船舶表面微结构设计及其减阻性能分析

赖 昭1、陈振豪2

1上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2024年4月26日; 录用日期: 2024年5月21日; 发布日期: 2024年5月29日

摘要

针对船舶航行时水下表面存在微结构时,可减小阻力、提升能源使用效率的特点,以鲨鱼皮表面为仿生基础,设计仿鲨鱼、V形、矩形三种微结构表面,通过Fluent软件进行数值模拟,探究不同微结构形状对近壁区表面减阻率、剪切力、速度和湍流动能的影响。数值模拟结果表明:与无结构表面相比较,不同沟槽形状的微结构表面都具备一定的减阻性能。相较于仿鲨鱼、V形微结构表面,矩形微结构表面的减阻效果最好,速度为1 m/s时减阻率最高可达18.4%。微结构的存在可以有效地减小表面所受到的壁面剪切力,减缓近壁边界层的速度梯度变化,改善流体在近壁区域内的流动情况,减少能量涡旋。

关键词

微结构,减阻,鲨鱼盾鳞结构,数值模拟

Ship Surface Microstructure Design and Its Drag Reduction Performance Analysis

Zhao Lai¹, Zhenhao Chen²

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai ²Shanghai Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Shanghai

Shanghar Co., Ltd., China Coar rechnology and Engineering Group, Shanghar

Received: Apr. 26th, 2024; accepted: May 21st, 2024; published: May 29th, 2024

Abstract

In view of the fact that the presence of microstructures on the underwater surface during ship navigation can reduce the drag force and improve the efficiency of energy use, three microstructured surfaces, namely, shark-like, V-shape, and rectangular, are designed based on the sharkskin surface, and numerical simulations are carried out by Fluent software to investigate the effects of dif-

文章引用: 赖昭, 陈振豪. 船舶表面微结构设计及其减阻性能分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2932-2942. POI: 10.12677/mos.2024.133266

²中煤科工集团上海有限公司,上海

ferent microstructured shapes on the surface drag reduction rate, shear force, velocity, and turbulent kinetic energy of the surface in near-wall area. The numerical simulation results show that the microstructured surfaces have certain drag reduction performance compared with the unstructured surfaces. Compared with the shark-like and V-shaped microstructured surfaces, the rectangular microstructured surface has the best drag reduction effect, with a maximum drag reduction rate of 18.4% at a velocity of 1 m/s. The presence of microstructures can effectively reduce the shear force and the turbulence kinetic energy. The existence of microstructures can effectively reduce the wall shear force on the surface, slow down the change of velocity gradient in the boundary layer in the near-wall region, improve the flow of fluid in the near-wall region, and reduce the energy vortex, so it has a certain drag reduction performance.

Keywords

Microstructure, Drag Reduction, Shark Shield Scale Structure, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Open Access

1. 引言

船舶运输在全球货物贸易中占据着主导地位,但是也带来了越来越严重的能源消耗和空气污染问题。 船舶的能源利用效率和航行时所受到的阻力息息相关,因此,船舶的减阻降排意义重大。

近年来,改变船体表面微结构是船舶减阻领域的热门研究方向[1] [2] [3]。较多学者从仿生学角度出发,在鲨鱼、贝壳、珊瑚等生物表面提取不同种类的微结构并展开了研究,发现微结构能够实现一定的减阻效果,且具有可持续、环境友好等诸多优点[4]。其中,鲨鱼表面的盾鳞结构得到了更多关注。秦立果构建简化盾鳞结构,通过流体仿真发现交错排列的简化盾鳞结构表面的减阻效果更好[5]。张璇对矩形、三角形、半圆形沟槽表面的流场进行数值模拟,结果表明三种沟槽表面均具有减阻效果,其中矩形沟槽表面减阻效果最佳[6]。汪志远通过数值模拟方法,发现鲨鱼皮微沟槽结构相比 V 形沟槽结构减阻效果更好[7]。

