



微型涡流发生器影响下的湍流边界层流场与摩阻特性

张奕 潘翀 窦建宇 张淼

Flowfield and friction characteristics downstream of mirco vortex generator in turbulent boundary layer

ZHANG Yi, PAN Chong, DOU Jianyu, ZHANG Miao

引用本文:

张奕, 潘, 窦建宇, 等. 微型涡流发生器影响下的湍流边界层流场与摩阻特性[J]. 实验流体力学, 2023, 37(4): 48–58. DOI: 10.11729/sytlx20230027

ZHANG Yi, PAN Chong, DOU Jianyu, et al. Flowfield and friction characteristics downstream of mirco vortex generator in turbulent boundary layer[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics | J Exper Fluid Mech, 2023, 37(4): 48–58. DOI: 10.11729/sytlx20230027

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11729/sytlx20230027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

涡流发生器对高负荷压气机叶栅角区分离影响的实验研究

Experimental investigation on the effects of vortex generator on corner separation in a high-load compressor cascade

实验流体力学. 2017, 31(6): 22–28, 36 <https://doi.org/10.11729/sytlx20160195>

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>

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>

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>

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>

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>

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

微型涡流发生器影响下的湍流边界层 流场与摩阻特性

张奕¹, 潘翀^{1, 2}, 窦建宇¹, 张淼^{3, *}

1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191

2. 北京航空航天大学 宁波创新研究院先进飞行器与空天动力技术创新研究中心, 宁波 315800

3. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210

摘要:在中等雷诺数平板湍流边界层中, 利用体视粒子图像测速技术与免标定双层热膜摩阻传感器, 测量了单排楔形微型涡流发生器阵列下游的速度场与摩阻, 以研究微型涡流发生器对湍流统计量和摩阻特性的影响。速度场测量结果表明: 微型涡流发生器诱导下游湍流边界层内产生时均流向涡对和时均流向速度亏损区, 导致流向脉动速度的展向预乘能谱出现第二外区峰值。速度场本征正交分解的结果表明: 微型涡流发生器诱导产生的流动结构与湍流边界层内的大、超大尺度结构的能量贡献相当, 并影响了近壁含能结构的分布。摩阻测量实验表明: 具有较高高度、展向排列更密集的微型涡流发生器阵列的减摩阻率更高, 减摩阻效果可持续至下游 80 倍自身特征高度处。

关键词:微型涡流发生器; 湍流边界层; 雷诺应力; 流动控制; 摩阻

中图分类号: V211.7

文献标识码: A

Flowfield and friction characteristics downstream of mirco vortex generator in turbulent boundary layer

ZHANG Yi¹, PAN Chong^{1, 2}, DOU Jianyu¹, ZHANG Miao^{3, *}

1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Aircraft and Propulsion Laboratory, Ningbo Institute of Technology,
Beihang University, Ningbo 315800, China

3. Shanghai Aircraft Design & Research Institute,
Commercial Aircraft Corporation of China Ltd., Shanghai 201210, China

Abstract: The present work uses the stereoscopic particle image velocimetry and calibration-free dual hot-film wall shear stress measurement sensor to measure the flowfield and friction at downstream of the one array of forwards wedge Micro Vortex Generator (MVG) in the turbulent boundary layer at moderate Reynolds number. The result of flowfield measurement shows that MVG produces the streamwise velocity defect regions and streamwise vortices pairs in downstream time-averaged flowfield, which causes the second outer-peak in the spanwise pre-multiplied energy spectra. The result of proper orthogonal decomposition shows that the contribution of energy of structures induced by MVG is equivalent to the that of large-scale structures and very large-scale structures in the smooth-wall turbulent boundary layer, which also significantly affects the spatial distribution of the near-wall structures. The friction measurement experiment shows that MVG array with higher height and closer spanwise arrangement has

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-05-07; 录用日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(91952302, 11721202)

* 通信作者 E-mail: zhangmiao@comac.cc

引用格式: 张奕, 潘翀, 窦建宇, 等. 微型涡流发生器影响下的湍流边界层流场与摩阻特性 [J]. 实验流体力学, 2023, 37(4): 48-58.

ZHANG Y, PAN C, DOU J Y, et al. Flowfield and friction characteristics downstream of mirco vortex generator in turbulent boundary layer[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(4): 48-58.

higher friction drag reduction. The drag reduction effect of MVG lasts downstream to 80 times of its own characteristic height.

Keywords: micro vortex generator; turbulent boundary layer; Reynolds stress; flow control; friction drag

0 引言

附着在交通工具表面的边界层流态大部分为湍流,其所产生的摩阻较层流边界层高出约一个量级。通过控制湍流边界层内多尺度流动结构可有效减小边界层的摩阻并实现总阻力的降低,对节能减排具有重要意义。

随着雷诺数的升高,湍流边界层内小尺度流动结构对湍动能和摩阻的贡献逐渐降低,以近壁面小尺度结构为主要控制对象的传统主/被动控制技术的减阻效果随之降低。近期对湍流边界层内跨流层跨尺度湍流结构相互作用的研究表明,外区大尺度流动结构影响着湍流边界层内跨流层能量传递和近壁雷诺切应力的生成^[1-2]。因此,通过控制较高流层中的大尺度流动结构,既可直接降低其在壁面留下的大尺度摩阻成分,亦可抑制其对近壁小尺度结构的调制作用,降低小尺度结构对壁面摩阻的贡献,进而有望在高雷诺数条件下降低壁面摩阻^[3-5]。

目前针对湍流边界层的减阻流动控制技术包括沟槽壁面^[6-9]、超疏水壁面^[10]、局部吹吸气^[11]、近壁面行波^[12]和涡流发生器(Vortex Generator, VG)^[13-15]等。其中,VG具有结构简单、附加重量低、易于维护等优点,工程应用潜力较大。VG的特征高度 h 与边界层厚度 δ 相当($h/\delta \sim 1$),存在附加压差阻力大的缺点。与之相比,微型涡流发生器(Micro Vortex Generator, MVG)几何尺寸更小($h/\delta < 0.5$)、附加阻力更低^[16-17],具有比常规VG更好的减阻控制能力^[13, 17-18]。因其特征高度 h 的差异,MVG也被称为低形阻VG(Low-Profile VGs, LPVG)^[18-20]、亚边界层VG(Sub-Boundary-Layer VGs, SBVG)^[21]、浸没式VG(Submerged VGs)^[16]等。MVG有叶片形、楔形、车辙形及叉骨形等多种形状。当来流绕过MVG时,在其下游会形成较为稳定的时均流向涡对,从而对近壁流动施加控制。

目前,对MVG流动控制技术的研究主要集中于3个方向:1)分析不同形式MVG在零压梯度或逆压梯度边界层中诱导产生的流动结构及其沿程演化规律^[19, 21-22];2)应用MVG进行边界层分离流动控

制^[18, 20-21];3)将MVG应用于二维翼型、三维机翼、机身等处进行流动减阻试验^[20-21, 23-26]。为解决MVG在湍流边界层减阻控制中的工程应用问题,需明确MVG对流场产生有效控制的流向范围。文献^[20]中提到,当基于边界层动量厚度 θ 的特征雷诺数 $Re_\theta \approx 3.5 \times 10^5$ 时,MVG产生的时均流向涡对沿程抬升并在其下游约 $50h$ 处耗散殆尽。Zaman等^[22]的研究表明,当 $Re_\theta \approx 1.1 \times 10^4$ 时,MVG所产生的流向高、低速流动区域沿主流方向逐渐融合,并在其下游约 $24h$ 处形成较厚的均匀低速流层。

