

文章编号: 1007-7294(2025)05-0732-10

# 抑制水下航行体初生空化的粗糙带参数优化设计

邢浩杰<sup>1</sup>, 胡常莉<sup>1</sup>, 王志英<sup>2</sup>, 程 诚<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 抑制水下航行体初生空化对减小空化带来的不利影响具有重要意义。本文针对通过改变物面粗糙性来抑制初生空化的方法, 开展基于代理模型方法的粗糙带参数优化设计研究。首先, 采用数值计算的方法分析粗糙带参数对水下航行体头部空化初生特性的影响机制, 并给出粗糙带各参数的初始设计范围, 然后, 采用代理模型方法进行参数选优分析。结果表明: 航行体头部表面设置粗糙带可改变其表面压力分布规律, 粗糙带前后边界会引起压力的小幅波动, 可改变最小压力值从而影响空化初生特性; 通过代理模型的敏感度分析可知, 相比于粗糙带的位置和宽度, 其高度对初生空化数的影响较大, 最终获得的优化结果经数值计算验证可明显降低初生空化数, 达到较好的抑制空化初生的效果。

**关键词:** 粗糙带; 代理模型; 初生空化; 优化设计

中图分类号: TV131.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.05.006

## Optimal design of rough band parameters for suppression of incipient cavitation in underwater vehicles

XING Hao-jie<sup>1</sup>, HU Chang-li<sup>1</sup>, WANG Zhi-ying<sup>2</sup>, CHENG Cheng<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Suppressing incipient cavitation in an underwater body is of great importance to reducing the adverse effects caused by cavitation. For the method of suppressing incipient cavitation by changing the surface roughness, the research on the optimal design of the rough band parameters based on surrogate model methods was conducted. Firstly, numerical calculation methods were used to analyze the influence mechanism of the rough band parameters on the incipient cavitation characteristics at the head of the underwater body, and an initial design range for the rough band parameters was established. Then, the surrogate model method was used for parameter optimization analysis. The results show that setting a rough band on the head surface of the body can change the pressure distribution. The front and rear boundaries of the roughness may cause slight pressure fluctuations, which can change the minimum pressure value and thereby affect the incipient cavitation characteristics. Through sensitivity analysis of the surrogate model, it can be observed that compared with the position and width of the rough band, its height has a greater influence on incipient cavitation. The final optimization results obtained were verified by numerical calculation, which can obviously reduce the incipient cavitation and achieve a better effect in suppressing it.

**Key words:** roughness band; surrogate model; incipient cavitation; optimal design

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52076108; 12293000; 12293003; 12293004; 11972194)

作者简介: 邢浩杰(1999-), 男, 硕士研究生;

胡常莉(1986-), 女, 博士, 副教授, 通讯作者, E-mail: changlihu@njust.edu.cn。

## 0 引言

当水下航行体局部压力下降到液体的饱和蒸汽压以下时,在航行体表面就会出现空化现象,空化会造成航行体表面剥蚀<sup>[1]</sup>和噪声<sup>[2]</sup>等负面影响。空化一般要经历空化初生、空化发展和空化溃灭三个阶段<sup>[3]</sup>,其中空化初生作为空化的初始阶段涉及到空化的形成机理和生成条件,因此,对于水下航行体初生空化的控制研究具有十分重要的工程应用价值。

目前,已有学者通过实验研究发现,水下航行体的初生空化与其近壁面的流动结构有较大的关联<sup>[4-6]</sup>,而在表面布置微结构可有效改变壁面流场结构并控制空化流动且对于水力机械自身的性能影响较小,所以表面微结构是控制初生空化的重要手段。目前,已有不少学者研究发现粗糙带可有效抑制空化的形成与发展<sup>[7-10]</sup>,但粗糙带参数选择不当则会起到促进空化的作用<sup>[11]</sup>。位置、宽度和高度为粗糙带的主要参数,若想使用传统方法设计出可有效抑制水下航行体初生空化的粗糙带,则需要对三个参数分别研究,需要使用大量的计算和实验资源,具有优化设计周期长且无法得到各个参数的影响权重等缺点。使用代理模型方法可有效解决这一问题,代理模型方法具有可同时考虑多个设计变量、缩短计算周期、生成多个优化点和计算出各参数的权重等优点。基于代理模型方法在水力机械的优化设计中已经得到了广泛的应用。韩翔希等<sup>[12]</sup>基于RBF神经网络模型方法对灯光渔船的艏部型线进行优化设计,最终,经过CFD验证发现抽取的三组优化结果均可有效减小总阻力,改善艏部伴流不均匀度;赵宇等<sup>[13]</sup>研究发现,使用代理模型方法优化出的串列泵在设计流量附近的效率和空化性能均有所提高。通过敏感性分析,发现首级叶轮叶片安放角对串列泵的空化性能影响最大;杜向党等<sup>[14]</sup>采用代理模型方法对航行体壳体外形进行了优化设计,并通过实验验证了其优化结果的可靠性;杨潇等<sup>[15]</sup>则以游艇总阻力作为优化目标,对游艇艇身造型进行了优化设计,并通过CFD方法对优化结果进行验证。结果表明,优化出的艇身造型可降低5.81%的总阻力,且相对误差仅为0.65%。

