



流向凹曲率壁面湍流边界层的TRPIV实验研究

王轩 范子椰 陈乐天 唐湛棋 姜楠

Experimental study of TRPIV for turbulent boundary layer of longitudinal concave curvature wall

WANG Xuan, FAN Ziye, CHEN Letian, TANG Zhanqi, JIANG Nan

引用本文:

王轩, 范子椰, 陈乐天, 等. 流向凹曲率壁面湍流边界层的TRPIV实验研究[J]. 实验流体力学, 2022, 36(6): 1–9. DOI: 10.11729/sytlx20210084

WANG Xuan, FAN Ziye, CHEN Letian, et al. Experimental study of TRPIV for turbulent boundary layer of longitudinal concave curvature wall[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics | J Exper Fluid Mech, 2022, 36(6): 1–9. DOI: 10.11729/sytlx20210084

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11729/sytlx20210084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液固两相湍流边界层相干结构的PIV实验研究

Experimental study of coherent structures in a solid–liquid turbulent boundary layer

实验流体力学. 2017, 31(6): 29–36 <https://doi.org/10.11729/sytlx20160199>

超疏水表面对湍流边界层相干结构影响的TRPIV实验研究

TRPIV experimental study of the effect of superhydrophobic surface on the coherent structure of turbulent boundary layer

实验流体力学. 2019, 33(3): 90–96 <https://doi.org/10.11729/sytlx20180101>

基于单相机光场PIV的逆压湍流边界层测量

Volumetric measurements of an adverse–pressure–gradient turbulent boundary layer using single–camera light–field PIV

实验流体力学. 2019, 33(2): 66–71 <https://doi.org/10.11729/sytlx20180192>

沟槽对湍流边界层中展向涡影响的实验研究

An experimental study on riblet–induced spanwise vortices in turbulent boundary layers

实验流体力学. 2018, 32(1): 55–63 <https://doi.org/10.11729/sytlx20170092>

沟槽超疏水复合壁面湍流边界层减阻机理的TRPIV实验研究

TRPIV experimental investigation of drag reduction mechanism in turbulent boundary layer over superhydrophobic–riblet surface

实验流体力学. 2021, 35(1): 117–125 <https://doi.org/10.11729/sytlx20200001>

平板边界层参数水槽测量与仿真分析研究

Experimental and numerical investigations of the boundary layer parameters of an underwater flat plate model

实验流体力学. 2017, 31(1): 26–31, 46 <https://doi.org/10.11729/sytlx20160098>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463376

Email: sytlx@163.com

网址: <http://www.sytlx.com>



关注微信公众号

获得更多资讯

流向凹曲率壁面湍流边界层的 TRPIV 实验研究

王轩¹, 范子柳¹, 陈乐天¹, 唐湛棋^{1, 2}, 姜楠^{1, 2, *}

1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300354 2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300354

摘要:带有曲率和压力梯度作用的湍流边界层广泛地存在于各类工程应用中。以带有流向凹曲率的壁面(简称凹壁面)模型为研究对象,利用双相机大小视场的 TRPIV 系统分别测量了上游和下游两个不同流向位置的瞬时速度场。以光滑平板模型的实验数据为基准,研究了凹壁面上湍流边界层的变化规律。通过对比光滑平板的平均速度剖面和雷诺应力剖面,发现凹壁面情况下的平均速度剖面逐渐偏离了传统对数律,且湍流强度比平板情况下更弱。以 Λ_{ci} 准则识别出的顺向涡为条件进行条件相位平均,发现凹壁面中涡上方正脉动的峰值与空间尺度的变化相反,而下方的负脉动比平板情况更强。进一步使用空间两点相关方法提取相干结构,同时利用椭圆拟合的方法计算近壁区相干结构与壁面的倾角,发现凹壁面上相干结构沿流向的空间尺度逐渐增大。结果表明:当湍流边界层受到凹曲率和顺压梯度的共同作用时,近壁附近与尾迹区内湍流强度的差异增大,同时边界层内相干结构的旋涡强度增加;随着向下游的发展,缓冲层附近顺向涡上方正脉动的空间尺度增大,但峰值降低,而在对数律区的上侧则产生了相反的现象;凹壁面湍流边界层内相干结构向更高法向高度迁移的趋势减弱,且相干结构的尺度在下游一侧的增长幅度更大。

关键词:流向曲率;顺压梯度;湍流边界层;TRPIV;相干结构

中图分类号:O357.5

文献标识码:A

Experimental study of TRPIV for turbulent boundary layer of longitudinal concave curvature wall

WANG Xuan¹, FAN Ziye¹, CHEN Letian¹, TANG Zhanqi^{1, 2}, JIANG Nan^{1, 2, *}

1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300354, China

Abstract: Turbulent boundary layers with curvature and pressure gradient are widely used in various engineering applications. A wall model with concave curvature in streamwise was used as the research object, and the instantaneous velocity fields at two different streamwise positions upstream and downstream were measured by TRPIV experiment with dual camera size field of view. Using experimental data from a smooth flat plate as a benchmark, the variation pattern of the turbulent boundary layer on a concave wall is investigated. By comparing the mean velocity profile and the Reynolds stress profile with those of the smooth flat plate, it was found that the mean velocity profile in the concave wall case gradually deviated from the conventional logarithmic law and that the turbulence intensity was weaker than that in the flat plate case. Conditional averaging is carried out under the condition of the prograde vortex identified by Λ_{ci} criterion. It is found that the peak of the positive fluctuations above the vortices in the concave wall varies oppositely to the scale range, while the negative fluctuations below the vortices is stronger than that of flat plate. The coherent structures were further extracted using a spatial two-point correlation method and the inclination of the coherent structures in the near-wall

收稿日期: 2021-08-04; 修回日期: 2021-10-13; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(11732010, 11972251, 11872272); 中德科学基金国际交流合作项目(GZ1575); 工业和信息化部高技术船舶项目([2019]360)

* 通信作者 E-mail: nanj@tju.edu.cn

引用格式: 王轩, 范子柳, 陈乐天, 等. 流向凹曲率壁面湍流边界层的 TRPIV 实验研究 [J]. 实验流体力学, 2022, 36(6): 1-9.