本文针对上述第一个研究方向开展实验测量,旨在研究MVG对经典零压梯度湍流边界层不同下游位置流动特性和摩阻的影响,为掌握MVG控制效果的沿程演化规律提供新的认识,为MVG在中高雷诺数湍流边界层中的减阻流动控制应用提供机理支撑。为此,本文使用体视粒子图像测速(Stereoscopic Particle Image Velocimetry, SPIV)技术和免标定双层热膜摩阻传感器,在低速风洞中测量中等雷诺数条件下平板湍流边界层内单排楔形MVG阵列下游不同流向站位的法向-展向平面内的三分量速度场和当地壁面摩阻,使用统计分析、能谱分析和本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)等方法研究MVG对湍流边界层内流场统计特性和流动结构的影响,并讨论MVG下游摩阻的沿程变化及MVG几何参数对减摩阻能力的影响。

1 实验设备与研究方法

1.1 实验模型布置

风洞实验在北京航空航天大学D6低速风洞中进行。该风洞为直流吸气式,风速可调范围为 $0 \sim 50$ m/s。实验段总长度为5 m,收缩比约为9:1,采用变截面设计以减小洞壁体发展边界层对主流区流场均匀性的影响,其入口、出口横截面尺寸分别为 $0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $0.48 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。

实验模型布置如图1所示。在风洞实验段内放置长4.5 m、厚0.015 m、宽0.40~0.48 m的有机玻璃平板,用于产生零压力梯度平板湍流边界层。平板距风洞底壁0.085 m,平板前缘距风洞实验段入口

约 0.1 m, 前缘具有 9.5°切角以防止流动在前缘产生局部分离。在距平板前缘 0.300 m 的下游位置, 沿展向布置一根直径 1 mm 的圆柱形碳棒作为绊线, 以触发边界层转捩。本文所使用的笛卡尔坐标系原点位于平板展向中心处 MVG 后缘与壁面的接触点, x 、 y 、 z 分别代表流向、法向和展向, 各方向的速度、时均速度和脉动速度分别记为 (U, V, W) 、 $(\bar{U}, \bar{V}, \bar{W})$ 和 (u, v, w) 。 U_∞ 为自由来流速度。如无特殊说明, 在下文光滑壁面湍流和 MVG 壁面湍流各工况结果中, 具有上标“+”的速度和长度单位均已使用光滑壁面湍流边界层的内尺度(摩擦速度 u_τ 及涡黏尺度 l^*)作无量纲化。

在距绊线 3.1 m 的下游位置, 沿展向布置一排 3D 打印加工的 MVG 阵列。边界层在此流向位置已经完全转捩为湍流边界层。表 1 为自由来流速度 $U_\infty = 14$ m/s 时该处湍流边界层的主要特征参数, 其中 Re_τ 为摩擦雷诺数 ($Re_\tau = u_\tau \delta / \nu$, ν 为运动黏性系数), Re_θ 为动量厚度雷诺数, H 为形状因子,

表 1 光滑壁面湍流边界层主要特征参数

Table 1 Main characteristic parameters of the studied smooth-wall TBL

$U_\infty / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	δ / cm	$u_\tau / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Re_τ	Re_θ	H	Δy^+	Δz^+	$u_\tau T / \delta$
14	9.98	0.55	3453	6353	1.3	4.5	4.5	11000

1.2 MVG 尺寸参数

MVG 阵列特征尺寸如图 2 所示, 其中 l 为流向长度, a 为展向宽度, s 为展向间距。本文以 Ashill 等^[21]提出的前向三角楔形 MVG (Forwards Wedge MVG) 作为基准模型。该构型的 MVG 在已有研究中表现出最小的附加阻力及较优的控制性能^[21, 28]。本文中, 基准楔形 MVG 记作 MVG_0 , 其特征高度 $h_0 = 5$ mm、展向间距 $s_0 = 0$ mm (即相邻 MVG 无间隙)、展向宽度 $a_0 = 10$ mm、流向长度 $l_0 = 20$ mm。下文中的部分空间坐标将使用 MVG_0 的特征高度 h_0 进行无量纲化。此外, 本文还对比研究了具有更大展向间距的 MVG 阵列 (记作 MVG_s) 及更高特征

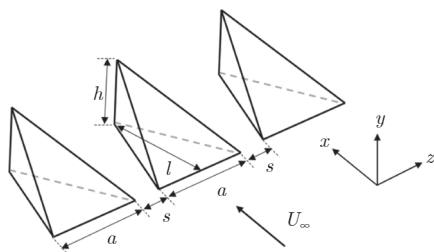


图 2 MVG 阵列特征尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MVG array characteristic size

Δy^+ 、 Δz^+ 为空间分辨率, $u_\tau T / \delta$ 为以边界层外尺度无量纲的采样总时长 (T 为各工况实验的拍摄时间, 用于衡量计算结果是否收敛)。上述特征参数系利用 Chauhan 等^[27]提出的复合速度型公式对 SPIV 所测流向时均速度型函数 $\bar{U}^+(y^+)$ 进行拟合得到, 综合考虑了内区及尾迹区内的流向时均速度的分布特点。

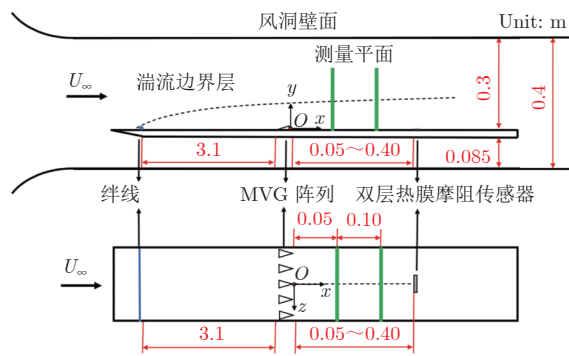


图 1 低速风洞中实验布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup in the test section of a low-speed wind tunnel

高度的 MVG 阵列 (MVG_h)。3 种 MVG 阵列的主要几何参数如表 2 所示。

表 2 3 种 MVG 阵列的主要几何参数

Table 2 Main size of the three MVG array

模型名称	s / mm	h / mm	l / mm	a / mm
MVG_0	0	5	20	10
MVG_s	5	5	20	10
MVG_h	0	10	20	10

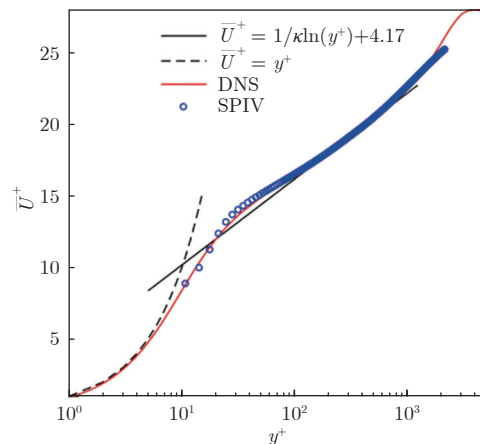
1.3 SPIV 测量

当 $U_\infty = 14$ m/s 时, 对 3 种 MVG 阵列下游 $x/h_0 = 10$ (近尾迹区) 和 $x/h_0 = 30$ (远尾迹区) 这 2 个流向站位开展 SPIV 测量, 获得该 x 站位 y - z 平面内的三分量速度场, 并与无 MVG 条件下的光滑壁面流场测量结果进行对比。SPIV 实验所使用的示踪粒子为平均粒径约 2 μm 的癸二酸二异辛酯 (DEHS) 液滴, 通过网格状的分布式粒子布撒装置注入直流式风洞的进气口, 被吸入风洞后流经收缩段、稳定段与主流充分掺混。双曝光脉冲激光器 (Beamtech Vlite-380) 激发能量为 380 mJ/pulse 的激光束, 经透镜组整形后形成片光, 从风洞侧壁垂

