

引用格式: 宋科委, 龚杰, 杨海燕, 等. 阻流板对规则波中船舶阻力及运动特性影响研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(增刊 1): 28–34.  
SONG K W, GONG J, YANG H Y, et al. Influence of interceptor on ship resistance and motion characteristics in regular waves[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(Supp 1): 28–34 (in Chinese).

# 阻流板对规则波中船舶阻力及运动特性影响研究

宋科委<sup>1</sup>, 龚杰<sup>2,3</sup>, 杨海燕<sup>1</sup>, 葛坤玮<sup>1</sup>

1 江苏航运职业技术学院 船舶与海洋工程学院, 江苏 南通 226010

2 武汉理工大学 高性能舰船技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063

3 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

**摘要:** [目的] 旨在分析阻流板对规则波中船舶阻力及运动特性的影响。[方法] 以一条半排水型方尾船为研究对象, 基于RANS方法并结合重叠网格技术进行阻流板安装前后船舶在规则波中的阻力与运动特性数值仿真, 总结船舶阻力、姿态与运动响应随波长与航速的变化规律。[结果] 结果表明: 阻流板在规则波中的减阻率比静水减阻率大1.03%~2.43%; 阻流板对垂荡和纵摇传递函数的影响随着波长的增大而变大,  $\lambda = 2L_{pp}$ 工况下的垂荡传递函数  $T_{F3}$  和纵摇传递函数  $T_{F5}$  平均降低了3.5%和1.4%; 当船舶出现甲板上浪时, 阻流板可使  $T_{F3}$  和  $T_{F5}$  的降低率分别达到9%和3%。[结论] 研究方法与研究成果可为船舶节能装置设计与性能预报提供技术参考。

**关键词:** 船舶阻力; 规则波; 阻流板; 运动响应; 数值模拟

中图分类号: U661.73

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03462

## Influence of interceptor on ship resistance and motion characteristics in regular waves

SONG Kewei<sup>1</sup>, GONG Jie<sup>2,3</sup>, YANG Haiyan<sup>1</sup>, GE Shenwei<sup>1</sup>

1 School of Ship and Ocean Engineering, JiangSu Shipping College, Nantong 226010, China

2 Key Laboratory of High Performance Ship Technology of the Ministry of Education,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

3 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430063, China

**Abstract:** [Objectives] This study analyzes the influence of interceptors on the resistance and motion characteristics of ships in regular waves. [Methods] Taking a semi-displacement ship as the research object, the numerical simulation of its resistance and motion characteristics with and without interceptors in regular waves is carried out based on the RANS method and overset mesh. The variation laws of ship resistance, attitude and motion response with wavelength and ship speed are summarized. [Results] The results show that the resistance reduction effect of interceptors in regular waves is about 1.03%–2.43% higher than that in calm water. The influence of interceptors on the heave and pitch transfer functions increases with the increase in wavelength. The average reduction rates of heave transfer function  $T_{F3}$  and pitch transfer function  $T_{F5}$  under  $\lambda = 2L_{pp}$  conditions are 3.5% and 1.4%. When the phenomenon of green water on deck occurs, the interceptors can reduce  $T_{F3}$  and  $T_{F5}$  by 9% and 3%. [Conclusions] The results of this study can provide valuable technical references for the design and performance prediction of ship energy-saving devices.

**Key words:** ship resistance; regular wave; interceptor; wave response; numerical simulation

收稿日期: 2023-07-15 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 江苏省自然科学基金青年项目 (BK20230285); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究项目 (23KJB580004); 国家自然科学基金资助项目 (52201376); 南通市科技计划项目 (JC12022094)

作者简介: 宋科委, 男, 1991年生, 博士, 讲师。研究方向: 船舶推进与节能。E-mail: songkewei1125@126.com

龚杰, 男, 1991年生, 博士, 讲师。研究方向: 船舶计算流体力学。E-mail: gongjie21@whut.edu.cn

\*通信作者: 宋科委

## 0 引言

船舶在高速航行时往往伴随着剧烈的运动和急剧增大的航行阻力。对于高速滑翔艇, 阻流板等船尾附体的安装能够起到调整船舶航行姿态的目的<sup>[1]</sup>。对于中高速水面舰船来说, 这些艉部附体具有较好的减阻作用<sup>[2]</sup>。

