

· 航道及通航建筑物 ·



1 000 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^{*}

陈 明¹, 张忠原¹, 周绪生¹, 李中华², 薛宏程¹, 黄海津¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

2. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 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, 采用平面二维紊流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计算公式。结果表明: 1) 停泊段的最大流速和最大比降随船闸泄水均呈先增后减的变化过程, 且泄水时间越短, 最大流速峰值出现越早; 初始水深越小, 最大比降峰值出现越晚。2) 随着中间渠道宽度、初始水深和泄水时间的增加, 且当其中 2 个影响因素不变时, 船舶纵向系缆力均与第 3 个影响因素呈负幂关系减小。3) 同一渠道断面系数下纵向系缆力随船闸泄水平均流量的增加而线性增长, 船舶能承受的船闸最大泄水平均流量与断面系数呈线性增长关系。研究成果可为船闸与升船机组合布置下的中间渠道船舶停泊安全标准制定提供理论依据。

关键词: 船闸; 升船机; 中间渠道; 船舶; 泊稳条件

中图分类号: U641.3; TV691

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0106-09

Mooring stability condition of ships in intermediate channel under combination arrangement of a thousand-ton class ship lock and a ship lift

CHEN Ming¹, ZHANG Zhongyuan¹, ZHOU Xusheng¹, LI Zhonghua², XUE Hongcheng¹, HUANG Haijin¹

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aiming at the safety problem of ship mooring stability in the intermediate channel with a combination arrangement of 1,000-ton class ship locks and ship lifts, a planar two-dimensional turbulence mathematical model is used to study the influence of channel width, initial water depth and ship lock discharge time and other parameters on the ship mooring stability. The formula for calculating the average flow rate of maximum discharge that a ship can withstand is proposed. The results show that: 1) The maximum flow velocity and maximum gradient in the berthing section showed the process of first increasing and then decreasing with the water discharge from the ship lock, and the shorter the discharge time, the earlier the peak of the maximum flow velocity appeared; the smaller the initial water depth, the later the maximum gradient peak appeared. 2) As the width of the intermediate channel, initial water depth, and ship lock discharge time increase, when two of these parameters remain constant, the longitudinal mooring force of the ship decreases in a negative power function relationship with the third parameter. 3) Under the same section coefficient of channel, the longitudinal mooring force increases linearly with the increase of the average discharge flow rate of the ship lock. The maximum average discharge flow

收稿日期: 2025-03-17 录用日期: 2025-04-02

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206104)

作者简介: 陈明(1983—), 男, 教授, 从事通航水力学教学与研究工作。

rate that a ship can withstand is increased linearly related to the section coefficient. The research results can provide a theoretical basis for the formulation of safety standards for ship mooring in intermediate channels under the combined arrangement of ship locks and ship lifts.

Keywords: ship lock; ship lift; intermediate channel; ship; mooring stability condition

船闸-中间渠道-升船机组合布置是解决高山峡谷条件下船舶过坝的有效途径,也是未来高坝通航的重要发展方向。然而,当上级船闸向中间渠道内泄水时,由于泄水流量的非恒定性,中间渠道内的水流条件异常复杂,直接影响船舶的泊稳条件。戈龙仔等^[1]通过水工模型试验,研究了船闸在灌泄水过程中产生的非恒定流在规则矩形断面渠道内的波动特性。结果表明,可以利用水面比降和振荡波的高度来衡量渠道内的通航水流条件。曹玉芬等^[2]在戈龙仔的基础上,研究了不同船闸运行方式下的通航水流条件。结果表明,船闸错时灌泄水能有效减小渠道内振荡波波高和比降,同时充泄水渠道内水流条件最差。孟祥玮等^[3]利用物理模型结合数学模型研究船闸泄水进入中间渠道后中间渠道内的水流条件与渠道尺度的关系,指出当中间渠道长度约等于泄水波长一半时,船闸中间渠道振荡波最大。祝龙等^[4]通过建立一系列数学模型,对中间渠道内的水动力特性进行了研究。结果表明,增加中间渠道的宽度和初始水深可以改善通航水流条件。梅铃钦等^[5]通过数值模拟研究中间渠道的不同断面形式对通航水流条件的影响,发现采用梯形断面能够有效减小水位变幅、振荡波高、最大水面坡度以及最大纵向流速。

系缆力是评判船舶泊稳条件的重要参数之一,国内现有的相关研究主要聚焦于闸室或引航道内的船舶系缆力分析,而关于中间渠道内船舶系缆力的研究报道较少。周华兴等^[6-8]依据某引航道工程的模型试验成果,分析船舶停泊条件及影响因素,提出一系列改善措施;然后,又对引航道船

