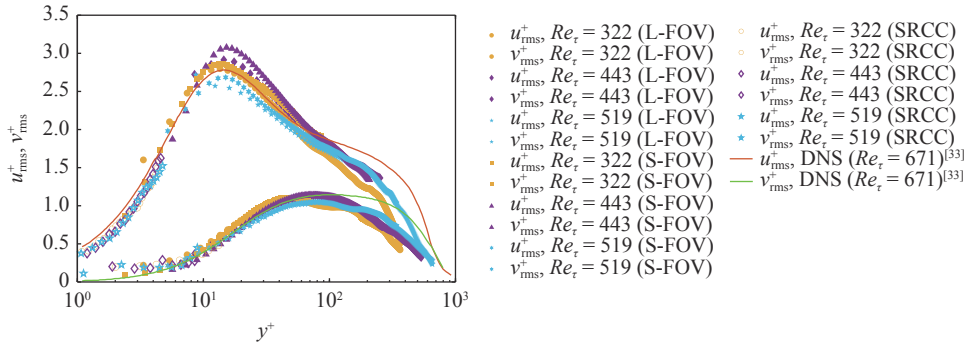
Table 1 Basic flow parameters of turbulent boundary layer

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3
$U_\infty / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.149	0.227	0.272
δ / mm	48.7	45.6	43.4
θ / mm	4.72	4.42	4.21
$u_\tau / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	6.8	10.0	12.3
Re_δ	7045	10050	11461
Re_θ	683	974	1112
Re_τ	322	443	519



(a) 内尺度平均速度剖面

(a) The inner-scaled average velocity profiles



(b) 内尺度流法向湍流强度分布

(b) The distribution of inner-scaled turbulence intensity in streamwise and wall-normal directions

图 3 流场基本统计量

Fig. 3 Basic statistics of flow field

图中分别绘制了 L-FOV 和 S-FOV 以及由 SRCC 算法得到的各组别的速度剖面和湍流度分布数据. 其中图 3(b) 选择了 Schlatter 等^[33] 的 DNS 数据做对比分析.

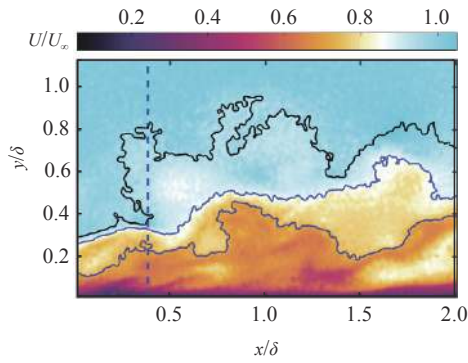
2 分析方法

2.1 均匀动量区的检测与统计

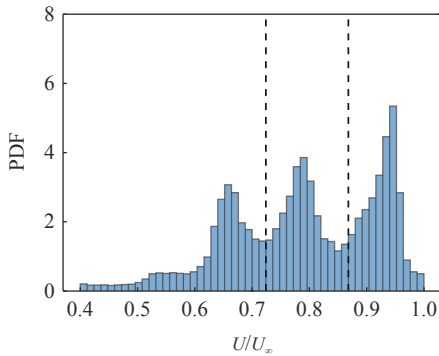
根据 UMZs 的特性, UMZs 的检测应基于瞬时场的 PDF. 以 PDF 中出现的局部峰值来表征瞬时流场中出现的 UMZs 个数, 而局部峰值所对应的流向速度值, 便是瞬时场中 UMZs 内的流向速度, 称之为模态速度. 图 4(a) 是来流速度 $Re_\tau = 322$ 时, L-FOV 某一瞬时速度场的流向速度分布情况; 图 4(b) 是对应时刻检测全场统计得到的流向速度 PDF 分布情况; 图 4(c) 所示为图 4(a) 中蓝色虚线法向位置的流向速度剖面. 在图 4(a) 中的 3 条分界线分别为 TNTI 界限以及图 4(b) 所示 UMZs 分界线. 图 4(b) 统计结果已根据 Chauhan 等^[15] 提出的有关 TNTI 选取的规则, 有效削弱了非湍流区域高速流体对统计结果带

来的影响, 其中 TNTI 界面上的流向平均速度 $\bar{U}_{TNTI} = 0.96U_\infty$, TNTI 的平均界面高度 $\bar{y}_{TNTI} \approx 0.8\delta$.

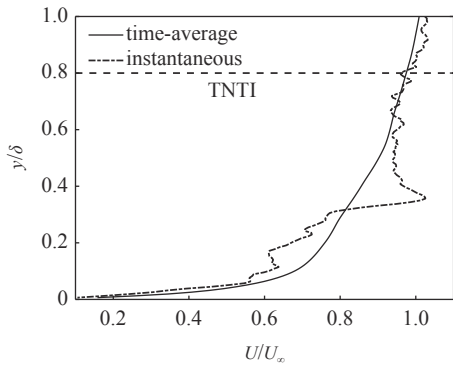
在 UMZs 个数的统计过程中, 需要根据直方图统计 UMZs 的个数. 而在识别过程中, 用以选出局部峰值的局部区域所包含直方图中矩形条数目的多寡, 与识别到的 UMZs 个数有关: 当选取过少的矩形条时会使统计个数偏高, 当选取过多的矩形条当作局部区域时会使统计过程中的某些峰值丢失, 从而使统计得到的数目偏少. 本文参照 de Silva 等^[7] 得出的统计规律, 选取矩形条横轴长度约为 $0.1U_\infty$ 的局部长度, 得到了不同速度下的所有瞬时场的 UMZs 的个数, 当对 UMZs 的个数进行概率密度函数统计时, 得到如图 5 所示的分布情况. 从图 5 中, UMZs 的数目随着雷诺数 Re_τ 的增加, 表现为: 少数目的 UMZs 比例减少, 多数目的 UMZs 的比例增大, 这与 de Silva 等^[7] 的结果一致. 如图 6 所示, 本文 3 个工况下得到的 UMZs 数目平均值 \bar{n}_{UMZ} 与摩擦雷诺数 Re_τ 均符合线性增长的关系^[7,18,34]. 以上均验证了本文 UMZs 检测及统计方法的可靠性.



