

· 综合 ·



内河1万吨级船舶运动仿真研究*

马希钦¹, 徐春燕², 苏喆义², 李宗激², 李旭光², 易海彬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: 以三峡水运新通道1万吨级江海直达新船型为对象, 研究其在内河的操纵性, 旨在完善具备内河条件水动力特征的船舶运动仿真平台。结合数值模拟方法和循环水槽阻力试验, 分析不同水深和运动频率下的船舶横摇、艏摇的水动力导数, 采用船舶操纵(MMG)模型, 编写1万吨级江海直达船的三自由度操纵运动仿真平台, 并利用公开的大比尺船模操纵性试验数据进行验证。结果表明: 回转性、跟随性和制动指标均满足JT/T 258—2021《长江运输船舶操纵性衡准》, 验证了仿真平台的可靠性。研究成果可为内河1万吨级船舶的安全操纵提供一定的理论依据, 也为内河船舶操纵性模拟器的研发提供技术支持。

关键词: 内河1万吨级船型; 操纵性; 运动虚拟仿真

中图分类号: U675.91

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0012-11

Simulation on motion of 10,000-ton class inland waterway vessel

MA Xiqin¹, XU Chunyan², SU Zheyi², LI Zongji², LI Xuguang², YI Haibin²

(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: The maneuverability of a new 10,000-ton class river-sea direct vessel designed for the Three Gorges new navigation channel is investigated in this paper, with the objective of enhancing a ship motion simulation platform that incorporates the hydrodynamic characteristics of inland waterways. Numerical simulation methods are combined with circulating water channel resistance tests to analyze the hydrodynamic derivatives for ship roll and yaw under varying water depths and motion frequencies. By the maneuvering modeling group model, a 3-degree-of-freedom maneuvering motion simulation platform is developed for the 10,000-ton class river-sea direct vessel. The verification of platform's reliability is carried out against publicly available large-scale ship model maneuverability test data. The results demonstrate that the vessel's turning ability, course-keeping, and stopping characteristics all comply with the JT/T 258-2021 *Criteria of Maneuverability for Transport Ship in Yangtze River*, and the platform's reliability is validated. The results provide a theoretical foundation for the safe operation of 10,000-ton class vessels in inland waters and offer technical support for the development of inland ship maneuvering simulators.

Keywords: 10,000-ton class inland waterway vessel; maneuverability; motion virtual simulation

目前,我国为了提高水路运输效率、推动交通产业的进步,发展江海直达船型成为了必然的趋势。然而,内河航运环境复杂多变,内河水深

通常较浅,船舶航行时受到明显的浅水效应影响时,会导致船体下沉、舵效变差等。这些因素都使船舶操纵困难,对航运安全构成威胁。随着船

收稿日期: 2025-05-07 录用日期: 2025-07-04

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB2605803, 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。

舶业的不断发展,船舶操纵性能研究的重要性也随之提升。需要注意的是,内河船舶的设计和航行环境与海船存在显著差异,在将基于或拟用于海船的预测方法用于内河船舶时,应仔细考虑这些差异的影响^[1]。目前大多数研究聚焦于海船,很少有针对内河船只的操纵性研究^[2]。因此单独进行内河船舶操纵性研究显得尤为必要。

船舶操纵性问题的研究方法有多种,例如:直接预报法、计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值方法以及基于系统的研究方法。虚拟仿真模拟因其安全性高、经济性好、操作简便、预报快捷以及便于重复试验的优点,成为备受关注的研究手段^[3]。史琪琪等^[4]采用虚拟现实(virtual reality, VR)技术、3D 成像投影技术研究海上船舶操纵性;闻光华等^[5]利用 Visual Basic 语言,开发出适用于内河船舶操纵性预报的计算程序;杨盐生等^[6]通过建立操纵数学模型及计算机仿真算法,对操纵性进行预报研究。综上所述,现有研究虽各有侧重,但能够融合物理试验数据且专门面向大型内河船型的操纵性仿真平台仍有待完善。

本文为构建一套具有扩展性的仿真程序,利用物理模型与 CFD 软件相结合的方法,进行水动力参数的求解。其主要创新点在于:1) 构建专门适用于大型内河船型的数学模型,并且进行深浅水的水动力导数研究;2) 所开发的仿真平台具有良好的模块化与可扩展性,能够便捷地调整船型、水深、流场等参数,使其不仅是针对特定船型的个案研究工具,更是一个可服务于多场景、多船型操纵性评估的通用分析平台。本文研究成果可为该类船舶的设计优化、安全评估提供一定的技术支撑。

1 船型概况

本文所研讨的船型为1万吨级江海直达船,船舶的几何外观及六自由度见图1,详细的船型参数为:船长 $L=130$ m, 型宽 $B=22$ m, 吃水 $T=5.5$ m, 方形系数 $C_b=0.846$, 水线长 $L_w=127.84$ m, 排水

量 $\Delta=13\ 097.35$ t, 中剖面系数 $C_M=0.8$ 。本文以此船为例进行后续的仿真试验。

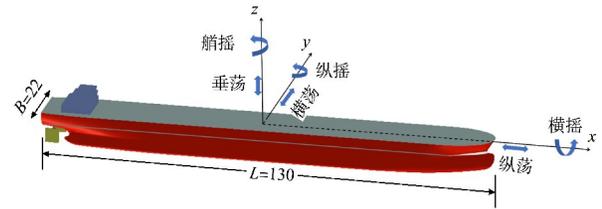


图1 1万吨级船舶模型(单位:m)

Fig. 1 10,000-ton class ship model(unit:m)