舶系缆力计算公式的应用条件进行探讨^[9],对比分析船舶航行阻力公式、规范公式和规范简化公式。结果表明,只有当断面系数 $Z \geq 12$ 时,才能按航行阻力公式代替系缆力作近似计算。于宝海等^[10]分析了不同船闸水头和尺度下闸室与引航道停泊条件的差异。结果表明,船闸水头与闸室尺度的增加会极大影响引航道的停泊条件,认为输水流量是引航道断面设计的重要参数。

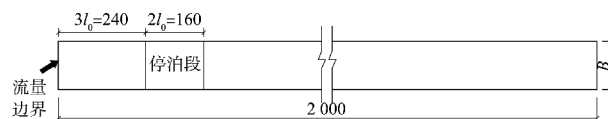
可见,目前针对船舶泊稳条件的研究,大部分围绕特定工程展开,而对其他工程的指导价值有限。此外,鲜有中间渠道内靠泊船舶泊稳条件的相关报道,通航建筑物和中间渠道布置尺度,如通航建筑物水头、有效尺度,以及中间渠道宽度、水深等与船舶泊稳条件的内在关系仍不明确。为此,本文将围绕 1 000 吨级船闸与升船机组合布置的中间渠道船舶泊稳条件开展研究,为相应的通航水动力安全标准制定提供理论依据。

1 数学模型建立

1.1 控制方程

本文采用二维不可压缩浅水方程组,其中的水流连续性方程和动量方程采用控制体积法对空间变量进行离散,采用有限差分法对时间进行离散。

1.2 计算区域及边界条件



注: l_0 为船长, B 为中间渠道宽度。

图 1 中间渠道的平面布置形式 (单位: m)

Fig. 1 Layout type of intermediate channel (unit: m)

中间渠道上端为船闸，下端为升船机。按最不利工况考虑整个渠道设为同一矩形断面，包括船舶停泊段，总长度取为 $L = 2\ 000\ \text{m}$ 。根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[11]，III 级限制性航道船舶船型尺度为 $80.0\ \text{m} \times 10.8\ \text{m} \times 2.0\ \text{m}$ （长度 \times 宽度 \times 吃水深度）；依据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[12]，同时考虑船闸泄水在中间渠道内形成波流的不利条件，停泊段设置于泄水出口下游 $3l_0$ 位置处，停泊段长度取 $2l_0$ ，中间渠道布置形式及停泊段位置见图 1。为探究中间渠道尺度和初始水深对船舶泊稳条件的影响规律，中间渠道宽度 B 取 $18 \sim 30\ \text{m}$ ，渠道初始水深 H 取 $3 \sim 5\ \text{m}$ 。

渠道上游进口为船闸泄水流量边界，考虑上游船闸泄入中间渠道的水体必然会通过下游端的溢流口溢出，由此不会导致较大的波动反射叠加，因此渠道下游出口设为自由出流边界。模型两侧及底部为渠道边壁，取壁面边界条件，表面糙率为水泥混凝土抹面糙率，取糙率 $n = 0.014$ 。以中间渠道宽度为 $21\ \text{m}$ 的数学模型为例，设计模型对应的网格节点 4 387 个，网格单元 7 762 个，采用非结构三角形网格，网格节点间距约 $4\ \text{m}$ 。

1.3 计算工况

中间渠道内船舶泊稳条件受中间渠道宽度、初始水深、流量边界等多因素影响，为全面分析各因素对船舶泊稳条件的影响规律，重点围绕 17 组中间渠道尺度进行研究，见表 1，并根据前期研究成果^[13]选取 18 组流量边界进行计算，见表 2。闸室尺度设置为 $180\ \text{m} \times 18\ \text{m}$ （长度 \times 宽度），表 1 中断面系数 Z 为渠道过水横断面面积与船舶水下舢断面面积的比值，平均流量 Q 为船闸泄水水量 W 与泄水时间 T 的比值。考虑 1 000 吨级船闸闸室尺度不唯一，不同输水系统布置形式下的阻力系数也各不相同。因此，为了更好地体现普适性，本文以闸室水量及泄水时间为参数对流量过程线进行多项式拟合。以设计水头 $20\ \text{m}$ 、船闸泄水时间 $12\ \text{min}$ 的流量过程线为例，对比了不同次数多项式的拟合效果，结果见图 2。