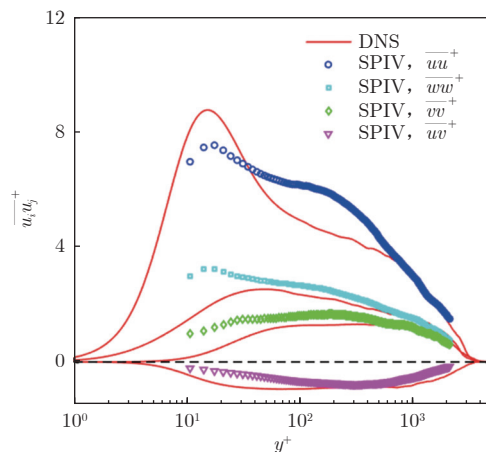
直入射照亮测量平面。片光厚度为 3 mm, 以降低流向速度的测量不确定度。2 台超高分辨率跨帧 CCD 相机 (Imperx CLB-B6620M, 分辨率为 6600 像素 $\times$ 4400 像素) 搭配 180 mm 微距镜头 (TAMRON SP AF 180 mm F/3.5 MACRO1:1) 记录测量平面内的示踪粒子信息, 其物理分辨率是 0.016 mm/像素。2 台相机分别布置于测量平面的上、下游两侧, 以异侧布局的形式拍摄, 相机视角约为 65°。使用经 GPU 加速的光流法速度场求解器 (Multi-iterative Lucas-Kanade, MILK)^[29] 分别计算 2 台相机像平面内的粒子图像, 获得二维二分量速度场, 计算时对粒子图像进行了 4 次降采样, 最终查询窗口尺寸为 16 像素 $\times$ 16 像素, 重叠率为 75%, 最大跨帧位移不超过 12 像素。之后, 将 2 台相机像平面上的二维二分量速度场通过空间标定映射至测量平面, 获得二维三分量速度场^[30-32]。SPIV 测量的有效视野范围为 80 mm (法向) $\times$ 60 mm (展向)。示踪粒子以 14 m/s 的速度在跨帧时间 20 μ s 内沿流向最多前进 2.8 mm (小于片光厚度 3 mm), 可保证在跨帧粒子图像对上计算出互相关峰。各工况均采样 1000 对瞬时速度场, 相机的采样频率为 0.5 Hz。经检验, SPIV 测量得到的湍流二阶统计量在此样本量下达到收敛。

应用 MILK 算法得到粒子位移的不确定度约为 0.1 像素^[29], 根据陈启刚和钟强^[30]给出的估算方法, 面内速度分量 (V , W) 的测量精度约为 0.4%, 面外速度分量 (U) 的测量精度约为 1.0%。图 3 为 SPIV 测量得到的光滑壁面湍流边界层的流向时均速度型函数 $\bar{U}^+(y^+)$ 、雷诺正应力曲线 ($\overline{uu}^+(y^+)$ 、 $\overline{vv}^+(y^+)$ 、 $\overline{ww}^+(y^+)$) 和雷诺切应力曲线 ($\overline{uv}^+(y^+)$), 同时给出 Watanabe 等^[33]在 $Re_\tau = 3058$ 条件下开展时间发展湍流边界层直接数值模拟 (Direct Numerical Simulation, DNS) 得到的结果作为对比, 图中 κ 为卡门常数, $\overline{u_i u_j}^+(i = j = 1, 2, 3)$ 中 u_1 、 u_2 、 u_3 分别表示脉动速度 u 、 v 、 w 。可以看到, SPIV 实验测量得到的 $\bar{U}^+$ 在近壁区 $y^+ = 10$ 处仍然能够和 DNS 的结果相吻合; 在雷诺应力方面, 实验测量的 $\overline{vv}^+$ 、 $\overline{ww}^+$ 及 $\overline{uv}^+$ 沿法向的变化趋势和 DNS 的结果吻合, 两者的数值在 $y^+ = 30$ 以上的流层基本一致; 但 $\overline{uu}^+$ 在 $y^+ = 10 \sim 20$ 以内 (内区) 总体低于 DNS 的结果, 究其原因, 一方面是本文研究的体发展湍流边界层和 DNS 模拟的时间发展边界层^[33]在流动特性上存在差异, 另一方面则是本文采用的 SPIV 实验布置方式导致测量面外的 U 分量不确定度更大, 且较高的片

光厚度使得沿片光厚度方向的体平均效应较强, 进一步降低了对 U 分量小尺度脉动的解析能力, 从而使 $\overline{uu}^+$ 内区测量结果相较于 DNS 结果偏低。



(a) 时均速度型函数



(b) 雷诺应力的法向分布

图 3 光滑壁面工况下 SPIV 测量结果与 DNS 结果对比
Fig. 3 The SPIV measurement results are compared with the DNS results under the smooth wall condition

1.4 壁面摩阻测量

湍流边界层的壁面摩阻由高南和刘玄鹤^[34]发展的一种新型免标定双层热膜摩阻传感器测量得到。该传感器装置如图 4(a)所示, 其工作原理为: 在外接恒温开尔文电桥的控制下, 双层热膜 (镍箔) 同温协同工作, 此时下膜的存在将上膜向壁面的传热损失限制在总产热量的 5% 以内, 使上膜热量几乎只传给流体, 解决了传统单层热膜摩阻测量技术因壁面热损失而导致的测量偏差问题。Liu 等在此基础上发展了根据上层热膜发热量计算壁面摩阻的免标定测量技术, 其计算原理详见文献^[35-37]。本文使用的矩形镍箔流向长度为 1.75 mm、展向宽度为 30 mm、厚度约为 40 μ m, 可测量矩形镍箔表面的平均摩阻。传感器电桥所测得的瞬时电压数据由数据采集卡 (NI USB-6259) 实时采集, 采样频率为 1024 Hz。

壁面时均摩阻 τ_w 理论值^[38] 的半经验关系式为:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \cdot 0.0592 Re_x^{-0.2} \quad (1)$$

式中: Re_x 表示以距边界层起点长度(绊线位置)为特征尺寸的雷诺数。

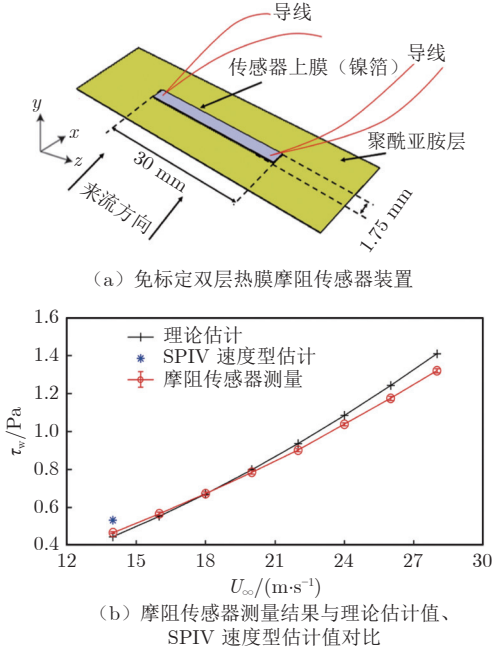


图4 摩阻传感器及其测量结果

Fig. 4 The friction sensor and its measurement results

对各工况均开展7次摩阻重复测量实验,多次测量所得不确定度用误差条表示。摩阻单次测量持续时间为40 s(满足 Ashill 等^[21] 建议的收敛性准则)。如图4(b)所示,在不同自由来流速度下利用摩阻传感器测得的光滑壁面湍流边界层的时均摩阻 τ_w (红色曲线)与式(1)估计的理论值(黑色曲线)相比较,二者最大误差约为4.7%。图4(b)中也给出了 $U_\infty = 14$ m/s 时经 SPIV 所测 $\bar{U}^+(y^+)$ 估算所得的 τ_w (蓝色点),比摩阻传感器的测量结果高14%。此外,本文还利用摩阻传感器测量了 $U_\infty = 14$ m/s 时光滑壁面及3组MVG阵列下游 $x/h_0 = 10 \sim 80$ 范围内的壁面摩阻,研究发现:即便是大间距的MVG_s阵列,摩阻传感器的展向测量尺寸仍然包含了2个MVG的展向周期尺寸,这意味着摩阻传感器获得的是具有展向平均意义的当地摩阻。

2 MVG 下游速度场统计量

图5给出了3种MVG阵列下游近、远尾迹区2个 x 站位($x/h_0 = 10$ 和30)的 $y-z$ 平面内的时均速度场。彩色云图表示垂直平面的流向速度分量 $\bar{U}^+$, 黑色箭头表示法向速度分量 $\bar{V}^+$ 和展向速度分量

