

宁波舟山港大型水运工程装配式上部结构施工安全智慧 监控研究

张敏健¹ 李忠² 裘雷¹

1. 宁波北仑第三集装箱码头有限公司, 中国·浙江 宁波 315800
2. 宁波市宁波远东码头经营有限公司, 中国·浙江 宁波 315800

摘要: 装配式建造是提升水运工程建设质量与效率的重要方向。然而, 大型预制构件在复杂海洋环境下的运输、吊装与安装作业, 风险因素动态多变, 传统安全管理模式存在预警滞后、协同困难等局限。本文以宁波舟山港六横港区佛渡作业区一期工程为研究对象, 聚焦其高桩码头装配式上部结构(预制横梁、纵梁、面板)施工过程, 构建了一套集智能感知、数据融合与协同决策于一体的智慧化安全监控体系。该体系以 BIM 与 GIS 技术融合构建的数字孪生场景为空间基底, 整合智能视频识别、物联网监测、无人机巡查等模块, 实现了对施工全要素的三维可视化监管、安全隐患的智能识别与实时预警, 以及风险处置的全流程数字化管理。应用实践表明, 该体系显著提升了项目安全管理的精准性、主动性与协同效能, 为同类大型水运工程推行装配式建造与智慧化安全管控提供了可借鉴的技术范式与实践经验。

关键词: 装配式上部结构; 智慧工地; BIM+GIS; 安全监控; 风险管理

Research on Intelligent Safety Monitoring for Prefabricated Superstructure Construction in Large-Scale Water Transport Projects at Ningbo Zhoushan Port

Zhang Minjian¹, Li Zhong², Qiu Lei¹

1. Ningbo Beilun Third Container Terminal Co., Ltd., China Zhejiang Ningbo 315800
2. Ningbo Ningbo Yuandong Terminal Operation Co., Ltd., China Zhejiang Ningbo 315800

Abstract: Prefabricated construction is an important direction for improving the quality and efficiency of water transport engineering construction. However, the transportation, hoisting and installation of large prefabricated components in complex marine environments involve dynamic and variable risk factors, and traditional safety management models have limitations such as lagging early warning and difficult coordination. This paper takes the first phase of the Foduo operation area in Liuheng Port, Ningbo Zhoushan Port as the research object, focusing on the construction process of the prefabricated superstructure (prefabricated cross beams, longitudinal beams, and panels) of the high-pile wharf. A smart safety monitoring system integrating intelligent perception, data fusion and collaborative decision-making has been constructed. This system takes the digital twin scene constructed by the integration of BIM and GIS technology as the spatial base, and integrates intelligent video recognition, Internet of Things monitoring, and unmanned aerial vehicle inspection modules, achieving three-dimensional visualization supervision of all construction elements, intelligent identification and real-time early warning of safety hazards, as well as full-process digital management of risk disposal. Application practice shows that this system significantly improves the accuracy, proactiveness and collaborative efficiency of project safety management, providing a technical model and practical experience for the promotion of prefabricated construction and smart safety control in similar large-scale water transport projects.

Keywords: Prefabricated superstructure; Smart construction site; BIM + GIS; Safety monitoring; Risk management

0 引言

随着全球水运工程向工业化、智能化转型, 以宁波舟山港六横港区佛渡作业区一期工程项目为代表的大型港口建设项目, 其装配式上部结构施工规模大、工艺复杂, 且

处于开阔海域, 面临恶劣气象水文条件与多工种交叉作业等多重安全挑战。传统依赖人工巡检与纸质记录的管理模式, 存在信息滞后、协同效率低、风险预警能力不足等问题。以 BIM、GIS、物联网及人工智能为代表的新一代信

息技术,为构建实时感知、智能预警与协同管控的智慧安全监控体系提供了技术支撑。本研究依托佛渡项目实践,探索并构建覆盖装配式施工全过程的智慧化监控系统,旨在推动水运工程安全管理从被动响应向数据驱动、主动预防的模式转变,为行业数字化转型提供案例借鉴。