(a) 瞬时流向速度场
(a) Instantaneous streamwise velocity field



(b) 图 (a) 时刻流向速度概率密度函数分布
(b) PDF of streamwise velocity



(c) 图 (a) 中所选流向位置在法向上的瞬时流向速度分布
(c) Instantaneous wall-normal velocity distribution

图 4 均匀动量区的检测

Fig. 4 Detection of uniform momentum zones

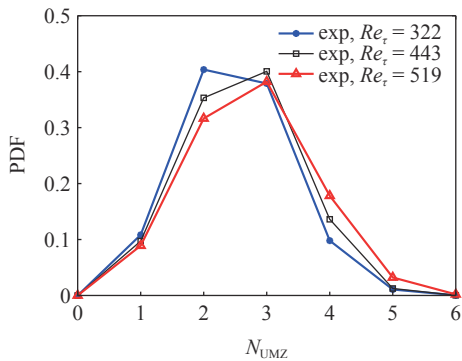


图 5 均匀动量区数量的概率密度函数分布

Fig. 5 The probability density distribution of UMZs number

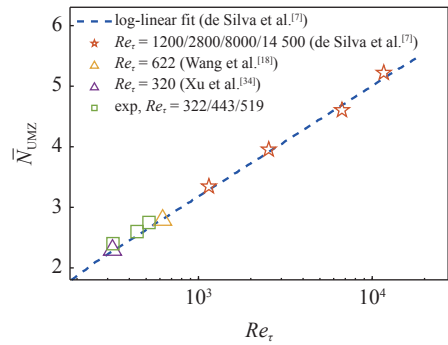


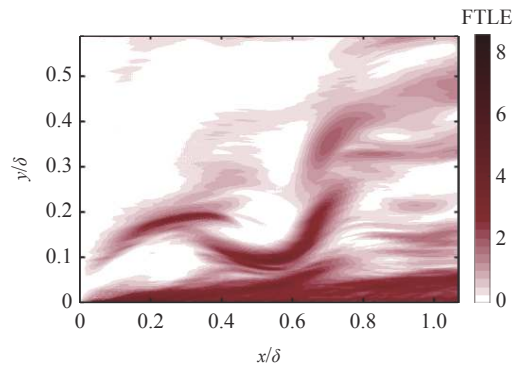
图 6 均匀动量区平均数目的对数线性规律

Fig. 6 Log-linear law of average number of UMZs

2.2 湍流结构的识别

UMZs 是湍流结构发展演化过程在二维流场向平面的一种瞬态呈现形式, UMZs 与湍流结构是“肌肉”与“骨骼”的关系. 因此, 探索 UMZs 与湍流结构发展演化的动力学关联对深入认识 UMZs 的一般规律具有重要作用. 鉴于有限时间 Lyapunov 指数方法 (FTLE 方法) 在识别湍流结构方面的成功经验^[29], 以及 PIV 实验原始流场降噪的现实需求, 本文采用了 POD 流场重构和 FTLE 方法相结合的手段, 对湍流结构进行有效识别.

湍流结构作为占据着流场中绝大部分能量的结构体^[35], 利用 POD 方法提取时间序列瞬态流场占据主要能量的前 n 阶模态, 并选取合适的模态数对瞬时流场进行降阶重构, 既保留了湍流结构的主要特征, 又实现了对流场的降噪处理, 保留了流场的基本特征^[36]. 为了充分保证不对后续分析产生影响, 将对速度场进行降阶重构, 再计算出流场的 FTLE 场加以比较选出最合适的模态. 本文将分别选取占据全场前 90%, 98% 和 100% 能量的模态对速度场进行 POD 降阶重构, 进而采用 FTLE 方法对湍流结构进行刻画. 由图 7 结果可见, 90% 能量场重构流场得出



(a) 90% 能量场
(a) 90% energy field

图 7 不同比例能量重构的 FTLE 场

Fig. 7 FTLE fields reconstructed with different proportions of energy

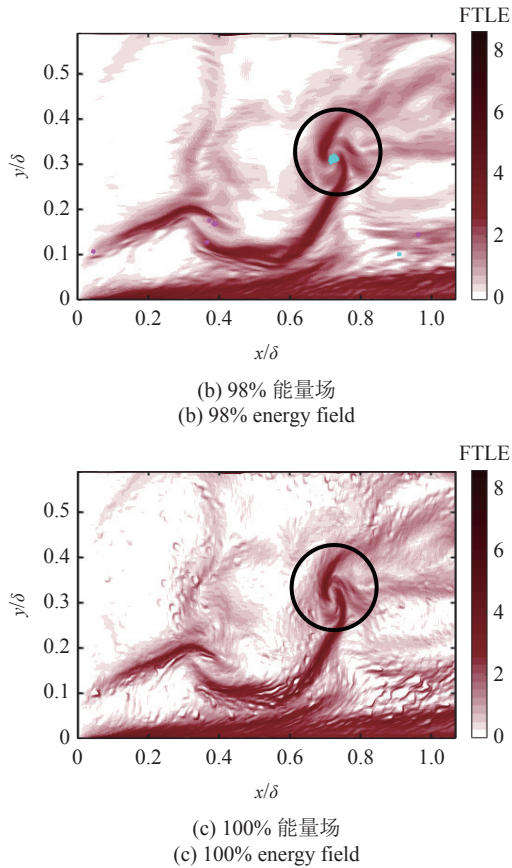


图 7 不同比例能量重构的 FTLE 场 (续)

Fig. 7 FTLE fields reconstructed with different proportions of energy (continued)

的 FTLE 场在识别到的涡结构上出现了失真的现象, 对应图中圆圈部分, 但 98% 能量重构流场所得的

FTLE 场, 其识别到的涡结构与原场保持高度一致, 且其可以在一定程度上消除背景噪声, 如图 7(b) 所示. 因此, 本文后续分析中将选择以 98% 能量重构流场作为分析 FTLE 场的数据基础, 实现对湍流结构的识别. 同时, 利用带符号的涡强值 $\lambda_{ci} \cdot \text{sign}(\omega)$ 定位涡核的位置, 如图 7(b) 所示, 浅蓝色点代表逆时针旋转的展向涡核, 紫色代表顺时针旋转的展向涡核.

