

水上 ETC 全自动无人船闸设想

罗招贵^{1,2}, 戴娜¹, 陈华栋^{1,2}, 陈正平^{1,2}

(1. 国网电力科学研究院有限公司/南瑞集团有限公司, 江苏南京 210003;
2. 南京南瑞水利水电科技有限公司, 江苏南京 210003)

摘要: 针对船闸无人值班等智慧发展方向、全自动船闸研究不够系统等问题, 进行了全自动船闸的流程、组成及实现路径研究, 提出了由全自动过闸指挥调度、船闸控制、智能感知及安全管控、运维保障体系 4 部分组成的全自动船闸方案, 及范围上由点到面、技术上由易到难、分步实施的实践路径。采用远程集控、统一调度、智能联动等技术, 构建船闸现地无人值班/少人值守的区域船闸集中调控系统, 并在扬州港航区域船闸进行示范应用。结果表明, 集中控制、统一调度与智能联动为安全可靠的船闸远程控制及统一调度提供支撑, 实现了船闸现地无人值班/少人值守, 全市船闸运调岗位人员大为减少, 船闸操作人员减少 60% 以上, 有效提升了下辖 6 座船闸的运行效能, 也为全自动船闸的建设进行了阶段性验证。

关键词: 全自动船闸; 数字孪生; 智能感知; 视频识别; 集中控制; 统一调度

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0191-09

Concept of fully automated unmanned ship lock with waterway ETC

LUO Zhaogui^{1,2}, DAI Na¹, CHEN Huadong^{1,2}, CHEN Zhengping^{1,2}

(1. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd. /NARI Group Corporation, Nanjing 210003, China;
2. Nanjing NARI Water Resources and Hydropower Technology Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: Aiming at the intelligent development directions such as unattended operation of ship locks and the lack of systematic research on fully automatic ship locks, this study conducts research on the process, components, and implementation pathways of fully automatic ship locks. A fully automatic ship lock solution is proposed, consisting of four parts: fully automatic navigation command and dispatch, ship lock control, intelligent perception and safety management, operation and maintenance support system. A step-by-step implementation approach is suggested, expanding from individual points to broader areas and progressing from technically simpler to more complex tasks. Technologies such as remote centralized control, unified scheduling, and intelligent linkage are adopted to establish a regional ship lock centralized control system for unattended or local minimally attended operation. This system is demonstrated and applied at Yangzhou port and waterway regional ship locks. The results show that centralized control, unified scheduling, and intelligent linkage can ensure the safety and reliability of remote control and unified scheduling for ship locks, achieving unattended or minimally attended operation at the local level, significantly reducing the number of personnel in ship lock operation and dispatch positions across the city. The number of ship lock operators is reduced by over 60%, effectively enhancing the operational efficiency of the six ship locks under its jurisdiction. This also provides phased validation for the construction of fully automatic ship locks.

Keywords: fully automated ship lock; digital twin; intelligent perception; video recognition; centralized monitoring and control; unified scheduling

收稿日期: 2025-07-29 录用日期: 2025-09-16

作者简介: 罗招贵(1978—), 男, 高级工程师, 从事水利水运工程自动化信息化相关技术研究及应用工作。

近年来,我国内河船闸已逐步开展远程集中控制、统一调度、智能监测感知等系统研究及建设,成为支撑内河航运发展的关键基础设施。广西西江集团研发并实施了西江流域船闸群集中管控系统,实现了对西江流域广西段12个梯级19座船闸的高效运行管理,显著提升了船舶过闸效率和船闸运行的安全性^[1]。苏北航务管理处开展了苏北运河智慧船闸研究,并在刘老涧三号船闸应用与实践,打造了少人值守、控调智能联动的高效过闸新模式^[2]。江苏港航基于江苏智慧船闸建设实践基础,提出了最终实现船闸无人化的全自主运行目标及演进阶段^[3]。三峡船闸提出了船闸智能化全自动运行方式设想,该方式无需人为进行关闸门操作,由船方确认、船闸闸室监测、集控监测3个部分组成^[4]。浙江数智交院对智慧船闸设计与建设方案进行了研究,构建船闸运行全面感知、过闸要素汇聚治理、智慧船闸大脑,涵盖船闸建设、调度、养护服务全业务流程、全生命周期一体化管理^[5]。东风日产动力总成工厂进行了黑灯工厂研究,提出AR巡检应用等关键技术,实现提升生产效率、降低生产成本目标^[6]。

