



中间渠道 3 000 吨级内河船舶浅水效应研究*

马希钦¹, 李宗激², 冯伟², 易海彬², 刘智航², 徐春燕², 苏喆义²

(1. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;)

摘要: 当前, 高坝通航中采用的中间渠道和串通各大水系的运河渠道设计尚无统一标准, 船舶在渠道内的航行与开敞水域相比具有显著差异。以内河 I 级航道 3 000 吨级散货船代表船型为研究对象, 采用三维流固耦合数值模拟与循环水槽船模阻力试验验证相结合的方法, 研究静水条件下, 船舶于 2 倍船宽渠道内, h/T (水深吃水比) = 1.2、1.3、1.5、2.0、2.5, 航速从 1.0~3.0 m/s, 步长 0.5 m/s 组合工况下, 浅水效应对船舶航行参数的影响。研究结果表明: 当 $h/T < 1.5$ 倍, 航速 > 2.0 m/s 时, 船舶首尾水位差显著增加, 水面比降增大, 纵向受力明显增大, 造成船舶航行总阻力增大。此外, 随着航速增加, 造成船周流速增大, 船周水位和静水压力降低, 船尾静水压力低于船首区域, 船舶下沉和纵倾程度加剧, 最终导致船舶总阻力进一步增大。研究成果可为中间渠道或运河渠道水深设计及船舶安全航速确定提供重要参考。

关键词: 中间渠道; 浅水效应; 船舶阻力; 数值模拟; 水面比降

中图分类号: U66

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0153-09

Shallow water effects on 3,000-ton-class inland waterway vessels in intermediate channel

MA Xiqin¹, LI Zongji², FENG Wei², YI Haibin², LIU Zhihang², XU Chunyan², SU Zheyi²

(1. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Currently, there is no unified standard for the design of intermediate channels and the canals connecting major water systems in high dam navigation. The navigation of vessels within these channels is significantly different from that in open water areas. This paper takes the representative ship type of 3,000-ton-class bulk carrier in inland waterway class I as the research object. The method of three-dimensional numerical simulation of fluid-solid coupling combined with the experimental validation of the resistance test of circulating flume ship model is used to study the influence of shallow water effect on the navigational parameters of the ship under static water conditions in a channel of twice the width of the ship, with h/T (water depth to draft ratio) = 1.2, 1.3, 1.5, 2.0 and 2.5, and speeds ranging from 1.0 to 3.0 m/s, with a step size of 0.5 m/s for combined working conditions. The research results show that when h/T is less than 1.5 times and speed is greater than 2.0 m/s, the water level difference between the bow and stern of the ship increases significantly, the specific drop of water surface increases, and the longitudinal force increases significantly, resulting in an increase in the total resistance of the ship's navigation. In addition, as the speed increases, the flow velocity around the ship increases, the water level and hydrostatic pressure around the ship decreases, and the hydrostatic pressure at the transom is lower than that in the bow area. The degree of sinking and longitudinal inclination of the ship intensifies, ultimately leading to a further increase in the total resistance of the ship. The results of this research can provide important references for the design of water depth of intermediate channels or canal channels and the determination of safe navigation speed of ships.

Keywords: intermediate channel; shallow water effect; ship resistance; numerical simulation; water surface gradient

收稿日期: 2024-12-05

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206103)

作者简介: 马希钦 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 从事枢纽通航、三维流固耦合水动力模拟等方面的研究工作。

中间渠道作为一种灵活的调度运行通道,逐渐被设置于梯级船闸与升船机之间。船舶在狭窄的中间渠道中航行时,船舶阻力和流场特性受浅水效应的影响显著,水体易形成涌浪,不仅会增加船舶阻力与纵倾幅度,还会在船舶两侧产生不对称侧向力,加剧船舶操纵难度。目前,高坝通航中采用的中间渠道和串通各大水系的运河渠道设计尚无统一标准,现行国内外规范针对中间渠道航行条件的指导依据较少,亟需系统性研究中间渠道船舶航行水深与航速变化对阻力的综合影响,为中间渠道或运河渠道水深设计及船舶安全航速提供参考依据。