本研究基于圆端头的格兰韦尔线型<sup>[16]</sup>(长径比1:1)航行体。首先,采用CFD方法分析粗糙带对于水下航行体近壁面流动特性的影响,总结粗糙带对航行体初生空化的影响规律;然后,确定出合理的粗糙带位置、宽度以及高度的选取范围,在此范围内生成设计点,以航行体的初生空化数作为代理模型优化设计的目标变量;最后,对优化结果进行CFD验证以确保优化结果的准确性,并进一步总结粗糙带对航行体初生空化的影响规律。

## 1 数值计算方法

### 1.1 控制方程

基于均相流模型,气液两相混合程度较好,其连续性方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$\mu = \alpha_v \mu_v + (1 - \alpha_v) \mu_l \quad (3)$$

$$\rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (4)$$

式中, $u_i$ 和 $u_j$ 分别为 $i$ 和 $j$ 方向上的速度分量; $p$ 、 $\mu$ 和 $\rho$ 分别为混合相压力、粘性系数和密度; $\alpha_v$ 为气相体积分数; $\rho_v$ 和 $\rho_l$ 分别为气相和液相的体积分数; $\mu_v$ 和 $\mu_l$ 分别为气相和液相的粘性系数。

### 1.2 湍流模型

采用大涡模拟(LES)对湍流流动进行计算,大涡模拟的基本思想是通过滤波函数将大尺度脉动和小尺度脉动分开处理,直接计算大尺度脉动,而小尺度脉动用亚格子模型来封闭。公式(1)和公式(2)通

过滤波函数处理后得到 LES 方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (6)$$

式中,  $\tau_{ij}$  被称为亚格子(SGS)应力, 其定义为

$$\tau_{ij} = \rho(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (7)$$

为了构造亚格子应力的封闭模型, 需要对未知的亚格子应力进行建模处理。假设亚格子应力与可求解尺度的应变张量系数  $\bar{S}_{ij}$  成比例, 将小涡对大涡的影响关联起来得到

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} - 2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

式中,  $\tau_{kk}$  为亚格子应力中各向同性部分,  $\mu_t$  为亚格子模型的湍流黏度。采用的亚格子模型为 Nicoud 和 Ducros<sup>[15]</sup> 提出的 WALE 亚格子模型, 该模型在求解空化问题上具有很好的适用性。其湍流黏度  $\mu_t$  表达式为

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (9)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2, \quad \bar{g}_{ij}^2 = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

式中,  $L_s$  是亚格子尺度的混合长度, 其定义为

$$L_s = \min(kd, C_w V^{1/3}) \quad (12)$$

其中,  $k$  为 von Karman 常数;  $d$  为到最近壁面的距离;  $V$  为计算单元的体积;  $C_w$  为默认的 WALE 常数, 取值为 0.5。

### 1.3 空化模型

对于空化流动的计算, 选用 Zwart 空化模型, 这是基于简化的 Rayleigh-Plesset 方程, 质量交换率方程为

$$m^+ = C_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2 \max(p_v - p, 0)}{\rho_l}} \quad (13)$$

$$m^- = C_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2 \max(p - p_v, 0)}{\rho_l}} \quad (14)$$

式中,  $C_{\text{vap}}$  和  $C_{\text{cond}}$  分别为蒸发系数和凝结系数,  $C_{\text{vap}}=50$ ,  $C_{\text{cond}}=0.01$ ;  $\alpha_{\text{nuc}}$  为气核体积分数,  $\alpha_{\text{nuc}} = 5 \times 10^{-4}$ ;  $p$ 、 $p_v$  分别为当地压力和饱和蒸汽压;  $R_B$  为气泡半径, 取值为  $10^{-6}$  m。

### 1.4 计算域及边界条件设置

模型选用直径  $D=20$  mm, 总长  $L=80$  mm 的流线头型航行体, 如图 1 所示, 在航行体表面布置不同位置、高度和宽度的粗糙带, 以分析其对航行体初生空化的影响。图 2 为计算域及边界条件设置情况, 计算域长度为  $56D$ , 直径为  $25D$ 。计算域左面设置为速度入口, 速度大小为定值 24.35 m/s; 右面和侧面为压力出口。图 3 为航行体周围及头部网格划分情况, 航行体计算域采用六面体结构化网格划分, 其中航行体周围采

