

基于欧拉方法的减阻沟槽壁面湍流涡结构的辨识¹⁾

李山^{*、2)}, 杨绍琼^{*}, 田海平^{*}, 王清毅^{*}, 姜楠^{*, +, **}

^{*} (天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072) ⁺ (天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072)

^{**} (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)

摘要: 利用高时间分辨率粒子图像测速(TRPIV)技术实验测得自由来流速度为 0.19m/s (沟槽无量纲峰峰间距 $s^+ \approx 21$) 时沟槽壁面湍流边界层的速度矢量场时间序列。通过与同材料等厚有机玻璃平板对应物理量的对比, 沟槽壁面实现了近 11% 的摩阻减小。本文主要基于欧拉方法, 使用 Q 准则和 λ_{ci} 准则, 旨在对减阻沟槽壁面湍流涡结构进行辨识, 分析减阻沟槽壁面边界层内瞬时涡结构的分布及演化规律。结果表明: Q 准则辨识得到的两种平板表面边界层内瞬时涡结构成对出现, 但减阻沟槽表面涡核更小, 强度更弱。而基于 λ_{ci} 准则辨识得到的光滑平板湍流边界层近壁瞬时涡结构具有涡包属性, 强度更大; 而减阻沟槽表面的瞬时涡结构分布均匀, 涡包属性不明显, 距离壁面法向位置外移, 涡强趋弱。另外发现边界层外区分布的瞬时涡结构几乎不变, 也说明减阻沟槽对流场的影响局限于近壁。

关键词: 湍流边界层, 减阻沟槽, Q 准则, λ_{ci} 准则, 线性随机估计

引言

湍流边界层减阻技术已被美国航空和宇宙航行局(NASA)列为 21 世纪的航空关键技术之一。而沟槽壁面减阻技术则是一种相对简单、成本低、减阻效果明显且极有希望大范围工程应用的湍流边界层被动减阻技术。NASA 兰利研究中心 Walsh^[1-2]等人最早进行沟槽壁湍流减阻研究。他们在 20 世纪 80 年代的实验表明采用 $h^+ = 13, s^+ = 15$ 的对称 V 型沟槽薄膜表面在湍流状态下最大可减阻 8%, 并通过大量对比实验发现了沟槽尖峰的锐度对减阻效果影响很大, V 型沟槽在 $h^+ \leq 25, s^+ \leq 30$ 时, 具有最佳的减阻效果。Bacher 和 Smith^[3]在测量边界层流速分布后, 采用边界层动量积分获得了 25% 的净减阻。Park 和 Wallace^[4]用热线测速仪精细测量了沟槽内流向速度场, 通过对摩擦切应力积分, 获得了约 4% 的减阻。20 世纪 90 年代, Bechert^[5]对高横比可调的细薄肋型沟槽进行了研究, 获得了 9.9% 的减阻效果, 并认为最佳的减阻沟槽几何形状应当有适当的高横比。Debisschop 和 Nicuwestadt^[6]通过直接测量阻力和速度, 发现沟槽面在具有逆压梯度的湍流边界层中, 可获得高达 13% 的减阻效果。Rene^[7]等人使用 3D-PIV 测量了管道内壁摆动型沟槽边界层的速度场, 取得了较好的减阻效果, 并证明了近壁区存在一个增加的展向速度分量。

国内在 20 世纪 80 年代后期开始关注沟槽减阻技术, 并主要采取了实验方式, 验证了沟槽的减阻效果。胡海豹等在回转体模型上加工沟槽, 其水洞实验获得的最大减阻量约 10%^[8]; 王晋军等人的沟槽板水槽实验, 获得的局部减阻量约 13%~26%^[9]; 杨弘炜等将一种菱形网状小圆坑点阵结构用于 NACA16012 翼型表面获得减阻效果高达 22%^[10]; 李山等人^[11]利用 TRPIV 精细测量了沟槽及光滑壁面湍流边界层的瞬时流场速度信息, 结果表明沟槽有效减阻率为 10.73%, 并证实沟槽的存在使得边界层近壁区黏性底层增厚, 缓冲层和对数律层上移; 沟槽壁面削弱了近壁区内与多尺度相干结构相联系的脉动速度及雷诺应力各分量。

