



连续窄弯河段通航建筑物平面布置

马利军¹, 乾东岳², 普晓刚², 李明¹

(1. 湖南省航务勘察设计研究院, 湖南长沙 410005; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 依托湖南华容河旗杆咀船闸改建工程, 采用数值模拟与通航船舶操纵模拟器相结合的研究方法, 对船闸布置于连续窄弯河段凹岸, 上、下游引航道均处于曲率半径较小的弯曲段的通航建筑物平面布置进行研究, 并提出改善通航条件的方法及平面布置需要注意的事项, 供类似工程参考。

关键词: 连续窄弯河段; 曲线引航道; 通航建筑物; 平面布置

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0083-08

Navigation structures' layout of continuous narrow curved river

MA Li-jun¹, QIAN Dong-yue², PU Xiao-gang², LI Ming¹

(1. Hunan Shipping Survey and Design Institute, Changsha 410005, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Depending on Qiganzui's reconstruction project of Huarong river in Hunan province, we combine numerical simulation with navigation ship handling simulator to research the navigation structures' layout on the lock which locates on the concave bank of continuous narrow curved river and both the upstream and downstream approaching channels lie on the curved reach with small radius of curvature, propose the method to improve the navigational conditions, and point out matters of attention for the layout, so as to provide reference for similar projects.

Keywords: continuous narrow curved river; curve approach channel; navigation structure; layout

梯级渠化是增加航道水深、改善通航条件行之有效的工程措施之一。以通航为主要目的的枢纽建设, 一般应选择河道顺直、河面宽阔的河段作为坝址, 其平面和断面形态要能够满足通航建筑物布置的需求。但因受河势、地形及梯级水位衔接等因素影响, 往往难以选择到理想的顺直、开阔河段作为枢纽坝址, 而不得不择址于平面弯曲、河面狭窄的河段。此时, 一般将枢纽布置于两弯道间相对顺直的过渡段, 且引航道宜顺直布置, 而将口门区与连接段置于弯道上, 如葛洲坝、景洪、沙颍河葫芦湾、嘉陵江沙溪、四九滩等。建在单个弯道河段上的枢纽, 通航建筑物多布置

于凸岸台地, 通过长距离的引航道与河道上下游主航道相连, 如三峡、株洲、大源渡等^[1-5]。但对狭窄弯曲河段(船闸无法布置于滩地)通航建筑物的平面布置, 却鲜有工程实例及相应研究成果。本文以湖南华容河旗杆咀船闸改建工程为例, 对窄弯河段通航建筑物平面布置进行探讨。该船闸布置于连续狭窄弯道凹岸, 且上、下游引航道均处于曲率半径较小的弯曲段。

1 工程概况

旗杆嘴船闸建于1982年, 以沟通华容内河与东洞庭湖。老船闸布置于河道左岸, 设计通航等

收稿日期: 2016-01-27

作者简介: 马利军(1985—), 男, 工程师, 从事航道整治及通航建筑物研究。

级为Ⅶ级；泄水闸布置于右岸，共六孔（俗称六门闸）。随着华容河航道等级提升至Ⅳ级，现有船闸因设施落后，闸室有效尺寸小，难以满足过闸船舶客货运量要求，需进行升级改建。改建后船闸等级与航道相匹配，能够满足500 t级（并兼顾1 000 t级）船舶过闸。因闸址地形条件所限且已建泄水闸移址困难，改建船闸只能布置于原闸址弯段处，船闸布置存在较大难度。

1.1 闸址河段河势特征

闸址河段平面形态呈反“S”型，闸址处河宽不足150 m，船闸位于急弯段凹岸侧，其右侧约90 m处为泄水闸。船闸上游为华容内河，呈近90°的急弯，弯道凹岸为三角形滩地区域；船闸下游为华容外河（东洞庭湖），为弯曲半径约500 m的弯道凸岸，枯水是河，洪水成湖。由图1可以看出，船闸闸址为典型的连续窄弯河段，且并无直线过渡段。