表 1 中间渠道尺度

Tab. 1 Scale of intermediate channel

序号	渠道宽度 B/m	初始水深 H/m	断面系数 Z
1	18	3.0	3.57
2	18	3.5	4.17
3	18	4.0	4.76
4	18	4.5	5.36
5	18	5.0	5.95
6	21	3.0	4.17
7	21	3.5	4.86
8	21	4.0	5.56
9	21	4.5	6.25
10	21	5.0	6.94
11	24	3.0	4.76
12	24	3.5	5.56
13	24	4.0	6.35
14	24	4.5	7.14
15	24	5.0	7.94
16	27	4.0	7.14
17	30	4.0	7.94

表 2 流量边界工况

Tab. 2 Boundary condition of the flow rate

序号	水头 H_s/m	泄水水量 $W/\text{万 m}^3$	泄水时间 T/min	平均流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1	10	3.564	7	84.86
2	10	3.564	8	74.25
3	10	3.564	9	66.00
4	10	3.564	10	59.40
5	10	3.564	11	54.00
6	10	3.564	12	50.00
7	20	7.128	8	148.50
8	20	7.128	10	118.80
9	20	7.128	12	99.00
10	20	7.128	14	84.86
11	20	7.128	16	74.25
12	30	10.692	10	178.20
13	30	10.692	12	148.50
14	30	10.692	14	127.29
15	40	14.256	13	182.77
16	40	14.256	15	158.40
17	40	14.256	17	139.76
18	50	17.820	16	185.63
19	50	17.820	18	165.00
20	50	17.820	20	148.50

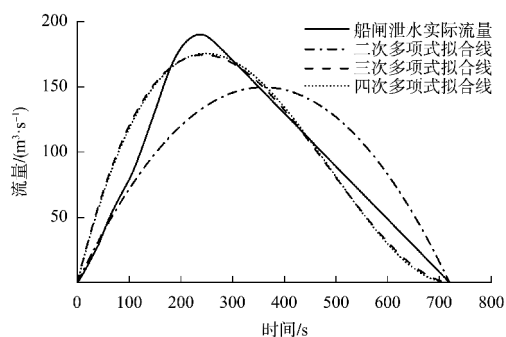


图 2 船闸泄水流量过程线

Fig. 2 Time series of the lock discharge flow

二、三、四次多项式拟合曲线的相关系数 R^2 分别为 0.85、0.96、0.96。此外，三次多项式拟合曲线拟合效果明显优于二次多项式拟合，且与四次多项式拟合效果相当。与船闸泄水实际流量过程线相比，三次多项式拟合曲线对应的流量峰值略低，但峰值出现时间接近，泄水水量与泄水时间一致。因此本文最终选用三次多项式。通过给定泄水时间 T ，泄水水量 W 及一个待定系数，拟合得到流量边界，拟合方程见下式：

$$aT^3 + bT^2 + cT = 0 \quad (1)$$

$$(aT^4)/4 + (bT^3)/3 + (cT^2)/2 = W \quad (2)$$

式中： T 为泄水时间； W 为泄水水量； a 、 b 、 c 为待定系数。

1.4 数学模型验证

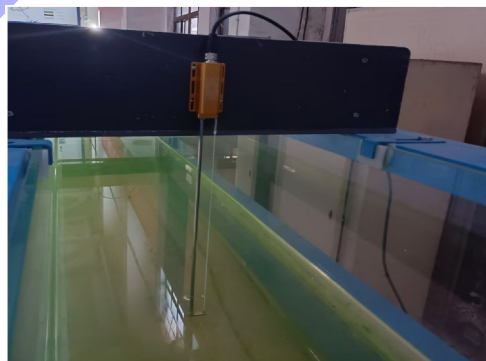
为了验证数值模拟结果的可靠性，本文基于比尺 1:50 的中间渠道物理模型(长 28 m、宽 0.4 m、高 0.4 m)开展试验，物理模型的现场照片见图 3。试验中，渠道初始水深为 4.0 m，采用 6 min 阀门开启方式向中间渠道泄水，泄水时间 9 min，船闸泄水流量过程线见图 4。水深变化过程通过布置在距上游端部 6.8 m 处的波高仪进行测量，结果见图 5。数值模拟的进口流量边界采用物理模型试验实测数据，结果表明，数值模拟结果与实测数据的变化趋势整体一致，最大误差不超过 2.0%。因此，本文所采用的数学模型能够准确地反映上游船闸泄水引起的中间渠道水面波动情况。