在阻流板的作用机理研究方面, Brizzolara<sup>[3]</sup>基于 CFD 求解器对二维阻流板的绕流场进行数值模拟, 通过分析阻流板安装区域的速度分布、压力分布等流场信息, 总结了阻流板的水动力作用机理。Mansoori 等<sup>[4]</sup>通过数值仿真求解了阻流板在不同高度和攻角下的固定平板绕流场, 发现阻流板的效能与平板末端的边界层厚度成正比。Jacobi 等<sup>[5]</sup>基于粒子图像测速 (PIV) 测量得到了安装阻流板前后的船尾区域速度场, 并对三维流场进行了扫描重构, 分析了安装阻流板带来的阻滞流和引起的升力改变。Deng 等<sup>[6]</sup>基于数值方法研究了阻流板对深 V 型船黏性流场的影响, 分析了船舶阻力、升力、船底压力分布和艉部速度分布的变化。

在阻流板的参数设计与作用效果预报方面, Karimi 等<sup>[7]</sup>针对安装了不同深度阻流板的船模进行阻力试验研究, 结果表明, 单体滑翔艇的减阻率最高可达 15%, 双体滑翔艇也能够取得 12% 的减阻效果。Pacuraru 等<sup>[8]</sup>研究了阻流板对多瑙河及黑海沿岸的快速排水型客船快速性的影响, 分析表明, 性能最优的阻流板可使该船型的有效功率降低 2.8%~8.8%。朱锋等<sup>[9]</sup>研究了阻流板和水平翼的组合附体对深 V 型艇水动力性能的影响, 结果显示该艇的运动姿态得到了较大幅度的改变, 过渡状态下的船模阻力降低率可达 18.97%。

目前, 阻流板在半排水型舰船上的研究聚焦于静水条件, 规则波对阻流板的减阻与减摇性能影响有待阐明。因此, 本文将在前期阻流板静水试验与数值研究<sup>[10]</sup>的基础上, 进行多种波浪工况下的数值仿真, 分析波浪条件下的减阻效果与静水条件下的差异, 总结船舶阻力、姿态与运动响应随波长与航速的变化规律。

## 1 数值计算方法

本文数值研究基于 STAR-CCM+ 软件, 其求解器使用有限体积法。湍流模型采用 SST  $k-\omega$  模型<sup>[11]</sup>, 自由液面的模拟基于流体体积法 (VOF) 模型。对于空间离散, 采用对流项二阶迎风格式, 时间的离散采用一阶格式。采用动态流体固

态相互作用 (DFBI) 模型来计算船体运动对流体力的响应<sup>[12]</sup>, 该模型能够整合物体表面的压力和剪切力。

### 1.1 控制方程

不可压缩牛顿流体的运动满足连续性和动量守恒方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \frac{1}{Re_{\text{eff}}} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \right] + \mathbf{S} \quad (2)$$

式中:  $\nabla$  为向量算子;  $\mathbf{u}$  为速度矢量;  $\mathbf{S}$  为源项;  $Re_{\text{eff}}$  为有效雷诺数;  $p$  为无量纲压力。定义

$$p = \frac{p_{\text{abs}}}{\rho U_0^2} + \frac{2}{3} k_e, \quad Re_{\text{eff}} = \frac{U_0 L}{\nu + \nu_t} \quad (3)$$

式中:  $p_{\text{abs}}$  为绝对压力;  $U_0$  和  $L$  分别为参考速度和参考长度;  $\nu$  为运动黏度;  $\nu_t$  为湍动黏度;  $k_e$  为湍动能。

### 1.2 数值造波技术与数据处理

在 STAR-CCM+ 求解器中, 规则波的产生由计算域的进口和出口边界条件来完成。进口处自由液面的位置定义为

$$\eta(t) = a \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad (4)$$

进口处速度分量可定义为

$$u = a\omega \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t + \varphi) \quad (5)$$

$$w = a\omega \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t + \varphi) \quad (6)$$

式中:  $a$  为波幅;  $k$  为波数;  $\omega$  为波浪的圆频率;  $\varphi$  为初始相位;  $z$  为垂向坐标;  $d$  为水深;  $u$  和  $w$  分别为轴向和垂向速度。

为了避免波反射, 在计算域的出口边界设置了波阻尼函数<sup>[13]</sup>, 其修正后的动量方程表达式为<sup>[14]</sup>

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \mu(x)u \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \mu(x)v \quad (8)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $\mu$  为阻尼系数, 在入射波方向采用线性阻尼形式。

$$\mu(x) = \begin{cases} a_s(x-x_0)/L_s, & x > x_0 \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $x_0$  为波开始被吸收的位置;  $L_s$  为阻尼层的