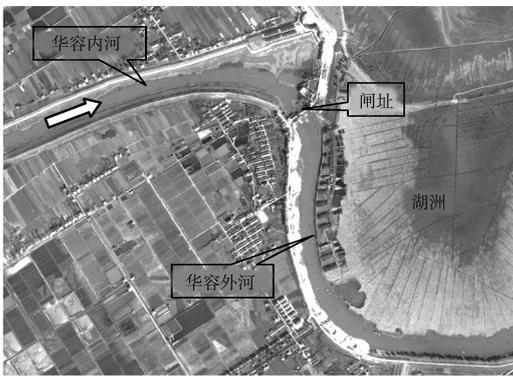


图1 闸址河段河势

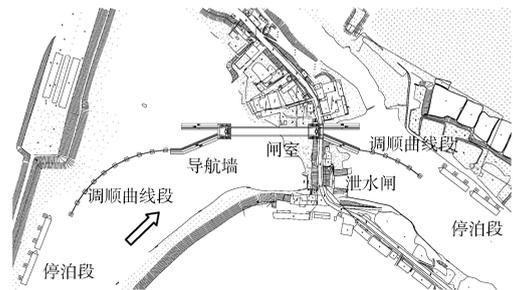


图2 初拟平面布置方案

1.2 初拟平面布置方案

船闸于旧址重建，外闸首布置在泄水闸左侧，闸室有效尺寸为145.0 m×12.0 m×3.5 m（长×宽×

门槛水深）。内河引航道主导航墙长75 m，辅导航墙67.5 m（1倍船长）；调顺直线段长20 m，曲线段弯曲半径为225 m，长为287.6 m，弧度夹角69°；停泊段位于左岸侧，长145 m。外河引航道主导航墙长75 m，辅导航墙67.5 m；调顺曲线段弯曲半径为216.7 m，长110 m，弧度夹角29°，调顺直线段长50 m；停泊段长145 m，布置于外河左岸侧。引航道宽度40 m。初拟平面布置方案见图2。船闸设计通航船舶尺度为500吨级货船（67.5 m×10.8 m×1.6 m，长×宽×吃水）和1 000吨级货船（85 m×10.8 m×2.0 m）。

2 初拟方案通航条件分析

采用平面二维水流数学模型与船舶操纵模拟器相结合的手段，来了解船闸上、下游引航道、口门区的通航水流条件及船舶航行条件，并据此对引航道的布置和尺度提出优化措施。

2.1 模型概况

河段水流模拟采用水动力学软件 DHI Software 中的 Mike21 水流模型进行。受六门闸调控影响，华容河内河与外河水动力条件关联性较小，可分开建模计算，计算域为距坝轴线上、下游各2 km 范围河段（图3）。因外河高水期与东洞庭湖区相连，为避免边界条件对计算结果的影响，外河模型计算域覆盖部分东洞庭湖区地形。

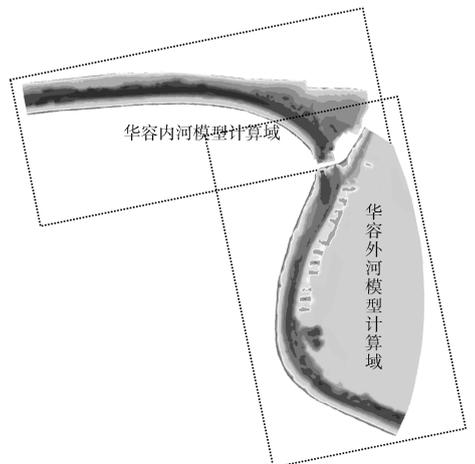


图3 模型计算域

依据所模拟船型的主尺度、螺旋桨特性、电机功率等相关基础参数建立船舶数学模型。采用

V. Dragon-3000AT 型通航船舶操纵模拟器进行船舶操纵性试验,包括回旋试验、“Z”型曲线试验两部分,并在船舶操纵性数据库中选取性能相接近的通用船型水槽试验数据以验证船舶数学模型的船舶操纵性。此外,还需对模拟环境、模拟方案等方面进行验证。经验证,该模型可完整地模拟船舶驾驶室操作环境及船闸区水域环境(包括岸线、水深、风流等)(图4)。