综合上述研究分析,船闸控制、调度、感知监测、智能化等已在船闸开始应用并取得了良好效果,部分学者开展了船闸自动化运行研究,但以各个系统各自建设为主,缺少系统总体规划,运行调度与安全管控缺少统筹考虑。如何统筹规划,实现无人高效、安全可靠的自动化船闸是本文的研究重点。本文基于船闸运行管理需求,自动化系统建设情况,借鉴其他行业经验,提出水上ETC(electronic toll collection,电子收费),ETC全自动无人船闸的设想,并在扬州港航船闸示范应用^[7],旨在为内河船闸无人值班/少人值守的智能化系统提供一套可借鉴的技术方案和示范案例,并为最终实现船舶(船民)及船闸设施安全的全自动船闸奠定基础。

1 全自动化无人船闸建设总体思路及流程

1.1 总体思路

全自动无人船闸系统的核心目标是构建“无人

值班、智能调度、自主过闸、安全可控、高效协同”的智慧运行体系,实现船舶从报到、进闸、船闸充泄水、闸门启闭到船舶出闸的全流程自动化,减少人工干预。同时需保证船舶、船员及船闸等设施及人员安全。为此,全自动船闸需建设三大系统、一个体系,即全自动过闸指挥调度系统、船舶智能感知及安全监控系统、船闸远程集中控制系统及配套的运维管理及保障体系,分别实现指挥调度、安全管控、控制执行及运维管理与应急保障。全自动无人船闸系统架构见图1。

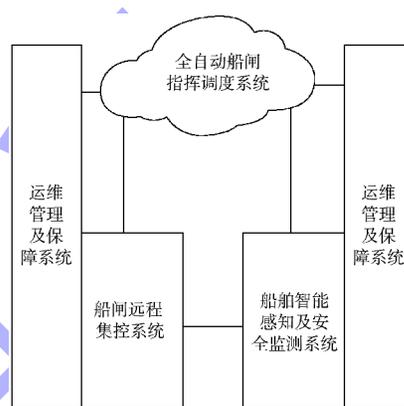


图1 全自动无人船闸系统架构

Fig. 1 Fully automatic unmanned ship lock architecture

1.2 船舶全自动过闸流程

船舶全自动过闸流程以“无人干预、智能协同”为核心,涵盖船舶报到、进闸、出闸及过闸过程中安全监管,以及相应的充水/泄水门、开门、关门等的自动控制。以船舶下行进闸为例,其流程为:船舶通过APP进行报到、预约下行过闸时间→系统通过AIS(automatic identification system,船舶自动识别系统)及北斗判断船舶是否在可报到区域→缴费(如有)、排档调度→通知船舶到上闸首候闸区(在此处需设置船舶身份识别、吃水检测等系统)→给控制系统发下行进闸开门令(关上闸首工作门、充水门→开上闸首充水门→上游与闸室水位平→开上闸首工作门)→通知船舶按调度顺序进闸→完成进闸(在上闸首或闸室上游侧需设置船舶身份识别、行人识别等系统)→给控制系统发下行出闸令(关上闸首工作门、充水门→开下闸首充水门→下游与闸室水位平→开下闸