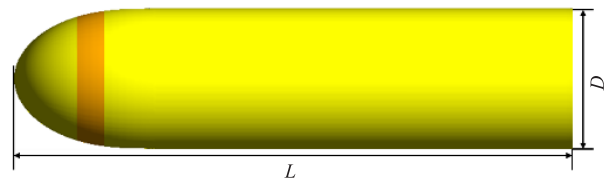


图 1 航行体模型

Fig.1 Model of the navigational body

用 O-Block 拓扑结构, 并对头部以及近壁面进行网格加密处理, 粗糙带航行体则是对增设粗糙带位置单独切分, 网格设置与基准航行体相同。

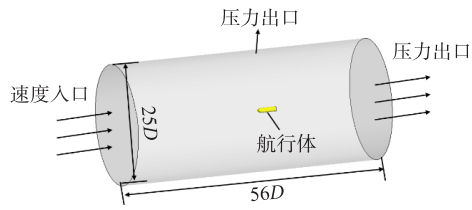


图 2 计算域及边界条件

Fig.2 Computational domain and boundary condition

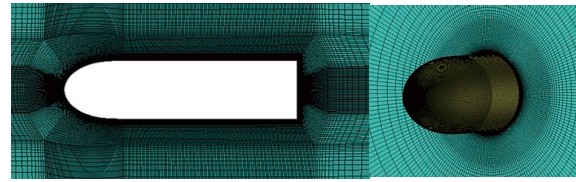


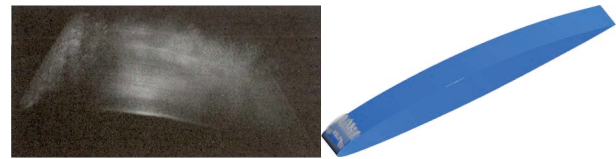
图 3 网格划分情况

Fig.3 Meshing

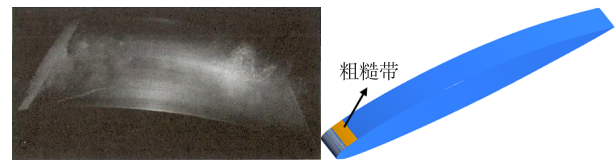
## 2 数值计算分析

### 2.1 数值计算方法验证

图 4 为实验<sup>[7]</sup>与数值计算得到的典型工况下的绕流 NACA66 水翼的空穴形态图。对于前缘粗糙的水翼, 数值计算中采用等效砂粒模型理论来实现粗糙带的模化。可以发现, 对于表面光滑水翼和前缘粗糙的水翼, 数值计算得到的空穴形态均与实验结果吻合较好, 且通过对比可知, 相同空化数条件下, 前缘粗糙水翼表面的空穴尺度明显小于光滑水翼的, 这体现了粗糙带对空化的抑制作用。



(a) 光滑水翼



(b) 粗糙水翼

图 4 不同水翼实验(左)与数值模拟(右)结果对比

Fig.4 Comparison between experimental results and numerical simulation results of different hydrofoils

### 2.2 粗糙带对航行体初生空化的影响

为初步确定抑制初生空化的粗糙带参数有效范围, 下面将依次研究粗糙带的位置、宽度和高度对初生空化特性的影响。表 1 给出所有设计工况的粗糙带参数, 其中粗糙带位置定义为从粗糙带中间位置到航行体顶端距离, 共 13 个工况, 以粗糙带不同轴向位置( $X$ )、不同宽度( $W$ )及不同高度( $H$ )分为三组,  $S$  为基准航行体。

表 1 计算工况

Tab.1 Calculation conditions

粗糙带	位置	宽度	高度	粗糙带	位置	宽度	高度
$S$	0	0	0	$W-2$	$0.525D$	$0.15D$	$0.0005D$
$X-1$	$0.45D$	$0.3D$	$0.0005D$	$W-3$	$0.55D$	$0.2D$	$0.0005D$
$X-2$	$0.5D$	$0.3D$	$0.0005D$	$H-1$	$0.5275D$	$0.175D$	$0.00025D$
$X-3$ ( $W-4$ )	$0.6D$	$0.3D$	$0.0005D$	$H-2$	$0.5275D$	$0.175D$	$0.0005D$
$X-4$	$0.75D$	$0.3D$	$0.0005D$	$H-3$	$0.5275D$	$0.175D$	$0.0025D$
$X-5$	$1.35D$	$0.3D$	$0.0005D$	$H-4$	$0.5275D$	$0.175D$	$0.0042D$
$W-1$	$0.5D$	$0.1D$	$0.0005D$				

图 5 给出不同轴向位置粗糙带的初生空化数和初生空化数减小率。从整体来看, 粗糙带的轴向位置对初生空化数的影响规律呈非线性关系。图 6 为不同轴向位置粗糙带在航行体上的位置和基准航行体表面压力系数分布曲线,  $C_{pmin}$  为表面压力最小点。可以看出当粗糙带位置在  $C_{pmin}$  附近时, 航行体的初生空化数减小率较大, 所以, 在进一步探讨粗糙带宽度对于航行体初生空化数的影响时, 位置选取在  $C_{pmin}$  点附近。

