中间渠道船舶航行过程水力特性与操纵性能研究*

韦德鉴[1]，陈莹颖[2]，傅陆志丹[2]，姜兴良[3]，黄伟杨[4]

（1. 平陆运河集团有限公司，广西 南宁 530022；2. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029；
3. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007；4. 中共启东市委组织部，江苏 启东 226200）

摘要：针对两级 1 000 吨级升船机之间的中间渠道内船舶航行与泊稳安全问题，采用物理模型试验和船舶操纵仿真模拟相结合的方法，开展船舶自第二级船厢直线驶出的航行试验研究，揭示船舶航行条件与中间渠道水面波动、航行船舶下沉量、停泊船舶受力等关键要素的影响规律，提出中间渠道船舶最高安全航速。结果表明：综合考虑升船机对接安全、运行效率和船舶航行与泊稳安全，中间渠道内船舶航行速度宜控制在 1.5 m/s 以内；中间渠道采用 3.6 m 设计通航水深合理、可靠，可满足船舶安全通航需求；中间渠道整体线形布置合理，船舶以 1.5 m/s 最高航速航行时航向基本稳定。

关键词：升船机；中间渠道；物理模型试验；船舶操纵

中图分类号：U642　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0143-09

Hydraulic characteristics and maneuvering performance of ship navigation in intermediate channel

WEI Dejian[1], CHEN Yingying[2], FU Luzhidan[2], JIANG Xingliang[3], HUANG Weiyang[4]

(1. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530022, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
4. Organization Department of CPC Qidong Municipal Committee, Qidong 226200, China)

Abstract: In view of the safety issues of ship navigation and berthing in the intermediate channel between two-stage 1,000-ton-class ship lifts, a combined approach of physical model tests and ship maneuvering simulation is adopted. Navigation tests are conducted for ships departing straight from the second-stage ship chamber. The effects of ship navigation conditions on key factors are revealed, such as water surface fluctuations in the intermediate channel, sinkage of navigating ships, and forces on berthed ships, and the maximum safe navigation speed in the intermediate channel is proposed. The results indicate that comprehensively considering the docking safety and operational efficiency of ship lifts, as well as the safety of ship navigation and berthing, the navigation speed in the intermediate channel should not exceed 1.5 m/s. The design navigable water depth of 3.6 m for the intermediate channel is reasonable and reliable, which can meet the safety requirements of ship navigation. The overall alignment of the intermediate channel is reasonable, and the ship can maintain basically stable course when sailing at the maximum speed of 1.5 m/s.

Keywords: ship lift; intermediate channel; physical model test; ship maneuvering

收稿日期：2026-01-21　　**录用日期：**2026-03-16

***基金项目：**国家重点研发计划项目(2023YFB2604700)

作者简介：韦德鉴(1966—)，男，正高级工程师，从事水运工程建设与管理工作。

水运工程

高坝通航建筑物形式主要包括升船机和多级船闸。在高坝、超高坝通航建筑物建设中，升船机因具有运行速度快、投资小及节水等特点，在我国得到了越来越广泛的应用，至今已有多座不同类型的垂直升船机分别在岩滩、水口、思林、沙沱、三峡、景洪、向家坝等工程中建成运行。当通航枢纽水头更高时，可采用设中间渠道的多级升船机，如已投入运行的构皮滩水电站通航建筑物，即为带两级中间渠道的三级垂直升船机[1]。

升船机中间渠道是沟通多级升船机并供上、下行船舶航行的人工航道，其两端封闭，断面尺度受工程地形条件的限制通常小于 GB 50139—2014《内河通航标准》[2]中限制性航道尺度的要求，是一种较为特殊的限制性航道。中间渠道船舶航行特性与通航建筑物通航效率及船舶航行安全息息相关。李焱等[3]采用水工物理模型和船模试验方法，对构皮滩第 1 级中间渠道的航行水力条件、单线通航隧洞及渡槽的尺度进行研究；王小威等[4]利用物理模型试验，研究构皮滩中间渠道内船舶上下行过程中的航行特性，建立可准确预测船舶最大下沉量的无量纲公式；赵鑫[5]采用理论分析、物理模型试验和三维数学模型相结合的方法，开展 3 000 和 1 万吨级船舶在中间渠道的航行特性研究，通过对中间通航渠道尺度与临界航速的系统分析，提出中间渠道尺度的确定方法；王新等[6]依托乌江构皮滩通航工程，开展含长距离通航隧洞中间渠道的水力学观测与实船试验，揭示中间渠道波动传播时空变化规律及船舶航行特性；邓健等[7]以乌江思林二线通航隧洞工程为研究对象，采用模拟器开展多种船舶操纵仿真试验，分析船舶在通航隧洞内不同阶段的航行特点，提出适用于狭长隧洞通航船舶的航行方案；陈明等[8]针对 1 000 吨级船闸与升船机组合布置的中间渠道船舶泊稳安全问题，采用平面二维数学模型研究渠道宽度、初始水深和船闸泄水时间等参数对船舶泊稳条件的影响规律，提出船舶可承受船闸最大泄水平均流量的计算公式。