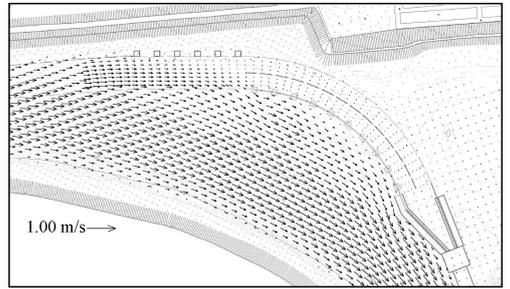


图4 大型船舶操纵模拟器

2.2 初拟方案通航条件

2.2.1 内河引航道

内河近坝段因六门闸拦蓄来流形成库区,水动力条件较弱。主流靠近右岸侧,左侧流速普遍低于右侧,三角形滩地区域基本为静水。在相同流量下,近坝段水动力强度随水位增加而减弱;反之,同一水位下,其强度随流量增大而增大。如,在泄流量为 $166 \text{ m}^3/\text{s}$ (六门闸实际最大泄流量)时,当闸上水位为 25.06 m (六门闸最低运行水位,船闸最低通航水位)时流速达到最大,约 0.38 m/s 。引航道口门区横向流速与六门闸下泄流量及闸下水位相关,下泄流量增加、闸下水位降低,则口门区横向流速增加,但增值较小。口门区流速在 $0.11 \sim 0.28 \text{ m/s}$,最大横向流速 0.05 m/s 。引航道内流速在 0.03 m/s 以下,可视为静水。

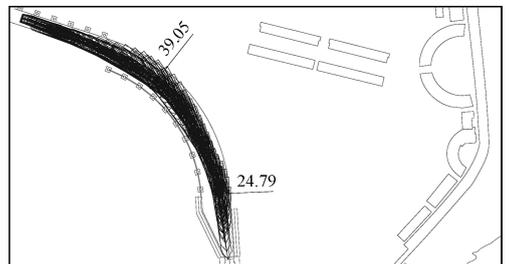


注: $Q=166 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_d=25.06 \text{ m}$ 。

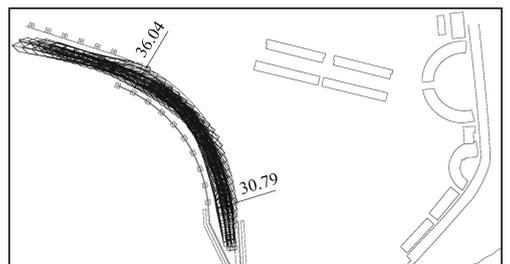
图5 内河引航道水流场

在初拟平面布置方案下,针对泄水闸为最大泄流流量($Q=166 \text{ m}^3/\text{s}$),船闸分别处于最高、最低通航水位 33.55 、 25.06 m 时,并考虑 5、6 级风(E/W/N)的作用等几种不同工况,进行船舶操作模拟试验。

图6为500吨级货船在各工况下进出闸的航迹叠加图。因内河水流流速较小,其对船舶进出闸操纵几无影响;而风对船舶操纵的干扰大于水流,但由于船舶尺度小、舵效好,通过合理的操纵,船舶飘距、舵角等均满足操控要求,可顺利进出闸。



a) 进闸

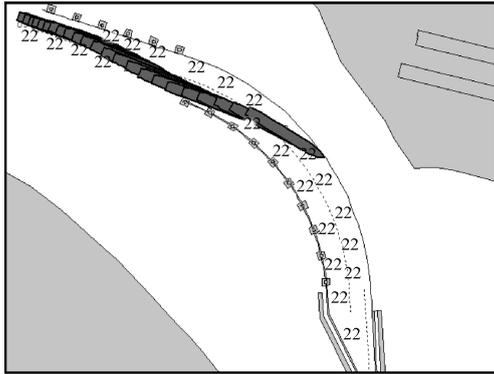


b) 出闸

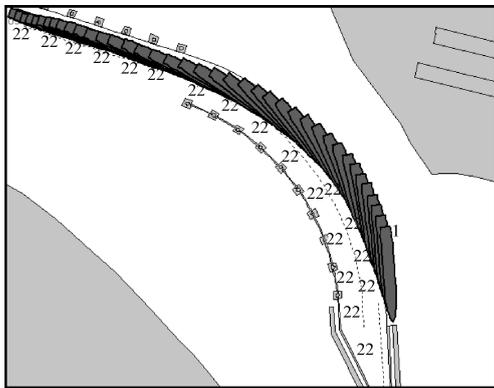
图6 500 t 货船各工况下内河进出闸航迹叠加

1000吨级货船因船体较长,需较大的转弯半径,但河道曲率半径小,船舶转向角度大,即使

在无风无流的情况下，仍难顺利进出闸。进闸时，或因靠船墩距导流堤堤头较近，船舶在到达堤头时航速较低，舵效较差，无法顺利转入弯道水域，致使船尾触碰导流堤(图 7a))；或因船舶一进入弯道水域就需打右满舵，由于横移量过大致使船舶越出航道(图 7b))。出闸时，即使在满舵的情况下，仍无法顺利驶出弯道水域(图 8)。