首工作门)→通知船舶按调度顺序出闸→完成出闸(在下闸首或闸室下游侧需设置船舶身份识别、行人识别等系统)。船舶全部出闸后,下行过闸流程结束,见图 2。

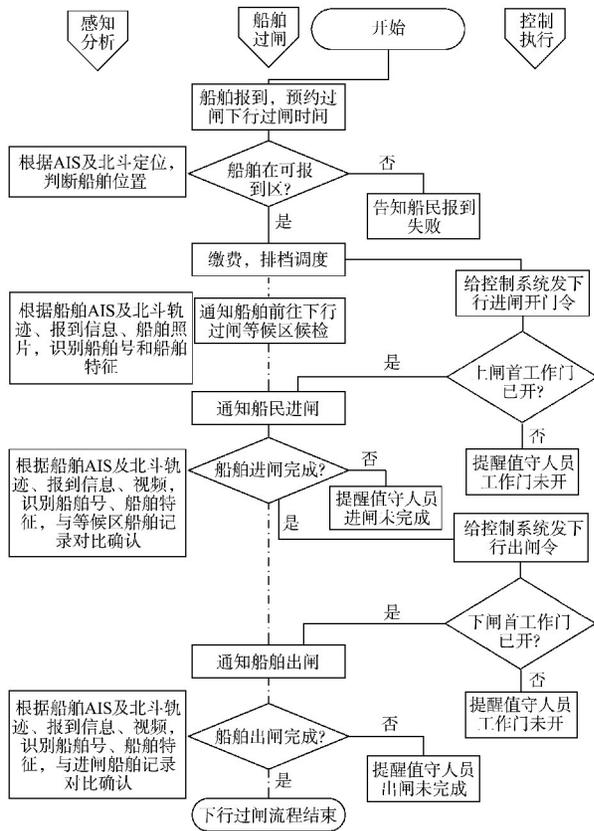


图 2 全自动无人船闸过闸流程

Fig. 2 Fully automated unmanned lock transit flow

2 全自动过闸指挥调度系统

全自动过闸指挥调度系统是全自动化船闸的核心, 构建通航调度与安全一体化管控平台^[8], 负责统筹协调各子系统运行, 实现船舶过闸的智能决策与可靠控制。该系统包含船舶全自动过闸指挥、船舶收费调度、数字孪生船闸、应急调度指挥等子模块。

2.1 船舶全自动过闸指挥子模块

该模块是系统的“大脑”, 与船闸收费调度、广播指挥系统实时交互, 获知船舶过闸需求, 指挥船舶进闸、出闸, 并通过数字孪生仿真、视频实时展示船舶过闸过程; 与船闸控制系统联动, 下达充泄水、闸门启闭等操作指令。与船舶智能感知与安全监管系统实时交互, 采用大数据技术,

对实时生产数据(如闸门开关状态)及智能感知数据(如船舶位置)进行多维度分析, 包括阈值对比、趋势预测、相关性挖掘等; 对设备潜在故障(如油系统泄漏)、船舶过闸风险(如吃水超限)进行提前预判, 实现船舶过闸行为、船闸运转状态等各类异常情况分析判断及预警, 并与应急指挥系统对接, 实现异常情况应急处置。

2.2 船闸收费调度及船舶诚信管理子模块

船闸收费调度实现船舶基础数据管理、船舶报到、船闸收费、船闸调度排档等业务功能。在梯级船闸中, 决策目标为: 船舶平均待闸时间最少, 通过效率最高, 且上下游枢纽航道之间滞留船舶最少, 达到船舶综合通航效率、待闸成本和碳排放要求^[9]。基于电子地图、水文流速等测算流域内各船只的位置和到达下级船闸的预计时间, 根据下级船闸的待闸船只情况、闸次计划估算待闸船舶数量, 给出上级船闸的闸次过闸时间计划, 利用人工智能技术自动形成梯级船闸一体化调度方案^[10], 实现船舶高效通航, 见图 3。

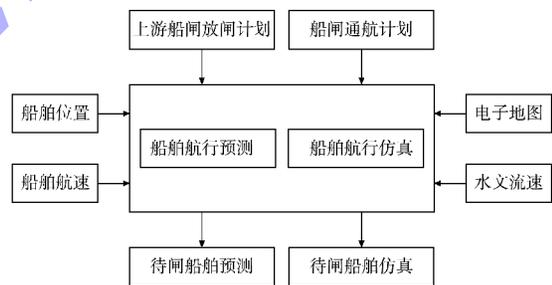


图 3 梯级船闸联合调度逻辑

Fig. 3 Cascaded lock coordinated scheduling logic

船舶诚信管理在统一、公开、透明的积分规则基础上, 采用技术手段对船舶的行为进行评价和约束, 防止船舶过闸时船户弄虚作假, 空登记、谎报吃水^[11]及过闸过程中抢档、损坏设施等各类不诚信行为, 为诚信守约的通航船舶提供更高效率的过闸方式, 帮助其提高货运效率, 实现船主和管理方的互赢互利。

2.3 数字孪生船闸子模块

该模块通过数字孪生技术构建数字孪生船闸, 对船闸建筑物、闸阀门、闸室、船舶等实体进行 1:1 三维建模, 融合各设备运行数据(闸门开度、水

位)、船舶动态数据(位置、航速),实现“物理实体-虚拟模型”的实时数据交互^[12],通过船舶过闸过程的模拟仿真与回溯,对船舶过闸及船闸健康状况进行预测、分析、评估与提前预警。

2.4 应急调度指挥子模块

根据无人船闸条件下应急响应机制研究情况,总结水路交通事故防控技术发展趋势^[13],对全自动船闸运行风险分析与应急管控策略研究,包括响应机制、应急流程、分级管控指挥^[14]。根据船闸枢纽风险类别与分级特点^[15],预设各类突发事件(如闸门故障、船舶碰撞)的处置流程与方案,形成标准化应急手册。发生应急事件时,系统自动触发应急预案,并通过数字孪生平台展示现场态势,辅助管理人员制定处置策略,下达操作指令,实现应急指挥与处置,保障人员、船舶、船闸及水域环境等安全和运行效率。