本文以鲨鱼皮表面为仿生原型,设计出不同沟槽形状的鲨鱼盾鳞单元结构,依据已有的减阻理论和 数据,运用数值模拟的方法研究不同沟槽形状对减阻效果的影响。

2. 建立计算模型

2.1. 微结构设计

Walsh、Lee 等人的研究表明,沟槽尺寸无量纲参数 $h^+ \le 25$, $s^+ \le 30$ 时,沟槽具有减阻作用,且当 $h^+ = 10$, $s^+ = 15$ 时减阻效果最好[8] [9]。

沟槽尺寸无量纲参数计算公式如下:

$$h^{+} = \frac{0.172hU \operatorname{Re}^{-\frac{1}{10}}}{v} \tag{1}$$

$$s^{+} = \frac{0.172 \, sU \, \text{Re}^{-\frac{1}{10}}}{v} \tag{2}$$

其中, h^+ 为沟槽高度无量纲值;h 为沟槽高度; s^+ 为沟槽宽度无量纲值;s 为沟槽宽度;U 为流体来流速度;v 为运动粘度系数;Re 为雷诺数值。

平板流动的雷诺数计算公式如下:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$
 (3)

其中, ρ 为流体密度;L为计算域特征长度, μ 为流体的动力粘度。

本文设定速度范围取值为 1~9 m/s,选用常温下的水作为流体介质,代入上述公式计算可得 $h \le 0.52$ mm, $s \le 0.62$ mm。

根据前人对鲨鱼皮特征部位鳞片采样所得到的鳞片尺寸测量结果,取沟槽宽度 s = 沟槽高度 h = 0.5 mm,沟槽间距 h = 3s = 1.5 mm,构建鲨鱼盾鳞结构模型,如图 1 所示。

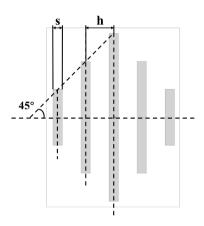


Figure 1. Schematic diagram of shark shield scale structure

图 1. 鲨鱼盾鳞结构示意图

选取三种不同的沟槽形状,构建微结构模型,如图 2 所示。其中,图 2(a)的沟槽为了更接近真实的 鲨鱼皮表面,在图 2(b) V 形沟槽的基础上纵向两端各添加了 10°的倾角。

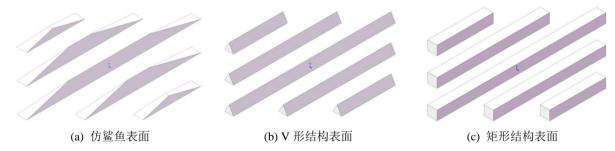


Figure 2. Schematic representation of the microstructure of different groove shapes 图 2. 不同沟槽形状的微结构示意图

2.2. 计算域创建

对不同微结构表面建立相同的流体域,并将微结构表面与无结构表面置于同一流体域内,以便进行比较。为了确保计算的准确性,设置计算域的范围为:长度 300 mm,宽度 80 mm,高度 50 mm,如图

3 所示。为使流体流入微结构区域时流动情况已趋于稳定,减少误差,设置微结构区域在距入口 100 mm 处。

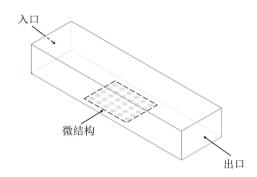


Figure 3. Computation domain diagram 图 3. 计算域示意图

2.3. 控制方程

三维可压缩流体的控制方程表达式如下:

1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \tag{4}$$

2) 动量方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho vV) = -\frac{\partial \rho}{\partial v} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y$$
 (6)

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \tag{7}$$

3) 能量方程

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_n} \operatorname{grad} T\right) + S_T \tag{8}$$

其中,u、v、w 为速度矢量 V 沿 x、y、z 轴的速度分量。

2.4. 湍流模型的选择

湍流较理想层流来说,其运动复杂不规则,各个方向上都具有较强的脉动性。目前在 Fluent 软件中可选用的湍流模型众多,本文选用 SST $k-\omega$ 模型。相比标准的 $k-\omega$ 模型, SST $k-\omega$ 模型考虑到了湍流剪应力的传播,修改了湍流粘性公式,增加了横向耗散导数项,因此能够更好地模拟平板流动,在近壁区拥有更好的精度、更广的适用领域和算法稳定性。