$\bar{W}^+$ 合成的面内速度矢量。蓝色虚线为MVG阵列下游时均速度场 $\bar{U}^+ = 17$ 等值线,红色点划线为光滑壁面工况下 $\bar{U}^+ = 17$ 等值线。可以看到,在3种MVG阵列的下游近尾迹区,边界层近壁区均出现时均流向涡对和时均流向速度亏损区,时均流场的展向不均匀性显著,与前人研究相符^[21-22]; 时均流向涡对结构强度及时均流向速度亏损区沿程逐渐衰减,在下游远尾迹区仅表现为近壁处的低动量层,展向不均匀性明显减弱。相较于基准MVG₀工况(图5(b)),大间距MVG_s工况(图5(a))在远尾迹区形成的近壁低动量层更薄、更接近光滑壁面水平;而更高的MVG_h(图5(c))则显著增厚了远尾迹区的近壁低动量层。

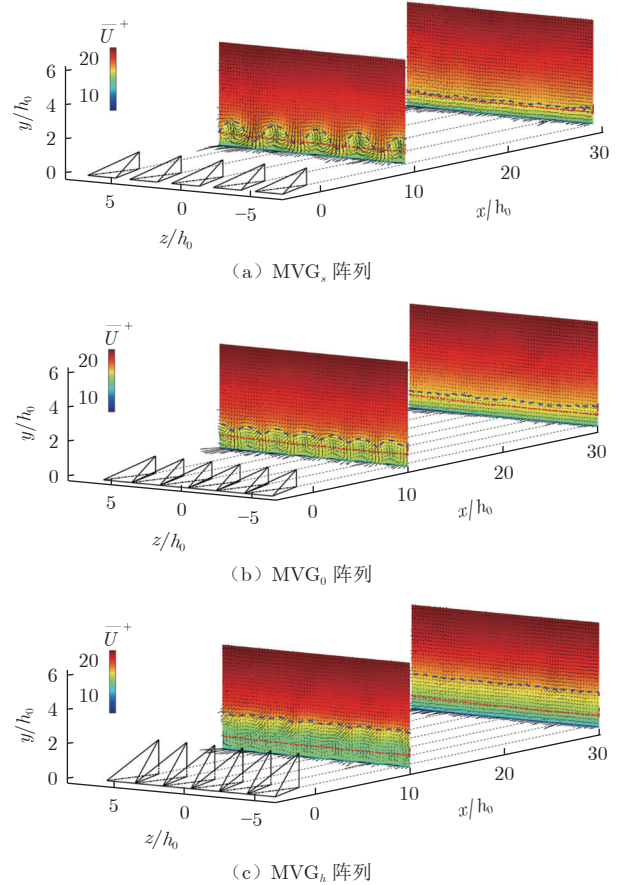


图5 MVG阵列下游的时均速度场

Fig. 5 Time averaged results of three velocity component fields behind MVG arrays

考虑到MVG引入的展向不均匀性,对流场统计量沿展向进行了平均。图6给出了3种MVG阵列的近、远尾迹区($x/h_0 = 10$ 和30)时均流向速度型和雷诺应力型的展向平均结果。图中,“ $\langle \rangle$ ”表示沿时间和展向的系综平均,蓝色和红色的点划线分别为MVG阵列 $h = 5, 10$ mm 所对应的法向位置。从

图 6(a) 可以看到, MVG 阵列对近尾迹区 ($x/h_0 = 10$) 流场统计量的影响主要体现在 3 个方面: 1) 在 MVG 高度的流层 ($y = h$) 附近, 产生低平均动量及高湍流脉动区, 主要由 MVG 诱导产生的时均流向涡对和时均流向速度亏损区所致; 2) 在 MVG 高度以下的近壁区 ($y < h$), 雷诺正应力 (即湍流脉动强度) 及雷诺切应力均有所降低, 可归因于时均流向涡对近壁湍流结构的规则化作用, 在一定程度上反映了 MVG 的减摩阻潜力; 3) MVG 的 h 越高、 s 越小, 对边界层的扰动作用越强, 诱导产生的时均流向涡

对越强。从图 6(b) 可以看到, 在远尾迹区 ($x/h_0 = 30$), MVG 对平均流场的诱导作用随时均流向涡对的耗散而减弱, 但仍然在湍流脉动强度场上留下峰值“印记”, 且峰值出现的流层相比近尾迹区更高, 反映了时均流向涡对从壁面逐渐抬升的 bottom-up 过程^[21, 39]。值得注意的是, 在 $x/h_0 = 30$ 处, 3 种 MVG 阵列工况下近壁区 ($y^+ < 15$) 的流向雷诺正应力和雷诺切应力均低于光滑壁面湍流边界层的水平, 降低的幅度仍和 MVG 高度及间距相关, 预示 MVG 在远尾迹区具有减摩阻潜力。

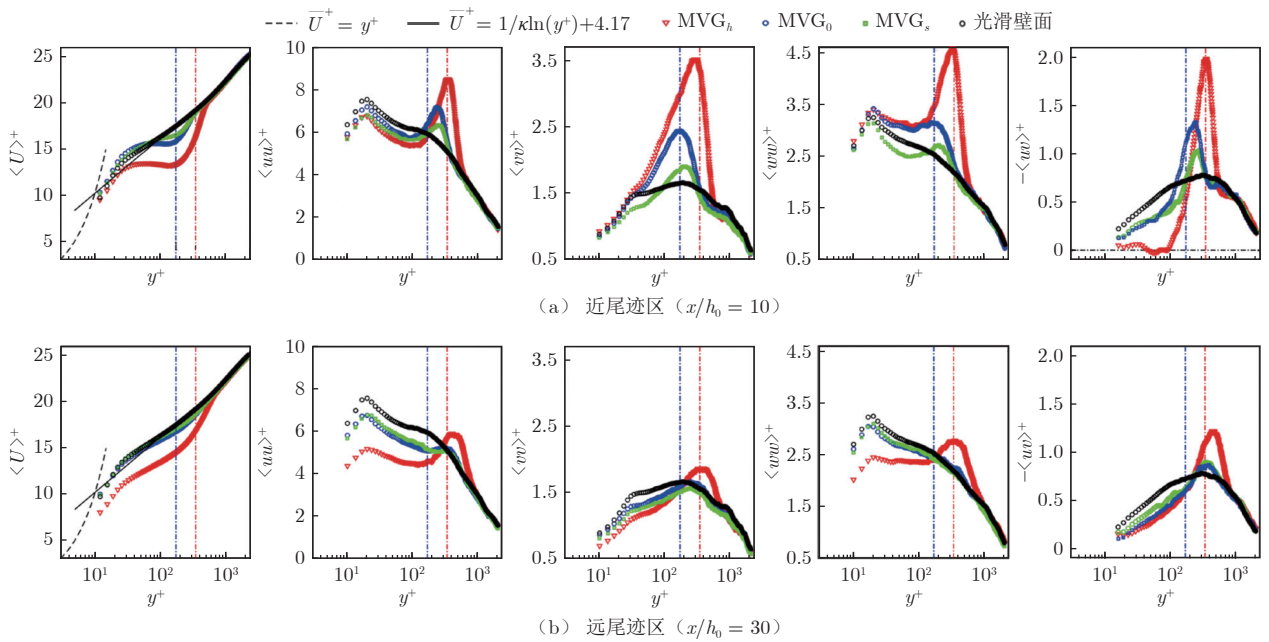


图 6 MVG 阵列下游的时均流向速度型与雷诺应力的展向平均结果

Fig. 6 Spanwise average results of wall-normal profiles of time-averaged streamwise velocity and Reynolds stress behind MVG arrays