2 1万吨级船舶动力学方程及其水动力参数

2.1 坐标系和三自由度运动数学模型

船舶在水面上六自由度任意运动的真实情况比较复杂,为简化数学模型,仅考虑纵荡、横荡和艏摇三自由度船舶的操纵方程描述船舶的运动。本文采用两种不同的坐标系统:惯性坐标系统(固定坐标系统)与附体坐标系统(运动坐标系统),见图2。其中, $O_0x_0y_0z_0$ 为固定于地球表面的惯性坐标系统,取作基准参考系统; $Oxyz$ 为原点位于船舶重心上的附体坐标系,相对船舶是固定的,船体坐标系随着船舶的运动而运动。

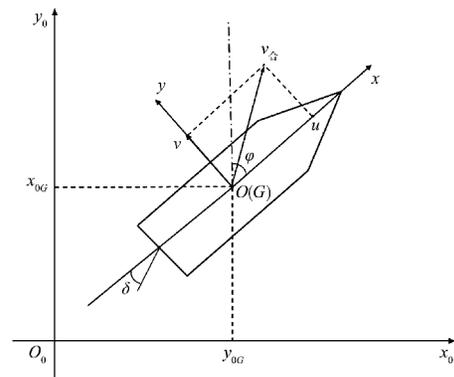


图2 描述船舶运动的坐标系

Fig. 2 Coordinate system depicting motion of ship

基于牛顿第二运动定理,将船体坐标系的坐标原点选在船舶初始位置($t=0$ s)重心所在位置,船舶三自由度操纵运动数学模型通常可表示为以下形式:

$$\begin{cases} m(\dot{u}-vr) = X_1+X_H+X_P+X_R \\ m(\dot{v}+ur) = Y_1+Y_H+Y_P+Y_R \\ I_{zz}\dot{r} = N_1+N_H+N_P+N_R \end{cases} \quad (1)$$

式中： m 为船舶质量； u 、 v 、 r 为前进、横移速度以及转首角速度； I_{zz} 为船舶绕船体坐标系 z 轴的惯性力矩； X_I 、 X_H 、 X_P 、 X_R 分别为惯性类、黏性类、桨上单独作用、舵上单独作用的流体纵向力； Y_I 、 Y_H 、 Y_P 、 Y_R 分别为惯性类、黏性类、桨上单独作用、舵上单独作用的流体横向力； N_I 、 N_H 、 N_P 、 N_R 分别为惯性类、黏性类、桨上单独作用、舵上单独作用的流体垂向力矩。

2.2 总阻力拟合系数计算

由于船模试验预测到的船体阻力准确度较高。因此，长久以来，船舶行业的阻力值预测基本依赖于船模试验^[7]。此方法的优点：需要场地较小、试验规模相比实船减小、能直观地观察试验细节、更加经济容易实行。缺点在于：模型与实船存在一定的差异、试验时与实际情况存在一定出入。

2.2.1 试验对象

本文选用 1 万吨级内河集散货船模进行阻力试验测定，缩尺比 $\lambda = 100$ ，船型的主要参数见表 1。

表 1 船型参数

Tab. 1 Ship type parameters

类型	总长/m	型宽/m	吃水/m	水线长/m
实船	130	22	5.5	127.84
船模	1.300	0.220	0.055	1.278 4

2.2.2 试验平台

本文试验所使用的循环水槽为长方形水槽，水槽主要由扩散段、收缩段、造波消波设备和测试段组成，见图 3。内部设有封闭的水流通道，水流在水槽内循环流动。周边为透明的观察窗，可观察水流的流动情况，确保试验过程中水流的稳定性和均匀性^[8-10]。循环水槽的参数为：主尺度 $18\text{ m} \times 4\text{ m} \times 6\text{ m}$ (长×宽×高)，试验段内部尺寸 $6\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 1.4\text{ m}$ (长×宽×高)；流速范围 $0.1 \sim 2\text{ m/s}$ ，其中 $0.1 \sim < 0.5\text{ m/s}$ 时流速精度为 $\pm 0.01\%$ ， $0.5 \sim < 1.0\text{ m/s}$ 时流速精度为 $\pm 1.5\%$ ， $1.0 \sim < 1.5\text{ m/s}$ 时流速精度小于 $\pm 2.0\%$ (水面以下 0.15 m)， $1.5 \sim < 2.0\text{ m/s}$ 时流速精度为小于 $\pm 2.5\%$ (水面以下 0.20 m)。



图 3 循环水槽

Fig. 3 Circulating water tank

2.2.3 试验方法

试验布置可见图 4，船模安装步骤繁琐，其关键性准备工作为^[11]：1) 开始试验时需要先调整压载物在船上的分布，调整船模的浮态，精确调整到设计吃水，使其与静止水面相持平；2) 大范围地固定船身，用导航架限制船体的前后及横向移动；3) 试验前应检查滑轮是否基本光滑、摩擦阻

力较小；4) 将船中部与测量弯矩的传感器连接，船尾端连接砝码，给定一个初始拉力；5) 在电控台上的循环水槽控制系统软件上，调节相应流速大小，使水以设定流速在水槽内循环流动；6) 在水流作用下，船模产生的阻力会拉动连接的传感器，传感器会进行数据的采集，通过操作电控台上的阻力测量软件可以实时查看、记录测量的阻力值。