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j}\right)}{\partial x_j} + G_w - Y_w + S_w + D_w$$
(9)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right)}{\partial x_j} + G_k - Y_k + S_k \tag{10}$$

3. 计算域求解方法

3.1. 边界条件设置

对计算域各表面的边界条件设置如下表 1。

Table 1. Calculation domain boundary condition settings

 表 1. 计算域边界条件设置

边界名称	位置	边界条件
Inlet	入口	Velocity Inlet (1 m/s~9 m/s)
Outlet	出口	Outflow
Symmetry	左右面	Symmetry
Тор	上表面(无结构)	Wall (no-slip)
Bottom	下表面(微结构)	Wall (no-slip)

运用 Fluent 软件进行计算时,计算方式选用 SIMPLEC,壁面函数选用标准壁面函数,空间离散格式选用二阶迎风插值,残差设置为 10^{-4} ,迭代步数设置为 1000 步。

3.2. 准确性验证

普朗特光滑平板摩擦阻力系数 C_f 计算经验公式如下:

$$C_f = 0.074 \,\mathrm{Re}_L^{-0.2} \tag{11}$$

为验证所选用湍流模型和求解方法的准确性和可靠性,对无结构表面进行仿真计算,与公式计算结果相比较,结果如下表 2 所示。

Table 2. Comparison of simulation results with the calculated values of Eq. 表 2. 仿真结果与公式计算值比较

	仿真结果	计算结果	相对误差/(%)
1	0.005846097	0.005945990	1.68
3	0.00467894	0.004773093	1.97
5	0.004203118	0.004309532	2.47
7	0.003953677	0.004029067	1.87
9	0.003785726	0.00383156	1.20

由表 2 可见,无结构表面的仿真结果和摩擦阻力系数公式计算结果的相对误差在 5%的范围内,因此 所选择的湍流模型和求解方法适用于所建立模型的数值模拟,结果具有准确性。

3.3. 减阻率评定

采用壁面剪切应力来定义壁面总阻力,将相同入口速度条件下,微结构表面和无结构表面的摩擦阻力系数的仿真计算结果进行相对差值的计算,得到减阻率 η :

$$\eta = \frac{C_{f-top} - C_{f-bottom}}{C_{f-top}} \times 100\%$$
(12)

4. 数值模拟结果分析

4.1. 减阻率分析

通过数值模拟计算得到不同沟槽形状在 1~9 m/s 速度下的减阻率,结果如图 4 所示。

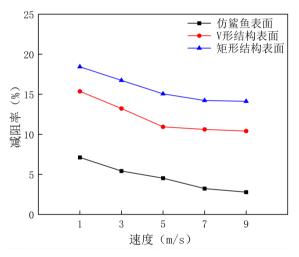


Figure 4. Resistance reduction with velocity for surfaces with different groove shapes

图 4. 不同沟槽形状表面随速度变化的减阻率

由图 4 可得,随着速度的增加,所有微结构表面的减阻率都有所下降。在三种不同沟槽形状的微结构表面中,矩形结构表面的减阻效果最好,速度为 1 m/s 时减阻率最高可达 18.4%,其次为 V 形结构表面、仿鲨鱼表面。由图中趋势可以简单推断,水流进入微结构区域之后,相比于矩形结构表面,水流流入 V 形结构表面的沟槽时,对肋条两侧表面的压力有所增大,摩擦阻力随之增大,因此减阻效果弱于矩形结构表面;相比于 V 形结构表面,当水流流入仿鲨鱼表面的沟槽时,因为肋条迎流区前端表面具有 10°的倾角,水流流过所需要的能量会增大,造成了摩擦阻力的增大,除此之外,也可能造成"回流"现象,形成能量涡旋,减缓后面的水流的流动,因此减阻效果弱于 V 形结构表面。为了进一步探究不同沟槽形状对微结构表面减阻效果的影响,下面将根据速度为 1 m/s 时的剪切力、速度和湍流动能云图展开分析。

