DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.006

三峡–葛洲坝梯级枢纽通航二十年创新发展与实践

齐俊麟*，陈冬元，李然

（长江三峡通航管理局，湖北宜昌 443000）

摘要：面对三峡–葛洲坝梯级枢纽通航设计能力逐渐饱和、过坝货运量快速增长的新形势与新常态，积极利用现代信息技术提升通航能力成为当前三峡高质量通航发展的必然选择。本文旨在阐述三峡–葛洲坝梯级枢纽高质量通航的技术体系构建及其工程应用，按照现状分析、技术体系构建、实施成效、存在瓶颈、后续发展措施的总脉络展开研究。在梳理国内外发展现状的基础上，研判了影响三峡高质量通航的主要因素在于通航装备、交通组织、安全保障、环境整治、绿色养护，构建了三峡–葛洲坝梯级枢纽高质量通航的技术体系。立足三峡–葛洲坝梯级枢纽通航20年发展实践，凝练了智能运营、通航组织、安全保障、航道能力、绿色通航等梯级枢纽通航成果；针对高质量通航发展的主要瓶颈，提出了三峡–葛洲坝梯级枢纽智慧绿色通航的中长期发展建议。三峡–葛洲坝梯级枢纽智能化运行及其效率提升，可为内河大型梯级枢纽通航建设提供技术借鉴与管理启示。

关键词：三峡工程；梯级枢纽；通航组织；智能通航；绿色建养

中图分类号：U64　　**文献标识码：**A

Innovation and Practice of High-Quality Navigation of the Three Gorges-Gezhouba Cascade Hub in 20 Years

Qi Junlin*, Chen Dongyuan, Li Ran

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, Hubei, China)

Abstract: As the navigation design capacity of the Three Gorges–Gezhouba cascade hub has been gradually saturated and the volume of transiting cargo has increased rapidly in the past two decades, it is necessary to adopt advanced information technologies to improve the navigation capacity and promote the high-quality navigation of the Three Gorges. This study aims to investigate the technical system and its engineering application for the high-quality navigation of the Three Gorges–Gezhouba cascade project, and involves the aspects of current situation analysis, technical system construction, implementation results, existing bottlenecks, and follow-up development measures. The study reviews the research status of cascade hubs in China and abroad and explores the major factors affecting the high-quality navigation of the Three Gorges, namely navigation equipment, traffic organization, safety assurance, environmental improvement, and environmental-friendly maintenance. The technical system is also built. The innovative development and practice of the Three Gorges–Gezhouba cascade hub over the past 20 years are summarized from the aspects of intelligent operation, navigation organization, safety assurance, channel capacity, and green navigation. Moreover, the medium- and long-term suggestions are proposed for the intelligent and green navigation of the Gorges–Gezhouba cascade hub focusing on the major bottlenecks.

收稿日期：2022-09-14；**修回日期：**2022-10-28

通讯作者：*齐俊麟，长江三峡通航管理局正高级工程师，研究方向为枢纽通航；E-mail: 18672099998@163.com

资助项目：国家自然科学基金项目(71874132)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

The improvement in the intelligent operation level and efficiency of the Three Gorges–Gezhouba cascade hub can provide a key technical reference for the high-quality navigation construction of large-scale inland river cascade hubs in China.
Keywords: Three Gorges project; cascade hub; navigation organization; intelligent navigation; environmental-friendly maintenance

一、前言

三峡工程是迄今为止世界上规模最大的水利枢纽工程，也是综合效益最广泛的水电工程[1]；实质性改善了长江中上游的航道条件，推动了长江航运高速发展，在长江经济带建设中的战略地位及作用极为突出[2]。例如，三峡船闸自2003年6月试通航以来，过闸货运量快速增长，累计过闸货运量为1.483×10^9 t（截至2020年8月），支撑了长江经济带发展。然而，三峡船闸于2011年提前达到设计通过能力，已连续多年超负荷运行；船闸拥堵现象日益严重，船闸通过能力不足成为长江经济带高质量发展的瓶颈环节之一，同时带来了一系列的环保和安全问题[3]。例如，2011年以来的过闸船舶平均待闸时间由44 h增长到200 h，能力和需求之间的矛盾凸显；船舶运营航次从往年的12航次左右下降到9个航次左右，船舶营运效率逐年下降；每日近千艘船舶、近万名船员、近3×10^5 t危险品在大坝的上/下游集中，带来的环境和生态问题不利于长江生态区保护。

梯级枢纽高质量通航组织能够实现船舶安全、有序、便捷地通过大坝/水闸，同步发挥枢纽的综合效益；在通航组织过程中，根据船舶动态、通航设施状况、通航环境及天气等，合理指派船舶进入闸室，确定船舶在闸室的位置，实现内河相邻大坝/水闸的协同运作。国外的相关研究主要涉及多闸、单闸的通航组织[4~9]，较多从运筹优化角度给出最优或次优的通航组织方案；很少考虑大型梯级枢纽的运营模式、通航环境、应急安全、绿色建养等，对智能通航、智慧航道、绿色航道的思考和探讨极少。对于三峡–葛洲坝梯级枢纽通航组织而言，面临通航管制分道航行、水流水位变化船舶受限航行、船闸检修双线变单线通航、汛前腾库防洪船闸由五级转四级运行、恶劣天气时船舶交通组织与疏散等情况；只有改善船舶交通流量时空分布，协同三峡大坝、葛洲坝（简称两坝）运作，匹配船舶交通供需关系，才能充分发挥枢纽通航效能，降低通航交通压力及风险，保障长江水道的便捷通畅。

国内有关三峡–葛洲坝梯级枢纽的通航研究，集中在船舶交通流演化机理[10~13]、两坝联合调度[14~17]、通航能力评估[18~20]、安全应急[21~23]等方面。随着区域经济快速发展，过闸货运量快速增长，过坝船舶以大型化单船为主，而船队模式因市场竞争力不足而趋于消失，导致船闸运行服务对象出现了根本性转变；单船过闸时间大幅增加、闸室面积利用率降低、船舶间组织调度等系列难题浮现，需要兼顾智慧、高效、安全、绿色等方向[24~26]开展系统研究。在此背景下，长江三峡通航管理局作为三峡高质量通航的牵头单位，着眼“服务三峡工程、确保航运畅通”目标，联合长江设计集团有限公司、南京水利科学研究院、武汉理工大学等进行技术攻关，在梯级枢纽通航装备运维、通航交通组织、通航安全保障、航道环境整治及绿色养护等方面取得了一批创新成果并开展了实践应用。

本文立足三峡–葛洲坝梯级枢纽通航20年来的探索与实践，阐述大型梯级枢纽高质量通航技术体系及其实践成效；结合交通强国建设的新形势，探讨工程未来发展规划以及针对性建设举措，以期为我国内河航运智慧绿色高质量发展提供先导方案。

二、三峡–葛洲坝梯级枢纽通航技术体系

围绕高效、平安、绿色发展主题，着眼梯级枢纽高质量通航目标，构建三峡–葛洲坝梯级枢纽通航技术体系（见图1）。立足坚实技术支撑，将长江三峡建设成为“东西畅通、南北辐射，有效覆盖、立体互联”的长江经济带现代化综合立体交通走廊的重要环节，为长江水道高质量建设及智能运维提供支持。