长度;  $a_s$  为消波强度系数。本文中  $a_s$  取为 2, 消波区间为  $3 < x/L_{pp} < 4$ 。

波浪作用于船舶的频率为遭遇频域  $f_e$ , 其定义为

$$f_e = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda} + \frac{U}{\lambda}} \quad (10)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $U$  为水流速度;  $\lambda$  为波长。

将计算得到的船舶阻力系数、垂荡和纵摇值进行快速傅里叶变换 (FFT), 阻力系数的 0 阶幅值为规则波中的平均受力。

将垂荡和纵摇的一阶幅值进行无量纲化, 得到幅值的响应因子 (RAO), 即传递函数 (TF), 其定义如下:

$$T_{F3} = \frac{z_1}{a}, \quad T_{F5} = \frac{\theta_1}{ak} \quad (11)$$

式中:  $T_{F3}$  和  $T_{F5}$  分别为垂荡和纵摇传递函数;  $z_1$  和  $\theta_1$  分别为垂荡和纵摇的 1 阶幅值。

### 1.3 计算模型与计算工况

本文所使用的船舶为一条半排水型单体方尾船, 具有 V 字型艏和方形尾, 还安装有两对减摇鳍。船舶设计航速为 18 kn, 对应的弗劳德数  $Fr = 0.4$ 。船舶几何外形及坐标系见图 1, 船模具体参数见表 1, 模型计算时的缩尺比为 1:16。



图 1 船舶几何模型

Fig. 1 Geometric model of ship

表 1 船舶主尺度

Table 1 Main parameters of ship

主尺度	实船	船模
船长 $L_{pp}/m$	106.72	6.670
船宽 $B/m$	12.13	0.758
吃水 $T/m$	3.84	0.240
排水体积 $\Delta/m^3$	2 249	0.549
湿表面积 $S/m^2$	1 396	5.453

在文献 [10] 中, 静水阻力试验与仿真结果表明, 当阻流板的深度  $d$  为  $0.15\%L_{pp}$  时, 阻流板具有较好的减阻特性。本文数值仿真计算仍基于上述阻流板模型。图 2 给出了阻流板在艏封板的安装布置情况, 其中阻流板的展长为 281 mm, 艏封板底边的宽度为 648 mm, 两侧阻流板的间距为 42 mm。

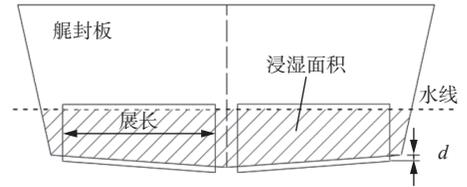


图 2 阻流板的安装布置图

Fig. 2 Installation layout diagram of interceptor

分别基于裸船体 (BH) 和安装阻流板的船体 (INT) 进行不同波浪工况下的数值仿真。如表 2 所示, 选取了 3 种波长, 分别为  $0.5L_{pp}$ ,  $L_{pp}$  和  $2L_{pp}$ , 波陡  $ak = 0.0075$ 。航速的研究范围  $Fr$  为  $0.233 \sim 0.584$ , 对应的遭遇频域的范围  $f_e$  为  $0.483 \sim 1.979$ 。

表 2 计算波浪工况

Table 2 Simulation wave conditions

$\lambda/L_{pp}$	$ak$	$f_e$	$Fr$
0.5	0.007 5	1.249	0.233
		1.332	0.300
		1.412	0.334
		1.494	0.400
		1.654	0.467
		1.817	0.500
		1.897	0.534
		1.979	0.584
		1.0	0.007 5
0.807	0.300		
0.847	0.334		
0.889	0.400		
0.969	0.467		
1.050	0.500		
1.090	0.534		
1.131	0.584		
2.0	0.007 5		
		0.504	0.300
		0.524	0.334
		0.545	0.400
		0.585	0.467
		0.625	0.500
		0.645	0.534
		0.666	0.584

### 1.4 计算域和网格结构

考虑到船模的对称性, 数值计算时对半侧船模进行求解。基于重叠网格技术来模拟船体在波浪中的运动, 计算时允许船舶进行垂荡及纵摇运动。计算域分为背景域和重叠域两部分。由于出