对于内河船舶和在沿海水域及港口航行的运输船舶,有限的水深会在不同程度上影响船舶阻力。对于深水的预测方法,如 Holtrop 等^[1]的方法,由于未考虑浅水的影响而不太适用。因此,船舶阻力的研究正逐步从深水环境转向浅水及封闭水域。徐双喜等^[2]运用数值计算与模型试验相结合的方法研究浅水阻力,运用经验公式确定各航速工况下的下沉量,再运用数值计算方法计算计入下沉量后的航行阻力。徐晓森^[3]采用数值计算方法计算了内河千吨级肥大型系列船型在不同水深下的阻力和船型波变化情况,得到不同工况下的剩余阻力系数,生成了剩余阻力系数和傅汝德数的关系图谱。吴建林等^[4]以瓯江下游的浅吃水肥大船作为研究对象,对考虑自由面的船舶阻力性能进行分析,比较深水和浅水下的阻力性能差异,分析了浅水中船舶阻力和各阻力分量的变化以及浅水对兴波的影响。孙帅等^[5]对 KCS 标准船模开展数值预报分析,探究水深变化对船舶阻力及流场特性的影响,得出随着水深的减小,艏艉压力差增大、艏倾现象更明显;船舶阻力系数、 z 方向抽吸力以及桨盘面伴流分数均增大。赵大刚等^[6]通过改变阻塞比和航速对两种船型船舶阻力进行数值计算,获得了阻塞效应的影响规律,对拖曳水池的阻塞效应修正提出了合理化建议。朱广春等^[7]分析水深吃水比为 1.5 的浅水条件下,船舶在不同航速下的阻力和流场变化规律,提出可以

通过降低航速有效减缓浅水增阻效应。俞中奇等^[8]根据 1 000 吨级散货船在限制性Ⅲ级航道中的阻力试验结果,提出适合内河限制性Ⅲ级航道的船舶阻力估算公式。魏泽等^[9]对不同水深下的高速排水型船舶的兴波波形及兴波阻力进行实验及数值研究,比较不同方法求得的兴波阻力系数,检验了数值计算方法的可行性。周华兴等^[10]通过对船舶阻力的计算,根据影响船舶阻力的主要因素对深水、浅水以及限制性航道进行了界定说明。Tarafder 等^[11]采用势流理论的方法对船舶在浅水条件下的水动力进行了研究。Pavkov 等^[12]和 Yun 等^[13]用船模水池试验对浅水中船舶阻力和下沉进行了研究。Elsherbiny 等^[14]采用数值模拟和水池试验的方法对标准船型 KCS 通过不同航道时的水动力性能进行了研究。

本文通过 CFD(计算流体动力学)对内河Ⅰ级航道 3 000 吨级散货船在浅水中航行时增阻和流场特性进行数值研究,采用三维流固耦合数值模拟,结合循环水槽船模阻力试验验证的方法,以渠道宽度为 2 倍船舶宽度的中间渠道为基准,依次改变 h/T (水深吃水比) = 1.2、1.3、1.5、2.0、2.5 (h 为渠道内水深; T 为 3 000 吨级船舶吃水 4.3 m),航速 1.0~3.0 m/s,步长 0.5 m/s 组合工况下,分析 3 000 吨级散货船在不同水深、航速下的阻力和流场变化规律,探讨浅水效应影响下阻力增加的原因。

1 数学模型建立

1.1 基本方程

本研究使用有限差分法(FDM)求解三维瞬态雷诺时均化的 Navier-Stokes 方程。使用自动时间步长调整确保仿真的稳定性和收敛性,选择广义最小残差(GMRES)算法迭代求解线性压力方程组,有效提高仿真的收敛性,显著缩短计算时间。并且基于 RNG k-Epsilon 湍流模型对船体周围的湍流进行模拟,相较于普通的 k-Epsilon 模型,能够更好地模拟低强度湍流以及强剪切运动。相关方程^[15-16]如下。

连续性方程 (质量守恒方程):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases} \quad (2)$$

湍动能方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &\rho \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon}^* G - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 和 z 方向相对于来流速度 V 的量纲为一的速度分量; G_x 、 G_y 、 G_z 为 x 、 y 和 z 方向的重力加速度; f_x 、 f_y 、 f_z 为 x 、 y 和 z 方向的黏滞力; A_x 、 A_y 、 A_z 表示流体在 x 、 y 、 z 方向上的有效流通面积或截面积分量; V_F 为可流动的体积分量; x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 方向坐标; u_i 、 u_j 为流速在 i 、 j 方向上的速度分量, m/s ; P 为压力, Pa ; ρ 为密度, kg/m^3 ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; k 为湍动能, m^2/s^2 ; $C_\mu = 0.085$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 0.7179$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$; μ 为分子黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t 为湍流黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; G 为湍动能产生项, m^2/s^3 , $C_{1\varepsilon}^*$ 为与 μ 相关的函数。

1.2 模型建立与网格划分

不同船型在中间渠道内航行时,由于船舶外形和尺寸的差异,所受阻力也存在显著差别。因此,船舶选型成为本研究中的一个重要考虑因素。鉴于 I 级航道的货运需求较大,且该类航道通常配有升船机或中间渠道设计,同时目前关于 I 级航道代表船型 3 000 吨级散货船的阻力研究尚显不足,本研究选取该船型为研究对象,船舶模型按 1:1 比例建