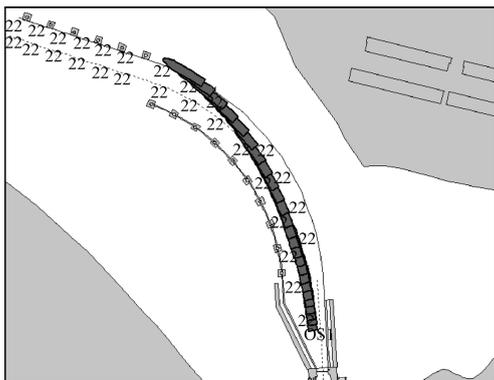


a) 无流

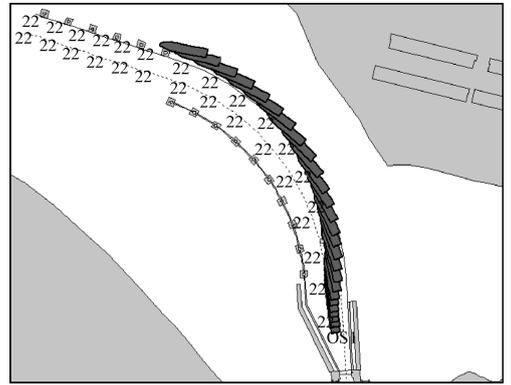


b) 无风

图 7 1 000 吨级货船 (无流、无风) 内河进闸航迹



a) 无流

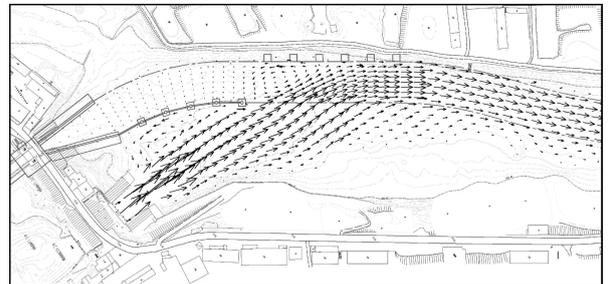


b) 无风

图 8 1 000 吨级货船 (无流、无风) 内河出闸航迹

2.2.2 外河引航道

华容河外河处于洞庭湖湖区。由于六门闸泄槽轴线与下游主槽存在约 40°的夹角，水流出泄水闸后直接顶冲左岸滩地，并在引航道导墙与六门闸之间形成回流区，如，在最大下泄流量(166 m³/s)，船闸处于最低通航水位(21.64 m)时，最大回流流速 0.36 m/s，最大断面流速 1.47 m/s。主流从右岸过渡至左岸，于引航道出现横流，且随下泄流量增加、闸下水位降低，横流逐渐增加。外河引航道内最大横向流速 0.6 m/s(图 9)。



注: $Q=166 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_d=21.64 \text{ m}$ 。

图 9 外河引航道水流流场

针对泄水闸为最大泄流流量 ($Q=166 \text{ m}^3/\text{s}$)，船闸分别处于最高、最低通航水位 31.72、21.64 m 时，并考虑 5、6 级风(E/W/N)的作用等几种不同工况，进行船舶操作模拟试验。

虽然外河流速相对内河大，但由于 500 t 货船船舶尺度小、舵效好，通过合理的操纵，其飘距、舵角均在合理范围内，船舶基本可顺利进出船闸。图 10a)为进闸的航迹叠加图，在调顺曲线段的航

迹带最大为 42.94 m, 部分航迹带在设计航道外侧; 在直线段的航迹带最大为 31.56 m, 都在设计航道内; 图 10b) 为出闸的航迹叠加图, 在调顺曲线段的航迹带最大为 34.06 m, 在直线段的航迹带最大为 34.84 m, 都在设计航道内。

