



CSTAM 2012-B03-xxxx

壁面展向弯肋条的槽道湍流减阻机理研究

谭廉华，任玉新

清华大学航天航空学院

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

壁面展向弯肋条的槽道湍流减阻机理研究¹⁾

谭廉华^{*, 2)}, 任玉新^{*}

^{*}(清华大学航天航空学院, 北京海淀区 100084)

摘要 壁面肋条是一种简单有效的减小表面湍流摩擦阻力的方式。相对于传统直肋条, 有研究表明, 在展向发生弯曲的肋条有可能增强减阻能力。但弯肋条减阻效果的高低, 取决于展向弯曲方式的参数选取。本文采用直接数值模拟的方法, 对上壁面为光滑壁面, 下壁面带直肋条和展向弯肋条的槽道湍流进行了计算。研究了展向弯肋条的不同几何参数对可压缩槽道湍流减阻效果的影响, 并通过分析相应的湍流拟序结构特点, 探讨弯肋条的减阻机理。

关键词 湍流减阻, 肋条, 直接数值模拟

引言

对于在流体中高速运动的物体, 表面摩擦是一种主要的阻力来源。例如, 巡航状态下的飞机, 表面摩擦阻力占到总阻力的 40-50%; 潜艇和鱼雷在水下高速前进时, 表面摩擦阻力占到总阻力的 80%。若能减小这部分阻力, 则同样的推力下, 物体可携带更多的燃料和有效载荷, 性能将大幅上升。而当物体较长, 表面较平坦, 运动速度较快时, 其表面的流动状态往往会从层流发展成湍流, 形成比层流状态下大得多的表面摩擦阻力。因此, 湍流减阻成为迫切需要解决的课题。

在多种湍流减阻方法中, 在物体表面沿流向敷设肋条或沟槽 (riblets) 是一种被动控制方式, 其优点是结构简单, 使用时不需改变物体的外形, 在不大幅增加重量的同时能起到减阻作用, 维护成本也较低。此项技术起源于鲨鱼表皮所带有的肋条结构, 鲨鱼能够在水中快速游动, 被认为是由于表皮上的肋条结构起到了很好的湍流减阻作用[1]。自二十世纪七十年代起, 国内外研究者采用实验[2-12]和数值计算[13-21]等方法, 对表面肋条在湍流减阻上的应用进行了广泛研究[22-24]。这些研究表明, 肋条最大可减阻 10%。直至今, 从效果上考虑, 利用表面肋条进行湍流减阻的方法, 仍然还在发展之中。

另外, 高频的壁面展向振动是湍流减阻的一种主动控制方法, 其最大减阻效果可高达 40%[25], 不足之处是需要额外的能量输入, 且实现机构较为复杂。Peet et al. (2007)[26]提出, 可将传统的表面直肋条改进, 令其具有展向的小幅周期性位移, 形成一种正弦形弯肋

条。Peet et al. (2008)[19]用大涡模拟对湍流场进行数值分析, 发现在不同几何参数下, 弯肋条减阻能力有较大差异。对于相同偏移角, 当展向位移的无量纲波长为 6 时, 弯肋条比直肋条的湍流减阻能力增加了 2%, 而当无量纲波长为 3.22 时, 弯肋条不具有减阻能力。而几何参数对弯肋条减阻能力的影响关系, 尚未见文献论述。

针对上述问题, 本文将采用直接数值模拟的方法, 采用不同的几何参数, 对带有表面弯肋条的槽道湍流场进行模拟, 以期分析弯肋条减阻能力的影响因素。

1 数值模拟方法与计算条件

本文考虑可压缩槽道湍流, 槽道的上壁面为光滑壁面, 下壁面铺设肋条。

对于表面肋条, 考虑了 $Ma=0.33$ 下, 直肋条 (straight riblets) 和正弦形弯肋条 (sinusoidal riblets) 两种情况。其中直肋条的几何结构如图 1(a) 所示, 正弦形弯肋条为直肋条在展向发生偏移所形成, 如图 1(b) 所示。