a) 渠道上游进口



b) 渠道下游出口



c) 波高仪



d) 采集系统

图 3 试验模型及仪器照片

Fig. 3 Test model and instrument photos

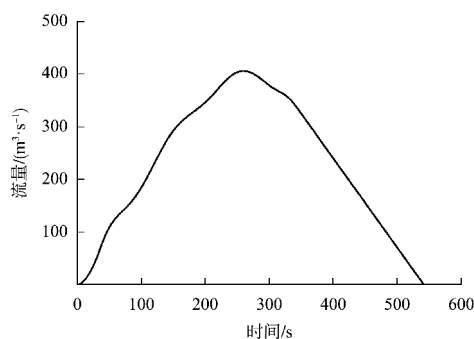


图4 船闸泄水流量过程线

Fig. 4 Time series of ship lock discharge flow rate

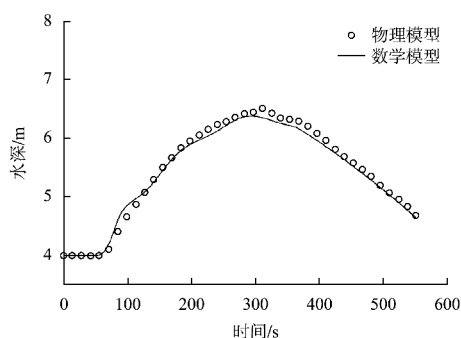


图5 渠道水深过程线

Fig. 5 Time series of channel water depth

2 结果分析

2.1 水流条件

分析中间渠道水流条件时,重点围绕中间渠道停泊段中心线上的最大流速和最大比降变化规律进行阐述。船闸泄水水头 H_s 为 10 和 20 m 条件下最大流速和最大比降随渠道宽度、初始水深、船闸泄水时间的变化规律,见图 6~8,由图可知,最大流速和最大比降均呈先增后减的变化过程,且最大流速峰值的发生时刻受渠道宽度和初始水深影响不大,但泄水时间越短,则越早出现峰值;对于最大比降而言,其峰值出现时刻对渠道宽度和泄水时间不敏感,主要受渠道初始水深影响,初始水深越小,则峰值出现时刻后延。因此,如果渠道初始水深持续减小,船闸泄水时间越短,则容易造成最大流速和最大比降的峰值出现时刻重叠,进而形成不良的船舶停泊条件。

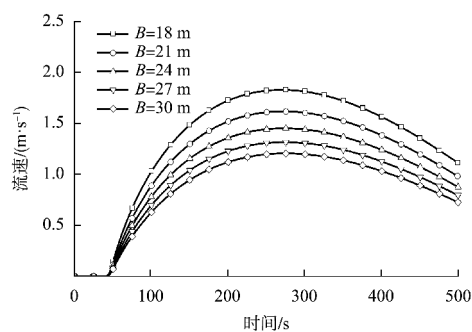
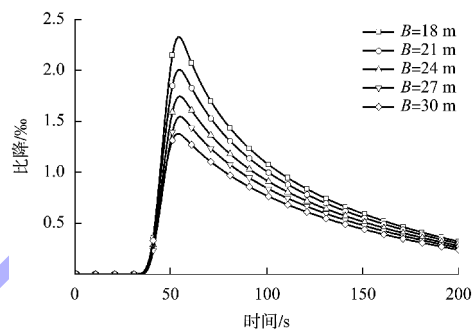
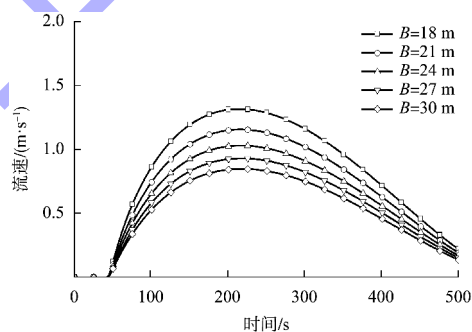
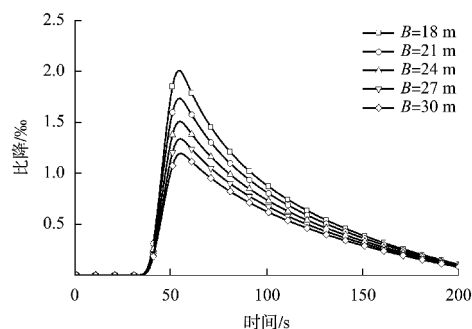
a) 最大流速($H_s=20$ m, $T=12$ min, $H=4$ m)b) 最大比降($H_s=20$ m, $T=12$ min, $H=4$ m)c) 最大流速($H_s=10$ m, $T=9$ min, $H=4$ m)d) 最大比降($H_s=10$ m, $T=9$ min, $H=4$ m)

图6 不同渠道宽度下水流条件随时间变化规律

Fig. 6 Change law of water flow conditions with time under different channel width

