

柔性表面微结构减阻效果研究

诸敏瑛¹, 于海洋¹, 李子繁¹, 陈熙¹, 邵朱芸²

¹上海奋为船舶技术有限公司, 上海

²上海海事大学, 上海

收稿日期: 2022年8月21日; 录用日期: 2022年9月23日; 发布日期: 2022年9月30日

摘要

随着减阻研究的深入, 人们将越来越多的注意力放到了仿生减阻上。通过观察一些水生生物, 科学家们发现了垂向水流方向的沟槽结构具有一定的减阻效果, 一些研究者也通过模拟这些水生生物的表皮做了一系列的研究, 但是这些微结构在哪个尺度具有最好的减阻性能、微型沟槽的高宽比对减阻效果的影响还没有确切研究, 同时目前的研究都以刚性结构为基础, 忽略了微结构材料对减阻效果的影响。为解决以上问题, 本文利用有限元软件, 对不同尺度、不同高宽比的沟槽以及柔性沟槽的减阻效果进行研究。通过研究发现, 微型沟槽在5微米尺度的减阻效果最佳, 可以达到15%; 沟槽的高宽比在大于1.2时减阻效果最佳, 可以达到15%左右; 柔性沟槽在低速流中的减阻效果比较明显, 其中在1 m/s的流速下可以达到12.38%。

关键词

减阻, 仿生, 数值模拟

Research on Drag Reduction Effect of Flexible Surface Structure

Minying Zhu¹, Haiyang Yu¹, Zifan Li¹, Xi Chen¹, Zhuyun Shao²

¹Shanghai FORVER Marine Technology Co. Ltd., Shanghai

²Shanghai Maritime University, Shanghai

Received: Aug. 21st, 2022; accepted: Sep. 23rd, 2022; published: Sep. 30th, 2022

Abstract

With the deepening of the research on drag reduction, people are paying more and more attention to bionic drag reduction. By observing some aquatic organisms, scientists have found that the trench structure that hangs in the direction of water flow has a certain resistance reduction effect. Some researchers have also done a series of studies by simulating the epidermis of these aquatic

organisms. However, the scale at which these micro fabrics have the best drag reduction performance, and the effect of the aspect ratio of the micro groove on the drag reduction effect has not been accurately studied. At the same time, the current research is based on rigid structure, ignoring the influence of micro woven materials on the drag reduction effect. In order to solve the above problems, this paper uses finite element software to study of trenches and flexible trenches at different scales and different aspect ratios. Through the study, it was found that the micro groove had the best resistance reduction effect at the 5 micron scale, which can reach 15%. The aspect ratio of the groove is the best resistance reduction when it is greater than 1.2, and can reach about 15%. The drag reduction effect of flexible grooves in low-speed flow is more obvious, which can reach 12.38% at a flow rate of 1 m/s.

Keywords

Drag Reduction, Bionics, Numerical Simulation

Copyright © 2022 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

随着绿色船舶、节能减排等概念得到越来越多人的关注，人们将注意力转到了减少船舶或者水下航行器的能源消耗上。船舶、水下航行器的主要阻力就是表面和水之间的摩擦阻力，减小阻力不仅可以减少能源消耗以提高航程，还可以在在一定程度上提高航行体的航速。

早在上世纪 80 年代，俄罗斯科学家 Reif [1]就发现鲨鱼皮表面有沿水流方向的特殊脊状结构，NASA 的 Walsh 教授[2] [3]将脊状结构简化为 V 形肋条结构，并通过试验发现肋条结构减阻率可达到 8%。中国的徐琰[4]通过数值模拟分析了不同肋条形状对减阻效果的影响。

中国的胡海豹[5]研究团队发现垂直于水流的沟槽结构也具有减阻效果，并提出沟槽内的“滚动轴承”模型；邬立岩团队观察草鱼鳞片发现表面有垂直于水流方向的月牙型凹槽；温健[6]研究了大鳞副泥鳅(*P. dabryanus*)表面沟槽进行柔性沟槽的流固耦合数值仿真，但是其模型忽略了凹槽的展向长度远大于其沟槽尺寸。