沟槽减阻技术应用广泛。主要可应用于飞行器表面、流体驱动设备、管道输送系统上以实现人类长期追求的节约能源目标。该技术已经有了大量的工程应用试验。空中客车公司在 A320 实验机表面上贴上 70% 沟槽薄膜, 获得了 3% 的减阻效果, 经济效益巨大; DLR Berlin 的研究机构通过给管道内表面使用划痕技术产生沟槽, 也获得了大约 5% 的减阻效果。实验研究等说明了沟槽减阻技术可以有效减少运输工具受到的表面阻力而节约能源, 有着广泛工程应用空间和巨大经济价值。但是目前, 由于沟槽减阻技术还存在着沟槽尺寸优化等问题, 该技术尚未得到广泛工程应用, 但也说明了该技术具有广阔的发展空间。

1) 国家自然科学基金(11272233), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB720101), 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室开放基金联合资助项目

2) E-mail: lish@tju.edu.cn.

本文利用 TRPIV 测量技术，突破了以往湍流空间单点测量的局限性，能在同一时刻记录整个测量平面的瞬时流场信息。基于欧拉方法，使用 Q 准则和 λ_{ci} 准则，旨在对减阻沟槽壁面湍流涡结构进行辨识，分析减阻沟槽壁面边界层内瞬时涡结构的分布及演化规律，从沟槽对壁面涡结构影响的角度分析其减阻的物理机理。

1 实验模型及装置

实验在 SZ-2 型开口式低速循环水槽中进行。实验段长 130cm，宽 14cm，深 15cm，其流速在 0~0.4m/s 范围内连续可调，水槽中心的背景湍流度小于 3.5%，流场均匀度为 0.6%。平板尺寸为 1200mm×138mm×9mm（长×宽×厚），平板前缘按 8:1 的半椭圆修行，一块平板表面光滑，另一块板表面为沿流向的三角形截面沟槽结构（见图 1, h 表示沟槽深度），平板水平放置于水槽底部。为得到充分发展的湍流边界层，距板前缘 7.5cm 处加绊线，边界层在平板上表面发展。为防止壁面激光反射形成噪声信号，在试验段的底部粘贴黑色不透光纸。

实验时激光片光源、高速相机和平板相对位置示意图见图 1。拍摄过程中，激光片光源平面与平板垂直，与水槽两侧壁平行，片光源位于水槽展向中心线处，在此次实验中，激光片光源中心打在沟槽最凹处的正上方。CCD 相机镜头与片光保持平行，保证了拍摄时的对焦的准确性。