口边界处设置波阻尼函数, 船尾距离出口边界比静水阻力计算域要大。背景域在长、宽、高方向上的尺寸依次为:  $-3 < X/L_{pp} < 2$ ,  $0 < Y/L_{pp} < 1$ ,  $-2 < Z/L_{pp} < 1$ 。重叠域在长宽高方向上的尺寸依次为:  $1.50L_{pp}$ ,  $0.15L_{pp}$ ,  $0.30L_{pp}$ 。

如图 3 所示, 计算域的边界条件设置为: 入口为速度入口; 顶部和底部为速度入口, 模拟了无限远场边界条件; 出口为压力出口; 两侧为对称平面; 船体与附体表面设为无滑移壁面。

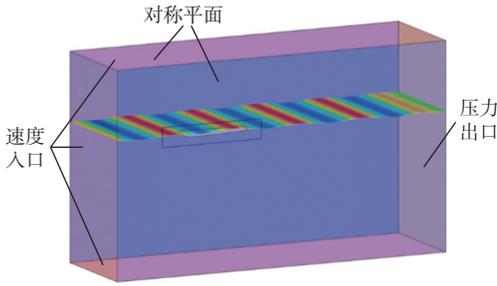


图 3 数值计算域

Fig. 3 Numerical computational domain

图 4 给出了计算域的网格划分情况。在规则波中船舶波浪增阻及运动性能求解时, 需重点对自由液面的网格进行加密。根据 ITTC 规程<sup>[15]</sup>的推荐, 在轴向方向上每个波长划分了不少于 60 个网格单元, 在垂向方向上每个波高划分了 20 个网格单元。船体边界层网格取为 5 层, 网格过渡比取为 1.3。最终用于计算的网格数量为计 766 万。时间步长取为波浪周期的 0.004 倍, 即每个波浪周期内 250 个时间步。

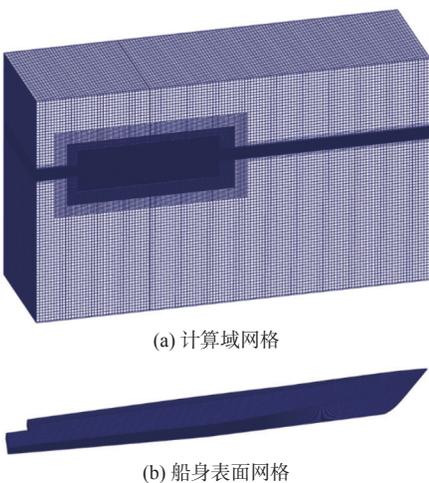


图 4 计算域网格划分情况

Fig. 4 Mesh generation of computational domain

## 1.5 网格不确定度分析

为了验证本文所使用的网格拓扑形式, 基于 Richardson<sup>[16]</sup> 外推方法开展网格的不确定度分析, 所选取的工况为  $Fr = 0.4$ ,  $\lambda = L_{pp}$ ,  $ak = 0.075$ 。将

网格细化比  $r$  设定为  $\sqrt{2}$ , 基于同一网格拓扑结构, 通过调整非边界层网格的基本参数, 生成了 3 套网格, 分别为细网格  $G_f$  (766 万)、中网格  $G_m$  (295 万) 和粗网格  $G_c$  (128 万)。基于细网格、中网格、以及粗网格的计算结果分别记为  $S_f$ ,  $S_m$  和  $S_c$ 。网格收敛率  $R_G$  定义为

$$R_G = |S_f - S_m| / |S_m - S_c| \quad (12)$$

准确阶数  $P_{RE}$  定义为

$$P_{RE} = \ln(|S_m - S_c| / |S_f - S_m|) / \ln(r) \quad (13)$$

距离度量标准渐近范围  $P_G$  的定义为

$$P_G = P_{RE} / P_{th} \quad (14)$$

式中,  $P_{th}$  为理论准度, 其大小取为 2。

网格不确定度  $U_G$  可以由下式计算得到:

$$U_G = \begin{cases} (2.45 - 0.85P_G) \left| \frac{(S_f - S_m)}{(r^{P_{RE}} - 1)} \right|, & 0 < P_G \leq 1 \\ (16.4P_G - 14.8) \left| \frac{(S_f - S_m)}{(r^{P_{RE}} - 1)} \right|, & P_G > 1 \end{cases} \quad (15)$$

