

## 侧喷射流参数及介质对仿生鱼表面减阻的影响

刘国勇<sup>1†</sup>, 乔俊雨<sup>1</sup>, 宋中鑫<sup>2</sup>, 朱冬梅<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083;  
2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 101400)

**摘要:**为研究射流孔结构参数和流场条件对水下射流减阻的影响,以鲣鱼为对象建立仿生鱼模型,通过模拟鲨鱼鳃部在仿生鱼模型侧面添加月牙形射流孔以建立射流模型。采用数值模拟方法,分析不同射流孔几何结构参数和不同流场条件下喷气射流模型与喷水射流模型对减阻的影响规律。在本文设定的条件范围内,当射流孔位置  $X=20$  mm, 高宽比  $k=2$ , 射流孔高度  $h=15$  mm, 速度比为 0.5, 主流场速度为 10 m/s, 得到喷水射流模型的最大减阻率为 24.64%, 喷气射流模型的最大减阻率为 10.17%, 表明喷水射流模型具备较好的减阻效果。本文通过计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真分析不同射流孔结构参数下射流介质对仿生鱼表面减阻的影响,为新型水下航行器的设计提供了依据。

**关键词:**仿生鱼;射流减阻;数值模拟;表面阻力

**中图分类号:**TB17      **文献标志码:**A

## Effects of Side Jet Parameters and Medium on Surface Drag Reduction of Bionic Fish

LIU Guoyong<sup>1†</sup>, QIAO Junyu<sup>1</sup>, SONG Zhongxin<sup>2</sup>, ZHU Dongmei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 101400, China)

**Abstract:** To investigate the effect of the jet hole structure parameters and the flow field conditions on the drag reduction of the underwater jet, a biomimetic fish model is established with bonito fish as the biomimetic object. The jet model is established by adding a crescents jet hole to the side of the biomimetic fish model by simulating shark gills. The effects of air jet model and water jet model on drag reduction under different jet hole geometry parameters and different flow field conditions are analyzed by numerical simulation. In the range of conditions set in this paper, when the jet hole position  $X=20$  mm, the aspect ratio  $k=2$ , the jet hole height  $h=15$  mm, the velocity ratio is 0.5, and the mainstream field velocity is 10 m/s, the maximum drag reduction rate of the water jet model is obtained as 24.64 %, and the maximum drag reduction rate of the jet model is 10.17 %, which shows that the water jet model has a good drag reduction effect. In this paper, the effects of jet medium on the surface drag reduction of bionic fish is also analyzed by CFD simulation, which provides a basis for the design of new underwater vehicles.

\* 收稿日期:2024-09-14

基金项目:博士后创新人才支持计划(BX20190032), Postdoctoral Innovative Talent Support Program (BX20190032); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(QLH2022-X), Fundamental Research Funds for the Central Universities (QLH2022-X)

作者简介:刘国勇(1969—),男,湖北宜城人,北京科技大学副教授,博士

† 通信联系人,E-mail:gy\_liu666@ustb.edu.cn

**Key words:** bionic fish; jet drag reduction; numerical simulation; surface drag

近年来,低碳环保和节约能源一直是人们关注的热点。在海洋行业,水下航行器常因为阻力的影响而增加能源损耗,因此研发高效减阻的水下航行器将成为海洋领域未来的研究重心。仿生减阻技术通过模拟自然界动植物的体表特征,旨在实现减阻效果。凭借其卓越的减阻性能、低廉的成本以及无污染的环保特性,该技术将在水下航行器的研发领域扮演关键角色。

射流减阻技术是仿生减阻技术的一种,它通过对鲨鱼鳃部的模拟而发展起来。鲨鱼鳃位于鲨鱼头部两侧,一般呈矩形或月牙形。在鲨鱼游动的过程中,鲨鱼鳃部会不断地喷射水流,既满足了鲨鱼游动时所需要的氧气,又通过射流改善了鳃部附近的流场,提高鲨鱼的游动速率。鲨鱼这种独特的射流结构引起了国内外研究人员的关注,并对其减阻机理进行了分析。赵华琳<sup>[1]</sup>采用仿真模拟的方法,通过在平板上添加射流孔,研究了仿生射流的减阻机理。赵刚等<sup>[2-3]</sup>在回转体上添加射流孔进行射流实验,发现仿生射流减阻在回转体上的减阻效率与模型的转速及射流孔的参数有关。李芳等<sup>[4-5]</sup>分析了多孔射流模型表面的流场特性。通过分析发现,减阻率与射流孔个数及流速比有关,流速比越大,射流孔越多,减阻率越高,最高可达约 59%。常用的射流介质除了水以外,还常用到空气,王峻等<sup>[6]</sup>研究了喷气射流对于航行器高速入水的影响。研究发现,引入喷气射流减阻可以明显降低水下航行器受到的最大砰击载荷,喷气量越大,降载效果越好。王家楣等<sup>[7]</sup>在平底型船模的不同部位安装气体喷射装置,通过对比实验分析了喷气部位、喷气量、喷气形式对模型减阻的影响,最高减阻率可达到 33%。