4.2. 剪切力分析

图 5 为速度为 1 m/s 时不同沟槽形状的微结构表面的剪切力云图,通过对比可以清晰地看出,微结构表面的剪切力会根据沟槽形状产生差异。纵观所有微结构表面,可以看到最大的剪切力均出现在单个结

构的迎流区,最小的剪切力出现在单个结构的背流区。其中,矩形结构表面的最小剪切力区域(即深蓝色区域)所占面积最多。

图 6 为不同沟槽形状的微结构表面的局部剪切力云图,从图中可以更清晰地看到,仿鲨鱼表面的最大剪切力区域所占面积明显大于其他表面,基本都分布在单个结构的迎流区的沟槽上,最小剪切力区域基本都分布在单个结构的背流区的沟槽上。V 形结构表面和矩形结构表面的最大剪切力区域基本都分布在单个结构的迎流区的沟槽前端,最小剪切力区域基本都分布在沟槽之间的间隙和单个结构的背流区。其中,矩形的单个结构对周围流场的影响范围更大。

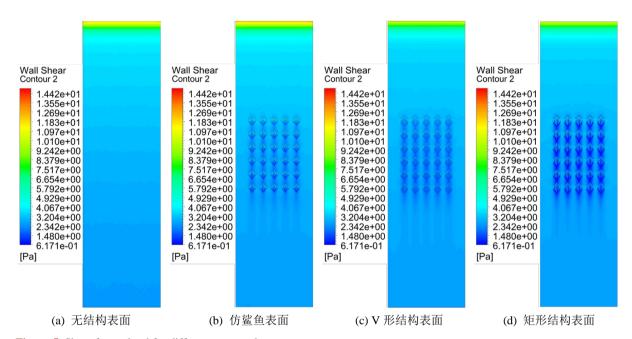


Figure 5. Shear force cloud for different groove shapes **图 5.** 不同沟槽形状下的剪切力云图

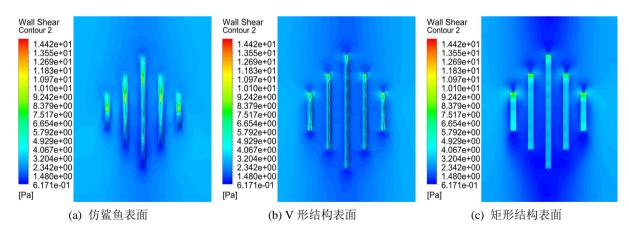


Figure 6. Localized Shear force cloud for different groove shapes 图 6. 不同沟槽形状下的局部剪切力云图

为了更准确地说明不同沟槽形状下微结构表面的剪切力分布情况,读取不同表面的剪切力平均值和 最小值进行比较,结果如下表 3 所示。

表面	剪切力平均值(Pa)	剪切力最小值(Pa)
无结构表面	3.22380	2.45652
仿鲨鱼表面	3.05533	0.49758
V 形结构表面	2.94945	0.03348
矩形结构表面	2.79169	0.00923

Table 3. Average and minimum values of shear force on different surfaces 表 3. 不同表面的剪切力平均值和最小值

由表中数据可得,微结构表面的剪切力平均值均小于无结构表面,说明微结构的设置能够有效地减小表面所受的剪切力。在微结构表面中,仿鲨鱼表面的剪切力最大,说明在水流的冲刷作用下,纵向倾角给表面带来了更多的剪切力,削弱了微结构表面的减阻效果。矩形结构表面的剪切力平均值最小,相比仿鲨鱼表面具有更好的减阻性能。

