基于智能架设平台的高桩码头上构快速安装技术*

冯先导[1,2]，何　聪[2]，林红星[2]，仲　军[2]，朱映滔[2]

（1. 中国海洋大学，山东 青岛 266100；
2. 中交第二航务工程局有限公司，长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室，
交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心，湖北 武汉 430040）

摘要：在高桩码头上部结构安装中，传统浮式吊装工艺存在对恶劣海况适应性差、设备智能化水平偏低等问题。依托江苏盐城港大丰港三期通用码头 3 号泊位工程，研发基于智能架设平台的高桩码头上构快速安装技术。应用结果表明：架设平台在开敞海域具有高抗浪性，具备快速安装预制横纵梁、靠船构件、预制面板，并辅助现浇桩帽等功能。提高了构件安装自动化水平，平面精度达±1 cm，安装效率平均提升 42%，作业人数减少 58%，实现了预制构件的全覆盖、流水式安装。该技术促进了高桩码头上部结构安装向工业化、智能化、绿色低碳进步，应用效果显著。

关键词：上构快速安装；智能架设平台；高桩码头；开敞海域；施工质量

中图分类号：U656.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0156-07

Rapid intelligent technology for superstructure of high-piled wharf based on intelligent installation platform

FENG Xiandao[1,2], HE Cong[2], LIN Hongxing[2], ZHONG Jun[2], ZHU Yingtao[2]

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China)

Abstract: In the installation of superstructure of high-piled wharf, the traditional floating lifting process has problems such as poor adaptability to harsh sea conditions and low level of equipment intelligence. Relying on the berth 3 project of Dafeng Port Phase III General Wharf in Yancheng Port, Jiangsu Province, the rapid installation technology for superstructure of high-piled wharf based on intelligent installation platform has been developed. The application results show that the installation platform has high wave resistance in open sea areas, and has the functions of quickly installing prefabricated longitudinal and transverse beams, berthing components, prefabricated panels, and assisting cast-in-place pile caps. The automation level of component installation is improved, with a plane accuracy of ±1 cm, the installation efficiency is improved by 42% on average, the number of operators is reduced by 58%, and the full-coverage and streaming installation of prefabricated components is realised. This technology promotes the superstructure installation of high-piled wharf to industrialisation, intelligence, green and low-carbon progress, and the application effect is remarkable.

Keywords: rapid installation of superstructure; intelligent installation platform; high-piled wharf; open sea area; construction quality

收稿日期：2024-07-27

***基金项目：**国家重点研发计划资助项目(2022YFB2603000)

作者简介：冯先导（1984—），男，硕士，正高级工程师，从事港航工程设计与施工技术研究工作。

水运工程

一带一路沿线港口建设常遭遇波浪周期长、极端波高大的挑战[1]，国内项目也面临着开敞海域强浪、强流、大潮差等复杂环境条件[2]。高桩码头结构是港口水工建筑物的主要形式之一，上部结构常设计为“现浇桩帽+预制横、纵梁+预制靠船构件+预制面板”[3]。建造模式以劳动力密集型为主，水上上部结构吊装主要借助于浮式起重船、自升式顶升平台、临时施工平台+履带吊、简易起重机等设备[4-7]。

传统浮式安装设备在恶劣波流条件下安装上部结构，存在施工窗口期受环境影响大、作业工效低、碳排放量大等弊端。自升式平台和临时施工平台可有效规避波浪的影响，但移位需抓波浪窗口、耗时长。简易起重机架设在桩基上部，受风浪影响小，但在过跨方式、智能化方面仍存在不足。因此，为提升上部结构安装工效和质量，提高安装设备对环境和码头结构类型的适应性，在现有工艺基础上[8]开展码头上部结构安装技术研究十分必要。

本文以江苏盐城大丰港三期通用码头 3 号泊位工程为背景，设计一种集自动化过跨、智能安装于一体的架设平台，提出上部结构快速安装工艺，解决恶劣风浪海况条件下宽幅高桩码头上部结构安装的问题，为类似环境下高桩码头施工提供参考。