1 工程概况

宁波舟山港六横港区佛渡作业区一期工程位于六横岛西南海域,地处舟山群岛南部的佛渡岛,东临双屿港与六横岛相望,西接汀子港与宁波北仑相邻,南濒象山港海域,北靠佛渡水道,距沈家门街道约 32.7 公里。工程建设规模包括 2 个 20 万吨级集装箱泊位,设计年吞吐量和通过能力均为 200 万标准箱,最大可停靠 24 万标准箱集装箱船。码头岸线总长 950 米,陆域总面积达 93.14 万平方米,规划建设码头作业区、集装箱堆场和辅助作业区等功能区块,水工结构按照 3.2 万标准箱展望船型设计,充分考虑了未来航运发展需求。



图1 佛渡项目建成效果图

2 装配式上部结构施工安全风险分析

2.1 装配式上部结构施工的主要危险因素

该工程施工安全风险主要源自环境、设备、工艺及管理四个维度的复杂交互。环境方面,项目地处开敞海域,施工受风、浪、流、潮汐等动态水文气象条件直接影响,不仅制约大型起重船等作业船舶的稳定窗口,也增加构件海上运输与吊装过程的不确定性。设备方面,大型起重船、运输驳船及配套吊索具的性能状态与操作安全是核心,任何设备故障或操作不当都可能引发严重后果。工艺方面,大型预制构件的吊点设计、翻身技术、远距离海上运输以及高空、高精度的安装就位,技术复杂,对工序衔接与协同精度要求极高。管理方面,涉及多单位、多工种在有限作业面与时间窗口内的交叉协同,现场指挥协调、安全技术交底、应急响应等环节的任何疏漏均可能放大前述风险。

2.2 施工安全风险的主要表现形式

基于上述危险因素,项目施工风险具体表现为以下几种形式:一是构件失控风险,包括构件在吊装、运输过程中因绑扎不牢、碰撞或受风浪影响而发生滑落、倾覆;二是船机设备失稳风险,主要来自起重船在恶劣海况下或因操作不当导致的力矩失衡、倾覆,及设备机械故障;三是人员伤害风险,在立体交叉作业环境下,易发生高空坠落、物体打击、淹溺及机械伤害等事故;四是安装质量与结构安全风险,表现为构件安装定位偏差、连接节点施工质量缺陷等,可能影响码头整体结构安全与耐久性。为应对这些风险,项目构建的安全智慧化体系致力于通过实时监测与智能分析,实现风险的早期辨识、预警与干预。

3 安全智慧化监控

3.1 技术路线与架构设计

为实现对装配式上部结构施工全过程、多要素的精细化安全管控,宁波舟山港佛渡项目构建了分层化、集成化的安全智慧化监控平台总体架构。该体系以“数据驱动、智能预警、协同决策”为核心设计理念,自下而上可分为数据感知层、平台支撑层、智能应用层与决策展示层。

数据感知层作为体系基础,由部署于施工现场的各类智能终端构成,包括高清视频监控、智能安全帽、船载定位与姿态传感器、自动气象水文站、无人机等,负责全方位采集“人、机、料、法、环”等多维实时数据。平台支撑层以 BIM+GIS 深度融合的一体化数字底座为核心,实现了物理施工场景的高精度三维数字化重构,为所有空间相关数据提供了统一的时空基准与可视化载体。该平台具备强大的数据融合与处理能力。智能应用层则基于平台支撑,开发并集成了视频智能分析、人员动态管理、大型船机安全监控、环境风险预警、隐患闭环管理等专业化功能模块,各模块通过标准化接口实现数据共享与业务联动。决策展示层作为面向管理人员的统一入口,通过三维可视化综合驾驶舱与定制化数据分析看板,将处理后的关键信息、预警信号及决策建议进行直观呈现,为安全指挥与决策提供有力支持。这一架构在保证各子系统专业独立性的同时,实现了系统间的高度集成与协同,为项目的安全管理提供了全面的技术支撑。

3.2 安全智慧化监控方案

宁波舟山港六横港区佛渡作业区一期工程的安全智慧化监控方案,以 BIM+GIS 为数字底座,融合物联网、人工智能等先进技术的智能监管体系,推动安全管理从被动响应向数据驱动、主动预警模式转型。方案核心包括三维