目前,射流减阻技术的研究主要应用于航天航空领域<sup>[8-11]</sup>。国内外学者在射流孔的结构及其排布形式方面也进行了大量研究。哈尔滨工业大学王秀蕊<sup>[12]</sup>采用数值模拟的方法分析了射流孔的结构因素和喷气速度对减阻效果的影响。结果表明,当射流孔角度为 40°,射流比为 0.3 时的猫耳形射流孔减阻效果最好。谷云庆等<sup>[13]</sup>采用数值模拟的方法分析了射流孔排布方式对表面减阻效果的影响,并通过实验验证了结果的准确性。Kodama 等<sup>[14]</sup>通过设计的循

环水槽进行了喷气射流实验,得到了最高 40% 的减阻率。Faheem 等<sup>[15]</sup>通过实验探索了交叉导线对椭圆和圆形射流孔混合流场特性的影响。Yao 等<sup>[16]</sup>研究了射流角度和射流孔的形状对于涡流结构的影响。研究发现,射流角度的减小会减弱横流在尾迹区域的捕获,与正方形射流相比,圆形和椭圆形射流的涡流结构的卷起过程有所延迟。He 等<sup>[17]</sup>研究了不同射流孔结构对柴油喷油器喷嘴中空化起始的影响,发现较大的入口圆角半径有助于抑制空化现象的发生,当喷嘴的倾斜角增加到一定程度时可以推迟空化的起始。Du 等<sup>[18]</sup>以鲨鱼鳃为研究对象,采用柔性材料模拟了鲨鱼鳃部射流孔的驱动过程,实现了仿生鳃射流孔的角度、大小和形状的主动调节功能。王林等<sup>[19]</sup>通过数值模拟系统地分析了射流孔数量、位置等对升力体减阻性能的影响。研究结果表明,随着射流孔数量的增加,整体减阻率显著提高。

目前关于仿生射流减阻技术的研究大多采用平板模型和圆柱模型,关于曲面模型的研究相对较少,海洋中的鱼类身体表面多为曲面形态,基于曲面模型的研究对于研发新型水下航行器以及提升传统航行器的性能具有至关重要的意义。关于射流减阻的研究,普遍集中在喷气射流或喷水射流中的一种,没有对比分析这两种模型减阻效果的差异。本文以鲤鱼为仿生对象建立曲面模型,结合射流减阻技术,通过 CFD 仿真分析不同射流孔结构参数下射流介质对仿生鱼表面减阻的影响,为新型水下航行器的设计提供了依据。

## 1 仿真模型及求解设置

### 1.1 仿真模型

鲤鱼是金枪鱼族中较小的一种,体长一般为 300~500 mm,身体呈纺锤形,被认为是最快的海洋鱼类之一。本文以鲤鱼为研究对象,测试速度取 1~10 m/s。由于鱼鳍主要影响鱼类的上浮下潜和转向能力,在直线运动时,鲤鱼会将鱼鳍收拢,因此为方便建模,忽略鲤鱼的鱼鳍,建立三维仿真模型如图 1 所示,模型全长 370 mm,为了适应不同条件下的水下环境,将鱼首钝化,鱼尾保持一定大小的截面。

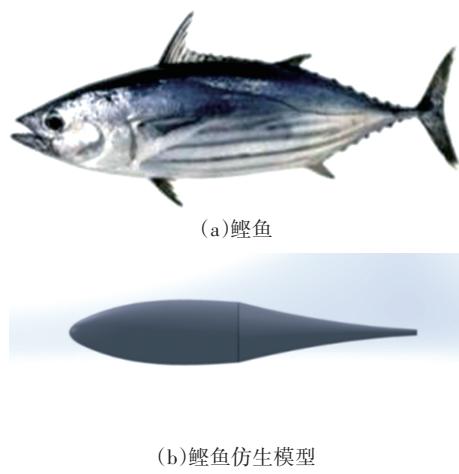


图 1 鲣鱼及仿生模型图

Fig.1 Diagram of a bonito and its bionic model

如图 2 所示,鲨鱼鳃位于鲨鱼头部两侧,一般呈月牙形。在鲨鱼游动的过程中,鲨鱼鳃部会不断喷射水流,既满足了鲨鱼游动时所需要的氧气,又通过射流改善了鳃部附近的流场,提高了鲨鱼的游动速率。为了模拟自然界中动物体表的减阻特性,基于鲣鱼模型构建了月牙形射流孔,从而赋予其高速游动的特性。建立的射流减阻模型如图 3 所示,射流方向垂直于速度来流方向。其中,  $h$  代表射流孔的高度,  $w$  代表射流孔的宽度。本节所取的射流孔高度  $h$  为 15 mm, 射流孔宽度  $w$  为 3 mm。