直肋条的横截面形状由正弦曲线表示:

$$z(y) = -\delta + \frac{h}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{s}y - \frac{\pi}{2}\right)$$

其中, 肋条的间距 s (波长) 与肋条高度 h (振幅的 2 倍) 相等。 z 为壁面法向的坐标, y 为展向坐标。

弯肋条由直肋条在展向发生周期性偏移所形成, 偏移量可由下式描述:

$$y'(x) = a \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

其中, 波长 λ 与计算区域的流向长度相等, 振幅 a 为可调节参数。

1) 博士后科学基金资助项目 (2012M510418)

2) Email: tanlianhua@sina.com

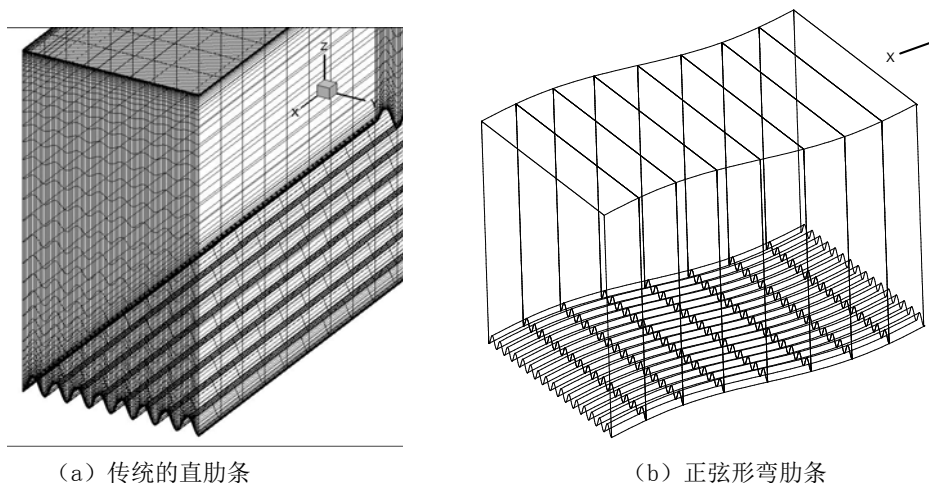


图1 表面肋条的几何结构

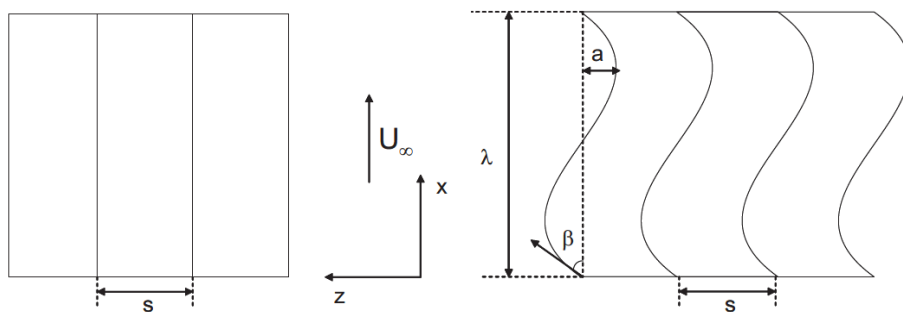


图2 直肋条（左）和弯肋条（右）的俯视图。（Yeet et al. 2007）

为了获得更多的流场细节，本文采用高精度的有限差分格式（Sun and Ren 2010[27]），对可压缩 Navier-Stokes 方程进行直接数值模拟（DNS）。其中，无粘项的空间离散采用七阶 WENO 格式，粘性项的空间离散采用四阶中心格式，时间推进采用 LU-SGS 方法。计算所用的无量纲时间步长为 0.05。具体采用的计算条件如表 1 所示。