WANG X, FAN Z Y, CHEN L T, et al. Experimental study of TRPIV for turbulent boundary layer of longitudinal concave curvature wall[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2022, 36(6): 1-9.

region to the wall was calculated using an ellipse fitting method. It was found that the scale range of the coherent structure on the concave wall gradually increases along the streamwise. The results show that when the turbulent boundary layer is subjected to a combination of concave curvature and favorable pressure gradient, the difference in turbulence intensity near the near-wall region and within the wake region increases, along with an increase in the intensity of vortices in the coherent structures within the boundary layer. With development downstream, the scale range of positive fluctuations above the prograde vortex on the buffer layer increases, but the peak value decreases, while the opposite phenomenon occurs on the upper side of logarithmic region. The trend of coherent structure migration to higher normal height in the curved wall turbulent boundary layer is weakened, and scale range of the coherent structures grows mainly towards the downstream side.

Keywords: streamwise curvature; favorable pressure gradient; turbulent boundary layer; TRPIV; coherent structure

0 引 言

湍流边界层是工程中常见的流动现象,同时也是湍流领域研究的热点问题之一。在实际流动中通常会遇到在曲面上发展的湍流边界层现象^[1],而表面上的流动往往也会受到由曲率引起的压力梯度影响^[2-3]。一般来说,带有凹曲率和凸曲率的壁面会分别增加和减少湍流活动^[4],同时由曲率引起的压力梯度也会影响湍流活动^[5]。针对曲率和压力梯度影响的研究也一直受到船舶、航天等领域的重视。

迄今为止,研究者们主要研究了曲率和压力梯度分别对湍流边界层的影响,其中针对压力梯度的研究一般采用在光滑平板上施加压力梯度的方法。Spalart^[6]通过数值模拟发现顺压梯度在达到一定的强度后会使得湍流边界层发生层流化。Aubertine等^[7]对逆压梯度的影响进行了激光多普勒测速(LDV)实验,发现逆压梯度会扩大尾迹区域,使得对数律区向下收缩,雷诺应力剖面与平板类似,但外层的应力比平板更强。Joshi等^[8]对顺压梯度的流场进行了粒子图像测速(PIV)实验,发现近壁区的涡结构受到了限制,而加速流动也使得涡结构的倾角减小。最近,Volino^[9]对不同压力梯度下的湍流边界层进行了激光多普勒测速实验,认为顺压梯度抑制湍流,且使相干结构的流向尺度更大,而在逆压梯度中则会产生相反的现象。

曲率对湍流边界层单独影响的相关研究大多使用带有曲率的管道来尽可能地抑制由于过流截面变化产生的压力梯度。目前针对曲壁面的实验研究方式一般为单点速度测量,如热线等。Meroney等^[10]使用毕托管对流向曲壁面进行了测量,发现凹曲面

上的流速比平板更高,而凸曲率对湍流边界层的影响则完全相反。So等^[11]在针对凹壁面的热线实验中发现凹曲率会增强湍流强度。Arolla等^[12]通过数值模拟研究了凹曲率和由凹曲率引起的压力梯度对湍流边界层的影响,发现在曲率起始处会出现逆压梯度,使壁面摩擦减小,而凹曲率对流场中的法向分量影响最大。Matsubara等^[13]对弯曲槽道进行了模拟研究,发现曲壁面会显著增加大尺度结构的强度。

曲壁面上的湍流边界层会不可避免地受到由曲率引起的压力梯度作用^[12],因此曲壁面湍流边界层相比平板湍流边界层是一个更加复杂的流动。目前针对曲率和压力梯度综合影响下湍流边界层的研究仍局限于最基本的统计量,而对于内部流动及其结构的实验研究较少。本文利用高时间分辨率粒子图像测速技术(Time-Resolved Particle Image Velocimetry, TRPIV),获取凹壁面湍流边界层上不同流向位置的二维速度矢量场,利用大小视场获取法向高度上完整的平均速度剖面以及雷诺应力剖面,选取不同的法向高度并应用可以体现涡旋转方向的 Λ_{ci} 准则进行条件相位平均,提取流场中的顺向涡(即沿顺时针旋转的展向涡),然后利用空间两点相关方法研究不同法向高度的相干结构形态,分析凹壁面上湍流边界层内部流动的变化。

1 实验装置

实验在天津大学流体力学实验室重力溢流式低湍流度循环水洞中进行。水洞实验段尺寸为 $4.1\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),流速最高可达 0.5 m/s 。实验模型为带有流向凹曲率的曲面模型,总长度为 2.75 m ,其前半部分为平板,尺寸为 $1.20\text{ m} \times 0.59\text{ m} \times$

0.01 m(长×宽×高), 后半部分为曲板, 尺寸为1.55 m×0.59 m×(0.01~0.18) m(长×宽×高)。在实际工程中, 湍流边界层流动常存在不同程度的曲率作用情况, 而发生小曲率作用的情况较为普遍, 加之实验段尺寸也存在一定限制, 最终选定曲面的型线为函数 $y = 0.01e^x$ 。由于该模型的曲率半径较大, 相机视野中拍摄区域的壁面接近水平, 因此在以互相关算法进行计算时可以选择矩形计算域。为获得充分发展的湍流边界层, 在平板前缘下游50 mm处增加了直径 $d = 2$ mm的绊线。实验装置如图1所示, 图中 x 、 y 和 z 分别代表流向、法向和展向。

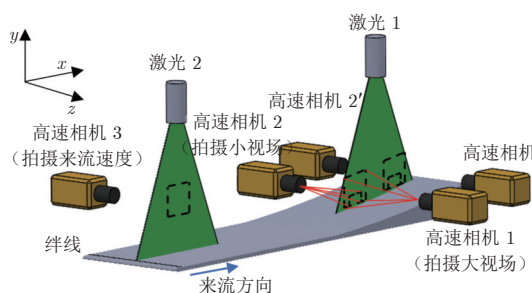


图1 实验装置示意图
Fig. 1 Experimental facility diagram

为了获得较为完整的流场速度分布以及近壁面处的精细流动, 采用大视场和小视场相结合的方式进行实验: 共使用3台高速相机进行拍摄, 其中2台相机分别布置在实验段的两侧, 用于大小视场的拍摄, 第3台高速相机用于拍摄实验段前端的自由来流速度。实验中, 在两个不同位置使用不同激光进行照射。

由于实验模型带有沿流向的凹曲率, 使得湍流边界层在不同流向位置受到的影响程度各不相同, 因此在模型曲面部分的上游和下游各选择一个位置进行测量(图2), 两个位置与模型前端的距离定义为 L 。为便于后期计算, 调整高速相机视场与来流呈一定夹角, 使得测量时观察到的壁面尽可能平行于相机视场。图中 θ 为相机视场与来流方向的夹角, 在上游和下游测量位置分别为 $\theta_1 = 5.5^\circ$ 和 $\theta_2 = 9.0^\circ$ 。