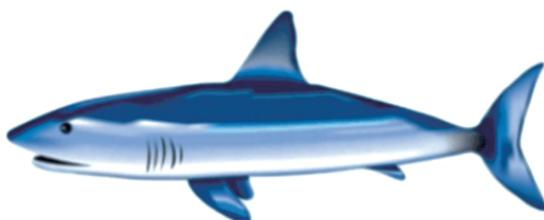


图 2 鲨鱼鳃部示意图

Fig.2 Schematic diagram of the gills of a shark

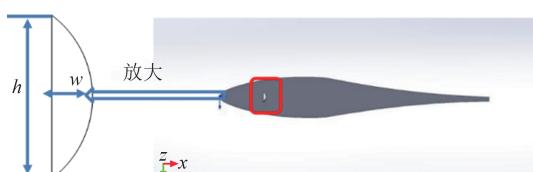


图 3 仿生射流模型

Fig.3 Bionic jet model

对高宽比进行定义:

$$k = \frac{h}{w} \quad (1)$$

本文研究的射流孔高度  $h$  为 3、5、7、10、13、15 mm, 高宽比  $k$  取 2、3、4、5、7、10, 在此基础上分析射流孔的尺寸对不同介质下的射流减阻的影响。

## 1.2 计算区域

考虑到鱼类生活的水流环境是自然界中的常态,因此选择不可压缩的液态水作为流体介质。为了方便研究,本文采用 Eulerian–Lagrangian 方法,假设仿生鱼模型是静止的,水以一定速度流向模型。

本文主要研究鲣鱼模型的表面减阻效果及周围流场的变化情况,构建了一个圆柱形计算域,设置计算域的大小为  $\phi 1\ 000\text{ mm} \times 1\ 500\text{ mm}$ 。为了提高计算效率,建立 1/2 的三维模型如图 4 所示。

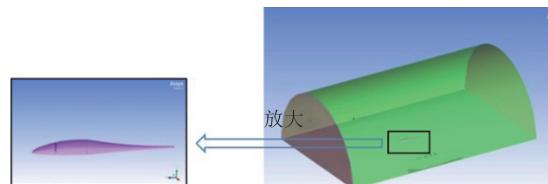


图 4 1/2 的三维计算域

Fig.4 One-half of the three-dimensional computing domain

## 1.3 边界条件

本文研究的仿生鱼表面阻力与气液混合的环境有关,需要考虑水的体积分数和空气的体积分数,因此选择适合不同相混合情况的 Mixture 多相流模型作为仿真的基础。采用标准  $k-\omega$  模型进行湍流模拟,它结合了  $k-\varepsilon$  模型和  $k-\omega$  模型的优点,可以精准地预测到边界层中的湍流行为,且具备计算速度快、计算准确等特点。流场入口为速度入口(velocity-inlet),水力直径设置为 1 m;出口为压力出口(pressure-outlet),压力出口的表压(gauge pressure)默认为 0。流场外边界、仿生鱼表面以及旋转壁面设置为无滑移壁面边界条件(boundary condition)。流场入口和出口的湍流黏度比(turbulent viscosity ratio)设置为默认的 5%,其余参数保持默认设置。本文采用的是 1/2 的三维模型,因此将模型的下边界表面设置为对称边界(symmetry)。

## 1.4 网格划分及无关性验证

网格划分对于仿真模拟工作来说是一个非常重要的环节,增加或减少网格数量都可能影响模拟结果的准确性。本文设置的网格基本尺寸为 60 mm,以保证整体的计算效率和精度。为了提高模拟结果的准确性,对计算域里的仿生鱼模型进行加密处理,最大网格尺寸设置为 1 mm,这有助于更精细地捕捉近壁区域的流动特性。最终得到了大约 230 万个高质量的网格,确保了计算结果的精确性和可靠性,具体的网格划分效果如图 5 所示。