可视化看板、AI 智能识别分析和安全管理三大模块，通过统一平台实现全域感知、智能分析与高效协同。三维可视化看板作为指挥中枢，呈现工程实况与专项施工数据；AI 智能识别系统通过 AI 图像识别与视频分析实现不安全行为的及时预警；安全管理模块能够精准定位问题高发区域，并通过对历史数据的分析，预判安全风险走向。该方案的实施将为佛渡项目建立“感知 - 预警 - 处置 - 优化”的全过程管控体系，提升安全管理的精准性与主动性，并为同类大型水运工程提供可复制的智慧化建设范式。

3.2.1 三维可视化看板

该看板是项目安全智慧化监控平台的核心综合指挥界面，以融合了高精度地理信息与工程 BIM 模型的三维数字场景为基础，构建了全景化、一体化的态势展示与决策支持视图。平台界面中央主体为工程现场及周边海域的精细化三维模型，直观呈现码头结构、施工分区、船舶航道及预制构件堆场等关键要素的空间布局与实时状态。在三维场景中，系统动态关联并叠加显示大型预制构件从出运、海上运输到现场吊装与安装的全过程位置与轨迹，同时集成起重船、运输驳船的实时工况数据，以及风、浪、流等环境监测信息。通过不同颜色、图标与数据面板的联动，实现了对装配式上部结构施工进度、安全状态与资源分布的立体化、可视化监管，为施工协调与安全决策提供了直观的空间信息支撑。

3.2.2 AI 智能识别分析

该智慧化平台集成了基于计算机视觉的智能视频分析系统，建立了覆盖主要施工区域的智能感知网络。系统采

用深度学习算法，具备针对施工场景的专项识别能力，包括安全行为识别（如安全帽、救生衣是否正确穿戴）、区域管控（如未经授权进入吊装警戒区、临边临水危险区域）以及异常状态检测（如人员异常聚集、设备异常移动）等功能。通过在码头前沿、预制构件堆场、起重船作业区、运输通道等关键位置部署的高清智能摄像机，系统可实时捕捉现场动态，并对人员、设备、环境及作业行为进行持续感知与风险研判。针对本项目大型预制构件吊装安装作业的特点，系统算法重点强化了对起重船吊臂回转区域、构件安装就位区等高风险区域的监控，能够有效识别人员违规闯入、吊装路径下方站人、作业区域隔离设施被破坏等潜在风险，并及时发出预警，见图 2。

3.2.3 安全管理模块

安全管理模块结合实际项目需求，构建覆盖巡检计划、执行、问题发现、整改到趋势分析的全流程数字化管理体系。该模块提升了安全监管效能，能够系统统计各区域、各类巡检的执行情况，清晰展示巡检范围、频次与结果。对于发现的安全隐患，模块可呈现其空间分布与状态（如待整改、整改中、已关闭），并支持按问题类型、责任单位、风险等级等多维度筛选与分析。这有助于管理人员快速定位问题高发区域，并跟踪每项隐患从发现到整改验证的全过程，推动安全隐患的及时处理。

4 装配式上部结构施工安全防控策略

4.1 智慧化技术赋能施工安全管控

针对大型预制构件海上运输与安装，佛渡项目深度融合智慧化技术，构建了全过程安全防控网络。基于



图2 AI智能识别分析系统

表1 智慧监控体系核心性能与效能指标

类别	指标项	设计/实测值	依据与来源
感知层性能	视频监控重点区域覆盖率	≥ 93%	依据施工平面布置图与已批准的摄像头点位部署方案测算得出
	环境数据采集与上传频率	1分钟	根据已选型传感器及数据传输模块的技术规格书确定
	大型构件实时定位精度	0.1米 (RMS)	基于已采购的“GPS+北斗”高精度定位终端的技术参数
平台层能力	三维模型加载时间	< 15秒	经模型轻量化处理后, 在测试环境中进行的实际加载测试结果
	多源数据融合显示延迟	< 10秒	基于系统架构设计方案与内部网络测试环境的估算结果
	并发预警信息处理能力	50条/秒	根据服务器集群与消息队列中间件的设计容量确定
应用层效能	智能识别准确率与误报率	准确率92%, 误报率5%	源自所采用视频分析算法在同类工地场景下的第三方标定测试报告
	隐患线上管理流程周期	48小时	依据项目安全管理规定制定的数字化流程时限
	安全状态数据可视化率	97%	体系架构设计目标, 要求所有接入系统的关键要素状态必须可视