立,船长 92 m、船宽 16.2 m、设计吃水 4.3 m。船舶模型见图 1,探讨其在浅水效应下的阻力特性。

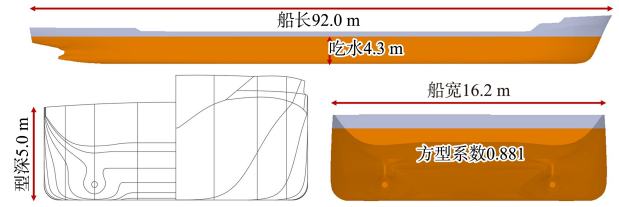
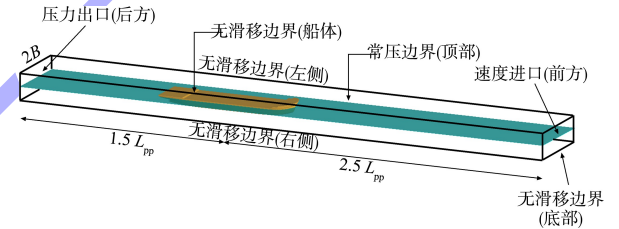


图 1 3 000 吨级船舶模型

Fig. 1 3,000-ton-class ship model

三维数学计算模型及其边界条件见图 2。为了避免速度进口水流对船首水位的影响,船首前方需预留足够的空间。因此,计算域在船首部向前延伸 2 倍船长 (184.0 m),船尾部向后延伸 1 倍船长 (92.0 m)。渠道宽度设置为船舶宽度的 2 倍 (32.4 m)。速度进口边界设定为定常均匀流入边界,渠道两侧及底部设为不可渗透且无滑移的壁面边界,压力出口边界设为自由出流边界,顶部边界则设定为大气常压边界。



注: B 为船宽; L_{pp} 为船长。

图 2 数学模型及边界条件

Fig. 2 Mathematical model and boundary conditions

为简化模拟范围,基于伽利略惯性参考系^[17],给定水流恒定流速,并限制船舶的六自由度运动,使船舶保持静止状态。通过将水流相对于船舶的来流速度视为船舶在静水中的航行速度,以实现船舶的相对运动。在水深较浅的中间渠道内航行时,船体与水体之间的相对运动会引发较为剧烈的水流紊动。为了精确捕捉水流变化,需对船体与水体接触区域以及水体与边壁接触区域的计算网格进行加密,以提高模拟精度。

本研究对船体所在区域的网格进行整体均匀加密处理。网格划分见图 3,在 X 方向,船体周围的网格尺寸设置为 0.4 m,远离船体的区域网格尺寸为 0.6 m,最大网格尺寸不超过 1.0 m;在 Y 方

向，由于渠道宽度较窄，整体网格加密尺寸设置为 0.4 m；在 Z 方向，整体网格尺寸同样为 0.4 m，并对水面附近的区域进行细化加密，网格尺寸为 0.25 m，以确保计算结果的准确性。

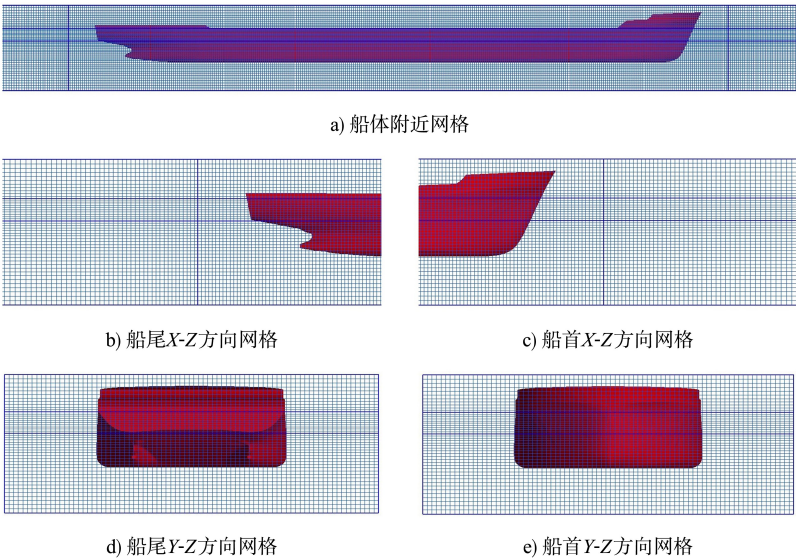


图 3 网格划分
Fig. 3 Mesh division

1.3 数值模拟有效性验证

1.3.1 网格无关性验证

方程误差以及网格误差是 CFD 模拟的主要误差来源。网格的粗细直接影响差分节点之间的插值结果和信息传递，导致不同网格密度产生数值结果具有偶然性。本研究基于 3 种网格尺度避免

数值模拟的计算偶然性。根据 3 种网格尺寸的阻力数值计算结果见表 1，细网格与密网格的计算结果基本一致，继续增加网格数量船舶阻力数值趋于稳定。考虑到网格的数量和计算效率，选取最小网格尺寸为 0.25 m 的细网格划分方案进行后续模拟。