3 结果分析与讨论

3.1 统计分形特性

按照 UMZs 的判别标准, 任一瞬态流场均有确定的 UMZs 分区数目, 而具有相同 UMZs 分区数目的瞬态流场, 更倾向遵循相似的规律. 在 $Re_\tau = 322$ 来流条件, 对具有相同 UMZs 数目的瞬态流场进行分组, 进而对组内所有瞬态流场 TNTI 线下的全部流向速度矢量作概率密度函数分布, 并将 UMZs 分界线显示在统计图上.

图 8 为 L-FOV 数据得到的结果, 可见: 尽管每组中瞬态流场的 UMZs 数目 N 不同, 但在 $0.6U_\infty \sim 0.96U_\infty$ 范围内, 各组的 PDF 统计结果不仅出现了相同数目的 3 个峰值, 而且分界线基本一致, 与各组 UMZs 数目无关. 此外, 统计结果中高速 UMZs 的占比与瞬态流场 UMZs 数目呈现相关性, 即 N 大, 高速区占比也较高.

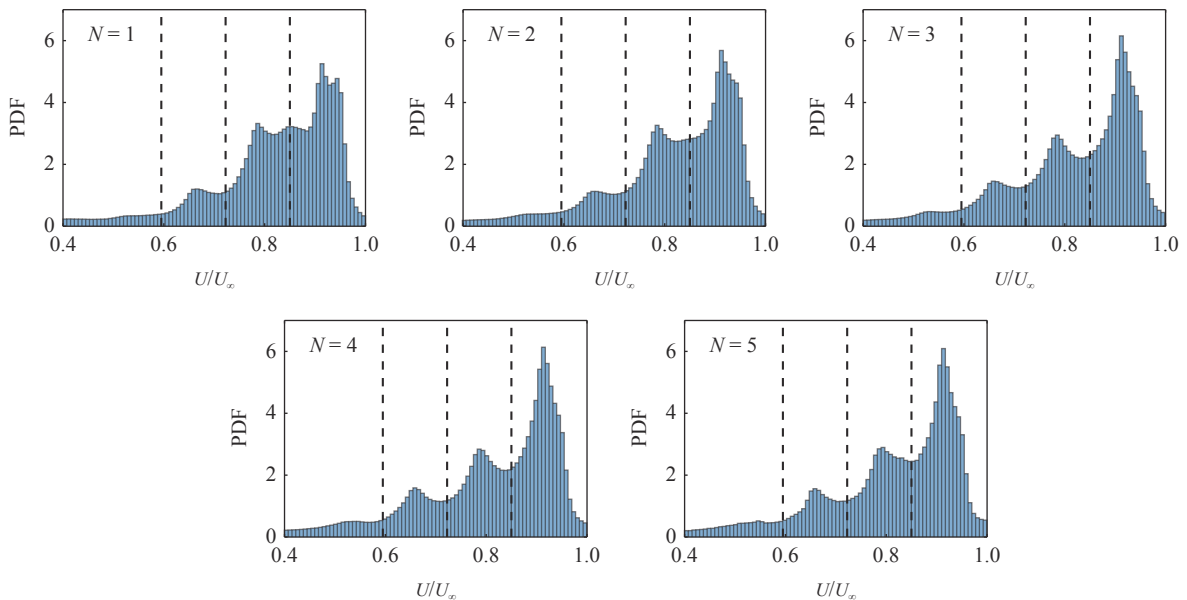


图 8 L-FOV 下不同数目均匀动量区流向速度概率分布

Fig. 8 Probability distribution of streamwise velocity in different numbers of UMZs under L-FOV

基于相同 UMZs 数目瞬时流场的统计平均结果却与分组无关. 为进一步论证以上结论的可靠性, 拥有更高分辨率的 S-FOV 数据被进一步分析. 因为法向高度限制同时为更好地分析近壁强湍流区域的统计结果, TNTI 界线被进一步严格规定, 故而通过增大局部湍动能的取值来实现. 此处, 选取 $\bar{U}_{\text{TNTI}^*} = 0.86U_\infty$, $\bar{y}_{\text{TNTI}^*} \approx 0.45\delta$, 结果见图 9.

S-FOV 结果显示: 在 $0.6U_\infty \sim 0.86U_\infty$ 范围内, 各分组统计结果同样与瞬态流场 UMZs 数目无关, 出现了相同数目 5 个峰值, 各组分界线依然一致, 高速 UMZs 占比依然随着 N 增大而提高. 此外, 还应注意 S-FOV 在 $0.4U_\infty \sim 0.6U_\infty$ 的范围内均有 1 个较小的不明显峰值. 流向、法向区间减小, 平均界面高度 \bar{y}_{TNTI} 减小后, UMZs 数目和峰值不减反增, 体现了分

形特征. 图 10(a) 即是图 9 中 5 个 PDF 轮廓线的显示结果, 进一步凸显了分形特征. 图 10 通过对比 3 个不同雷诺数下 S-FOV 的结果, 不难发现在图 10(a)、图 10(b) 和图 10(c) 中其统计规律相似, 其中最具代表性的规律是, 随着 UMZs 数目的增大, 高速流体的占比皆增大. 可见, 这种分形特征不受雷诺数的影响, 这更加印证了 UMZs 统计分形特性的一般性.

综上, 基于统计的流向速度 PDF 存在着分形特性, 而且是普适存在的, 不随法向高度、TNTI 分界线的位置、雷诺数的变化而产生本质变化.