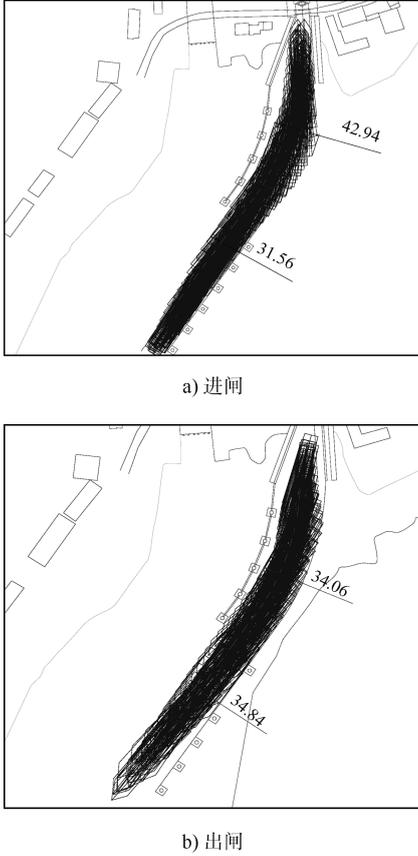
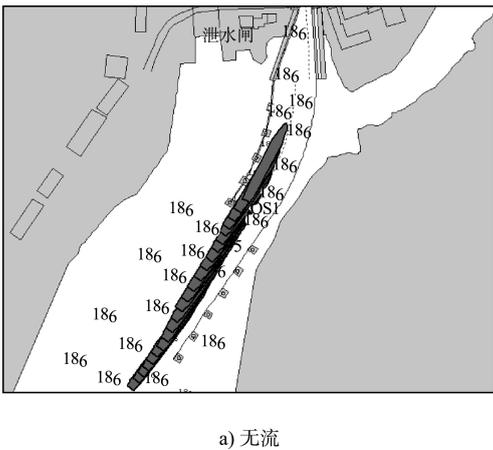


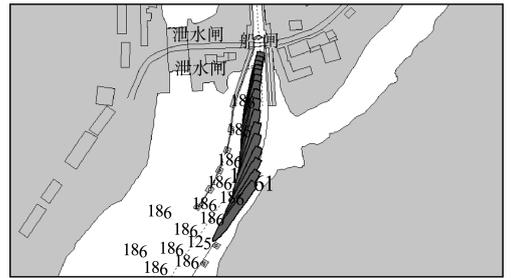
图 10 500 t 货船各工况下外河进、出闸航迹叠加

与内河相同, 因外河引航道曲率半径小, 闸前为弯道水域, 无直航段, 同时 1 000 吨级船舶尺度大、舵效差, 船舶无法顺利进出外河船闸, 航行风险较大 (图 11、12)。

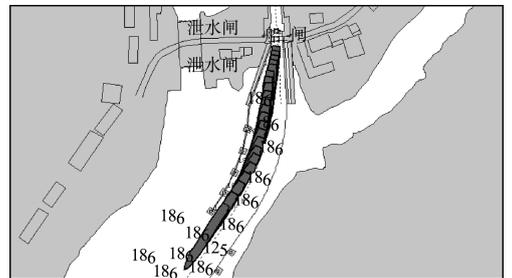


b) 无风

图 11 1 000 吨级货船 (无流、无风) 外河进闸航迹



a) 无流



b) 无风

图 12 1 000 吨级货船 (无流、无风) 外河出闸航迹

3 方案优化

3.1 方案优化思路及措施

3.1.1 内河引航道

内河引航道通航水流条件较优, 但曲线调顺段曲率半径较小, 且限制引航道可航水域的建筑物较多, 包括靠船墩、墩板式导流堤及左岸防洪大堤等。在横风作用下船体将承受较大的横向作用力, 风至漂移量增大。同时由于船体受风面积不均, 横风作用在船体上将产生一定的扭转力矩, 促使船体转向, 增加船舶在引航道弯曲段实际需要的转弯半径。

为此,可将停泊段航道边线向防洪大堤平移 14.84~20.79 m,并向上游顺移,以加大引航道调顺段曲率半径,增加船舶调整航向的空间;拓宽航道左边线,以便船舶出闸后即可及时调整航向;缩短主导墙以增大其与防洪大堤之间的距离;因六门闸泄流量小,内河水流流速较低,通过模拟计算不同导墙长度对水流条件的改变情况,知最大横向流速均发生于导墙头部,且导墙越短横向流速越大,但其最大值不超过 0.15 m/s,低于规范限值,导墙长度对改善通航水流条件作用不明显,反而限制船舶的操纵空间,增加船员心里负担,综合考虑,宜取消墩板式导墙,并拉直右边线曲线段,以便进闸船舶有足够的空间提前压舵,抵抗横风。

3.1.2 外河引航道

外引航道及口门区需疏挖至设计河底 18.64 m,低于天然河床 2 m 左右。当下游水位较低时,“深槽吸流”效应明显,引航道及口门区局部出现较大横流,最大可达 0.6 m/s。引航道弯曲半径及航道宽度较小,1 000 吨级货船难以进、出闸。