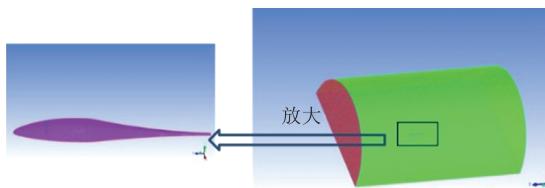


图 5 射流模型网格划分

Fig.5 Jet model meshing

选择网格数量为 50 万、100 万、200 万、400 万个进行验证(见表 1). 选择网格数量最多的方案 4 作为参考组,为了在确保仿真结果准确性的同时,有效利用计算资源,本文对四种不同网格尺寸的喷气射流模型进行了表面阻力模拟分析. 为了更好地进行比较,定义误差  $i$  如式(2)所示:

$$i = \frac{F_x - F_4}{F_4} \quad (2)$$

式中:  $F_4$  为方案 4 模型所受到的总阻力(N);  $F_x$  为方案  $x$  模型所受到的总阻力(N).

方案 4 与其他三种不同方案的阻力误差进行比较,结果如表 1 所示.

表 1 四种网格数量下的计算结果及对比

Tab.1 Calculation results and comparison under the number of four grids

方案	网格数/万个	总阻力 $F_x$ /N	误差 $i$ /%
1	50	6.854 134	9.83
2	100	6.554 640	5.03
3	200	6.338 155	1.56
4	400	6.240 503	—

由表 1 可以看出,与方案 4 相比,网格数量为 200 万个时,误差小于 3%,且网格数量越多,误差越小,这表明当网格数量超过 200 万个时,网格数量对仿真的结果影响不大. 因此选择方案 3 作为后续仿真的网格方案.

## 2 射流孔位置及尺寸对不同介质下射流减阻的影响分析

### 2.1 射流孔位置对不同介质下射流减阻的影响

图 6 为射流孔布置图,假设鱼首顶端为原点,  $X$  表示射流孔到原点的位置. 拟定  $X$  的范围为 20~140 mm, 每 20 mm 为一个间隔,共取 7 个点. 在主流场速度为 10 m/s, 射流速度为 5 m/s 的情况下对比如分析喷气射流与喷水射流的减阻情况.

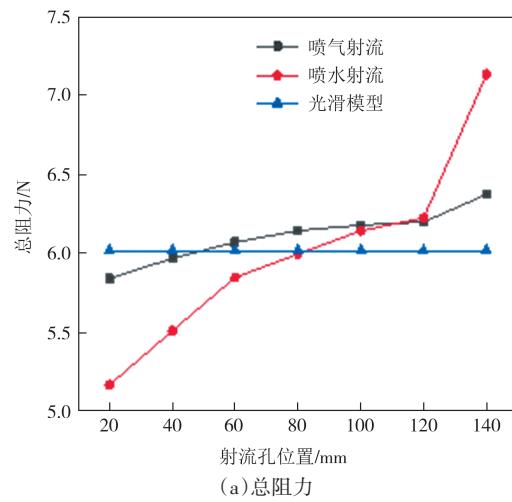
通过 Fluent 软件模拟,得到如图 7 所示的射流表



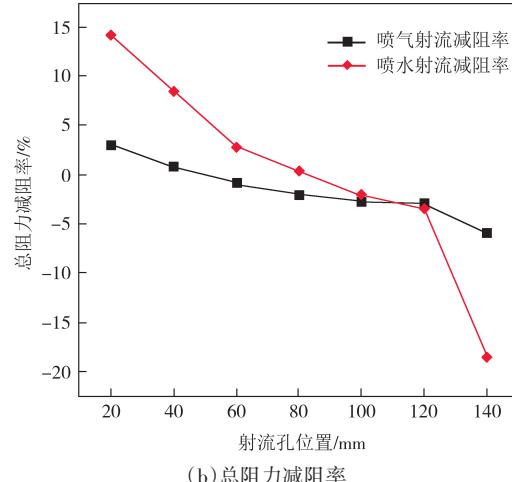
图 6 射流孔布置图

Fig.6 Layout of the orifice

面总阻力减阻曲线图. 由图 7(a)以看出, 随着射流孔位置  $X$  的增加, 喷气射流模型及喷水射流模型的总阻力均呈现整体增大的趋势; 在射流孔位置  $X=20\sim 120$  mm 时, 喷水射流模型的总阻力值均小于喷气射流模型, 在拟定的射流孔位置范围内, 喷水射流模型与喷气射流模型的总阻力最大值均出现在  $X=140$  mm 处, 喷水射流模型的最大总阻力值为 7.13 N, 喷气射流模型的最大总阻力值为 6.37 N; 两种射流模型的最小值均出现在  $X=20$  mm 处, 喷水射流模型的最小总阻力值为 5.17 N, 喷气射流模型的最小总阻力值为 5.84 N.