不同网格下的阻力 ( $C_0$ ) 和传递函数计算结果见表 3。可以看出, 3 套网格计算结果的差别不大,  $G_c$  和  $G_f$  之间的阻力和传递函数差值在 3% 以内。网格不确定验证数据在表 4 中给出, 网格收敛率  $R_G$  小于 1, 单调收敛。阻力和传递函数的网格不确定度  $U_G$  都在 5%  $S_f$  ( $G_f$  计算结果) 以内, 说明这套网格拓扑形式表现出了良好的收敛性, 后续计算都将基于细网格进行。

表 3 阻力和传递函数计算结果

Table 3 Simulation results of resistance and transfer functions

网格	$C_0$	$T_{F3}$	$T_{F5}$
$G_f$	0.007 329	0.436 4	0.298 2
$G_m$	0.007 341	0.431 5	0.297 1
$G_c$	0.007 398	0.423 5	0.295 5

表 4 阻力和传递函数网格无关性分析

Table 4 Mesh independence analysis of resistance and transfer functions

参数	$R_G$	$P_G$	$U_G / S_f$
$C_0$	0.204 6	2.288 9	0.009 3
$T_{F3}$	0.612 9	0.706 3	0.033 0
$T_{F5}$	0.689 0	0.537 4	0.016 6

## 2 结果与分析

### 2.1 阻流板对规则波中船舶阻力性能影响

安装阻流板后船舶阻力的改变率定义为阻流

板的减阻率。图 5 给出了阻流板的静水减阻率和不同波长下的阻流板减阻率的对比情况。

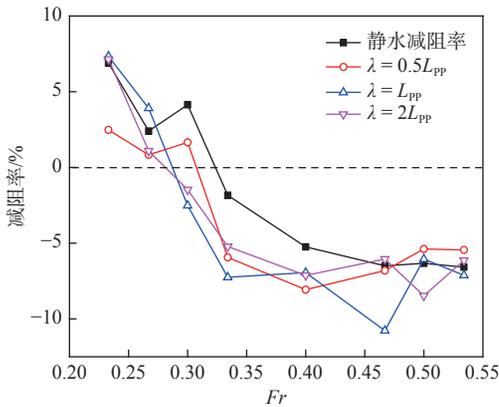


图 5 阻流板减阻率随弗劳德数  $Fr$  的变化

Fig. 5 The variation of resistance reduction rate of interceptor with Froude number

由图 5 可知: 不同工况下的减阻率具有相似的变化规律, 都随着  $Fr$  的增大呈现先增大后趋于平稳的趋势; 阻流板在规则波中的减阻效果优于静水减阻效果, 尤其是在  $0.300 \leq Fr \leq 0.467$  航速范围内; 阻流板在波浪中开始减阻的航速提前, 且随着波长的增大, 开始减阻的航速越小; 当  $Fr \geq 0.334$  时, 阻流板的平均静水减阻率为 5.3%, 而波长为  $0.5L_{pp}$ ,  $L_{pp}$  和  $2L_{pp}$  工况下的平均减阻率分别为 6.33%, 7.63% 和 6.60%, 比静水减阻率大 1.03%~2.43%。

## 2.2 阻流板对规则波中船舶运动特性影响

阻流板的安装会改变船舶的航行姿态。图 6 和图 7 分别为裸船体(BH)和阻流板(INT)安装后船舶纵摇(船倾为正)和垂荡(上浮为正)均值随弗劳德数  $Fr$  的变化关系。由图 6 可以看出: 规则波中的船舶纵倾角  $\theta_0$  会随着波长的增大而变大,  $\lambda = 2L_{pp}$  工况下的船舶纵倾幅度明显大于静水工况; 安装阻流板后船舶纵倾角都会出现一定程度的降低, 且随着波长增大, 阻流板对船舶纵倾角的影响越大; 静水工况下阻流板对船舶纵倾角的影响与  $\lambda = L_{pp}$  工况相当, 纵倾角降幅可达  $0.6^\circ$ 。

由图 7 可知: 船舶的垂荡均值  $Z_0$  会随着波长的增大而减小, 且在安装阻流板后, 船舶的垂荡均值会出现一定程度的降低, 最大改变量可达 6 mm ( $0.025T$ ); 对于工况  $\lambda = 2L_{pp}$ , 船舶垂荡均值在  $Fr \geq 0.467$  时出现降低, 并且安装阻流板前后的垂荡均值差别较小, 这与高航速下船舶出现甲板上浪有关。