除此之外，因为现实情况中流体介质的属性会有不同(海水、淡水、石油等)，导致接触面表面的雷诺数不同，从而沟槽的尺度也会有所不同。比如 Toms 发现在流体中添加高分子量添加剂可以大幅度减少阻力(Toms 效应)。J. S. Chung 利用激光风速计测量研究了稀聚环氧乙烷和聚丙烯酰胺溶液管流的湍流结构，得出聚合物添加剂可使层流到湍流的过渡有一定的延迟，从而达到减阻效果。由于不同流质对壁面结构要求不同，所以本文采用水作为流质进行初步研究。

通过前人的研究发现，垂向水流的沟槽尺寸基本在 1~50 微米。但是对于相同沟槽形状在哪个尺度具有最佳减阻效果没有确切的研究，而且对于沟槽的不同高宽比对减阻效果的影响也缺少研究。本文将对沟槽的尺度和沟槽的不同高宽比进行研究，并结合实际鱼鳞的材料属性对柔性沟槽表面的减阻特性进行研究。此研究对于较少航行器的阻力有巨大意义，可以提高航行器的性能和续航。

2. 流体模型的选择

一般认为在直径为 d 的管道中，若雷诺数 $Re < 2300$ 时流动为层流，若 $Re > 2300$ 流体扰动会增加而转变成湍流。经过计算可以发现本文的模型都适用湍流模型，本文选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。该方程与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比，多考虑了旋流情况，采用时均应变率修正了湍动粘度，提高计算精度。因此该模型

可以更好的模拟高应变率及流线弯曲程度较大的流动。

湍流动能 k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial t} \left[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

湍流耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (2)$$

式中: k 为湍动能, ε 为湍流耗散系数, t 是时间, u_i 是湍流运动粘性系数, G_k 和 G_b 分别是由平均速度梯度和浮力产生的湍流动能, Y_M 为扩散波动, α_ε 和 α_k 分别是湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的有效普朗特数的倒数。

3. 针对微结构尺度的研究

本文将利用脊宽 1 微米, 脊高 1.2 微米的脊状沟槽作为基准, 记尺度比为 1, 利用 ANSYS Fluent 中的 scale 工具进行等比缩放, 研究不同尺度下 V 形沟槽表面在 1 m/s 的水流中的减阻效果。

3.1. 二维模型建立及网格划分

在尺度分析过程中, 利用二维模型就可以满足要求且节省计算资源。微结构尺度的模型见图 1 和图 2, 在建立基础模型时, 定义脊高(h)为 1.2 微米, 脊宽(w)为 1 微米。一般认为脊状表面流场的粘性影响区域主要集中在 10 倍脊高以内。故计算区域高度(H)至少大于 12 微米, 在此模型中 H 取 20 微米, 这样可以尽可能减少上下壁面的相互干扰, 计算域总长 L 为 40 微米。