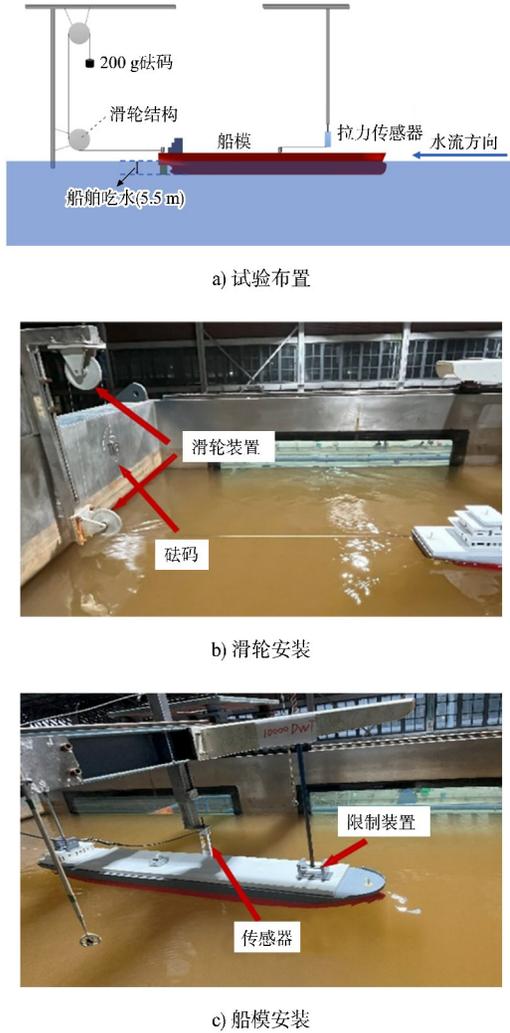


图 4 试验布置与船模安装

Fig. 4 Test layout and ship model installation

2.2.4 阻力系数值计算

根据 2.2.3 节的步骤 6), 获得了 1 万吨级船模在水槽试验中的阻力数据。由于船舶的尺度效应对于阻力的影响较小^[12], 可将计算结果与武汉理工大学基于 1:25 比例模型试验所得的实船阻力数据进行对比分析。作为参照的船型参数见表 2, 其主尺度与本文试验船型基本一致, 确保了对比的有效性。两组试验数据在换算至实船尺度后, 其阻力曲线见图 5。可以看出, 试验数据吻合良好、误差较小, 验证了本文计算方法的合理性及试验的可靠性。

表 2 武汉理工大学船型参数

Tab. 2 Ship type parameters of Wuhan University of Technology

类型	总长/m	型宽/m	吃水/m	水线长/m
实船	130	22	5.5	130
船模	5.2	0.88	0.055	5.12

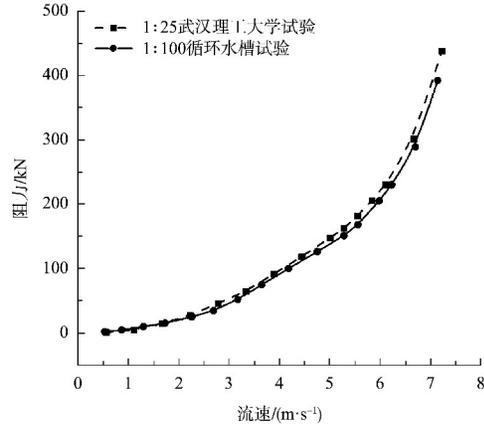


图 5 阻力值对比

Fig. 5 Comparison of resistance values

选取所获得阻力值的中间部分数据, 见表 3, 并依据式(2)执行拟合运算, 从而得到相应的拟合系数。

表 3 船舶总阻力数据

Tab. 3 Total resistance data of ship

船模航速/(m·s ⁻¹)	实船航速/(m·s ⁻¹)	实船阻力/kN
0.365	3.650	75.065 41
0.475	4.750	126.256 40
0.528	5.280	151.261 40
0.556	5.560	168.265 50

$$\begin{cases} R_t = \frac{\rho S v_1^2}{2} C_{tm} \\ C_{tm} = a_0 + a_1 Fr_1 + a_2 Fr_2^2 + a_3 Fr_3^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为水的密度; R_t 为总阻力; S 为湿面积; v_1 为船速; C_{tm} 为总阻力系数; Fr_1 、 Fr_2 、 Fr_3 分别对应后 3 个航速的弗劳德数; $a_0 \sim a_3$ 为待定系数, 经计算得 $a_0 = 7.639 0 \times 10^{-3}$ 、 $a_1 = 3.036 8 \times 10^{-3}$ 、 $a_2 = 3.949 0 \times 10^{-4}$ 、 $a_3 = -1.400 8 \times 10^{-5}$ 。

在后续的程序中, 应用这些拟合系数能够估算 1 万吨级船舶的阻力值, 从而为总阻力的精确计算以及操纵性能的深入分析提供有力支持。

2.3 水动力导数的确定

2.3.1 数值模拟法

确定船舶操纵运动数学模型中的水动力导数是实现船舶操纵性预报的关键^[13]。约束船模试验是精确求取水动力导数的可靠方法, 但是试验费用高, 难以推广。如今, 数值模拟的快速发展为

水动力导数的计算提供了新的途径^[14-16]。

数值模拟方法因简便直观的特点而被广泛应用,尤其在船舶水动力精确测量和理论分析方面具有显著优势。Flow-3D 区别于其他软件的一个特点是其 Tru-VOF 技术,这种技术能够精确处理自由表面问题,涉及表面确定、追踪流体表面移动和边界条件应用3个关键环节。Flow-3D 使其在航行阻力问题的解决上更为精确,故本文选用 Flow-3D 软件,并通过构建三维流固耦合模型进行分析。Flow-3D 软件通过3个核心控制方程计算沿 x, y, z 方向的速度分量 (u, v, w) 以及流体压力。软件采用体积分方法能够精确捕捉流体的自由表面,通过解自由界面方程实现。

