



三峡升船机船舶进出船厢牵引方案*

陈新, 汤伟毕

(长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443000)

摘要: 根据三峡升船机船厢、上下闸首等设备设施的实际布置和结构特点, 针对不同类型的典型船型, 研究牵引距离、牵引角度、牵引力等技术指标, 提出轨道小车和电动推轮牵引两种三峡升船机船舶进出船厢牵引方案, 论证方案的可行性, 并结合升船机现阶段通航运行时间和牵引预期耗时对方案进行比选, 得出预期全年日均通航时间由 47 min 59 s 缩短至 43 min 47 s, 较现行船舶通航效率有所提升, 为后续的船舶牵引工程实现提供理论支撑。

关键词: 三峡升船机; 船舶牵引; 典型船舶; 电动推轮; 轨道小车

中图分类号: U67

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0138-06

Traction scheme for ships entering and leaving ship chamber of Three Gorges ship lift

CHEN Xin, TANG Weibi

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

Abstract: According to the actual layout and structural characteristics of the equipment and facilities such as the ship chamber and the upper and lower lock heads of the Three Gorges ship lift, the technical indexes such as traction distance, traction angle and traction force are studied for different types of typical ship types. Two traction schemes for ships entering and leaving the ship chamber of the Three Gorges ship lift are put forward, which are rail trolley and electric wheel traction. The feasibility of the scheme is demonstrated, and compared with the current navigation operation time of the ship lift and the expected traction time. It is concluded that the expected average daily navigation time of the whole year is shortened from 47 min 59 s to 43 min 47 s, which is improved navigation efficiency compared with the current ship, and provides theoretical support for the subsequent ship traction projects.

Keywords: Three Gorges ship lift; ship chamber; typical ship; electric wheel traction; rail trolley

船舶牵引技术是指通过牵引力将船舶移动或控制其运动的技术。随着船舶的大型化发展, 对运河航道、通航建筑物、船坞及码头等设备设施提出了更高的要求, 船舶牵引技术可实现船舶的平稳移动与停靠。这项技术在海洋工程、港口操作、船舶操纵等领域具有重要的应用价值。国内许多学者和研究机构对船舶牵引技术进行了深入研究。对船舶牵引力的计算方法以及牵引力对船舶运动的影响等进行详细的分析和总结, 探讨了船舶牵引技术在港口操纵中的应用效果和优化方法^[1-2], 夏天等^[3]基于 MMG (Marine Manuevering Game) 模

型理论, 构建船坞牵引(定位)小车-缆绳-船舶系统的动力学方程, 探讨了牵引缆绳长度、牵引绞车启动加速时间以及牵引速度等因素对牵引缆绳受力的影响; 韩龙等^[4]建立船舶牵引机械有限元模型, 并对主要结构参数进行优化, 从而为船舶牵引机械的小型化、轻量化提供了依据; 齐俊麟^[5]提出采用机械牵引方式协助船舶成组快速进出三峡船闸的技术方案。国外船舶牵引技术已成熟应用于船闸通航建筑物以及浮箱结构、船坞和码头的船舶行驶及停靠中, 针对巴拿马运河, 采用牵引船与拖轮组合, 满足超大型船舶的操纵及

收稿日期: 2024-02-29

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402007)

作者简介: 陈新(1969—), 男, 工程师, 从事升船机运维技术研究。

锚泊要求, 提高通航效率和通航安全^[6-8]。

目前对升船机过厢船舶牵引技术研究较少。三峡升船机由于通航运行条件复杂, 存在船舶进出船厢的航行安全问题。当船舶进出升船机船厢时, 船厢与航道处于连通状态, 此时船厢与引航道水域呈盲肠航道特点, 当盲肠航道口门区出现水位涨落时, 水位波动呈放大现象, 影响船舶安全航行与靠泊^[9]。船舶受水位波动影响, 可能发生擦碰升船机设备设施, 甚至发生触底、搁浅等通航安全事故。本文根据三峡升船机船厢、上下闸首等设备设施的实际布置和结构, 提出船舶牵引的安全限制准则与指标。开展三峡升船机船舶牵引技术研究, 旨在为为后续的船舶牵引工程实现提供理论支撑。