1　工程概况

江苏盐城大丰港三期通用码头 3 号泊位工程，泊位码头长 290 m、总宽 53 m，见图 1。码头采用内、外两侧靠泊，外侧布为 1 个 10 万吨级通用泊位，内侧 1 个 3 万吨级通用泊位。码头主体采用高桩板梁式结构，上部结构为现浇桩帽节点、预应力横梁、预应力纵梁、叠合面板，预制构件共 1 046 件。码头基础为 ϕ1 200 钢管桩、ϕ1 200PHC 管桩，排架间距为 9 m，PHC 桩包括直桩和 10∶1 斜桩，钢管桩为 3.5∶1 斜桩，每排架 14~18 根桩。

工程地处江苏外海，具备风大、浪高、流急、大潮差 4 个特点，受台风侵扰[9]。常年风速影响大，最大风速可达 32 m/s，最大波高超过 3 m，持续时间长。所在海域为强海流区，涨落水流急，前沿垂线平均最大流速 2.0 m/s，最大潮差可达 6.0 m，船舶全年平均可作业时间不足 15 d/月。

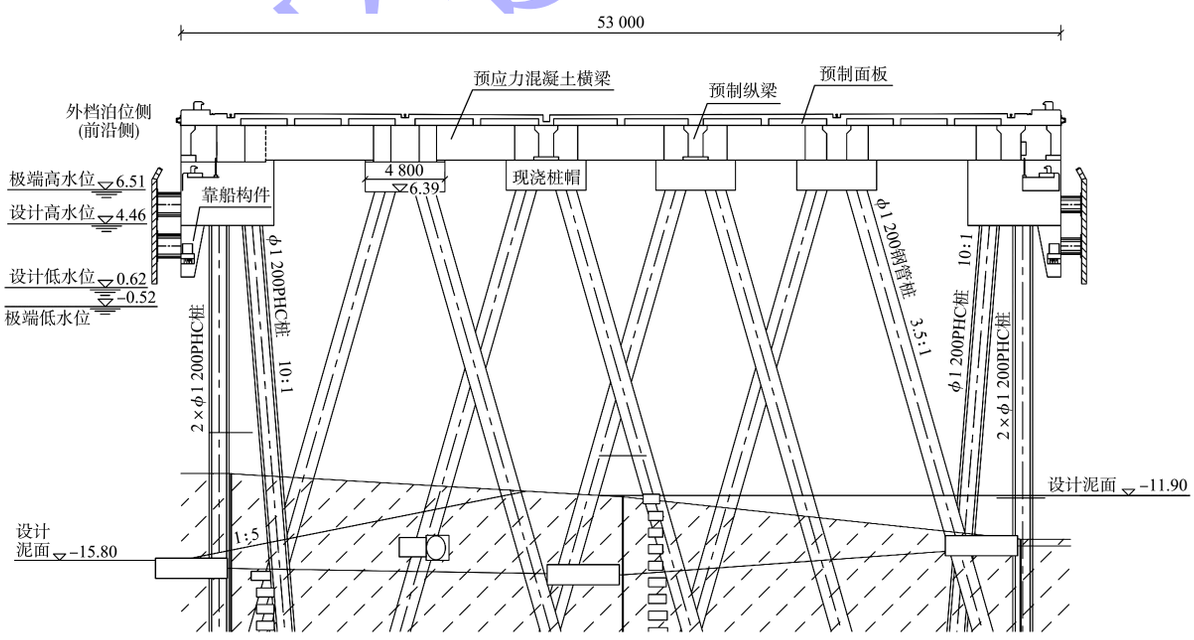

图 1　码头断面（高程：m；尺寸：mm）

Fig. 1　Pier section (elevation: m; dimension: mm)

2　智能架设平台及监控系统

2.1　智能架设平台

为避免水文环境对架设平台的影响，提出将架设平台支撑于桩帽上方，脱离水面，消减波浪对架设平台的直接作用。结合项目宽幅码头(53 m)的结构特点，对智能架设平台进行了设计，架设平台整体尺寸为 48 m×63.5 m×12.6 m，覆盖整个码头断面，主要技术参数见表 1。架设平台由下至上可分为自行走机构、主机结构、斜拉式双悬臂多功能起升系统，见图 2。