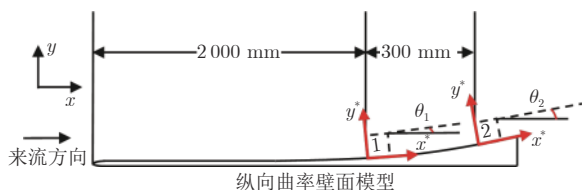


图2 实验测量示意图
Fig. 2 Schematic diagram of experimental measurements

由于模型的拍摄表面为曲面, 且在拍摄范围内其曲率变化不明显, 在分析曲面流动时选取矩形计算域进行计算。为便于分析, 定义 x^* 为在不同位置选取的流场计算区域内的流向, y^* 为法向, U^* 和 V^* 、 u^* 和 v^* 分别为流向和法向的平均速度和脉动速度。

实验使用的示踪粒子为直径 20 μm 的空心玻璃微珠, 密度为 1.04 kg/m^3 。3 台高速相机为丹麦 Dantec 公司的 SpeedSense 9072 CMOS 相机, 分辨率为 1 280 像素 × 800 像素。大视场相机对应的物理空间尺寸为 $80.39 \text{ mm} \times 50.25 \text{ mm}$ (流向×法向), 小视场相机对应的物理空间尺寸为 $28.26 \text{ mm} \times 17.66 \text{ mm}$ (流向×法向), 小视场包含于大视场中。采样频率 $f = 1\,000 \text{ Hz}$, 激光片光的厚度约为 1 mm。两个位置的测量分两次进行, 因此入口处的自由来流速度存在一定波动, 在测量上游和下游时分别为 0.316 m/s 和 0.328 m/s 。实验水温 $T = 20^\circ$, 水的密度 $\rho_w = 998.2 \text{ kg/m}^3$, 水的运动黏度 $\nu = 1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。实验共采集了 3 组流场数据, 每组实验获取了两个不同位置大小视场各 8 216 张流场照片。大视场使用 $32 \text{ 像素} \times 32 \text{ 像素}$ 的查询窗口, 小视场由于粒子浓度较低, 使用 $48 \text{ 像素} \times 48 \text{ 像素}$ 的查询窗口; 大小视场查询窗口的重叠率均为 75%。以互相关算法进行计算, 小视场相邻矢量的间距为 0.26 mm , 大视场相邻矢量的间距为 0.5 mm 。

目前, 尚无法在实际实验中将流动中压力梯度和流向曲率的影响进行单独分析。此前相关研究常采用零压力梯度的光滑平板流动作为基准进行对比研究。本文亦开展了光滑平板实验。实验中同样使用 2 台高速相机进行大小视场的拍摄。来流速度为 0.267 m/s ; 采样频率 $f' = 800 \text{ Hz}$; 大视场相机对应的物理空间尺寸为 $126 \text{ mm} \times 77 \text{ mm}$ (流向×法向), 小视场相机对应的物理空间尺寸为 $27 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$ (流向×法向), 小视场位于大视场中; 其余参数与曲面流动相同。计算矢量场时同样选取矩形计算域, 因此使用与前文相同的坐标系 x^* 和 y^* 定义。

2 实验结果与分析

流向凹曲率壁面的湍流边界层流动不仅会受到凹曲率的作用, 还会受到由凹曲率引起的流向顺压梯度的影响, 使得湍流边界层存在沿流向逐渐增大的加速度。由于模型型线曲率半径较大, 在初期测试中发现该模型壁面上的湍流边界层受到的凹曲率

作用较弱,而受到的顺压梯度作用相对较大。对于带有流向顺压梯度的流动,需要了解流向顺压梯度引起的加速度强弱,研究者普遍使用加速度参数 K ^[14-17]来表征这一强弱程度:

$$K = \frac{\nu}{U_0^2} \frac{dU_0}{dx} \quad (1)$$

式中, U_0 表示当前测量位置的自由来流速度。当 $K > 3.0 \times 10^{-6}$ 时,湍流边界层会发生层流化现象^[6]。此外,曲面会使流体在不同流向位置流过的截面大小非线性变化,从而使得流向加速度在流向上非均匀;但本实验测量区域尺寸不足以使 K 产生明显变化,因此选取平均加速度参数作为测量位置的加速度参数。通过对 K 的计算发现,在上游和下游测量位置均满足 $K < 2.0 \times 10^{-6}$,流向顺压梯度的作用较弱,因此可以认为在该曲面上的湍流边界层未发生层流化现象。为比较其与平板的湍流边界层流动情况,引入光滑平板模型的实验数据进行对比,平板数据同样被分为大视场和小视场数据。本实验顺压梯度和流向曲率对湍流边界层的作用较弱,传统的对数律方程仍然具有较强的鲁棒性^[6, 18-19],因此本文利用平均速度剖面的对数律区与对数律公式 $U^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + B$ 进行拟合来获取壁面摩擦速度 u_τ ,其中 $y^+ = yu_\tau/\nu$ 、 $U^+ = U/u_\tau$ 分别为内尺度无量纲化的法向高度和平均速度, κ 为卡门常数, B 为积分常数。由于研究对象为曲面湍流边界层,其对数律方程可能产生变化,因此将卡门常数 κ 与积分常数 B 均设为变量进行拟合,此外,还应用 Spalding 曲线^[20]进行了拟合验证。结果发现: κ 和 B 均未发生明显变化,Spalding 曲线拟合结果也与对数律方程拟合结果相似,可以认为拟合得到的壁面摩擦速度未发生较明显变化。表 1 列出了实验基本湍流参数,其中, U_∞ 为入口处来流速度, $u_{\tau, \text{large}}$ 、 $u_{\tau, \text{small}}$ 分别为大小视场的壁面摩擦速度(本实验将小视场的 $u_{\tau, \text{small}}$ 用于后

续数据处理),边界层厚度 δ_{99} 按照 0.99 倍当前测量位置的平均来流速度确定,剪切雷诺数 $Re_\tau = u_\tau \delta/\nu$ 表示内尺度雷诺数(u_τ 随着边界层向下游的发展逐渐增大,且下游增长幅度大于上游)。