2.3.2 水动力导数模型

1) 纯横荡运动坐标系见图6。

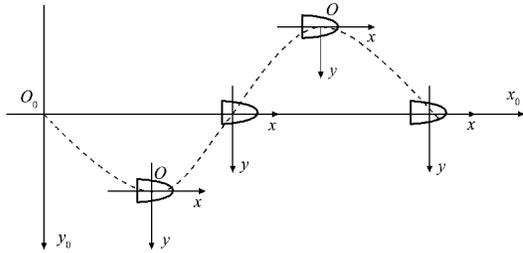


图6 纯横荡运动水动力计算

Fig. 6 Hydrodynamic calculation of pure lateral motion

纯横荡运动线性船舶操纵性水动力导数求解公式为:

$$\begin{cases} N'_v = -\frac{N_2}{a\omega} = -\frac{N_0 \sin \tilde{\varphi}_n}{a\omega} \\ N'_{\dot{v}} = -\frac{N_1}{a\omega^2} = -\frac{N_0 \cos \tilde{\varphi}_n}{a\omega^2} \\ Y'_v = -\frac{Y_2}{a\omega} = -\frac{Y_0 \sin \tilde{\varphi}_y}{a\omega} \\ Y'_{\dot{v}} = -\frac{Y_1}{a\omega^2} = -\frac{Y_0 \cos \tilde{\varphi}_y}{a\omega^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Y'_v, N'_v 为位置导数; $Y'_{\dot{v}}, N'_{\dot{v}}$ 为加速度导数; Y_0, N_0 为船舶所受横向力、艏摇力矩幅值;

$\tilde{\varphi}_y, \tilde{\varphi}_n$ 为横向力、艏摇力矩与横向位移之间的相位差; Y_1, N_1 为横向力、艏摇力矩与横向位移同相位的分量幅值; Y_2, N_2 为横向力、艏摇力矩与横向位移成 $2/\pi$ 相位差的分量幅值; a 为横荡运动幅值; ω 为横荡运动圆频率。

2) 纯艏摇运动坐标系见图7。

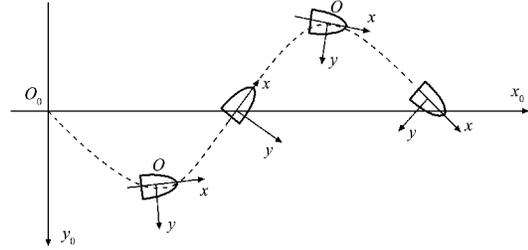


图7 纯艏摇运动水动力计算

Fig. 7 Hydrodynamic calculation of pure bow motion

船舶在纯艏摇运动状态下,沿地理坐标系的纵轴以匀速前进,同时叠加一种横向的低频简谐运动和周期性的艏摇运动^[17]。纯艏摇运动线性船舶操纵性水动力导数计算公式如下:

$$\begin{cases} Y'_r = -\frac{Y_1}{\psi_0 \omega^2} = -\frac{Y_0 \cos \tilde{\varphi}_y}{\psi_0 \omega^2} \\ Y'_r = -\frac{Y_2}{\psi_0 \omega} = -\frac{Y_0 \sin \tilde{\varphi}_y}{\psi_0 \omega} \\ N'_r = -\frac{N_1}{\psi_0 \omega^2} = -\frac{N_0 \cos \tilde{\varphi}_n}{\psi_0 \omega^2} \\ N'_r = -\frac{N_2}{\psi_0 \omega} = -\frac{N_0 \sin \tilde{\varphi}_n}{\psi_0 \omega} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Y'_r, N'_r 为旋转导数; $Y'_{\dot{r}}, N'_{\dot{r}}$ 为旋转加速度导数; ψ_0 为艏向角简谐幅值。

要确定受限船模的运动行为,只需通过试验或计算流体动力学分析获得其横向力 Y_0 与艏摇力矩 N_0 的时间变化曲线。通过分析水动力和横向位移之间的相位差 $\tilde{\varphi}_y$ 和 $\tilde{\varphi}_n$, 就可根据式(3)、(4)计算得到水动力导数。

2.3.3 浅水和深水水动力导数数值

1) 纯横荡水动力导数。根据现有研究对内河深

浅水界定的探讨^[18]以及国际航运协会以 h/T (h 为航道水深, T 为船舶吃水) 的大小对浅水效应进行划分。其中: 深水, $h/T \geq 3.0$; 中深水, $1.5 < h/T < 3.0$; 浅水, $1.2 < h/T \leq 1.5$ 。为贴合实际情况, 本文选取 5 种典型的水深吃水比 ($h/T = 1.3$ 、 1.5 、 3.0 、 4.0 和 8.3), 采用运动频率 $f = 0.10$ 、 0.12 Hz, 无因次速度幅值 $v' = 0.16$ 、 0.20 时的纯横荡运动。本文基于已有研究^[19]进行分析, 得到的水动力导数值, 见表 4。

表 4 纯横荡水动力导数计算结果

Tab. 4 Calculation results of hydrodynamic derivative of pure transverse swing

f/Hz	v'	h/T	Y'_v	$Y'_\dot{v}$	N'_v	$N'_\dot{v}$	
0.10	0.16	1.3	-0.017 85	-0.014 11	-0.018 54	-0.000 17	
		1.5	-0.015 23	-0.013 35	-0.015 76	-0.000 15	
		3.0	-0.012 57	-0.007 59	-0.008 79	-0.000 16	
		4.0	-0.008 94	-0.005 83	-0.008 69	-0.000 07	
		8.3	-0.006 59	-0.006 24	-0.007 29	-0.000 13	
		0.20	1.3	-0.019 48	-0.020 41	-0.019 45	-0.000 30
	1.5	-0.017 26	-0.011 76	-0.018 52	-0.000 33		
	3.0	-0.014 53	-0.008 69	-0.009 64	-0.000 07		
	4.0	-0.009 81	-0.005 17	-0.009 27	-0.000 03		
	8.3	-0.007 11	-0.006 84	-0.008 64	-0.000 16		
	0.12	0.16	1.3	-0.016 36	-0.014 82	-0.019 01	-0.000 21
	1.5	-0.012 22	-0.016 28	-0.015 17	-0.000 23		
3.0	-0.012 81	-0.008 94	-0.009 43	-0.000 15			
4.0	-0.007 94	-0.004 83	-0.008 16	-0.000 11			
8.3	-0.005 81	-0.006 34	-0.007 24	-0.000 13			
0.20	1.3	-0.018 25	-0.016 37	-0.018 52	-0.000 32		
1.5	-0.016 31	-0.014 26	-0.017 89	-0.000 31			
3.0	-0.013 91	-0.009 68	-0.009 94	-0.000 09			
4.0	-0.009 46	-0.004 27	-0.008 94	-0.000 05			
8.3	-0.006 58	-0.007 05	-0.008 19	-0.000 12			