3 展向能谱特性

为从尺度空间上厘清 MVG 对湍流脉动特性的影响, 对 SPIV 测量得到的速度场进行展向能谱分析。图 7 给出了 MVG₀ 阵列近、远尾迹区 ($x/h_0 = 10$ 和 30) u 、 v 、 w 分量的展向预乘能谱及 u 和 v 的互相关展向预乘能谱, 即 $k_z \hat{\phi}_{u_i u_j}$ ($i = j = 1, 2, 3$ 或 $i = 1, j = 2$), 同时给出光滑壁面的情况作为对比。各预乘能谱均使用所对应的光滑壁面工况的能谱峰值进行无量纲化, 即 $k_z \hat{\phi}_{u_i u_j} = k_z \phi_{u_i u_j} / k_z \phi_{u_i u_j}^{\max, \text{光滑}}$ 。其余工况 (MVG_h 和 MVG_s) 的能谱特性与 MVG₀ 工况类似, 受限于篇幅不再给出。如图 7(a) 所示, SPIV 测量能够解析到光滑壁面能谱 $k_z \hat{\phi}_{uu}$ 的内区峰 P_1 和外区峰 P_2 , 峰值的法向高度和峰值波长均与前人的

DNS 结果^[40] 一致。此外, $k_z \hat{\phi}_{vv}$ 、 $k_z \hat{\phi}_{ww}$ 的内区峰 P_1 和 $k_z \hat{\phi}_{uv}$ 的外区峰 P_2 也和 DNS 结果^[40] 吻合, 但现有的 SPIV 测量难以解析到 $k_z \hat{\phi}_{uv}$ 在 $y^+ \approx 20$ 处的内区峰。图 7(b) 表明, 在 MVG 作用下, 近尾迹区 $k_z \hat{\phi}_{uu}$ 、 $k_z \hat{\phi}_{vv}$ 、 $k_z \hat{\phi}_{ww}$ 和 $k_z \hat{\phi}_{uv}$ 的能谱中均出现一个独立的能谱峰 P_{MVG} (即第二外区峰), 其所诱导的流动结构展向波长 λ_z^+ 与 MVG 的展向周期 (相邻 MVG 的中心距离, $\lambda_{\text{MVG}}^+ \approx 350$, 如图 7(b) 中竖直虚线所示) 基本一致, 其法向高度对应于图 6 显示的 $\langle uu \rangle^+$ 、 $\langle vv \rangle^+$ 、 $\langle ww \rangle^+$ 和 $\langle uv \rangle^+$ 在对数区的峰值位置。此外, 近尾迹区 $k_z \hat{\phi}_{uu}$ 和 $k_z \hat{\phi}_{vv}$ 分量的外区峰 P_2 有所增强, 并能够持续到远尾迹区。从图 7(c) 可以看到, 由 MVG 所导致的能谱峰 P_{MVG} 在远尾迹区各分量能谱中基本消失, 且 $k_z \hat{\phi}_{uu}$ 、 $k_z \hat{\phi}_{vv}$ 和 $k_z \hat{\phi}_{ww}$ 的内区峰相较于光滑壁面

工况均有降低、 $k_z \hat{\phi}_{uv}$ 能谱内区峰值区域有所收缩，表明 MVG 对近壁小尺度结构的抑制及对内外区不

同尺度结构间的传能与调制作用降低，导致图 6 中近壁处雷诺应力低于光滑壁面水平。

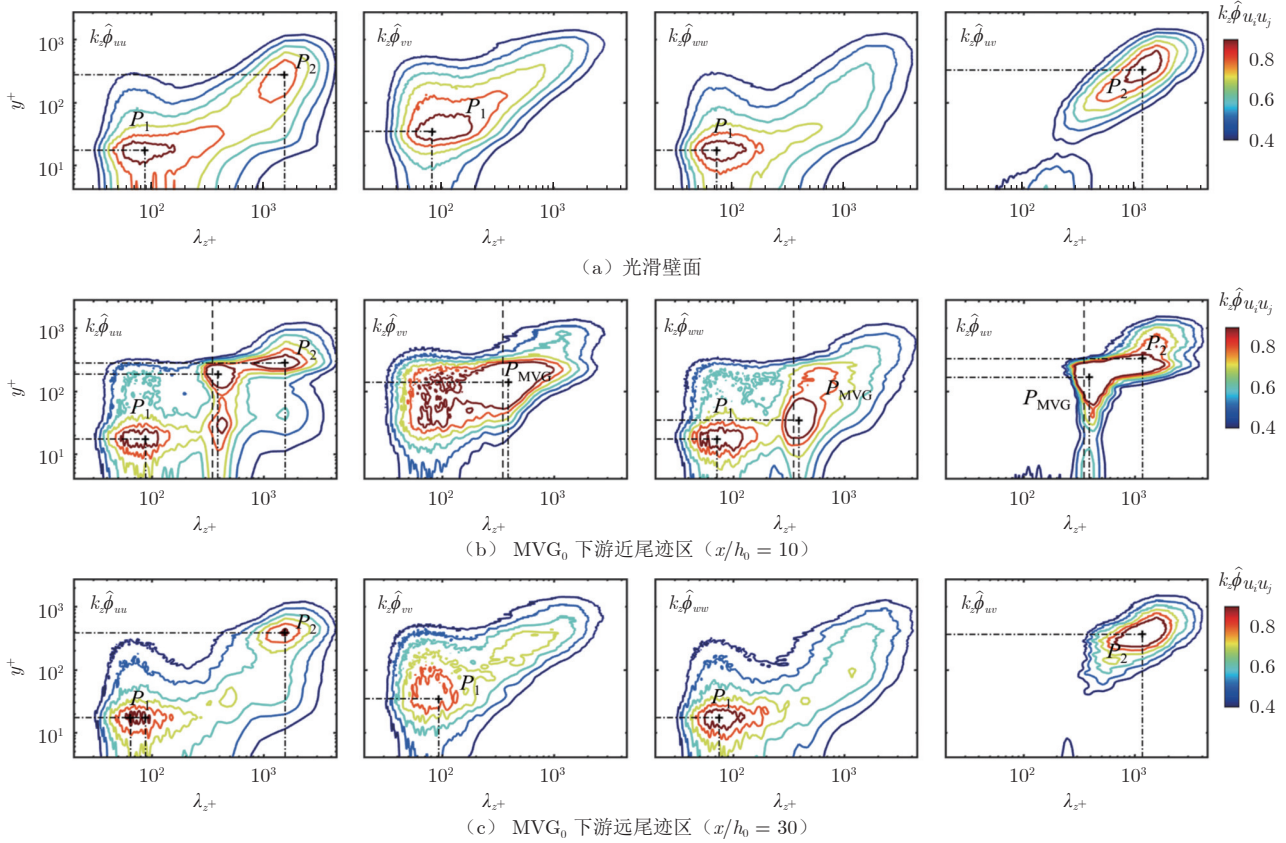


图 7 光滑壁面及 MVG₀ 下游近、远尾迹区展向预乘能谱

Fig. 7 Spanwise pre-multiplied energy spectra of smooth-wall and MVG₀ arrays

4 POD 模态分解

对 SPIV 测得的光滑壁面及 MVG 阵列下游速度场用 POD 进行模态分解，以厘清 MVG 所引入的流动结构在湍动能层面的表征。使用 Snapshot POD 算法对各工况的 1000 帧三分量平面速度场进行 POD 分解^[41-42]。图 8 给出了光滑壁面及 MVG₀ 阵列工况下各阶模态的能量占比及能量积累曲线，其中 i 为模态阶数。图 9 给出了光滑壁面及 MVG₀ 工况下近尾迹区 ($x/h_0 = 10$) 和远尾迹区 ($x/h_0 = 30$) 的部分典型 POD 模态的空间基 $\Psi_i(y, z)$ ，云图为流向分量 Ψ_i^u ，黑色箭头表示法向分量 Ψ_i^v 、与展向分量 Ψ_i^w 的合成矢量。

从图 9 可以看到，光滑壁面工况下，第 1 阶 POD 模态 $\Psi_{i=1}$ 以贯通内外区的超大尺度结构为典型特性，高阶 POD 模态 $\Psi_{i=5, 10, 20}$ 则表现出内外区分离的双层结构特征。MVG₀ 阵列工况下，近尾迹区第 1 阶 POD 模态中出现了类似图 5 近壁处半圆形时均