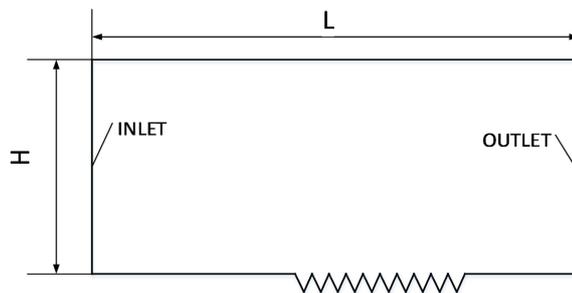


Figure 1. Diagram of the micro textures scale model

图 1. 微结构尺度模型图

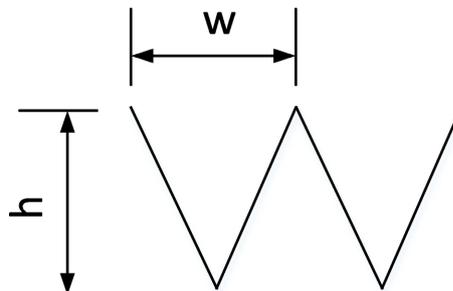


Figure 2. Definition of the gap

图 2. 沟槽定义

3.2. 有限元计算结果

设定左边界为入口，速度为 1 m/s，流质为水，右边界为压力出口，尺度为 1、5、10、20、30、50 的沟槽表面流速。

通过数值模拟我们发现沟槽的存在使水形成了涡旋，也就是“滚动轴承”的现象，这种涡旋的存在大大减少了水和壁面的粘性摩擦阻力。计算完不同尺度沟槽后在后处理的报告中提取阻力，与相同情况下的刚性板阻力进行比较，具体数值模拟数据见表 1。

Table 1. Numerical simulation of data

表 1. 数值模拟数据

尺度比	沟槽表面阻力 (N)	刚性板表面 (N)	减阻率 (%)
0.5	0.006544248	0.007652879	14.49
1	0.006592459	0.007720185	14.61
2.5	0.007023472	0.008251857	14.89
4	0.007471494	0.008789114	14.97
5	0.007776013	0.009145547	14.99
7	0.008349145	0.009784189	14.67
10	0.009221222	0.010702149	13.84
15	0.010667575	0.012122441	12.00
20	0.012111716	0.013466036	10.06
25	0.01349531	0.014644466	7.85
30	0.014934623	0.015858831	5.833
35	0.01626361	0.016962462	4.12
40	0.017624094	0.018069714	2.47
45	0.018950435	0.019106524	0.82
50	0.020173763	0.020053897	-0.60

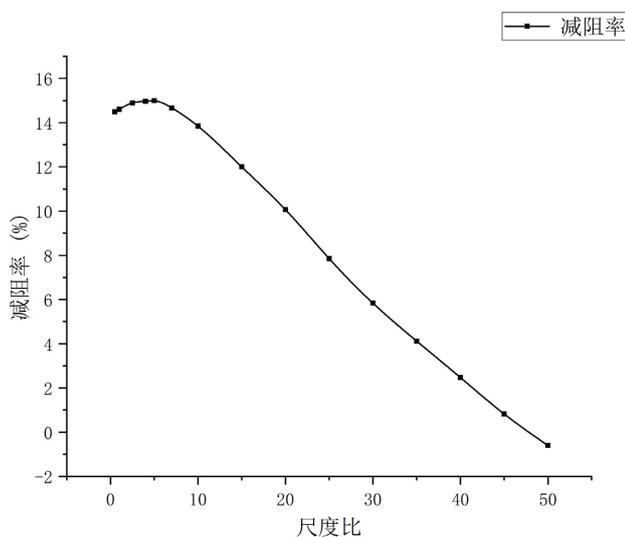


Figure 3. The effect on drag reduction about scale

图 3. 尺度比对减阻的影响

将表 1 的数据进行整理, 见图 3 可得, 微织构尺寸在大于 50 微米之后就不在具有减阻效果, 在小于 20 微米时, 减阻效果可以达到 10% 以上, 其中尺度为 5 的减阻效果最佳, 即脊宽为 5 微米, 脊梁高为 6 微米, 可以达到 14.99%。

