

基于表面 V 形沟槽的圆柱减阻性能研究

江兴隆, 欧阳凌浩, 李 超

(中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘 要 为了研究沟槽圆柱在亚临界雷诺数下的阻力特性, 采用数值模拟与水槽试验相结合的方法, 对沟槽圆柱的减阻性能进行研究。开展三维流场数值模拟, 确定最佳仿真模型参数, 研究沟槽参数、雷诺数以及迎流角对减阻效果的影响, 设计了一种减小端面绕流干扰的水槽试验, 验证仿真结果。结果表明: 在雷诺数为 40 000 时, 沟槽深度为 $0.0075D$ (D 为圆柱直径)、沟槽宽度为 $0.065D$ 、沟槽数量为 36; V 形沟槽圆柱迎流角为 $60^\circ \sim 90^\circ$, 最大减阻率为 24%, 具有良好的减阻效果, 对今后沟槽缆的设计使用具有一定的参考价值。

关键词 沟槽圆柱; 数值模拟; 水槽试验; 减阻效果

中图分类号 O351.2

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)02-0137-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.02.008

Research on Drag Reduction Performance of Cylinder Based on Surface V-Shaped Groove

JIANG Xinglong, OUYANG Linghao, LI Chao

(No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China)

Abstract In order to study the drag characteristics of grooved cylinder at subcritical Reynolds number, the drag reduction performance of grooved cylinder is studied by combining numerical simulation with flume test. Three-dimensional numerical simulation of flow field is carried out to determine the optimal simulation parameters. The influence of groove parameters, Reynolds number and angle of attack on the drag reduction are studied. A flume test is designed to reduce the interference of flow around the end face, which verifies the simulation results. The results show that when the Reynolds number is 40 000, the optimal groove parameters are as follows: groove depth $0.0075D$, groove width $0.065D$, groove number 36. When the angle of attack of V-shaped groove cylinder is $60^\circ \sim 90^\circ$, the maximum drag reduction rate can reach 24%, which has a good drag reduction effect. It provides certain reference value for the design and use of the groove cable.

Key words grooved cylinder; numerical simulation; flume test; drag reduction effect

0 引言

水下拖曳系统是进行海洋探测的重要手段, 广泛应用于海洋环境监测、资源勘探、军事等众多领域。进行大深度拖曳时, 水下拖曳系统的阻力主要由拖缆产生^[1]。拖缆的阻力过大, 导致定深变差, 影响拖曳系统的工作性能。拖缆在水中的运动, 可

看为多段不同迎流角圆柱的运动, 所以拖缆的减阻可看作多段圆柱的减阻, 本文采用表面沟槽的减阻方式来减小圆柱阻力。

Walsh 等人^[2]最先开展沟槽减阻性能的研究, 并发现对称的 V 型条纹沟槽表面在湍流条件下可减阻 8%。Bechert 和 Brused^[3]测试了多种形状的沟槽条纹, V 型沟槽减阻效果可达 10%。Lim^[4]通过

收稿日期: 2021-11-01

作者简介: 江兴隆 (1993-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事水下拖曳系统设计和流体仿真计算研究。

项目基金: 装备预研船舶重工联合基金“大深度拖曳减阻技术研究”(6141B04060801)。

在圆柱体上横向布置 O 形圈, 对圆柱绕流进行控制, 最大有 9% 的减阻效果。Quintavalla S J^[5]发现低深径比沟槽可以显著降低绕流阻力, 且所有沟槽占总圆柱截面积比值会影响临界雷诺数。Huang S^[6]在拖曳水池测量了矩形沟槽圆柱的绕流升阻力。王洋浩^[7]设计了一种波状圆柱, 其脉动升阻力系数减小, 并通过实验得到最大减阻效果为 20%。廖崇吉^[8]进行了沟槽圆柱体的数值仿真计算, 在雷诺数 $Re=40\ 000$ 时, 最大减阻率为 16.3%。钱权^[9]开展了 V 型沟槽圆柱绕流数值模拟研究, 最大减阻率可达 28.4%。齐野含^[10]发现沟槽圆柱能够抑制表面旋涡的影响区域范围, 提高旋涡的流向尺度, 并通过水槽试验验证了仿真结果。

目前, 国内外关于沟槽减阻研究已经有很多, 但很少对有一定倾斜角的沟槽圆柱进行研究, 表面沟槽对拖缆的减阻也还未形成系统的研究。本文对 V 形沟槽圆柱的减阻研究, 讨论了沟槽参数、雷诺数及迎流角对减阻性能的影响, 对今后沟槽缆的实际设计使用具有一定的参考价值。