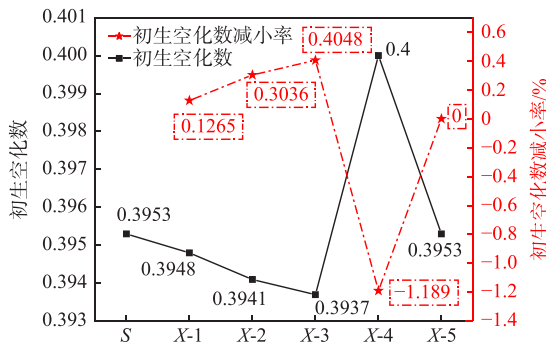


图 5 不同轴向位置粗糙带的航行体初生空化数及其减小率

Fig.5 Incipient cavitation number of the body with roughness strips and reduction rate

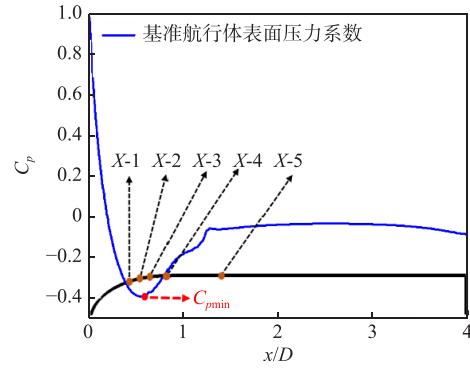


图 6 不同轴向位置粗糙带和表面压力最低点的位置

Fig.6 Different axial positions of roughness strips and the location of minimum surface pressure

图 7 给出了不同宽度粗糙带航行体的初生空化数及其减小率,除  $W-1$  外其他粗糙带均可降低初生空化数,当宽度达到  $W-3(0.2D)$  时,继续加宽后航行体初生空化数不再改变,本着尽可能少地改变航行体基本结构的原则,后续的研究应该在抑制空化效果较好的前提下尽可能地减小宽度。图 8 给出无空化条件下不同宽度粗糙带航行体的表面压力系数,图中  $W_A$  为粗糙带前边界位置, $W-1_B$ 、 $W-2_B$ 、 $W-3_B$  分别为  $W-1$ 、 $W-2$ 、 $W-3$  粗糙带的后边界位置( $W-4$  粗糙带后边界位置位于  $0.75D$ ,对表面压力的影响不大,所以不再单独指出)。在局部放大图中可以看出在粗糙带的前后边界均出现压力波动。对比发现,不同宽度的粗糙带前边界的波动均会提升下游的表面压力,而当后边界位置位于最低压力点附近时,压力会急剧下降,如图  $W-1$  曲线所示,其最小表面压力低于基准航行体,促进了空化初生。

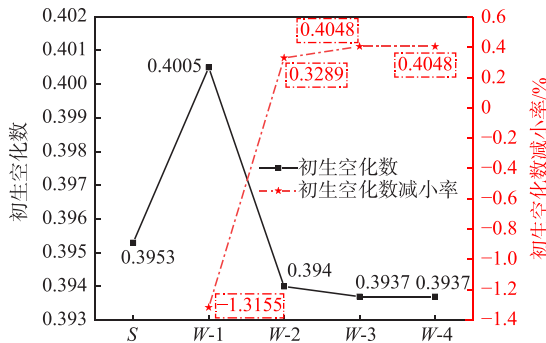


图 7 不同宽度粗糙带的航行体的初生空化数及其减小率

Fig.7 Incipient cavitation number of the body and reduction rate

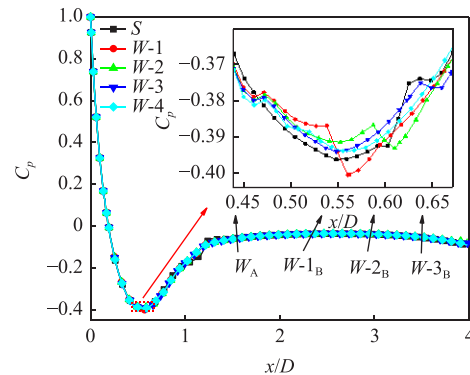


图 8 航行体的时均表面压力系数

Fig.8 Time-averaged surface pressure coefficient of the body

图 9 为不同粗糙高度的航行体的初生空化数及其减小率。总体来看,在该位置设置粗糙带对航行体的初生空化均起到抑制效果,其中最小初生空化数  $\sigma = 0.387$ ,比基准航行体的初生空化数降低了 2.0997%。图 10 给出无空化条件下粗糙高度对表面压力的影响,在表面压力最低区域的放大图中可以看出,粗糙带前后边界均出现压力波动,且粗糙高度越高,粗糙带前后边界处压力波动越大。对比发现,设置四种不同高度粗糙带均可增大航行体的表面压力系数,而且在所研究范围内粗糙带高度越高,表面压力越大。

### 2.3 基于代理模型的粗糙带参数优化设计

基于上述的分析可知,粗糙带设置在表面压力点最小值附近为佳,因此,位置的初始取值范围确定在  $0.5D \sim 0.55D$  之间;宽度不宜过窄,当达到  $0.2D$  时继续增大宽度对航行体的初生空化抑制效果影响不大,因此,宽度的初始范围确定在  $0.15D$  到  $0.2D$  之间;在所研究范围内,粗糙带高度越高对航行体初生

