

文章编号:1000-8055(2011)01-0161-06

大尺度回转体脊状表面减阻试验

刘占一, 宋保维, 胡海豹, 黄桥高, 姜 军

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘 要: 对表面光滑和有脊状结构的大尺度回转体模型在风洞中进行了变速度、变攻角试验, 为脊状表面减阻技术的工程化应用提供了参考。对比分析发现: 来流速度对脊状表面减阻效果有很大影响, 减阻效果随速度增加呈现先增大后减小的趋势, 在某一速度达到最佳, 减阻效果提高 20%; 攻角对脊状表面减阻效果影响有限; 脊状结构的存在对模型升力系数和俯仰力矩系数几乎没有影响。

关 键 词: 脊状结构; 大尺度回转体; 攻角; 减阻效果; 风洞

中图分类号: O357.5

文献标识码: A

Experiment investigation about drag reduction of riblet structure on large-scale cylinder

LIU Zhan-yi, SONG Bao-wei, HU Hai-bao,

HUANG Qiao-gao, JIANG Jun

(School of Marine Technology,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Experiments of large-scale cylinder model with smooth and riblet surfaces were carried out under different speeds and attack angles in wind tunnel, providing a reference for engineering application of drag reduction technique about riblet surface. Results from comparison and analysis are as follows: wind speed has a great influence on drag reduction effect of riblet surface. Drag reduction effect increases first, then decreases with increasing wind speed, and reaches to peak at certain speed. The drag reduction effect could exceed 20 percents. Attack angle has limited influences on drag reduction effect of riblet surface. The riblet structure has almost no influence on the lift coefficient and pitching coefficient of model.

Key words: riblet structure; large-scale cylinder; attack angle;

drag reduction effect; wind tunnel

减阻技术在社会的各个领域都有着重要的意义。而在众多的减阻技术中, 脊状表面减阻技术有着明显的优势: 脊状表面减阻技术不改变物体结构、外形, 也不增加辅助设备, 只在物体外表面刻铸一定形状尺寸的脊状结构, 在应用简便性和应

用范围上有重大突破。该项技术在国外目前已投入实际应用, 在 2008 年北京奥运会上, 菲尔普斯身着美国 Speedo 公司生产的具有条纹表面的游泳衣掠走了 8 金 1 银; 空中客车曾将 A320 试验机表面积约 70% 贴上条纹薄膜, 达到了节油

收稿日期: 2009-11-25; 修订日期: 2010-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(50835009, 10672136); 西北工业大学科技创新基金(2008KJ02012); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2010JQ1009)

作者简介: 刘占一(1985-), 男, 河南南召人, 博士生, 主要研究方向为水下减阻技术。

1%~2%的效果;NASA(美国航空航天局)兰利中心在 Learjet 型飞机上开展的类似飞行试验显示,减阻量为6%左右^[1]。

脊状表面减阻技术的研究已经持续了近50年。Walsh 通过系统的试验研究获得了脊状结构形状、尺寸与减阻效果间的关系^[2];Bacher 等利用小型水洞设备对脊状表面进行了试验研究,提出了脊状表面减阻机理^[3];樊星、胡海豹等通过风洞试验研究了脊状表面流场特性,发现脊状表面边界层速度分布曲线上抬,湍流度下降^[4-5]。

国内外对旋成体沟槽表面减阻也有不少研究。Neumann 和 Dinkelacker^[6]对头部为椭圆半球、表面布置有V型沟槽的圆柱体在水洞中的研究表明,湍流情况下减阻9%,转捩区减阻效果可达13%。Coustols^[7]对贴有条纹薄膜的旋成体进行了研究,在亚声速和跨声速流动中得到了约8%的减阻效果。海军工程大学的夏向东等^[8]对表面粘贴微沟槽薄膜的回转体在拖曳水池中利用PIV(particle image velocimetry)进行了流场测试,发现微沟槽能降低壁面涡的强度和猝发频率。吉林大学的任露泉等^[9]对非光滑表面的旋成体在风洞中进行了阻力测试,总阻力最大减阻效果5%左右。

以上研究中,回转体整体尺度在几十至几百毫米,与实际飞行器尺度有较大差距。本文对长约2.5m、表面加工有脊状结构的回转体模型进行了风洞试验研究,获得了不同速度、攻角情况下的减阻规律。

