



# 长江和西江大型船闸通航运行 关键技术研究与展望 \*

齐俊麟<sup>1</sup>, 陈冬元<sup>1</sup>, 吴 澄<sup>2</sup>, 李中华<sup>3</sup>, 廖 鹏<sup>4</sup>, 柳晨光<sup>5</sup>

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;  
3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 4. 东南大学, 江苏 南京 210096; 5. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 保障长江和西江大型船闸通航枢纽的畅通、安全、高效意义重大。针对闸-船-航道三要素影响因素多、耦合性强, 航道水流非定常, 水位变幅高、变率快等难题, 研究大型船闸通过能力多维分析建模与仿真、非恒定流下船闸航道水动力学特性分析、多约束非定常船-闸水动力学精细化建模等方法, 攻克了复杂多变条件下船闸中间航道通航、新标准船型与船闸协同下快速过闸、大型船闸扩能建设工程设计等船闸通过能力提升关键技术, 以及大型船闸联动安全控制、关键设备运行智能监测、通航安全风险防控等联动运行安全控制关键技术, 构建长江和西江大型船闸高效安全通航工程技术体系, 并建立通航调度与安全一体化管控平台。从多尺度动力学、数字孪生、智能化与国产化和绿色生态技术等方面, 展望大型船闸通航运行科技发展的方向。

**关键词:** 长江和西江; 大型船闸; 通过能力; 通航调度

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0137-07

## Key technology research and outlook for large ship lock navigation in Xijiang River and the Yangtze River

QI Junlin<sup>1</sup>, CHEN Dongyuan<sup>1</sup>, WU Peng<sup>2</sup>, LI Zhonghua<sup>3</sup>, LIAO Peng<sup>4</sup>, LIU Chenguang<sup>5</sup>

(1. Three Gorges Navigation Administration Bureau, Yichang 443002, China;  
2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;  
3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Southeast University, Nanjing 210096, China;  
5. Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** It is of great significance to ensure the smooth, safe and efficient navigation hub of the large-scale ship locks on Xijiang River and the Yangtze River. Aiming at the problems that the three elements of lock-ship-channel have many influencing factors and strong coupling, channel water flow is unsteady, water level has high amplitude and fast rate of change, etc., the multi-dimensional analysis modeling and simulation of large-scale ship lock passing capacity, unsteady flow down ship lock channel of hydrodynamic characteristics analysis, multi-constraint unsteady ship-lock hydrodynamics refinement modeling and other methods are studies. These methods overcome the problems of navigating the middle channel of the lock under complex and changeable conditions, rapid lock-passing under the cooperation of new standard ship types and locks, and key technologies for improving large-scale ship lock passing capacity such as capacity expansion construction engineering design, as well as key technologies for joint operation safety control such as large-scale ship lock linkage safety control, key equipment operation intelligent monitoring, and navigation safety risk prevention and control. The efficient and safe navigation engineering technology system for large-scale ship locks on Xijiang River and the Yangtze River is built. An integrated management and control platform for general aviation dispatching and safety is established. From the aspects of multi-scale dynamics, digital twins, intelligence and localization, and green ecological technology, the development direction of large-scale ship lock navigation operation technology is prospected.

**Keywords:** Xijiang River and the Yangtze River; large ship lock; passing capacity; navigation scheduling

收稿日期: 2023-04-26

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52001240, 52172303); 三峡后续工作科技项目(SXHGXZ-2021-3)