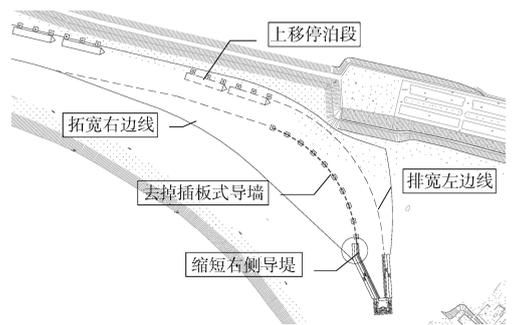
为此,加宽引航道弯曲段左边线,以增加调顺曲线段的可航水域;向下游平移停泊段,增大其与调顺曲线段及导航墙之间的距离,便于船舶离开停泊段后及时摆正船位,避免因稍微偏离航线而撞击导墙或靠船墩;将泄水闸下游一定范围河道浚深,以减弱“深槽吸流”效应;通过模拟计算不同导墙长度对水流条件的改变情况,知适当缩短导墙长度,加大其与停泊段之间的距离,可增加船舶可航水域,同时可有效减少导墙的挑流作用,改善口门区横流,使最大横流由 0.6 m/s 降至 0.22 m/s,最大纵向流速由 1.42 m/s 降至 0.74 m/s。

3.2 优化后平面布置方案

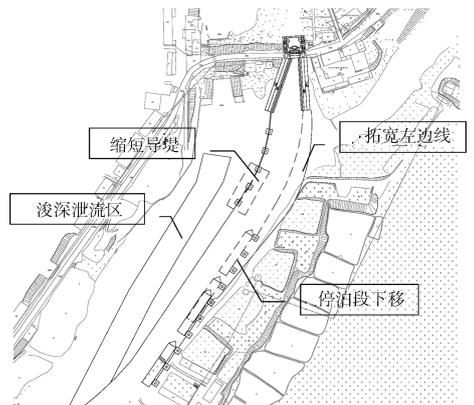
内河去掉插板式导墙,并将主导墙缩短 25 m;距堤头 0~200 m 范围内航道左边线渐变式拓宽,最大增加宽度 50 m;200~600 m 范围内航道左边线拓宽至防洪大堤坡脚线,最大限度地增加航道弯曲半径,调整后推荐方案内河引航道弯曲半径,

从设计方案 225 m 增加至 280 m;采用切角法调整航道右边线,最大加宽值 70 m。

外河缩短导堤 25 m,并将停泊段向下游顺移 175 m,以拓宽距堤头-90~280 m 范围内可航水域。停泊段与下游航道的衔接需要作出相应的调整,切掉一部分左岸滩地,加宽尺度为 0~20 m。



a) 内河引航道



b) 外河引航道

图 13 优化后平面布置方案

3.3 优化后通航条件

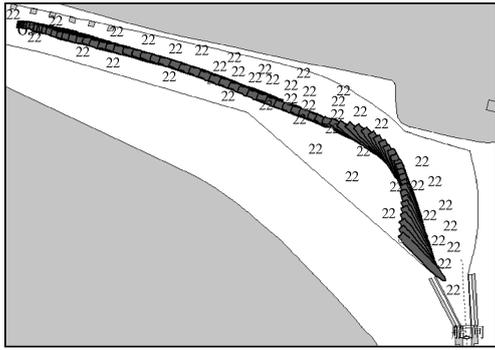
初拟方案中 500 吨级货船在各模拟工况下基本均能顺利进出船闸,但 1 000 吨级货船即便在无风、无流的情况下仍以失败告终。因此,本文针对下泄流量为 166 m³/s,船闸分别处于最高、最低通航水位时,不同风况下千吨级船舶进出闸的情况分析方案优化对通航条件的改善。

3.3.1 内河引航道

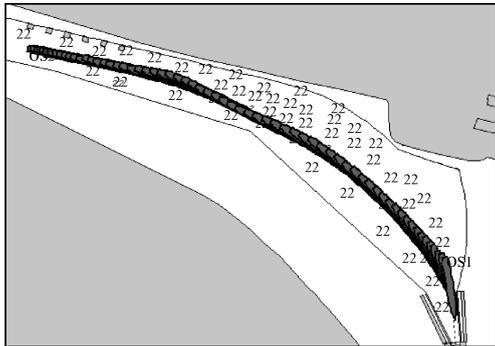
模拟在 5 级、6 级风及作用下,船舶进出闸情况。E-6、W-6 风况下,试验均失败,但 E-5、W-5 和 N-6 的工况下,试验均成功。说明横向风和风级对船舶航态影响很大。