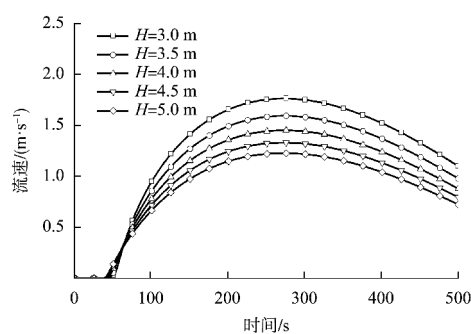
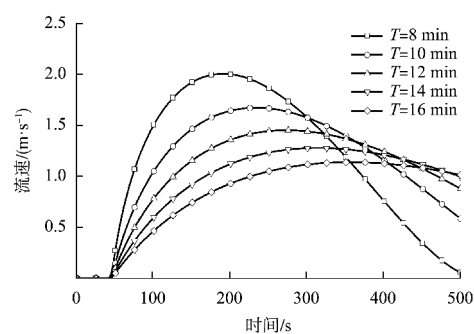
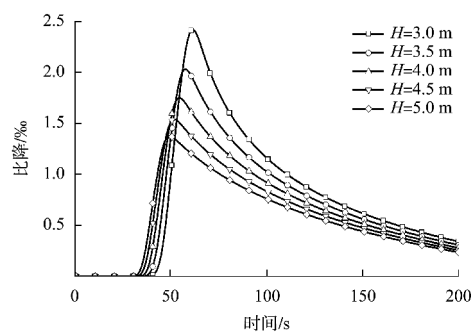
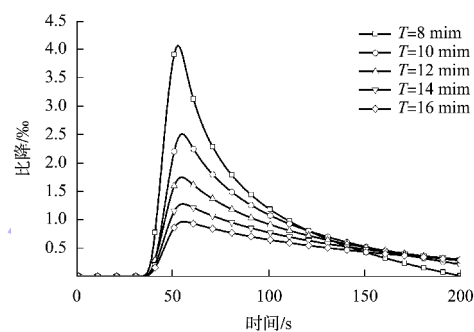
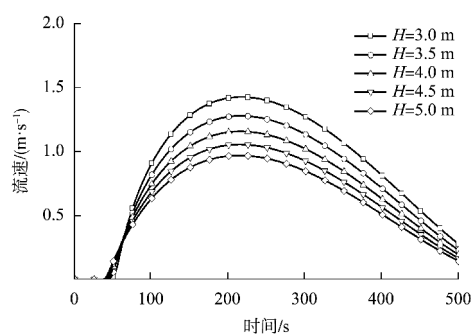
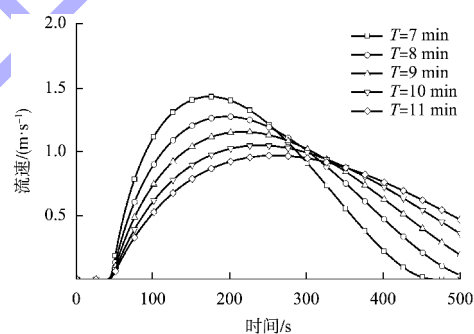
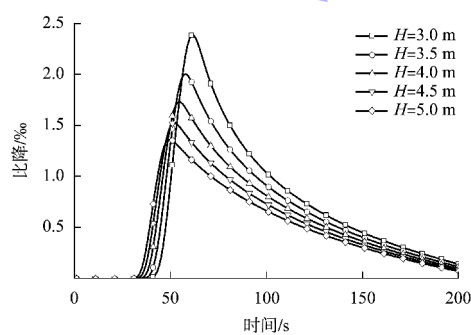
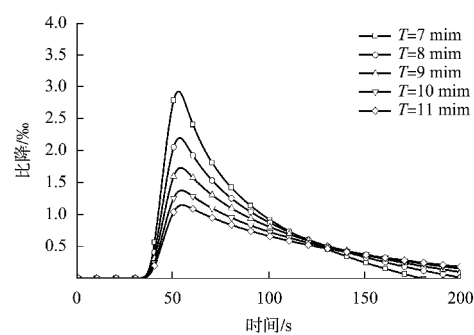
a) 最大流速($H_s=20$ m, $T=12$ min, $B=24$ m)a) 最大流速($H_s=20$ m, $H=4$ m, $B=24$ m)b) 最大比降($H_s=20$ m, $T=12$ min, $B=24$ m)b) 最大比降($H_s=20$ m, $H=4$ m, $B=24$ m)c) 最大流速($H_s=10$ m, $T=9$ min, $B=21$ m)c) 最大流速($H_s=10$ m, $H=4$ m, $B=21$ m)d) 最大比降($H_s=10$ m, $T=9$ min, $B=21$ m)d) 最大比降($H_s=10$ m, $H=4$ m, $B=21$ m)