综上可见，目前相关研究成果主要集中于中间渠道的优化设计及试验研究，尚无相关规范依据，航行船舶对中间渠道内停泊船舶的影响也鲜有研究。本文以两级 1 000 吨级升船机之间的中间渠道及船舶为研究对象，通过物理模型试验研究中间渠道船舶航行与停泊特性，采用船舶操纵仿真模拟验证中间渠道整体线形布置的合理性，旨在为相关通航建筑物的设计和运行提供参考和借鉴。

1 工程概况

本文涉及的通航建筑物为两级带中间渠道的 1 000 吨级垂直升船机，两级升船机的船厢结构完全相同，船厢总长 88 m，设计有效尺度为 73.0 m×12.2 m×3.5 m(长×宽×水深)。中间渠道设计通航水深 3.6 m，代表船型尺度为 68.0 m×11.0 m×2.4 m(总长×型宽×设计吃水)。两级升船机船厢之间自上游至下游依次为第 1 级升船机下闸首、中间渠道和第 2 级升船机上闸首；根据地形条件，中间渠道分为明渠段和渡槽段两种结构，共 6 段，从上游至下游分别为 1#明渠、1#渡槽、2#明渠、2#渡槽、3#明渠和 3#渡槽[9]，各区段平面尺度见表 1。船舶可在中间渠道内停泊等待升船机完成对接、船厢门打开或船厢内已有船舶驶出。当船舶采用“曲进直出”方式进出升船机船厢时，为缩短进入船厢时间，船舶应尽可能靠近船厢停泊，即尽量减小导航段和调顺段的长度。参考具有良好导航和调顺功能的导航建筑物平面布置[10]，将导航段和调顺段合二为一，结合船舶航行方式，确定了第 1 级升船机对应的 1#停泊段和第 2 级升船机对应的 2#停泊段范围。两级升船机船厢和中间渠道平面布置以及停泊段范围见图 1。

表 1 中间渠道各区段平面尺度

Tab. 1 Planar dimensions of each section in intermediate channel

区段	轴线长度/m	宽度/m
1#明渠	20.93	12.20~34.88
1#渡槽	119.00	34.88
2#明渠	422.81	34.88~38.00
2#渡槽	114.00	34.88
3#明渠	28.80	34.88
3#渡槽	325.00	12.20~34.88

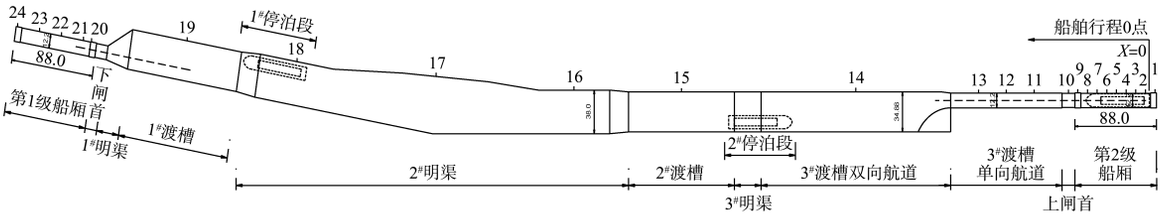


图 1　两级升船机中间渠道平面布置

Fig. 1　Planar layout of two-stage ship lift with intermediate channel

2　研究方法

2.1　物理模型

2.1.1　模型设计与量测手段

水工物理模型设计时不考虑船厢的提升设备及行程等因素，仅考虑两级升船机之间的实际水域部分，包括第 2 级升船机的船厢和上闸首、中间渠道及第 1 级升船机的下闸首和船厢。物理模型按照重力相似准则设计，综合考虑模型相似率、实验室场地等条件，模型几何比尺为 1∶16。试验船舶为两条 1 000 吨级设计单船，船舶模型同样按重力相似准则设计，几何比尺与水工物理模型保持一致。船舶模型除满足与实船的尺度、线型几何相似外，船模航速与实船航速也应满足相似条件，同时还应使船模与实船的排水量保持相似。船舶在中间渠道航行过程采用牵引系统拖曳船模方式进行，即在模型航线的上方设置导向装置，通过固定的牵引装置，拖曳船舶按设定的速度和航线航行，保证船模在船厢及中间渠道航行时航速恒定且不偏离航线和碰壁[11]。

试验在模型左侧沿程布置了 24 个波高仪测量各区段水位变化，第 2 级船厢(简称 2#船厢)下游侧测点为编号 1，第 1 级船厢(简称 1#船厢)上游侧测点为编号 24，具体布置见图 1；在船舶前后牵引装置上布设超声波测距仪测量船舶首尾升沉量；采用全桥式应力环拉压力传感器测量停泊船舶受力；通过全站仪测验船舶航线、航行距离和航速。