2) 纯艏摇水动力导数。选取 4 种不同的水深吃水比 ($h/T = 1.5$ 、 3.0 、 4.0 和 8.3), 采用与纯横荡相同固定频率 $f = 0.10$ 、 0.12 Hz, 模拟无因次角速度幅值 $r' = 0.2$ 、 0.6 的纯艏摇运动, 其水动力导数结果见表 5。

表 5 纯艏摇水动力导数计算结果

Tab. 5 Calculation results of hydrodynamic derivatives of pure bowing

f/Hz	r'	h/T	Y'_r	$Y'_\dot{r}$	N'_r	$N'_\dot{r}$	
0.10	0.2	1.3	0.007 97	-0.000 64	-0.010 50	-0.000 42	
		1.5	0.007 05	-0.000 73	-0.007 13	-0.000 37	
		3.0	0.000 57	-0.000 33	-0.003 78	-0.000 23	
		4.0	0.000 39	-0.000 32	-0.000 39	-0.000 15	
		8.3	0.000 29	-0.000 28	-0.000 3	-0.000 15	
		0.6	1.3	0.010 27	-0.000 83	-0.013 48	-0.000 71
	1.5	0.007 62	-0.000 66	-0.007 88	-0.000 34		
	3.0	0.000 62	-0.000 37	-0.004 39	-0.000 24		
	4.0	0.000 44	-0.000 29	-0.000 43	-0.000 21		
	8.3	0.000 32	-0.000 31	-0.000 36	-0.000 19		
	0.12	0.2	1.3	0.007 34	-0.000 72	-0.008 92	-0.000 40
	1.5	0.006 82	-0.000 92	-0.006 58	-0.000 35		
3.0	0.000 56	-0.000 39	-0.004 41	-0.000 25			
4.0	0.000 34	-0.000 28	-0.000 37	-0.000 14			
8.3	0.000 26	-0.000 27	-0.000 34	-0.000 12			
0.6	1.3	0.010 51	-0.000 87	-0.011 38	-0.000 62		
1.5	0.006 13	-0.000 81	-0.007 58	-0.003 20			
3.0	0.006 43	-0.000 44	-0.004 71	-0.000 22			
4.0	0.000 39	-0.000 24	-0.000 40	-0.000 16			
8.3	0.000 29	-0.000 31	-0.000 36	-0.000 18			

上述得出的水动力导数, 可用于仿真程序中黏性水动力的计算。通过对船模运动的数值模拟, 当 $h/T < 3.0$ 时, 江海直达船操纵性浅水效应显著。因此, 在实际试验中应考虑浅水效应, 当 $h/T < 3.0$ 时, 仿真计算必须调用专为浅水条件辨识或修正的水动力导数及相应数学模型。

3 内河 1 万吨级船舶操纵性数值试验

船舶操纵性是指船舶进行特定机动的能力。作为船舶的重要航行性能之一, 它反映船舶保持与改变航向、航速及位置的能力, 对船舶投入运营后的航行安全性和经济性影响显著^[20-21]。本文将上述阻力系数值、水动力导数值输入自行编写的船舶运动方程计算程序中进行计算, 通过对船舶三自由度操纵运动进行模拟仿真^[22], 采用 4 阶龙格-库塔法对操纵运动数学模型进行迭代计算。龙格-库塔公式为:

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 = f(t_n, y_n); \\ k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right) \\ k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right) \\ k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3) \end{cases} \quad (5)$$

式中： k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为斜率； y_n 、 y_{n+1} 为第 n 个，第 $n+1$ 个函数值； h 为步长； t_n 为第 n 个计算点。

仿真界面见图 8，其中主界面集成了视景仿真与数据监控功能，操作者可通过左侧的虚拟船舵和右侧的车钟实时调控舵角与航速。同时，界面中央直观呈现了船舶的运动轨迹，并以数字形式动态反馈纵向速度(u)、横向速度(v)、转首角速度(r)及航向(dir)等关键运动参数。此外，系统还提供了两个独立的参数编辑窗口：船舶参数编辑器用于修改船体主尺度等自身特性；流场数据编辑器则用于设定流场作用范围等外部条件。下文中与仿真结果进行对比的是已在武汉理工大学流体试验循环水槽中完成的物理模型试验结果。