表 1 计算条件

	流向	展向	壁面法向
坐标方向	x 向	y 向	z 向
网格分布	均匀	均匀	双曲正切分布
网格数	160	256	160
计算区域尺寸	2.9	1.78	2
展向 16 个肋条单元，每个单元内分布 16 个网格			

3. 计算结果与分析

为了考察肋条的减阻效果，将槽道上下壁面的摩擦阻力进行比较，计算公式为：

$$R_D = \frac{D_f - D_r}{D_f} \times 100\%$$

其中，

$$D_f = \mu \int_{A_f} \frac{\partial u}{\partial n} dA_f, \quad D_r = \mu \int_{A_r} \frac{\partial u}{\partial n} dA_r,$$

D_f ， D_r ， A_f ， A_r 分别表示光滑壁面和肋条壁面的摩擦阻力与表面积。

本文首先计算了直肋条的减阻效果，然后计算了不同展向偏移量下弯肋条的减阻效果。对于上下壁面瞬时摩擦阻力随时间步长数变化的曲线，直肋条的情况如图 3 所示，弯肋条的情况如图 4-8 所示。

基于图 3-8 中的计算结果，可得到不同展向偏移量下，正弦形弯肋条与直肋条减阻效果的比较。如图 9 所示，当弯肋条的展向偏移量较小时 ($a/\delta=0.05$)，其减阻效果稍逊于直肋条，而当偏移量增大 ($a/\delta=0.1-0.25$)，弯肋条的减阻效果要强于直肋条。但弯肋条的减阻百分比随展向偏移量的增大而起伏，未表现出单调性趋势。