2.1.2　试验工况

船舶在中间渠道的航行方式应确保船舶和建筑物的安全，在此前提下，宜尽量缩短航行时间、提高过机效率，故较为合理的航行方式为沿航线分段变速行驶。

船舶出船厢时，船厢内大量水体被推出，船尾下沉明显，有可能发生船舶触底，影响船舶及船厢安全，还会引起船厢及中间渠道内水面波动，进而影响升船机对接和中间渠道内船舶停泊安全，再结合防止船舶碰撞边壁和稳定航向的因素，船舶进出船厢、其对应闸首及 3#渡槽单向航道(中间渠道狭窄段)的航行速度须严格控制，试验中船舶以 0.6 m/s(出厢最高航速 v_0)驶出 2#船厢、2#船厢上闸首和 3#渡槽单向航道，以策安全。在船舶出 3#渡槽单向航道后再加速至 1.0、1.5、2.0 和 2.5 m/s(中间渠道内最高航速 v_1)在 3#渡槽双向航道、3#明渠等中间渠道段航行。

试验中有两条船舶模型，一条由牵引系统拖曳，在船厢及中间渠道内分段变速航行；另一条停泊在 2#或 1#停泊段，通过测量其纵、横向受力，分析船舶在船厢及中间渠道航行对中间渠道内停泊船舶泊稳条件的影响。此外，试验中还考虑了 1#船厢下厢门处于敞开(与中间渠道对接)或关闭两种状态时，船舶航行对中间渠道水流及船舶停泊条件的影响，特别需要对 1#船厢下厢门外的水面变化进行量测，分析其水面波动是否影响第 1 级升船机与中间渠道顺利对接。试验工况见表 2。

表 2　试验工况

Tab. 2　Test conditions

试验工况	v_0/(m·s^{-1})	v_1/(m·s^{-1})	其他条件
ST1	0.6	1.0、1.5、2.0、2.5	停泊船舶位于 2#停泊段，1#船厢下厢门敞开
ST2	0.6	1.0、1.5、2.0、2.5	停泊船舶位于 2#停泊段，1#船厢下厢门关闭
ST3	0.6	1.0、1.5、2.0、2.5	停泊船舶位于 1#停泊段，1#船厢下厢门敞开

2.2　船舶操纵仿真模型

本文建立船舶操纵性运动基本公式的假设为：1)船舶航行在无限宽广水域；2)自由液面为静水面，视船体为刚体；3)忽略纵摇及升沉[12]。建立的坐标系见图 2，其中 $O'X_0Y_0Z_0$ 为固连于地球的地理位置坐标系，$OXYZ$ 为固连于船舶的动坐标系，动坐标系原点 O 为中纵剖面、中横剖面及重心平面的交点。

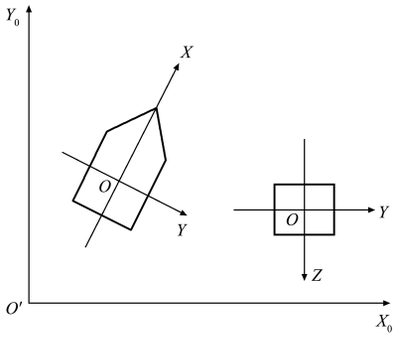


图 2　船舶操纵性运动坐标系

Fig. 2　Coordinate system for ship maneuvering motion

在此基础上，建立船舶操纵运动基本公式：

$$(m+\lambda_{11})\dot{u}-(m+\lambda_{22})vr-(mx_G+\lambda_{26})r^2=X_H+X_P+X_R \tag{1}$$

$$(m+\lambda_{11})\dot{v}-(m+\lambda_{11})ur+(mx_G+\lambda_{26})\dot{r}=Y_H+Y_P+Y_R \tag{2}$$

$$(I_Z+\lambda_{66})\dot{r}+(mx_G+\lambda_{26})(\dot{v}+ur)=N_H+N_P+N_R \tag{3}$$