图 8 船舶运动仿真界面

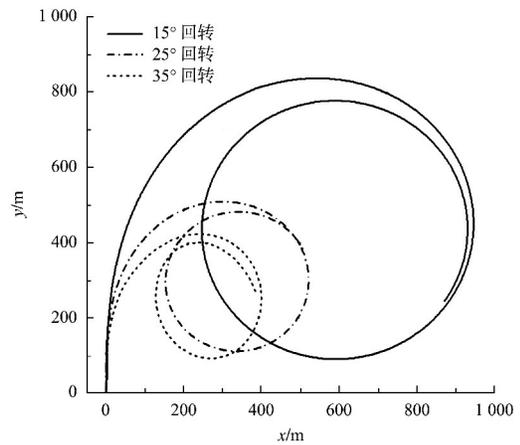
Fig. 8 Ship motion simulation interface

3.1 回转试验

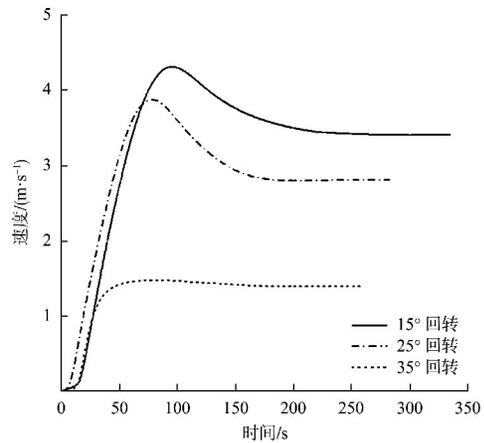
常速直线航行的船舶，将舵转至某一舵角，一般为 35° ，并保持此舵角，船将做曲线运动，称为回转试验。随着船舶的转向，需要记录轨迹、航速等主要数据。船舶操纵性中，回转运动研究是最常见且广泛关注的研究。一方面回转运动是

船舶操纵中常见的一种运动，另一方面回转运动的最后阶段是定常运动，便于进行理论分析。

本文试验船舶以初始航速为 5.5 m/s ，艏向角为 0° ，分别进行 35° 、 25° 、 15° 的右回转仿真试验，结果见图 9。



a) 回转轨迹



b) 速度变化

图 9 1万吨级船舶不同角度回转工况下的仿真运动轨迹及参数
Fig. 9 Simulated motion trajectory of a 10,000-ton class ship under different angular rotation conditions

对仿真结果与武汉理工大学试验值进行分析，结果见表 6，其中列出了武汉理工大学的试验值与程序仿真值。结果表明，回转直径 D 和战术直径 D_T 与船垂线间长 L_{bp} 的比值与已有的物理模型试验结果基本一致，说明程序在船舶回转操纵性方面的准确性较好。其结果之间仍然存在一些差异，其原因可能是模型试验本身存在不确定性(如流场变化，存在风、浪等自然因素的干扰以及模型试验中的微小扰动)；其次，由于采用船舶操纵

(MMG)模型时进行了一定的简化, 只考虑三自由度的运动, 加之水动力导数为回归公式计算与实

际不完全吻合^[23]。这种误差在合理容错范围内, 符合工程实际的精度要求。

表 6 1 万吨级船舶回转试验性能验证
Tab. 6 Rotation test performance of 10,000-ton class ship

试验状态	舵角/ (°)	D/L_{bp}			D_r/L_{bp}		
		武汉理工大学试验值	仿真值	误差/%	武汉理工大学试验值	仿真值	误差/%
吃水 5.5 m, 航速 5.5 m/s	35	1.979	2.177	10.02	2.555	3.113	21.83
	25	3.147	3.024	3.94	3.712	3.992	7.54
	15	5.469	5.524	1.01	6.129	7.097	15.79

3.2 Z 型试验

大多数情况下, 船舶都是通过不断左右转向达到控制航向的目的, Z 型试验精确地模拟了这种过程。船舶按预定航速直线航行达到稳定后, 以尽可能快的速度将舵以规定角度转到一边, 最常用舵角为 15°, 当船舶航向变化量与所操舵角相等时, 迅速转向另一侧, 反复进行。在 Z 型试验, 需要重点关注超越角和回转指数的数值, 以评估船舶的操纵性能。

本文 Z 型试验的航速定为 5.5 m/s, 操舵角选取最常用的 15° 小舵角, 进行多次打舵, 得到 Z 型操舵试验记录曲线见图 10。

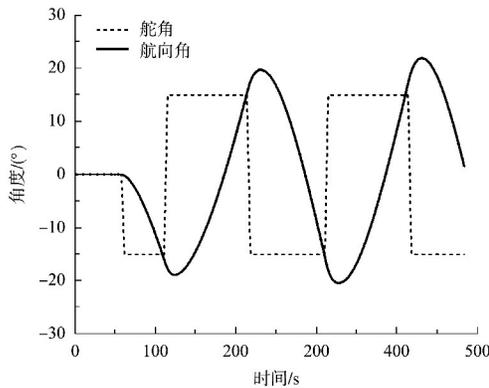


图 10 1 万吨级船舶 15° Z 型试验的仿真运动轨迹
Fig. 10 Simulated motion trajectory of 15° Z-type test of 10,000-ton class ship

将结果与武汉理工大学试验值进行对比分析, 见表 7。 φ_{0v1} 、 φ_{0v2} 分别为第一超越角、第二超越角, 第一超越角在船舶实际避碰机动中具有重要意义, 这个角度越小, 越容易转向。从上述仿真

结果分析, 观察到船舶打舵后的第一超越角较小, 表明其转向调整能力较强, 易于转向。

表 7 1 万吨级船舶 Z 型试验操纵性能验证
Tab. 7 10,000-ton class ship Z-type test maneuverability

试验状态	舵角/ (°)	武汉理工大学 试验值	仿真值	$ \Delta /\%$
吃水 5.5 m, 航速 5.5 m/s	15	$\varphi_{0v1} = 4.930^\circ$	$\varphi_{0v1} = 3.841^\circ$	22.09
		$\varphi_{0v2} = 6.220^\circ$	$\varphi_{0v2} = 4.728^\circ$	24.00
		$K' = 1.190$	$K' = 1.262$	6.05
		$T' = 0.760$	$T' = 0.650$	14.47

此外, 根据已有研究^[24-25]可知, 船舶的操纵性指数 K' (回转性指数)、 T' (应舵指数) 是同时减小或增大的, 即船舶回转性结果提高将使跟从性受到某种程度降低作用, 而跟从性的改善又将导致回转性的降低。