图 8 和图 9 分别给出了垂荡和纵摇传递函数随弗劳德数  $Fr$  的变化关系。由上述两图可知:

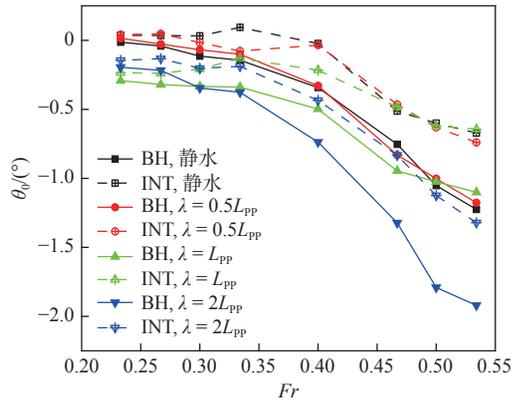


图 6 纵摇均值随弗劳德数  $Fr$  的变化

Fig. 6 Variation of mean value of pitch with Froude number

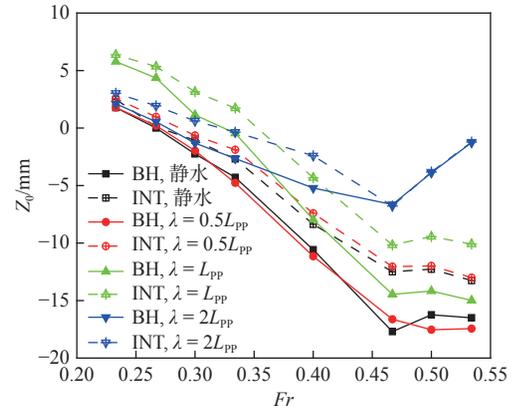


图 7 垂荡均值随弗劳德数  $Fr$  的变化

Fig. 7 Variation of mean value of heave with Froude number

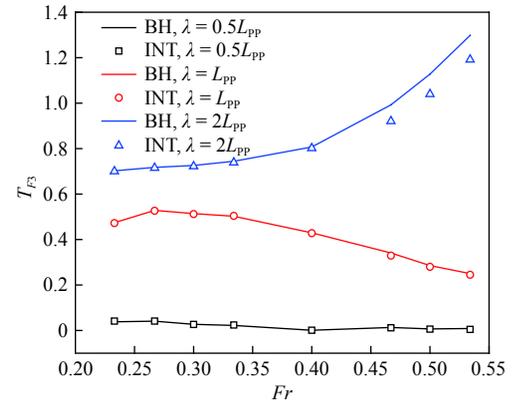


图 8 垂荡传递函数随弗劳德数  $Fr$  的变化

Fig. 8 The variation of heave transfer function with Froude number

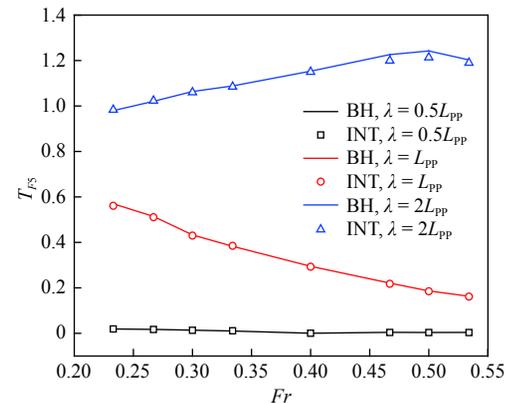


图 9 纵摇传递函数随弗劳德数  $Fr$  的变化

Fig. 9 Variation of pitch transfer function with Froude number

$T_{F3}$  和  $T_{F5}$  会随着波长的增大而变大;  $\lambda = 0.5L_{pp}$  工况下的传递函数是一个小量, 阻流板安装后的差异不明显;  $\lambda = L_{pp}$  工况下的传递函数在安装阻流板后有所下降,  $T_{F3}$  和  $T_{F5}$  的平均降低率分别为 1.5% 和 0.8%;  $\lambda = 2L_{pp}$  工况下的传递函数在安装阻流板前后差异显著,  $T_{F3}$  和  $T_{F5}$  的平均降低率为 3.5% 和 1.4%,  $Fr \geq 0.467$  时的  $T_{F3}$  和  $T_{F5}$  降低率分别可达 9% 和 3%。