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters

起质量/t	适应排架跨度/m	可顶升高度/m	整机长度/m	整机宽度/m	整机总功率/kW	整机质量/t	起升高度/m	过跨速度/(m·min^{-1})	天车轨距/m	天车纵移速度/(m·min^{-1})	整机横移速度/(m·min^{-1})
80	26	0.6	48	63.5	60	340	18	0~9	3.2	0~9	0~9

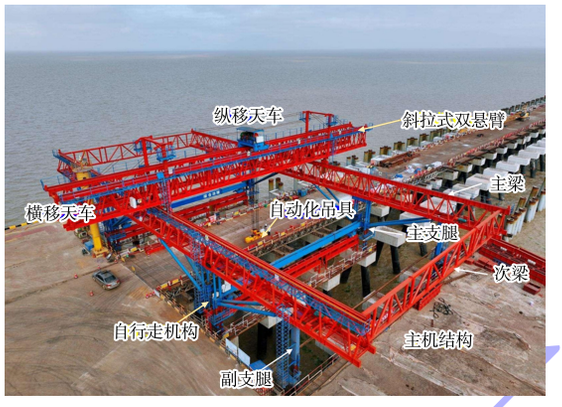

图 2　智能架设平台

Fig. 2　Intelligent erection platform

1）自行走机构：由 2 个主支撑、副支撑、导轨组成，移动过跨时收缩主副支腿，通过电机驱动在导轨上移动，实现快速过跨。支腿底部为“板凳式”结构，搁置于桩帽钢筋两侧，避开了钢筋干扰。

2）主机结构：由主梁和次梁组成，截面设计为透空的门式桁架，增加抗风能力，横移天车可在主梁顶部移动。

3）斜拉式双悬臂多功能起升系统：由横移天车、纵移天车、斜拉式结构、自动化吊具组成，其中主机结构的次梁从两端伸出，与横移天车形成双悬臂吊装系统，实现了海陆双侧取件，增加了构件运输方式的选择。在架设平台的吊具上设计双电机驱动三向陀螺仪、横调油缸、纵调油缸，实现预制构件的 360° 回转、构件调平、构件三维姿态调整功能。

2.2　智能监控系统

国内部分沿海码头项目也采用了与本架设平台相似的结构设计，如徐圩港区液体散货泊位区架管桥项目[10]，采用侧向喂梁自平衡履步式架桥机吊装预制纵横梁，加快了主梁装配效率。但在构件安装下放时，需人工牵引辅助，效率较低。为实现码头上部结构安装过程中的智能化，在架设平台上配备了智能监控系统辅助吊装，系统界面见图 3。系统运行流程为：信息感知→参数分析→智能决策与控制→精准执行。