表 1 不同网格密度计算结果对比

Tab. 1 Comparison of calculation results with different mesh densities

网格类型	网格数量/万	最小网格尺寸/m	渠道宽度/m	渠道水深/m	水流速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	船舶阻力数值/kN	相对增长值/%
粗网格	84	0.35	32	8.6	2.5	80	12.67
细网格	181	0.25	32	8.6	2.5	71	—
密网格	450	0.20	32	8.6	2.5	71	—

1.3.2 数值方法验证

本研究采用西南水利水运工程科学研究院循环水槽，针对 3 000 吨级船模开展阻力试验，模型长度为 1.53 m，缩尺比为 1:60。模型尺寸见表 2。循环水槽现场见图 4。

表 2 船体主要参数

Tab. 2 Hull main parameters

类型	船长/m	船宽/m	型深/m	吃水/m
实船	92.0	16.2	5.0	4.3
模型	1.53	0.27	0.08	0.07



图 4 循环水槽
Fig. 4 Circulating flume

循环水槽试验设备主尺度长 18 m、宽 4 m、高 6 m，试验设备计测段长 6 m、宽 1.8 m，入口

水深为 1 m, 最小流速为 0.1 m/s, 最大流速为 2.0 m/s, 针对本次试验船模, 循环水槽试验设备可为实际 3 000 吨级船舶提供 0.8~15.5 m/s 船舶航速。循环水槽概念见图 5。

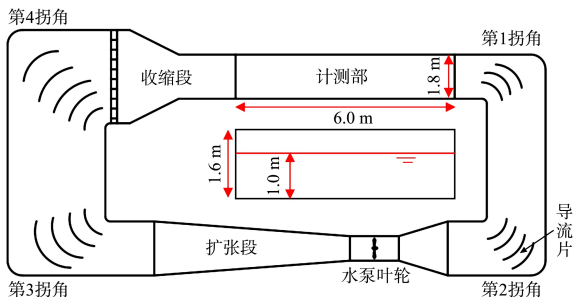


图 5 循环水槽概念图

Fig. 5 Circulating flume conceptual diagram

船模试验安装见图 6, 采用 3D 打印技术进行船体构造, 船体外表面已进行防腐处理、喷漆着色, 并已标注满载吃水线, 吃水线以上和以下部分已用不同颜色加以区分。由于水槽宽度与船宽比为 6.67(大于 3.0), 水深吃水比为 13.95(大于 2.5), 因此可将船舶视为在开阔水域中航行。为验证数学模型的准确性, 本研究使用物理模型试验数据经比尺换算为实际 3 000 吨级船舶于开阔水域航行时的船舶阻力数值, 对 $h/T=2.5$, 航速为 1.0~3.0 m/s 的数学模型阻力进行验证, 结果见图 7。由于试验船模的外表面需要进行防腐处理和喷漆着色, 其表面粗糙度并非完全一致, 导致船体表面的粗糙度并不是一个确定且统一的数值。而在数学船舶模型中, 外表面粗糙度被假设为一致性参数。在船舶航行过程中, 船体表面粗糙度的差异会引起两者摩擦阻力存在差异, 由此造成物理模型与数学模型之间的总阻力差异。然而, 试验结果表明, 其相对误差小于 20%, 处于可接受的范围内。这表明所采用的数值模拟方法具有可靠性, 其对航行阻力的计算精度基本满足研究要求。



图 6 3 000 吨级船模循环水槽试验安装

Fig. 6 Installation of 3,000-ton-class ship model in circulating flume for testing

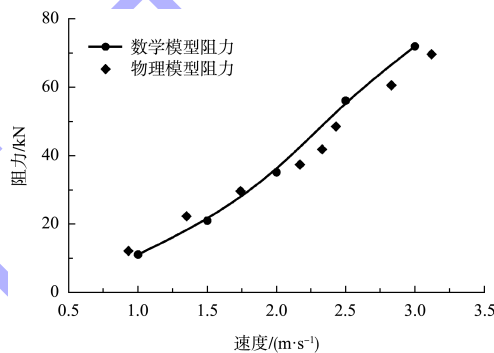


图 7 船舶数值模拟阻力与物理模型试验阻力对比

Fig. 7 Comparison of ship resistance between numerical simulation and physical model test

1.4 计算工况设置

本研究在静水条件下, 以 2 倍船宽的渠道宽度为基础进行数值模拟, 主要考察浅水效应对船舶阻力变化的影响。为突出浅水效应, 选择 $h/T=1.2$ 、 1.3 、 1.5 、 2.0 、 2.5 作为水深变化工况。考虑到船舶在中间渠道正常航行速度为 1.0~3.0 m/s, 设置 5 种水深工况下, 航速 1.0~3.0 m/s, 步长 0.5 m/s, 改变航速进行工况组合, 以全面分析水深对船舶阻力(R_t)的影响。