（一）高效运行相关技术

1. 梯级枢纽通航装备联控

为解决高水头输水阀门在高速水流作用下产生空化、振动等现象机理不明问题，开发了高水头船闸输水模拟实验系统，提出了输水系统水力学调控

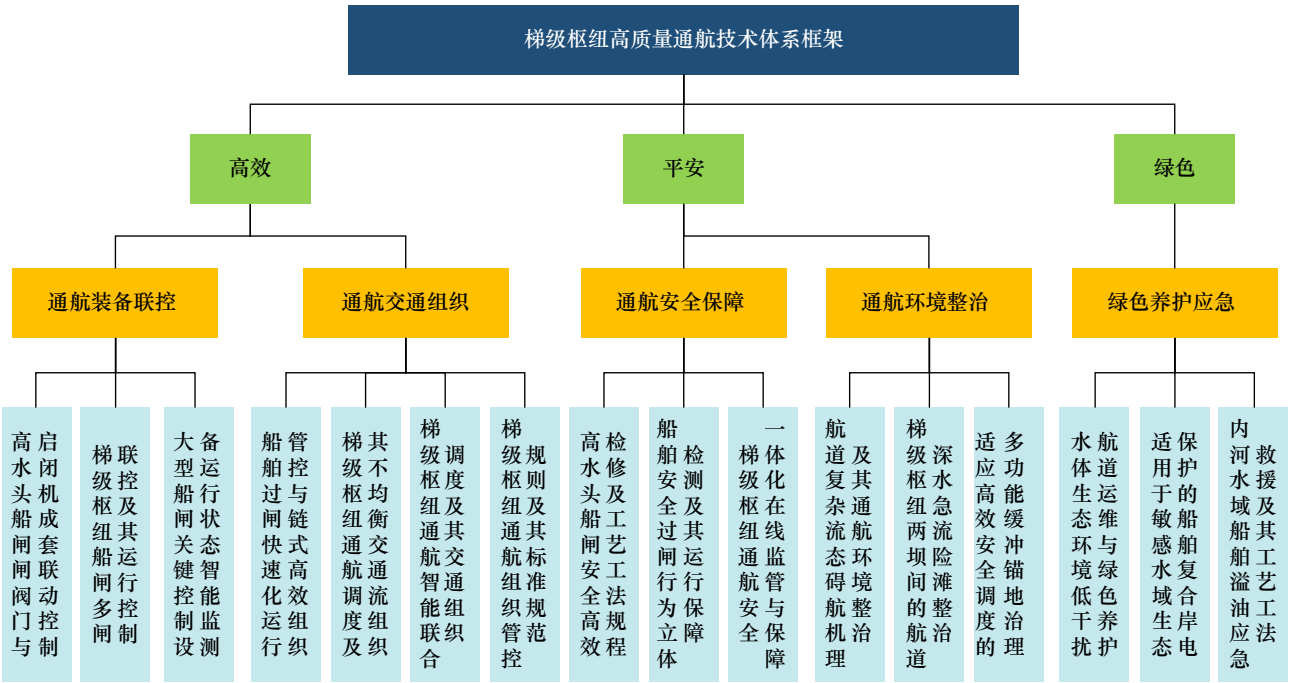

图1　三峡–葛洲坝梯级枢纽通航技术体系框架

措施、40 m以上超高水头船闸阀门防空化方法，为闸阀门与启闭机联动控制明确了理论基础。为解决闸室内产生的超灌、超泄严重影响船舶停泊和人字闸门运行的安全问题，研发了“输水阀门6 m动水关阀、人字闸门平水开门”的闸阀门联动控制技术；建立了水位差–动水关阀开度计算模型，用于精确控制输水阀门的关闭时机，实现了闸室超灌超泄量控制精度≤0.1 m。通过原型观测，掌握了大惯量、大水深条件下人字闸门启闭速度–负载特性，提出了人字闸门启闭控制优化方法，实现大淹没水深人字闸门平稳运行，5000吨级过闸主力船型的系缆力降低了60%。

针对多闸联控系统的高可靠性、高响应速率要求，开发了葛洲坝三闸联控运行系统，实现三峡–葛洲坝船闸多闸联控系统的不间断运行。由于船闸运行流程复杂、控制网络系统维护要求高，研发了核心机电控制系统、实训硬件在环仿真系统，为特殊工况下应急控制方案验证提供了基础平台。针对多线多级连续船闸的运行方式多、工艺流程复杂特点，开发了运行工艺流程仿真系统，支持实现船闸运行的预前管控。

针对大型船闸人字闸门启闭机高精度运行控制需求，研制了用于人字闸门启闭机的实时激光测距装置，提高了控制精度与可靠性。针对高水头船闸从事后检修、定期检修转向状态检修的应用需求，运用振动检测技术分析低速重载大型人字闸门、反弧门运行状态特征信号，据此界定设备关键部件的运行状态；发展了高水头船闸重要部件运转卡阻情况的检测与分析技术。采用声发射方式检测低速重载大型人字闸门启闭机减速器的运行状态，形成了人字闸门启闭机减速器运转检测及分析技术；开发了三峡–葛洲坝船闸关键设备设施服役状态运行状态监测系统（见图2），使得相关数据平均反馈时间相较传统方式降低80%以上。

2. 梯级枢纽通航交通组织

针对船舶过闸快速化难题，研发了基于同步移泊方法的过闸船舶航行自动控制技术。引入闸室有效面积利用率、船舶的吨位与面积关系、日流量不均衡系数，改进了船闸通过能力的工程计算模型；综合理论计算和实践经验，提出了单向运行与同步移泊的多级船闸交通组织方法。对于单船人工驾驶进出闸通过效率偏低、闸室内停船定位精度不高而影响船闸运行效率的问题，提出了并排虚拟成组、梭形成组等过闸船舶成组方式，日运行能力由12闸次提高至16闸次。运用多船同步进出闸跟随的模糊控制与仿真技术，开发了闸区水域船舶航行动态高