1 V 形沟槽圆柱模型

1.1 几何模型

圆柱直径 $D=20\text{ mm}$, V 形沟槽沿圆柱的周向均匀分布。沟槽的尺寸主要由 3 个参数确定, 分别为沟槽深度 h 、沟槽宽度 s 、沟槽数量 n , 得到如图 1 所示的模型示意图。

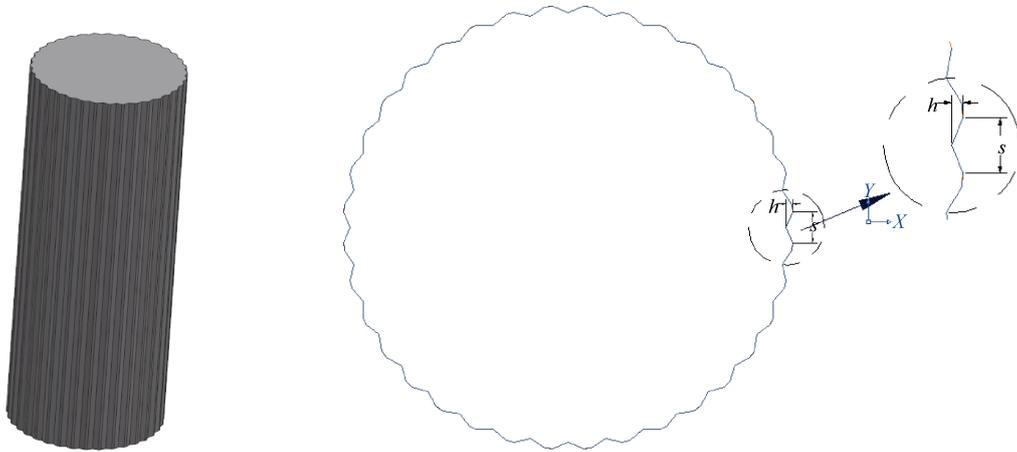


图 1 沟槽圆柱模型图

Fig. 1 Model diagram of groove cylinder

1.2 沟槽深度尺寸确定

Walsh 等人^[1]对沟槽平板的减阻性能研究可知: 无量纲沟槽深度 $h^+ \leq 25$ 时, 沟槽具有很好的减阻效果, 本文借鉴该研究成果进行沟槽圆柱的参数设计。

无量纲沟槽深度:

$$h^+ = \frac{hu_\tau}{\nu} \quad (1)$$

壁面剪切速度:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (2)$$

壁面剪切应力:

$$\tau_\omega = 0.0225\rho U_\infty^2 \left(\frac{U_\infty \delta}{\nu} \right)^{-0.25} \quad (3)$$

边界层厚度:

$$\delta(x) = 0.37xRe_x^{-0.2} \quad (4)$$

由式 (3) 和 (4) 代入式 (2), 得:

$$u_\tau = 0.172U_\infty Re_x^{-0.1} \quad (5)$$

从而得到无量纲沟槽深度为

$$h^+ = 0.172 \frac{hU_\infty Re_x^{-0.1}}{\nu} \quad (6)$$

$$Re_x = \frac{U_\infty x}{\nu} \quad (7)$$

式中: h 为沟槽深度; U_∞ 为来流速度; ν 为运动粘性系数。

来流速度为 2 m/s、 h^+ 取为 25 时, 通过式 (6) 计算得到沟槽深度 $h=0.21\text{ mm}$, 即 $h \approx 0.01D$, 后续

进行数值模拟时, 沟槽深度在 $0.01D$ 附近选取。

2 网格无关性分析

获得适合沟槽圆柱的仿真模型, 确定影响仿真模拟的重要参数, 使计算结果准确。在雷诺数 $Re=40\ 000$ 、圆柱直径 $D=20\ \text{mm}$ 时, 采用光滑圆柱进行仿真计算。

在保证流场不受边界尺寸影响的前提下, 选择计算域 $20D \times 10D$, 前后边界面距离圆心 $5D$, 上游边界面距离圆心 $5D$, 下游边界面距离圆心 $15D$, 如图 2 所示。