$$(I_X+J_X)\dot{p}=K_H+K_R \tag{4}$$

$$2\pi(I_P+J_P)\dot{n}_p=Q_P+Q_E+Q_f \tag{5}$$

式中：m 为船舶质量，kg；$\dot{u}$、$\dot{v}$ 分别为加速度矢量在 X、Y 轴上的分量，m/s^2；u、v 分别为速度矢量在 X、Y 轴上的分量，m/s；r 为船体绕 Z 轴的转首角速度，s^{-1}；$\dot{r}$ 为船体绕 Z 轴的转首角加速度，s^{-2}；λ_{11}、λ_{22} 分别为船头纵、横向附连质量，kg；λ_{26} 为船体在水中时对 YOZ 平面的附连静矩，kg·m；λ_{66} 为船体在水中时绕 Z 轴的附连惯矩，kg·m^2；x_G 为重力 X 轴坐标，m，艏向为正；I_X、I_Z 分别为船体自身绕 X、Z 轴的转动惯矩，kg·m^2；I_P、J_P 分别为螺旋桨转动、附加惯矩，kg·m^2；J_X 为船体在水中时绕 X 轴的附连惯矩，kg·m^2；$\dot{p}$ 为船舶绕 X 轴的横倾角加速度，s^{-2}；$\dot{n}_p$ 为桨旋转角加速度，s^{-2}；g 为重力加速度，m/s^2；X_H、X_R、X_P 分别为船体、舵、桨的纵向力，N；Y_H、Y_R、Y_P 分别为船体、舵、桨的横向力，N；N_H、N_R、N_P 分别为船体、舵、桨的转首力矩，N·m；K_H、K_R 分别为船体、舵的横倾力矩，N·m；Q_P、Q_E、Q_f 分别为螺旋桨扭矩、主机扭矩、摩擦力矩，N·m。

在式(1)~(5)的基础上建立综合考虑风、浪、流、缆、浅水及侧壁作用力下的涉及四象限的船舶操纵运动仿真数学模型，从而为船舶动态运动仿真试验奠定数学模型基础。

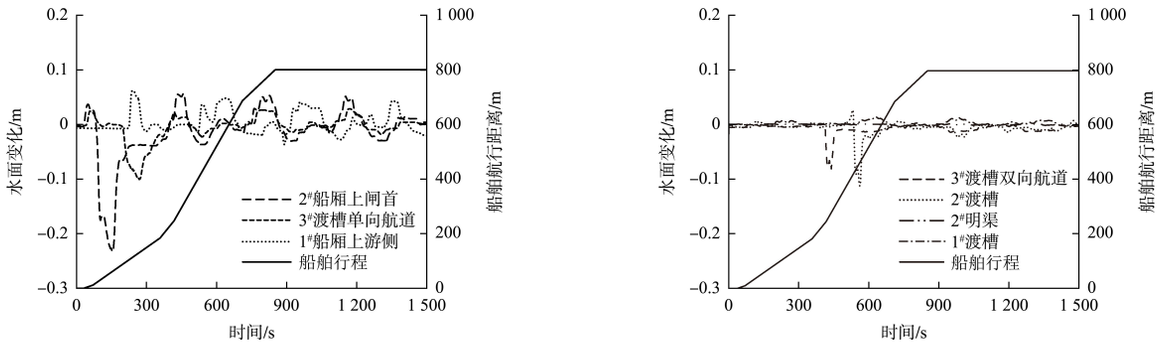
船舶操纵仿真模拟试验采用 NTPRO5000 仿真软件，通过其建立研究水域范围内的地形、流场模型以及船舶操纵时的场景模型，对代表船型在设定工况条件下的运动状态进行仿真研究[13]；采用 Virtual Ship Yard 船模建模软件建立 1 条与设计船型相似的 1 000 吨级船舶，并经航行稳定性、回转和倒车制动性试验验证该船舶满足船舶操纵性能标准要求。在此基础上，本文模拟 1 条 1 000 吨级船舶自 2#船厢以直线路径驶入中间渠道(v_1 为 1.5 m/s)直至在 1#停泊区停下过程。模拟过程中，认为渠道自由液面是静水面，且忽略风、浪对船舶的影响。

3　结果分析

3.1　中间渠道及船厢水面变化

试验工况 ST1，航行船舶以 v_0=0.6 m/s、v_1=1.5 m/s 自 2#船厢驶入中间渠道，另一条船舶停泊在 2#停泊段，中间渠道及船厢典型区段水面随时间变化曲线见图 3。不同试验工况，典型区段水面变化最大值见表 3。

水运工程



a) 两级船厢及3#渡槽单向航道　　b) 3#渡槽双向航道等中间渠道其他区段

图 3　典型区段水面随时间变化曲线

Fig. 3　Curves of water surface variation over time in typical sections

表 3　典型区段水面变化最大值

Tab. 3　Maximum water surface fluctuation in typical sections　　m

试验工况	v_1/(m·s^{-1})	2#船厢下游侧	2#船厢上闸首	3#渡槽单向航道	3#渡槽双向航道	2#明渠	1#渡槽	1#船厢下闸首	1#船厢上游侧
ST1	1.0	0.19	0.31	0.18	0.04	0.01	0.03	0.06	0.11
	1.5	0.17	0.28	0.21	0.13	0.01	0.03	0.07	0.13
	2.0	0.20	0.31	0.22	0.19	0.02	0.08	0.15	0.24
	2.5	0.39	0.37	0.28	0.35	0.05	0.14	0.27	0.40
ST2	1.0	0.16	0.30	0.17	0.03	0.02	0.03	0.05	–
	1.5	0.14	0.29	0.18	0.10	0.03	0.03	0.10	–
	2.0	0.22	0.33	0.24	0.19	0.03	0.10	0.15	–
	2.5	0.65	0.43	0.38	0.23	0.09	0.26	0.47	–
ST3	1.0	0.17	0.31	0.17	0.03	0.01	0.03	0.07	0.12
	1.5	0.16	0.29	0.18	0.08	0.01	0.02	0.05	0.10
	2.0	0.23	0.35	0.22	0.17	0.02	0.07	0.20	0.26
	2.5	0.58	0.51	0.36	0.42	0.12	0.25	0.39	0.54