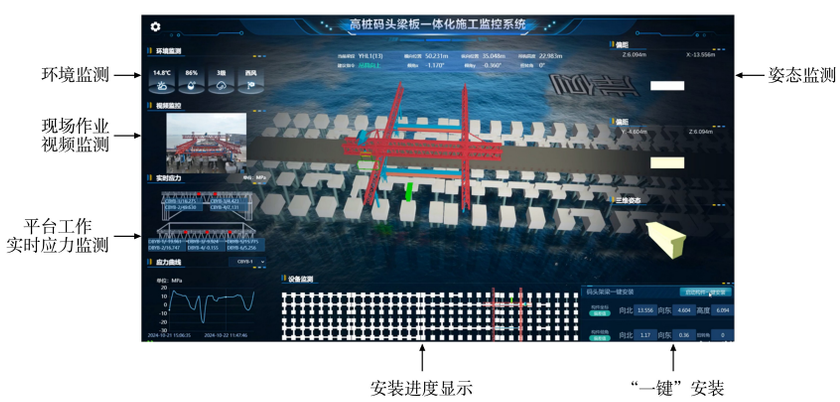

图 3　智能监控系统

Fig. 3　Intelligent monitoring system

水运工程

数据来源于状态感知，对环境、平台状态、构件姿态感知是系统运行的初始环节和关键环节[11]。

1）构建基于“BIM(Building Information Modeling，建筑信息模型)+GIS(Geographic Information System，地理信息系统)”的码头构件安装数字仿真场景，通过在主机结构上布设应变计、激光、风速仪、摄像头等高精度仪器，监测水文气象、平台作业实时应力、构件位置和姿态。确保使用期间架设平台内力和位移满足设计要求，构件安装过程的位置和姿态以及设备状态实时监测，从多参数全方位反映施工现场真实状态。

2）通过偏差预测模型、纠偏目标函数求解得到构件移动最优决策，对构件吊装轨迹的精确追踪，并在系统上输出构件姿态和位置控制参数，提出纠偏吊装的决策建议。

3）操作人员通过监控系统，实现安装全过程自动分析预警和设备运行智能决策。

3　施工方法

智能架设平台施工的总体工艺包含架设平台拼装、构件吊装、移动过跨，见图 4。智能架设平台在码头断面可以完成靠船构件、预制横纵梁等全覆盖快速安装，并能辅助现浇桩帽的钢筋、模板吊装作业。与传统浮式安装工艺对比[12-13]，作业区域转换快，作业面更为集中，工序衔接时间短。

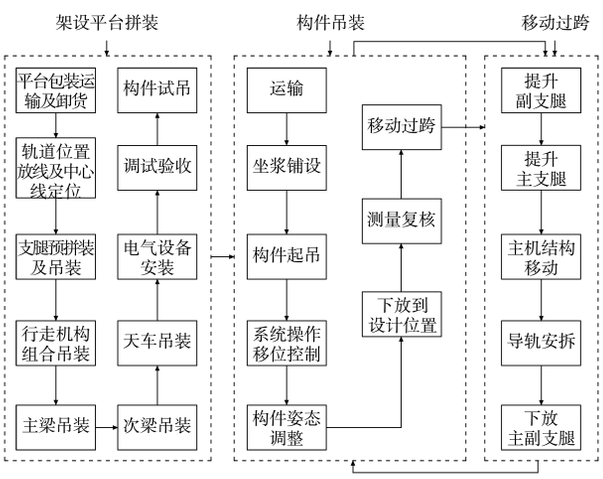

图 4　总体工艺

Fig. 4　Overall process

3.1　架设平台安装

当码头初始平台的桩帽完成现浇后，通过履带吊将智能架设平台各组件运输至现场并进行拼装，见图 5。

图 5　架设平台现场拼装

Fig. 5　Erection platform assembled on site

3.2　构件安装

靠船构件的安装以及上部桩帽的施工和混凝土强度是制约码头上部构件安装工效的关键环节，因此在同断面时，架设平台优先安装靠船构件。通过横移天车移动至智能架设平台的悬臂处，对海侧的靠船构件进行安装，见图 6。

图 6　靠船构件安装

Fig. 6　Installation of shipboard components

运梁车通过已建码头位置经现场施工便桥将预制构件运至码头智能架设平台吊具正下方，专人指挥起升机下降，由现场工人将预制构件与起吊工索具进行连接固定。钢丝绳、卸扣等工索具与吊环之间连接完成并检查无误后，现场专人指

水运工程

挥缓慢提升构件，使预制构件缓慢离开平板车，见图 7。

图 7　梁构件安装

Fig. 7　Installation of beam elements

通过智能监控系统，选择对应的安装构件编号，启动构件“一键安装”。系统根据构件的预设位置，计算最优吊装路径，通过天车的横移和纵移调整构件位置。自动化吊具将预制梁起吊一定高度后，沿主梁横移至设计位置正上方。根据智能监控系统计算出预制构件实际位姿与目标位姿的偏差，控制自动化吊具调整预制梁的位姿，预制梁精确对位后，吊具下放预制梁至指定位置，见图 8。