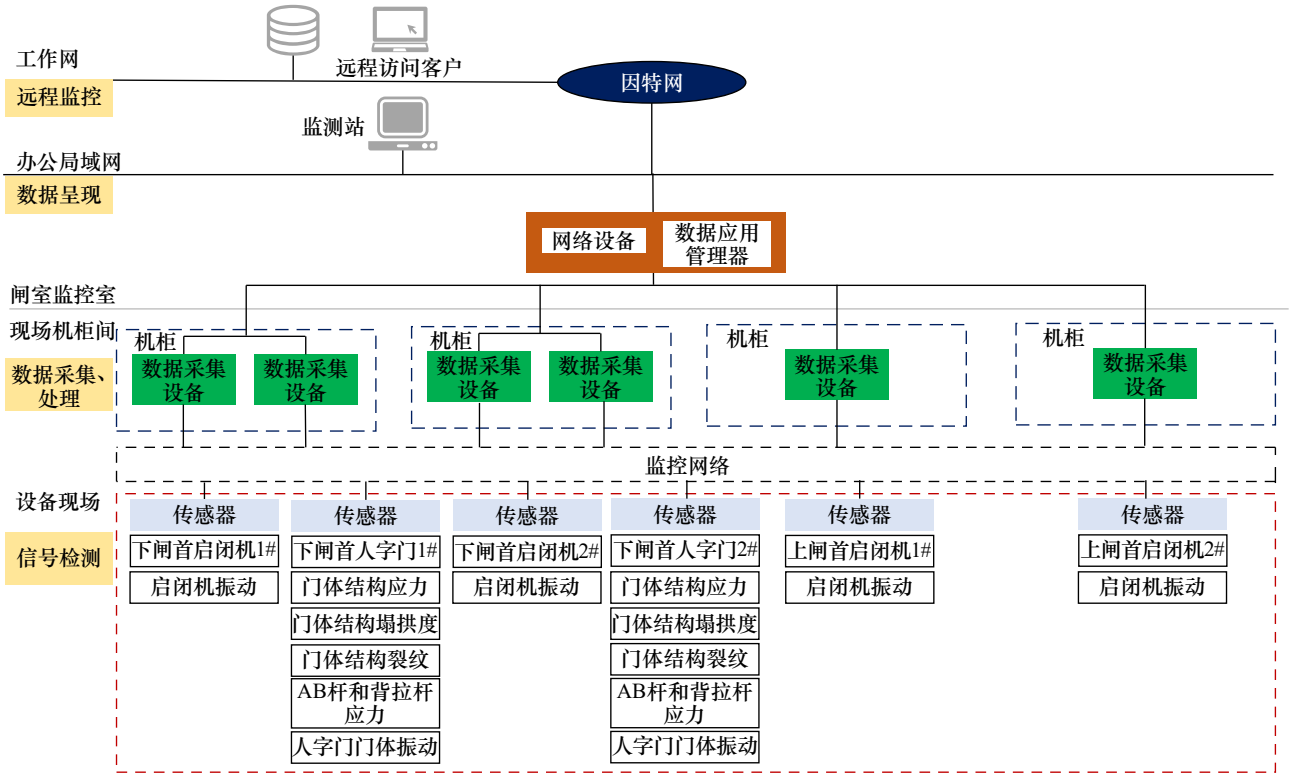

图2　三峡–葛洲坝船闸结构监测系统架构

精度感知系统、多船同步航行控制系统，实现船–闸–岸协同的船舶过闸航行管控、船舶同步进出闸与闸室靠泊的精确控制。

鉴于梯级枢纽河段中多船型、多航线、多通道、多货种、复杂编组，两坝联合精确调度的现状，提出了基于缓冲锚地以匹配两坝间不均衡交通流的交通组织方法；开发了基于自回归移动平均模型的枢纽交通流仿真平台，研制了与船舶高效集泊排挡/快速成组链接装置、船闸溢负荷条件相适配的三峡–葛洲坝梯级枢纽通航调度系统，使得船舶进出闸时间缩短了20 min，船舶安全通航效率提升了33%。

针对梯级枢纽通航系统船舶调度多目标不确定性组合优化问题，构建了梯级枢纽交通流仿真模型，设计了闸室分配、闸室编排、运行调度等耦合子模块的启发式求解算法，基于船舶航速的空间资源优化配置方法；开发了过闸远程申报系统，申报率超过98%。对于梯级枢纽通航联合调度建模与求解难度大的情况，以平均闸室面积利用率最大化、平均船舶待闸时间最小化为目标，建立了联合调度模型；为规避模型求解带来的高时间复杂度，发展了联合调度双层循环混合智能求解算法、与通航调度相关的智能综合管理系统（见图3），实现了“互联网+”多模式、多功能服务，确保船东满意度优于90%。

制定了船型全系列、流量全覆盖的适航流量标准、分道航行规则、驾引指南，解决了船舶适航规则标准化问题。考虑枢纽航道受两岸峡谷制约、三峡电站日调节与葛洲坝电站反调节等多重影响，制定了复杂水流条件下航运调度规则，提出了三峡枢纽下泄流量的速度变化方法，解决了电站日调节产生的非恒定流影响船舶航行安全的问题。针对汛期流量大、比降大、流速高，呈洪水急险滩的特性，采用时间序列神经网络预报、操纵性建模相结合的数值计算方法，获得了船型全系列、流量全覆盖的适航流量标准；据此制定枢纽航道汛期分道航行规则及驾引指南，为汛期枢纽通航调度提供技术标准依据，汛期限航船舶积压量减少约28.6%。