同样在 $Re_\tau = 322$ 来流条件下, 对 S-FOV 数据相同 UMZs 数目的瞬时流场作统计平均, 得出不同分组下分区界面的平均高度与流向速度剖面的关系, 如图 11 所示. 可见, 随着不同分组中 UMZs 数目的增大, 其在平均流场中的界面位置会逐渐降低, 且同

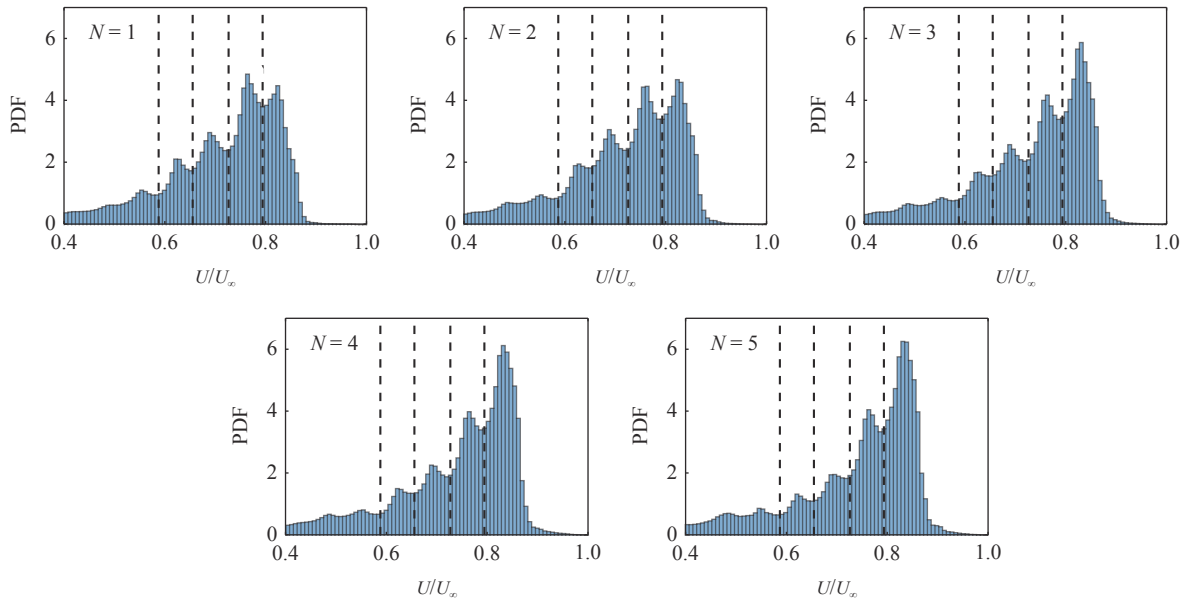


图 9 S-FOV 下不同数目均匀动量区流向速度概率分布

Fig. 9 Probability distribution of streamwise velocity in different numbers of UMZs under S-FOV

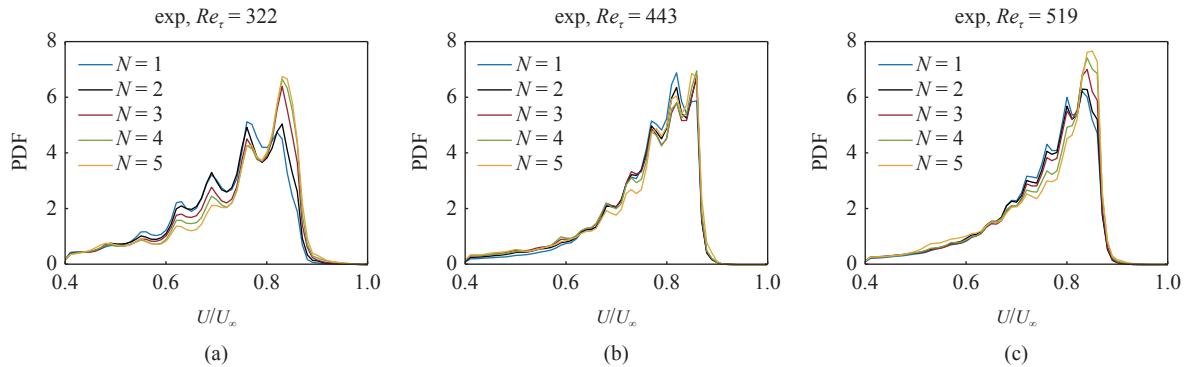


图 10 不同雷诺数下不同数目均匀动量区流向速度概率分布

Fig. 10 Probability distribution of streamwise velocity with different UMZs numbers under different Reynolds numbers