作者简介: 齐俊麟(1964—), 男, 硕士, 教授级高工, 从事枢纽通航研究。

自 1998 年起, 我国逐步建设了三峡—葛洲坝梯级通航枢纽与西江梯级通航枢纽大型船闸, 是支撑长江与西江快速发展的关键设施, 保证其通航畅通、安全、高效意义重大。但长江和西江大型船闸通航要素庞杂、环境复杂多变、船舶交通量大, 通航能力提升与运行安全管控难度极大, 其工程应用过程中存在众多技术难题, 主要表现为: 1) 船闸通航及闸-船-航道 3 要素的影响因素多、耦合性强, 复杂多变通航条件下大型船闸扩能建设与安全高效运行需要高精度通航能力分析的理论支撑; 2) 船闸/升船机超大、船舶大型化、船闸水头高、中间航道水深流急、航道水流非正常, 船闸群通过能力提升需要解决闸-船-航道通航要素适配等关键技术; 3) 水位变幅高、变率快等强时变工况下运行控制系统具有强非线性, 船舶流量大、船型杂等复杂交通条件下船闸群通航调度技术难度大, 船闸群运行调度系统适用性须解决联动运行安全控制、联合调度智能服务等关键技术。围绕以上难题, 长江三峡通航管理局等单位通过科技攻关, 形成了以大型船闸通航能力精细化分析理论方法体系为基础, 以通航能力提升建设、高效安全可靠运行调度关键技术为核心, 以长江—葛洲坝与西江两大船闸群安全高效通航工程实践的系列成果, 保证长江和西江大型船闸通航功能。本文总结长江和西江船闸通航运行关键技术的创新与应用情况, 并展望未来的大型船闸通航运行科技发展趋势。

## 1 大型船闸通过能力精细分析方法

### 1.1 多维分析建模与仿真

#### 1.1.1 通过能力多维分析

通过能力分析是大型船闸改扩建以及通过能力挖潜基础性研究。围绕大型船闸通过能力评价, 廖鹏<sup>[1]</sup>研究引入交通量系数、服务水平系数, 改进船舶一次过闸时间、一次过闸吨位的计算公式, 建立的船闸群通过能力计算模型见式(1), 完善了

大型船闸通过能力评价方法。

$$C_D = (n - n_0)N \cdot \frac{\alpha \lambda A_c g_a}{\beta_p f(g_a)} \quad (1)$$

式中:  $C_D$  为年过闸货运量, t;  $n$  为日平均过闸次数;  $n_0$  为日非运客、货船过闸次数;  $N$  为年通航时间, d;  $\alpha$  为船舶装载系数;  $\beta_p$  为保证率  $p$  的日流量不均衡系数;  $\lambda$  为闸室有效面积利用率;  $A_c$  为闸室有效面积,  $m^2$ ;  $g_a$  为过闸船舶平均吨位, t;  $f(g_a)$  为与船舶的平均吨位有关的过闸船舶平均面积函数,  $m^2$ 。

同时, 王多银等<sup>[2]</sup>从影响已建大型船闸通过能力三要素——船闸、船舶与管理出发, 分三层次剖析通过能力的主要影响因子及其影响程度, 分离出 29 个相对独立的计算参数, 形成了独立参数与通航设施、船舶、管理、环境等 4 大因素相互关系对照矩阵图, 建立了通过能力评价指标体系和递阶层次分析模型。

#### 1.1.2 船舶交通组织与调度仿真

船闸船舶交通仿真是船闸通过能力评价及通航调度优化关键技术。围绕大型船闸运行船舶交通调度建模, 廖鹏等<sup>[3]</sup>基于  $G/G/1$  排队模型建立估算繁忙船闸的船舶待闸时间的近似模型, 公式为:

$$E[W_q(t)] \approx V \cdot \frac{D[g(t)] + D[f(t)]}{2(1-\rho)} \quad (2)$$

$$P\{W_q(t) \leq t\} = P\{U_0 W_q(t) \leq U_0 t\} \approx 1 - e^{-U_0 t} \quad (t \geq 0) \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间, h;  $E[W_q(t)]$  为系统平衡时船舶待闸时间分布函数  $W_q(t)$  的期望, h/艘;  $V$  为船舶到达率, 艘/h;  $D[g(t)]$  和  $D[f(t)]$  分别为服务时间函数  $g(t)$  和到达间隔时间函数  $f(t)$  的方差,  $h^2/\text{艘}^2$ ;  $\rho$  为交通负荷, 其值为  $V$  与  $C$  之比, 其中  $C$  为船闸服务率, 艘/h;  $P$  为概率;  $U_0$  为期望的倒数。