1 典型船舶进出船厢牵引条件

根据交通运输部 2018 年颁布的《三峡升船机通航船舶船型技术要求(试行)》^[10], 其中明确指出允许通过三峡升船机的船舶类型主要为客船、滚装

船、货船和集装箱船, 其中货船占比最大, 其次为商品车滚装船。因此在选择三峡升船机通航船舶典型船型时, 主要选择符合三峡升船机通航尺度要求, 且过厢频次高、过厢效率低的货船及商品车滚装船作为研究对象。根据筛选, 滚装船“安吉 209”和“安吉 210”以及货船“同发 7”满足典型船舶的要求。

三峡升船机上游通航水位变幅大, 下游水位变化速率快, 其中上游变幅 30 m、下游变幅 11.8 m, 上闸首航槽狭窄, 下闸首航槽呈喇叭口不规则形状, 船厢甲板狭窄, 设备设施布置多。根据三峡升船机船厢、上下闸首等设备设施的实际布置和结构特点, 针对升船机过厢典型船型, 提出船舶牵引安全指标见表 1。

以典型进厢船舶为例, 其安全限制准则为: 船舶在承船厢内行驶时, 轨道小车牵引方案辅助船舶航行最大航速可达 0.50 m/s。船舶在上闸首、承船厢以及下闸首航段行驶时, 电动推轮牵引方案辅助船舶航行最大航速可达 0.50 m/s。

表 1 不同牵引方案安全指标

方案	牵引位置	牵引距离	牵引角度	牵引力/kN	制动方式
轨道小车牵引方案	承船厢	船首到承船厢至船尾进承船厢	进厢船舶与承船厢中线 0°~5°	5~15	卷扬机制动
电动推轮方案	浮式导航墙	由浮式导航墙至进厢船舶船尾完全进入承船厢	电动推轮与进厢船舶中线 夹角 0°~15°	10~15	当船身完全驶入厢内预定位置时, 电动推轮吊舱反转制动减速

2 船舶进出厢牵引方案

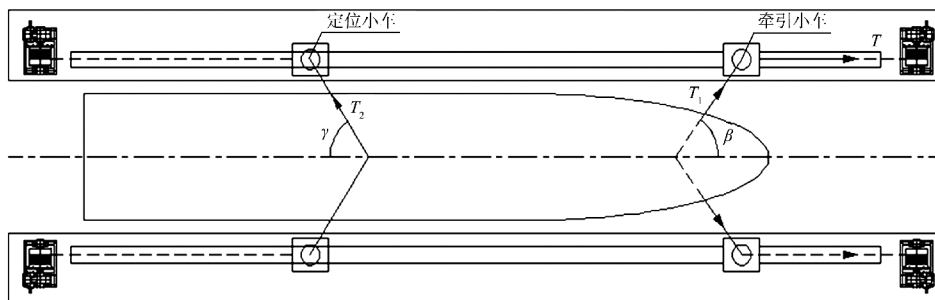
2.1 轨道小车牵引方案

2.1.1 牵引轨道

牵引轨道固定安装于承船厢内的两侧过道上, 为牵引小车与定位小车提供运动路径, 避免小车

在牵引过程中受船舶反向拉力过大时, 被引船缆绳拽动, 出现偏移甚至落水。

假设船舶在受牵引系统辅助时匀速航行, 且缆绳刚性相连, 计算过程中不考虑船舶加速带来的质量力。船舶进船厢过程中的模型^[11]见图 1。



注: T 为卷扬机牵引力, kN; T_1 为牵引缆绳需要提供的牵引力, kN; T_2 为船舶带动定位小车移动需要提供的拉力, kN; β 与 γ 分别为牵引小车和定位小车的缆绳与船舶运动方向的夹角, 参考船坞牵引系统中的防护需要, $\beta=20^\circ\sim 45^\circ$, $\gamma=20^\circ\sim 45^\circ$ 。

图 1 牵引计算模型

以牵引小车与船舶的位置关系与定位小车与船舶的位置关系作为缆绳内力的计算示意,见图2。图2a)中A点为牵引小车,G点为船体上的系缆点,图2b)中D点为定位小车,F点为船体上的系缆点。 α 与 θ 分别代表牵引缆绳和定位缆绳与水平面形成的夹角。