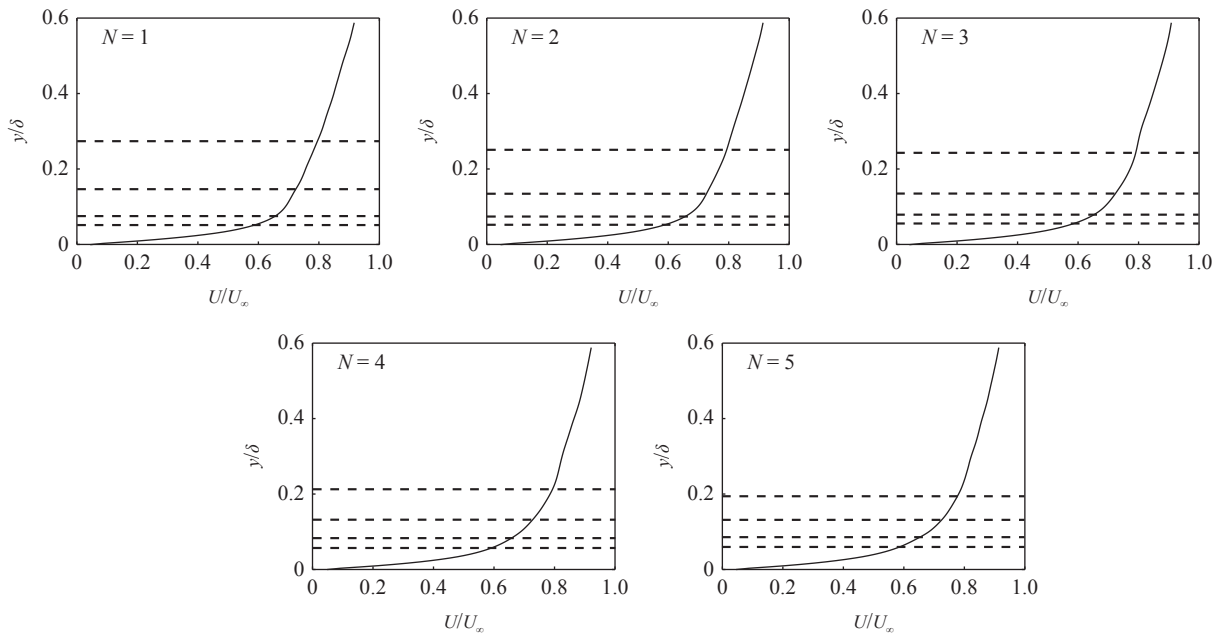


图 11 不同数目均匀动量区流向速度剖面下分区界面平均高度 (虚线为 UMZs 分界线对应法向高度)

Fig. 11 Average height of partition interface under streamwise velocity profiles with different UMZs numbers (the dashed lines represent the wall-normal heights of UMZs boundary)

一分组统计结果显示各分区厚度越靠近壁面逐渐变薄, 也呈现出相似的倍率关系, 可见 UMZs 法向厚度向壁面方向亦呈现出分形特性。

3.2 分形特性的产生根源

为了探究随着 UMZs 数目增大, 平均流场界面位置会逐渐降低的现象, 特选取 UMZs 数目不同的瞬态流场进行分析。图 12 给出了 $Re_\tau = 322$ 下不同数目 UMZs 的瞬时场对应的显示涡结构的 FTLE 场 (图 12 中间列图 12(b)、图 12(e)、图 12(h)、图 12(k)) 以及其所对应流向速度概率分布, 其中图 12 左列图 12(a)、图 12(d)、图 12(g) 和图 12(j) 为对应瞬时场全场速度概率分布, 图 12 右列图 12(c)、图 12(f)、图 12(i) 和图 12(l) 分别对应 FTLE 场中虚线与 TNTI 线包围的涡包结构对应部分的局部速度场的流向速度概率分布。从图 12(a) 和图 12(b), 瞬态流场 UMZs 数目 $N=1$, 可以发现当瞬时流场 UMZs 数量少时, 此时流动充分发展, 流动结构完善, 结构层次丰富且复杂, 所以统计结果中其界面位置会较高, 但统计得到的 UMZs 数目少。同理也可在图 12(d) 和图 12(e) (瞬态流场 UMZs 数目 $N=2$) 中发现此状态。PDF 统计 (图 12(a)、图 12(d)) 显示流向速度多集中分布, 难以进行 UMZs 区域划分。当只取充分发展区流场内包含涡包结构的流场进行分析时, 如图 12(c)

所示, 却出现了明显的分区, 与图 12(a) 中的分布情况有明显的不同。此外, 图 12(f) 中的分布也出现了明显的分区现象。

当 UMZs 数目开始变多时, 与少数目的 UMZs 不同, 瞬态流场呈现出湍流间歇区的明显特点, 且涡包结构发展明显, 如图 12(h) 和 12(k) 所示, 统计上就会出现界面位置降低的现象。此时流向速度概率分布, 区域划分就很明显, 代表着出现更多的 UMZs, 流速分布在全场皆有占比, 但高速流体占比更大。同样抽取 FTLE 场中的涡结构对应的速度概率分布, 可以得到同图 12(c) 和图 12(f) 相似的规律, 皆出现了明显的分区现象 (见图 12(i) 和图 12(l))。因图 12(c)、图 12(f)、图 12(i) 和图 12(l) 分布相似, 可见以涡包结构为代表的“自组织的湍流结构”是导致流向速度 PDF 出现多个峰值的根本原因。

综上所述, UMZs 的多寡是由瞬时场中涡包结构的发展状态决定: 当瞬时场处于湍流间歇区, 涡包结构处于发展阶段, 其 UMZs 数目多; 当瞬态场处于湍流充分发展区, 湍流结构发展充分、层次丰富且复杂, 反而会降低瞬态流场 UMZs 的数目。尽管如此, 具有相同 UMZs 数目的瞬态流场处于相似的湍流场状态, 具有相似的分形特性, 本质上是受以涡包结构为代表的“自组织的湍流结构”影响的一种外在