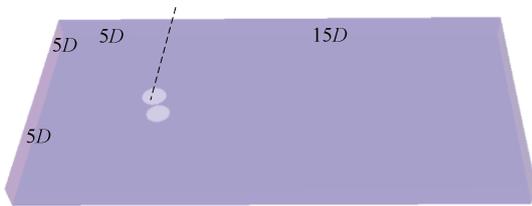


图 2 计算域
Fig. 2 Computing domain

采用多面体网格进行全局的网格划分, 该网格可很好地在小尺寸沟槽圆柱表面划分规则网格。在仿真计算中, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型, 该模型算法稳定性好, 可很好地模拟精细化局部流场, 对物体近壁区的流场有很好的计算精度。该模型要求圆柱壁面到最近的网格节点高度的无量纲数 $y^+ \approx 1$, 当来流速度为 $2\ \text{m/s}$ 时, 计算得出第 1 层边界层的高度为 $0.008\ 5\ \text{mm}$ 。

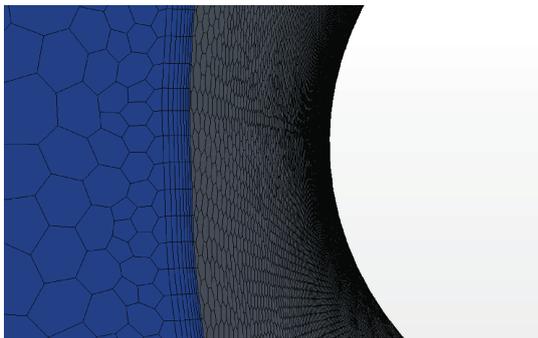


图 3 计算域局部网格划分
Fig. 3 Computing domain local meshing

分别选取 3 种网格基准值 $0.018\ \text{m}$ 、 $0.015\ \text{m}$ 、 $0.012\ \text{m}$, 测得平均阻力值如表 1 所示。

表 1 不同网格尺寸比较表
Table 1 Comparison table under different mesh sizes

网格基准值/m	网格数/万	阻力/N	C_d	实验值 ^[11]	误差/%
0.018	94	0.93	1.16	1.18	-1.70
0.015	147	0.95	1.19	1.18	0.85
0.012	267	0.96	1.20	1.18	1.70

从表中可看出, 网格基准值为 $0.015\ \text{m}$ 、网格数目为 147 万时, 阻力系数为 1.19, 与 Norberg C 的试验结果误差最小, 网格基准值选为 $0.015\ \text{m}$ 。

3 数值模拟结果分析

第 2 章节得到了仿真模型的重要参数, 即圆柱展长为 D , 网格基准值为 $0.015\ \text{m}$, 用于 V 形沟槽圆柱的数值模拟。

3.1 雷诺数 Re

迎流角 $\theta=90^\circ$, 雷诺数 Re 分别为 $20\ 000$ 、 $30\ 000$ 、 $40\ 000$ 、 $50\ 000$ 时, 模拟光滑圆柱和 V 型沟槽圆柱的平均阻力系数, 得到如图 4 所示的变化曲线。

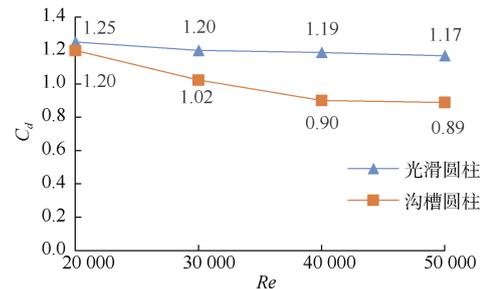


图 4 不同雷诺数下升阻力系数的变化曲线
Fig. 4 Variation curves of drag coefficient under different Reynolds numbers

图 4 中, 随雷诺数的增加, 光滑圆柱的阻力系数变化不明显, 阻力系数约为 1.2。V 型沟槽圆柱的升阻力系数随雷诺数的增加而呈现减小趋势, 当雷诺数 $Re > 40\ 000$ 后, 升阻力系数的变化较缓, 具有很好的减阻效果。

3.2 沟槽参数

在雷诺数 $Re=40\ 000$ 、迎流角 $\theta=90^\circ$ 时, 分别研究沟槽深度 h 、沟槽宽度 s 、和沟槽数量 n 对减阻效果的影响。

3.2.1 沟槽深度

分别仿真计算沟槽深度 h 为 $0.005D$ 、 $0.007\ 5D$ 、 $0.01D$ 、 $0.012\ 5D$ 、 $0.015D$ 时, 稳定时间段内 V 型