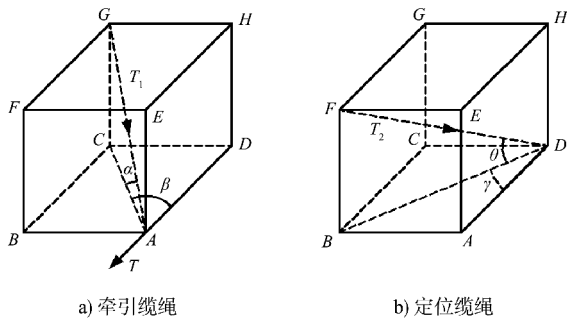


图2 牵引缆绳与定位缆绳空间受力

设每个定位小车所受摩擦力为 F_{2f} ,则定位小车匀速前进时 T_2 在x方向上的分力与 F_{2f} 平衡,可得到式(1)~(3):

$$F_{2f} = \cos\theta\cos\gamma T_2 \quad (1)$$

$$F_{2f} = \mu(T_2\cos\theta\sin\gamma + T_2\sin\theta + G) \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{\mu G}{\cos\theta\cos\gamma - \mu(\sin\theta + \cos\theta\cos\gamma)} \quad (3)$$

式中: μ 为导轨与小车之间摩擦阻力系数,取值0.01; G 为小车的重力,kN。

同理,设每个牵引小车所受摩擦力为 F_{1f} ,则牵引小车匀速前进时 T_1 在x方向上的分力 F_{1f} 与之平衡,即式(4)、(5):

$$F_{1f} = T - T_1\cos\beta\cos\gamma \quad (4)$$

$$F_{1f} = \mu(T_1\sin\alpha + T_2\cos\alpha\sin\beta + G) \quad (5)$$

对于船舶而言,匀速航行的船舶需要保持x方向的受力平衡,如式(6):

$$T_1 = \frac{R_x + 2T_2\cos\theta\cos\gamma}{2\cos\alpha\cos\beta} \quad (6)$$

式中: R_x 为船舶阻力,kN。

考虑到船舶横向力的作用,总体而言,横向力将作用在小车与导轨之间的摩擦阻力上,因此可以得出卷扬机牵引力 T 的计算式(7):

$$T = T_1\cos\alpha\cos\beta + \mu(|G - T_1\sin\alpha| + T_1\cos\alpha\sin\beta + |R_y|) \quad (7)$$

式中: R_y 为船舶横向力,kN。

由上述公式可知,船舶牵引力的计算需要参考船舶的阻力、横向力与小车质量。其中小车质量通过船舶的受力情况估算,因此,船舶牵引力计算的关键在于船舶阻力与横向力的准确获取。

2.1.2 牵引设备

牵引设备由无动力的牵引小车和动力装置组成,可实现牵引船舶的航行与制动。小车沿引船轨道运行,由于船舶运动方向不同,小车需考虑受纵向拉力和横向倾覆力的作用。升船机轨道小车由脱钩装置、车架、行走机构、双反托轮和水平轮组成,见图3。动力装置通过牵引缆绳带动牵引小车在轨道上同步运动,从而实现牵引船舶进出船厢。

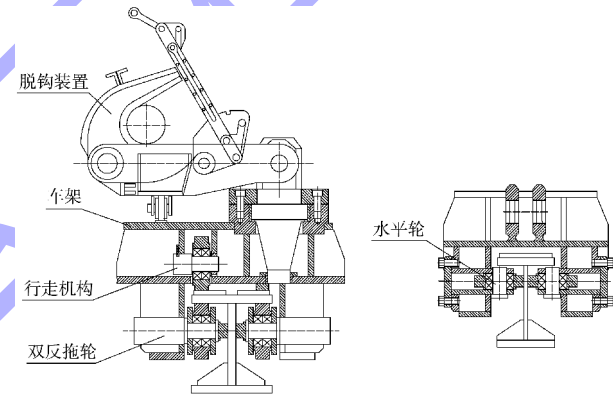


图3 小车组成

2.2 电动推轮牵引方案

2.2.1 电动推轮

电动推轮为自动航行(无人驾驶)与远程集中控制的电力驱动船舶,船首与船尾分别安装1套推进系统,升船机上下游航道分别布置1套电动推轮。其尺寸为船长36.6m、船宽10.5m、吃水3.1m、船深4.5m、缩尺比1:20。

电动推轮具有自主导航与靠泊功能,在整个电动推轮牵引船舶进出船厢的过程中,被推船舶为无动力状态,由电动推轮提供动力辅助,被推船只进入并停靠在升船机船厢及导航墙,电动推轮配有相应的充电装置,2套分别安装在靠近升船机上、下闸首浮式导航墙上,充电装置与升船机供配电室通过电缆连接。