3.3. V 形沟槽的高宽比对减阻效果的影响

经过上面的研究, 我们得出微织构尺度在 0~10 微米都具有较好的减阻效果, 通过观察 V 形沟槽的特征, 认为脊高和脊宽的比例(η)也会对减阻效果产生影响。

$$\eta = \frac{h}{w} \quad (3)$$

分别分析高宽比 0.6~2.0 的沟槽表面减阻效果。数值模拟结果见表 2。

Table 2. Numerical simulation of data

表 2. 数值模拟数据

高宽比 (η)	沟槽表面阻力 (N)	刚性板表面 (N)	减阻率 (%)
0.6	0.008206836	0.009031378	9.13
0.8	0.008031907	0.009010686	10.86
1.0	0.00784727	0.009148067	14.22
1.2	0.007776013	0.009145547	14.97
1.3	0.007786124	0.009158737	14.99
1.4	0.007784672	0.009153918	14.96
1.6	0.007781182	0.009158843	15.04
1.8	0.007781009	0.00912956	14.77
2.0	0.007780045	0.009159296	15.06

通过分析表 2 数据可得, 高宽比在大于 1.0 的情况下减阻效果比较好, 通过观察流速图可以发现在高宽比在大于 1.2 之后沟槽底部越来越尖, 但是对“滚动轴承”区域影响不大, “困水”区形状基本稳定, 所以减阻效果也基本稳定在 15% 左右。

4. 柔性 V 形沟槽表面减阻

通过以上数据, 我们大致可以确定什么样的沟槽形状的减阻效果比较好, 但是上述的模拟都采用了刚性结构, 而现实生活中生物表面不会是刚性结构, 而是柔性的, 所以本文进一步对柔性的 V 形沟槽的减阻效果进行研究, 利用 Ansys 中的流固耦合模块, 对脊高 6 微米, 脊宽 5 微米的柔性沟槽进行研究。

4.1. 流固耦合模型的建立

流固耦合模型见图 4, 与上述二维模型建立类似, 尽量避免壁面的相互影响。设置 $H = 60 \mu\text{m}$, $e = 7 \mu\text{m}$, $B = 20 \mu\text{m}$, $L = 80 \mu\text{m}$ 。流体区域设置为水, 固体的沟槽部分参考温健的研究, 采用杨氏模量为 7.03 MPa, 密度为 1000 Kg/m^3 的柔性材料。

4.2. 流固耦合模拟结果

在水流的作用下, 柔性沟槽发生形变, 柔性沟槽在流固耦合情况下的变形和应力云图, 见图 5 和图 6。最大变形为 $5.0\text{e-}6 \text{ mm}$, 最大应力为 $4.3\text{e-}3 \text{ MPa}$, 均出现在沟槽顶部。