图 7 不同渠道初始水深下水流条件随时间变化规律
Fig. 7 Change law of water flow conditions with time
under different initial water depth of channel

图 8 水流条件随船闸泄水时间变化规律
Fig. 8 Change law of water flow conditions with
ship lock discharge time

2.2 系缆力变化规律

基于上述得到的最大流速和比降,采用式(3)和(4)分别求得靠泊船舶所承受的波浪力 F_i 和流速力 F_v [14], 以上两种力相加即为船舶纵向系缆力 F 。

$$F_i = igDk^{0.5} + 2vD(1-k^{0.5})[g(\omega_n - \chi)]^{0.5}/l_0 B_n^{0.5} \quad (3)$$

$$F_v = (\delta \Psi m_c \chi + f\Omega + D/C^2 R)gV^2 \quad (4)$$

式中: i 为停泊段比降; g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为船舶的排水量, t ; k 为系数; v 为船舶中心点流速, m/s ; ω_n 为引航道过水横断面面积, m^2 ; χ 为船舶浸水横断面面积, m^2 ; l_0 为船舶的长度, m ; B_n 为引航道水面的宽度, m ; δ 为船舶排水量方形系数; Ψ 为剩余阻力系数; m_c 为船前流速不均匀系数; f 为摩擦系数; Ω 为船舶浸水表面面积, m^2 ; C 为谢才系数; R 为水力半径, m ; V 为引航道断面平均流速, m/s 。

在船闸泄水非恒定流的影响下,中间渠道停泊段船舶纵向系缆力与最大瞬时流量、船闸泄水时间、中间渠道断面设计等密切相关。本文以设计水头 20 m, 泄水时间 12 min 为例探究其系缆力变化规律, 具体结果见图 9。由图可知, 随着中间渠道宽度、初始水深和船闸泄水时间的增加, 且当其中两个影响因素不变时, 纵向系缆力均呈负幂关系减小。船闸泄水时间较短时 ($T=9$ min) 纵向系缆力较大 (53.87 kN), 且其峰值主要由波浪力决定, 见图 10a); 而对于较长的泄水时间如 $T=10$ 、12 min, 纵向系缆力峰值由波浪力和流速力共同决定, 见图 10b)、c)。对比可见, 船闸泄水时间较短时导致波浪力增大, 同时最大纵向系缆