1 试验设备及试验模型

1.1 风洞介绍

脊状表面减阻规律风洞试验研究在西北工业大学翼型叶栅空气动力学国防科技重点实验室的NF-3 直流式大型低速风洞试验室中完成。该风洞总长80m,驱动直流电机功率1120kW,工作段尺寸3.5m×2.5m×12m,空载时风洞最大风速90m/s。

测试天平为六分量杆式应变天平,精度1‰,攻角(侧滑角)由攻角机构自动设定,设定精度±0.5′,数据采集系统是由美国引进的PSI8400电子扫描阀和与它联网的SUN-44-330计算机工作站组成,扫描速度50000次/s,精度0.5%。

1.2 试验模型

试验模型采用回转体外形,由半球头部、前圆

柱段、测力天平连接段、后圆柱段及尾部曲线段五部分组成,各段之间用螺纹连接。模型全长2480mm,最大直径172mm,前圆柱段800mm,后圆柱段600mm,尾部曲线段490mm,模型外形如图1所示。

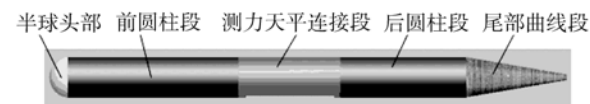


图1 试验模型示意图

Fig. 1 Sketch of testing model

柱段、测力天平连接段、后圆柱段及尾部曲线段五部分组成,各段之间用螺纹连接。模型全长2480mm,最大直径172mm,前圆柱段800mm,后圆柱段600mm,尾部曲线段490mm,模型外形如图1所示。

脊状结构加工在前圆柱段和后圆柱段上,沿轴向均匀分布。图2为脊状结构轴向方向示意图,其尺寸为 $h=0.01\text{ mm}$, $\theta=120^\circ$, $a=4s=0.1386\text{ mm}$,轴向1mm长度内约有5.77个脊状结构。对于光滑表面和脊状表面的对比测试试验,只需更换前圆柱段和后圆柱段即可。

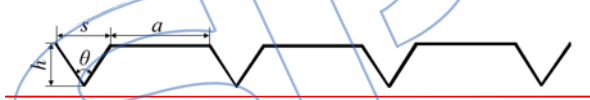


图2 脊状结构示意图

Fig. 2 Sketch of riblet on the model

本项试验主要是研究速度和攻角对脊状表面减阻效果的影响,两模型均进行了三个工况下的测试,各工况情况如表1所示。

表1 脊状表面减阻试验工况

Table 1 Testing items about drag reduction of riblet surface

序号	试验工况
1	$\alpha=0^\circ$, $V=40, 45, 50, 55, 60, 65, 70\text{ m/s}$
2	$V=60\text{ m/s}$, $\alpha=\pm 10^\circ, \pm 6^\circ, \pm 4^\circ, \pm 3^\circ, \pm 2^\circ, 0^\circ$
3	$V=65\text{ m/s}$, $\alpha=\pm 10^\circ, \pm 6^\circ, \pm 4^\circ, \pm 3^\circ, \pm 2^\circ, 0^\circ$

根据公式 $Re = \frac{VL}{\nu}$, 取模型特征长度 $L=2.48\text{ m}$, $V=40\sim 70\text{ m/s}$, 20°C 时空气运动黏度 $\nu=1.5\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$, 则试验中流动雷诺数 $Re=6.61\times 10^6\sim 1.16\times 10^7$ 。一般认为表面流动湍流转捩雷诺数为 5×10^5 , 因此试验中流动状况为湍流^[10-11]。

2 试验结果处理及分析

2.1 试验原始数据处理

按照如下公式把六分量力(或力矩)化为无量纲系数^[12]:

$$C_y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (1)$$

$$C_x = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (2)$$

$$m_z = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \rho V^2 SL} \quad (3)$$

$$C_z = \frac{Z}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (4)$$

$$m_y = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho V^2 SL} \quad (5)$$

$$m_x = \frac{M_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 SL} \quad (6)$$

式中 C_y , C_x , m_z , C_z , m_y , m_x 为模型的无量纲系数; Y , X , M_z 分别为升力、阻力和俯仰力矩; Z , M_y , M_x 分别为侧向力、偏航力矩和横滚力矩; S 为模型的最大横截面积; L 为模型的长度. 本试验中 $S=0.023 \text{ m}^2$, $L=2.48 \text{ m}$.