(a) 总阻力



(b) 总阻力减阻率

图 7 不同射流孔位置对应的总阻力减阻曲线图

Fig.7 Diagram of the total drag reduction curve corresponding to the position of the jet hole

从图 7(b)中可以看出,随着射流孔位置 $X$ 的增加,喷气射流模型及喷水射流模型的总阻力减阻率均呈现整体减小的趋势,且喷水射流孔模型的减小幅度较大。

当 $20\text{ mm} \leq X \leq 80\text{ mm}$ 时,喷水射流孔模型的总阻力小于光滑模型的总阻力,喷水射流总阻力减阻率大于0,这表明此时的喷水射流模型具备减阻效果,最大减阻率为14.1%。当 $80\text{ mm} < X \leq 140\text{ mm}$ 时,喷水射流孔模型的总阻力大于光滑模型的总阻力,喷水射流总阻力减阻率小于0,表明此时的喷水射流模型呈现出增阻效果。当 $20\text{ mm} \leq X \leq 50\text{ mm}$ 范围时喷气射流孔模型的总阻力小于光滑模型的总阻力,喷气射流总阻力减阻率大于0,表明此时的喷气射流模型具备减阻效果,最大减阻率为3.0%左右。当 $50\text{ mm} < X \leq 140\text{ mm}$ 范围时,喷气射流孔模型的总阻力大于光滑模型的总阻力,喷气射流减阻率小于0,这表明此时的喷气射流模型呈现出增阻效果。整体来看,在本节设定的射流孔位置范围内,喷水射流模型的减阻效果较好,且 $X=20\text{ mm}$ 时达到最大减阻率为14.1%。

## 2.2 射流孔高宽比对射流减阻的影响

射流孔尺寸是影响射流减阻效果的重要因素,不同尺寸的射流孔对喷气射流模型和喷水射流模型可能会产生与射流孔位置不一样的结果,故需要对射流孔的尺寸进行分析。设定主流场速度为 $10\text{ m/s}$ ,射流速度为 $5\text{ m/s}$ ,高宽比分别为 $2, 3, 4, 5, 7, 10$ ,通过模型仿真得到了图8所示的减阻曲线图。

由图8可知,喷水射流模型的减阻效果要好于喷气射流模型,这与上文的分析一致。随着高宽比的增加,两种模型的变化趋势相似,都表现为总阻力非线性增加的趋势,其中喷水射流模型的阻力增加幅度要大于喷气射流模型,喷水射流模型的总阻力最大增幅约为14.2%,喷气射流模型的总阻力最大增幅约为5.8%。在模拟试验的高宽比范围内,喷水射流模型的总阻力均小于光滑模型,这表明喷水射流模型全程处于减阻状态;喷气射流模型在高宽比为 $2\sim 4$ 范围内表现出减阻效果,在 $5\sim 10$ 范围内表现出增阻效果。结合图8来看,当高宽比为2时两种情况下的减阻效果最好,喷气射流模型减阻率约为3.61%,对应的总阻力为 $5.81\text{ N}$ ;喷水射流模型的减阻率约为15.42%,对应的总阻力为 $5.09\text{ N}$ 。

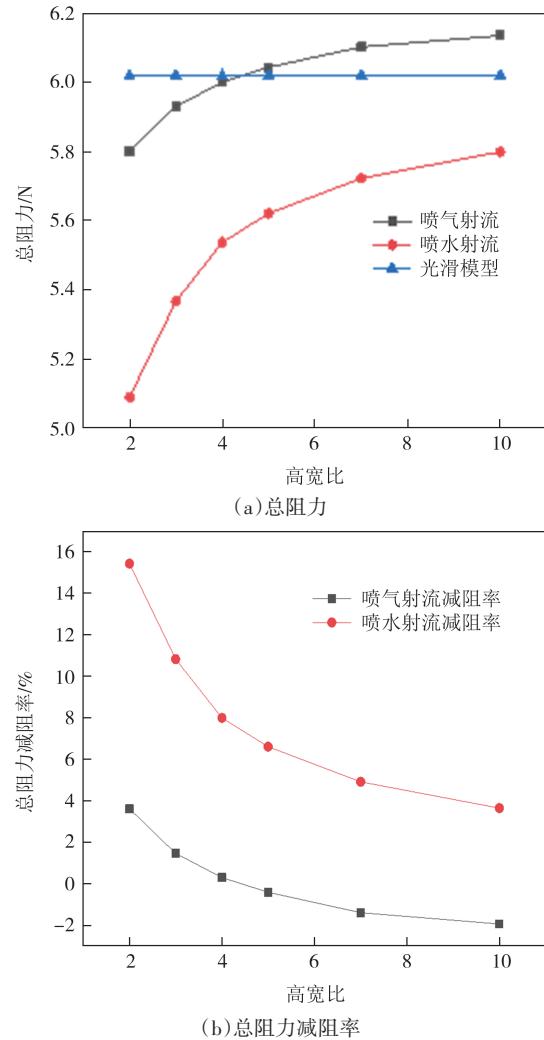


图8 不同射流孔高宽比对应的总阻力减阻曲线图

Fig.8 Diagram of the total drag reduction curve corresponding to the height-to-width ratio of different jet holes