2.1 基本统计量

图 3 为在曲面模型上两个不同流向位置得到的内尺度无量纲平均速度剖面,横轴为两个测量位置与壁面垂直的内尺度无量纲法向高度,定义 $U^{*+} = U^*/u_{\tau, \text{small}}$, $y^{*+} = y^*u_{\tau, \text{small}}/\nu$ 。为获取高法向空间分辨率及近壁处平均速度剖面,对小视场利用单行互相关算法(Single-Row Cross Correlation, SRCC)思想进行流场高法向空间分辨率速度矢量计算^[21-23]。SRCC 算法的思想是通过牺牲流向分辨率来提升法向分辨率,以获得更高法向空间分辨率的速度矢量。因此,基于该算法的思想将查询窗口大小调整为 256 像素 $\times$ 8 像素(流向 $\times$ 法向),重叠率为 50%。经实际计算,速度矢量的法向间距可达 0.09 mm,同时可测量到的流场矢量最高可以达到黏性底层。由于实验模型为曲面模型,大视场不同流向位置的平均速度剖面存在较为明显的变化,为了统一无量纲化后的结果,大小视场均使用小视场的壁面摩擦速度 $u_{\tau, \text{small}}$ 进行无量纲化,同时选取大视场与小视场拍摄位置重合的流向位置进行绘制。

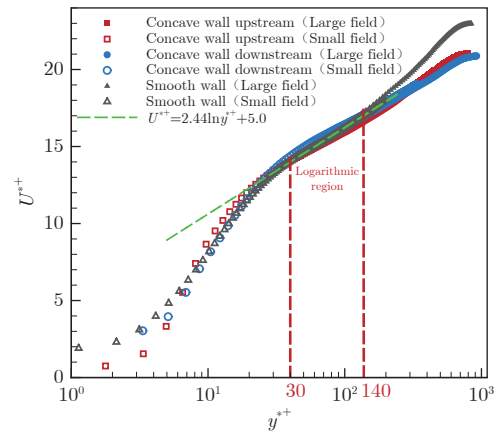


图 3 平均速度剖面
Fig. 3 Mean velocity profile

从图 3 可以看出,凹壁面上游速度剖面的对数律区变化不明显,但下游速度剖面的对数律区发生了明显偏离,速度剖面在对数律区向上隆起且对数律的斜率小于传统对数律方程。在缓冲层及以下区域,凹壁面与光滑平板情况下的速度分布无明显差异,这可能是由于凹曲率和顺压梯度对边界层内流

表 1 边界层参数
Table 1 Boundary layer parameters

	上游($L=2.0$ m)	下游($L=2.3$ m)	平板实验
$U_\infty/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.316	0.328	0.267
$u_{\tau, \text{large}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0175~0.0180	0.0196~0.0203	0.0116
$u_{\tau, \text{small}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0179	0.0202	0.0116
δ_{99}/mm	36.85	37.29	60.16
Re_τ	659.6	753.3	697.9
K	9.03×10^{-7}	1.68×10^{-6}	—

向速度的影响相互抵消所导致^[10, 24]。在对数律区以上, 两个测量位置的流动均受到抑制^[9], 说明顺压梯度在对数律区以上造成的影响更强。

图 4 为不同位置的内尺度无量纲化雷诺应力随 y^{*+} 变化的曲线, 雷诺应力各分量均使用壁面摩擦速度实现内尺度无量纲化。

$$\begin{cases} u_{\text{rms}}^{*+} = u_{\text{rms}}^*/u_{\tau, \text{small}} \\ v_{\text{rms}}^{*+} = v_{\text{rms}}^*/u_{\tau, \text{small}} \\ \langle u^* v^* \rangle^+ = \langle u^* v^* \rangle / u_{\tau, \text{small}}^2 \end{cases} \quad (2)$$

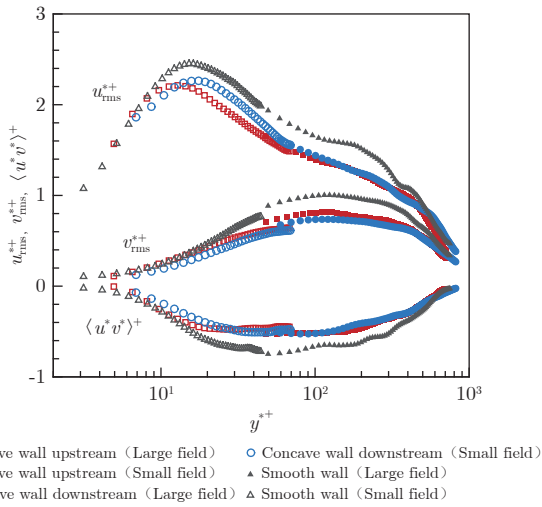


图 4 雷诺应力剖面

Fig. 4 Reynolds stress profile

从图中可以看到: 凹壁面湍流边界层的湍流强度显著减小, 且随着边界层向下游发展, 流向雷诺正应力在近壁处的峰值逐渐沿法向向上移动, 达到 $y^{*+} = 20$ 左右; 在对数律区以上时, 与光滑平板情况之间差距增大; 法向湍流强度和雷诺应力在近壁附近无明显变化, 而在对数律区及以上区域明显下降。这说明流向顺压梯度对湍流有显著的削弱作用, 且随着法向高度增大, 削弱作用先增大后减小。

2.2 涡结构识别

从 2.1 节对凹壁面流场基本统计量的分析中可以发现, 湍流边界层在受到凹曲率和流向顺压梯度的组合影响后, 湍流强度整体呈现下降趋势, 这一影响势必也会对边界层内的流动结构产生影响。为了研究凹壁面流场内流动结构的变化, 本文利用 λ_{ci} 准则进行流场内涡的识别^[25-27]。 λ_{ci} 为速度梯度张量的共轭复特征值, 该值可以表示流场中某一矢量点处的旋涡强度。应用该准则可以有效避免将剪切运动识别为涡旋运动。若将旋涡强度与展向涡量符号 $\text{sgn}(\omega_z)$ 结合, 即可识别出流场内涡结构的旋转方向:

$$\Lambda_{ci} = \text{sgn}(\omega_z) \times \lambda_{ci} \quad (3)$$

式中, Λ_{ci} 表示获得涡量符号后的 λ_{ci} 值。

图 5 给出了凹壁面湍流边界层不同流向位置的 Λ_{ci} 识别结果, x^* 与 y^* 均使用内尺度进行无量纲化。当 Λ_{ci} 为负时, 检测到顺向涡, 为正时, 则检测到逆向涡。为减少环境噪声对识别结果的影响, 使用阈值条件 $|\Lambda_{ci}| \geq T \times \Lambda_{ci, \text{rms}}(y)$ (T 为检测涡结构边界的阈值, 本文取 0.5) 来确定涡结构的边界, 同时考虑到流场的空间分辨率影响, 将仅有单个网格节点大小的涡结构过滤, 以减弱背景噪声影响^[28]。从图中可以看出, 流场中 Λ_{ci} 较大的区域与速度矢量中直观显示出的涡结构吻合程度较高, 流场内存在顺向涡和逆向涡的涡对, 以及由发卡涡组成的发卡涡包结构。