空化的抑制效果越好,因此,高度的设计范围在  $0.00375D \sim 0.005D$  之间。将三个自变量的取值范围汇总如表 2 所示,目标变量为初生空化数。

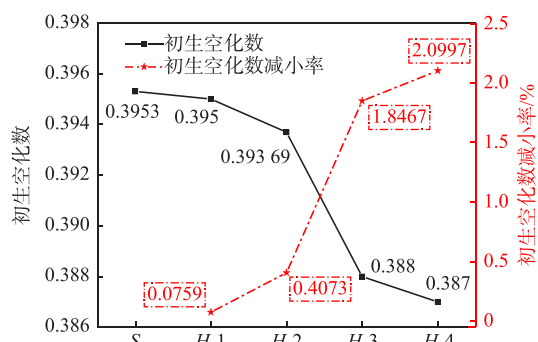


图 9 不同粗糙高度的航行体的初生空化数及其减小率

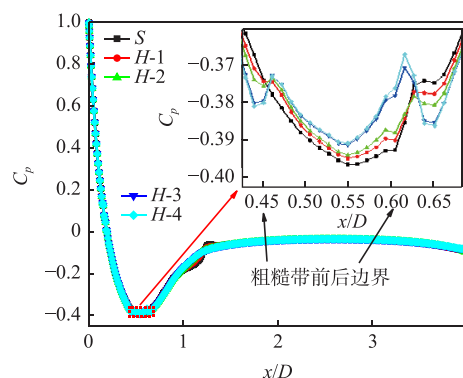


图 10 航行体的时均表面压力系数(无变化条件下)

Fig.9 Incipient cavitation number of the body and reduction rate Fig.10 Time-averaged surface pressure coefficient of the body

表 2 变量取值范围

Tab.2 Value range of variables

变量	最小值	最大值
位置	$0.5D$	$0.55D$
宽度	$0.15D$	$0.20D$
高度	$0.00375D$	$0.005D$

综合采用面心法(face-centered cubic design, FCCD)和拉丁超立方(Latin hypercube filling, LHF)来生成有效的实验点。其中, FCCD 用于生成拟合模型所需的核点,而 LHF 则用于生成附加点。最终,选取了 30 个点作为评估点。图 11 显示了生成的点在三维空间中的分布情况。研究使用多种代理模型对实验数据进行拟合的方法,包括 PRS(polynomial response surface)、KRG(Kriging)、RBNN(radial basis neural network)、SHEP(Shepard interpolation)、WAS(weighted average surrogate)等方法。选取  $P_{rms}$  函数作为各代理模型方法的评价指标,其表达式为

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} (y_i - y_i^{(-i)})^2} \quad (15)$$

其中,  $N_s$  为建立代理模型所用设计点  $x_i$  的个数,  $y_i$  为数值计算结果,  $y_i^{(-i)}$  为利用除  $x_i$  点外的设计点所建立的代理模型在  $x_i$  点处的拟合值。图 12 给出了五种代理模型的拟合误差指标,对比发现,在本研究中 KRG 模型的预测值均方差最大,PRS、RBNN 和 SHEP 模型的预测值均方差较为接近,WAS 模型误差最小。

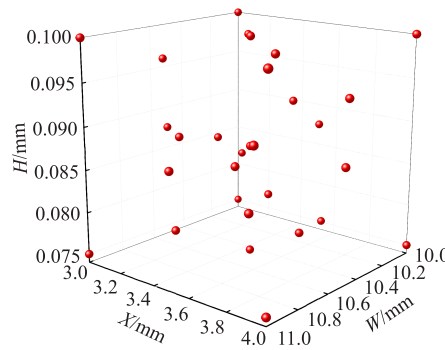


图 11 实验点三维空间分布

Fig.11 Three-dimensional spatial distribution of experimental sites

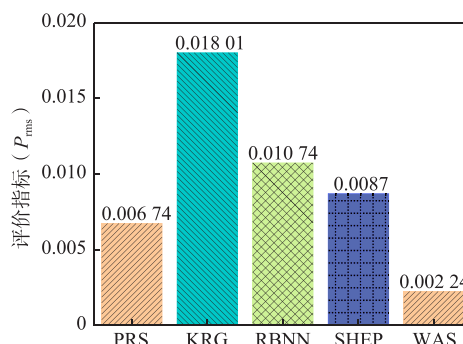


图 12 评价指标

Fig.12 Evaluation indicators

图 13 给出了不同代理模型建立的目标变量随自变量变化的云图。从图中可以看出, KRG、RBNN、SHEP 三种模型预测结果相近, 而 PRS 模型与其他模型相比差别较大, WAS 模型融合了其他模型的预测结果。可以看出在 WAS 模型优化的结果中, 对于航行体初生空化数降低效果较好的粗糙带参数位置集中在  $0.53D$  和  $0.505D$  附近, 宽度则在不同的位置有所区别, 高度在所选范围内均有分布。