（二）平安保障相关技术

1. 梯级枢纽通航安全保障

形成了高水头船闸安全高效快速检修装备体

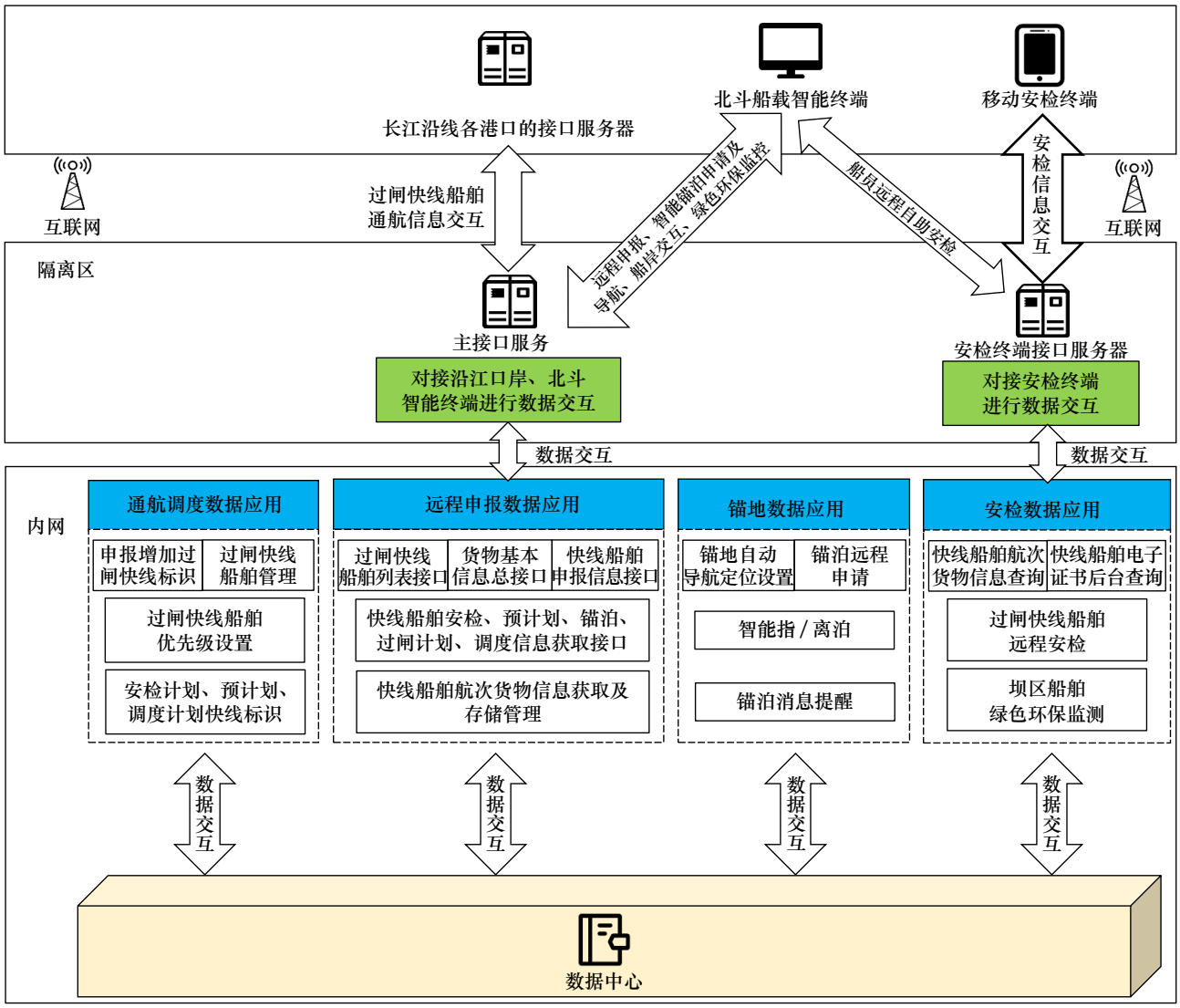

图 3　三峡 – 葛洲坝梯级枢纽智能综合管理系统架构

系，开发了以大型人字闸门多点同步升降装置为代表的系列快速检修装备，制定了大型船闸检修系统工艺工法及规程。三峡船闸人字闸门尺寸大，质量约为 860 t，采用的同步升降装置可在 1 h 内将门体顶升 680 mm 高度，同步精度为 0.5 mm；研制的顶底枢检修、反弧门钢止水修复装置，修复精度为 0.2 mm。针对输水廊道结构形式复杂、施工面展布困难问题，开发了斜井段快速智能检测系统，支持了水下水工检修设施快速展布、立体交叉作业等；创建了人字闸门支枕垫块表面修补、背拉杆调整、输水廊道砼蚀损修补等系列船闸检修工艺，制定了我国首部大型船闸检修技术规程、人字闸门顶落门施工水运工程一级工法，解决了高水头船闸安全高效检修问题，计划性停航检修工期缩短 50% 以上。

开发了大型船闸船舶行为立体检测系列特种装置，实现船舶动吃水、航速等参数的高精度在线监测。针对船闸水域航行受限、船舶动吃水不易定量计算的问题，建立了船闸船舶下沉量与航速、断面比关系的经验公式，提高了计算分析水平。针对过闸船舶水下部分无法检测的难题，建立了基于单波束阵列数据变分算法的数据复原模型；发展了船舶吃水量系列检测方法、过闸船舶三维吃水信息管理系统，实现船舶吃水的自动在线检测，误差不大于 10 cm。针对闸室内船舶集泊越界的管控需求，开发了激光扫描、视频图像处理技术融合的禁停区域越界探测及报警系统，报警正确率达 99.99%。

研制了梯级枢纽通航安全一体化在线监管与保障技术及相应平台，实现过闸船舶全过程、全方位服务。基于梯级枢纽航道船舶的航行数据，构建了船舶操纵性数值预报模型、梯级枢纽通航船舶航行仿真系统，可靠评估船舶航行风险。针对低能见度条件下大型船闸通航安全保障需求，建立了不利天气时的船舶过闸安全导航辅助系统，拓宽了大型船闸及引航道在船舶过闸时的助航范围。针对船舶过闸安全检查需求，开发了相应的射频识别与认证系统、业务管理系统，解决了过闸运输监控系统的联网联控技术问题。

2. 梯级枢纽通航环境整治

针对泡漩、剪刀水、扫弯水等恶劣流态，采用原型观测、物理–数学模型相结合的流态分析方法，阐明了梯级枢纽急险弯地质条件与汛期大坝泄洪、电站调峰耦合作用下非恒定流对不同载量、船型、功率的船舶碍航机理，形成了三维水流控制模型。应用基于船舶大样本数据采集和试航的时间序列神经网络预报技术、与操纵性方程相结合的数值模拟方法，实现复杂流态下船舶运动轨迹仿真及精准预测。形成了不同船舶类型、主机功率、通航流量条件下的船舶安全通航最大载量指标，以单位功率装载量为主控因素，船型全系列、流量全覆盖的梯级枢纽航道通航标准。

基于三维水流控制模型、典型滩段流场分析，提出了包括扩大有效过水断面、“引流压泡”、降低航线流速在内的深水滩险治理方案；研发了纵向阶梯倒坡炸礁与斜坡面抛填结合、“急险”并治的深水急流航道整治技术，建立了冲击波压力预测、速度计算、安全距离计算、共振危害判定计算等方法。在枢纽航道整治工程实施后，航道流态显著改善，最低限航流量标准由2.5×10^4 m^3/s提升至3×10^4 m^3/s，汛期通航运量增长了21.6%，改善了船舶在两坝间的航行安全水平。

针对梯级枢纽高效交通组织对多功能锚地环境整治及建设需求，设计了大风、大流量条件下适应大水深、大变幅、高边坡的安全停泊锚地工程技术方案。建设了低桩承台靠船墩、高桩墩台靠船墩、斜坡面系缆桩等结构型式锚地，满足了水深≥35 m、水位变幅≥30 m、风力≤10级的船舶安全停靠要求，支持分区分类、多排多列，如直立式靠船墩双侧一次靠泊能力达4×10^4 t。

（三）绿色养护应急相关技术

鉴于枢纽水域处于中华鲟核心保护区、风景名胜区、国家地质公园、饮用水源地等生态敏感区，积极研究枢纽通航全要素、船舶过坝全过程对水生境干扰的成因，揭示了锚地待闸船舶排放及潜在危险源对水生境的影响机理并形成相应的枢纽航道绿色养护技术；制定了航道疏浚、复合岸电、溢油应急、新能源替代等水体生态环境低干扰航道运维方案，牵引发展了纯电动航道维护船、海事巡逻船，提高了绿色通航技术水平。

针对敏感水域大量待闸船舶在锚地使用辅机发电带来的噪声振动干扰、集中排放问题，开发了船舶智能化岸电供电系统，集成了多场景自适应调节的岸电接口箱、水位自适应电缆柔性收放装置，适用水位变幅≥30 m，船岸电气连接时间≤2 min，并靠级联供电船舶数量达到10艘。建设了长江三峡通航综合岸电示范区，年替代燃油1855 t，减少CO_2排放5844 t。

针对危险品通过量超过8×10^6 t/a、船舶溢油风险较高、急流污染扩散迅速的特点，研发了适合内河水域的日常船舶污染和事故应急污染防治技术，建立了兼顾溢油和化学品泄漏事故应急的辅助决策系统。研制了集应急设备储存、装卸、运输、作业等功能于一体的多功能船舶溢油应急救援平台，创建了内河水域急流条件下溢油应急设备快速下水、溢油“导围控”等新工艺，应急设备下水时间由2 h缩短至30 min，为水域污染防治快速反应提供了坚实保障。

三、三峡–葛洲坝梯级枢纽通航二十年实践成效

（一）智能运营水平显著提升

将先进信息技术与三峡通航全要素精准对接，促进交通运输活动在物理空间和虚拟空间上的融合，构建了数字化、网络化、智能化的通航管理新模式，以智慧通航为核心，智慧监管、智慧运维、数字服务为支撑的梯级枢纽智能运营体系（见图4）。以智慧交通为导向，着眼“数字三峡、智能通航”目标，健全了三峡通航诚信管理体系，建立了智能管理平台、通航保障平台、政务服务平台。实施了三峡–葛洲坝船舶监管系统改扩建等工程，形成了