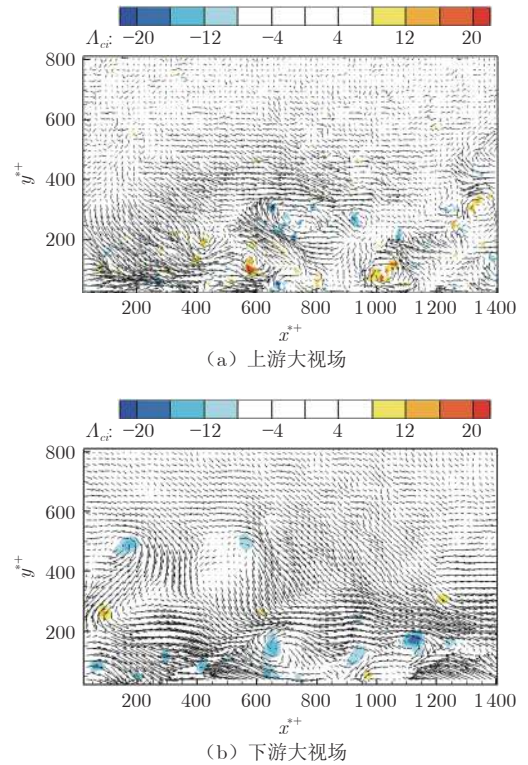


图 5 Λ_{ci} 识别结果

Fig. 5 Λ_{ci} recognition results

为进一步了解凹壁面流场中涡结构的强度沿法向分布情况, 对大视场中的 λ_{ci} 进行了时间和沿流向的平均, 并绘制了大视场 λ_{ci} 沿内尺度无量纲化法向高度 y^{*+} 的变化曲线, 如图 6 所示。从图中可以发现, 凹壁面和光滑平板上的 λ_{ci} 均显示出随着法向高度的变化先增大后减小的趋势, 而凹壁面上不同流向位置的旋涡强度在各法向位置上均大于平板情况, 且在对数律区附近相差更大。这说明虽然凹壁面边界层内的湍流强度被削弱, 但由于凹壁面对湍流边界

层的影响,流场内不同位置的速度梯度增强,进而使得旋涡强度增大,同时也使涡的分布更加集中于对数律区附近。

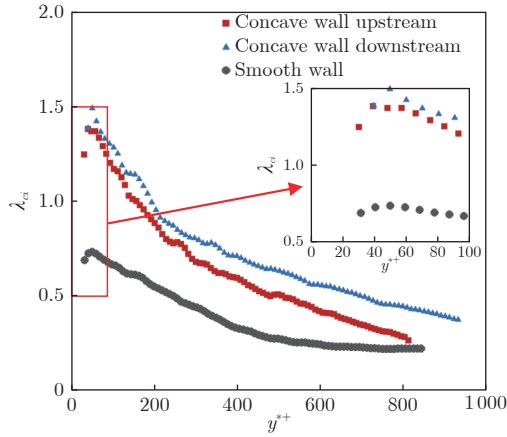


图6 大视场 λ_{ci} 随 y^+ 的变化曲线
Fig. 6 Variation of λ_{ci} in boundary layer

2.3 条件相位平均

顺时针旋转的展向涡通常被认为与发卡涡的涡头密切相关,而发卡涡在向下游迁移的过程中会对周围流场施加诱导作用,产生猝发事件^[29],对湍流内部的能量产生和输运起到了重要作用,发卡涡的形成与分布也与湍流脉动密切相关^[30]。

条件相位平均是研究流场中涡结构的典型方法。为研究凹壁面上展向发卡涡头的变化,2.3小节使用该方法提取了小视场内顺向涡(即顺时针旋转的展向涡)的统计特征。展向涡的识别条件使用2.2小节所述的 Λ_{ci} 准则^[31],可表示为:

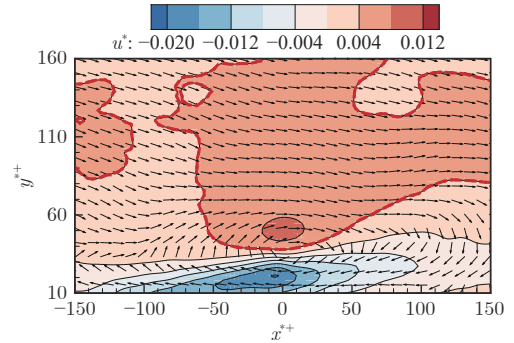
$$\Lambda_{ci}(x^*, y^*) < -\Lambda_{ci, rms}(y^*) \quad (4)$$

当检测位置达到检测条件,提取该时刻检测位置附近的流场。本文在小视场内选取了2个法向参考高度进行条件采样。

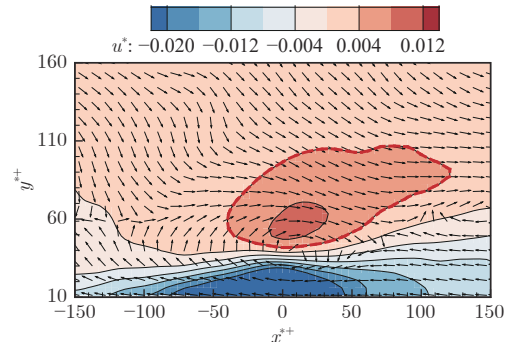
图7为参考法向高度 $y_{ref}^+ = 30$ 附近流向脉动速度的条件相位平均结果,流向脉动速度在参考位置的上方主要为正脉动,下方为负脉动。从图中可以看出:在凹壁面上游,顺向涡上方正脉动的峰值比平板情况下更强,以 $u^* = 0.004$ m/s 的等值线为基准(红色虚线),其空间尺度小于平板情况,顺向涡下方的负脉动也强于平板情况;而在凹壁面下游,正脉动峰值被削弱,空间尺度明显增大,但小于平板情况,下方负脉动的强度和空间尺度则仍在继续增大。