试验结果中, 回转性指数 K' 较物理模型结果有所增大, 应舵指数 T' 有所减小, 表明回转性较好, 跟随性相应降低, 根据《长江运输船舶操纵性衡准》^[26] 对应舵转首指数的要求, 本文研究结果符合航行要求。需要注意的是, 由于虚拟模拟过程中采用了线性控制的舵速率, 而实船试验中舵速率为非线性转动, 可能导致一定的误差。

3.3 制动试验

对于船舶的倒车制动仿真试验, 通常模拟船舶在稳速前进后转入全速倒车的状态, 直至船舶对水完全停止的过程。试验中主要记录船舶的冲程, 以评估制动效果和安全性。

试验中给定船舶试验航速为 5.5 m/s, 到达后立即全速倒车, 其倒车制动仿真试验轨迹见图 11。

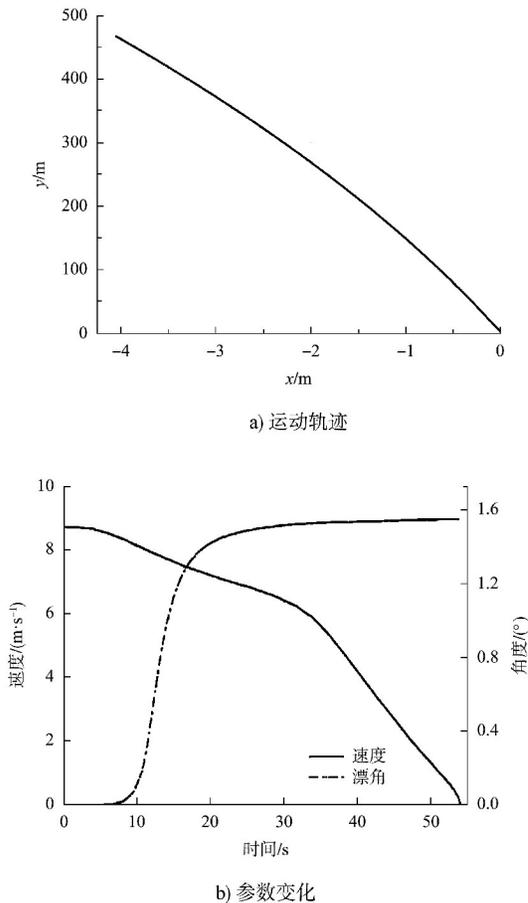


图 11 1 万吨级船舶倒车制动试验的仿真运动轨迹与参数变化
Fig. 11 Simulated motion trajectory and parameters variation of 10,000-ton class ship reversing brake test

船舶的试验制动性能仿真结果见表 8。一艘内河船舶快倒车冲程为 4~5 倍船长, 慢倒车冲程为 1~3 倍船长^[27]。根据相对制动指标, 即船舶前进的冲程与船长的比值 S_H/L 衡量船舶的倒车制动性, 其计算结果满足 JT/T 258—2021《长江运输船舶操纵性衡准》中“倒车制动性指标小于 3.5”的要求, 表明其制动性能符合规范要求。然而, 与其他操纵性指标相比, 制动性能的仿真结果与物理模型试验结果存在较大差异, 这可能与给定船速的差异及一些不可避免的因素有关。

表 8 1 万吨级船舶倒车制动试验操纵性能验证
Tab. 8 Maneuverability verification of 10,000-ton class ship reversing brake test

试验状态	S_H/L		误差/ %
	武汉理工大学试验值	仿真值	
设计吃水 5.50 m, 设计航速 5.5 m/s	2.412	3.459	43.41

4 结论

1) 本文通过循环水槽阻力试验(误差 < 10%)及综合既有研究成果, 确定了适用于内河船舶的阻力系数和水动力导数。结果表明, h/T 是影响水动力导数的关键参数。当 $h/T < 3.0$ 时, 纯横荡和纯船摇水动力导数随水深减小而逐渐增大, $h/T < 1.5$ 时显著增加; 当 $h/T > 3.0$ 时, 变化趋于平缓。因此, 在内河航道水深接近或低于 1.5 倍吃水时, 需要考虑浅水效应的影响。

2) 本文所开发的内河浅水航道船舶操纵运动仿真平台, 其回转性、跟随性和制动等指标与大比尺物理模型试验基本一致, 且满足 JT/T 258—2021《长江运输船舶操纵性衡准》要求。验证了仿真平台具有良好的精度和可靠性, 可用于内河大型船舶的操纵性能仿真。

3) 本文以特定 1 万吨级江海直达船型为例, 提出船舶在内河复杂边界条件下的操纵性能研究方法, 为内河船舶操纵性模拟器的研发奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] LIU J L, HEKKENBERG R, QUADVLIEG F, et al. An integrated empirical manoeuvring model for inland vessels[J]. Ocean engineering, 2017, 137: 287-308.
- [2] 杨晓. 水动力模型驱动下的智能船舶仿真平台研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
YANG X. Research on simulation platform of intelligent ship driven by hydrodynamic models[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.