3 船舶智能感知及安全管控系统

船舶智能感知及安全监管系统是全自动化船闸的“神经末梢”,通过部署多类型感知设备,实现对船舶、设备、环境的全方位监测,为系统决策提供数据支撑。主要建设内容包括船舶定位与身份识别、船舶行为及闸室周边安全监测、船闸设备状态监测、通航环境监测、视频监视与广播指挥等系统。

3.1 船舶定位与身份识别

船舶位置获取:通过在船闸高点安装 AIS 及北斗基站^[16],覆盖上下游 5~10 km 范围,实时获取船舶位置、航速、航向等信息,有效地提升可视化与追踪能力,保障恶劣环境下稳定的信息交换^[17]。

船舶身份识别:在上下游引航道候检区设置高清摄像机,利用视频分析技术,融合船舶登记信息、AIS 数据多源融合船舶目标智能识别和验证,自动识别船舶号、外形特征,确认船舶身份,防止误调度^[18]。

3.2 船舶行为及闸室周边安全监测

船舶过闸时需检测船舶吃水,还需监测船舶

在闸室是否越界、系缆等行为状态是否正常,闸室通航时是否有人员驻留,以保证船舶、人员及船闸设施安全。

船舶吃水检测:在引航道候检区安装高清摄像头(基于视频分析技术)^[19]或安装水下声呐传感器(采用单波束测量原理)^[20],实时检测船舶吃水深度,判断是否符合过闸标准,避免船舶吃水过深而在通过船闸时搁浅。

船舶越界监测:在闸首布置激光仪及高清摄像机,并从控制系统获取闸门开关状态,通过激光扫描与视频图像识别技术监测船舶是否超警戒线或超高限,并联动视频系统抓拍违规船舶,方便后续远方管理人员实时监视与后续取证^[21],避免船闸在泄水过程中,船舶越界碰撞到闸室门槛,造成不安全事件。

系缆安全监测:通过应变传感器或视频识别检测浮式系船柱系缆状态,出现异常时及时停止充泄水,防止系船柱卡阻而导致船舶倾覆,造成严重的安全隐患^[22]。

闸室人员异常行为监测:可在闸室安装高清摄像机,通过视频识别等技术^[23]实现闸室内船舶倾覆、人员落水及闸门周边有行人等异常行为识别,发现异常立即报警并停止闸门操作,避免造成人员伤亡事故。

3.3 船闸设备状态监测

闸门状态检测:采用 PSD (position sensitive device,位置感测器)光电位移传感技术和视频监控技术,进行人字闸门门缝、错位检测及人字闸门合拢对中监测^[24],并将检测数据与控制系统对接,当门缝、错位过大或合拢不对中时报警闭锁控制。

闸室水位监测:船闸的水位监测及水位判断在船闸运行中极其重要^[25]。除了在上下首、闸室设置投入或雷达水位计外,还可设置摄像机,基于图像识别的无标尺水位测量技术,对水位进行标定,采用线性插值和坐标拟合的方法计算水位^[26],与控制系统采集的数据进行双重校核,确保闸门开关及船舶安全。

设备运行状态监测:构建闸门启闭振动状态

的声纹监测系统^[27],检测闸门、廊道门开关时的异常声响;安装开度仪监测闸门开度,增设限位开关实现超行程保护;部署油压、油温传感器监测启闭机油系统状态;有异常情况实时报警并闭锁控制操作,提醒运维人员及时处置。

3.4 通航环境监测

在船闸附近建设水文及气象观测站,实现船闸及上下游航道水文及气象要素监测(水位、流速、风速风向等);接入气象台信息,实时跟踪台风路径;为船舶运输提供强降雨、风速风向、能见度、结冰等气象预报信息,提升航道安全通航能力^[28]。

3.5 视频监视与广播指挥系统

针对全自动无人船闸应用需求详细设计摄像头布置^[29],在闸室、闸首、引航道等关键区域安装高清摄像机、全景摄像机,消除监控盲区。船舶通过船闸时需要跟踪记录船舶过闸全过程情况,可采用跨摄像头多目标跟踪、融合多摄像头的信息,将多摄像头之间的特征传递和轨迹关联^[30],实现船舶从入闸引航道-船闸-出闸引航道全过程可视化监控。构建覆盖调度中心、船闸、引航道等场景的网络化广播指挥系统,实现过闸信息的广播通知提醒。