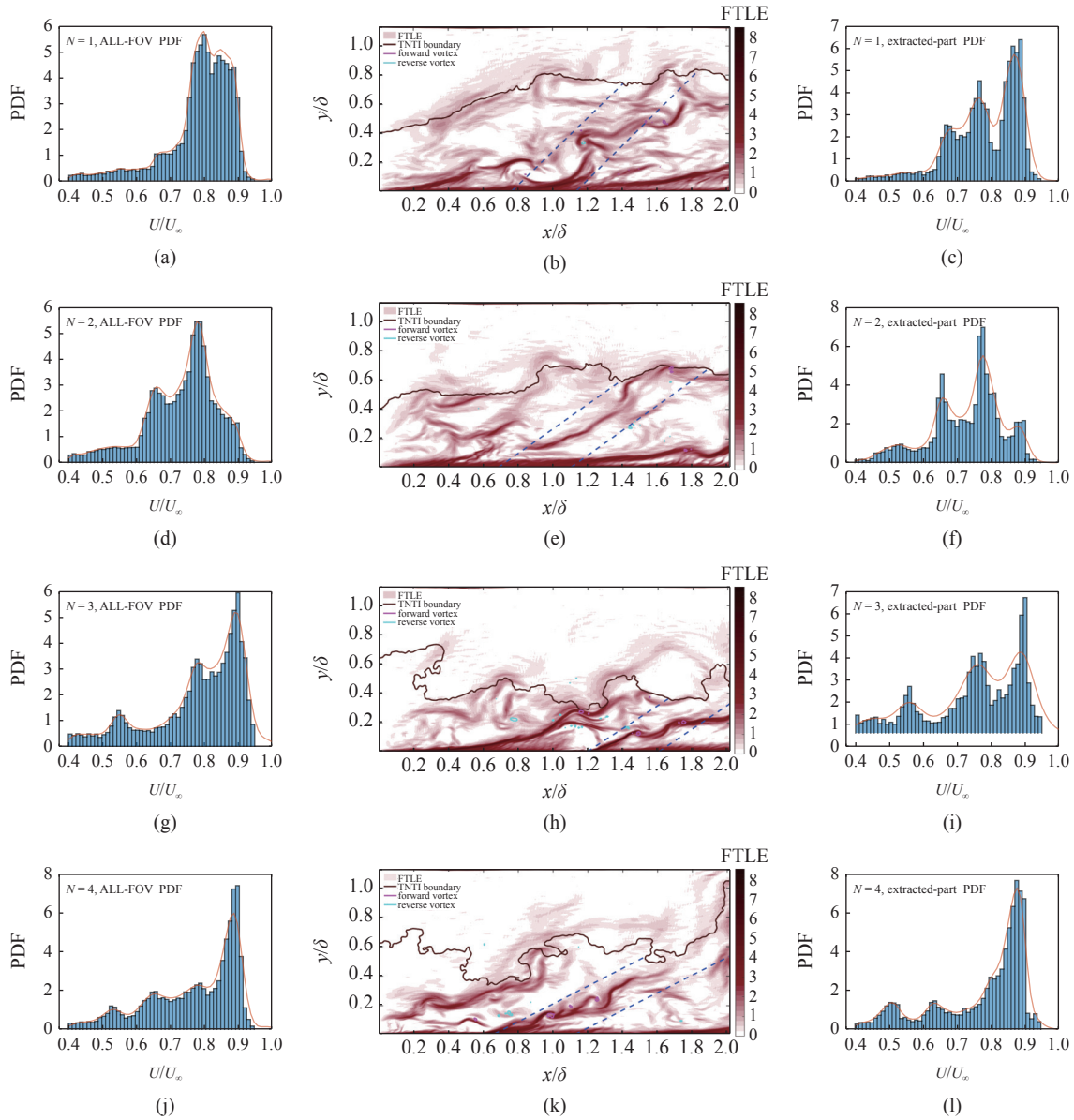


图 12 不同数目均匀动量区与湍流结构发展状态的关系 (图 (a), (d), (g) 和 (j) 分别为图 (b), (e), (h) 和 (k) 对应时刻的全场流向速度 PDF, (c), (f), (i) 和 (l) 分别为图 (b), (e), (h) 和 (k) 中蓝色虚线与 TNTI 包围涡包部分对应流向速度的 PDF)

Fig. 12 The relationship between the different numbers of UMZs and the development state of turbulent structures ((a), (d), (g), and (j) respectively show the full field streamwise velocity PDF at the corresponding time of (b), (e), (h), and (k). (c), (f), (i), and (l) respectively show the PDF of the streamwise velocity corresponding to the blue dashed line and TNTI surrounding parts in (b), (e), (h), and (k))

表征.

3.3 均匀动量区分界线与湍流结构的关联

经以上分析, UMZs 的统计分形特性是由湍流结构的发展和分布决定的, 因此探索 UMZs 的分界线与湍流结构的关联是一个重要前沿问题. 本文将 TNTI 界面, UMZs 分界线以及正负涡核位置共同显示在 FTLE 瞬态流场中, 对 UMZs 分界线与湍流结构的位置关系进行探索. 图 13 为 $Re_\tau = 322$ 下的瞬态流场, 随机抽取某些时刻可见: (1)UMZs 的分界

线总是会受湍流结构的吸引, 尤其是 0.2δ 以下的近壁区域, UMZs 分界线与湍流结构分布一致, 具有代表性的如图中 I 类型矩形位置处, 可见 UMZs 分界线变化; (2)UMZs 分界线总会有穿过展向涡头的行为, 正向展向涡旋的吸引致使“下层分界线出现突升、上层分界线出现突降”的现象, 使 UMZs 分界线在法向上聚集, 如图 13 中 II 类型圆圈周围所示; 而反向展向涡旋, 使 UMZs 分界线在流向上呈现分离, 如图 13 中 III 类型圆圈周围所示.

同时, UMZs 分界线穿过涡头的行为在一个典型发卡涡包结构中是有序的, 如图 14 所示一典型涡包结构由 A, B 和 C 组成, 下层分界线会穿过下级发卡涡的涡头, 上层分界线会穿过上级发卡涡的涡头, 由图 14 来看便是 1, 2 和 3 分界线穿过了 A 涡, 而 3, 4 分界穿过了 B 涡和 C 涡, 并不会相互串扰. 众所周知, 涡包结构的空分布上, 近壁年轻发卡涡的高度总是低于成熟发卡涡的法向高度^[37-38]. 因此, 与发卡涡包内众多展向涡高度的空分布规律相对

应, UMZs 分界线在统计上出现分区厚度自壁面向外由薄变厚的趋势.

4 结论

本文通过双相机 TRPIV 实验对平板湍流边界层的流法向平面进行了高分辨率的测量, 对均匀动量区 (UMZs) 的统计特性进行了分析, 并基于瞬态流场分析了 UMZs 分界线与湍流结构的关联, 得到主要结论如下.

(1) 对瞬态流场按照 UMZs 数目进行分组分析发现, 流向速度的 PDF 分布和 UMZs 厚度变化规律呈现普适的统计分形特征, 不受 TNTI 界面高度和雷诺数的影响.