图 10-13 所示为不同算例下，横截面上无量纲涡量的流向分量 ω_x 等值线图。图 10 是直肋条的情况，由左图可以看出，在槽道上部，

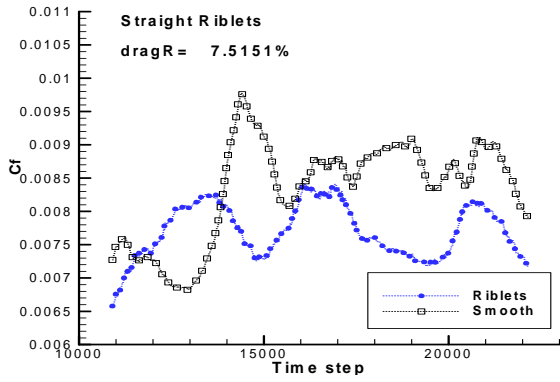


图3 Ma=0.33, 直肋条阻力系数随时间变化的曲线

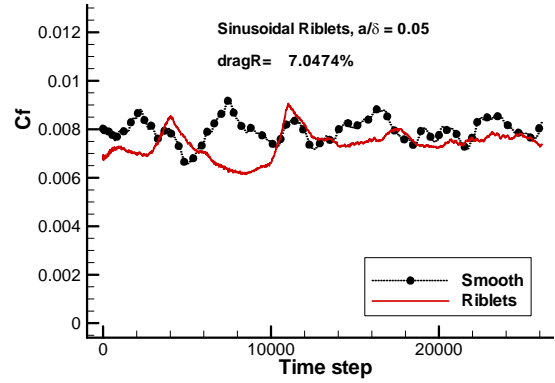


图4 Ma=0.33, a/delta=0.05, 正弦形弯肋条阻力系数曲线

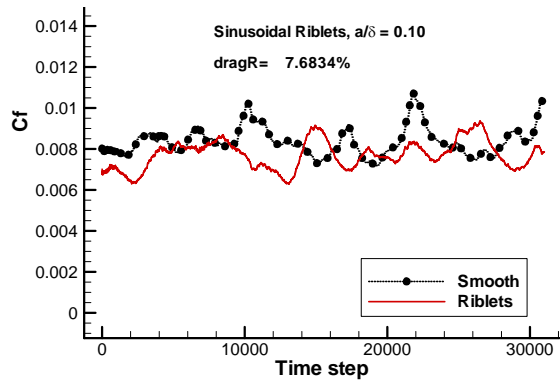


图5 Ma=0.33, a/delta=0.10, 正弦形弯肋条阻力系数曲线

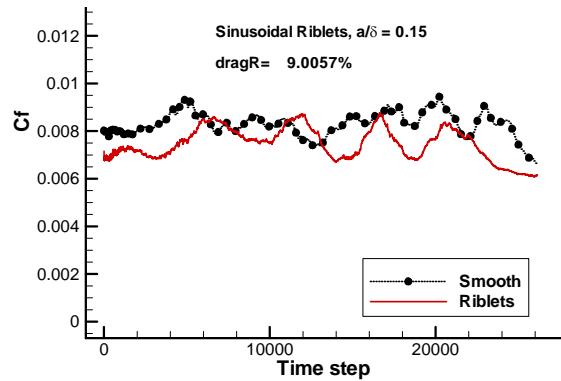


图6 Ma=0.33, a/delta=0.15, 正弦形弯肋条的阻力系数曲线

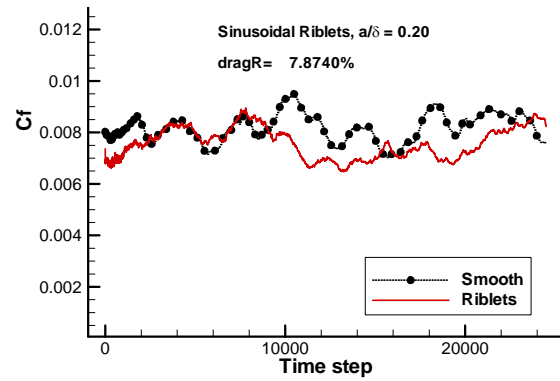


图7 Ma=0.33, a/delta=0.20, 正弦形弯肋条阻力系数曲线

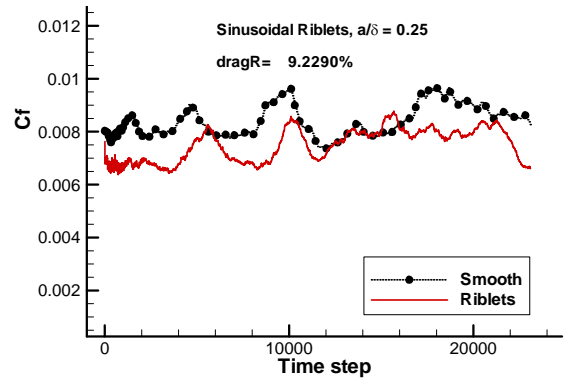


图8 Ma=0.33, a/delta=0.25, 正弦形弯肋条阻力系数曲线