模型的无量纲系数还要通过支架干扰扣除、阻塞修正和零位修正等方法进行修正处理.

2.2 试验结果分析

图3~图5给出了 0° 攻角不同风速下光滑模型和脊状模型阻力系数、升力系数和俯仰力矩系数对比. 图6给出了 0° 攻角时脊状表面减阻量随速度变化曲线.

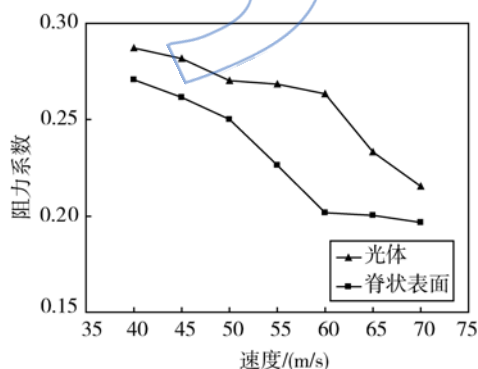


图3 阻力系数曲线(0° 攻角)

Fig. 3 Drag coefficient curves at attack angle of 0°

由图3~图6可见,在 0° 攻角下,脊状表面在 $40 \sim 70 \text{ m/s}$ 的风速范围内均有较好的减阻效果,但在不同风速下的减阻效果存在较大差异,减阻量随着风速的增大先增大后降低,在 60 m/s 时达到最大. 60 m/s 风速时,脊状模型和光滑模型的阻力系数分别为 0.2015 和 0.2635 ,此时减阻量

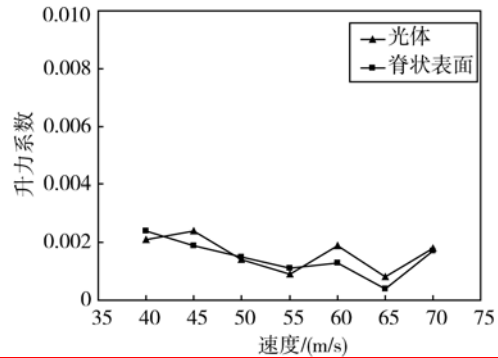


图4 升力系数曲线(0° 攻角)

Fig. 4 Lift coefficient curves at attack angle of 0°

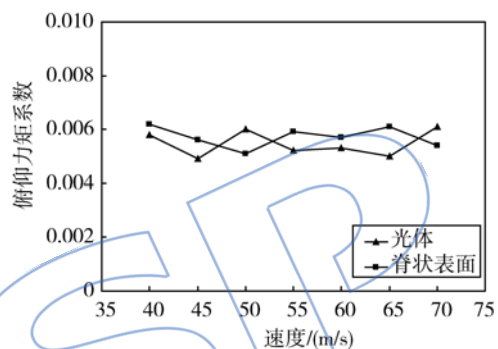


图5 俯仰力矩系数曲线(0° 攻角)

Fig. 5 Pitching moment coefficient curves at attack angle of 0°

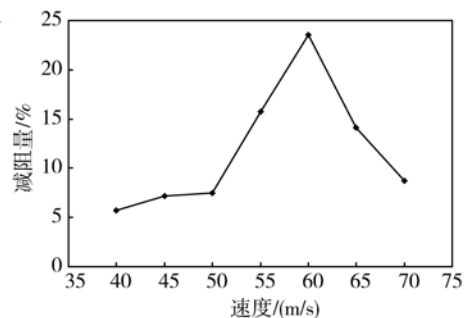


图6 减阻量与速度的关系(0° 攻角)

Fig. 6 Correlation between drag reduction quantity and speed at attack angle of 0°

为 23.53% . 脊状模型的升力系数和俯仰力矩系数与光滑模型很相近,没有明显变化.

图7~图9是 60 m/s 风速下光滑表面和脊状表面在不同攻角下阻力系数、升力系数和俯仰力矩系数对比. 图10是 60 m/s 风速下减阻量随攻角变化曲线.

图11~图13是 65 m/s 风速下光滑表面和脊状表面在不同攻角下阻力系数、升力系数和俯仰力矩系数对比. 图14是 65 m/s 风速下减阻量随攻角变化曲线.