在 $y_{ref}^+ = 80$ 附近也对顺向涡进行了提取,图8为提取出的顺向涡结果。图中表明,在凹壁面湍流边界层中,顺向涡上方正脉动的空间尺度随着边界

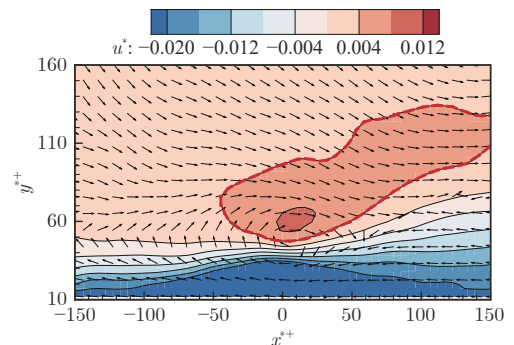
层向下游的发展逐渐缩小,但峰值的范围逐渐增大,同时二者均强于平板情况。此外,随着湍流边界层向下游发展,顺向涡下方的负脉动明显增强且均强于平板情况。



(a) $y_{ref}^+ = 30.29$ (光滑平板)



(b) $y_{ref}^+ = 30.23$ (凹壁面上游)



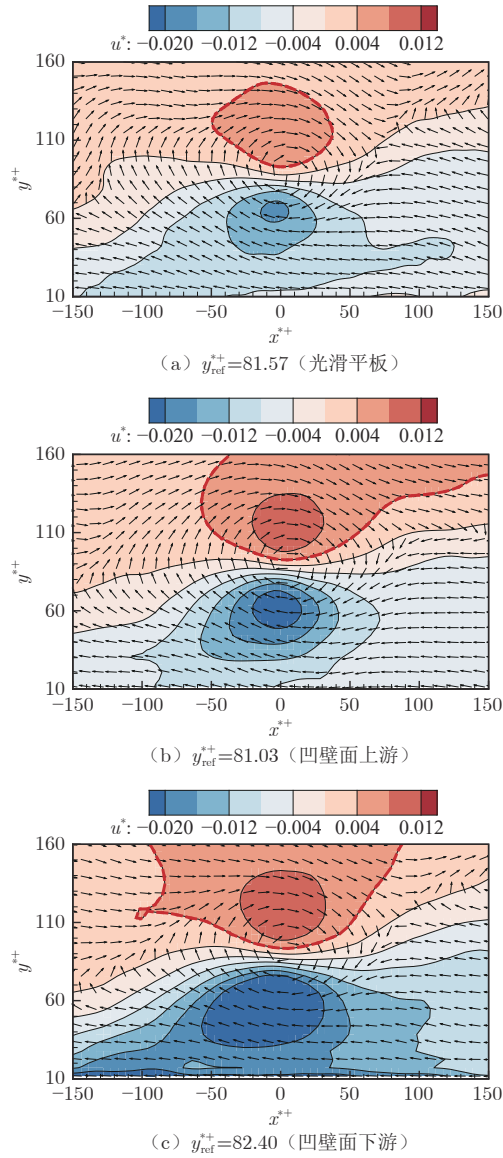
(c) $y_{ref}^+ = 33.08$ (凹壁面下游)

图7 小视场 $y_{ref}^+ = 30$ 附近顺向涡流向脉动速度的条件平均等值线图
Fig. 7 Conditional phase-averaged contour of the fluctuation velocity in the direction of the downward vortex near $y_{ref}^+ = 30$ in a small field

2.4 两点相关分析

从之前分析可知,流场内的顺向涡在凹曲率和流向顺压梯度的组合影响下,产生了较大变化。众所周知,顺向涡与发卡涡头有着密切联系,而发卡涡是壁湍流中普遍存在的相干结构^[32],因此,在凹曲率和流向顺压梯度的影响下,湍流边界层内相干结构的运动和发展也会产生一定变化。

针对相干结构在不同法向高度的流向分布特

图 8 小视场 $y_{\text{ref}}^+ = 80$ 附近顺向涡流向脉动速度的条件平均等值线图Fig. 8 Conditional phase-averaged contour of the fluctuation velocity in the direction of the downward vortex near $y_{\text{ref}}^+ = 80$ in a small field

征, 本文使用两点流向脉动速度相关法来体现凹壁面上湍流边界层内部相干结构在受到凹曲率和流向顺压梯度组合影响时产生的变化^[13, 33-34]。两点流向脉动速度相关计算公式如下:

$$R_{uu}(\Delta x, y, y_{\text{ref}}) = \frac{\langle u(x, y_{\text{ref}})u(x + \Delta x, y) \rangle}{\sigma_u(y_{\text{ref}})\sigma_u(y)} \quad (5)$$

式中, y_{ref} 表示计算选取的参考法向高度, Δx 表示两点之间的流向空间延迟, σ_u 表示流向脉动速度的均方根。

为研究近壁面附近相干结构的形态, 图 9 绘制了小视场两点相关结果, 所选取的参考高度与近壁处条件平均所选取的高度一致, x^* 与 y^* 均使用内

尺度进行无量纲化。从图中可以看到, 相较于光滑平板情况, 凹壁面近壁面处相干结构的尺度呈现先缩小后增大的趋势。在两点相关结果中, 相干结构呈现出椭圆外形。筛选出某一等值线上的所有点, 并对这些点进行椭圆拟合, 即可获得椭圆方程, 基于此方程可以获取相干结构与壁面之间的夹角。本文选取 $R_{u^*u^*} = 0.4$ 等值线(红色虚线)上的点作为参考点, 计算出的相干结构与壁面夹角已在图 9 中指出。可以发现: 位于缓冲层附近的相干结构与壁面的夹角明显小于光滑平板情况; 随着边界层向下游发展, 相干结构逐渐向壁面倾斜, 其沿流向的尺度也被逐渐拉长, 这与仅有流向顺压梯度影响时的趋势类似^[10]。但由于流向凹曲率的影响, 相干结构的尺度在上下游增长不均匀, 下游的空间尺度增长幅度更大。