流向速度亏损区的“印记”结构，从壁面延伸到对数区中部。值得注意的是，该“印记”一直持续至第 20 阶模态，说明 MVG 所诱导的流动结构(时均流向

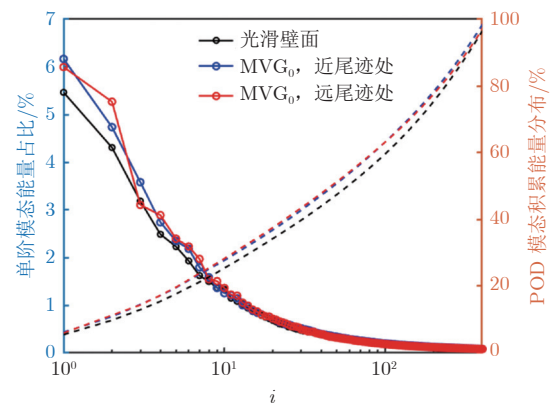


图 8 光滑壁面及 MVG₀ 工况近、远尾迹区 POD 分解所得各阶模态的能量占比及能量积累曲线

Fig. 8 Energy ratio of each rank and the cumulative energy of the POD result of smooth-wall case and near- or far-wake regions of MVG₀ case

涡对)贡献了整个 SPIV 测量视野范围内的大部分湍动能(即该流动结构与湍流边界层内的大、超大尺度结构对湍动能的贡献相当),并由此造成图 8 中 MVG_0 阵列工况下低阶 POD 能量贡献率明显高于光滑壁面工况。这与 Bai 等^[43]在湍流边界层内利用斜置沟槽产生大尺度流向环流时所观察到的各阶 POD 模态能量分布情况类似。在 MVG_0 阵列下游的远尾迹区,其所诱导的流动结构不再明显呈现于低阶 POD 模态中,结合 $\langle uu \rangle^+$ 、 $\langle vv \rangle^+$ 及 $\langle ww \rangle^+$ 仍然在

对数区存在峰值的观察,可以推测, MVG 所诱导的时均流向涡对结构在远尾迹区难以维持规则的完整外形,而是衰减为沿展向蜿蜒的涡量层并继续影响速度统计量的分布。对比图 9 中的第 20 阶模态可以发现, MVG_0 诱导的流动结构影响了近壁处含能结构分布,间接表征了 MVG 对下游结构的控制作用。 MVG_s 和 MVG_h 阵列工况下的低阶 POD 模态在近、远尾迹区的空间分布特性与 MVG_0 阵列工况下类似,不再另行给出。

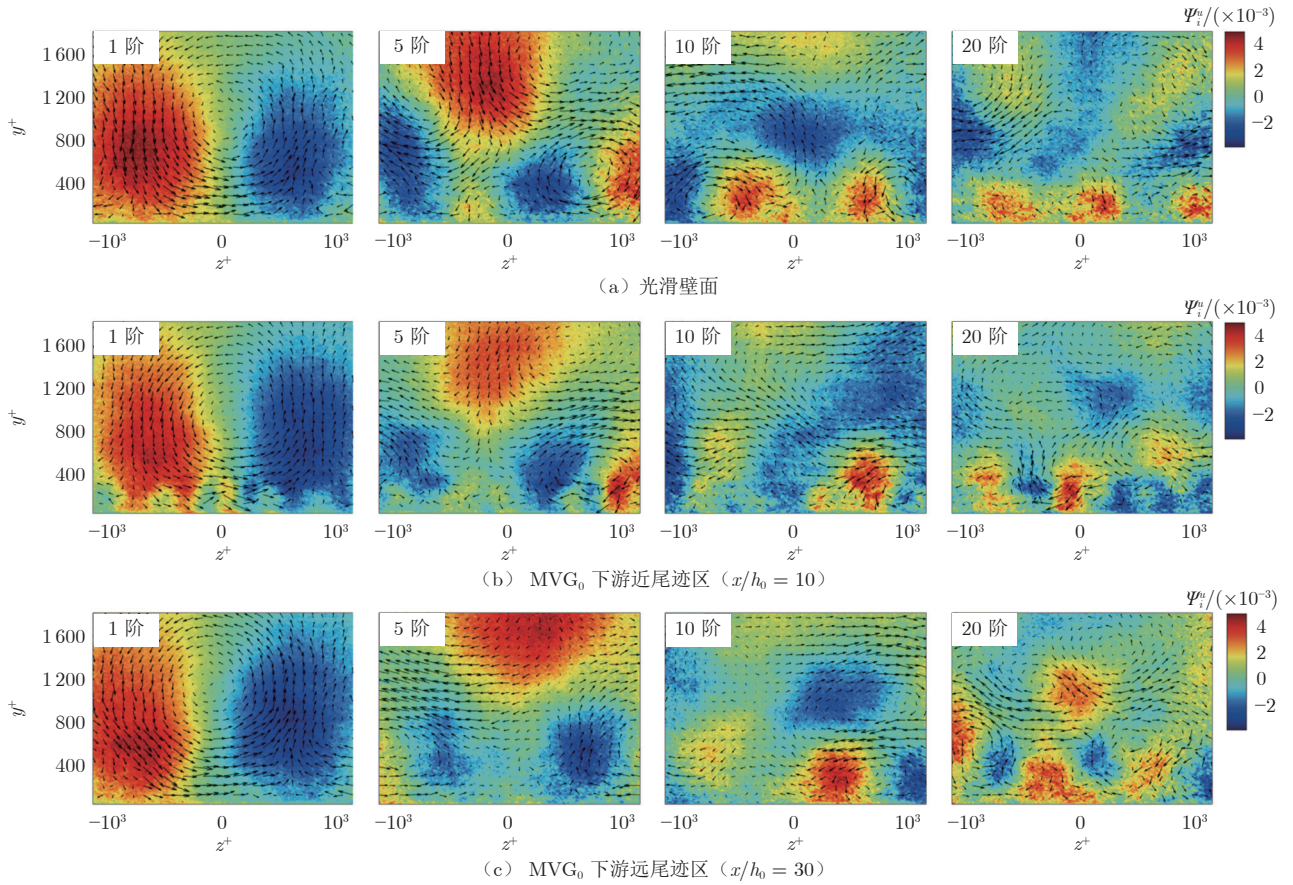


图 9 光滑壁面及基准 MVG_0 工况近、远尾迹区流场第 1、5、10、20 阶 POD 模态的空间基 $\bar{\Psi}_i(y, z)$

Fig. 9 Rank 1, 5, 10 and 20 mode $\bar{\Psi}_i(y, z)$ of POD decomposition results of smooth-wall case and near- or far-wake regions of MVG_0 case

5 MVG 阵列的减摩阻特性

本节讨论 MVG 阵列下游的摩阻沿程变化,主要评估各型 MVG 阵列的减摩阻效果,并分析间距、高度对 MVG 减摩阻特性的影响。减摩阻率 R_D (Drag Reduction) 根据下式计算:

$$R_D = \left(\frac{\tau_{\text{光滑}} - \tau_{\text{MVG}}}{\tau_{\text{光滑}}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\tau_{\text{光滑}}$ 与 τ_{MVG} 分别为免标定双层热膜摩阻传感器

所测的光滑壁面和 MVG 工况下同一流向位置的当地时均摩阻。

当 $U_\infty = 14 \text{ m/s}$ 时, 3 种 MVG 阵列下游 $x/h_0 = 10 \sim 80$ 范围内减摩阻率 R_D 的沿程变化如图 10 所示, 其中误差条表示多次重复实验的不确定度。可以看到, 在 $x/h_0 = 10$ 处, 3 种 MVG 工况下的当地时均摩阻相较于光滑壁面工况均略有增大 ($R_D < 0$), 增阻量在 5% 以内。增阻的主要原因是 MVG 产生的时均流向涡对在该处距壁面较近, 其诱导产生