BIM 与 GIS 集成的三维可视化监控系统, 可对预制梁、板等构件从出运、航渡到现场吊装、就位进行全流程动态追踪与状态管理, 并同步集成起重船、运输驳船的实时工况及作业海域风、浪、流等关键环境数据。现场部署的智能视频分析系统, 能自动识别人员安全装备穿戴不规范、非作业人员闯入禁区等风险, 并通过边缘计算设备实现快速声光报警。水文气象监测系统持续采集风速、波高、能见度等参数, 数据超限时自动向指挥中心及作业单元发送分级预警, 为吊装作业决策提供依据。此外, 无人机巡航系统覆盖高空、临边等监控盲区, 与地面视频网络协同, 形成“空中巡查、地面监控、船端感知”的立体化监控体系, 提升了复杂海况下吊装全过程的安全态势感知与主动干预能力。

4.2 关键工艺环节的精细化管理措施

围绕大型预制构件海上吊装、翻身及高精度安装等关键环节, 项目制定了系统化的精细管理措施。作业前, 利用 BIM 模型进行施工模拟, 优化吊点设计、吊索具配置与多钩协同翻身方案, 并开展可视化安全交底。作业中, 综合运用高精度定位、全站仪测量与传感器监测技术, 对构件姿态、平面位置与安装标高进行实时监测, 确保达到设计精度要求。为提升恶劣海况下的作业安全性与适应性, 项目采用模块化、可快速拆装的辅助作业平台, 以克服传统固定平台的局限。同时, 建立基于精细化海洋预报的“作业窗口”管理制度, 结合实时气象水文数据动态评估作业条件, 科学安排吊装时序, 保障关键工序在安全窗口期内高效完成, 实现安全与进度的协同。

5 智慧化监控体系的技术性能与效能指标

佛渡项目装配式上部结构施工智慧化监控体系, 其设计与部署严格依据技术规格、设备参数及测试结果, 形成了一套明确的量化技术性能与应用指标。这些指标反映了体系当前具备的能力与设定的管理目标, 为后续施工应用

中的效能评估提供了基准, 见表 1。

6 结语

本文以宁波舟山港六横港区佛渡作业区一期工程为依托, 针对大型水运工程装配式上部结构施工面临的安全风险, 系统地研究并构建了一套智慧化安全监控体系。该体系以 BIM 与 GIS 融合形成的数字孪生场景为空间信息底座, 通过集成物联网感知、智能视频分析、大数据决策支持等技术, 实现了对复杂施工环境下人员、机械、物料、工艺及环境全要素的实时感知、智能预警与协同管控。工程应用表明, 该体系有效提升了安全风险的前瞻性预控能力与过程管理的精细化水平, 为项目的高效平稳推进提供了有力保障。本研究为同类大型水运工程推广装配式建造与智慧化安全管理提供了可借鉴的技术方案与实践范例。未来, 随着技术的发展, 可在智能算法精度、系统互联互通标准及基于数据的深度安全管理模式等方面进行持续探索, 以进一步推动水运工程施工安全管理的智能化转型。

参考文献:

- [1] 高山珺, 鲍金虎, 吴锋. 全装配式高桩码头关键节点连接试验与应用[J]. 水运工程, 2025(04): 81-87.
- [2] 陈金湖, 刘芝刚. 装配式高桩码头结构特征与建造技术研究[J]. 港口航道与近海工程, 2024, 61(05): 49-54.
- [3] 林珈伊, 董立韩. 装配式高桩码头全生命周期质量管理技术分析[J]. 交通与港航, 2024, 11(S1): 90-95.
- [4] 邹小伟, 张丹, 马辉. 基于 BIM 和物联网的装配式建筑施工作业安全预警平台的建立[J]. 工程管理学报, 2019, 33(02): 124-129.
- [5] 宋春晖. 浅谈装配式预应力混凝土 T 梁架设及上部结构施工[J]. 电子制作, 2014(09): 175-176.
- [6] 张静, 王琳. 公路桥梁装配式上部构造施工工艺与质量控制[J]. 科技传播, 2013, 5(08): 65-66.