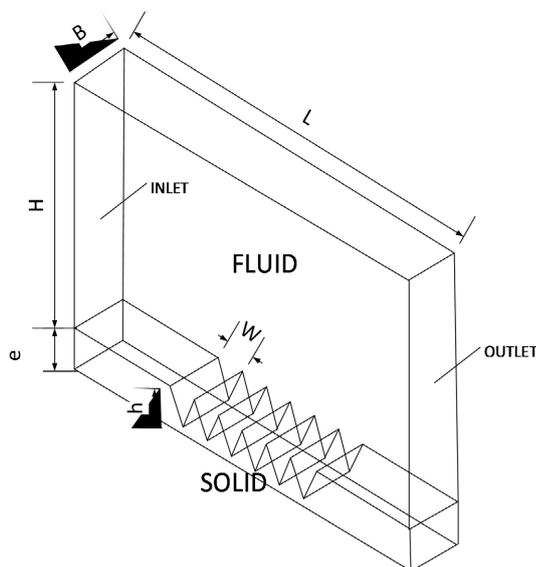


Figure 4. Diagram of the fluid-solid coupled model

图 4. 流固耦合模型图

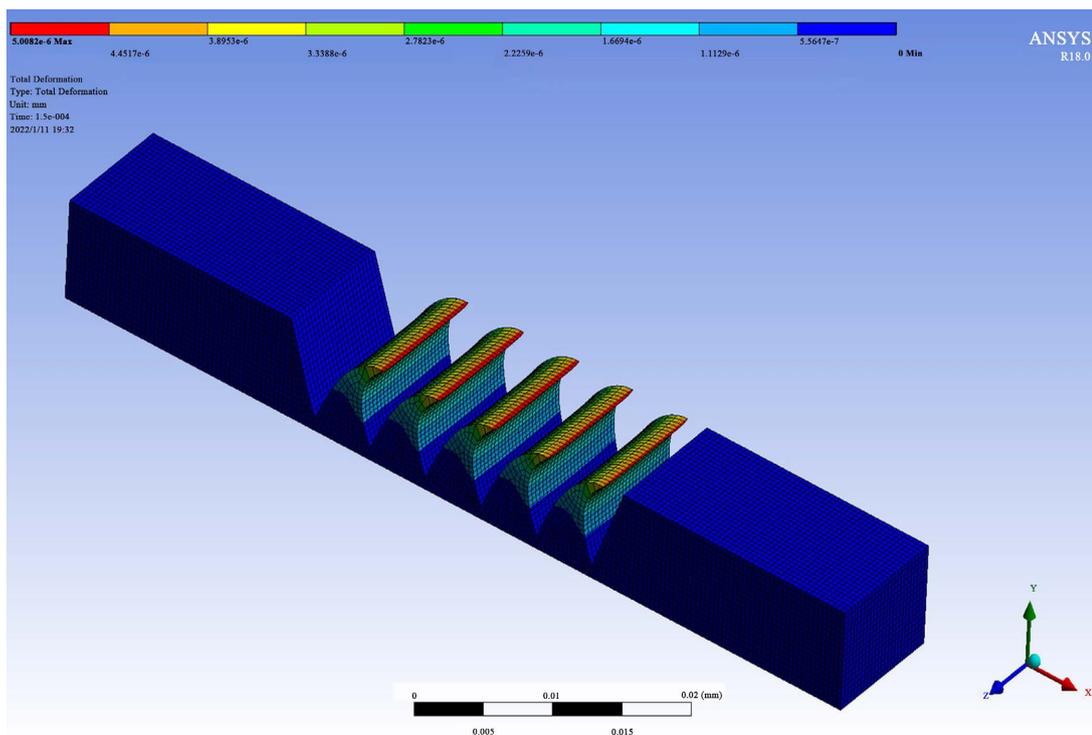


Figure 5. Deformation of flexible gap

图 5. 柔性沟槽的变形图

在后处理中提取阻力，与刚性平板的阻力进行比较，具体数据见表 3：

由于柔性沟槽的存在，大大减少了平板表面的粘性阻力，可达到减阻的目的。但是随着流速的逐渐增加，压差阻力的影响越来越大，导致减阻柔性沟槽表面阻力增加，减阻效果也不断减弱。可以发现在低速情况(1 m/s)，柔性沟槽的减阻效果可以达到 12.38%。