沟槽圆柱的平均阻力系数，如图 5 所示。

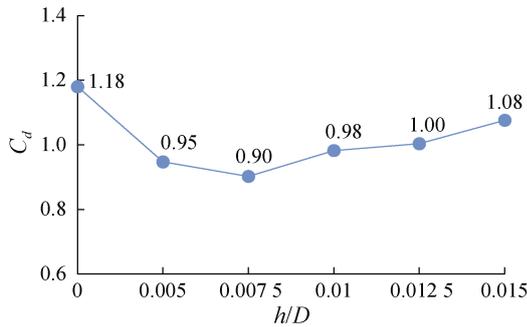


图 5 不同沟槽深度下阻力系数变化曲线
Fig. 5 Variation curves of drag coefficient under different groove depths

由图 5 看出，5 种沟槽深度下的阻力系数均小于光滑圆柱，说明选取的沟槽深度都具有一定的减阻效果。当沟槽深度大于 0.0075D 时，随 h 的增加，阻力系数变大；当沟槽深度小于 0.0075D 时，随 h 的增加，阻力系数变小。可知，当 $h=0.0075D$ 时，沟槽圆柱具有最佳的减阻效果。

3.2.2 沟槽宽度

沟槽宽度 s 分别为 0.055D、0.06D、0.065D、0.07D、0.075D 时，计算稳定时间段内 V 型沟槽圆柱的平均阻力系数，如图 6 所示。

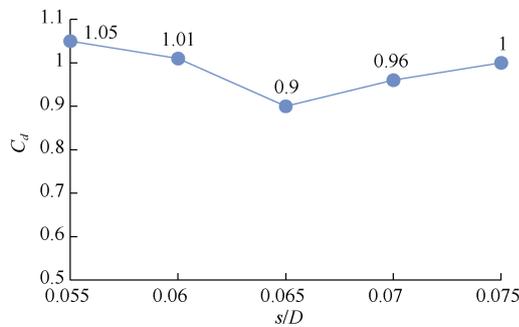


图 6 不同沟槽宽度下阻力系数变化曲线
Fig. 6 Variation curves of drag coefficient under different groove widths

如图 6 所示，5 种沟槽宽度的阻力系数均小于 1.19，具有一定的减阻效果。当沟槽宽度 s 大于 0.065D 时，随 s 的增大，阻力系数变大，从图中趋势可判断， s 增大到一定值后，可能会起到增阻效果；沟槽宽度 s 小于 0.065D 时，随 s 的减小，阻力系数变大，光滑圆柱即 $s=0$ ，不再具有减阻效果。当 $s=0.065D$ 时，阻力系数最小，减阻效果最佳。

3.2.3 沟槽数量

沟槽数量 n 分别为 24、30、36、40 时，计算稳定时间段内 V 型沟槽圆柱的平均阻力系数，如图 7 所示。

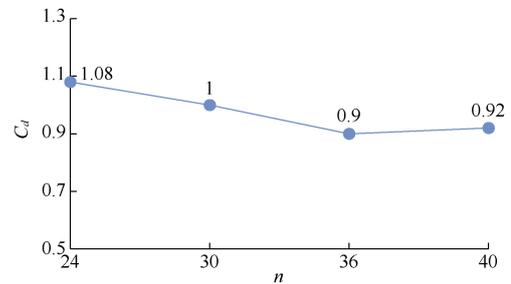
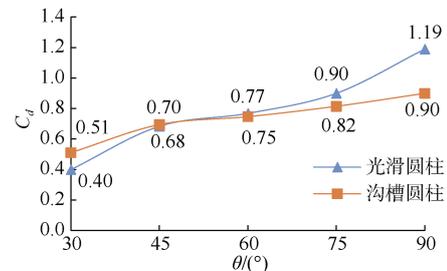


图 7 不同沟槽数量下阻力系数变化曲线
Fig. 7 Variation curves of drag coefficient under different groove numbers

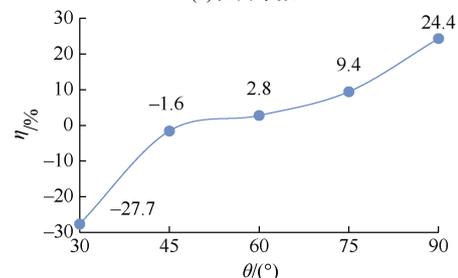
图 7 中，沟槽数量 n 小于 36 时，随着数量 n 的减小，阻力系数变大；沟槽数量 n 大于 36 时，阻力系数略微增加。当 $n=36$ 时，阻力系数最小，减阻效果最佳。