- [3] 杨斌, 何俊辉, 闫强. 平陆运河第五标段船舶操纵仿真模拟试验研究[J]. 西部交通科技, 2023(12): 3-6.
- YANG B, HE J H, YAN Q. Research on ship maneuvering simulation test in the fifth bid section of Pinglu Canal[J]. Western China communication science & technology, 2023(12): 3-6.
- [4] 史琪琪, 马宁, 马程前. 船舶操纵性海试实验虚拟仿真设计与应用[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(4): 64-68, 79.
- SHI Q Q, MA N, MA C Q. Design and application of virtual simulation experiment for ship maneuverability in sea trials[J]. Research and exploration in laboratory, 2024, 43(4): 64-68, 79.
- [5] 闻光华, 余葵, 赵藤. 内河货船操纵运动建模与仿真[J]. 山东工业技术, 2017(9): 246.
- WEN G H, YU K, ZHAO T. Modeling and simulation of maneuvering motion of inland river cargo ships[J]. Shandong industrial technology, 2017(9): 246.
- [6] 杨盐生, 方祥麟. 船舶操纵性能仿真预报[J]. 大连海事大学学报, 1997(1): 3-8.
- YANG Y S, FANG X L. Prediction by computer simulation for the manoeuvring performance of a ship[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1997(1): 3-8.
- [7] 郑小龙, 黄胜, 尚秀敏. 基于 CFD 的船舶阻力预报方法研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014, 28(2): 109-113.
- ZHENG X L, HUANG S, SHANG X M. Research on CFD-based ship resistance forecasting method[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (natural science edition), 2014, 28(2): 109-113.
- [8] 刘晗, 马宁, 邓德衡, 等. 循环水槽在平面运动机构试验中的应用及其数值验证[C]//中国造船工程学会. 2013 年船舶水动力学学术会议论文集. 北京: 中国造船工程学会, 2013: 623-631.
- LIU H, MA N, DENG D H, et al. Application of circulating water channel in planar motion mechanism tests and its numerical verification [C]//The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers. Proceedings of the 2013 Ship Hydrodynamics Academic Conference. Beijing: The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2013: 623-631.
- [9] 于昌利. 循环水槽系统设计与参数研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- YU C L. The system design and parameter study of circulating water channel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [10] 叶立钦, 钱宗保, 包树章, 等. 上海船研所循环水槽[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 1984(2): 67-83.
- YE L Q, QIAN Z B, BAO S Z, et al. Circulating water tank at Shanghai Ship Research Institute[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, Ministry of Transport, 1984(2): 67-83.
- [11] 杨怡君. 船模的阻力计算和实验测定[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
- YANG Y J. The resistance calculation and experimental test of ship model [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2016.
- [12] 张恒, 詹成胜. 基于 CFD 的船舶阻力尺度效应研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(2): 329-332.
- ZHANG H, ZHAN C S. A CFD-based study on the scale effect of ship resistance [J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2015, 39(2): 329-332.
- [13] 刘冬雨, 高霄鹏, 霍聪. 槽道型无人双体船操纵性预报研究[J]. 船舶力学, 2024, 28(4): 501-512.
- LIU D Y, GAO X P, HUO C. Maneuverability prediction of channel-type unmanned catamarans [J]. Journal of ship mechanics, 2024, 28(4): 501-512.
- [14] 李纳, 张彬. 海带采收船操纵性仿真计算[J]. 渔业现代化, 2022, 49(4): 88-95.

- LI N, ZHANG B. Research on maneuverability simulation of kelp harvesting ship [J]. Fishery modernization, 2022, 49(4): 88-95.
- [15] KOŁODZIEJ R, HOFFMANN P. Numerical estimation of hull hydrodynamic derivatives in ship maneuvering prediction [J]. Polish maritime research, 2021 (28): 46-53.
- [16] SHANG H D, ZHAN C S, LIU Z Y. Numerical simulation of ship maneuvers through self-propulsion [J]. Journal of marine science and engineering, 2021(9): 1-22.
- [17] 杨勇. 非定常操纵运动船体水动力数值计算[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- YANG Y. Calculation of unsteady hydrodynamic forces on a maneuvering ship [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [18] 周华兴, 郑宝友. 关于深水、浅水与限制性航道界定的探讨[J]. 水运工程, 2006 (1): 53-58, 67.
- ZHOU H X, ZHENG B Y. Discussion on defining deep water, shallow water and restricted channel [J]. Port & waterway engineering, 2006 (1): 53-58, 67.
- [19] 李旭光. 内河浅水航道万吨级船舶水动力导数研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- LI X G. Research on hydrodynamic derivatives of 10,000-ton class vessels in inland shallow water [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [20] LI S L, LIU C G, CHU X M, et al. Ship maneuverability modeling and numerical prediction using CFD with body force propeller [J]. Ocean engineering, 2022, 264: 112454.
- [21] WANG T, HATLEDAL L I, KANAZAWA M, et al. Effect of ship propulsion retrofit on maneuverability research based on co-simulation [C]// Proceedings of International Conference on Software Engineering and Formal Methods. Cham: Springer International Publishing, 2021: 189-203.
- [22] 宋伟伟, 赵建, 岳昌华. 船舶运动视景仿真系统设计与实现[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(13): 27-30.
- SONG W W, ZHAO J, YUE C H. Design and implementation of a ship motion visual simulation system [J]. Technology innovation and application, 2023, 13(13): 27-30.
- [23] 沈莉婷. 船舶操纵模拟器中拖锚制动过程建模与仿真[D]. 厦门: 集美大学, 2024.
- SHEN L T. Modeling and simulation of drag anchor braking process in ship handling simulator [D]. Xiamen: Jimei University, 2024.
- [24] 张显库, 李元奎. 船舶操纵性指数预报研究[J]. 中国航海, 2009, 32(1): 96-101.
- ZHANG X K, LI Y K. Prediction of ship maneuverability indices [J]. Navigation of China, 2009, 32(1): 96-101.
- [25] CAI C, CAI X Y, LI Y. Model tests for shallow-water ship maneuverability in Three Gorges Reservoir [J]. Polish maritime research, 2015, 22: 136-140.
- [26] 长江运输船舶操纵性衡准: JT/T 258—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- Criteria of manoeuvrability for transport ship in Yangtze River: JT/T 258-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- [27] 李晓飏, 蔡新永, 汪拥赤. 山区河流码头船舶靠离泊模拟仿真技术研究与应用[J]. 水运工程, 2017(6): 162-167, 173.
- LI X B, CAI X Y, WANG Y C. Research and application of emulation technique about ship's berthing and unberthing in mountainous river wharf [J]. Port & waterway engineering, 2017(6): 162-167, 173.

(本文编辑 王璁)