的上洗、下洗运动增强了近壁区各流层的动量掺混。当 $x/h_0 \geq 20$ 后, 3 种 MVG 均呈现出明显的减摩阻效果, 增大 MVG 阵列高度能显著提升减摩阻率。已有研究表明^[21], 高度越高的 MVG 阵列能够诱导时均流向涡对产生更大的环量, 因而对近壁处湍流结构的抑制和规则化作用也更强, 最终表现为减摩阻率的提升, 这与 Cheng 等^[4]以等离子体涡流发生器产生时均流向涡对减摩阻的研究结果相符 (Cheng 等通过增大电极电压提升时均流向涡对的强度, 实现了减摩阻率的提升)。大间距 MVG 阵列所诱导的时均流向涡对展向排列稀疏 (图 5(a)), 对边界层内流动结构的不规则运动影响作用有限, 在摩阻测量中则体现为大间距 MVG_s 的减摩阻率低于 MVG_0 阵列。但更高更密的 MVG 具有更大的型阻, 在实际应用时需考虑 MVG 所引起的附加阻力。高度更高、展向间距更小的 MVG 阵列的最优减阻位置更靠近上游, 在峰值减阻率后, 各型 MVG 阵列的减摩阻率均沿程逐渐衰减, 但在 $x/h_0 = 80$ 处 MVG_h 及 MVG_0 仍然具有超过 5% 的减摩阻率, 说明 MVG 阵列的减摩阻效果能够至少持续至下游 80 倍自身特征高度处。

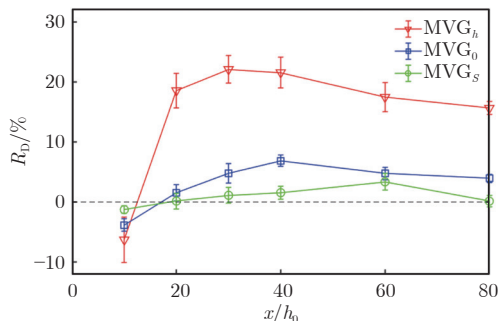


图 10 各型 MVG 阵列下游减摩阻率的沿程变化

Fig. 10 Drag reduction in different streamwise stations behind each MVG arrays

6 结 论

在 $U_\infty = 14$ m/s、 $Re_\tau = 3453$ 的湍流边界层中, 利用 SPIV 及免标定双层热膜摩阻传感器对 3 种 MVG 阵列下游速度场统计特性及减摩阻的效果开展实验测量, 结论如下:

1) MVG 在近尾迹区诱导产生时均流向涡对和时均流向速度亏损区, 并在 MVG 特征高度附近流层产生低平均动量及高湍流脉动区。随着时均流向涡对的沿程抬升, MVG 对湍流统计量的峰值扰动也在下游抬升至更高的流层。此外, MVG 引起近壁区

雷诺切应力的降低, 说明了 MVG 的减摩阻能力。

2) 展向预乘能谱表明, MVG 导致近尾迹区出现了第二外区峰值, 其所诱导流动结构的展向波长与相邻 MVG 的中心距离一致, 并显著影响了近尾迹区湍流边界层外区峰的强度与形貌。POD 模态分析表明, MVG 所诱导的流动结构与湍流边界层内的大、超大尺度结构对湍动能的贡献相当, 并影响了近尾迹区近壁含能结构的分布。

3) 实验证实 MVG 阵列具有减摩阻效果, 减摩阻有效范围至少可持续至下游 80 倍自身特征高度处。

后续应在 MVG 减摩阻机理与参数影响规律等方面开展进一步研究, 并在减阻应用中综合考虑 MVG 的减摩阻效果及其额外型阻。

致谢: 北京航空航天大学龙彦光博士、朱熠辰博士生在 2D-PIV 的基础上开发并完善了本实验所用的 SPIV 基础程序。加拿大新不伦瑞克大学高南教授、大连航华科技有限公司刘玄鹤博士研发了本实验所用的免标定双层热膜摩阻测量设备, 天津大学王昊博士生指导了热膜传感器的制备。北京航空航天大学张清福、于悦、李拓、徐颢文等多名研究生协助开展了实验测量工作。在此, 对上述个人与机构提供的帮助表示感谢。

参考文献:

- [1] WANG W K, PAN C, WANG J J. Energy transfer structures associated with large-scale motions in a turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 906: A14.
doi: 10.1017/jfm.2020.777
- [2] WANG J J, PAN C, WANG J J. Characteristics of fluctuating wall-shear stress in a turbulent boundary layer at low-to-moderate Reynolds number[J]. *Physical Review Fluids*, 2020, 5(7): 074605.
doi: 10.1103/physrevfluids.5.074605
- [3] LI B H, WANG K J, WANG Y F, et al. Experimental investigation on drag reduction in a turbulent boundary layer with a submerged synthetic jet[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(2): 024702.
doi: 10.1088/1674-1056/ac0da6
- [4] CHENG X Q, WONG C W, HUSSAIN F, et al. Flat plate drag reduction using plasma-generated streamwise vortices[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 918: A24.
doi: 10.1017/jfm.2021.311
- [5] YAO J, CHEN X, THOMAS F, et al. Large-scale control strategy for drag reduction in turbulent channel flows[J]. *Physical Review Fluids*, 2017, 2(6): 062601.
doi: 10.1103/physrevfluids.2.062601
- [6] 李楠, 吴光辉, 潘翀, 等. 小肋减阻的飞行试验方法、结果和分析[J]. *力学与实践*, 2023, 45(1): 10-21.
LI N, WU G H, PAN C, et al. Flight test method, result and analysis of small rib drag reduction[J]. *Mechanics in*