4 船闸远程集中控制系统

船闸控制系统是自动化船闸的核心操作执行系统。在区域或梯级船闸中,需建设船闸远程集控系统,实现区域或梯级船闸的远程监视与控制,支撑船闸现场无人值班/少人值守^[31]。系统采用分层分布式结构,从上到下分为集控中心和船闸层。集中控制系统关系到设备的安全可靠操作执行,其安全可靠非常重要,系统设计建设时需确保系统安全性、稳定性、可靠性。主要技术措施包括:通过网络双通道、关键设备冗余、选用成熟应用软硬件产品等措施保障本质安全;通过合理配置控制权限、控制令二次确认等方式,保障控制命令的准确、可靠;通过报警记录,方便控制过程跟踪及追溯;针对可能出现的异常情

况,具有完善的实时处理措施;在闸阀门、启闭机、液压系统等关键部位设置状态监测传感器,全面、可靠感知设备状态。

5 应用案例

为了论证上述研究及设想,依托扬州港航区域船闸,进行了船闸远程集控、统一调度、视频联动等部分功能的试点应用。扬州市下辖宝应、运东、运西、盐邵、樊川、芒稻6座船闸,上接长江、下联京杭运河,目前船闸管控采用现地控制、单闸调度模式,主要依靠人工经验,效率低下,操作人员比例高^[32]。

1) 运行调控模式。为了解决区域船闸运行管理中的问题,提高运行管理效率,本次建设后将实现区域船闸群一体化控制与调度,现地船闸无人值班/少人值守,建设运调中心,负责整个区域船闸的统一运行调度及远程集中控制操作,现地船闸协助运调中心做好上下游船舶进出闸的秩序管理,并负责所辖范围内工程设施的管理及安全巡查。正常情况下由运调中心制定调度计划并实施远程集中控制操作,当运调中心无法远程控制或因其他需要时,由运调中心切换至船闸现地值守人员进行控制操作,该模式下各层级职责定位见表1。

表1 船闸集控模式层级及职责
Tab.1 Hierarchy and responsibilities of ship lock centralized control mode

层级	职责	备注
集控层	负责对下辖的6座船闸进行远程集中控制与统一调度,异常情况时将控制权切换到船闸现地侧	运调中心
船闸层	负责船闸的日常管理及安全巡查,确保设备处于正常安全状态;应急情况或检修状态下,完成船闸的控制操作、过闸指挥	宝应、运西、运东、盐邵、樊川、芒稻6座船闸

2) 系统总体架构。系统整体采用纵向分层、横向分区思路进行系统设计。纵向上分为扬州船闸运调中心集控层(设置在芒稻船闸)、船闸站控层及船闸现地层。横向上分为生产实时控制安全区、信息管理区(包括统一调度系统、视频监视系统、智能联动等),控制区与管理区之间设置正

向物理隔离装置，数据只能单向从控制区发送至管理区，确保船闸控制系统安全，系统横向分区结构见图 4。

3) 船闸集中控制系统。运调中心层和船闸层之间的控制网租用 2 条运营商专用链路构成双通道，并配置纵向加密装置，系统实现对整个扬州处下辖 6 座船闸的远程集中控制。正常运行时控制权限设置在运调中心，当运调中心异常退出或管理需要时，可把控制权限切换到船闸现地，船闸远程集控平台见图 5。

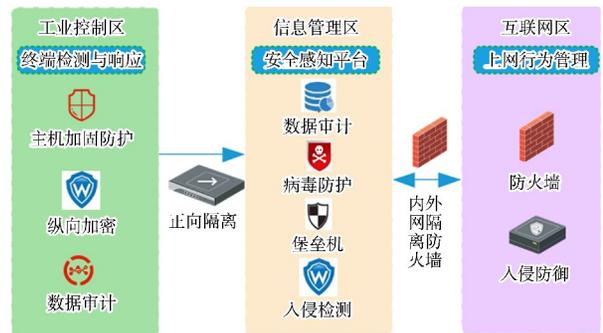


图 4 系统横向分区架构

Fig. 4 Horizontal partitioning architecture of the system



图 5 船闸远程集控平台

Fig. 5 Remote centralized control platform for ship locks

4) 统一调度系统。针对区域船闸群统一调度流程，结合全省联网收费系统、水上 ETC 便捷过闸等相关应用系统，开发了一套区域船闸群统一调度系统。功能包括六闸状态总览、智能调度服务、船闸运行服务、调度信息发布、闸费收费服务、综合管理 APP，实现区域 6 座船闸的统一收费及调度管理。