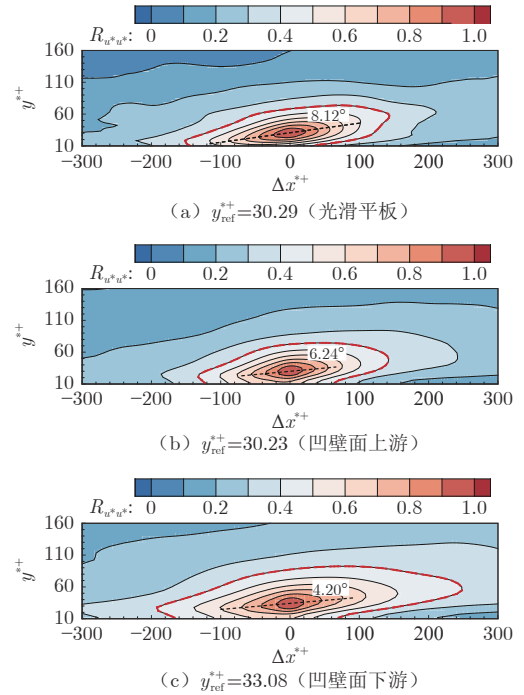


图 9 小视场流向两点相关系数等值线图

Fig. 9 The contour of two points correlation coefficient in the streamwise direction in the small field

小视场可以呈现出流场近壁处细致的空间形态, 而大视场则可以较为完整地表征相干结构的尺度大小。图 10 为不同工况下大视场两点相关系数的结果, 选取的参考法向高度在 $y_{\text{ref}}^+ = 80$ 附近, x^* 与 y^* 均使用内尺度进行无量纲化。在该高度附近, 湍流边界层受到凹曲率和流向顺压梯度的影响, 对数律区相干结构的尺度明显增大, 且随着湍流边界层向下游的发展, 相干结构的尺度逐渐增大, 在

下游位置超过了1倍边界层厚度(内尺度无量纲化后的边界层厚度 $\delta^+ = \delta u_\tau / \nu = 753.26$)。

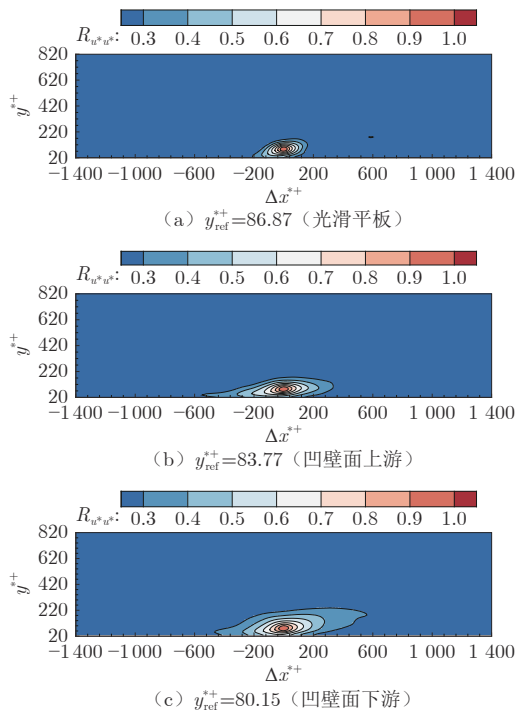


图10 大视场流向两点相关系数等值线图

Fig. 10 The contour of two points correlation coefficient in the streamwise direction in the large field

3 结论

通过双相机大小视场的 TRPIV 实验,对带有纵向凹曲率的壁面进行了测量并获取了瞬时速度场,经过数据处理和分析得出以下结论:

1)在流向凹曲率壁面上得到的平均速度剖面随着向下游发展逐渐偏离传统对数律,同时尾迹区被抑制。在相同法向高度的湍流强度均弱于平板情况。这说明流向凹曲率壁面上的湍流活动被明显抑制,且尾迹区的抑制作用相对更强。

2)相比于平板情况,凹壁面湍流边界层中涡的强度在不同法向高度均明显增强,且随着向下游的发展而逐渐增大。对数律区及其下方区域与尾迹区旋涡强度的差值增大,这表明凹壁面上湍流边界层内的涡强度显著增强,且更集中于近壁附近。

3)对凹壁面湍流边界层对数律区内的顺向涡进行条件相位平均,发现凹壁面会增强顺向涡下方负的流向脉动速度。缓冲层附近顺向涡上方正脉动峰值被削弱,但空间尺度有所增大,而对数律区上侧正脉动更加集中于顺向涡上方较小的区域内,且脉动强度明显增大。随着向下游的发展,缓冲层附近顺向涡上方正脉动的峰值和空间尺度均弱于平板情

况,而在对数律区上侧则均强于平板情况。

4)两点相关结果表明,凹壁面上相干结构向外层迁移的趋势减弱,其空间尺度随着向下游的发展呈现出不断增大的趋势,其中上游的空间尺度增长被抑制,而在下游则相反。

参考文献:

- [1] YOU J, BUCHTA D A, ZAKI T A. Concave-wall turbulent boundary layers without and with free-stream turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 915: A4. doi: 10.1017/jfm.2021.12
- [2] HOLLOWAY A G L, ROACH D C, AKBARY H. Combined effects of favourable pressure gradient and streamline curvature on uniformly sheared turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 526: 303-336. doi: 10.1017/s0022112004003088
- [3] LOPES A S, PIOMELLI U, PALMA J. Large-eddy simulation of the flow in an S-duct[J]. *Journal of Turbulence*, 2006, 7(11): 1-24. doi: 10.1080/14685240500331900
- [4] PATEL V C, SOTIROPOULOS F. Longitudinal curvature effects in turbulent boundary layers[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1997, 33(1-2): 1-70. doi: 10.1016/S0376-0421(96)00001-2
- [5] HARUN Z, MONTY J P, MATHIS R, et al. Pressure gradient effects on the large-scale structure of turbulent boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 715: 477-498. doi: 10.1017/jfm.2012.531
- [6] SPALART P R. Numerical study of sink-flow boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 172(1): 307-328. doi: 10.1017/s0022112086001751
- [7] AUBERTINE C D, EATON J K. Turbulence development in a non-equilibrium turbulent boundary layer with mild adverse pressure gradient[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 532: 345-364. doi: 10.1017/s0022112005004143
- [8] JOSHI P, LIU X F, KATZ J. Turbulence in accelerating boundary layers[C]//Proceedings of ASME/JSME/KSME Joint Fluids Engineering Conference. 2012. doi: 10.1115/AJK2011-25010
- [9] VOLINO R J. Non-equilibrium development in turbulent boundary layers with changing pressure gradients[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 897: A2. doi: 10.1017/jfm.2020.319
- [10] MERONEY R N, BRADSHAW P. Turbulent boundary-layer growth over a longitudinally curved surface[J]. *AIAA Journal*, 1975, 13(11): 1448-1453. doi: 10.2514/3.7014
- [11] SO R M C, MELLOR G L. Experiment on turbulent boundary layers on a concave wall[J]. *Aeronautical Quarterly*, 1975, 26(1): 25-40. doi: 10.1017/s0001925900007174
- [12] AROLLA S K, DURBIN P A. LES of spatially developing turbulent boundary layer over a concave surface[J]. *Journal of Turbulence*, 2015, 16(1): 81-99. doi: 10.1080/14685248.2014.959126
- [13] MATSUBARA K, MUROMOTO T. Two-point correlation