2 计算结果分析与讨论

2.1 浅水总阻力对比

研究中计算的所有工况下的船舶总阻力见表 3。

表 3 数学计算总阻力

Tab. 3 Mathematical calculation of total resistance

工况	$v/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	R_t/kN				
		$h/T=1.2$	$h/T=1.3$	$h/T=1.5$	$h/T=2.0$	$h/T=2.5$
1	1.0	23.43	21.03	17.64	16.50	11.08
2	1.5	56.52	46.12	33.87	28.55	20.95
3	2.0	107.46	85.33	68.49	47.80	35.12
4	2.5	206.38	145.18	101.98	71.24	56.07
5	3.0	767.31	302.36	167.51	104.12	78.79

通过绘制船舶总阻力曲线，见图 8，可以观察到船舶总阻力随航速的增加而增大，但随着水深的增加，总阻力则呈现减小趋势。当 $h/T>1.5$ ，航速低于 2.0 m/s 时，不同水深工况下的船舶总阻力相差较小，表明在这一条件下，浅水效应对船舶总阻力的影响较小。然而，当航速超过 2.0 m/s 且 $h/T<1.5$ 时，船舶总阻力明显增加，浅水增阻现象十分明显，且此时的总阻力远大于 2.0 倍吃水以上水深的船舶总阻力，表明浅水效应在较高航速和较小水深条件下对船舶阻力的影响尤为显著。

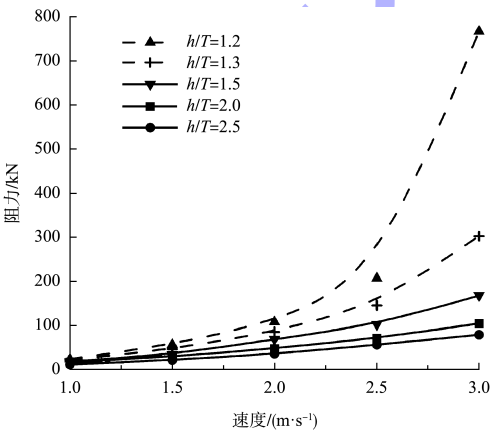


图 8 船舶总阻力曲线对比

Fig. 8 Comparison of ship total resistance curves

不同工况下总阻力的相对增长情况见表 4。当 h/T 为 1.3 和 1.2 ，且速度分别为 2.0 、 2.5 和 3.0 m/s 时，总阻力显著增加。与 2.5 倍吃水条件下的基准阻力相比，其增长幅度分别为 142.96% 、 158.92% 、 283.74% 、 205.96% 、 268.06% 和 873.82% 。

表 4 浅水对船舶阻力的影响（参考 2.5 倍吃水水深）

Tab. 4 Effect of shallow water on ship resistance
(referencing 2.5 times the draft depth)

工况	$v/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	总阻力增幅/%			
		$h/T=1.2$	$h/T=1.3$	$h/T=1.5$	$h/T=2.0$
1	1.0	111.49	89.84	59.28	48.97
2	1.5	169.80	120.17	61.68	36.28
3	2.0	205.96	142.96	95.03	36.10
4	2.5	268.06	158.92	81.88	27.05
5	3.0	873.82	283.74	112.60	32.15

2.2 船舶首尾处水面比降与船舶纵向受力

当船舶在中间渠道航行时，水流受船体挤压，船首处水位因壅水效应上升，从而产生较高的静水压力。相反，船尾处由于回流与涡流系统的形成以及船体排水作用，水位降低并形成负压区，导致静水压力显著下降。由此形成的水位差产生压力差，使船舶在纵向上受到作用力。为探讨水深和航速变化对船舶纵向受力的影响，通过计算船首与船尾水位差，得到各工况下的水面比降 ($J_{\text{纵}}$) 见表 5，进而对纵向静水压力进行量化分析。

表 5 水面比降

Tab. 5 Water surface gradient

工况	$v/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$J_{\text{纵}}/\text{‰}$				
		$h/T=1.2$	$h/T=1.3$	$h/T=1.5$	$h/T=2.0$	$h/T=2.5$
1	1.0	0.39	0.31	0.17	0.11	0.08
2	1.5	0.88	0.67	0.37	0.22	0.17
3	2.0	1.69	1.25	0.62	0.36	0.26
4	2.5	3.17	2.06	1.09	0.58	0.42
5	3.0	7.51	3.86	1.53	0.93	0.55

由船舶纵向分力计算公式 $F_{\text{纵}} = WJ_{\text{纵}}$ 对船舶纵向受力进行计算，其中 W 为载重与船舶自重，按满载吃水考虑，计算得到各工况的船舶纵向受力 ($F_{\text{纵}}$) 见表 6。