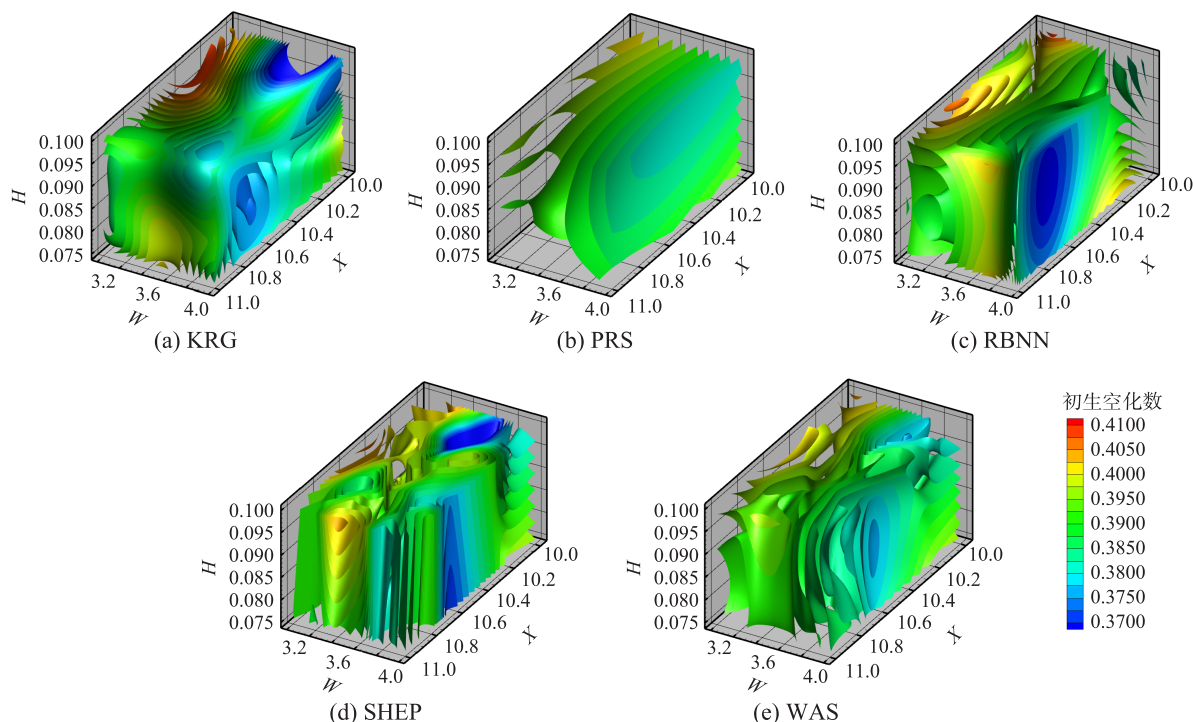


图 13 不同代理模型预测目标函数三维等值面分布

Fig.13 Three-dimensional iso-surface distribution prediction of the objective function by different surrogate models

图 14 是基于 WAS 模型的 Monte Carlo 敏感度分析, 图中空心框为全局敏感度, 实心框为主要敏感度。结果表明, 粗糙带高度对航行体初生空化数的影响最为显著, 而位置和宽度对初生空化数的影响则相对较小。因此, 在之后的优化设计时, 可以更多地考虑粗糙高度因素对初生空化数的影响。

为保证优化结果的准确性, 在 WAS 模型的优化结果中, 提取初生空化数最小的前 1% 作进一步分析, 其对应的自变量粗糙带参数在三维空间中的分布情况如图 15 所示。为了进一步验证代理模型结果的可靠性, 从结果中随机抽取 8 组工况(如表 3 所示), 采用 CFD 方法对其结果进行了验证。