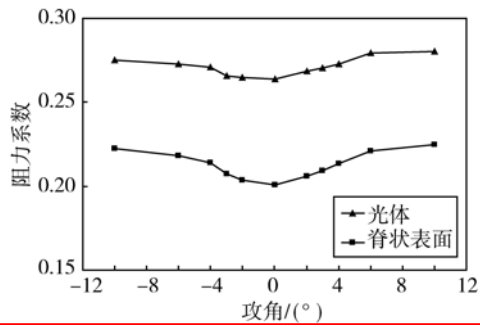


图7 阻力系数曲线(60 m/s)

Fig. 7 Drag coefficient curves at 60 m/s

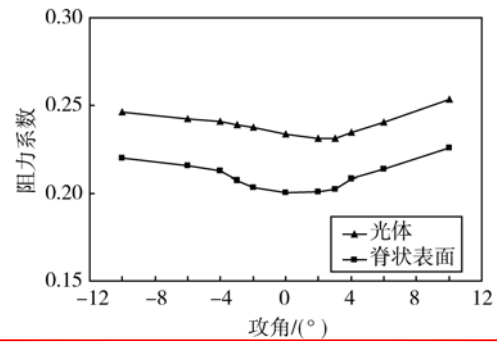


图11 阻力系数曲线(65 m/s)

Fig. 11 Drag coefficient curves at 65 m/s

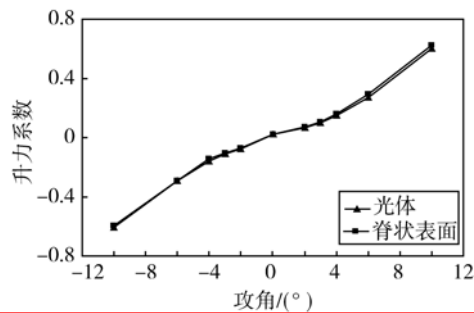


图8 升力系数曲线(60 m/s)

Fig. 8 Lift coefficient curves at 60 m/s

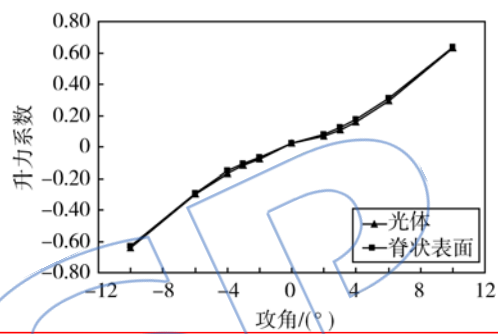


图12 升力系数曲线(65 m/s)

Fig. 12 Lift coefficient curves at 65 m/s

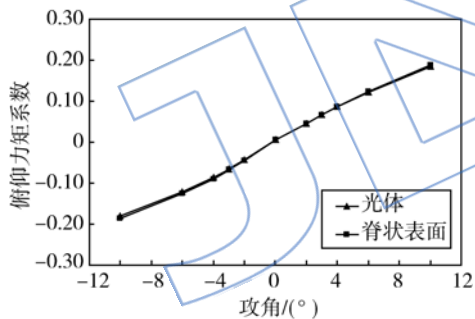


图9 俯仰力矩系数曲线(60 m/s)

Fig. 9 Pitching moment coefficient curves at 60 m/s

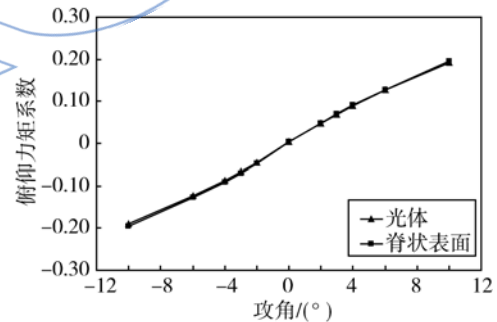


图13 俯仰力矩系数曲线(65 m/s)

Fig. 13 Pitching moment coefficient curves at 65 m/s

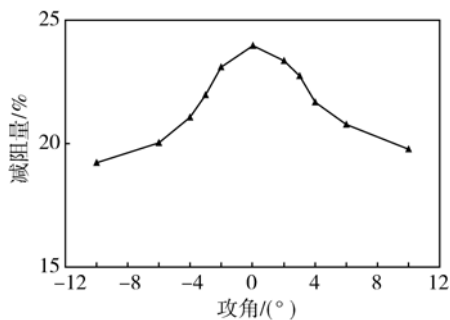


图10 减阻量与攻角的关系(60 m/s)