2.2.2 快速连接装置

电动推轮与船厢船舶通过快速连接装置有效适应不同船型的干舷和尾部型线特征等, 实现推轮与船舶快速对接与脱开操作。电动推轮与被推船舶连接后整体由浮式导航墙、闸首进入船厢, 当被推船舶完全进入船厢时, 由电动推轮带动船舶制动, 推轮与船舶分离后, 推轮自动退出船厢, 船厢上、下行与闸首对接完成, 再由牵引装置将货船拖出船厢。整个过程通过推轮顶推的方式完成推轮-船舶成组进出升船机。电动推轮与快速连接装置见图 4。

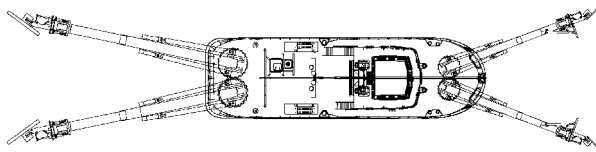


图 4 电动推轮与快速连接装置

快速连接装置结构见图 5, 主要由大臂、腕部、小臂组成, 其中大臂油缸负责调节大臂的方位, 定位板在两船连接时起定位作用, 当连接时电磁吸盘吸附于船两侧起到连接固定作用。两船相互连接时, 腕部油缸调整机械臂高度, 定位板油缸调整定位板与前船尾封板平行, 当定位板触及被推船舶尾封板时, 电磁吸盘转动贴近被推船舶舷侧, 实现两船连接固定。

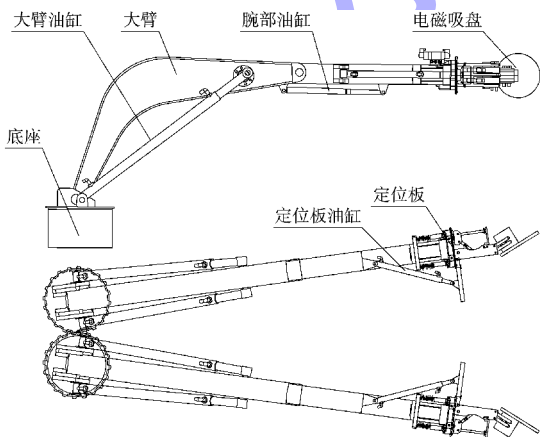


图 5 快速连接装置结构

以典型船舶“安吉 209”下行过升船机为例, 电动推轮牵引方案中船舶进出船厢具体流程为:

1) 待进厢船舶从上游引航道出发, 行驶至浮式导航墙, 船首驶至上闸首位置停船后推轮行驶至船尾, 见图 6。

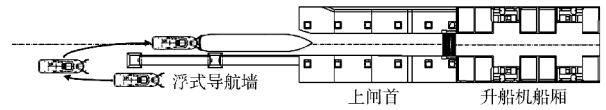


图 6 推轮驶入导航墙

2) 腕部油缸调整机械臂高度, 定位板油缸调整定位板与前船尾封板平行, 当定位板触及船尾封板时, 电磁吸盘转动贴近船舶舷侧, 两船连接固定在一起, 见图 7。

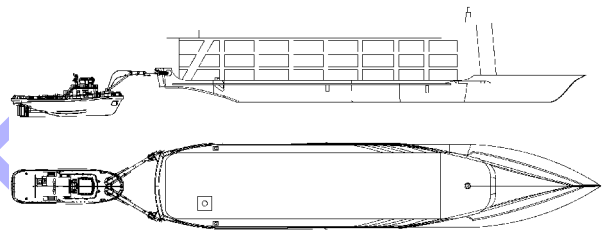


图 7 推轮与船舶连接

3) 推轮推动船舶驶入上闸首后继续推动船舶, 使其完全进入船厢并制动, 推轮与船舶分离后, 推轮自动退出船厢并返回初始位, 见图 8。

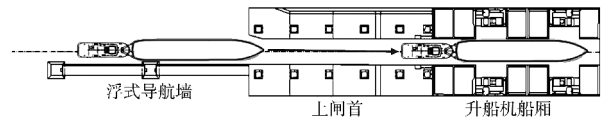


图 8 推轮推动船舶进厢

4) 升船机下行, 船厢与下闸首对接完成后, 牵引装置将船舶拖出船厢, 船舶沿着浮式导航墙驶入下游引航道。

2.2.3 导向与制动系统

三峡升船机总布置见图 9, 导向系统应具有防撞导向和船舶系缆功能, 其中第 1 导向轮组沿水流方向均匀布置在上、下闸首闸墙上, 是随水位波动而上下浮动的浮筒式结构; 第 2 导向轮组沿船厢纵向中心线对称布置, 并遵循顺水流方向船厢上下游端布置较密、中间段布置较疏的原则。