当航行船舶驶经 2#船厢、2#船厢上闸首和 3#渡槽单向航道时，因航槽断面狭窄，阻塞效应显著。船舶启动将 2#船厢内水体推向上游，致使船尾后的 2#船厢至 3#渡槽单向航道水面降低，船尾下沉明显，而 3#渡槽双向航道及其上游中间渠道段和 1#船厢水面有所上升。当船尾驶出 3#渡槽单向航道进入双向航道时，水域变宽，水体大量涌入 2#船厢至 3#渡槽单向航道，并形成较大涌水波，在传至 2#船厢下游侧反射后与上行涌水波叠加，在中间渠道和两级船厢内形成复杂的长波波动，水面恢复平稳所需时间较长。3#渡槽双向航道、2#明渠、1#渡槽等较宽区段断面系数较大，其水面变幅相对较小。

对于两级带中间渠道的垂直升船机，需要考虑在船舶自 2#船厢驶入中间渠道时，对第 1 级升船机下游对接及第 2 级升船机上游对接的影响。升船机船厢闸首处水面波动过大时，易出现船厢门启闭困难、对接不顺等问题；船厢门开启后，还可能因内外水位差导致水体双向窜流，造成船厢内水量与纵倾力矩急剧变化，不仅降低运行效率，还危及升船机锁定装置、船厢结构以及船舶航行、泊稳安全。参考三峡升船机对接要求[14-15]，船厢锁定至开门的 5~10 min 内船厢内外水位差变化不宜超过 0.15 m，对接过程中下游引航道水位变化也应不大于 0.15 m。据此，本文 1#船厢下闸首和 2#船厢上闸首的水面变幅，控制标准确定为不大于 0.15 m。

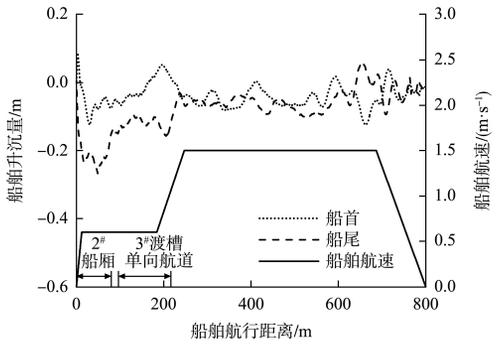
当 $v_1 \geqslant 2.0$ m/s 时，1#船厢下闸首处的水面变

幅最大值≥0.15 m，不利于第一级升船机在下游安全对接。故为保障其对接安全，船舶在中间渠道的航行速度不宜超过 1.5 m/s。

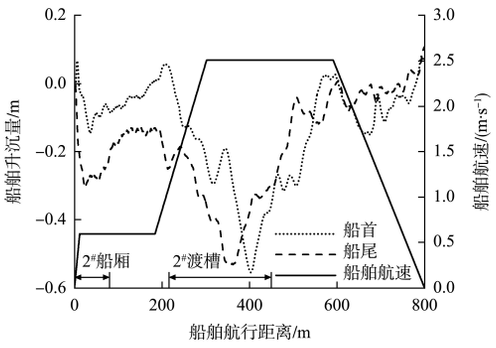
船舶从 2#船厢驶出至中间渠道过程中，沿程水面下降值均大于上升值；2#船厢上闸首最大水面变幅均大于 0.25 m。当中间渠道最高航速 v_1 = 1.0、1.5 m/s 时，约 10 min 后该处水面变幅即可小于 0.15 m；当 v_1 ≥2.0 m/s 时，则需要等待 40 min 以上。中间渠道最高航速 v_1 与 2#船厢上闸首处水面待稳时间呈正相关，与第 2 级升船机运行效率呈负相关。因此，综合考虑第 2 级升船机上游对接安全与运行效率，船舶在中间渠道航行速度同样不宜超过 1.5 m/s。