力发生时刻提前。

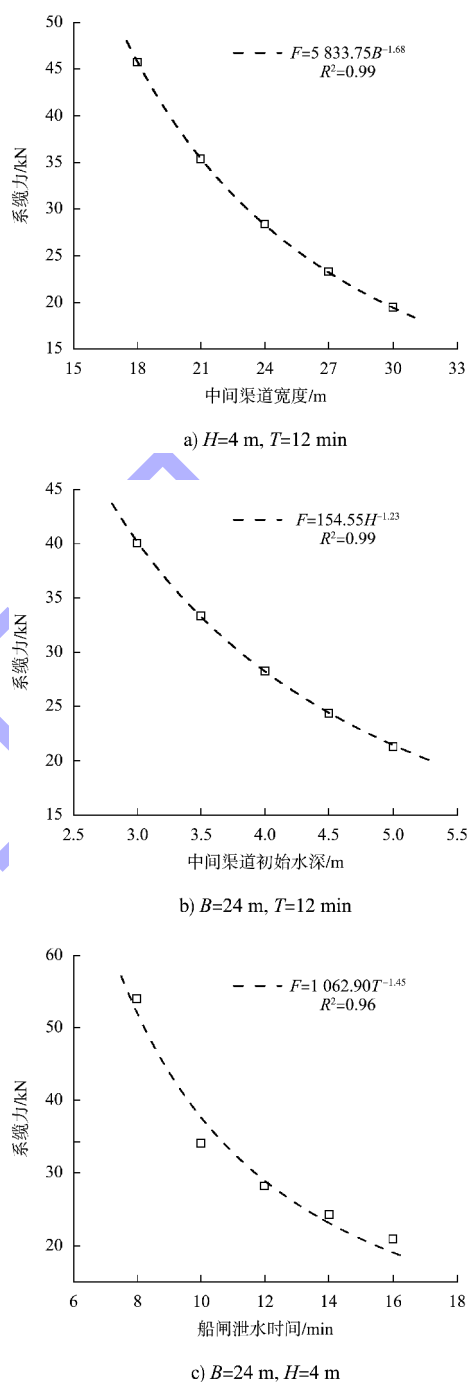


图9 船舶纵向系缆力变化规律

Fig. 9 Change law of longitudinal mooring force of ships

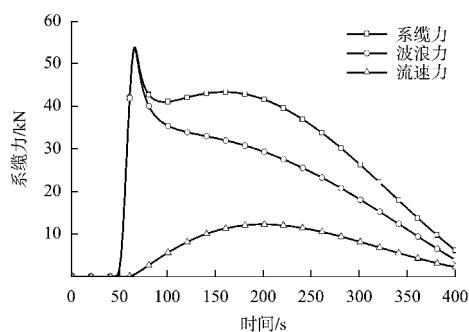
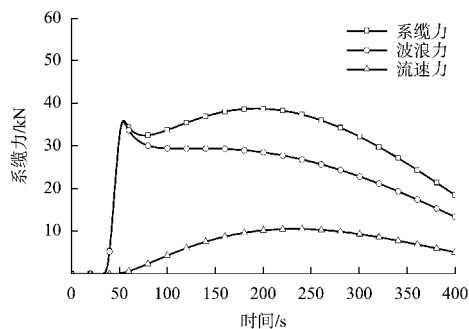
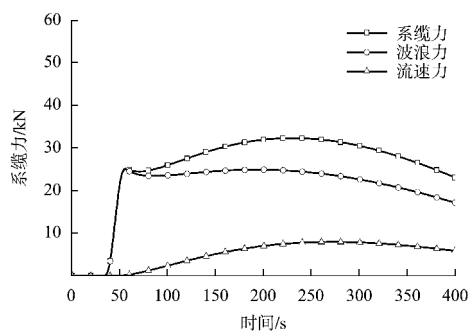
a) $B=24\text{ m}, H=4\text{ m}, T=8\text{ min}$ b) $B=24\text{ m}, H=4\text{ m}, T=10\text{ min}$ c) $B=24\text{ m}, H=4\text{ m}, T=12\text{ min}$

图 10 船舶纵向系缆力随时间变化规律

Fig. 10 Change law of longitudinal mooring force of ships over time

2.3 船舶安全泊稳条件

为了更好地分析渠道断面尺寸和水深、船舶尺度、船闸泄水过程与船舶纵向系缆力的关系,渠道断面系数 Z 、船闸泄水平均流量 Q 以及纵向系缆力间的影响规律,见图 11。由图可知,同一断面系数下纵向系缆力随平均流量的增加呈线性增加,斜率随断面系数增大而减小;在泄水时间较短的情况下,平均流量为 $84.86\text{ m}^3/\text{s}$ 时系缆力均偏大。由图 11 可知,根据 1 000 t 船舶最大纵向

系缆力 (32 kN),得出各渠道断面系数条件下船舶可承受的最大泄水平均流量,发现船舶可承受的最大泄水平均流量 Q 与断面系数 Z 呈线性增长关系,见图 12,拟合关系为:

$$Q = -46.67 + 24.02Z \quad (5)$$

由于本文为二维概化数学模型,计算模型并未针对泄水出口处采取任何消能措施,且停泊段的宽度一般需扩大。因此,本文计算出的系缆力值较实际情况偏大,应用该式估算各断面系数下中间渠道靠泊船舶能承受的最大泄水平均流量较为安全。

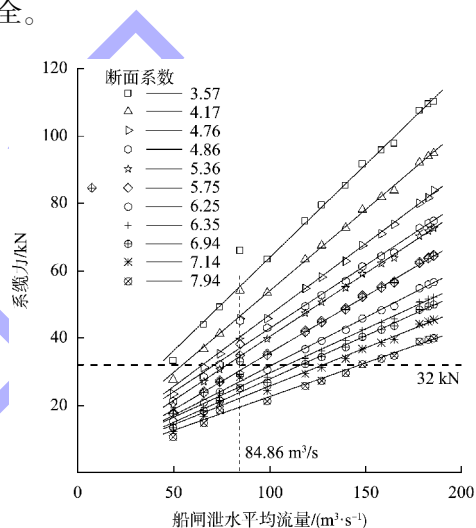


图 11 各断面系数下系缆力随船闸泄水平均流量的变化规律

Fig. 11 Change law of mooring force with average flow rate of ship lock discharge under different section coefficient