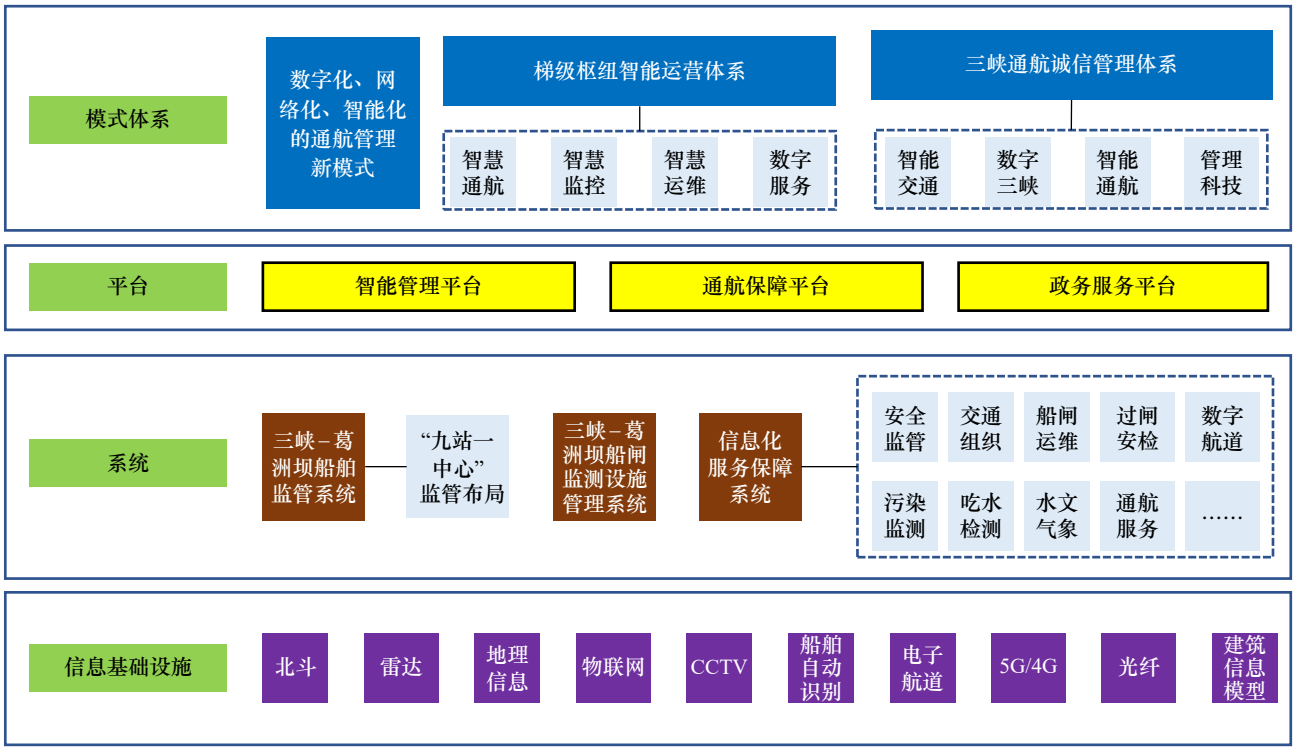

图4　梯级枢纽智能运营水平提升举措

注：CCTV表示闭路电视监控系统；5G表示第五代移动通信技术；4G表示第四代移动通信技术。

“九站一中心”的监管布局；建成了20余套信息化服务保障系统，覆盖安全监管、交通组织、船闸运维、过闸安检、数字航道、污染监测、吃水检测、水文气象、通航服务等要素。组织研发了北斗智能终端并推广应用，引导实现了过闸船舶的北斗智能终端全覆盖。开展了基于建筑信息模型技术的三峡–葛洲坝船闸监测设施管理系统建设工程，实现水工、机械、电气等的一体化运行管理和监测保障。目前，三峡通航要素基本实现数字化采集、数据并网融合，网络安全与信息化水平保持行业领先，支撑了通航管理全方位覆盖、全天候运行、全过程监管。

（二）通航组织能力显著提升

通过优化两坝船闸及升船机联合调度运行、过闸吃水控制标准从3.2 m提高到4.3 m，整治航道、开辟待闸锚地、增设导航墙待闸设施等工程措施，过坝调度、预计划及滚动计划新机制等管理措施，同步进闸、同步移泊、虚拟闸室、船闸快速检修等技术方法，实现了三峡船闸日均运行闸次从22个提升到31个、单闸次通过量从3140 t提升到20 807 t、单船平均吨位从870 t提升到5379 t。按照“源头管理、总量控制，远端调度、有序放行，信息公开、依法监督”原则，合力实施长江干线联动控制，开展葛洲坝三江航道动态吃水，协调防汛部门洪水期控泄、枯水期补水等调度，使得三峡枢纽年通过量从2004年的3.431×10^7 t提升到2021年的1.5×10^8 t。2022年1—7月，三峡枢纽通过量为9.062×10^7 t，再创历史新高。

（三）安全保障能力显著提升

聚焦三峡通航客运安全风险、危化品运输安全风险、航道与通航建筑物断航风险、船舶漂流撞坝安全风险、三峡库区地质滑坡与极端恶劣天气安全风险、船舶碰撞桥梁垮塌安全风险等，建立健全安全风险管控长效机制。坚持“三峡无小事”“三峡通航无小事”安全观，规范了包括高度协同保障通航、快速高效决策指挥在内的综合管理体系，完善了联合监管、文明执法等监督执法环节；在风险隐患分类分级、“双重”预防体系的基础上，改进了内河巡航救助一体化应急管理模式，增强了船闸设施设备、业务队伍素质等方面的保障能力。枢纽水

域内未发生一次性死亡10人以上重特大水上交通事故、船舶漂流撞坝责任事故、重大船舶污染水域环境事故，连续10年实现水上“零死亡、零沉船、零污染”。

（四）航道通过能力显著提升

根据航道典型断面分布，先后实施了两坝之间乐天溪航道整治工程、莲沱段航道整治工程，改善了两坝间的水流条件、限制通航流量，进一步提升了枢纽航道通过能力。例如，3000吨级单船限制通航流量从2.5×10^4 m^3/s提高到3.5×10^4 m^3/s，其他船舶单位马力拖带量也有了明显提高；两坝间的航道泡漩、回流等碍航副流流态明显改善，通航安全性有所增强。定期对三峡坝上锚地、葛洲坝坝下航道进行扫测维护，动态实施锚地清淤工程、航道下游浅点清除工程。实施三峡坝区河段的数字航道升级改造，提升航道整治维护能力。推动区域综合交通运输体系建设，实行滚装船长期翻坝转运，全面提升了干线航道通航能力。