3.2　航行船舶下沉量

试验工况 ST1，航行船舶以 v_0 = 0.6 m/s、v_1 = 1.5 m/s 自 2#船厢驶入中间渠道，另一条船舶在 2#停泊段停泊，航行船舶首尾升沉量随船舶航行距离变化曲线见图 4。不同试验组合，航行船舶的最大下沉量与最小安全余量及对应船舶位置见表 4。船舶航行过程中，船舶最大下沉量大于上升量，且船舶下沉量随区段与航速变化明显。当 v_1 = 1.0、1.5 和 2.0 m/s 时，船舶最大下沉量均出现在船尾位于 2#船厢内时，并主要受出厢速度控制；试验中船舶出厢最高速度为 0.6 m/s，最大下沉量为 0.27～0.30 m、最小安全余量为 0.90～0.93 m，数值接近。当 v_1 = 2.5 m/s 时，船舶最大下沉量出现在船尾位于 2#渡槽内时，最大下沉量为 0.43～0.53 m、最小安全余量为 0.67～0.78 m。



a) 中间渠道最高航速为1.5 m/s



b) 中间渠道最高航速为2.5 m/s

图 4　航行船舶首尾升沉量随航行距离变化过程线

Fig. 4　Curves of change in pitching amplitude of sailing vessel with sailing distance

表 4　航行船舶最大下沉量与最小安全余量

Tab. 4　Maximum sinkage and minimum safety margin of navigational ships

试验工况	v_1/(m·s^{-1})	最大下沉量/m	最小安全余量/m	对应船舶行程及位置
ST1	1.0	−0.29	0.91	X = 49.42 m,2#船厢
	1.5	−0.27	0.93	X = 48.46 m,2#船厢
	2.0	−0.27	0.93	X = 47.98 m,2#船厢
	2.5	−0.53	0.67	X = 526.80 m,2#渡槽
ST2	1.0	−0.28	0.92	X = 49.18 m,2#船厢
	1.5	−0.27	0.93	X = 51.58 m,2#船厢
	2.0	−0.27	0.93	X = 47.98 m,2#船厢
	2.5	−0.43	0.78	X = 504.02 m,2#渡槽
ST3	1.0	−0.30	0.90	X = 55.42 m,2#船厢
	1.5	−0.26	0.94	X = 57.82 m,2#船厢
	2.0	−0.27	0.93	X = 55.66 m,2#船厢
	2.5	−0.43	0.77	X = 529.80 m,2#渡槽

为保障船舶航行安全，设计吃水 2.4 m 的 1 000 吨级船舶，船底最小安全余量应不小于 0.7 m。试验结果表明，中间渠道设计通航水深 3.6 m 安全合理，可满足船舶通航需求；船舶在中间渠道内航速控制在 1.5 m/s 内时，船底最小安全余量满足要求。

3.3　船舶操纵性能

1 000 吨级船舶自 2#船厢以直线路径驶出，进入中间渠道航行(v_1 = 1.5 m/s)，其操纵性能和运动轨迹见图 5 和 6。船舶从 2#船厢驶出进入 3#渡槽单向航道的过程，因船速较低且基本保持直线行

驶，舵角偏幅较小；当船舶驶入 2#明渠时，由于水面进一步变宽，适当操以右舵，将舵角调至 6°左右，同时漂角开始增大；当船舶行至 2#明渠折角段时，将船体操以右舵，舵角调至 14°；在驶离 2#明渠折角段后，向左转舵，将舵角调至 7°左右以确保船首航向与河岸平行。航行过程中，舵角在 2#明渠折角段内变化幅度较大，但整体航行状态较稳定，中间渠道整体线形布置较合理。