(2) 瞬态流场 UMZs 数目的多寡是由流场中湍流结构的发展状态决定的: 湍流间歇区特征的瞬态流场 UMZs 数目多; 湍流结构发展充分、层次丰富的瞬态流场 UMZs 数目少. UMZs 的划分本质是由涡包结构为代表的具有“自组织行为的湍流结构”的动力学行为决定的, 自组织湍流结构内多级发卡涡的空分布规律决定了 UMZs 的统计分形特征及厚度的变化规律.

(3) UMZs 分界线在近壁向湍流结构存在区域集中分布, 并穿越展向涡核, 正向展向涡旋引起 UMZs 分界线在法向上向涡核聚集, 反向展向涡旋使得 UMZs 分界线以涡核为中心在流向呈现分离.

综上, 本文归纳了 UMZs 普适的统计分形特征, 实现了对湍流边界层时序流场 UMZs 分界的统一划分, 呈现了 UMZs 与湍流结构的密切关联. UMZs 本质上是由“具有自组织行为的湍流结构”的动力学行为决定的, 壁湍流中多尺度、多级的湍流结构或许可以解释 UMZs 的分形特征, 因而发展更精细的瞬态流场测量技术、降低湍流间歇区对 UMZs 统计分区的影响、实现对湍流结构发展演化过程和影响区域的时空提取, 都将有助于进一步回答这一问题. 同时, 尽管 UMZs 作为一种瞬态流场示性分类依据是客观的, 但因瞬态流场的随机性和个体差异, 分类结果缺乏稳健性, 分区界面也难以在时序流场中保持一致, 制约了 UMZs 分析方法的适用性. 因此, 基于 UMZs 统计分形结果, 发展时空一致的分区界面对于进一步揭示湍流机理具有重要价值.

参 考 文 献

1 Adrain RJ, Meinhart CDDTC. Vortex organization in the outer re-

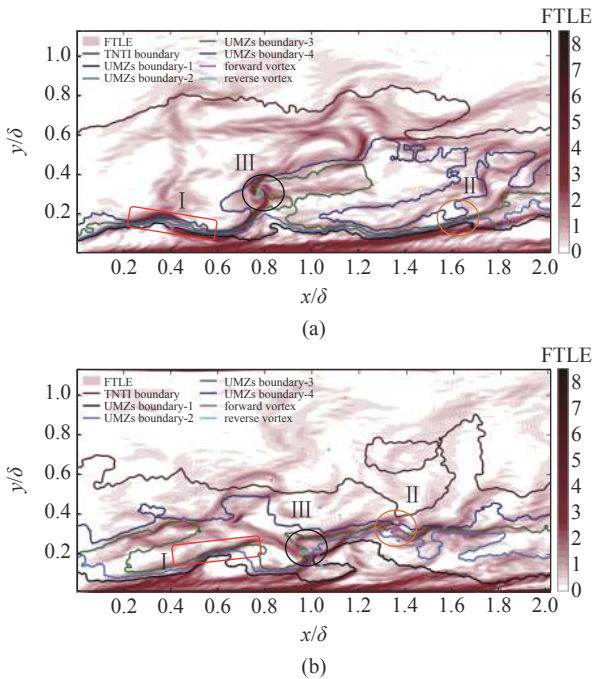


图 13 受涡结构影响的 UMZs 边界线变化 (I 类为 UMZs 分界线与湍流结构分布一致, II 类为正向展向涡旋影响下的 UMZs 边界线, III 类为反向展向涡旋影响下的 UMZs 边界线)

Fig. 13 Changes in UMZs boundary affected by vortex structure (Class I represents the UMZs boundary consistent with the distribution of turbulent structures; Class II represents the UMZs boundary affected by forward spanwise vortices; Class III represents the UMZs boundary affected by reverse spanwise vortices)