（五）绿色通航水平显著提升

采取生态航道建设养护方法，严格标准和规范实施，有效提升了梯级枢纽绿色通航水平（见图5）。严格执行船舶水污染物排放控制标准，实践形成了船舶污染防治“三控、三全、两禁止”的三峡模式，即源头防控、接收管控、去向监控，过闸船舶污染防治情况全检查、船舶生活污水直排阀全铅封、枢纽河段岸电设施全覆盖，不满足水污染物达标排放标准或船上存储交岸处置要求的船舶禁止过闸、在具备岸电供应能力的泊位上停泊超过2 h的船舶禁止使用辅机；率先实现辖区船舶生活垃圾、生活污水、油污水的零排放，“长江大保护”成效显现。着力推动三峡坝区岸电实验区建设，推行港口、锚地、靠船墩、抵坡等多种岸电接入应用方式，改造过闸船舶的供受电设施。自2019年4月以来，累计接电船舶超过1.1×10^4艘次，岸电用电量为1.607×10^7 kW·h，减少CO_2排放1.691×10^4 t。开展了“电化长江”“氢化长江”试验，改造并投用长江上首艘纯电动海巡公务船，制定了公务船艇全电化、

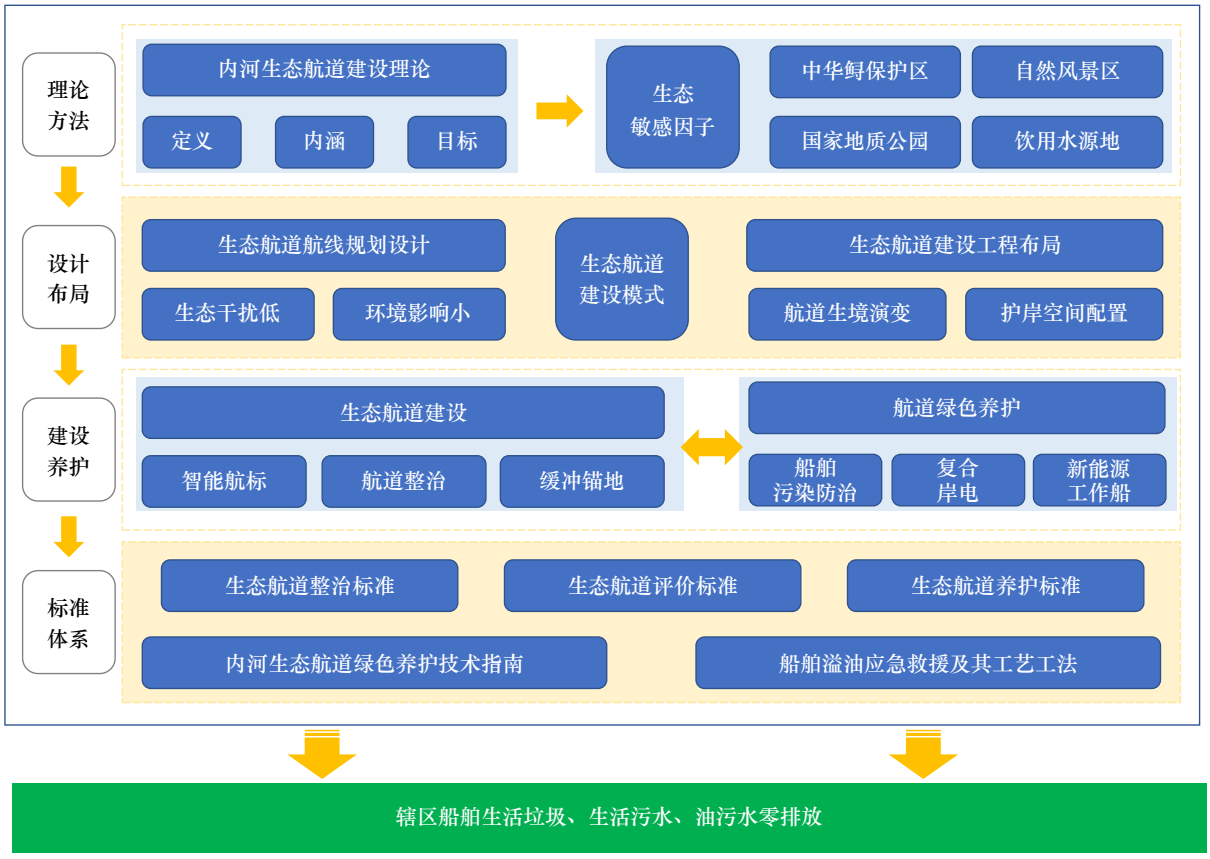

图5　梯级枢纽绿色通航措施

氢燃料动力船等规划；落实了电力驱动、液化天然气动力等清洁能源船舶优先过坝政策。

四、三峡－葛洲坝梯级枢纽高质量通航面临的瓶颈

（一）梯级枢纽联调联控任务繁重

三峡船闸是双线五级连续船闸，葛洲坝是三线单级船闸，共有人字形工作闸门及输水阀门76扇；运行级数和方式多，水位差最高为136 m，多闸联控系统集成与运行可靠性、闸阀门启闭精准控制安全性等要求极高。然而，2011年以来船闸满负荷运行已属常态化，船闸通航保障率、闸室面积利用率、单次过闸平均载重吨位等均远超设计值，梯级枢纽联调联控压力大而容错空间小。此外，三峡双线五级船闸常态为单向运行模式（升船机为迎向运行），而葛洲坝各单级船闸多为单向或迎向运行模式，需根据船舶交通流向、船闸检修情况、汛期流量等因素，对各个船闸的运行模式进行动态调整。这就导致两坝的联调联控任务更为繁重，对梯级枢纽高质量通航的影响长期持续。

（二）梯级枢纽船舶交通组织复杂

三峡－葛洲坝枢纽航道通航条件强时变（日变幅值达3 m），适航规则不健全，加之过闸船型多、待闸船舶数量大，船舶交通流的时空配置与动态调度复杂，交通高效组织难度大。梯级枢纽船舶交通组织需考虑两坝船闸的匹配运行，而两坝的船闸运行模式、船闸运行性能、水文气象要求等具有差异性；过闸船舶交通流的密度、方向、时间等存在季节性、昼夜内的时变特性，均影响两坝的锚地组织、船舶预申报、船舶虚拟闸室编排、闸次运行模式制定、闸次计划、闸室排挡等诸多决策。此外，汛期（尤其是大流量洪水期间）以及船闸检修期间，在梯级枢纽附近水域的多数船舶无法正常航行，容易造成船舶积压滞留，也会增大船舶交通组织难度；需要开展应急组织，进行积压船舶的快速疏导过坝或翻坝，也使相应的船舶交通组织更显复杂。

（三）梯级枢纽装备检修运维难度大

船闸、升船机作为内河航道的重要节点，在长时间使用过程后会出现不同程度的损伤，存在一定的安全隐患。三峡－葛洲坝梯级枢纽的船闸、升船机等设备数量多、技术复杂，维修技术难度高、专用工装工艺缺少规范，极易出现运维管控不及时所致的停航检修，而单一设备出现故障都将影响整线船闸或升船机的正常运行。此外，船闸、升船机设备体型巨大，重点关键设备位于水下，开展人工检修运维与管控难度极大，这些因素都不利于相关设备的立体化监控与高效运维。