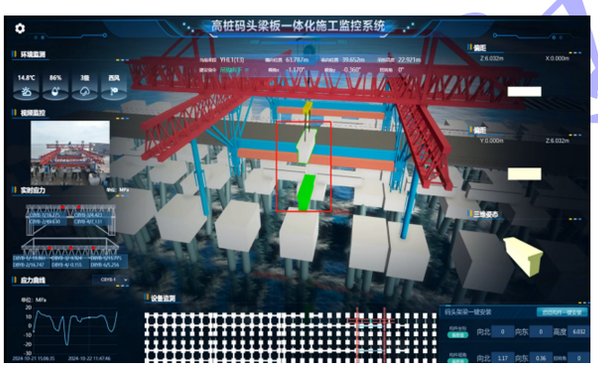

图 8　智能监控系统

Fig. 8　Intelligent monitoring system

智能架设平台依次重复完成上述步骤，即完成 1 跨的全部构件架设，现场预制梁安装效率可达 10 榀/d，安装平面精度达到 1 cm，轴线精度达到毫米级。

当靠船构件、预制横梁、纵梁等构件安装完成后，立即对节点进行现浇混凝土。智能架设平台安装由桩帽顶部支撑更换为轨道梁顶部支撑，进行面板的安装，见图 9。

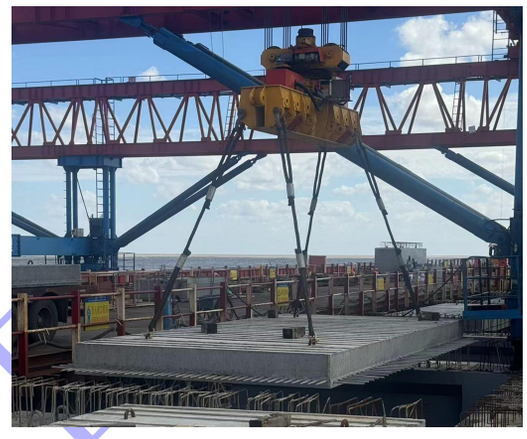

图 9　预制面板安装

Fig. 9　Prefabricated panel installation

在台风来临时，现场应采用防风拉索将装备进行锚固，将支腿等基础与桩帽进行连接，台风后经检查，智能架设平台各处均无受损。

4　架设平台技术经济参数对比

与传统浮式起重船相比，海上智能架设平台在设备性能和造价上优势显著，综合性价比超越了普通浮式起重船，主要表现在以下方面，具体技术指标见表 2。

表 2　技术经济参数对比

Tab. 2　Comparison of technical and economic parameters

项目	传统浮式起重船	智能架设平台
抗风浪能力	常用于作业波高 1 m 以下，遇台风时需在依靠拖轮移动至锚定区	具备高抗浪能力，作业波高可达到 2 m。遇台风时，与桩帽结构锚固，桁架结构，抗台风能力强
适用范围	适用于大型构件吊装，吊装范围与船舶吨位成正比	适用于桩帽式、下横梁式高桩码头小型构件吊装，吊装范围覆盖 2~3 个排架，可根据码头宽度设计，更利于工业化
关键配置	需配备运输船、拖轮等，吊装时作业人员数量约为 12 人	需运输平板车、电箱，吊装时作业人员数量为 5 人
费用	船舶调遣费用高，以使用时间按月计费	以构件安装量计费，不受工期影响
效率	可作业条件下，梁构件 7 榀/d	同等条件下，梁构件 10 榀/d，在恶劣海况下效率优势明显
精度	需人工牵引辅助，达到 1 cm	安装平面精度达到 1 cm，轴线精度达到毫米级
智能程度	较低	配备智能监控系统，具备感知、构件位置追踪及移动决策、可视化操作等功能
环保程度	采用柴油燃料作为主要动力，碳排放量高	采用电机驱动，用电量小，同工程量下，碳排放量约可减少 70%