此外, 齐俊麟<sup>[4]</sup>基于典型船闸的交通运行规则, 考虑平衡船闸交通负荷与服务质量的时间约束, 设计了船舶过闸交通模型的整体框架以及闸

室分配、闸室排档、运行调度等3个耦合子模块的启发式求解算法,建立多级多线船闸交通仿真模型。在此基础上,经仿真计算和运行实践探索,揭示了单级船闸与连续多级船闸在单向运行时通过能力最大,从而提出梯级多线连续船闸船舶单向运行的基本规则。同时,考虑优化配置航道与船闸的水域空间资源,提出一种基于船舶航速调整的联合调度策略,即实时预测航道上不同位置船舶的待闸延误并反馈给船舶,船舶根据运输紧急程度选择调整航速,在节约航行油耗的同时,将待闸时间成本分担在航程上,实现船闸、航道和船舶之间的协调与配合。

### 1.2 非恒定流下船闸航道水动力学特性分析

分析复杂条件下船闸航道水流特性是保障通航安全的基础。针对大型船闸下游航道受两岸峡谷制约、电站日调节与下游电站反调节的多重影响通航安全压力大,南京水利科学研究院<sup>[5]</sup>采取现场观测与数值模拟相结合的手段,揭示了非恒定流作用下大型船闸下游航道水流条件特性,建立非恒定流水位波动在引航道口门区与下闸首的传递变化关系模型,发现在流量调节过程中和流量调节过程结束后平均涨、落水速率的变化趋势,解决了电站日调节产生的非恒定流影响枢纽通航安全的难题。同时,建立引航道概化模型、回流概化模型和船舶航行数值模型,开展了船舶引航道水流条件与船舶航行相关试验,提出对原标准船闸引航道纵向和横向流速通航安全控制指标修正的建议值。

### 1.3 多约束非定常船-闸水动力学精细化分析与建模

闸门启闭机与输水系统阀门是船闸运行核心控制设备之一。围绕大型船闸复杂条件下快速安全启闭控制技术难题,陈琼等<sup>[6]</sup>建立船闸工作闸门整体水动力学三维数学模型,结合动网格技术模拟闸门动边界启闭过程,较为精确地模拟船闸闸门各种差异边界下水力学参数及细部流场特征。

同时利用数学模型研究闸门运行边界条件各因子对动水阻力矩峰值的影响,优化闸门启闭机控制提供基础。船闸水域船舶水动力学精细建模分析是航行安全控制的基础,齐俊麟采用动网格技术并选取重整化群(RNG)  $k-\varepsilon$  湍流模型,通过求解非定常雷诺平均(RANS)方程,对各种因素影响下船舶通过船闸过程中的黏性流场及水动力和航行船与停泊船水动力之间的水动力相互作用进行数值分析,揭示船舶水动力特性与船舶运动变化规律。同时考虑浅水效应、岸壁效应以及风、流等力和力矩的干扰,建立内河双桨双舵船舶三自由度操纵运动数学模型、浅水效应的水动力导数修正模型、岸壁效应力和力矩的计算模型,以及定常风、均匀流干扰力数学模型,提出并设计一种基于自适应遗传算法的模型预测控制(MPC)过闸船舶航迹控制器,采用时间序列神经网络预报技术和传统操纵性方程相结合的数值模拟方法,充分利用大数据样本,对枢纽水域船舶运动进行高精度数值预报。

## 2 大型船闸通过能力提升关键技术

### 2.1 复杂多变条件下船闸中间航道通航关键技术

船闸中间航道是保证其通航功能的重要基础设施,主要存在枯水期闸间航道复杂河床、湍急水流、以及水位不衔接等技术问题。对此,郝品正等<sup>[7]</sup>采用高精度航道三维水流数值模拟并结合成果研制的大比例船闸群物理模型以及遥控自航船模等技术手段,揭示了长江和西江船闸群航道滩险急、险、浅或多因素并存的特碍航特征,研发纵向阶梯倒坡炸礁与斜坡面抛填结合、急险并治的急流航道整治技术,有效治理船闸群间航道急流滩险碍航流态。同时,揭示了枯水期船闸群沿程航道变化规律,为黄金航道水利调度规则制定提供技术依据,提出了航道水位未衔接段航道整治及水利调度技术,实现了船闸上下游航道有效衔接。