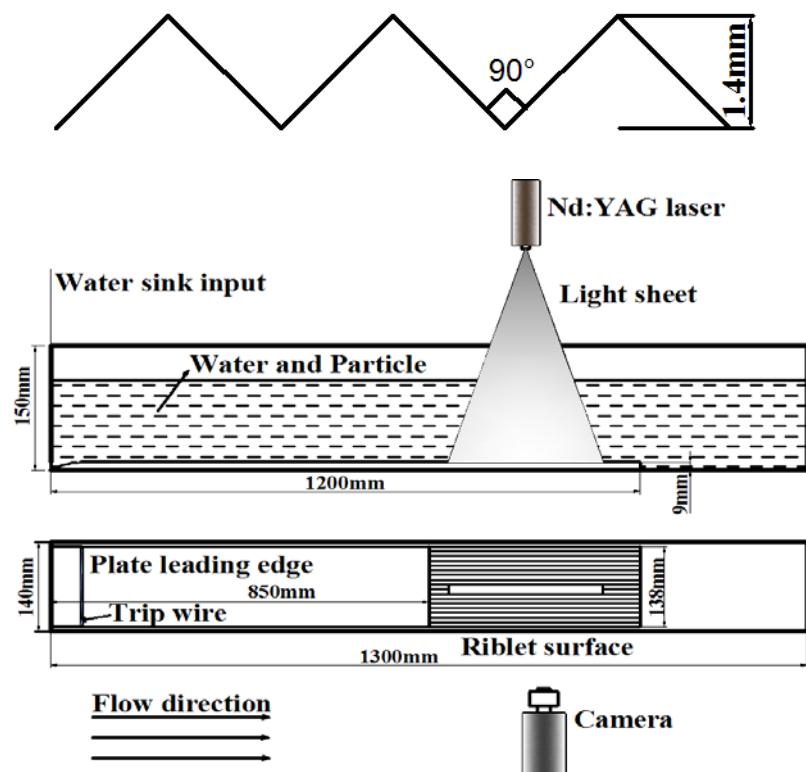


图 1. 沟槽截面及实验装置示意图

Fig.1. Schematic diagram of the riblets and experimental configuration

实验时水槽自由来流速度控制在 0.19m/s，高速相机采样频率为 250Hz，脉冲时间间隔为 4000μs，单帧曝光时间为 3500μs，每次记录图像 6001 张，持续时间为 24.004s。记录的粒子图像分辨率为 1280×1024 pixels，图像视野范围约为 11cm×9cm（流向×法向）。对原始粒子图像进行处理时选择查询窗口为 32×32 pixels，窗口重叠率为 75%，最终在 $x-z$ 平面内共得到 157×125（流向×法向）个二维瞬时速度矢量信息。

2 实验结果及分析

2.1 平均速度分布

图 2 为拍摄区域内不同平板表面同一位置处无量纲平均速度沿法向位置的分布剖面曲线。横轴 $y^+ = yu_*/v$, 纵轴 $u^+ = u/u_*$, u_* , v 分别为对应壁面摩擦速度和流体运动粘度。从图 2 中可以很直观地看出: 沟槽壁面湍流边界层与光滑平板湍流边界层一样, 流速沿法向的分布不仅具有分区特性, 而且线性分布公式和对数分布公式仍然适用, 在近壁区域 $y^+ < 35$, 相同 y^+ 位置处, 沟槽的无量纲速度 u^+ 要明显大于光滑壁面平板上的无量纲速度, 说明沟槽的存在使得边界层近壁区缓冲层增厚, 平均速度剖面的对数律层外移。Choi K S^[12] 及 Zhao^[13] 等均得出减阻沟槽面上粘性底层增厚的结论。将沟槽高度 h 、间距 s 两个沟槽几何模型参数无量纲化, 对于自由来流 $U_e=0.19\text{m/s}$ 工况下的沟槽壁面, 得到 $h^+ = 10.641$, $s^+ = 21.282$ 。

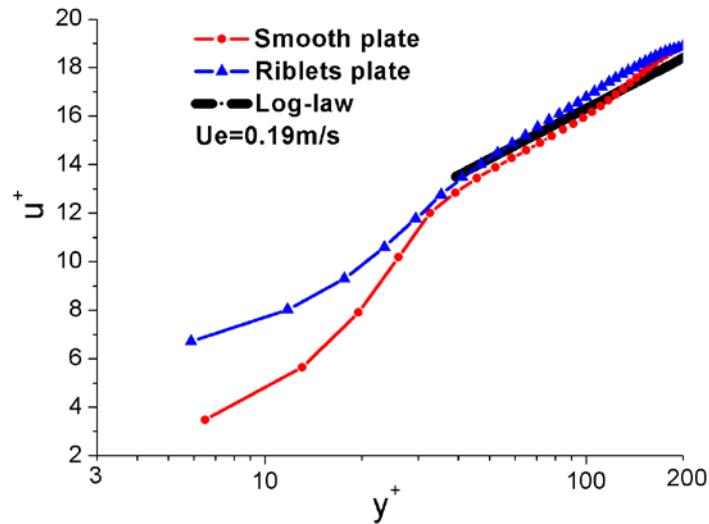


图2. 光滑面及沟槽面平板流向平均速度分布

Fig.2. Mean velocity profile of the TBL over the smooth and riblets plate

表1列出流速为0.19m/s工况下沟槽壁面及光滑壁面平板湍流边界层的主要参数。表中使用壁面摩擦阻力系数计算沟槽平板的减阻率 $\eta = (1 - C_f/C_{fp}) \times 100\%$, 雷诺数 Re_x 为以沟槽表面起点距平板前缘距离 $x = 850\text{mm}$ 作为特征长度的雷诺数。从表中可以看出沟槽平板的平均壁面摩擦速度 u_* 、平均壁面摩擦阻力 τ_w 以及平均壁面摩擦阻力系数 C_f 均小于光滑平板的相应参数。