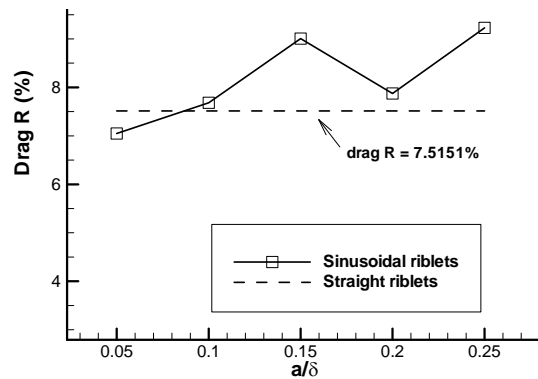


图9 不同展向偏移量 (a/delta) 下, 正弦形弯肋条的减阻百分比。

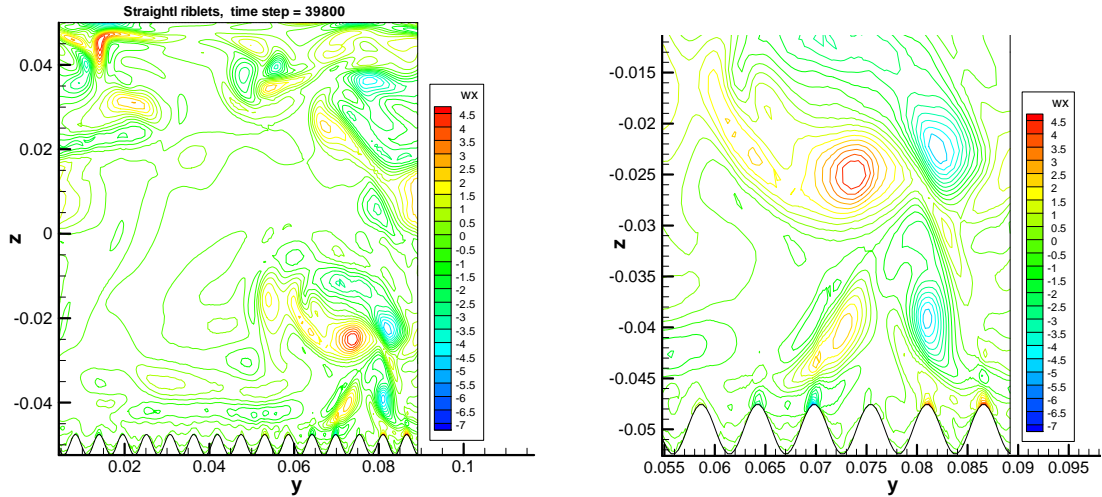


图 10 直肋条壁面的无量纲涡量 ω_x 等值线图。左边为全图，右边为局部放大。

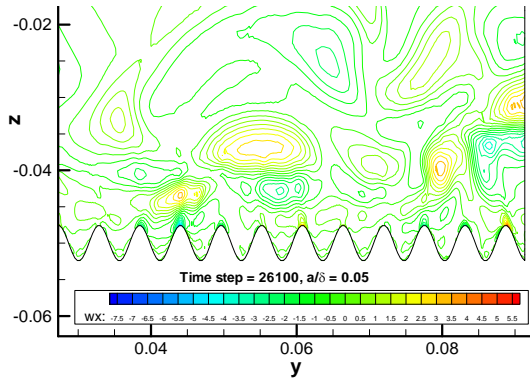


图 11 弯肋条壁面的无量纲涡量 ω_x 等值线图，

$a/\delta=0.05$ 。

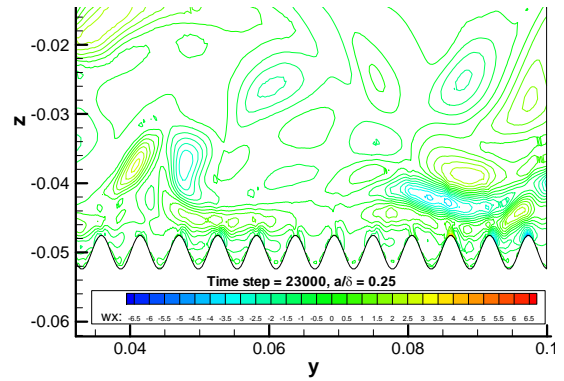


图 12 弯肋条壁面的无量纲涡量 ω_x 等值线图，

$a/\delta=0.25$ 。

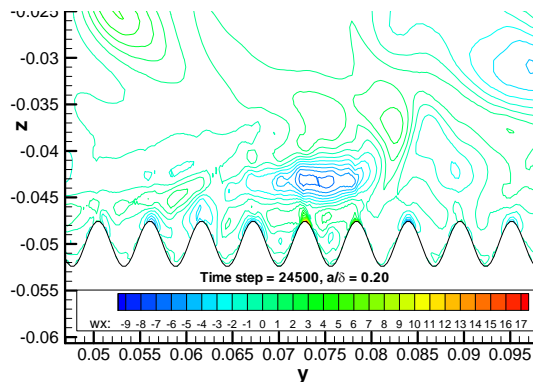


图 13 弯肋条壁面的无量纲涡量 ω_x 等值线图， $a/\delta=0.20$ 。

流向涡紧邻着光滑壁面，而在槽道下部，因肋条的存在，流向涡远离了壁面，这一现象正与 Choi et al.(1993)[13]所提出的减阻机理相符合。由图 10 中的局部放大图可以看出，直肋条壁面附近的正反向流向涡成对出现。