5) 智能联动。远程集中控制及调度模式下，运行值班人员监视任务重，为减轻运行人员工作强度、提高运行调度安全，将视频画面与调度系统融合应用，在调度系统中实现视频监视应用；将视频系统与控制系统联动，当进行开关闸门等操作或设备故障时自动推送相关视频画面，提高远程集中控制模式下船闸运行的安全和效率。

该系统于 2021 年 9 月在扬州航闸运行调度中

心正式启用，试运行接入宝应、芒稻两座船闸，当年 12 月扬州市所辖共 6 座船闸全部接入，全面实行远程集控与统一调度。新模式运行以来，提高了过闸效率，实现了船闸现地无人值班/少人值守，船闸操作人员减少 60% 以上^[33]，有效提升了下辖 6 座船闸的统一调度和船闸运行效能，实现减员增效，同时管理更加科学高效，服务更加智能便民，应用成效。

6 结语

1) 示范应用表明，远程集中控制与统一调度、视频联动等系统的建设实现了船闸船舶过闸及管理效率的提升，船闸现地的减员增效，通过远程视频监视及视频联动保障了船舶过闸安全，为全自动船闸的最终实现进行了有益实践探索。

2) 全自动船闸的建设是复杂、艰巨的系统工程,不能一蹴而就,需通过持续创新,攻克传感、智能识别、人工智能等关键技术环节,未来有望完全替代人工,实现船舶一次报到缴费,全程不上岸、船闸全自动无人操作过闸,且保障船舶、设施、人员安全。

3) 在构建之初必须做好顶层设计,充分重视全自动船闸所需基础条件,根据自身情况制定切实可行的分步实施计划,由点到面,由易到难,最终构建完整的全自动船闸。在范围选择上,先在通航量较小的单个船闸进行试点应用,在技术范围上,先试行调控一体化,由目前的船舶调度、船闸控制相互独立的模式升级为调度系统统一实现船闸调度与船闸控制;待应用成熟后向单个船闸无人调度、无人操作过渡,再向梯级或区域船闸群推广。对于船闸是否具备实现全自动船闸,需建立评价机制,对船闸设备现状及无人值班评价情况,从设备技术指标、应急技术条件及管理方式提出建设及改进措施^[34]。

4) 为保证船闸过闸安全可靠,在传感器、执行机构、测控设备选择方面,要选用质量可靠、性能稳定、应用成熟的产品,保证数据采集及时准确、执行稳定可靠;在安全感知方面,需采用图像识别分析等成熟技术,准确及时发现异常情况,方能真正实现自主运行,保证船舶、船员、船闸设施安全,过闸安全高效。

参考文献:

- [1] 熊先华, 宾进宽. 西江流域船闸群集中控制策略研究与实践[J]. 中国水运, 2024(23): 104-106.
XIONG X H, BIN J K. Research and practice on centralized control strategy of shiplock group in Xijiang River Basin [J]. China water transport, 2024(23): 104-106.
- [2] 刘军. 苏北运河智慧船闸的研究及应用[J]. 运输经理世界, 2020(9): 148-149.
LIU J. Research and application of smart lock inSubei canal[J]. Transport business China, 2020(9): 148-149.
- [3] 孙俊锋, 陆毅. 江苏智慧船闸建设实践与演进路径探析[J]. 现代交通技术, 2022, 19(1): 84-86, 90.
SUN J F, LU Y. Analysis on practice and evolution of smart ship lock in Jiangsu [J]. Modern transportation technology, 2022, 19(1): 84-86, 90.
- [4] 刘祖伟, 胡航, 熊锦玲, 等. 三峡船闸智能化运行方式的可行性研究[J]. 水运工程, 2021(3): 164-167.
LIU Z W, HU H, XIONG J L, et al. Feasibility study on intelligent and automatic operation mode of the Three Gorges ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 164-167.
- [5] 殷彤, 杨凯, 郑冰, 等. 智慧船闸设计与建设方案研究[J]. 中国水运, 2024(9): 115-118.
YIN T, YANG K, ZHENG B, et al. Research on design and construction scheme of smart ship lock [J]. China water transport, 2024(9): 115-118.
- [6] 唐行虎, 梁远霖. 动力总成黑灯工厂关键技术开发探索[J]. 汽车制造业, 2023(6): 10-12, 14-15.
TANG X H, LIANG Y L. Exploration on key technology development of powertrain black lamp factory [J]. Automobil industrie, 2023(6): 10-12, 14-15.
- [7] 储新隆, 严立笠, 田建亮, 等. 区域船闸群统一运行调度管理系统的构建[J]. 机电信息, 2022(21): 25-29.
CHU X L, YAN LL, TIAN J L, et al. Construction of unified operation scheduling management system for regional lock groups [J]. Mechanical and electrical information, 2022(21): 25-29.
- [8] 齐俊麟, 陈冬元, 吴澎, 等. 长江和西江大型船闸通航运行关键技术研究及展望[J]. 水运工程, 2024(1): 137-143.
QI J L, CHEN D Y, WU P, et al. Key technology research and outlook for large ship lock navigation inXijiang River and the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 137-143.
- [9] 高攀, 方志伟, 赵旭. “碳减排”视域下内河流域梯级枢纽联合通航调度优化[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(2): 308-316.
GAO P, FANG Z W, ZHAO X. Optimization of joint navigation scheduling of cascade hubs in inland river