表 6 船舶纵向受力

Tab. 6 Longitudinal force on ships

工况	$v/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$F_{\text{纵}}/\text{kN}$				
		$h/T=1.2$	$h/T=1.3$	$h/T=1.5$	$h/T=2.0$	$h/T=2.5$
1	1.0	20.70	16.30	9.21	5.81	4.21
2	1.5	46.65	35.86	19.81	11.66	8.96
3	2.0	89.90	66.22	32.80	19.03	13.97
4	2.5	168.73	109.61	58.20	30.59	22.23
5	3.0	399.24	205.50	81.41	49.26	29.40

船舶纵向受力绘制的航速变化规律曲线见图 9, 水面比降及船舶纵向受力受浅水效应与航速变化的影响显著。随航速变化的水位云图见图 10, 以 1.3 倍吃水深度(纵向受力突变点)为例, 随着航速增加, 船首与船尾水位差明显增加, 水面比降随之增大, 导致船舶纵向受力逐渐增大。当 $h/T < 1.5$ 时, 纵向受力随航速增加呈现突增趋势, 同时水位云图显示船体两侧水位明显下降。这表明, 浅水效应对船舶的主要影响在于其对水位差形成的船舶纵向受力的改变。

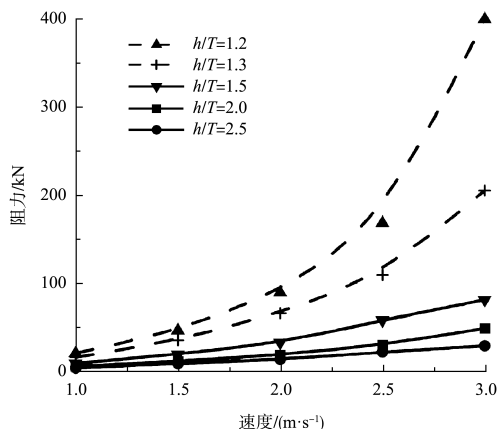


图 9 船舶纵向受力对比曲线

Fig. 9 Comparison curve of longitudinal force on ships

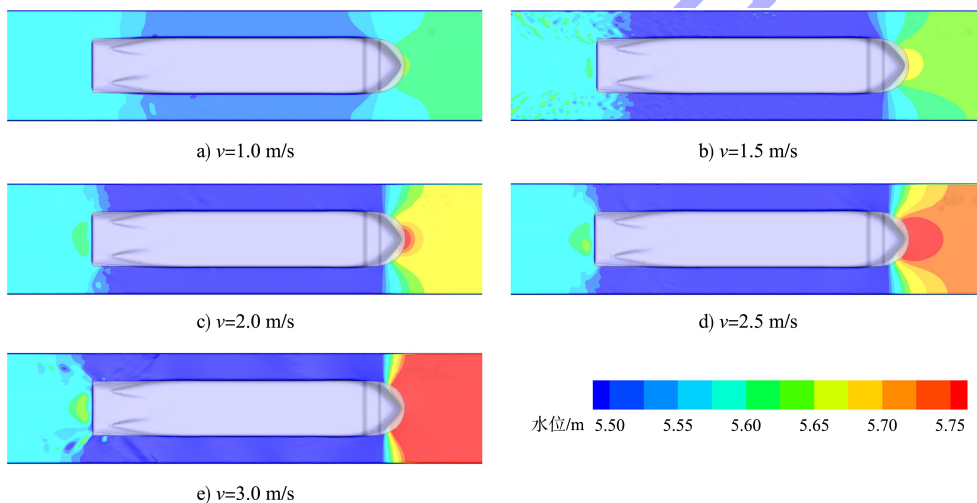


图 10 船周水位云图

Fig. 10 Water level distribution map around ship

2.3 船周压力分布与船周表面流速

根据船舶总阻力曲线对比(图 8)可知, 当 $h/T = 1.2$ 且航速为 2.0 m/s 时, 船舶总阻力出现显著突增现象。船底及船身压力场见图 11, 分析可见, 随着航速从 2.0 增至 3.0 m/s, 船底水体压力显著降低, 尤其靠近船尾区域的压力下降更为明显。

这种压力骤降导致水流紊动程度加剧, 船舶纵倾加重, 水压力分布不均引发水面比降增大, 从而导致兴波阻力显著增加。同时, 水流紊动的增强进一步引起船舶黏性阻力的上升。兴波阻力与黏性阻力的同步增长最终导致船舶总阻力突增。