- and integral scale of spatially advancing curved channel flow at friction-velocity-based Reynolds number 550[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 77: 31-39.
doi: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.03.003)
- [14] SALTAR G, ARAYA G. Reynolds shear stress modeling in turbulent boundary layers subject to very strong favorable pressure gradient[J]. *Computers & Fluids*, 2020, 202: 104494.
doi: [10.1016/j.compfluid.2020.104494](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104494)
- [15] UZUN A, MALIK M R. Simulation of a turbulent flow subjected to favorable and adverse pressure gradients[J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2021, 35(3): 293-329.
doi: [10.1007/s00162-020-00558-4](https://doi.org/10.1007/s00162-020-00558-4)
- [16] COHEN E, GLOERFELT X. Influence of pressure gradients on wall pressure beneath a turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 838: 715-758.
doi: [10.1017/jfm.2017.898](https://doi.org/10.1017/jfm.2017.898)
- [17] VOLCHKOV E P, MAKAROV M S, SAKHNOV A Y. Boundary layer with asymptotic favourable pressure gradient [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(13-14): 2837-2843.
doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.014](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.014)
- [18] VOLINO R J, SCHULTZ M P. Determination of wall shear stress from mean velocity and Reynolds shear stress profiles[J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3(3): 034606.
doi: [10.1103/physrevfluids.3.034606](https://doi.org/10.1103/physrevfluids.3.034606)
- [19] JONES W P, LAUNDER B E. Some properties of sink-flow turbulent boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 56(2): 337-351.
doi: [10.1017/s0022112072002903](https://doi.org/10.1017/s0022112072002903)
- [20] SPALDING D B. A new analytical expression for the drag of a flat plate valid for both the turbulent and laminar regimes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1962, 5(12): 1133-1138.
doi: [10.1016/0017-9310\(62\)90189-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(62)90189-8)
- [21] WILLERT C E. High-speed particle image velocimetry for the efficient measurement of turbulence statistics[J]. *Experiments in Fluids*, 2015, 56(1): 1-17.
doi: [10.1007/s00348-014-1892-4](https://doi.org/10.1007/s00348-014-1892-4)
- [22] 王建杰, 潘翀, 王晋军. 湍流边界层壁面剪切应力的光学测量及统计特性分析[C]//中国力学大会(CCTAM 2019)论文集. 2019.
- [23] NGUYEN T D, WELLS J C, NGUYEN C V. Wall shear stress measurement of near-wall flow over inclined and curved boundaries by stereo interfacial particle image velocimetry[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2010, 31(3): 442-449.
doi: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.12.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.12.002)
- [24] DIXIT S A, RAMESH O N. Large-scale structures in turbulent and reverse-transitional sink flow boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 649: 233-273.
doi: [10.1017/s0022112009993430](https://doi.org/10.1017/s0022112009993430)
- [25] ZHOU J, ADRIAN R J, BALACHANDAR S, et al. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 387: 353-396.
doi: [10.1017/s002211209900467x](https://doi.org/10.1017/s002211209900467x)
- [26] LEHEW J A, GUALA M, McKEON B J. Time-resolved measurements of coherent structures in the turbulent boundary layer[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(4): 1-16.
doi: [10.1007/s00348-013-1508-4](https://doi.org/10.1007/s00348-013-1508-4)
- [27] 刘铁峰, 王鑫蔚, 唐湛棋, 等. 超疏水表面对湍流边界层相干结构影响的TRPIV实验研究[J]. *实验流体力学*, 2019, 33(3): 90-96.
LIU T F, WANG X W, TANG Z Q, et al. TRPIV experimental study of the effect of superhydrophobic surface on the coherent structure of turbulent boundary layer[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2019, 33(3): 90-96.
doi: [10.11729/syltlx20180101](https://doi.org/10.11729/syltlx20180101)
- [28] WU Y, CHRISTENSEN K T. Population trends of spanwise vortices in wall turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 568: 555-76.
doi: [10.1017/s002211200600259x](https://doi.org/10.1017/s002211200600259x)
- [29] ADRIAN R J, MEINHART C D, TOMKINS C D. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 422: 1-54.
doi: [10.1017/s0022112000001580](https://doi.org/10.1017/s0022112000001580)
- [30] 苏健, 田海平, 姜楠. 逆向涡对超疏水壁面减阻影响的TRPIV实验研究[J]. *力学学报*, 2016, 48(5): 1033-1039.
SU J, TIAN H P, JIANG N. Trpiv experimental investigation of the effect of retrograde vortex on drag-reduction mechanism over superhydrophobic surfaces[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 1033-1039.
doi: [10.6052/0459-1879-16-140](https://doi.org/10.6052/0459-1879-16-140)
- [31] TANG Z Q, WU Y H, JIA Y X, et al. PIV measurements of a turbulent boundary layer perturbed by a wall-mounted transverse circular cylinder element[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2018, 100(2): 365-389.
doi: [10.1007/s10494-017-9852-8](https://doi.org/10.1007/s10494-017-9852-8)
- [32] ADRIAN R J. Hairpin vortex organization in wall turbulence[J]. *Physics of Fluids*, 2007, 19(4): 041301.
doi: [10.1063/1.2717527](https://doi.org/10.1063/1.2717527)
- [33] MARUSIC I. On the role of large-scale structures in wall turbulence[J]. *Physics of Fluids*, 2001, 13(3): 735-743.
doi: [10.1063/1.1343480](https://doi.org/10.1063/1.1343480)
- [34] JAISWAL P, MOREAU S, AVALLONE F, et al. On the use of two-point velocity correlation in wall-pressure models for turbulent flow past a trailing edge under adverse pressure gradient[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(10): 105105.
doi: [10.1063/5.0021121](https://doi.org/10.1063/5.0021121)

作者简介:



王 轩(1997—), 男, 天津人, 硕士研究生。研究方向: 湍流边界层。通信地址: 天津市津南区雅观路 135 号天津大学北洋园校区机械工程学院力学系 36 教学楼 412 室(300354)。
E-mail: 491716766@qq.com

(编辑: 秦虹)