- basin from perspective of carbon emission reduction[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(2): 308-316.
- [10] 王新田, 马慧卿, 万军, 等. 流域船闸群一体化调度系统设计与实践[J]. 水运工程, 2024(7): 210-216.
WANG X T, MA H Q, WAN J, et al. Design and practice of integrated scheduling system for ship lock group in river basin[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 210-216.
- [11] 董恺, 方泽兴. 基于过闸管理系统的船舶过闸申报诚信管理[J]. 中国水运, 2021(15): 46-49.
DONG K, FANG Z X. Credibility management of vessel lockage declaration based on lockage management system [J]. China water transport, 2021(15): 46-49.
- [12] 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.
- [13] 刘敬贤, 吴炜煌, 余红楚. 水路交通事故防控技术发展趋势与展望[J]. 中国水运, 2025(11): 1-5.
LIU J X, WU W H, YU H C. Development trends and prospects of prevention and control technologies for waterway transportation accidents [J]. China water transport, 2025(11): 1-5.
- [14] 向文平, 刘鹤, 王禾, 等. 无人水电站运行风险分析与应急管控策略研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(S1): 121-128.
XIANG W P, LIU H, WANG H, et al. Operation risk analysis and emergency control strategy for unmanned hydropower stations [J]. China safety science journal, 2021, 31(S1): 121-128.
- [15] 万军, 陈红生, 邱延林, 等. 江西信江航运船闸运行中信息化应急管理策略[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S2): 876-880.
WAN J, CHEN H S, QIU Y L, et al. Informatization emergency management strategy for the operation of Jiangxi Xinjiang Navigation Lock [J]. Water resources and hydropower engineering, 2024, 55(S2): 876-880.
- [16] 张俊杰, 孟俊. 北斗卫星导航系统在内河航运监管服务中的应用与展望[J]. 卫星应用, 2022(7): 57-61.
ZHANG J J, MENG J. Applications and prospects of BeiDou navigation satellite system in inland waterway regulation services [J]. Satellite application, 2022(7): 57-61.
- [17] 闫颖, 周钰凯, 王剑. 基于北斗的路港航智慧运维监测平台方案设计研究[J]. 全球定位系统, 2024, 49(5): 97-102.
YAN Y, ZHOU Y K, WANG J. The design research of intelligent operation and maintenance monitoring platform for road, port and navigation based on BeiDou system[J]. GNSS world of China, 2024, 49(5): 97-102.
- [18] 王永兴, 王涛, 韦扬. 多源融合的船舶身份智能识别与验证技术[J]. 中国航海, 2022, 45(4): 133-139.
WANG Y X, WANG T, WEI Y. Intelligent ship identity identification and verification with multisource fusion[J]. Navigation of China, 2022, 45(4): 133-139.
- [19] 冯维娜, 蒋梦婉. 基于机器视觉技术的船舶吃水深度动态检测[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(14): 158-161.
FENG W N, JIANG M W. Dynamic detection of ship draft depth based on machine vision technology [J]. Ship science and technology, 2024, 46(14): 158-161.
- [20] 杨卫忠, 宁文龙. 基于单波束测量原理的船体轮廓扫描吃水检测设施[J]. 中国水运(下半月), 2019(24): 77-78, 81.
YANG W Z, NING W L. Single-beam acoustic profiling facility for hull scanning and draft detection[J]. China water transport(the second half of the month), 2019(24): 77-78, 81.
- [21] 赵倩梅. 一种智能船舶超高与越线监测技术[J]. 内燃机与配件, 2024(5): 111-113.
ZHAO Q M. An intelligent ship superelevation and line crossing monitoring technology [J]. Internal combustion engine & parts, 2024(5): 111-113.
- [22] 杭震, 彭浩, 曹文卓, 等. 船闸浮式系船柱运行状态检测方法研究[J]. 机电工程技术, 2022, 51(12): 156-159, 193.
HANG Z, PENG H, CAO W Z, et al. Research on detection method for the operating status of floating