表 1 来流速度 0.19m/s 工况湍流边界层的减阻参数

Table1 Drag reduction parameters of the TBL at the free-stream velocity of 0.19m/s over the smooth and riblets plate

	沟槽(Riblets plate)	平板(Smooth plate)
自由来流速度 $U_e(\text{m/s})$	0.19	0.19
雷诺数 Re_x	161932	161932
壁面摩擦速度 $u_*(\text{m/s})$	0.009178	0.009868
壁面摩擦阻力 $\tau_w(\text{kg/m}\cdot\text{s}^2)$	0.084085	0.097194
壁面摩擦阻力系数 C_f	0.005273	0.005907
减阻率(%)	10.73	

2.2 涡结构的辨识

基于 Euler 体系的涡辨识方法, 主要以速度梯度张量的某些特性作为旋涡辨识的依据。本文采用 Q 准则和 λ_{ci} ^[14] 准则, 对所拍摄得到的时间连续的瞬时脉动速度场进行分析。图 3 和图 4 是 Q 准则和 λ_{ci} 准则辨识的同一瞬时速度场中的涡结构, 其中 x 轴为流向, y 轴为法向。从图 3 中可以看出, 代表 Q 涡结构的红色

等值线零散地分布在整个研究区域中，且主要集中与边界层内区域，相对于光滑壁面，沟槽壁面内的涡结构减少且强度明显减弱。而图 4 中 λ_{ci} 准则辨识的涡结构对比图可以看出，沟槽壁面涡结构减少，分布更为均匀，沿法向位置外移。

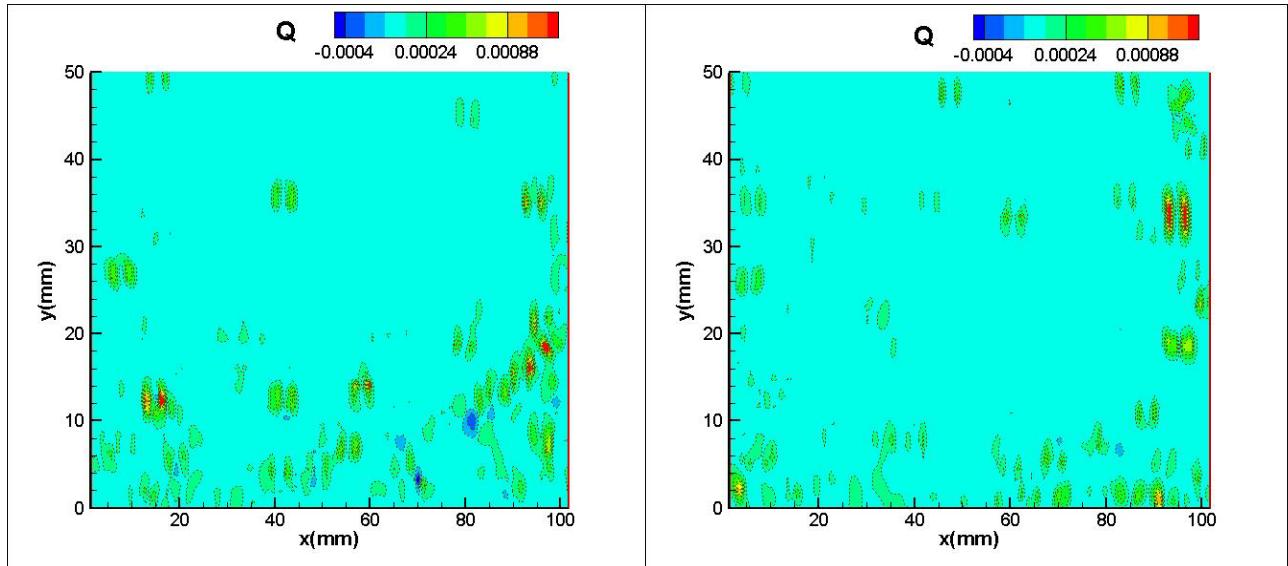


图 3. x - y 平面内的 Q 涡结构 (左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

Fig.3. Instantaneous vortex structures recognized by the Q -criterion (left: smooth plate; right: riblets plate)