图 14a)、14b) 为 E-6、W-6 工况下船舶进闸航迹图, 从图中可以看出, 船舶在到达弯道水域后, 受风的影响漂移量过大而撞上导流墙。

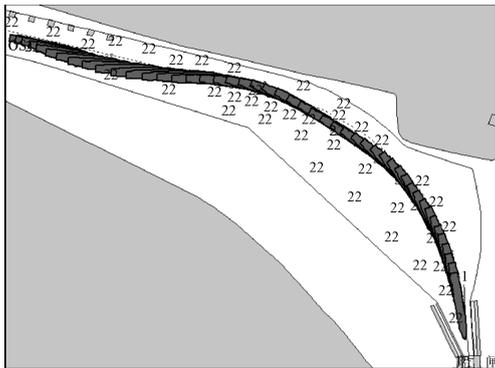
图 14c) 为 N-6 工况下船舶进闸航迹图, 从图中可以看出, 船舶在到达弯道水域后, 由于风向与船首向夹角较小, 风致漂移量较小, 通过合理利用车、舵, 可以保障船舶顺利进入船闸。



a) 无流, E-6



b) 无流, W-6

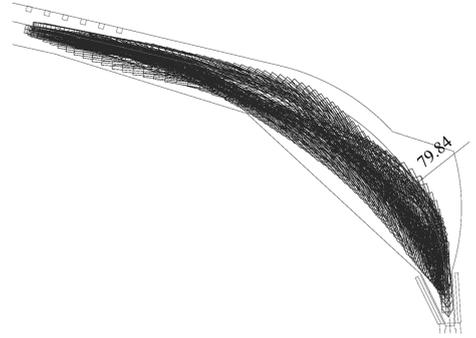


c) $Q=166\text{ m}^3/\text{s}$, $H_g=25.06\text{ m}$, N-6

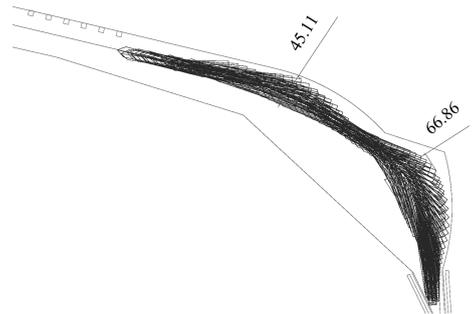
图 14 1 000 吨级货船内河进闸航迹

图 15 为 5 级风 (E-5、W-5) 各水流工况组合下 1 000 t 货船进、出闸的航迹叠加图。进闸时调

顺曲线段的航迹带最大为 79.84 m, 出闸时最大为 66.86 m, 航迹带均处于设计航道内。



a) 进闸

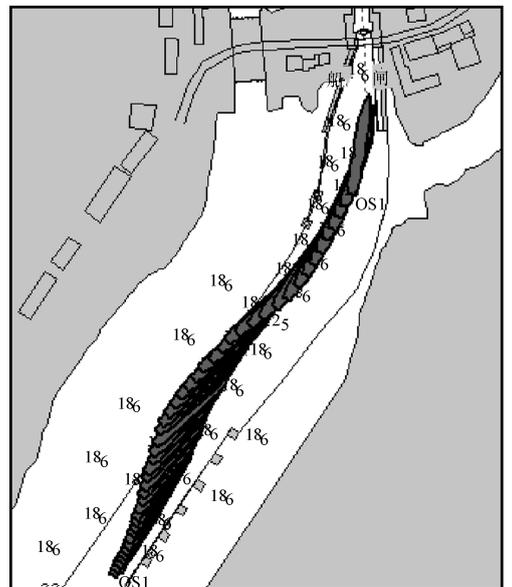


b) 出闸

图 15 1 000 t 货船内河进、出闸航迹叠加 (E-5、W-5)

3.3.2 外河引航道

E-6、W-6 风况下, 由于风力过大, 试验均失败, 船舶进出船闸的风险较大, N-6 风况下船舶能顺利进出船闸 (图 16)。



a) 无流, E-6