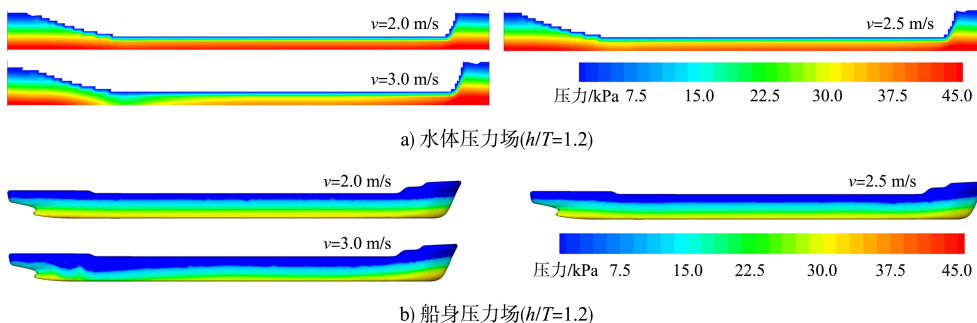


图 11 压力场图

Fig. 11 Pressure field diagram

由于当 $h/T < 1.5$ 且航速超过 2.0 m/s 时，船舶总阻力会出现突增现象。绘制 $h/T = 1.5$ 条件下船舶周围表面流速随航速变化的流速云图见图 12，以及在航速为 2.0 m/s 时船舶周围表面流速随水深变化的流速云图见图 13。

由图 12、13 可知，在相同水深条件下，随船舶航速的增加，船体两侧水体表面流速显著增大，且航速越高，流速增幅越大。当航速固定时，减

小航行水深会导致船体两侧水体表面流速增大，且水深越小，流速的增长幅度越明显。结合船舶周围水位云图(图 10)与压力场图(图 11)分析可知，航速的增加与水深的减小共同导致船体周围流速增大，水位下降显著，尤其在船尾区域水位下降幅度更大，引发船舶纵倾加剧。这一变化进一步导致船周水体紊动增强，排水体积减少，浮力下降，船体下沉，从而显著增加船舶总阻力。

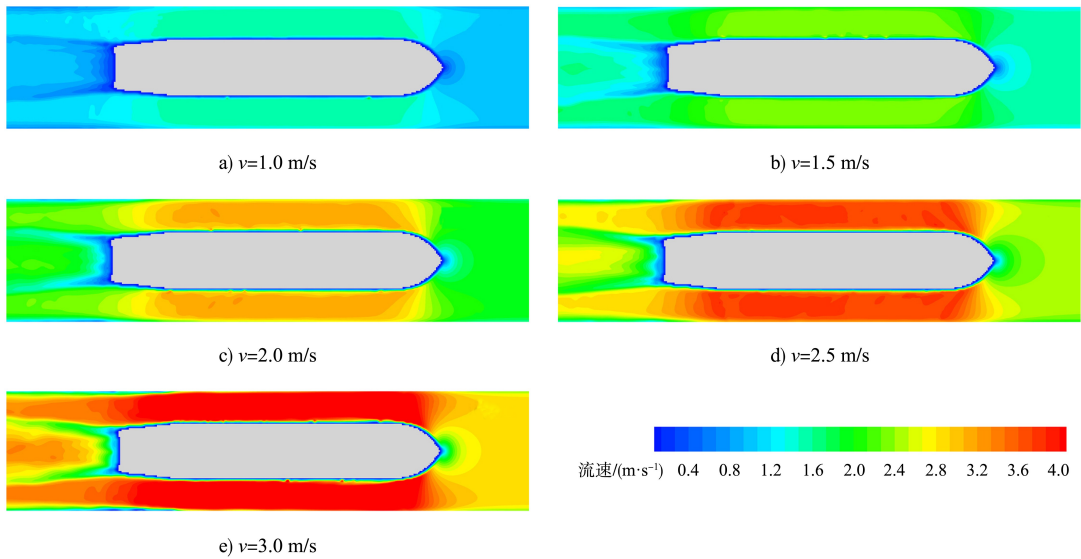


图 12 $h/T = 1.5$ 工况下，表面流速云图
Fig. 12 Surface flow velocity distribution map under condition of $h/T = 1.5$