- Engineering, 2023, 45(1): 10–21.
- [7] 刘沛清, 张雯, 郭昊. 大型运输机的减阻技术[J]. 力学与实践, 2018, 40(2): 129–139, 154.
LIU P Q, ZHANG W, GUO H. Drag reduction technique for large transport aircraft[J]. Mechanics in Engineering, 2018, 40(2): 129–139, 154.
- [8] 李晓辉, 王宏伟, 张森, 等. Tomo-PIV亚跨声速风洞应用探索[J]. 实验流体力学, 2020, 34(4): 44–52.
LI X H, WANG H W, ZHANG M, et al. Application exploration of Tomo-PIV in the subsonic and transonic wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(4): 44–52.
doi: 10.11729/sytlx20190061
- [9] 刘丽霞, 王康俊, 王鑫蔚, 等. 沟槽超疏水复合壁面湍流边界层减阻机理的TRPIV实验研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(1): 117–125.
LIU L X, WANG K J, WANG X W, et al. TRPIV experimental investigation of drag reduction mechanism in turbulent boundary layer over superhydrophobic-riblet surface[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(1): 117–125.
doi: 10.11729/sytlx20200001
- [10] 陈正云, 张清福, 潘翀, 等. 超疏水旋转圆盘气膜层减阻的实验研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(3): 52–59.
CHEN Z Y, ZHANG Q F, PAN C, et al. An experimental study on drag reduction of superhydrophobic rotating disk with air plastron[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(3): 52–59.
doi: 10.11729/sytlx20200025
- [11] PARK J, CHOI H. Effects of uniform blowing or suction from a spanwise slot on a turbulent boundary layer flow[J]. Physics of Fluids, 1999, 11(10): 3095–3105.
doi: 10.1063/1.870167
- [12] DU Y Q, SYMEONIDIS V, KARNIADAKIS G E. Drag reduction in wall-bounded turbulence via a transverse travelling wave[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 457: 1–34.
doi: 10.1017/s0022112001007613
- [13] 黄红波, 陆芳. 涡流发生器应用发展进展[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(3): 611–614, 618.
HUANG H B, LU F. Research progress of vortex generator application[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(3): 611–614, 618.
- [14] 刘刚, 刘伟, 牟斌, 等. 涡流发生器数值计算方法研究[J]. 空气动力学学报, 2007, 25(2): 241–244.
LIU G, LIU W, MOU B, et al. CFD numerical simulation investigation of vortex generators[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(2): 241–244.
- [15] 倪亚琴. 涡流发生器研制及其对边界层的影响研究[J]. 空气动力学学报, 1995, 13(1): 110–116.
NI Y Q. Development of the vortex-generator and study on the effect of vortex-generator on boundary layer[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1995, 13(1): 110–116.
- [16] LIN J C, HOWARD F G, SELBY G V. Small submerged vortex generators for turbulent flow separation control[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1990, 27(5): 503–507.
doi: 10.2514/3.26172
- [17] PUJALS G, DEPARDON S, COSSU C. Drag reduction of a 3D bluff body using coherent streamwise streaks[J]. Experiments in Fluids, 2010, 49(5): 1085–1094.
doi: 10.1007/s00348-010-0857-5
- [18] MA X Y, GEISLER R, SCHRÖDER A. Experimental investigation of three-dimensional vortex structures downstream of vortex generators over a backward-facing step[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2017, 98(2): 389–415.
doi: 10.1007/s10494-016-9768-8
- [19] YAO C, LIN J, ALLEN B. Flowfield measurement of device-induced embedded streamwise vortex on a flat plate [C]//Proc of the 1st Flow Control Conference, St. Louis, Missouri. 2002.
doi: 10.2514/6.2002-3162
- [20] LIN J C. Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(4-5): 389–420.
doi: 10.1016/S0376-0421(02)00010-6
- [21] ASHILL P R, FULKER J L, HACKETT K C. A review of recent developments in flow control[J]. The Aeronautical Journal, 2005, 109(1095): 205–232.
doi: 10.1017/s0001924000005200
- [22] ZAMAN K B M Q, HIRT S M, BENCIC T J. Boundary layer flow control by an array of ramp-shaped vortex generators[R]. NASA/TM—2012-217437, 2012.
- [23] 褚胡冰, 陈迎春, 张彬乾, 等. 增升装置微型涡流发生器数值模拟方法研究[J]. 航空学报, 2012, 33(1): 11–21.
CHU H B, CHEN Y C, ZHANG B Q, et al. Investigation of numerical simulation technique for micro vortex generators applied to high lift system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 11–21.
- [24] GIBERTINI G, BONIFACE J C, ZANOTTI A, et al. Helicopter drag reduction by vortex generators[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 47: 324–339.
doi: 10.1016/j.ast.2015.10.004
- [25] 张进, 刘景源, 张彬乾. 微型涡流发生器对超临界翼型减阻机理实验与数值分析[J]. 实验流体力学, 2016, 30(4): 37–41.
ZHANG J, LIU J Y, ZHANG B Q. Experimental and CFD study on the mechanism of supercritical airfoil drag reduction with micro vortex generators[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(4): 37–41.
doi: 10.11729/sytlx20150157
- [26] 易海明, 申俊琦, 潘翀, 等. 平流层飞艇纵向气动特性及减阻实验研究[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(5): 641–645, 653.
YI H M, SHEN J Q, PAN C, et al. Experimental investigation on the longitudinal aerodynamic performance and drag reduction of a stratospheric airship[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(5): 641–645, 653.
doi: 10.7638/kqdlxb-2013.0032
- [27] CHAUHAN K A, MONKEWITZ P A, NAGIB H M. Criteria for assessing experiments in zero pressure gradient boundary layers[J]. Fluid Dynamics Research, 2009, 41(2): 021404.
doi: 10.1088/0169-5983/41/2/021404
- [28] WANG S, GHAEMI S. Three-dimensional wake of non-conventional vortex generators[J]. AIAA Journal, 2019, 57(3): 949–961.
doi: 10.2514/1.j057420

- [29] PAN C, XUE D, XU Y, et al. Evaluating the accuracy performance of Lucas-Kanade algorithm in the circumstance of PIV application[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(10): 104704.
doi: [10.1007/s11433-015-5719-y](https://doi.org/10.1007/s11433-015-5719-y)
- [30] 陈启刚, 钟强. 体视粒子图像测速技术研究进展[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(8): 38–54.
CHEN Q G, ZHONG Q. Advances in stereoscopic particle image velocimetry[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(8): 38–54.
- [31] FEI R, MERZKIRCH W. Investigations of the measurement accuracy of stereo particle image velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 37(4): 559–565.
doi: [10.1007/s00348-004-0843-x](https://doi.org/10.1007/s00348-004-0843-x)
- [32] 陈钊, 郭永彩, 高潮. 三维PIV原理及其实现方法[J]. *实验流体力学*, 2006, 20(4): 77–82, 105.
CHEN Z, GUO Y C, GAO C. Principle and technology of three-dimensional PIV[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2006, 20(4): 77–82, 105.
doi: [10.3969/j.issn.1672-9897.2006.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9897.2006.04.015)
- [33] WATANABE T, ZHANG X, NAGATA K. Direct numerical simulation of incompressible turbulent boundary layers and planar jets at high Reynolds numbers initialized with implicit large eddy simulation[J]. *Computers & Fluids*, 2019, 194: 104314.
doi: [10.1016/j.compfluid.2019.104314](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2019.104314)
- [34] 高南, 刘玄鹤. 实用化壁面切应力测量技术的综述与展望[J]. *空气动力学学报*, 2023, 41(3): 1–24.
GAO N, LIU X H. A review of wall-shear-stress measurement techniques for practical applications[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2023, 41(3): 1–24.
doi: [10.7638/kqdlxxb-2021.0450](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0450)
- [35] LIU X H, LI Z Y, GAO N. An improved wall shear stress measurement technique using sandwiched hot-film sensors[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2018, 8(2): 137–141.
doi: [10.1016/j.taml.2018.02.010](https://doi.org/10.1016/j.taml.2018.02.010)
- [36] LIU X H, LI Z Y, WU C J, et al. Toward calibration-free wall shear stress measurement using a dual hot-film sensor and Kelvin bridges[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(10): 105303.
doi: [10.1088/1361-6501/aadb1b](https://doi.org/10.1088/1361-6501/aadb1b)
- [37] LIU X H, WANG H, WU C J, et al. On the calibration-free two-component wall-shear-stress measurement technique using dual-layer hot-films[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(8): 085004.
doi: [10.1063/5.0006705](https://doi.org/10.1063/5.0006705)
- [38] 徐华舫. 空气动力学基础(上册)[M]. 修订版. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.
- [39] 王建杰, 易海明, 潘翀, 等. 粗糙壁湍流研究现状综述[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(5): 611–619.
WANG J J, YI H M, PAN C, et al. Progress in rough-wall turbulence[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(5): 611–619.
doi: [10.7638/kqdlxxb-2017.0033](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2017.0033)
- [40] ZHANG Q F, PAN C, WANG J J. De-asymmetry of small-scale motions in wall-bounded turbulence[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(6): 065110.
doi: [10.1063/5.0092548](https://doi.org/10.1063/5.0092548)
- [41] DENG S C, PAN C, WANG J J, et al. On the spatial organization of hairpin packets in a turbulent boundary layer at low-to-moderate Reynolds number[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 844: 635–668.
doi: [10.1017/jfm.2018.160](https://doi.org/10.1017/jfm.2018.160)
- [42] WANG L W, PAN C, WANG J J, et al. Statistical signatures of component wall-attached eddies in proper orthogonal decomposition modes of a turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 944: A26.
doi: [10.1017/jfm.2022.495](https://doi.org/10.1017/jfm.2022.495)
- [43] BAI H L, GONG J L, LU Z B. Energetic structures in the turbulent boundary layer over a spanwise-heterogeneous converging/diverging riblets wall[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(7): 075113.
doi: [10.1063/5.0055767](https://doi.org/10.1063/5.0055767)

作者简介:



张 奕(1998—), 男, 辽宁辽阳人, 博士研究生。研究方向: 湍流与流动控制。通信地址: 北京市海淀区学院路 37 号(100191)。
E-mail: zhangyi05@buaa.edu.cn

(编辑: 秦虹)