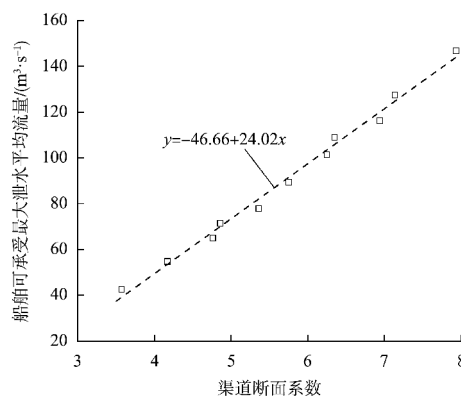


图 12 船舶可承受最大泄水平均流量随断面系数的变化规律

Fig. 12 Change law of average flow rate of maximum allowable discharge of ship lock with section coefficient

3 结论

1) 中间渠道停泊段中心线上的最大流速和最大比降随着船闸泄水均呈先增后减的变化过程, 且最大流速峰值的发生时刻受渠道宽度和初始水深影响不大, 但泄水时间越短, 则越早出现峰值; 对于最大比降而言, 其峰值出现时刻对渠道宽度和泄水时间不敏感, 主要受渠道初始水深影响, 初始水深越小, 则峰值出现时刻后延。

2) 随着中间渠道宽度、初始水深和船闸泄水时间的增加, 且当其中 2 个影响因素不变时, 船舶纵向系缆力均与第 3 个影响因素呈负幂关系减小。船闸泄水时间较短时 ($T=8\text{ min}$), 其峰值主要由波浪力决定; 而对于较长的泄水时间如 $T=10、12\text{ min}$, 纵向系缆力峰值由波浪力和流速力共同决定。

3) 同一渠道断面系数下纵向系缆力与船闸泄水平均流量呈线性增长关系, 船舶能承受的船闸最大泄水平均流量(允许系缆力为 32 kN)随断面系数增长呈线性增加, 拟合关系为: $Q=-46.67+24.02Z$ 。由于该式基于平面二维紊流数学模型计算成果, 其普适性有待通过三维模型以及物理模型试验进一步验证。

参考文献:

- [1] 戈龙仔, 曹玉芬, 孟祥玮, 等. 船闸中间渠道非恒定流特性与调节池改善措施探讨[J]. 水道港口, 2006, 27(6): 378-383.
GE L Z, CAO Y F, MENG X W, et al. Analysis of characteristics of unsteady flow in middle channel and improving measures about balancing bank[J]. Journal of waterway and harbor, 2006, 27(6): 378-383.
- [2] 曹玉芬, 戈龙仔, 孟祥玮, 等. 带中间渠道船闸运转方式的试验研究[J]. 水道港口, 2007, 28(2): 126-132.
CAO Y F, GE L Z, MENG X W, et al. Study on run mode of upper and lower lock with intermediate channel[J]. Journal of waterway and harbor, 2007, 28(2): 126-132.
- [3] 孟祥玮, 高学平, 周华兴. 船闸中间渠道尺度对通航水流条件影响的研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 31-36.
MENG X W, GAO X P, ZHOU H X. Study on influence from scale of ship lock intermediate channel on navigation flow condition [J]. Water resources and hydropower engineering, 2010, 41(10): 31-36.
- [4] 祝龙, 刘本芹, 宣国祥, 等. 分散梯级船闸中间渠道水力特性及关键参数影响研究[J]. 水运工程, 2020(12): 15-21.
ZHU L, LIU B Q, XUAN G X, et al. Study on hydraulic characteristics and influence of key parameters of middle channel of the dispersed cascade ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2020(12): 15-21.
- [5] 梅铃钦, 安建峰, 张首元, 等. 分散梯级船闸输水时的作用水头和中间渠道断面形式对通航水流条件的影响[J]. 水运工程, 2024(4): 88-92, 106.
MEI L Q, AN J F, ZHANG S Y, et al. Influence of cross-section type and working head of intermediate channel on navigation flow conditions in decentralized cascade lock during water transfer [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 88-92, 106.
- [6] 周华兴. 船闸输水阀门开启对停泊条件影响的研究[J]. 水道港口, 1989, 10(3): 10-16.
ZHOU H X. Research on the effect of the valve of filling and emptying system lifted on ship mooring conditions [J]. Journal of waterway and harbor, 1989, 10(3): 10-16.
- [7] 周华兴. 三峡双线船闸引航道停泊条件分析[J]. 水运工程, 1995(3): 27-33.
ZHOU H X. Analysis of berthing conditions in the approach channel of Three Gorges double-lane lock [J]. Port & waterway engineering, 1995(3): 27-33.
- [8] 周华兴, 郑宝友, 王化仁. 船闸灌泄水引航道内波幅与比降研究[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 103-108.
ZHOU H X, ZHENG B Y, WANG H R. Test on wave amplitude and slope during lock filling and emptying in approach channel [J]. Journal of waterway and harbor, 2005, 26(2): 103-108.

(下转第 121 页)