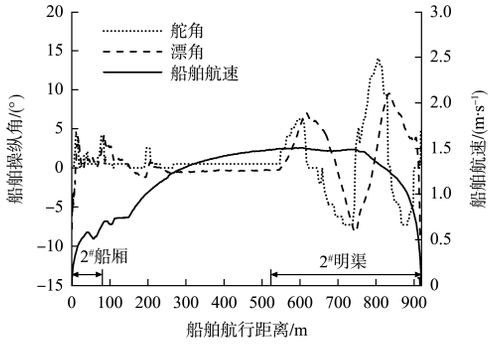


图 5　船舶舵角、漂角及航速

Fig. 5　Ship rudder angle，drift angle，and speed

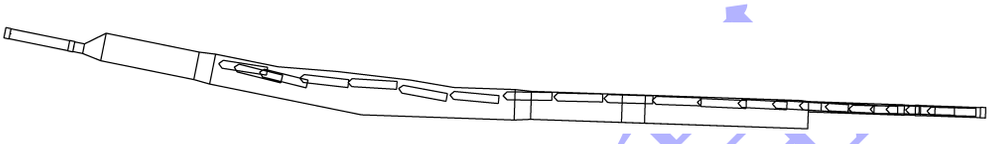


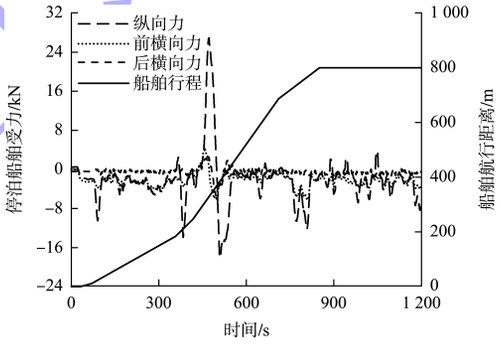
图 6　船舶直线出 2#船厢航行轨迹

Fig. 6　Ship's straight-line sailing trajectory out of No. 2 ship chamber

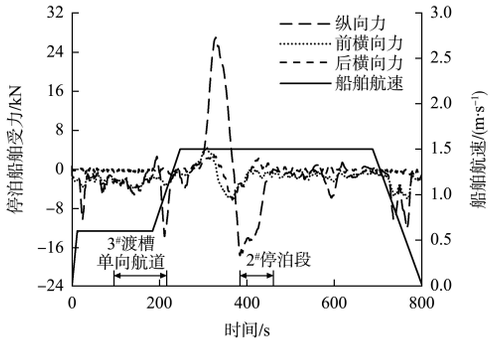
3.4　停泊段船舶受力

船舶自船厢驶出并在中间渠道航行时，会在中间渠道及船厢内形成复杂往复长波，不仅引发航行船舶颠簸，还易导致停泊船舶系缆力超标，形成安全隐患。

试验工况 ST1，航行船舶以 v_0 = 0.6 m/s、v_1 = 1.5 m/s 自 2#船厢驶入中间渠道，2#停泊段内船舶受力变化见图 7。各试验工况，停泊船舶最大受力见表 5。纵向力为停泊船舶受力控制指标，其最大值与 v_1 呈正相关，且在 $v_1 \geqslant 2.0$ m/s 时增幅显著。对比试验工况 ST1 和 ST3，当航行船舶以 v_1 驶经 2#停泊段与停泊船舶发生交会，受水域空间窄化影响，位于 2#停泊段的船舶受力明显大于位于 1#停泊段的船舶。当船舶以 v_0 = 0.6 m/s、v_1 = 1.5 m/s 航行时，2#停泊段船舶最大纵向力为 28.4 kN，而 1#停泊段船舶仅为 9.2 kN。



a) 随时间变化



b) 随航行距离变化

图 7　停泊船舶受力变化过程线

Fig. 7　Curves of force variation on berthed ship

表 5　停泊船舶最大受力值

Tab. 5　Maximum force value on berthed ship

试验工况	v_1/(m·s^{-1})	纵向力/kN		前横向力/kN		后横向力/kN	
		指向上游	指向下游	指向左岸	指向右岸	指向左岸	指向右岸
ST1	1.0	13.9	−13.5	1.6	−5.2	1.8	−3.3
	1.5	28.4	−16.3	5.8	−4.8	3.2	−6.4
	2.0	70.0	−44.6	8.8	−7.2	4.7	−12.1
	2.5	137.2	−78.4	9.8	−5.8	8.2	−18.4
ST2	1.0	14.9	−13.2	3.5	−4.7	1.6	−2.7
	1.5	26.5	−12.7	5.8	−4.7	4.2	−6.3
	2.0	65.5	−38.3	7.6	−8.3	4.7	−11.8
	2.5	92.7	−76.5	9.1	−12.4	6.3	−18.5
ST3	1.0	8.0	−7.1	1.3	−1.4	1.9	−0.5
	1.5	6.7	−9.2	1.4	−2.9	1.9	−1.7
	2.0	13.8	−9.4	1.9	−3.5	1.3	−2.1
	2.5	17.7	−19.9	1.9	−3.7	2.8	−2.8

根据 GB 51177—2016《升船机设计规范》[16]，1 000 吨级船舶允许系缆力的纵向、横向分力限值分别为 32、16 kN。从船舶泊稳安全角度出发，船舶在中间渠道最高航速不宜超过 1.5 m/s；此外，若船舶航行提速段内有靠泊船舶，应适当控制航行船舶加速度，避免过快提速，以保障船舶泊稳安全。

4　结论

1）船舶自船厢驶出并在中间渠道航行时，会引发船厢与中间渠道内水面波动，造成航行船舶尾部下沉，并改变中间渠道内船舶停泊条件，进而影响升船机对接安全与运行效率，对船舶航行及泊稳安全产生不利影响。

2）综合试验结果，在满足闸首水位变幅≤0.15 m、船底安全余量≥0.7 m 及停泊船舶受力不超 GB 51177—2016《升船机设计规范》限值(纵向 32 kN、横向 16 kN)的前提下，建议中间渠道内船舶最高航速不超过 1.5 m/s；中间渠道通航水深 3.6 m、船舶出厢最高航速 0.6 m/s 的方案合理可行，能满足设计船舶安全通航需求。

3）船舶自 2#船厢直线驶入中间渠道的操纵过程中，舵角变化范围为−7°～14°，航向整体保持稳定，表明中间渠道整体线形布置合理。

4）研究成果可为两级带中间渠道的升船机工程设计和运行提供技术支撑，有助于提升通航安全性与运行效率。

参考文献：

[1] 王可, 赵斌, 唐雪景, 等. 构皮滩水利枢纽垂直升船机设计中的关键问题研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(S2): 163-169.
WANG K, ZHAO B, TANG X J, et al. Research on pivotal issues in design of the partial balance winch vertical ship lifts of Goupitan Hydro-Station[J]. Water resources and hydropower engineering, 2023, 54(S2): 163-169.