图 11 中是弯肋条 ($a/\delta=0.05$) 的结果，此时的减阻效果弱于直肋条情况 (图 9)。由图

11 可知， $a/\delta=0.05$ 时，流向涡离肋条壁面很近，且强度大于直肋条算例，故所引起的摩擦阻力略大。对于减阻能力强于直肋条算例的两种情况，比较图 12 和 13 可知， $a/\delta=0.25$ 的流向涡强度更小，流向涡离壁面较远，故获得了较强减阻效果 (图 9)； $a/\delta=0.20$ 的流向涡强度较大，故减阻效果略差。Yeet and Sagaut (2008) 认为，由于正弦形肋条在展向具有偏

移,使得流向涡在展向被拉长,在法向被拉平,正向流向涡和反向流向涡不再像直肋条算例一样相邻,而是呈上下分布。这一点在本文的图 11-13 中也能观察到。

4. 结论

本文用直接数值模拟的方法,比较了直肋条和正弦形弯肋条对槽道湍流的减阻效果。在本文所采用的计算条件下,直肋条具有 7.52% 的减阻效果。正弦形弯肋条在展向偏移量较小时 ($a/\delta=0.05$),减阻效果略差于直肋条;当展向偏移量增大后 ($a/\delta=0.10-0.25$),减阻效果比直肋条强。这说明,要获得更好的减阻效果,必须对正弦形弯肋条的展向偏移量进行选择。根据目前的计算结果,展向偏移量与减阻百分比的大小之间,尚未表现出单调性的趋势,有待进一步研究。计算结果中,流向涡的强度及位置与各算例的减阻能力表现出明显的相关性,阐明了弯肋条的减阻机理。