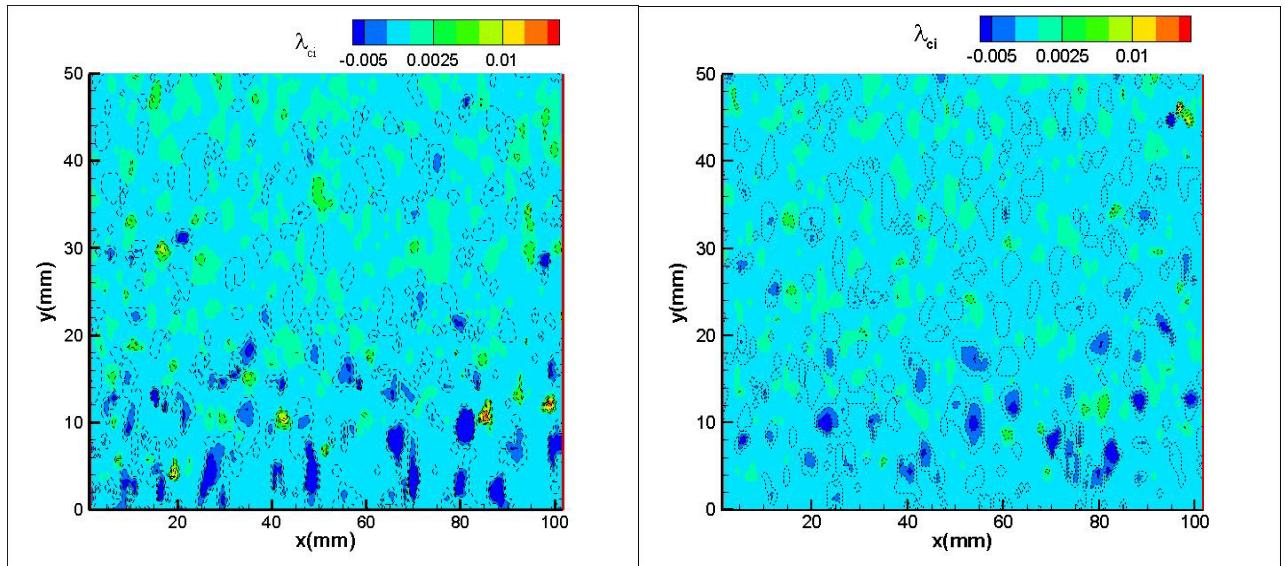


图 4. x - y 平面内的 λ_{ci} 涡结构 (左: 光滑壁面; 右: 沟槽壁面)

Fig.4. Instantaneous vortex structures recognized by the Q -criterion (left: smooth plate; right: riblets plate)

3 结 论

本文考察了三角形横截面的顺流向沟槽壁面对零压力梯度湍流边界层时均速度及涡结构的影响。通过对比光滑壁面与沟槽壁面的平均速度的分布，得出沟槽壁面基于壁面摩擦速度的无量纲时均速度在缓冲层明显大于相同流场条件下光滑壁面对应位置的时均速度。通过比较 Q 准则及 λ_{ci} 准则检测出来的涡结构，发现： Q 准则辨识得到的两种平板表面边界层内瞬时涡结构成对出现，但减阻沟槽表面涡核更小，强度更弱。而基于 λ_{ci} 准则辨识得到的光滑平板湍流边界层近壁瞬时涡结构具有涡包属性，强度更大；而减阻沟槽