[2] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[3] 李焱, 郑宝友, 周华兴. 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J]. 水道港口, 2012, 33(1): 45-50.
LI Y, ZHENG B Y, ZHOU H X, et al. Test on scale of navigation tunnel and canal bridge in the intermediate channel between ship lifts of Goupitan Power Station[J]. Journal of waterway and harbor, 2012, 33(1): 45-50.

[4] 王小威, 李中华, 李昌钊, 等. 构皮滩通航建筑物中间渠道船舶航行特性试验研究[J]. 水运工程, 2023(7): 125-132.
WANG X W, LI Z H, LI C Z, et al. Navigation characteristics of ships in middle channel of Goupitan navigation buildings[J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 125-132.

[5] 赵鑫. 中间通航渠道尺度与船舶临界航速研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.
ZHAO X. Research on the dimensions of navigational intermediate channel and critical vessel speed [D].

Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2025.

[6] 王新, 黄金根, 左邦祥, 等. 构皮滩通航设施第一级中间渠道水力学观测与实船试验[J]. 水运工程, 2023(9): 72-77.
WANG X, HUANG J G, ZUO B X, et al. Hydraulics observation and ship test of first-step intermediate channel of Goupitan navigation structure [J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 72-77.

[7] 邓健, 廖芳达, 谢澄, 等. 船舶操纵仿真的狭长通航隧洞航行安全研究[J]. 中国航海, 2021, 44(4): 7-12.
DENG J, LIAO F D, XIE C, et al. Ship handling simulation in research on safety of navigation in narrow and long tunnel[J]. Navigation of China, 2021, 44(4): 7-12.

[8] 陈明, 张忠原, 周绪生, 等. 1000 吨级船闸与升船机组合布置下中间渠道船舶泊稳条件研究[J]. 水运工程, 2025(12): 106-114, 121.
CHEN M, ZHANG Z Y, ZHOU X S, et al. Mooring stability condition of ships in intermediate channel under combination arrangement of a thousand-ton class ship lock and a ship lift [J]. Port & waterway engineering, 2025(12): 106-114, 121.

[9] 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司. 红水河龙滩水电站通航建筑物由通航 500 吨级船舶调整为通航 1 000 吨级工程可行性研究报告[R]. 长沙: 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 2018.
POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited. Feasibility study report on project of adjusting navigation structure of Longtan hydropower station on the Hongshui River from navigating 500-ton class vessels to 1000-ton class vessels[R]. Changsha: POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited, 2018.

[10] 中华人民共和国交通运输部. 中国水运建设 60 年: 建设技术卷[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. China port and waterway construction in the past 60 years: construction technology volume[M]. Beijing: China Communication Press, 2011.

[11] 李中华, 胡亚安, 刘克平. 向家坝升船机承船厢设计水深标准[J]. 水运工程, 2016(12): 153-157.
LI Z H, HU Y A, LIU K P. Water depth standard for Xiangjiaba ship lift's chamber [J]. Port & waterway engineering, 2016(12): 153-157.

[12] 乐美龙. 船舶操纵性预报与港航操纵运动仿真[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
LE M L. Prediction of ship maneuverability and simulation of port and waterway maneuvering motion [J]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004.

[13] 刘江林, 冯伟, 钟华林, 等. 基于船舶操纵仿真试验的弯曲河段复线船闸引航道方案论证和优化[J]. 水运工程, 2024(10): 84-89.
LIU J L, FENG W, ZHONG H L, et al. Demonstration and optimization of approach channel scheme for double track ship locks in curved river sections based on ship maneuvering simulation tests[J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 84-89.

[14] 南京水利科学研究院. 三峡升船机通航与运行保障关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.
Nanjing Hydraulic Research Institute. Research on key technologies for navigation and operation support of the Three Gorges ship lift[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2019.

[15] 尚桦. 水位波动对三峡升船机运行的影响[J]. 水运工程, 2024(3): 136-139.
SHANG H. Influence of water level fluctuation on operation of Three Gorges ship lift[J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 136-139.

[16] 升船机设计规范: GB 51177—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Design code for shiplift: GB 51177-2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.

（本文编辑　王璁）

水运工程