### 2.3 阻流板对规则波中船舶绕流场的影响

图 10 和图 11 以工况  $\lambda = L_{pp}$ ,  $Fr = 0.4$  为例给出了安装阻流板前后的波形变化 ( $t/T = 0.25$  时刻), 图中  $Z$  为波高,  $Z/L_{pp}$  为无量纲化波高。由图可见, 自由液面波形是迎浪规则波与开尔文波系的叠加耦合, 波峰到达船首处产生了较为明显的船首破碎波现象; 安装阻流板后, 船尾波系的波高值显著降低, 这也是阻流板使船舶阻力降低的主要原因。

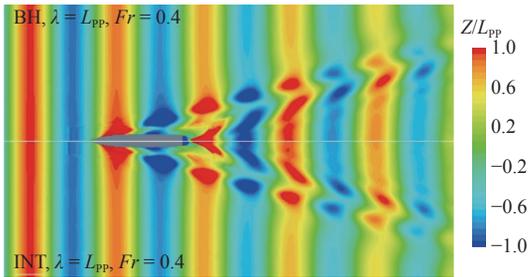


图 10 安装阻流板前后的波形图

Fig. 10 Waveform diagram before and after installing the interceptor

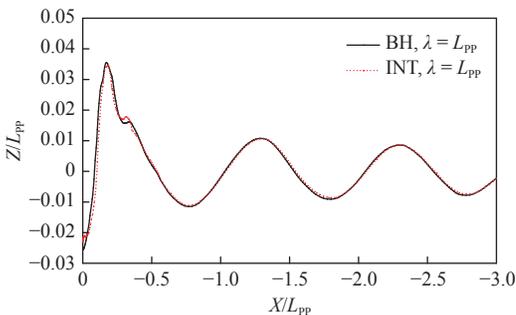


图 11 安装阻流板前后中纵剖面处的纵切波形图

Fig. 11 Longitudinal wave cut at central longitudinal section before and after installing the interceptor

图 12 为  $\lambda = 2L_{pp}$ ,  $Fr = 0.534$  工况下的船舶在  $t/T = 0.25$  时刻的甲板上浪情况。由图 12 可以看出: 阻流板安装前后甲板上浪现象并未得到明显改善; 相较于裸船体, 安装阻流板后的抬艏幅度得到了一定的控制, 其运动相应因子的降幅也要优于其他工况(图 8)。

图 13 为阻流板安装前后的船舶表面压力系数分布情况。由图 13 可以看出,  $t/T = 0.25$  时刻船

尾产生低压, 此时的船舶发生尾倾。阻流板的存在显著改变了船尾处的压力分布, 使其安装区域产生高压, 进而改变了船舶在波浪中的运动姿态与运动响应。

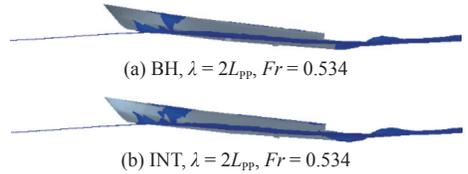


图 12 安装阻流板前后的甲板上浪情况

Fig. 12 Green water on the deck before and after installing the interceptor

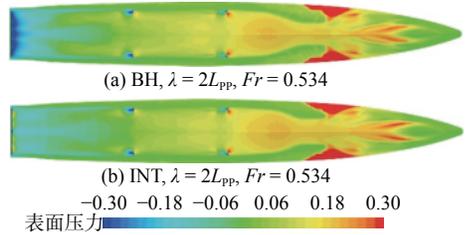


图 13 安装阻流板前后的船舶表面压力分布

Fig. 13 Pressure distribution on the ship surface before and after installing the interceptor

## 3 结 论

本文基于数值仿真手段进行了阻流板对规则波中船舶阻力及运动特性的影响研究。分析了规则波中的阻流板减阻率随波长和弗劳德数的变化规律, 总结了阻流板安装对船舶姿态与运动响应的影响, 并从流场角度对船舶阻力与运动的变化机理进行了剖析。本研究得出的结论如下:

1) 阻流板在规则波中的减阻效果要优于静水减阻效果。规则波中的减阻区间更长, 减阻率比静水减阻率大 1.03%~2.43%。

2) 阻流板的安装会增大船尾压力, 降低船舶的尾倾幅度; 且波长越大, 阻流板对船舶纵倾角的影响越大。

3) 阻流板对垂荡和纵摇传递函数的影响随着波长的增大而变大。  $\lambda = 0.5L_{pp}$  工况下的差异很小,  $\lambda = L_{pp}$  工况下的  $T_{F3}$  和  $T_{F5}$  的平均降低率分别为 1.5% 和 0.8%,  $\lambda = 2L_{pp}$  工况下的  $T_{F3}$  和  $T_{F5}$  的平均降低率分别为 3.5% 和 1.4%。