3.3 迎流角

在迎流角 θ 分别为 90°、75°、60°、45°和 30°条件下，数值模拟计算光滑圆柱和 V 型沟槽圆柱的时均阻力系数，得到 5 种迎流角下的阻力系数 C_d 和减阻率 η 的变化曲线，如图 8 所示。



(a) 阻力系数



(b) 减阻比

图 8 不同迎流角下减阻性能变化曲线
Fig. 8 Variation curves of drag reduction performance at different attack angles

图 8 中, 2 种圆柱的阻力系数 C_d 随迎流角 θ 的增加而增大。迎流角 θ 大于 45° 时, 光滑圆柱的阻力系数大于沟槽圆柱, 沟槽结果产生减阻效果; 迎流角 θ 小于 45° 时, 光滑圆柱的阻力系数小于沟槽圆柱, 沟槽结构增阻, 随 θ 的减小, 增阻效果越明显。 $\theta=90^\circ$ 时, 减阻效果最好, 减阻率达 24%。

4 水槽试验结果分析

4.1 试验件

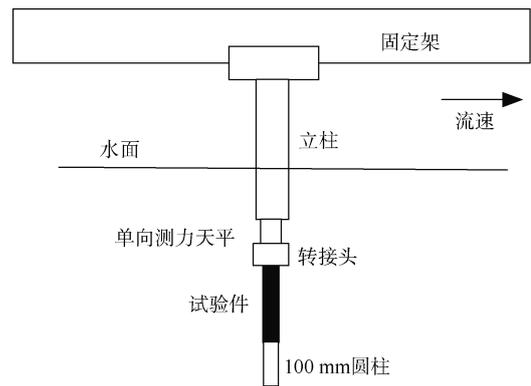
本次试验在哈尔滨工程大学的水槽实验室进行。由于试验的测力天平的测量量程影响, 为尽量减小测量误差, 试验件的长度取为 200 mm。如图 9 所示, 沟槽数量分别为 36 个、30 个、24 个的 V 形沟槽圆柱, 长度为 100 mm、200 mm 的光滑圆柱, 圆柱前端为 M8 的螺纹, 后端为 M8 的螺纹孔。长度 100 mm 的光滑圆柱, 与试验件的后端部相连, 用于减弱圆柱端部绕流阻力的干扰。



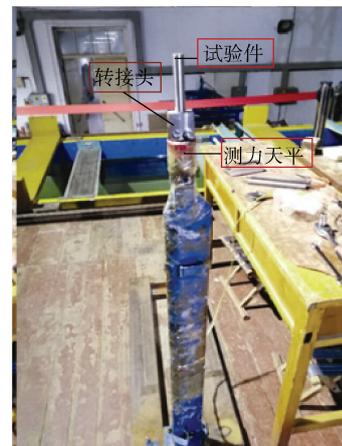
图 9 加工零件示意图
Fig. 9 Schematic diagram of machined parts

4.2 试验方案设计

首先, 为消除水下圆柱底端绕流影响, 测出 1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 流速下 100 mm 圆柱在水下的受力情况。其次, 在 200 mm 光滑圆柱和 3 种不同沟槽圆柱下端连接 100 mm 圆柱, 测量 1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 流速下的阻力值。最后, 第 2 次测得的阻力值减去第 1 次的阻力值, 得到光滑圆柱和沟槽圆柱的真实阻力值。图 10 为安装示意图。



(a) 安装图



(b) 现场安装图

图 10 试验装置的安装图

Fig. 10 Installation diagram of test equipment

4.3 试验数据分析

试验得到了光滑圆柱和 3 种沟槽数量圆柱的真实阻力, 计算得到 V 形沟槽圆柱的平均阻力系数 C_d 和减阻率 η , 如图 11 所示。

由图 11 可知: 随着雷诺数的增加, 4 种圆柱的平均阻力系数减小, 且在雷诺数为 40 000 时, 阻力系数最小。沟槽数量为 36 时, 平均阻力系数最小, 即减阻效果最好, 减阻率可达 25%; 沟槽数量为 24 时, 平均阻力系数与光滑圆柱相差不大, 且雷诺数为 30 000 时, 出现了增阻现象。

在雷诺数 $Re=40\ 000$ 时, 比较 4 种不同沟槽数量圆柱的仿真结果与试验结果, 如图 12 所示。

从图 12 可知, 在雷诺数 $Re=40\ 000$ 时, 除沟槽数量为 24 个之外, 仿真结果与试验结果非常贴近, 证明该数值模拟方法是正确的, 具有很高的可信度。