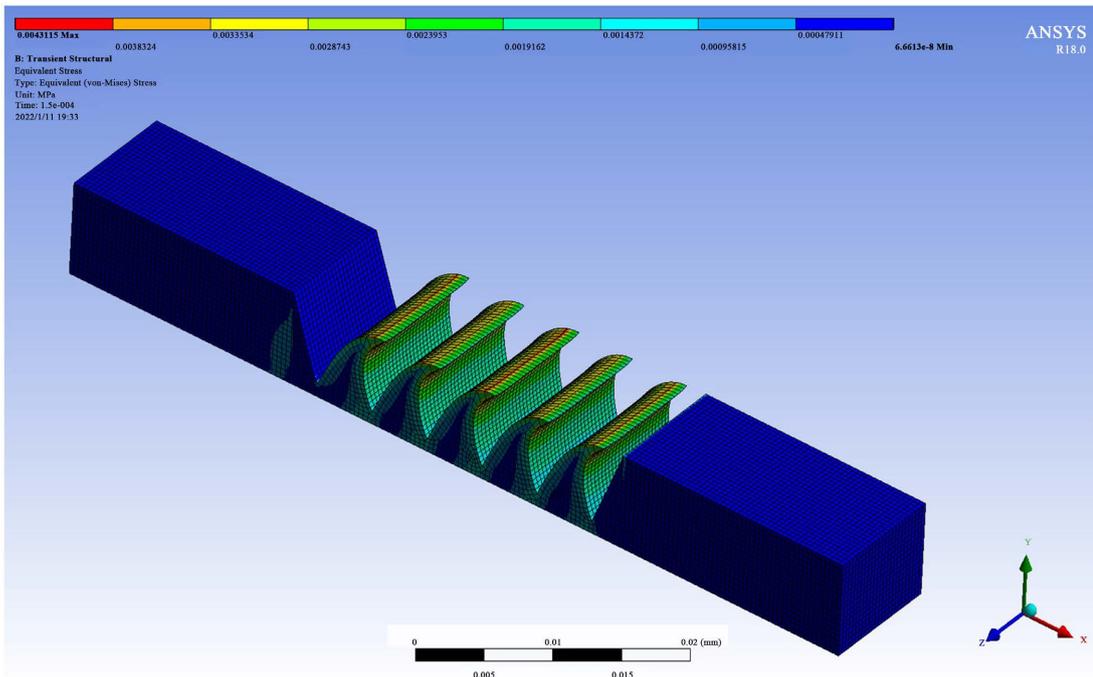


Figure 6. Mises of flexible gap
图 6. 柔性沟槽的应力云图

Table 3. Surface resistance of gap
表 3. 沟槽表面阻力

流速 (m/s)	压差阻力 (N)	粘性摩擦阻力 (N)	总阻力 (N)
1	4.48E-08	1.37E-09	4.62E-08
2	1.05E-07	3.47E-09	1.09E-07
3	1.82E-07	6.90E-09	1.89E-07
4	2.82E-07	1.12E-08	2.93E-07
5	3.84E-07	1.73E-08	4.01E-07
6	4.96E-07	2.48E-08	5.21E-07

5. 结论

本文通过数值仿真，模拟不同尺度、不同高宽比的 V 型沟槽的减阻性能，得出在尺度为 5 μm，高宽比大于 1.2 时减阻效果最佳，在流速为 1 m/s 时普遍可以达到 15% 的减阻效果。同时结合实际分析柔性沟槽表面的减阻效果，得出柔性 V 型沟槽在低速状态下具有良好的减阻性能的结论，在 1 m/s 的流速下减阻率最大，达到 12.38%。

利用仿生减阻的概念，目前已证明垂向水流方向的沟槽结构具有一定的减阻效果。以刚性材料为基础的情况下，进一步考虑了微织构材料对减阻效果的影响。对于提高小尺寸的航行器在低航速下的续航里程和待机时间提供了一定的参考意见。

参考文献

[1] Reif, W. and Dinkelacker, A. (1982) Hydrodynamics of the Squamation in Fast Swimming Sharks. *Neues Jahrbuch für*

Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, **164**, 184-187. <https://doi.org/10.1127/njgpa/164/1982/184>

- [2] Walsh, M.J. and Lindemann, A.M. (1984) Optimization and Application of Riblets for Turbulent Drag Reduction. *22nd Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, 347. <https://doi.org/10.2514/6.1984-347>
- [3] Walsh, M.J. (1983) Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique. *AIAA Journal*, **21**, 485-486. <https://doi.org/10.2514/3.60126>
- [4] 徐琰, 张臣, 汪子轩. 局部近似平面 V 型沟槽减阻特性数值模拟研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(15): 14.
- [5] 胡海豹, 宋保维, 潘光, 等. 鲨鱼沟槽表皮减阻机理的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(21): 4901-4903.
- [6] 温健. 大鳞副泥鳅(*P. dabryanus*)体表柔性微形貌减阻特性仿生研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.