## 2.3 射流孔高度对射流减阻的影响

对上文的分析可以看出射流孔高宽比 $k$ 为2时,射流模型的减阻效果最好,本节拟定主流场速度为 $10\text{ m/s}$ ,射流速度为 $5\text{ m/s}$ ,射流孔高度分别为 $3, 5, 7, 10, 13, 15\text{ mm}$ ,通过模拟仿真得到了如图9所示的减阻曲线图。

在射流孔高宽比为2时,随着射流孔高度的增加,由图9可知,两种射流模型的总阻力均呈现出整体减小的趋势,喷水射流模型的总阻力变化幅度较大,最大减小幅度约30.5%,喷气射流模型的减小幅度约为12.3%。在不同的射流孔高度下,喷水射流模型的总阻力均小于光滑对照模型,这表明喷水射流模型在模拟的过程中具备较好的减阻效果,而喷气射流模型仅在射流孔高度大于 $7\text{ mm}$ 时才具备总阻力减阻效果。图9(a)中,当射流孔高度较低时,射流

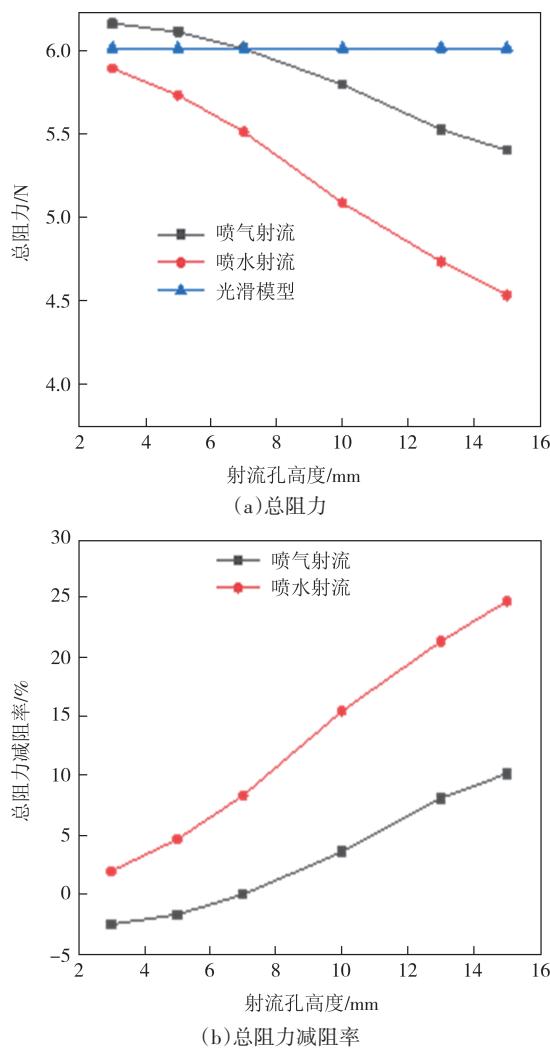


图9 不同射流孔高度对应的总阻力减阻曲线图

Fig.9 Diagram of total drag reduction curves corresponding to different jet hole heights

孔较小,单位时间内的射流量少,因此喷气模型的总阻力高于光滑模型.结合图9(b)来看,在设定的射流孔高度范围内,喷水射流模型的总阻力减阻率均大于0,且在射流模型高度为15 mm时总阻力减阻率最大,最大减阻率为24.64%,对应的总阻力为4.54 N.喷气射流模型在射流孔高度大于7 mm时总阻力减阻率大于0,同样在射流孔高度为15 mm时总阻力减阻率最大,最大减阻率为10.17%,对应的总阻力为5.41 N.整体来看,喷水射流模型的减阻效果较好.

上述分析表明,喷气射流条件下,对于仿生鱼而言属于射流局部减阻,喷水射流不仅具有黏滞阻力、摩擦阻力、惯性阻力,还具有气阻力,这些阻力综合作用使得喷气射流条件总阻力较喷水射流条件总阻力大,喷水射流模型的减阻效果要好于喷气射流模型.