船闸群汛期大流量条件下存在大量船舶滞航现象，亟需研究新的通航流量标准。针对船闸群复杂流态下船舶运动轨迹及相关运动参数预报的难点，在传统实船典型样本采集分析的基础上，长江三峡通航管理局等<sup>[8]</sup>采用随船测试采集随机样本的方法建立大样本数据库，提出时间序列神经网络预报技术与传统操纵性方程相结合的数值模拟方法，制定以满载排水量为主控因素的船型全系列、流量全覆盖的通航流量标准。

## 2.2 过闸新标准船型与船闸协同下快速过闸

随着长江和西江航运的发展，大型船闸通过能力不足逐步显现，需要进一步提升既有船闸的通过能力并得到行业管理部门的关注，设计合理的过闸船型提高一次过闸平均吨位，并提高过闸效率和船闸日调度闸次，均是合理有效的手段。针对长江和西江各发展时期航运环境条件变化特点，谢蒙<sup>[9]</sup>采用动态和不确定性分析方法，从长江和西江综合运输系统角度，构建综合考虑运输需求、通航设施的限制条件，以及社会效益、技术性能（船舶安全性、快速性等）、经济性能等多要素的过闸主导船型综合评价指标体系递阶层次结构模型。考虑未来运输组织模式和物流变化，采用多学科综合优化技术，优选出大系统较优的过闸船舶最佳船型的主尺度，为新建船闸的规模和尺度确定以及提高船闸利用率奠定基础。根据不同阶段下长江干线绿色智能技术的发展目标和发展需求，武汉理工大学提出了不同阶段、不同船型评价方案的确定原则和对应的评价指标体系，进而研发了国内首艘智能标准三峡 130 型散货运输示范船，平均过闸吨位超过 2 万 t<sup>[10]</sup>。

针对目前单船人工驾驶进出闸通过效率不高的问题，Liu 等<sup>[11]</sup>构建多船同步进出闸跟随模糊比例-积分-微分(PID)控制模型，开发了闸区水域船舶航行动态高精度感知系统，提出并建立船舶过闸多船同步航行控制平台，实现了船舶自动跟随进闸控制与闸室内精确停船自动控制，船舶

跟随间距可以缩短至 15 m 以内，缩短船舶进出闸的航行时间。

## 2.3 大型船闸扩能建设工程设计关键技术

长洲枢纽是西江航道控制性咽喉工程，面临特大型船闸总体布置、双线船闸互充节水技术、巨型船闸高效输水及闸室消能技术、中水头船闸大型平面输水阀门防空化技术、多线船闸运行调度等系列技术难题。针对船闸群瓶颈断面通过能力不足与复杂河势条件，张珊等<sup>[12]</sup>研发多船闸群并列布置创新形式及航线交叉区布置新技术，提出双线特大型并列船闸互通省水布置，解决了并列船闸独立输水和互通输水的水力学技术难题，节约水资源。同时提出引航道口门区设立导流墩、并列船闸闸首副导墙设置底透空分流导航结构，解决了在已建枢纽限制性复杂条件下扩建多线特大型船闸的平面布置和通航水流条件关键技术难题，支撑 4 线并列大型船闸长洲通航枢纽扩建平面布置设计。针对大型船闸扩建空间位置受限，南京水利科学研究院发明了闸底长廊道复合阶梯消能输水系统新形式，创新了闸墙长廊道侧支孔门槛消能输水形式，解决了特大型船闸船舶安全停泊与闸室高效消能输水核心难题；研发船闸一体式平面阀门结构形式，提高阀门自振频率，解决了特大型平面输水阀门有害振动技术难题。