（四）梯级枢纽通航环境复杂且风险高

三峡水利枢纽蓄水成库后，通航条件大为改善，通航船舶数量和类型不断增加，但也出现了风浪增大、阵发性雾情加重、航线交汇点增多等不利于船舶通航安全的因素。三峡坝区目前已有多处锚地、港区、应急停泊区、码头等，通航环境趋于复杂；水域自然和交通环境复杂且安全敏感度高，发生各种船舶通航安全事故风险较大，将对长江航运、三峡大坝效益造成不同程度的负面影响。三峡－葛洲坝梯级枢纽两坝间“四滩一弯一关”流态恶劣，汛期在大坝泄洪、电站调峰叠加作用的影响下，水位陡升陡降、航道流态紊乱，船舶航行安全风险较高。峡谷河段蜿蜒曲折、山高壁峭，信号易丢失、定位不精准、多源信号不统一，船舶航迹预判难，与多船型、多航线、多通道、多货种、编组复杂等船舶交通属性相叠加，导致通航环境安全风险居高不下，综合监管及高效组织难度大。

（五）梯级枢纽水域生态脆弱敏感

三峡水库是三峡大坝运行后蓄水形成的大型人工湖泊，实行“冬蓄夏放”的调度方案，造成反季节水位涨落，形成了落差为30 m、面积为350 km^2的水库消落带。在长期反复的干湿交替作用下，库区水流速度变缓，大量泥沙在缓平地区淤积，河漫滩面积不断增长，生态环境条件、地理景观格局发生巨变[27]。梯级枢纽水域涉及中华鲟核心保护区、风景名胜区、国家地质公园、饮用水源地等生态敏感区域，生态环境脆弱敏感。目前，梯级枢纽船舶通航量超过4×10^4艘次/年，待闸排放集中，通过危险品数量极大，船舶溢油风险高，急流污染扩散迅速，应急处置难度高，使得水生态环境低干扰通航难以实现。工程运行对梯级枢纽水域生态保护构成

较大压力，绿色通航保障水平亟待提升。

五、三峡–葛洲坝梯级枢纽工程后续发展建议

（一）深化通航基础设施网络建设

升级完善航道、通航基础设施及关联要素的监测网络，依托数据资源的汇聚及整合，运用新架构改造原有数字航道维护管理和动态监测应用体系；补充完善航道测绘、智能感知与航行监控等业务环节，实现航道全业务流程的精准化管理。以航道和关联要素数据资源的交换及共享为切入点，推动通航支撑保障业务与通航安全监管、指挥调度等业务的协作和融合，实现跨业务、跨层级、跨区域的一体协同。面向船方提供通航船舶一站式服务，反映船岸协同、全辖区覆盖、全天候与全过程的的业务特色。

（二）推进通航管理能力现代化建设

开展三峡河段调度动态计划模型等基础研究，引入新型信息技术并与通航交通组织基础设施融合，建立通航环境与船舶运行态势智能评判能力，为交通组织综合管理提供可视化支持。建设智能通航调度系统，进一步提升通航组织的效率和水平。开展增强现实技术应用研究，提高与船载北斗定位、CCTV、沿海船舶自动识别系统基站数据的融合水平。应用北斗导航、智能视频、大数据等，强化船舶作业动态、重点水域、船舶污染防治的智能监管，提供全景式信息服务、智能化助航服务。挖掘积累的海量运行数据，形成基于大数据的态势分析与综合研判能力，驱动枢纽通航向数字化、网络化、智能化转型。

（三）开展枢纽通航协同创新中心建设

发挥科技战略引领作用，建立“产学研”协同机制，建设枢纽通航国家协同创新平台、枢纽通航“知识库”“专家库”。把握信息技术、智能制造、新材料等前沿科技趋势，强化与通航基础设施的融合创新，提高关键技术攻关、核心设备研发能力。结合枢纽通航实践，推广清洁能源，拓展智能化、数字化、轻量化、环保型交通装备及成套技术装备应用范围。在技术开发与应用型课题研究方面精准布局，引导科技成果高效转化。加强与国际通航领域的高水平合作，提升我国枢纽通航技术的国际影响力。

（四）高质量实施交通强国试点项目

2021年，“长江三峡河段智能通航”入选交通强国试点项目。三峡梯级枢纽工程后续发展将紧密结合交通强国试点，推动高新技术与通航基础设施深度融合，形成我国内河智能航运试验区；以全方位覆盖、全天候运行、全过程监控为标志，驱动梯级枢纽工程的通航智能化水平迈上新台阶[25]。长江三峡通航管理局作为试点项目的责任单位，将在3~5年周期内，构建全景式信息化服务、智能化助航服务能力，智能通航调度、智能安检、智能监测、智能运维体系；建设三峡河段航道立体化监测网络、一体化动静态电子航道图，实质性提升三峡河段智能通航水平。

六、结语

三峡–葛洲坝梯级枢纽通航建设，秉承大型枢纽通航组织与管理的已有经验和方法，结合长江三峡河段通航设施的基础条件、长江水道运能快速增长的发展需求，充分运用信息技术成果，历经20年的发展实践，形成了梯级枢纽通航技术体系；从通航装备、交通组织、安全保障、环境整治、绿色养护等层面，推进三峡–葛洲坝梯级枢纽高质量通航的基础理论、关键技术、成套装备研发，取得了以峡谷河段急流险滩治理、梯级枢纽高效通航调度、梯级枢纽绿色通航等为代表的一系列技术及应用突破。建立了生态环境低干扰的绿色通航示范区，显著提高了三峡–葛洲坝梯级枢纽船舶安全通航效率，实质性提升了我国内河绿色通航技术水平。

着眼未来发展和应用，三峡–葛洲坝梯级枢纽高质量通航在数字化、智能化、绿色化方面仍有提升空间。① 在新的三峡–葛洲坝梯级枢纽通航调度规则、危险品船舶过闸新规则的指导下，总结通航组织与管理的基础理论与技术模式，形成可量化评价的指标体系。② 结合人工智能技术进展，探索形成面向智慧绿色通航的新理论与方法，据此构建高质量通航的事前预测、事中监管、事后分析技术谱系及成套装备。③ 把握数字孪生、大数据、云原

生、区块链等新技术趋势，探讨三峡通航与新一代信息技术融合应用，以智能服务促便捷通航。④ 发展三峡区域的综合交通运输体系及其理论方法，保障三峡区域“公铁水”运输方式综合调度与应用，在发挥内河水运优势的同时科学分流货物。在此基础上，把握国家新一轮科技平台重组的宝贵机遇，推动建设枢纽通航国家协同创新平台，为长江水道高质量建设提供全面支持。

致谢

本文部分研究成果得到长江设计集团有限公司、南京水利科学研究院、武汉理工大学等单位的合作支持，谨致谢意。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 14, 2022; **Revised date:** October 28, 2022

Corresponding author: Qi Junlin is a professor-level senior engineer from the Three Gorges Navigation Authority. His major research field is navigation hub. E-mail: 18672099998@163.com

Funding project: National Natural Science Fund project (71874132)

参考文献

[1] 新华社. “国之重器”三峡工程完成整体竣工验收 [EB/OL]. (2020-11-01)[2022-09-06]. http://www. gov. cn/xinwen/2020-11/01/content_5556472.htm.
Xinhua News Agency. The heavy strip “Three Gorges project” has completed the overall completion acceptance [EB/OL]. (2020-11-01)[2022-09-06]. http://www. gov. cn/xinwen/2020-11/01/content_5556472.htm.