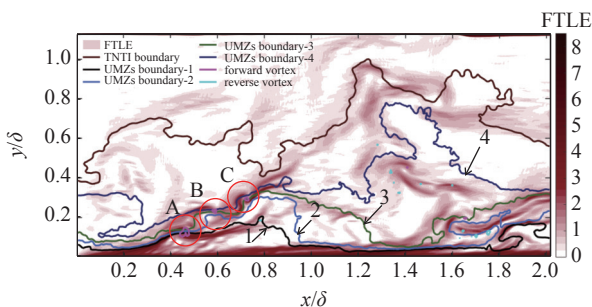


图 14 涡包结构与 UMZs 分界线位置关系

Fig. 14 Position relationship between vortex packets structure and UMZs boundary

- gion of the turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 422: 1-54
- 2 Zhang JH, Li BH, Su JB, et al. Influence of synthetic jet on uniform momentum zones. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2023, 101: 109131
 - 3 Chen X, Chung YM, Wan M. Uniform-momentum zones in a turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 884: A25
 - 4 Chen X, Chung YM, Wan M. The uniform-momentum zones and internal shear layers in turbulent pipe flows at Reynolds numbers up to $Re_\tau = 1000$. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2021, 90: 108817
 - 5 Anderson W, Salesky ST. Uniform momentum zone scaling arguments from direct numerical simulation of inertia-dominated channel turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 906(408): A8
 - 6 Eisma J, Westerweel J, Ooms G, et al. Interfaces and internal layers in a turbulent boundary layer. *Physics of Fluids*, 2015, 27(5): 055103
 - 7 De Silva CM, Hutchins N, Marusic I. Uniform momentum zones in turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 786: 309-331
 - 8 Heisel M, De Silva CM, Hutchins N, et al. On the mixing length eddies and logarithmic mean velocity profile in wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 887: R1
 - 9 Hearst RJ, De Silva CM, Dogan E, et al. Uniform-momentum zones in a turbulent boundary layer subjected to freestream turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 915(509): A109
 - 10 Bross M, Scharnowski S, Kähler CJ. Large-scale coherent structures in compressible turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 911(402): A2
 - 11 Scarano F, Jacob MC, Carbonneau X, et al. On the turbulent boundary layer over a flat plate at moderate Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 2022, 34(11): 115150
 - 12 Neamtu-Halic MM, Krug D, et al. Connecting the time evolution of the turbulence interface to coherent structures. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 898: A3
 - 13 Gampert M, Boschung J, Hennig F, et al. The vorticity versus the scalar criterion for the detection of the turbulent/non-turbulent interface. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 750: 578-596
 - 14 李思成, 吴迪, 崔光耀等. 低雷诺数沟槽表面湍流非湍流界面特性的实验研究. *力学学报*, 2020, 52(6): 1632-1644 (Li Sicheng, Wu Di, Cui Guangyao, et al. Experimental study on turbulent and non turbulent interface characteristics of groove surface at low Reynolds number. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(6): 1632-1644 (in Chinese))
 - 15 Chauhan K, Philip J, De Silva CM, et al. The turbulent/non-turbulent interface and entrainment in a boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 742: 119-151
 - 16 Reuther N, Kähler CJ. Evaluation of large-scale turbulent/non-turbulent interface detection methods for wall-bounded flows. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(7): 121
 - 17 Long Y, Wu D, Wang J. A novel and robust method for the turbulent/non-turbulent interface detection. *Experiments in Fluids*, 2021, 62(7): 138
 - 18 Wang K, Jiang N. Influence of uniform momentum zones on frictional drag within the turbulent boundary layer. *Chinese Physics B*, 2021, 30(3): 034703
 - 19 Laskari A, De Kat R, Hearst RJ, et al. Time evolution of uniform momentum zones in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 842: 554-590
 - 20 王超伟, 王康俊, 李彪辉等. 湍流边界层等动量区演化机理的实验研究. *力学学报*, 2021, 53(3): 761-772 (Wang Chaowei, Wang Kangjun, Li Biaohui, et al. Experimental study on the evolution mechanism of the constant momentum region of the turbulent boundary layer. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(3): 761-772 (in Chinese))
 - 21 Heisel M, De Silva CM, Katul GG, et al. Self-similar geometries within the inertial subrange of scales in boundary layer turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 942(433): A33
 - 22 De Silva CM, Philip J, Hutchins N, et al. Interfaces of uniform momentum zones in turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 820: 451-478
 - 23 Wu KT, Tsai CW, Wu MJ. Probabilistic characterization of sweep and ejection events in turbulent flows and its implications on sediment transport. *Water Resources Research*, 2022, 58(5): 030417
 - 24 Tang Z, Fan Z, Chen L, et al. Outer-layer structure arrangements based on the large-scale zero-crossings at moderate Reynolds number. *Physics of Fluids*, 2021, 33(8): 085121
 - 25 Heisel M, Sullivan PP, Katul GG, et al. Turbulence organization and mean profile shapes in the stably stratified boundary layer: zones of uniform momentum and air temperature. *Boundary-Layer Meteorology*, 2022, 186: 533-565
 - 26 胡建军, 朱晴, 王美达等. 近距离下射流冲击平板 PIV 实验研究. *力学学报*, 2020, 52(5): 1350-1361 (Hu Jianjun, Zhu Qing, Wang Meida, et al. Experimental study on PIV of jet impact on flat plate at close range. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(5): 1350-1361 (in Chinese))
 - 27 何江, 符松. 竖直平板间自然对流大尺度相干结构的 POD 分析. *力学学报*, 2003(4): 385-392 (He Jiang, Fu Song. POD analysis of large-scale coherent structure of natural convection between vertical plates. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2003(4): 385-392 (in Chinese))
 - 28 权基琢, 姜楠, 唐湛棋. 拉格朗日方法下立方体诱导拟序结构的实验. *力学学报*, 2013, 45(5): 772-776 (Quan Jizhuojun, Jiang Nan, Tang Zhanqi. Experiment of cube induced coherent structure based on Lagrangian method. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(5): 772-776 (in Chinese))
 - 29 Pan C, Wang J, Zhang C. Identification of lagrangian coherent structures in the turbulent boundary layer. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2009, 52(2): 248-257
 - 30 Tian H, Yi X, Xu F, et al. Lagrangian-based spatial-temporal topological study on the evolution and migration of coherent structures in wall turbulence. *Acta Mechanica Sinica*, 2022, 38(1): 321465
 - 31 唐湛棋, 姜楠. 圆柱尾迹影响旁路转捩末期发卡涡涡包的研究. *力学学报*, 2011, 43(6): 1037-1042 (Tang Zhanqi, Jiang Nan. A study on the influence of cylindrical wake on the seizure vortex packet at the end of bypass transition. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(6): 1037-1042 (in Chinese))
 - 32 申俊琦, 王建杰, 潘翀. 平板湍流边界层瞬时摩擦阻力的光学测量和统计分析. *气体物理*, 2020, 5(5): 13-23 (Shen Junqi, Wang Jianjie, Pan Chong. Optical measurement and statistical analysis of instantaneous frictional resistance of turbulent boundary layer on a flat plate. *Gas Physics*, 2020, 5(5): 13-23 (in Chinese))
 - 33 Schlatter P, Örlü R. Assessment of direct numerical simulation data of turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 659: 116-126
 - 34 Xu F, Zhong S, Zhang S. Statistical analysis of vortical structures in turbulent boundary layer over directional grooved surface pattern with spanwise heterogeneity. *Physics of Fluids*, 2019, 31(8): 085110
 - 35 Kang YD, Koo B. Experimental study of energy contribution by coherent structures in a turbulent boundary layer. *Journal of Coastal Research*, 2021, 114(sp1): 579-583
 - 36 Li S, Jiang N, Yang S, et al. Coherent structures over riblets in turbulent boundary layer studied by combining time-resolved particle image velocimetry (TRPIV), proper orthogonal decomposition (POD), and finite-time Lyapunov exponent (FTLE). *Chinese Physics B*, 2018, 27(10): 104701
 - 37 Tian H, Zhang J, Jiang N, et al. Effect of hierarchical structured superhydrophobic surfaces on coherent structures in turbulent channel flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 69: 27-37
 - 38 Jodai Y, Elsinga GE. Experimental observation of hairpin auto-generation events in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 795: 611-633