表面的瞬时涡结构分布均匀，涡包属性不明显，距离壁面法向位置外移，涡强趋弱。另外发现边界层外区分布的瞬时涡结构几乎不变，也说明减阻沟槽对流场的影响局限于近壁。

参考文献

- 1.Walsh, M.J. Riblets viscous drag reduction in boundary layers, NASA Technical Report, Virginia, 1990: 203-261
- 2.Walsh, M.J. Riblets as a viscous drag reduction technique, Am. Inst. Aeronaut. J., April 1983, 21(4): 485-486
- Bacher, E. V. & Smith, C. R. 1985. A combined visualization-anemometry study of the turbulent drag reduction mechanisms of triangular micro-groove surface modification, AIAA Paper, 85, 0548
- 3.Gallagher, J.A. and Thomas, A.S.W., Turbulent boundary layer characteristics over streamwise grooves, AIAA paper, 1984, 84, 2185
- 4.Park S R, Wallace J M. Flow alteration and drag reduction by riblets in a turbulent boundary layer, AIAA Journal,1994,32(1) : 31-38
- 5.Berchert D W, Bruse M , Hage W , et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry, Journal of fluid mechanics ,1997,338:59-87
- 6.Debisschop, J.R. & Nieuwstadt, F.T.M. 1996 Turbulent boundary layer in an adverse pressure gradient: effectiveness of riblets, AIAA.34, 932-937
- 7.René Grüneberger, F. Kramer, et al. Experimental Investigation of Oscillating Riblets for Turbulent Drag Reduction, New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VIII Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 121, 2013, pp 193-200
- 8.胡海豹等.回转体表面条纹沟槽减阻水洞实验研究.力学季刊,2006,27(002):267-272.(Hu Haibao et.al. Water tunnel experimental investigation on drag reduction in gyroidal objects with riblets surface, Chinese Quarterly of Mechanics, 2006,27(002):267-272.(in Chinese))
- 9.WANG Jinjun, LAN Shilong, MIAO Fuyou. Drag-reduction characteristics of turbulent boundary layer flow over riblets surfaces. Shipbuilding of China, 2001, 42 (4):1-5
- 10.YANG Hongwei, GAO Ge. Experimental study for turbulent drag reduction using a novel boundary control technique. Acta aeronautica et astronautica sinica, 1997.18 (4):455-457
- 11.李山,杨绍琼,姜楠. 沟槽面湍流边界层减阻的 TRPIV 测量. 力学学报, 2013, 45(2):183~192.(Li Shan, Yang Shaoqiong, Jiang Nan. TRPIV measurement of drag-reduction in the turbulent boundary layer over riblets plate. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(2):183~192(in Chinese))
- 12.Chi K S. Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 208:417-458
- 13.
- 14.唐湛祺, 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. Experimental Investigation on Hairpin Vortex Packets in the Later Stage of Bypass Transition Induced by Cylinder Wake. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011,43(6): 1037-1042(in Chinese))

On the Hierarchical Visualization of Coherent Structures of Turbulent Boundary Layer over a Drag-reducing Riblets Surface¹⁾

Li Shan^{*,2)}, Yang Shaoqiong^{*}, Tian Haiping^{*}, Wang Qingyi^{*}, Jiang Nan^{*,**,+}

^{*}(Department of Mechanics of Tianjin University, Tianjin 300072, China.)

^{**}(Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China)

[†](State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Time series of velocity vector fields at the free stream velocity of 0.19m/s (dimensionless peak-to-peak space $s^+ \approx 21$) in the turbulent boundary layers over the smooth/riblets Plexiglas plate were experimentally measured by utilizing the time-resolved particle image velocimetry (TRPIV) technology. A nearly 11% friction reduction rate were obtained by comparing with the corresponding physical quantities of the two plates. Based on the Euler methods, this paper focused on the identification of the near-wall vortex structures by using the Q-criterion and λ_{ci} -criterion to analyze the differences of the distribution of instantaneous vortex structures and their evolution in the drag-reducing riblets boundary layer. Results show that the instantaneous vortex structures that are recognized by the Q-criterion appear in pairs within the boundary layers over such two different flat-plate surfaces. However, the vortex cores were smaller and their intensities were weaker over the drag-reducing riblets surface. Besides, the instantaneous vortex structures based on the λ_{ci} -criterion to be recognized over the smooth flat-plate turbulent boundary layer appeared in vortex packages with greater intensity, while the instantaneous vortex structures uniformly distributed over the drag-reducing grooved surface with an outside-shift of their wall-normal position and weaker vortex intensity. Furthermore, distributions of the instantaneous vortex structures found in the outer region of the boundary layer were almost unchanged, which also showed that effects of the drag-reducing riblets to the flow field were confined in the near-wall region.

Key words: Turbulent boundary layer, Drag-reducing riblets, Q-criterion, λ_{ci} -criterion, Linear stochastic estimation

1)The project was jointly supported by the National Natural Science Foundation of China (11272233), the National Fundamental Research Program of China(973) (2012CB720101) and the opening fund of State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

2)E-mail: lish@tju.edu.cn