- bollards of ship locks [J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2022, 51(12): 156-159, 193.
- [23] 娄广森, 姜兴华, 张磊. 基于图像识别的电力作业现场人员行为智能管控系统设计[J]. 信息与电脑, 2025, 37(11): 124-126.
- LOU G S, JIANG X H, ZHANG L. Design of an intelligent management and control system for personnel behavior in power operation sites based on image recognition[J]. Information & computer, 2025, 37(11): 124-126.
- [24] 杨全林, 高术, 金俊. 基于PSD传感和视频图像技术的人字闸门合拢对中状态监测装置研制[J]. 中国水运, 2019(1): 21-23.
- YANG Q L, GAO S, JIN J. Development of a hybrid PSD-vision monitoring device for closure alignment detection in miter gates [J]. China water transport, 2019(1): 21-23.
- [25] 刘豪, 杨珏, 杨冰, 等. 一种基于多类型水位计的船闸水位监测方法及水位计健康自诊断方法[J]. 中国水运, 2025(11): 100-102.
- LIU H, YANG J, YANG B, et al. A hybrid water level monitoring and sensor self-diagnosis methodology for navigation locks using multi-sensor fusion [J]. China water transport, 2025(11): 100-102.
- [26] 孙英豪, 丁勇, 李登华, 等. 基于图像识别的无标尺水位测量技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(4): 91-97.
- SUN Y H, DING Y, LI D H, et al. Research on measuring technique of water level without scale based on image recognition[J]. Hydro-science and engineering, 2023(4): 91-97.
- [27] 李章维, 周浩, 郑文皓, 等. 基于声纹识别的变压器故障检测方法[J]. 浙江工业大学学报, 2025, 53(3): 293-298.
- LI Z W, ZHOU H, ZHENG W H, et al. Transformer fault detection method based on voiceprint recognition[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2025, 53(3): 293-298.
- [28] 孟英杰, 田刚, 明绍慧, 等. 长江航运智慧气象服务的实践[J]. 中国水运, 2023, 23(2): 10-12.
- MENG Y J, TIAN G, MING S H, et al. Practice of smart meteorological services for Yangtze River shipping [J]. China water transport, 2023, 23(2): 10-12.
- [29] 殷婷婷, 吴俊孟, 钱龙. 自动化集装箱码头视频监控系统设计[J]. 水运工程, 2022(10): 204-207.
- YIN TT, WU J M, QIAN L. Design of video monitoring system for automated container terminal [J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 204-207.
- [30] 张鹏, 雷为民, 赵新蕾, 等. 跨摄像头多目标跟踪方法综述[J]. 计算机学报, 2024, 47(2): 287-309.
- ZHANG P, LEI W M, ZHAO X L, et al. A survey on multi-target multi-camera tracking methods [J]. Chinese journal of computers, 2024, 47(2): 287-309.
- [31] 张继承. 龙滩水电站“无人值班”运行模式可行性探讨[J]. 水力发电, 2017, 43(4): 11-13, 68.
- ZHANG J C. Discussion on the feasibility of unattended operation of Longtan hydropower station [J]. Water power, 2017, 43(4): 11-13, 68.
- [32] 储新隆, 步晓俊, 陈华栋. 扬州市区域性船闸远程集中控制系统的设计与应用[J]. 信息与电脑, 2022, 34(15): 142-144.
- CHU X L, BU X J, CHEN H D. Design and application of remote centralized control system for Yangzhou regional ship lock [J]. Information & computer, 2022, 34(15): 142-144.
- [33] 陆风定. 扬州区域性船闸集中控制系统现状及提档升级的思考[J]. 珠江水运, 2024(18): 100-102.
- LU F D. Current Status and Considerations for Enhancement of the Regional Ship Lock Centralized Control System in Yangzhou [J]. Pearl River water transport, 2024(18): 100-102.
- [34] 蒋亮. 中小型水电站无人值班评价探讨[J]. 红水河, 2021, 40(5): 40-43.
- JIANG L. Discussion on unmanned evaluation of small and medium hydropower station [J]. Hongshui River, 2021, 40(5): 40-43.