1）对环境适应性高，具备高抗浪能力，历经“贝碧嘉”、“格美”等台风后，架设平台仍正常作业。

2）功能丰富，具备吊装各类型构件的能力，单个工作位置可覆盖两跨范围构件安装，作业面广，能大幅提高施工效率；构件运输方式可从海上、陆上供应，途径更多。

3）智能化程度高，配置的智能监控系统起到移动决策、定位作用，构件平面位置更准确。对工人熟练程度的依赖性降低，个体差异对施工精度不产生影响。

4）绿色低碳环保，采用电力驱动方式代替柴油燃料驱动，环保性更好[14]。

5　结语

1）智能架设平台较传统浮式起吊设备适应性强，在环境方面，可在大潮差、2 m 波高等环境下作业，作业窗口期长。在适用范围方面，架设平台对下横梁式、桩帽式以及宽平台类型的高桩码头上部结构安装均适用。

2）架设平台应用了高频电机，通过设计天车不同档位的移动速率，在构件运输、下放时自适应调整快慢，移动效率高。并且在吊装构件过程中无需人工辅助，路径最短，可将构件的吊装效率提升 42%以上。

3）监控系统集成高精度数据感知体系以及预测控制算法，实现了快速、平稳预制构件位姿纠偏，构件平面安装精度自动化快速达到 1 cm，轴线误差控制在毫米级。

4）智能架设平台未来可在两个方面持续优化，一是优化吊具与构件连接方式，实现自动化连接、无人卸扣功能；二是实现模块化设计，提高整机宽度和长度尺寸的适应性，加大架设平台的周转率。

参考文献：

[1] 滕爱国, 熊韬, 彭晟, 等. 新扩建以色列阿什杜德港(ASHDOD)施工关键技术[J]. 水运工程, 2018(3): 213-220.
TENG A G, XIONG T, PENG S, et al. Key technologies applied in the expanded construction of ASHDOD Port Project [J]. Port & waterway engineering, 2018(3): 213-220.

[2] 薛天寒, 董敏, 沈忱, 等. 开敞岛礁海域环境大型 LNG 码头规划布置关键问题[J]. 水运工程, 2023(7): 42-47.
XUE T H, DONG M, SHEN C, et al. Key issues in planning and layout of large liquefied natural gas terminals in open island and reef waters [J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 42-47.

[3] 徐旭东, 杨岩松. 高桩梁板码头结构设计分析[J]. 珠江水运, 2023(6): 107-109.
XU X D, YANG Y S. Structural design analysis of high pile girder wharf [J]. Pearl River water transport, 2023(6): 107-109.

[4] 张智博, 卢浩, 苑桂博, 等. 海上风机稳桩施工平台吊装过程中的多船水动力干扰特性与动力响应分析[J]. 海洋工程, 2022, 40(3): 40-51.
ZHANG Z B, LU H, YUAN G B, et al. Analysis of the hydrodynamic interaction characteristics and dynamic responses of multi vessels during lifting of the pile stabilizing construction platform of offshore wind turbine[J]. The ocean engineering, 2022, 40(3): 40-51.

[5] 崔文涛, 逯鹏, 郭小亮, 等. 自升式平台滚装安装海上升压站组块技术[J]. 船舶工程, 2023, 45(S1): 25-31.
CUI W T, LU P, GUO X L, et al. Technology for Ro-Ro installation of offshore substation topside by jack-up platform [J]. Ship engineering, 2023, 45(S1): 25-31.

[6] OSPINA C E, SIRCAR J, KUMAR V K. Container wharf with an innovative precast deck in a high seismicity area[C]// Ports 2016. American Society of Civil Engineers, Reston: ASCE, 2016: 607-616.

[7] 王兴坤, 孙国峰, 张轩维. 高桩码头施工新工艺应用[J]. 水运工程, 2019(S1): 9-11, 110.
WANG X K, SUN G F, ZHANG X W. Application of new construction technology for high pile wharf [J]. Port & waterway engineering, 2019(S1): 9-11, 110.

[8] 施少治, 何聪, 林红星, 等. 高桩码头梁板架设机研发及应用[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(7): 100-104.
SHI S Z, HE C, LIN H X, et al. Development and application of beam and slab erector for piled wharfs[J]. China harbour engineering, 2023, 43(7): 100-104.