4) 当船舶出现甲板上浪时, 阻流板对船舶升沉的影响很小, 但对船舶纵摇和垂荡传递函数的影响增大,  $T_{F3}$  和  $T_{F5}$  的降低率分别可达 9% 和 3%。

### 参考文献:

- [1] 邓锐, 陈思源, 马勇, 等. 阻流板对高速船水动力性能影响的 CFD 研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版),

- 2019, 47(5): 90–94, 100.
- DENG R, CHEN S Y, MA Y, et al. CFD study on influence induced by interceptor on high speed vessel's hydrodynamic performance[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2019, 47(5): 90–94, 100 (in Chinese).
- [2] 宋科委, 郭春雨, 龚杰, 等. 阻流板对双桨船阻力和伴流场影响数值研究 [J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(8): 957–964.
- SONG K W, GUO C Y, GONG J, et al. Numerical study on the effect of interceptors on the resistance and wake field of twin-screw ship[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2019, 53(8): 957–964 (in Chinese).
- [3] BRIZZOLARA S. Hydrodynamic analysis of interceptors with CFD methods[C]//7th International Conference on Fast Sea Transportation. Ischia, Italy: FAST, 2003.
- [4] MANSOORI M, FERNANDES A C. Hydrodynamics of the interceptor on a 2-D flat plate by CFD and experiments[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2015, 27(6): 919–933.
- [5] JACOBI G, THILL C H, VANT VEER R, et al. Analysis of the influence of an interceptor on the transom flow of a fast ship by pressure reconstruction from stereoscopic scanning PIV[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 281–292.
- [6] DENG R, CHEN S Y, WU T C, et al. Investigation on the influence induced by interceptor on the viscous flow field of deep-Vee vessel[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 196: 106735.
- [7] KARIMI M H, SEIF M S, ABBASPOOR M. An experimental study of interceptor's effectiveness on hydrodynamic performance of high-speed planing crafts[J]. *Polish Maritime Research*, 2013, 20(2): 21–29.
- [8] PACURARU S, PACURARU F, PRESURA A. Numerical investigation on fast displacement ship hydrodynamics[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Iasi, Romania: IOP Publishing, 2019, 591(1): 012111.
- [9] 朱锋, 陈嘉伟, 何术龙, 等. 带阻流板的高速深 V 艇减阻机理研究 [J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2019, 43(6): 1007–1011.
- ZHU F, CHEN J W, HE S L, et al. Study on drag reduction mechanism in high-speed and deep-V craft with interceptor[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science Engineering)*, 2019, 43(6): 1007–1011 (in Chinese).
- [10] SONG K W, GUO C Y, GONG J, et al. Influence of interceptors, stern flaps, and their combinations on the hydrodynamic performance of a deep-Vee ship[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 170: 306–320.
- [11] 柏铁朝, 许建, 王国栋, 等. 近冰面航行潜艇阻力及绕流场分析 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(2): 36–48.
- BAI T C, XU J, WANG G D, et al. Analysis of resistance and flow field of submarine sailing near the ice surface[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(2): 36–48 (in Chinese).
- [12] 刘垚, 蔡卫军, 王明洲. 基于重叠网格方法的水轮机非定常水动力数值仿真 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(1): 85–92.
- LIU Y, CAI W J, WANG M Z. Numerical simulation for hydrodynamic performance of marine current turbine based on overset grid[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(1): 85–92 (in Chinese).
- [13] WANG W, WU T C, ZHAO D G, et al. Experimental-numerical analysis of added resistance to container ships under presence of wind-wave loads[J]. *PLoS One*, 2019, 14(8): e0221453.
- [14] WANG X Z, LIU L W, ZHANG Z G, et al. Numerical study of the stern flap effect on catamaran' seakeeping characteristic in regular head waves[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 206: 107172.
- [15] ITTC. Recommended procedures and guidelines-practical guidelines for ship CFD Applications[C]//International Towing Tank Conference. Copenhagen, Denmark: ITTC, 2014.
- [16] SONG K W, GUO C Y, SUN C, et al. Simulation strategy of the full-scale ship resistance and propulsion performance[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2021, 15(1): 1321–1342.