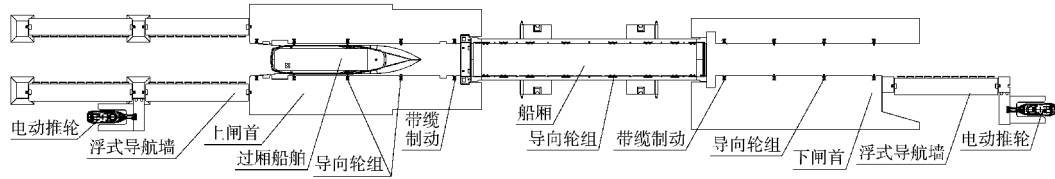


图9 三峡升船机总体布置

多个制动系统安装在靠近船舶上下游端部导航墙的两侧，其为带阻尼作用的钢丝绳卷扬式结构，可随升船机航道水位波动而上下浮动，另两个带缆制动装置安装在船舶两侧中部，用于失控船舶紧急制动。上闸首靠近浮式导航墙的位置以及下闸首靠近船舶的位置均布有带缆桩，为船舶进出提供紧急制动效果。

2.3 牵引方案对比

基于虚拟样机技术，完成典型船舶(“安吉209”)、升船机浮式导航墙、上下闸首、船厢及附属设备、

轨道牵引小车、导向与制动装置、电动推轮与快速连接装置、升船机引航道及限制水域仿真模型的建立，论证轨道小车牵引和电动推轮牵引船舶过升船机方案的可行性。

根据目前运行阶段平均1艘船舶通过升船机的时间为48 min，可将船舶通航流程分解为船舶进厢所需时间、船舶出厢所需时间，以及升船机设备运行所需时间。经过测算，船舶通航耗时以及牵引系统辅助船舶预期耗时见表2。

表2 4种不同工况下耗时对比

船舶	方案	牵引设备连接固定时间	进厢时间	设备运行时间	出厢时间	总计
	现行状态	-	12 min27 s	25 min27 s	8 min54 s	46 min48 s
上行	轨道小车系统预期	连接固定时间合计5 min	3 min27 s(下闸首行驶时间) 4 min05 s(承船厢行驶时间) 合计7 min32 s	25 min27 s	3 min58 s(承船厢行驶时间) 4 min22 s(上闸首行驶时间) 合计8 min20 s	46 min19 s
	电动推轮方案预期	连接时间3 min	5 min13 s	25 min27 s	8 min54 s	42 min34 s
	现行状态	-	17 min11 s	24 min20 s	9 min23 s	50 min54 s
下行	轨道小车系统预期	连接固定时间合计5 min	7 min18 s(上闸首行驶时间) 4 min08 s(承船厢行驶时间) 合计11 min24 s	24 min20 s	3 min58 s(承船厢行驶时间) 2 min24 s(下闸首行驶时间) 合计6 min22 s	47 min06 s
	电动推轮方案预期	连接时间3 min	8 min18 s	24 min20 s	9 min23 s	45 min01 s

其中升船机上、下行时间和其他停船准备时间固定为24~26 min，现行船舶以0.29 m/s平均的航速通过升船机，远小于升船机设计航速($v_s=0.50$ m/s)。

轨道小车牵引系统对于升船机的运行效率有所提升，但仍达不到设计要求。另外受布置限制，牵引轨道只能铺设在承船厢内。船舶在承船厢与下闸首内航行时可达设计航速，而在上闸首航行时速度仍然受限，船舶平均航速提升至0.36 m/s。

牵引电动推轮方案不受升船机布置的限制，电动推轮从浮式导航墙至船舶完全进入升船机船

厢内全过程连接成组，可实现船舶在上闸首、船厢与下闸首内航行时航速均达到设计航速，船舶平均航速提升至0.50 m/s。

根据全年统计数据，现行状态、提升效率与升船机的设计预期对比见表3。

表3 牵引系统预期效率提升对比

方案	平均航速/ ($m \cdot s^{-1}$)	全年日均通航时间	全年日均通航次数/次
现行状态	0.29	47 min59 s	约23
轨道小车系统预期	0.36	46 min42 s	24
电动推轮牵引方案预期	0.50	43 min47 s	26