[2] 陈海山, 汪阳. 超大型水利设施防洪与区域经济发展: 以三峡工程为例 [J]. 世界经济, 2022, 45(5): 137–161.
Chen H S, Wang Y. Flood control in super large water conservancy facilities and regional economic development: A case study of Three Georges project [J]. The Journal of World Economy, 2022, 45(5): 137–161.

[3] 人民政协网. 打破“肠梗阻”建设三峡新航道 [EB/OL]. (2021-11-11)[2022-09-06]. http://www.rmzxb.com.cn/c/2021-11-11/2981647.shtml.
People’s Political Consultative Conference Network. Breaking development barriers and building a new channel for the Three Gorges [EB/OL]. (2021-11-11) [2022-09-06]. http://www. rmzxb.com.cn/c/2021-11-11/2981647.shtml.

[4] Verstichel J, Causmaecker P D, Spieksma F C R, et al. Exact and heuristic methods for placing ships in locks [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(2): 387–398.

[5] Verstichel J, Causmaecker P D, Spieksma F, et al. The generalized lock scheduling problem: An exact approach [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 65(2): 16–34.

[6] Verstichel J, Kinable J, Causmaecker P D, et al. A combinatorial benders’ decomposition for the lock scheduling problem [J]. Computers & Operations Research, 2015, 54: 117–128.

[7] Prandtstetter M, Ritzinger U, Schmidt P, et al. A variable neighborhood search approach for the interdependent lock scheduling problem [C]. Copenhagen: European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, 2015.

[8] Nauss M R. Optimal sequencing in the presence of setup times for tow/barge traffic through a river lock [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 187(3): 1268–1281.

[9] Smith L D, Sweeney D C, Campbell J F. Simulation of alternative approaches to relieving congestion at locks in a river transportation system [J]. Journal of the Operational Research Society, 2009, 60(4): 519–533.

[10] 范贤华, 谭志荣, 刘钊, 等. 基于突变理论的三峡船闸通航状态评价 [J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(3): 49–52.
Fan X H, Tan Z R, Liu Z, et al. Three Gorges ship lock navigation situation assessment based on catastrophe theory [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2014, 40(3): 49–52.

[11] 郝国柱, 黄立文, 姜丹. 通航环境态势辨识模型与应用研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(3): 496–500.
Hao G Z, Huang L W, Jiang D. Study on application and identification model of navigation environmental situation [J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2015, 39(3): 496–500.

[12] 刘清, 韩丹丹, 陈艳清, 等. 基于系统动力学的三峡大坝通航风险演化研究 [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(4): 19–23.
Liu Q, Han D D, Chen Y Q, et al. Research on navigation risk evolution in Three Gorges dam area based on system dynamics [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(4): 19–23.

[13] 卢升荣, 刘瑶. 极端水位对长江中游船舶交通流特征的影响 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 103–107.
Lu S R, Liu Y. Impact of extreme water levels on characteristics of vessel traffic flow in the middle reaches of Yangtze River [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2017, 36(3): 103–107.

[14] 齐欢, 肖恒辉, 张晓盼, 等. 三峡 – 葛洲坝两坝联合调度数学模型及算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(2): 99–104.
Qi H, Xiao H H, Zhang X P, et al. The mathematic model and algorithm for the co-scheduling of the Three Gorges dam and the Gezhouba dam [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007, 27(2): 99–104.

[15] 张晓盼, 齐欢, 袁晓辉. 三峡工程两坝联合通航调度的混合模拟退火算法 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 708–710.
Zhang X P, Qi H, Yuan X H. Hybrid simulated annealing algorithm on navigation co-scheduling to the two dams of the Three Gorges project [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(4): 708–710.

[16] Zhang X P, Yuan X H, Yuan Y B. Improved hybrid simulated annealing algorithm for navigation scheduling for the two dams of the Three Gorges project [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2008, 56(1): 151–159.

[17] Ji B, Yuan X B, Yuan Y B. A hybrid intelligent approach for co-scheduling of cascaded locks with multiple chambers [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(4): 1236–1248.

[18] 丁涛, 张乃宇. 基于船舶吨位变化的三峡船闸过货能力分析 [J].

重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 8–12.
Ding T, Zhang N Y. Cargo handling capacity of the Three Gorges Ship Lock based on ship tonnage change [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2022, 41(4): 8–12.

[19] 王多银, 黄海津, 程梦瑶, 等. 三峡船闸通过能力计算及提升策略 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(3): 66–69.
Wang D Y, Huang H J, Cheng M Y, et al. Traffic capacity of Three Gorges shiplock: A new calculation method and improvement strategies [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(3): 66–69.

[20] Zhang Y, Tian H W, Li R, et al. Hybrid simulation model for navigation performance evaluation of the Three Gorges–Gezhouba dams under novel regulations [J]. Simulation, 2022, 98(8): 677–698.

[21] 程晓东, 徐涛, 冯志州, 等. 汛期三峡 – 葛洲坝两坝间船舶疏散应急调度研究 [J]. 人民长江, 2022, 53(7): 8–12.
Cheng X D, Xu T, Feng Z Z, et al. Emergency dispatch of ships evacuation between Three Gorgers dam and Gezhouba dam in flood season [J]. Yangtze River, 2022, 53(7): 8–12.

[22] 李明伟, 安小刚, 潘士琦, 等. 基于数字孪生的船闸安全智慧管理方法 [J]. 水运工程, 2021 (6): 212–217.
Li M W, An X G, Pan S Q, et al. Smart management method for ship lock safety based on digital twin [J]. Port & Waterway Engineering, 2021 (6): 212–217.

[23] 覃盼, 冯志涛, 张杰, 等. 三峡坝区船舶通航安全风险演化研究 [J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(12): 136–143.
Qin P, Feng Z T, Zhang J, et al. Research on evolution of navigation safety in Three Gorges dam area [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(12): 136–143.

[24] 齐俊麟. 加强三峡通航技术研究, 促进航运高质量发展 [J]. 水运工程, 2020 (2): 1–5.
Qi J L. Strengthening research on navigation technology of the Three Gorges to promote high-quality development of navigation [J]. Port & Waterway Engineering, 2020 (2): 1–5.

[25] 中华人民共和国交通运输部. 关于长江航务管理局开展内河航运安全管控与应急搜救建设等交通强国建设试点工作的意见 [EB/OL]. (2021-10-26)[2022-09-06]. https: //xxgk. mot. gov. cn/2020/jigou/zhghs/202110/t20211026_3623073.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Opinions on the Yangtze River navigation administration's pilot work for the construction of a transport powerful country, such as safety control and emergency search and rescue of inland waterway navigation [EB/OL]. (2021-10-26)[2022-09-06]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202110/t20211026_3623073.html.

[26] 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, 2015.
Qi J L. Key technologies and applications for Three Gorges – Gezhouba dam hydro-junction shipping [M]. Beijing: China Communication Press, 2015.

[27] 窦文清, 贾伟涛, 张久红, 等. 三峡水库消落带植被现状、适生策略及生态修复研究进展 [EB/OL]. (2022-07-29)[2022-09-06]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220728.1021.006.html.
Dou W Q, Jia W T, Zhang J H, et al. Research progress of vegetation status, adaptive strategies and ecological restoration in the water-level fluctuation zones of the Three Gorges reservoir [EB/OL]. (2022-07-29)[2022-09-06]. https: //kns. cnki. net/kcms/detail/21.1148.Q.20220728.1021.006.html.