4.3. 速度分析

图 7 为速度为 1 m/s 时不同沟槽形状的微结构表面的速度云图,由图中能够直观看到,微结构的存在能够拓宽近壁区边界层厚度,减缓速度梯度的变化。

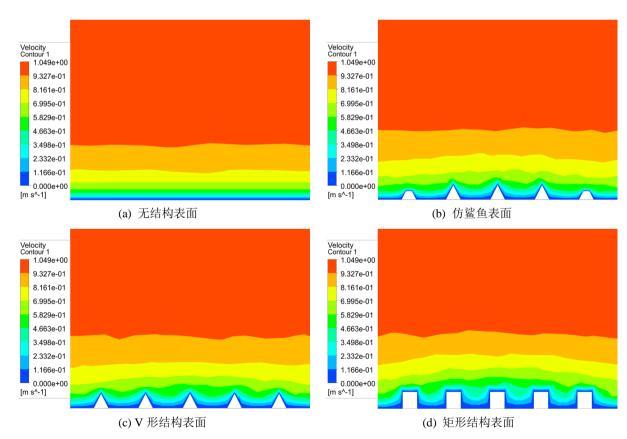


Figure 7. Velocity cloud for different groove shapes **图 7.** 不同沟槽形状下的速度云图

为了进一步比较不同沟槽形状的微结构表面,图 8 显示了入口速度为 1 m/s、y = 132.5 mm 时流向速度沿 Z 向距壁面距离的变化情况。从图中可以清晰地看到,不同沟槽形状的微结构表面都能够减缓速度梯度的变化。其中,矩形结构表面的两条曲线之间的区域面积差值最大,为 2.75E-04,两条曲线第二次重合点的横坐标位置也最大,为 0.00252 m,说明矩形结构表面对速度梯度变化的减缓效果最好。

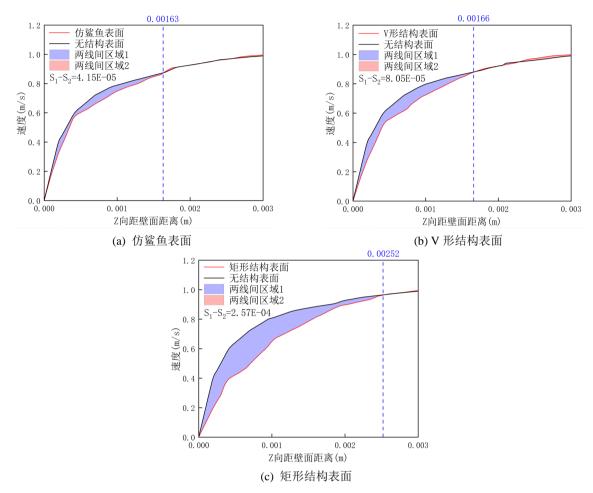


Figure 8. Velocity variation with distance from the wall in the Z direction for different groove shapes 图 8. 不同沟槽形状下随 Z 向距壁面距离的速度变化

4.4. 湍流动能分析

图 9 为速度为 1 m/s 时不同沟槽形状的微结构表面的湍流动能云图,从图中可以清晰可见无结构表面 近壁区存在绿色的高湍流动能区域,仿鲨鱼表面的单个结构两侧存在部分高湍流动能区域,V 形结构表 面单个结构两侧存在的高湍流动能区域相较仿鲨鱼表面更少,矩形沟槽表面的单个结构周围没有出现高湍流动能区域。

为了进一步比较不同沟槽形状的微结构表面,图 10 显示了入口速度为 1 m/s、y = 132.5 mm 时湍流 动能沿 Z 向距壁面距离的变化情况。从图中可以看出,不同沟槽形状的微结构表面的湍流动能相比无结构表面均有一定程度的降低。两条曲线之间的区域面积差值代表了微结构表面和无结构表面的湍流动能差值,其中,矩形结构表面的湍流动能差值最大,说明了矩形结构表面对改善近壁区流体的流动情况、减少能量涡旋的效果最好。