## 3 大型船闸联动运行安全控制关键技术

### 3.1 运行安全控制技术

长江和西江船闸多为高水头大型船闸，闸阀联动控制安全保障难度大，存在闸室内产生的超灌超泄严重影响船舶停泊和人字闸门运行安全等问题。对此，长江三峡通航管理局<sup>[13]</sup>创建了“输水阀门动水关阀、人字闸门平水开门”的闸阀门联动控制技术。通过建立水位差-动水关阀开度计算模型，精确控制输水阀门的关闭时机，实现闸室超灌超泄量控制小于 0.1 m。同时，通过原型观

测揭示大惯量、大水深下的人字闸门启闭速度-负载特性, 提出泵控大惯量负载、双向平衡阀三级负载控制的人字闸门启闭控制优化方法, 实现了大淹没水深人字闸门平稳运行。

大型船闸是一个跨域的复杂的巨型复杂机电液系统, 系统的集成控制环节复杂。针对多线多级连续船闸运行方式多、工艺流程复杂, 杨全林等<sup>[14]</sup>研发出运行工艺流程计算机仿真系统, 揭示机械设备、水位条件和人的制约关系, 开创了大型船闸运行预前管控的新模式。

### 3.2 关键设备设施运行智能监测技术

大型船闸关键设备设施规格大、种类杂, 运行状态实时监测精度高, 故障识别与检修保障技术难度大。围绕高水头大型船闸人字门启闭机高精度运行控制需求, 周雨萌等<sup>[15]</sup>发明用于船闸人字门启闭机的实时激光测距设备, 代替原拉线传感器, 测距精度可达毫米级, 提高了人字们启闭控制精度。针对高水头大型船闸关键设施运行状态监测实时性问题, 长江三峡通航管理局提出大型船闸关键设备设施服役状态电子巡检技术方法, 提高了船闸设备设施状态监测的实时性。

围绕高水头船闸从事后检修和定期检修向状态检修转变的技术需求, 长江三峡通航管理局运用振动检测技术提取低速重载大型人字闸门、反弧门运行状态特征信号分析, 有效界定设备关键部件运行状态, 研发出大型船闸关键设备设施服役状态运行状态监测系统。针对船闸运行流程复杂、控制网络系统维护要求高, 提出基于软件故障注入的船闸运行半实物仿真数据融合方法, 研发出基于数字孪生核心机电控制系统运行模拟与实训硬件在环仿真系统, 为特殊工况下的应急控制方案验证等提供基础平台。

### 3.3 通航安全风险防控技术

船舶大型化与过饱和船闸船舶交通流激增了长江和西江大型船闸通航风险性, 需要有效辨识通航安全风险、实时有效地监控船舶航行异常行

为。围绕过闸船舶水下部分无法检测存在安全隐患, 陈德山等<sup>[16]</sup>建立单波束阵列数据变分算法的数据复原模型, 发明船舶吃水量系列检测方法, 研发出过闸船舶三维吃水信息管理系统, 实现了船舶吃水自动在线检测。围绕闸室内船舶集泊越界的管控需求, 李然等<sup>[17]</sup>研发出基于激光扫描与视频图像处理技术融合的禁停区域越界探测及报警系统。同时, 集成应用了连续波测量、低速船舶识别匹配等技术, 研制出小型测速测距一体化雷达, 解决了船舶在闸室内低速条件下高精度测速与测距的难题。

## 4 长江和西江大型船闸高效安全通航工程技术体系

### 4.1 高效通航工程技术标准体系

围绕大型船闸通航技术标准需求, 吴澎等<sup>[18]</sup>建立长江和西江船闸群航道划分原则, 提出大型船闸航道通航水位确定方法。同时, 提出实际通过量达到设计通过能力的80%且呈现持续增长的趋势时应增建、改建或扩建船闸, 并优化了引航道布置方式和相关连接段尺度保障船舶快速进出闸, 支撑了大型船闸航道治理设计以及船闸扩建工程设计。围绕大型船闸闸室利用率高效利用技术需求, 武汉理工大学等<sup>[19]</sup>建立基于证据理论的标准船型评价模型, 提出内河船型现代化综合评价指标体系, 进而制定了过闸运输船舶标准船型主尺度系列。交通运输部珠江航务管理局等制定的JTS/T 322—2023《通航建筑物联合调度技术规程》<sup>[20]</sup>统一了我国内河通航建筑物联合调度技术要求, 规范了多梯级通航建筑物联合调度行为, 提高了运行效率和应急处置能力。