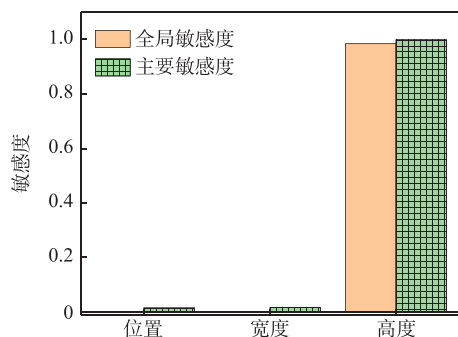


图 14 敏感度分析

Fig.14 Sensitivity analysis

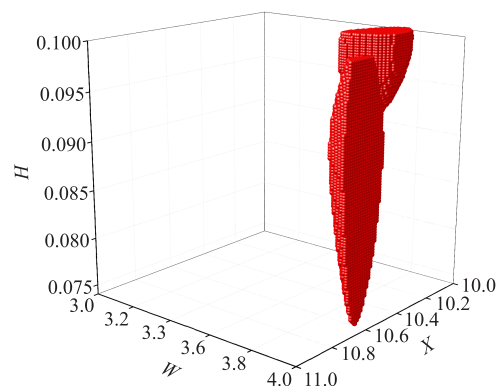


图 15 WAS 模型优化结果

Fig.15 Optimisation results of WAS model

图 16 展示了 WAS 模型优化结果与 CFD 计算结果的对比情况和误差,可以看出误差均小于 3%,这表明所采用的代理模型方法具有较好的预测精度。WAS 模型的优化结果显示,位置、宽度和高度分别为  $X=0.509D$ 、 $W=0.185D$ 、 $H=0.0049D$ (即表 3 中 No.2)的粗糙带对航行体的初生空化抑制效果最好,且经过数值计算验证, No.2 粗糙带航行体初生空化数  $\sigma = 0.3824$ ,相比基准航行体的初生空化数  $\sigma = 0.3953$ 降低了 3.26%,明显降低了航行体的初生空化数。

表 3 粗糙带参数 CFD 验证

Tab.3 Parameters of roughness band

编号	位置	宽度	高度
No.1	0.534D	0.200D	0.0045D
No.2	0.509D	0.185D	0.0049D
No.3	0.532D	0.200D	0.0045D
No.4	0.529D	0.200D	0.0046D
No.5	0.531D	0.198D	0.0045D
No.6	0.530D	0.199D	0.0042D
No.7	0.536D	0.182D	0.0049D
No.8	0.532D	0.200D	0.0045D

2.4 优化粗糙带航行体的流场分析

图 17 展示了 WAS 模型最优结果(粗糙带航行体 No.2)与基准航行体的初生空化形态及周围压力云图。可以看出,受到粗糙带的影响,航行体的初生空化发生在粗糙带的后边界位置,结合图 18 可得出航行体的初生空化起始位置向下游偏移 0.05D。图 19 为单相流条件下航行体的表面压力系数分布情况,可以看出,粗糙带的前边界造成了航行体表面压力的小幅度波动,提高了航行体的表面压力从而抑制了初生空化。

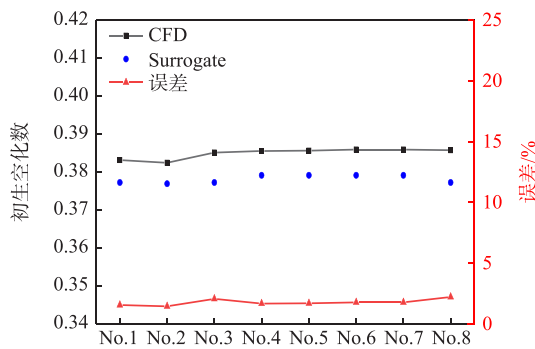


图 16 WAS 模型优化结果与 CFD 计算结果的对比情况和误差

Fig.16 Comparison between WAS model optimisation results with CFD calculations and errors

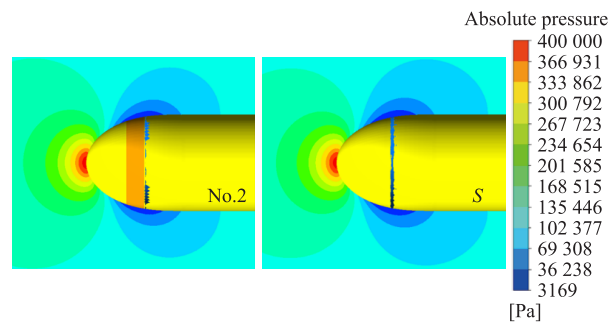


图 17 空化形态及压力云图

Fig.17 Cavitation patterns and pressure clouds

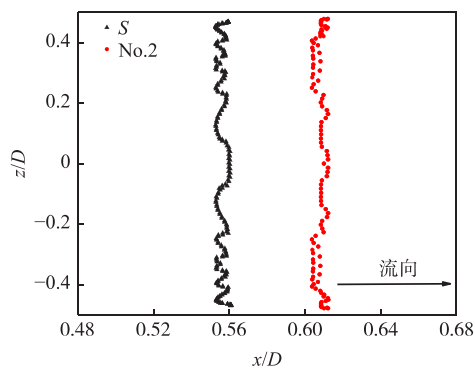


图 18 空化起始位置

Fig.18 Initiative position of cavitation

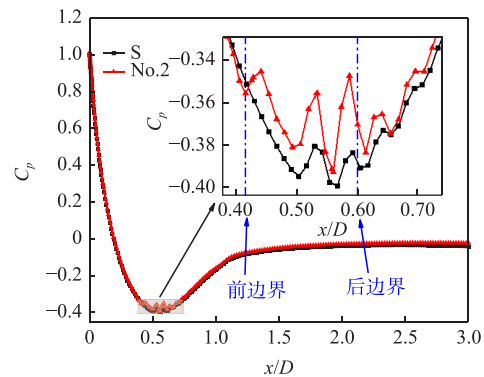


图 19 单相流表面压力系数分布情况

Fig.19 Distribution of surface pressure coefficients for single-phase flow

### 3 结 论

本文采用数值计算方法,分析了粗糙带参数对水下航行体初生空化的影响机制,给出了粗糙带参数的初始设计范围,然后通过代理模型方法对粗糙带参数进行了选优,并通过CFD方法验证了代理模型方法的准确性,结果表明:

(1)在航行体头部设置粗糙带可以影响其表面的压力分布,且粗糙带的前后边界会造成航行体表面压力的波动从而影响航行体的空化初生特性;

(2)通过敏感度分析得出,相比于位置和宽度,粗糙带的高度对航行体的初生空化数影响最大;

(3)经过数值计算验证了代理模型的方法具有较好的预测精度。代理模型方法寻优选出的粗糙带可有效提高航行体的表面压力,可将初生空化数降低3.26%。

### 参 考 文 献:

- [1] 王 勇,刘厚林,谈明高. 泵汽蚀研究现状及展望[J]. 水泵技术, 2008. 179(1): 1-4+10.  
Wang Yong, Liu Houlin, Tan Minggao. Pump cavitation research status and outlook[J]. Pump Technology, 2008. 179(1): 1-4+10. (in Chinese)
- [2] 戚定满,鲁传敬,何友声. 空化噪声谱特性研究[J]. 振动与冲击, 1999(3): 34-38+98.  
Qi Dingman, Lu Chuanjing, He Yousheng. Characterisation of the cavitation noise spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999(3): 34-38+98. (in Chinese)
- [3] 潘森森,彭晓星. 空化机理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
Pan Sensen, Peng Xiaoxing. Physical mechanism of cavitation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [4] Arakeri V H, Acosta A J. Viscous effects in the inception of cavitation on axisymmetric bodies[J]. Journal of Fluids Engineering, 1973, 95(4): 519-527.
- [5] Pan S S, Yang Z, Hsu P. Cavitation inception tests on axisymmetric headforms[J]. Journal of Fluids Engineering, 1981, 103(2): 268-272.
- [6] Katz J, O'herm T J. Cavitation in large scale shear flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 1986, 108(3): 373-376.
- [7] 陈 倩,吴 钦,黄 彪,等. 绕前缘粗糙水翼非定常空化流动实验研究[C]//第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集(上册), 2019.  
Chen Qian, Wu Qin, Huang Biao, et al. Experimental study of non-constant cavitation flow around a leading edge rough hydrofoil[C]//Proceedings of the 30th National Symposium on Hydrodynamics and the 15th National Hydrodynamics Symposium (Upper Volume), 2019. (in Chinese)
- [8] 李清华. 离心泵叶片前缘粗糙带空化特性的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.  
Li Qinghua. Study on the cavitation characteristics of the rough belt on suction surface of centrifugal pump blade[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [9] 戴月进,张媛媛,黄典贵. 水翼表面粗糙带对空化抑制效果的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(5): 770-773.  
Dai Yuejin, Zhang Yuanyuan, Huang Diangui. Numerical study of the impact of hydrofoil surface roughness on cavitation suppression[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(5): 770-773. (in Chinese)
- [10] 傅琳琅,胡常莉. 粗糙带对绕平头回转体初生空化流动特性的影响研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(8): 1120-1128.  
Fu Linlang, Hu Changli. Influence of rough band on characteristics of inception cavitating flows around an axisymmetric body with blunt headform[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(8): 1120-1128. (in Chinese)
- [11] Churkin S A, Pervunin K S, Kravtsova A Y, et al. Cavitation on NACA0015 hydrofoils with different wall roughness: High-speed visualization of the surface texture effects[J]. Journal of Visualization, 2016, 19(4): 587-590.
- [12] 韩翔希,张 恒,冯志强,等. 基于RBF神经网络的渔船尾部型线两目标优化[J]. 船舶工程, 2018, 40(10): 35-39+58.

- Han Xiangxi, Zhang Heng, Feng Zhiqiang, et al. Two-objective optimization of fishing boat stern form line based on RBF neural network[J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(10): 35–39+58. (in Chinese)
- [13] 赵宇, 王国玉, 黄彪, 等. 基于代理模型方法的串列泵优化设计[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(3): 438–447+454.
- Zhao Yu, Wang Guoyu, Huang Biao, et al. Optimization design of tandem pump based on surrogate method[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(3): 438–447+454. (in Chinese)
- [14] 杜向党, 石秀华, 史娟娟. 水下航行器壳体外形优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2005(5): 23–24.
- Du Xiangdang, Shi Xiuhua, Shi Juanjuan. The optimal design of the shape of AUV[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2005(5): 23–24. (in Chinese)
- [15] 杨潇. 基于 CFD 的游艇流体力学仿真及艇身造型优化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- Yang Xiao. Fluid mechanics simulation and hull shape optimization of yacht based on CFD[D]. Chengdu: School of Mechanical and Electrical Engineering, 2020. (in Chinese)
- [16] 胡常莉. 绕回转体空化流动特性与机理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- Hu Changli. Study on the physical mechanism of cavitating flows around axisymmetric bodies[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)