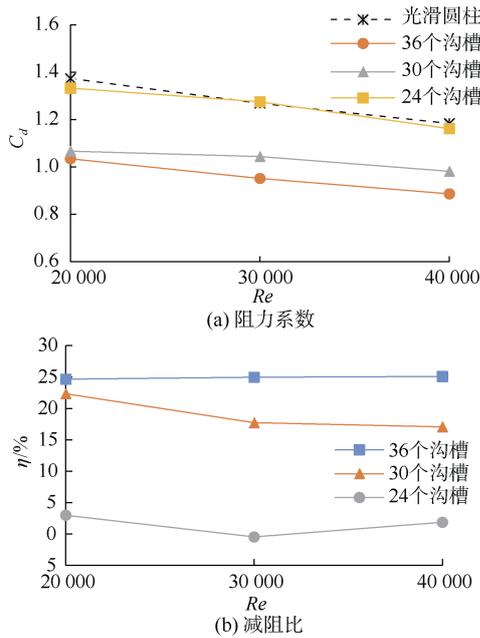


图 11 不同雷诺数下各试验件的减阻性能变化曲线
Fig. 11 Variation curves of drag reduction performance of each test article under different Reynolds numbers

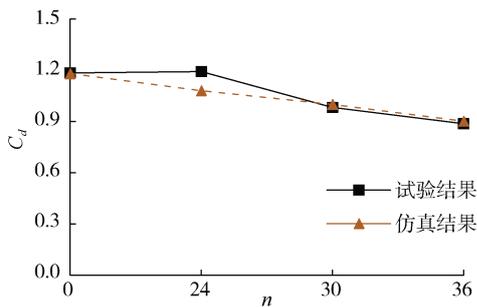


图 12 仿真结果和试验结果比较图
Fig. 12 Comparison between simulation results and test results

5 结束语

本文研究了不同仿真模型参数对计算精度的影响，以及不同沟槽参数、雷诺数和迎流角下，V形沟槽圆柱的减阻效果，并通过试验验证了仿真结果。具体结论如下：

- 1) 采用数值仿真计算的方法，对比分析升阻力系数，确定网格基准值为 0.015 m。
- 2) 对比分析了不同沟槽参数的减阻性能，得到沟槽深度 $h=0.0075D$ 、沟槽宽度 $s=0.065D$ 、沟槽数量 $n=36$ 时，V形沟槽圆柱具有最好的减阻效果。
- 3) 不同雷诺数下，光滑圆柱的阻力系数在 1.2

附近浮动，V形沟槽圆柱的阻力系数随雷诺数的增加而逐渐减小，最大减阻率为 24%。

4) 迎流角为 90° 时，V形沟槽圆柱的减阻效果最好，随迎流角的减小，减阻效果变差，迎流角 45° 不再具有减阻效果。在沟槽缆的设计使用时，V形沟槽应布置在水下迎流角为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 的位置。

5) 通过比较试验与仿真结果，发现两者结果基本吻合，说明模拟方法正确，仿真结果具有很高的可信度。

参考文献

- [1] 江兴隆, 王盟, 艾艳辉. 基于水池试验的毛发缆减阻性能研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3 (5): 402-407.
- [2] WALSH M J. Riblets viscous drag reduction in boundary layers[R]. US: NASA, 1990.
- [3] BERCHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry[J]. Journal of fluid mechanics, 1997, 33 (8): 59-87.
- [4] LIM H C, LEE S J. Flow control of a circular cylinder with O-rings[J]. Fluid Dynamics Research, 2004, 25 (1): 107-122.
- [5] QUINTAVALLA S J, ANGILELLA A. J, SMITS A J. Drag reduction on grooved cylinder in the critical Reynolds number regime[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 48 (2): 15-18.
- [6] HUANG S. VIV suppression of a two-degree-of-freedom circular cylinder and drag reduction of a fixed circular cylinder by the use of helical grooves[J]. Journal of Fluids & Structures, 2011, 27 (7): 1124-1133.
- [7] 王洋浩, 张联英, 罗昔联. 流体横掠波状圆柱的动特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 360-364.
- [8] 廖崇吉. 布有表面织构的圆柱绕流减阻性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [9] 钱权, 王国荣. 亚临界雷诺数下 V 型沟槽圆柱减阻数值模拟[J]. 海洋科学进展, 2019, 37 (1): 150-161.
- [10] 齐野含. 柱式结构表面减阻工艺参数研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [11] NORBERG C. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 17 (1): 57-96.

(责任编辑: 曹晓霖)