[9] 宫英龙, 张亮亮, 范飞. 江苏海域波浪分布特征研究[J]. 水运工程, 2014(8): 33-40.
GONG Y L, ZHANG L L, FAN F. On distribution

水运工程

characteristics of wave climate in Jiangsu sea[J]. Port & waterway engineering, 2014(8): 33-40.

[10] 赵冬冬. 高桩码头预制梁架设新工艺研究与应用[J]. 中国水运, 2024(3): 115-117.
ZHAO D D. Research and application of new technology for prefabricated beam erection of high pile wharf [J]. China water transport, 2024(3): 115-117.

[11] 耿卫宁. 感知技术在自动化集装箱码头的应用[J]. 水运工程, 2020(10): 155-159.
GENG W N. Application of sensing technology in automatic container terminal[J]. Port & waterway engineering, 2020(10): 155-159.

[12] 刘鹏, 周厚亚, 刘晓曦. 装配式高桩码头插槽式横梁安装工艺[J]. 水运工程, 2023(5): 147-152.
LIU P, ZHOU H Y, LIU X X. Installation process for slot-type beams of prefabricated high-piled wharf [J]. Port & waterway engineering, 2023(5): 147-152.

[13] 李永锋. 大型沉箱起重船大吊力助浮出运技术[J]. 水运工程, 2020(7): 223-226.
LI Y F. Launching and transportation technology of large caisson assisted by crane ship with large lifting force[J]. Port & waterway engineering, 2020(7): 223-226.

[14] 梁军波, 陈睿. 港口碳排放核算体系研究及应用[J]. 水运工程, 2024(7): 51-55.
LIANG J B, CHEN R. Research and application of port carbon emission accounting system[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 51-55.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 110 页)

[9] 重庆交通大学. 长江上游涪陵至丰都河段航道整治工程数学模型研究[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
Chongqing Jiaotong University. Research on the mathematical model of the waterway regulation project in the upper reaches of the Yangtze River from Fuling to Fengdu[R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.

[10] 张鹏, 胡江. 三峡库区急流滩代表船舶自航上滩水力指标研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(4): 877-880.
ZHANG P, HU J. Study on the navigable hydraulic parameter of 3000-ton ships at the rapids of Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(natural science), 2012, 31(4): 877-880.

[11] 许光祥, 曾锋. 急滩消滩水力指标的合理表达式[J]. 水运工程, 2010(11): 103-106.
XU G X, ZENG F. Reasonable expression of hydraulic parameters of rapids abating [J]. Port & waterway engineering, 2010(11): 103-106.

[12] 郭琦, 庹莜葭, 张文江. 长江上游观音背滩航道整治方案[J]. 水运工程, 2024(3): 126-132.
GUO Q, TUO Y J, ZHANG W J. Regulation schemes of Guanyinbei beach in upper reaches of the Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2024 (3): 126-132.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 115 页)

[8] 渠庚, 许辉, 唐文坚, 等. 三峡水库运用后荆江河道断面形态变化及对航道条件的影响[J]. 水运工程, 2011(12): 117-122.
QU G, XU H, TANG W J, et al. Morphology variation of different sections in Jingjiang river and its impact on Jingjiang channel condition after TGR operation[J]. Port & waterway engineering, 2011(12): 117-122.

[9] 江凌, 李义天, 孙昭华, 等. 三峡工程蓄水后荆江沙质河段河床演变及对航道的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1): 1-10.
JIANG L, LI Y T, SUN Z H, et al. Channel evolution of Jingjiang Reach and its influences on waterway after impoundment of the Three Gorges project[J]. Journal of basic science and engineering, 2010, 18 (1): 1-10.

[10] 张晓红, 汪红英. 三峡工程建成后上荆江河道演变趋势及治理[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 9-10, 29, 94.
ZHANG X H, WANG H Y. Evolution trend and treatment of upper Jingjiang River after the completion of the Three Gorges project [J]. Yangtze River, 2009, 40 (22): 9-10, 29, 94.

(本文编辑 王璁)

水运工程