Fig. 10 Correlation between drag reduction quantity and attack angle at 60 m/s

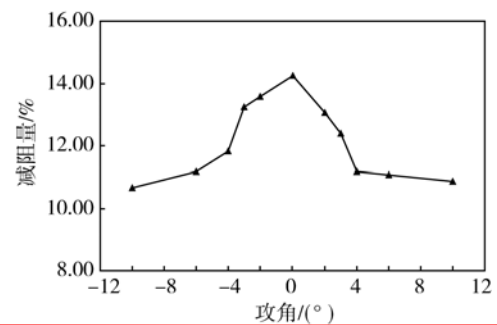


图14 减阻量与攻角的关系(65 m/s)

Fig. 14 Correlation between drag reduction quantity and attack angle at 65 m/s

从图 11~图 14 中可以看出,在 60 m/s 和 65 m/s 风速,脊状模型和光滑模型的阻力系数、升力系数、俯仰力矩系数对比曲线都反映出以下规律:在 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 攻角范围内,脊状模型的阻力系数比光滑模型的阻力系数小,在 0° 攻角减阻量达到最大,但是减阻量变化并不大,不超过 5%;脊状模型和光滑模型的升力系数和俯仰力矩系数基本没有变化。

通过对光滑模型和脊状模型进行变速度、变攻角试验,可以看到,本试验条件下,脊状表面确实具有明显的减阻效果,可能的原因在于脊状结构内形成了类似于“滚珠轴承”的涡,涡的存在使流体与壁面间的摩擦从滑动摩擦变为滚动摩擦,阻力自然就降低了。作者曾利用数值方法模拟了脊状表面流场情况,可以清楚地观察到脊状结构内的小涡,如图 15 所示^[13]。

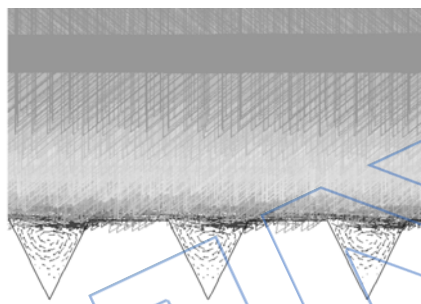


图 15 数值模拟结果

Fig. 15 Result of numerical simulation

速度对于脊状表面的减阻效果影响很大,在合适的速度下,脊状表面的减阻效果才能达到最好。可能的原因是脊状结构内涡的稳定运动需要合适的外部流场来提供能量,外部流场速度过小,涡有可能因为能量不足而无法形成;外部流场速度过大,则有可能破坏涡的稳定结构。因此,在合适的速度下,脊状表面才能发挥最好的减阻效果。由于试验条件的限制,本试验未能测得脊状表面近壁区流速分布,无法获得更多近壁区流场信息。潘家正^[14]对表面有横向肋条的平板在 5~20 m/s 风速下进行阻力测试,还通过热线风速仪获得了边界层的速度形态和雷诺应力形态,发现在中间某一风速(11 m/s)时减阻效果达到最大,与本试验结果一致。他认为如果试验风速较大,将使滞留在凹坑内的小涡受到高速流动的抽吸而不断逸出凹坑,导致减阻能力降低。由于潘家正采用的脊状结构尺寸为 1.6 mm 和 3.2 mm,与本试验相差较大,所以存在最佳减阻效果的风速并不一致。这

也说明脊状结构的尺寸对于减阻效果也有重要影响。

攻角对于脊状表面的减阻效果有一定的影响,随攻角变大,减阻效果有所下降, 0° 攻角时减阻效果最好。原因在于,随着攻角逐渐变大,模型的迎风面积变大,压差阻力在总阻力中所占比重变大,摩擦阻力所占比重变小,而脊状结构减阻针对的是摩擦阻力,因此对于总阻力,减阻效果变弱。

而由于脊状结构尺寸微小,对模型表面压力场影响甚微,因此脊状模型升力系数和俯仰力矩系数相比光滑模型没有明显变化。

3 结 论

本文对表面光滑和有脊状结构的大尺度回转体模型在风洞中进行了对比测试试验,得到以下结论:

1) 来流速度对脊状表面的减阻效果具有很大影响。在 40~70 m/s 的速度范围内,减阻量从 5.75% 增加到 23.53%,再降低到 8.68%,即随着速度的增大,脊状表面的减阻效果先增大后降低,且在某一速度时减阻效果达到最佳。

2) 攻角对脊状表面的减阻效果有一定的影响。在 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的攻角范围内,60 m/s 时减阻量在 19.23%~23.96% 间变化,65 m/s 时减阻量在 10.65%~14.25% 间变化,并且随着攻角的增大,脊状表面的减阻效果有所降低。攻角改变 10° ,减阻量大约变化 5%,可见,本试验条件下攻角对减阻量的影响有限。

3) 本试验条件下,脊状结构对航形体的升力系数和俯仰力矩系数没有显著影响。

本文中,回转体模型的长度达到了 2480 mm,更接近实际航行器尺度,对脊状表面在实际航行器上的应用具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 王晋军. 沟槽面湍流减阻研究综述[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(1): 31-34.
WANG Jinjun. Reviews and prospects in turbulent drag reduction over riblets surface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(1): 31-34. (in Chinese)
- [2] Walsh J M. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets[R]. Orlando, FL: 20th American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Sciences Meeting, 1982.

- [3] Bacher V E, Smith R C. A combined visualization-anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications[R]. Boulder, CO: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Shear Flow Control Conference, 1985.
- [4] 樊星, 姜楠. 用平均速度剖面法测量壁湍流摩擦阻力[J]. 力学与实践, 2005, 27(1): 28-30.
FAN Xing, JIANG Nan. Skin friction measurement in turbulent boundary layer by mean velocity profile method[J]. Mechanics and Practice, 2005, 27(1): 28-30. (in Chinese)
- [5] 胡海豹, 宋保维, 刘占一, 等. 基于湍流边界层时均速度分布的脊状表面减阻规律研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1040-1047.
HU Haibao, SONG Baowei, LIU Zhanyi, et al. Research about the characteristic of drag reduction over riblets surface based on average velocity profile in the turbulent boundary layer[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5): 1040-1047. (in Chinese)
- [6] Neumann D, Dinkelacker A. Drag measurements on V-grooved surfaces on a body of revolution in axial flow[J]. Applied Scientific Research, 1991, 48(1): 105-114.
- [7] Coustols E. Behaviour of internal manipulators—"riblet" models in subsonic and transonic flows[R]. Tempe, AZ: AIAA, 2nd Shear Flow Conference, 1989.
- [8] 夏向东, 刘志华, 董文才, 等. 回转体微沟槽面湍流边界层流动实验测量[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(6): 533-538.
XIA Xiangdong, LIU Zhihua, DONG Wencai, et al. Experimental measurement of the turbulent boundary layer flow of gyroidal objects with microgrooves surfaces[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(6): 533-538. (in Chinese)
- [9] 任露泉, 张成春, 田丽梅. 仿生非光滑用于旋成体减阻的试验研究[J]. 吉林大学学报, 2005, 35(4): 431-436.
REN Luquan, ZHANG Chengchun, TIAN Limei. Experimental study on drag reduction for bodies of revolution using bionic non-smoothness[J]. Journal of Jilin University, 2005, 35(4): 431-436. (in Chinese)
- [10] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
ZHANG Zixiong, DONG Zengnan. Viscous fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese)
- [11] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
JING Sirui, ZHANG Mingyuan. Hydrodynamics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
- [12] 恽起麟. 风洞实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
YUN Qilin. Wind tunnel testing [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [13] 刘占一, 胡海豹, 宋保维, 等. 不同间隔脊状表面的减阻数值仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6025-6028, 6032.
LIU Zhanyi, HU Haibao, SONG Baowei, et al. Numerical simulation research about riblet surface with different spacing[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 6025-6028, 6032. (in Chinese)
- [14] 潘家正. 湍流减阻新概念的实验探索[J]. 空气动力学学报, 1996, 14(3): 304-310.
PAN Jiazheng. The experimental approach to drag reduction of the transverse ribbons on turbulent flow[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1996, 14(3): 304-310. (in Chinese)