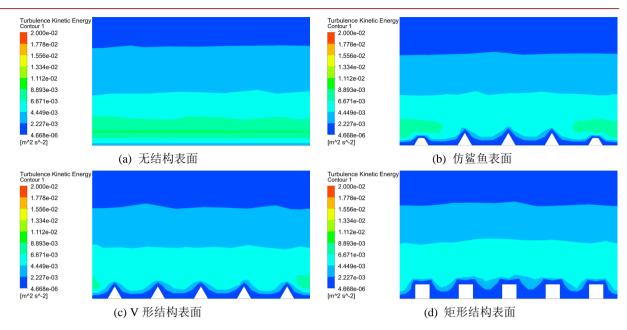


Figure 9. Turbulent kinetic energy cloud for different groove shapes **图 9.** 不同沟槽形状下的湍流动能云图

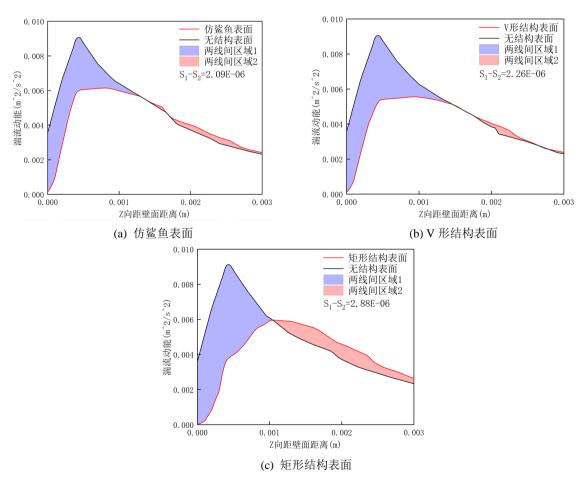


Figure 10. Variation of turbulent kinetic energy with distance from the wall in the z-direction for different groove shapes 图 10. 不同沟槽形状下随 Z 向距壁面距离的湍流动能变化

5. 结论

本文以鲨鱼皮表面为仿生原型设计鲨鱼盾鳞结构,并设计三种不同沟槽形状,通过数值模拟方法探究不同沟槽形状对微结构表面减阻效果的影响。结果表明:不同沟槽形状的微结构表面均具有一定的减阻效果,其中矩形结构表面的减阻效果最好,速度为1 m/s 时减阻率最高可达到18.44%。微结构的存在能够有效地减小表面所受的壁面剪切力,减缓近壁区边界层速度梯度变化,改善近壁区流体的流动情况,减少了能量涡旋,因此具有一定的减阻性能。

参考文献

- [1] 秦立果, 龚朝永, 孙红江, 等. 非光滑表面减阻研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 107-122.
- [2] Chen, L., Duan, Y., Cui, M., et al. (2021) Biomimetic Surface Coatings for Marine Antifouling: Natural Antifoulants, Synthetic Polymers and Surface Microtopography. Science of the Total Environment, 766, Article ID: 144469. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144469
- [3] Jin, H. (2022) Bioinspired Marine Antifouling Coatings: Status, Prospects, and Future. *Progress in Materials Science*, **124**, Article ID: 100889. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100889
- [4] 王春举, 程利冬, 薛韶曦, 等. 仿生减阻微结构制造技术综述[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 88-98.
- [5] 秦立果, 孙红江, 杨浩, 等. 鲨鱼皮盾鳞结构减阻性能数值模拟[J]. 中国科技论文, 2019, 14(12): 1271-1277.
- [6] 张璇, 白秀琴, 袁成清, 等. 防污贝壳表面纹理特征减阻效应仿真分析[J]. 中国造船, 2013, 54(4): 146-154.
- [7] 汪志远, 马建敏. 鲨鱼皮微沟槽结构减阻计算分析[J]. 力学季刊, 2017, 38(1): 160-168.
- [8] Walsh, M. (1982) Turbulent Boundary Layer Drag Reduction Using Riblets. 20th Aerospace Sciences Meeting, Orlando, 11-14 January 1982, 169. https://doi.org/10.2514/6.1982-169
- [9] Lee, S.-J. and Lee, S.-H. (2001) Flow Field Analysis of a Turbulent Boundary Layer over a Riblet Surface. *Experiments in Fluids*, **30**, 153-166. https://doi.org/10.1007/s003480000150