5. 致谢

本研究工作得到博士后科学基金项目 (2012M510418) 资助,特此感谢。

参考文献

- 1 Walsh MJ and Anders JB. Riblet/LEBU research at NASA Langley. Appl. Sci. Res. 46, 255-262, 1989
- 2 Walsh MJ. Drag Characteristics of V-Groove and Transverse Curvature Riblets. Viscous Flow Drag Reduction, ed. R. Hough, AIAA, New York, 168-84, 1980
- 3 Walsh MJ. Turbulent Boundary Layer Drag Reduction Using Riblets. AIAA Paper 82-169, 1982, New York
- 4 Walsh MJ. and Lindemann, A. M. Optimization and Application of Riblets for Turbulent Drag Reduction. AIAA Paper 84-0347, 1984
- 5 Walsh MJ. Riblets, Viscous Drag Reduction in Boundary Layers. eds. D. M. Bushnell and J. N. Heffner, AIAA, Washington, D. C., 203-261, 1990
- 6 Fanny AZ. et al. Flight Test Results of Riblets at Supersonic Speeds. NASA Technical Memorandum 4387, 1992.
- 7 Bechert DW et al. Experiments on Drag-Reducing Surfaces and Their Optimization with an Adjustable Geometry. J. Fluid Mech., 338, 59-87, 1997
- 8 Lee and Lee. Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface. Exp. Fluids, 30, 153-166, 2001
- 9 王晋军,兰世隆,苗福友. 沟槽面湍流边界层减阻特性研究. 中国造船, 2001, 42 (4) : 1-5
- 10 李新华,董守平,赵志勇,等. 小尺度沟槽表面减阻作用的实验研究. 矿山机械, 2006, 34 (2) : 91-93
- 11 胡海豹,黄桥高,潘光,等. 脊状表面的加工成型技术及其减阻试验研究. 航空制造技术, 2011 (7) : 64-67
- 12 Ali Imad S. and Al-Fatlawie Noor H. Drag reduction in turbulent flow using different kinds of riblets. International conference on sunrise technologies, Conference Proceeding-ME, Dhule, 13th-15th, Jan, 2011.
- 13 Choi H et al. Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over Riblets. J. Fluid Mech., 255, 503-539, 1993
- 14 Goldstein D et al. Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over Modelled Riblet Covered Surface. J. Fluid Mech., 302, 333-376, 1995
- 15 黄德斌,邓先和,王杨君. 沟槽面管道湍流减阻的数值模拟研究. 水动力学研究与进展: A 辑, 2005, 20 (1) : 101-105
- 16 刘志华,董文才,夏飞. V 型沟槽尖端形状对减阻效果及流场特性影响的数值分析. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006, 21 (2) : 223-231
- 17 丛茜,封云,任露泉. 仿生非光滑沟槽形状对减阻效果的影响. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006, 21 (2) : 232-238
- 18 胡海豹,宋保维,杜晓旭,等. 条纹沟槽表面近壁区流场数值计算. 火力与指挥控制, 2008, 33 (4) : 54-56
- 19 Peet Y and Sagaut P. Turbulent Drag Reduction using Sinusoidal Riblets with Triangular Cross-Section. AIAA-2008-3745, 38th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, June 23-26 2008, Seattle, WA
- 20 胡海豹,黄桥高,刘占一,等. 脊状表面减阻机理研究. 摩擦学报, 2010, (1): 32-37
- 21 Zhang et al. Numerical simulation and experimental study of drag-reducing surface of a real shark skin. Journal of hydrodynamics, 23 (2): 204-211, 2011
- 22 王树立,史小军,赵书华,等. 沟槽面在湍流减阻中的技术研究及应用进展. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(1) : 146-150
- 23 许超,汪静,刘娅琛,等. 仿生沟槽减阻技术的研究和应用进展. 大连水产学院学报, 2009, 24 Supp 1: 235-237
- 24 Dean and Bhushan. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. Phil. Trans. R. Soc. A 368, 4775-4806, 2010
- 25 Jung WJ, Mangiavacchi N, and Akhavan R. Suppression of turbulence in wall bounded flows by high-frequency spanwise oscillations. Phys. Fluids, 8:1605-1607, 1992
- 26 Peet Y, Sagaut P and Charron Y. Towards Large Eddy Simulations of Turbulent Drag Reduction Using Sinusoidal Riblets. WSEAS Paper 565-355, 2007. The 5th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, Vouliagmeni, Greece, August 25-27, 2007
- 27 Sun ZS, Ren YX. The development of the characteristic-wise hybrid compact-WENO scheme for solving the Euler and Navier-Stokes equations. Computational Fluid Dynamics Review 2010, 279-297, 2010

TURBULENT DRAG REDUCTION USING SINUSOIDAL RIBLETS WITH DIFFERENT AMPLITUDES

TAN Lianhua¹ REN Yuxin¹

(¹ School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Straight longitudinal ribs manufactured in a flat surface act to reduce turbulent skin-friction drag 4 to 8%. It has been shown that this value can be increased if sinusoidal-like rods are used in replace. Direct numerical simulation of a turbulent flow over a riblet-covered surface is performed for six cases: straight riblets and sinusoidal riblets with five different values of spanwise deviation. It is found that drag reduction with sinusoidal riblets influenced by the deviation, showing a higher drag reduction over straight riblets for a larger value of the deviation. The contours of instantaneous streamwise vorticity are presented to analyze the relationship between organized coherent structures and spanwise deviations of sinusoidal riblets.

Key words turbulent drag reduction, riblets, direct numerical simulation