### 3 流场条件对不同介质下射流减阻的影响

设定射流孔位置 $X$ 为20 mm,射流孔高宽比 $k$ 为2,射流孔高度 $h$ 为15 mm,选择四种不同的主流场速度 $V=3, 5, 7, 10 \text{ m/s}$ ,对于射流速度,选择五种不同的速度比 $v_i=0.1 \sim 0.5$ (间隔为0.1).在上述条件下研究不同流场条件的喷气射流模型及喷水射流模型的减阻效果.速度比 $v_i$ 的定义如下:

$$v_i = \frac{v}{V} \quad (3)$$

式中: $V$ 表示主流场速度, $v$ 表示射流速度.

图10为不同流场条件对应的压差阻力减阻曲线图,其中A表示喷气射流模型,W表示喷水射流模型,V3、V5、V7、V10分别表示主流场速度为3、5、7、10 m/s.

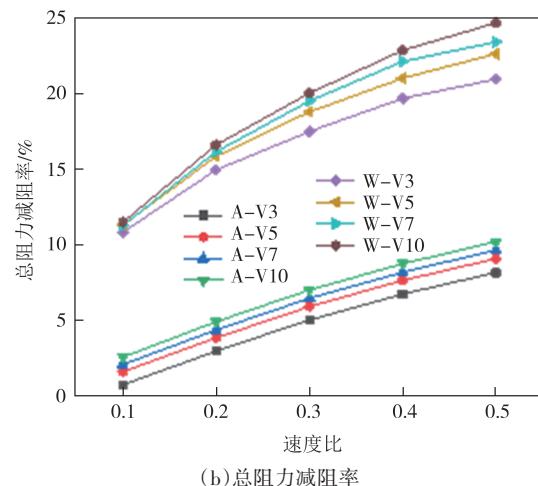
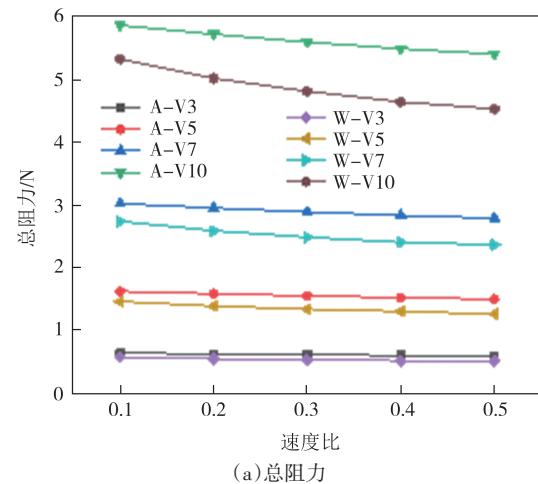


图10 不同流场条件对应的总阻力减阻曲线图

Fig.10 Diagram of total drag reduction curve corresponding to different flow field conditions

从图 10 中可以看出无论是喷气射流模型还是喷水射流模型都具备较好的减阻效果,且喷水射流模型的减阻效果更好。从图 10(a)中可以看出,随着速度比的增大,喷气模型与喷水模型在来流速度越大时,总阻力减小趋势越明显,对比两种射流模型,喷水射流模型的总阻力变化幅度更大,这表明射流速度对喷水射流模型的影响更大。从图 10(b)中可以看出不同流场条件下,喷水射流模型的总阻力减阻率要明显大于喷气射流模型,这表明喷水射流模型的减阻效果更好。在同一主流场速度下,随着速度比的增大,两种射流模型的总阻力减阻率随之增大,在本文拟定的流场条件下,当速度比为 0.5 时达到最大值。随着主流场速度的增加,射流模型的总阻力减阻率变大,当主流场速度为 10 m/s 时达到最大值,此时喷水射流模型的最大减阻率为 24.64%,喷气射流模型的最大减阻率为 10.17%。

## 4 结论

本文基于仿生鲤鱼设计了一种射流孔射流模型,分析了在不同射流孔参数条件下,喷射介质对减阻性能的影响,主要结论如下:

1) 当射流孔位置  $X=20$  mm 时,喷水模型的减阻效果最好,最大减阻率为 14.1%;当射流孔高宽比  $k=2$  时,喷水模型的减阻效果最好,最大减阻率约为 15.42%;当射流孔高度  $h=15$  mm 时,喷水模型的减阻效果最好,最大减阻率为 24.64%。

2) 不同流场条件下,喷水射流模型的减阻效果好于喷气射流模型,且主流场速度越大,模型所受到的阻力也越大。在本文拟定的速度范围内,当速度比为 0.5 时,喷气射流模型和喷水射流模型在主流场速度为 10 m/s 时存在最好的减阻效果,喷水射流模型的最大减阻率为 24.64%,喷气射流模型的最大减阻率为 10.17%。