3 结论

1) 根据三峡升船机船厢、上下闸首等设备设施的实际布置和结构特点,针对不同类型的典型船型,提出牵引距离、牵引角度、牵引力等技术指标,以典型进厢船舶“安吉 209”、“安吉 210”、“同发 7”为例,开展船舶进出船厢牵引方案研究。

2) 提出轨道小车和电动推轮牵引两种三峡升船机船舶进出船厢牵引方案,基于虚拟样机技术完成两种方案仿真模型的建立,论证方案的可行性,并结合升船机现阶段通航运行时间和牵引预期耗时,对方案进行比选,可知采用电动推轮牵引方案预期平均航速为 0.50 m/s,预期全年日均通航时间为 43 min47 s,较现行船舶通航效率有所提升。

参考文献:

- [1] 马云骄,葛杨元. 新型铺缆船牵引机构设计应用[J]. 船舶与海洋工程, 2018, 34(6): 36-40.
- [2] 吴彬,何夏茵. 巴拿马运河新船闸对通航船舶的系泊布置要求[J]. 船舶, 2018, 29(1): 89-94.
- [3] 夏天,赵立光,李文岩. 船坞牵引(定位)小车-缆绳-船舶系统动力响应分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(22): 296-301.

- [4] 韩龙,钱怡. 船舶牵引机械的结构优化设计[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2013, 12(4): 432-435.
- [5] 齐俊麟. 机械牵引协助船舶进出船闸技术论证[J]. 航海工程, 2017, 46(4): 215-219.
- [6] API RP 2SK, Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures [M]. Washington D. C. : American Petroleum Institute, 2005: 66-67.
- [7] LUIS C, JAVIER T S, LAURA C S, et al. Effects of the expanded Panama Canal on vessel size and seaborne transport [J]. Promet-traffic & transportation, 2018, 30(2): 241-251.
- [8] 林樑腾. 超大型船舶通过新巴拿马运河操纵[J]. 航海技术, 2020(2): 12-15.
- [9] 郑卫力. 三峡升船机通航运行实践与思考[J]. 水运工程, 2022(9): 112-115, 121.
- [10] 三峡升船机通航船舶船型技术要求(试行). 交通运输部官网 [EB/OL] (2018-05-10) [2018-05-24]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202006/t20200623_3314546.html.
- [11] MENG Q J, WAN D C. URANS simulations of complex flows around a ship entering a lock with different speeds [J]. International journal of offshore and polar engineering, 2016, 26(2): 161-168.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 114 页)

参考文献:

- [1] 徐红娟. 虾峙门口外人工航道通航能力研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
- [2] 张玮,刘锦安,孙宏杰,等. 长江深水航道通过能力研究[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(2): 5-10.
- [3] 王亥索,张冠群. 进港航道通过能力经验公式的比较分析[J]. 港工技术, 2009, 46(5): 5-6.
- [4] 彭厚德. 跨河桥梁通航净空尺度与航道等级升级改造的相互影响[J]. 水运工程, 2013(4): 139-141.
- [5] 魏庆,王畅,卢虹李,等. 跨山区航道桥梁改扩建工程中通航尺度研究[J]. 中国水运, 2023(5): 148-150.
- [6] 李文艳,黄力,李歌清,等. 山区航道跨河桥梁通航净空尺度研究[J]. 水运工程, 2021(7): 142-148.
- [7] 浙江海事局. 舟山灌门航道、龟山航道通航安全管理规定: ZJMSA-0200-2020-0005[A]. 杭州: 浙江海事局, 2020.
- [8] 交通运输部规划研究院. 宁波舟山港总体规划

(2020年修订版)[A]. 北京: 交通运输部规划研究院, 2022.

- [9] 浙江海事局. 金塘大桥、西堠门大桥通航安全管理规定[A]. 杭州: 浙江海事局, 2009.
- [10] 交通部. 关于舟山大陆连岛工程金塘大桥通航净空尺度和技术要求的批复: 交水发[2003]585号[A]. 北京: 交通部, 2003.
- [11] 中交水运规划设计院有限公司. 海轮航道通航标准: JTS 180-3—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [12] 交通部. 关于舟山大陆连岛工程西堠门大桥通航净空尺度和技术要求的批复: 交水发[2003]584号[A]. 北京: 交通部, 2003.
- [13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 王璁)