### 4.2 运行关键设备设施维护技术体系

围绕长江和西江大型船闸关键设备设施运行可靠度要求高的问题, 杨珏等<sup>[21]</sup>建立大型船闸重要设备的全生命周期运行可靠度模型, 确定安全运行保障评价指标及评价标准。同时, 提出关键设备设施运行可靠性提升技术, 确定大型船闸主

要设备设施技术状态等级划分标准和维护标准，构建国内船闸设计规划运维成套技术体系。围绕长江和西江大型船闸通航能力保障中大型船闸大修快速性的技术需求，高雄等<sup>[22]</sup>发明人字门维修高精度同步升降系统，解决了大型人字门现场快速检修难题。同时，研制出大型人字门顶落门、顶底枢检修专用装置，以及用于人字闸门背拉杆调整的自动加力装置，并形成人字门、顶落门水运工程一级工法，使人字门检修更安全高效、施工更规范。

#### 4.3 通航调度与安全一体化管控平台

为提高长江、西江两大流域船闸群通航调度与安全管控效率与服务水平，王忠民等<sup>[23]</sup>建立大型船闸通航调度与安全一体化管控平台。围绕船闸群通航联合调度建模与求解复杂问题，首先以最大化平均闸室面积利用率和最小化平均船舶待闸时间为目建立联合调度模型。为避免对模型求解带来时间复杂度高的问题，提出基于闸次时间表优化方法进行联合调度模型求解，与基于两层循环混合智能算法的调度求解算法。同时，发明多线并列船闸联合调度模拟及分析技术，提出受限复杂条件下多线船闸群通航交通组织方法，保障了多线船闸群的科学调度和安全高效运行。围绕多级枢纽过闸船舶长河段远程在线服务技术难题，黄海遵<sup>[24]</sup>建立多模节点预瞄智能报闸模型，研发出非线性抽稀回溯移动地理信息系统（GIS）、内嵌式移动大数据异构资源集成等技术，研制出船载智能报闸系统，实现“不停船报到、不上岸缴费、一次报闸、全线通过”。围绕船舶过闸安全检查技术要求，长江三峡通航管理局等<sup>[25]</sup>开发适合于船舶过闸的无线射频识别（RFID）船舶识别与认证系统、业务管理系统，研发出过闸船舶危险品运输监控系统联网联控技术，建立大型船闸通航调度与安全一体化管控平台，实现了船舶从

发航计划、航行、锚泊、过坝全过程的联合调度和安全监管。

### 5 结论

1) 大型船闸高效通航理论体系待发展。大型船闸通航涉及机械、电气、水工、交通管理、海事、航道、信息化等诸多专业学科的交叉融合，专业性与技术性要求高，高效通航管理亟需通过专业基础理论支撑，需要探索大型船闸多尺度动力学建模、智能快速计算以及大型船闸通航安全风险预警等理论方法。

2) 大型船闸运行数字孪生技术与装备待研发。随着数字交通技术发展及应用，结合数字孪生建设推进大型船闸运行智能控制成为大型船闸科技创新重要方向，需要解决大型船闸关键设备运行状态实时感知、建模仿真以及状态预测等理论方法以及研发基于半实物的大型船闸运行数字孪生仿真平台等。

3) 大型船闸运行智能化技术与国产化装备待研发。随着人工智能与智能交通技术发展与应用，大型船闸运行控制以及调度智能化技术尚需要进一步发展，特别结合大数据分析技术实现大型船闸高精度运行控制与精准化智能调度值得进一步深入研究。同时长江和西江大型船闸为国之重器，大型船闸运行与调度系统核心装备需要进一步国产化掌控核心技术。

4) 大型船闸运行绿色与生态技术待深化。长江和西江大型船闸运行涉及众多环节，推动大型船闸运行节能控制意义重大，需要解决零碳新能源与新材料技术应用、船闸运行节能优化控制等技术难题。同时，长江和西江大型船闸水域为生态敏感水域，需要解决船舶水污染监测与预警、排放监测与预警以及生态保护等技术难题。