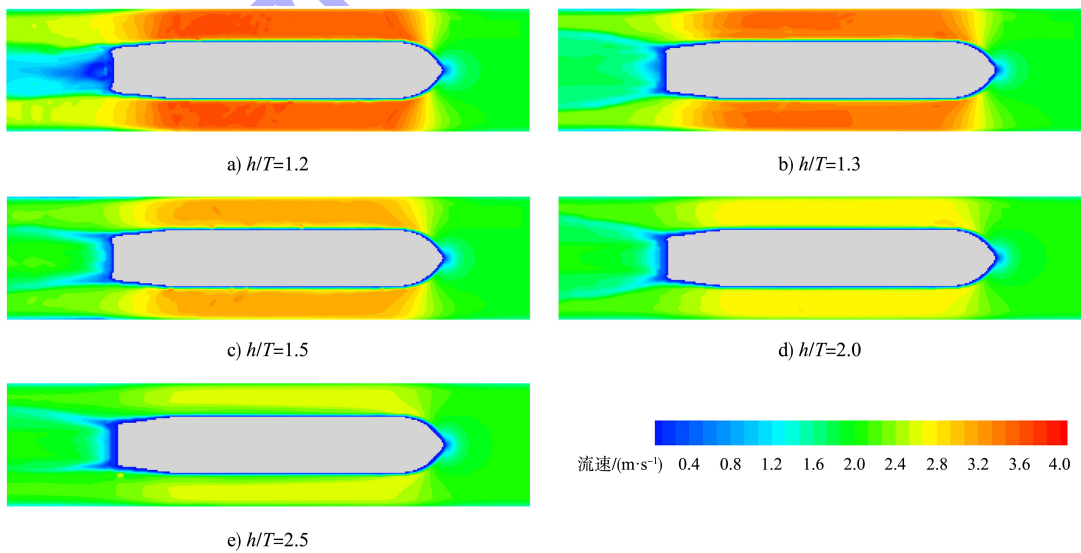


图 13 $v = 2.0 \text{ m/s}$ 工况下，表面流速云图
Fig. 13 Surface flow velocity distribution map under condition of $v = 2.0 \text{ m/s}$

3 结论

1) 研究表明,当渠道宽度为船宽的2倍且水深小于2.0倍吃水时,浅水效应对船舶阻力的影响显著,尤其在 $h/T < 1.5$ 且航速大于2.0 m/s时,船舶总阻力因浅水效应出现突增现象。因此,建议在航道设计中将通航水深设置为船舶吃水的1.5倍以上。若水深低于此标准,需将船舶极限航速控制在2.0 m/s以下,以减少浅水效应的不利影响。

2) 中间渠道内船舶总阻力突变的主要原因是,当水深与吃水比值较小且航速超过极限值时,水位变化剧烈,导致水体紊动增强,从而引发船体下沉和纵倾加剧。由此引起的兴波阻力和黏性阻力同步增大,最终导致总阻力显著增加。为避免船舶失控,应尽量避免因船闸灌泄水操作导致中间渠道内水位剧烈波动。

3) 研究成果可为中间渠道或运河渠道的水深设计及船舶安全航速的确定提供重要参考。本研究未考虑船舶下沉量以及船舶纵倾的变化情况,因此在后续的研究中可进一步探讨浅水效应对船舶下沉量以及船舶纵倾程度的影响。

参考文献:

- [1] HOLTROP J, MENNEN G G J. An approximate power prediction method[J]. International shipbuilding progress, 1982, 29(335): 166-170.
- [2] 徐双喜,林江萍,董威,等. 浅水航道船舶阻力计算方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(3): 414-417, 422.
XU S X, LIN J P, DONG W, et al. Study on calculation method of ship resistance in shallow water[J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2020, 44(3): 414-417, 422.
- [3] 徐晓森. 内河千吨级货船浅水阻力数值仿真及计算方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
XU X S. Numerical simulation and calculation method researches of inland kiloton cargo ships in shallow water[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [4] 吴建林,刘亚东,宁宏洲,等. 瓯江航道浅吃水肥大船的阻力性能分析[J]. 船舶工程, 2015, 37(6): 15-17, 84.
WU J L, LIU Y D, NING H Z, et al. Resistance performance analysis of full ship with shallow draft in Oujiang River [J]. Ship engineering, 2015, 37(6): 15-17, 84.
- [5] 孙帅,王超,常欣,等. 浅水效应对船舶阻力及流场特性的影响分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(4): 499-505.
SUN S, WANG C, CHANG X, et al. Analysis of ship resistance and flow field characteristics in shallow water[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(4): 499-505.
- [6] 赵大刚,郭春雨,阚梓. 拖曳水池阻塞效应对不同船型影响数值研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(6): 575-583.
ZHAO D G, GUO C Y, KAN Z. Numerical study of influence of blockage effect of towing tank on different ship types[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(6): 575-583.
- [7] 朱广春,朱鹏飞,艾万政,等. 大型船舶浅水增阻和流场特性数值研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 169-175.
ZHU G C, ZHU P F, AI W Z, et al. Numerical study on added resistance and flow field characteristics of large ships in shallow water [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (natural science), 2021, 40(2): 169-175.
- [8] 俞中奇,袁章新,周超. 限制性Ⅲ级航道船舶阻力试验研究[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2014, 37(4): 23-27, 49.
YU Z Q, YUAN Z X, ZHOU C. Resistance performance of ships in grade Ⅲ restricted channels [J]. Journal of Shanghai Scientific Research Institute of Shipping, 2014, 37(4): 23-27, 49.
- [9] 魏泽,周利兰,高高. 高速排水型船舶兴波波形与兴波阻力的试验与数值研究[J]. 船海工程, 2012, 41(5): 23-25, 30.
WEI Z, ZHOU L L, GAO G. Experimental and numerical study of the wave pattern and wave-making resistance for high-speed ships [J]. Ship & ocean engineering, 2012, 41(5): 23-25, 30.