本文的模拟实验是在理想状态下完成的,没有考虑能量方面的消耗,在真实情况下,射流孔越大,喷射系统所消耗的能量越多,因此在实际运用时应根据条件选择适当的射流孔尺寸。

## 参考文献

- [1] 赵华琳. 仿生射流表面减阻特性及减阻机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- ZHAO H L. Study on drag reduction characteristics and drag reduction mechanism of bionic jetting surface [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [2] 赵刚, 谷云庆, 许国玉, 等. 仿生射流表面减阻特性实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(8): 3007–3012.
- ZHAO G, GU Y Q, XU G Y, et al. Experimental study on drag reduction characteristics of bionic jet surface [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(8): 3007–3012. (in Chinese)
- [3] 赵刚, 李芳, 杜军伟. 仿生射流表面优化设计与减阻机理分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1449–1456.
- ZHAO G, LI F, DU J W. Optimization design of bionic jet surface and mechanism analysis of drag reduction [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(5): 1449–1456. (in Chinese)
- [4] 李芳, 赵刚, 刘维新, 等. 多孔仿生射流表面减阻特性数值模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(6): 1698–1703.
- LI F, ZHAO G, LIU W X, et al. Numerical simulation of drag reduction characteristics of a bionic jet surface with multiple holes [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(6): 1698–1703. (in Chinese)
- [5] 李芳, 赵刚, 刘维新, 等. 仿生射流表面流场控制减阻数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(3): 574–583.
- LI F, ZHAO G, LIU W X, et al. Simulation on flow control and drag reduction with bionic jet surface [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(3): 574–583. (in Chinese)
- [6] 王峻, 刘珑翔, 陈瑛. 头部喷气圆柱高速入水空泡与降载特性的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2023, 38(2): 195–204.
- WANG J, LIU L X, CHEN Y. Numerical investigation on the high-speed water entry cavity and load reduction of air-jetting cylinder [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(2): 195–204. (in Chinese)
- [7] 王家楣, 姜曼松, 郑晓伟, 等. 不同喷气形式下船舶微气泡减阻水池试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 78–80.
- WANG J M, JIANG M S, ZHENG X W, et al. Study of drag reduction of vessel model by microbubble with different injection forms in the towing basin [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(12): 78–80. (in Chinese)
- [8] LEE J, LEE H J, HUH H. Drag reduction analysis of counterflow jets in a short penetration mode [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106065.
- [9] TARUR A. Influence of nozzle exhaust angle on supersonic retro propulsion [D]. Seattle: University of Washington, 2023.
- [10] XIE W, LUO Z B, ZHOU Y, et al. Experimental and numerical

- investigation on opposing plasma synthetic jet for drag reduction [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(8): 75–91.
- [11] XIE W, LUO Z B, ZHOU Y, et al. Influence of volume and frequency parameters on opposing plasma synthetic jet for drag reduction in supersonic flow [J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 146: 108971.
- [12] 王秀蕊. 射流孔结构对水下喷气平板减阻影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG X R. Study on influence of jet hole structure on drag reduction of underwater jet plate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] 谷云庆, 牟介刚, 郑水华, 等. 射流表面射流孔菱形排布减阻特性实验分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 16–20.
- GU Y Q, MOU J G, ZHENG S H, et al. Experimental analysis on drag reduction characteristics of jet hole diamond arrangement for jet surface [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 16–20. (in Chinese)
- [14] KODAMA Y, KAKUGAWA A, TAKAHASHI T, et al. Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21(5): 582–588.
- [15] FAHEEM M, KHAN A, KUMAR R, et al. Experimental investigation of the effect of cross wire on the flow field of elliptic jet [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2021, 90: 108834.
- [16] YAO Y F, MAIDI M, YAO J. Effect of jet inclination angle and hole exit shape on vortical flow structures in low-Reynolds number jet in cross-flow [J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2012, 2012(1): 632040.
- [17] HE Z X, TAO X C, ZHONG W J, et al. Experimental and numerical study of cavitation inception phenomenon in diesel injector nozzles [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 65: 117–124.
- [18] DU Y, ZHAO G, SUN Z Z, et al. Bionic structure of shark's gill jet orifice based on artificial muscle [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(4): 855–865.
- [19] 王林, 王宇楠, 罗振兵, 等. 逆向射流对高超声速升力体构型的减阻特性研究[J]. 宇航学报, 2024, 45(6): 881–892.
- WANG L, WANG Y N, LUO Z B, et al. Study on the drag reduction characteristics of opposing jet on hypersonic lifting body configuration [J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(6): 881–892. (in Chinese)