**参考文献:**

- [1] 廖鹏. 繁忙船闸的船舶待闸时间分析与估算[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 408-412.
- [2] 王多银, 程梦瑶, 黄海津. 基于层次分析法的船闸通过能力影响因素研究[J]. 水运工程, 2020(6): 147-151.
- [3] 廖鹏, 张玮. 船闸一次过闸平均吨位计算模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 207-212.
- [4] 齐俊麟. 长江三峡—葛洲坝水利枢纽通航关键技术及应用[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [5] 南京水利科学研究院. 重大水利枢纽既有通航设施通过能力提升及示范[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2021.
- [6] 陈琼, 李云, 刘本芹, 等. 高水头船闸一字闸门水动力特性数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2017(1): 87-94.
- [7] 郝品正, 冯小香, 陈冬元. 长江三峡—葛洲坝两坝间深水急险滩航道整治技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [8] 长江三峡通航管理局, 天津水运工程科学研究院, 武汉理工大学等. 三峡—葛洲坝两坝间航道船舶适航流量研究[R]. 宜昌: 长江三峡通航管理局, 2019.
- [9] 谢蒙. 基于提高三峡船闸通过能力的三峡船型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- [10] 王思佳. 三峡“130型”: 长江绿色航运新典范[J]. 中国船检, 2022(6): 66-69.
- [11] LIU C G, QI J L, CHU X M, et al. Cooperative ship formation system and control methods in the ship lock waterway[J]. Ocean engineering, 2021, 226(1): 108826.
- [12] 张珊, 吴澎. 长洲水利枢纽3-4号船闸平面布置研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 1-5.
- [13] 长江三峡通航管理局. 高水头船闸、阀门及启闭机状态检测分析关键技术研究[R]. 宜昌: 长江三峡通航管理局, 2013.
- [14] 杨全林, 李涵钊, 陈鹏. 三峡船闸运行调度人机集成设计方案研究[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 114-121.
- [15] 周雨萌, 蒋仲廉, 初秀民, 等. 内河船闸启闭机智能测距系统设计与实现[C]//中国智能交通协会. 第十三届中国智能交通年会大会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2018: 273-279.
- [16] 陈德山, 朱剑华, 李吉祥, 等. 基于多波束扫描的内河船舶吃水检测技术[J]. 水运工程, 2016(1): 152-157.
- [17] 李然, 张杰, 吴鹏, 等. 一种船舶过闸船速检测预警装置: 201520127141. X[P]. 2015-03-05.
- [18] 吴澎, 刘春泽, 李明泽, 等. 长洲枢纽既有船闸和扩建船闸的通过能力分析[J]. 水运工程, 2023(8): 56-62.
- [19] 武汉理工大学, 交通运输部水运科学研究院, 中国船级社武汉规范研究所, 等. 内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列第1部分: 长江水系: GB 38030. 1—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [20] 交通运输部珠江航务管理局, 交通运输部天津水运工程科学研究院. 通航建筑物联合调度技术规程: JTS/T 322—2023[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023.
- [21] 杨珏, 李乐新, 杨冰. 单级船闸运行可靠性分析及提升措施[J]. 水运工程, 2021(2): 17-21.
- [22] 高雄, 覃祥孝, 李然, 等. 多点同步升降装置及其升降方法: 200610019913. 3[P]. 2006-08-04.
- [23] 王忠民, 杨全林, 金俊. 三峡船闸通过系统与智能运行模式探讨[J]. 水运工程, 2020(2): 98-102, 116.
- [24] 黄海遵. 基于北斗导航的船闸报闸管理系统的建设与实现[J]. 企业科技与发展, 2016(6): 30-33.
- [25] 长江三峡通航管理局, 中交水运规划设计院有限公司, 交通运输部水运科学研究所, 等. 大型通航枢纽扩能与运营安全保障科技示范工程[R]. 宜昌: 长江三峡通航管理局, 2021.

(本文编辑 王璁)

