

预制梁场起重作业安全风险识别与防控技术体系

王志影

(中交一航局城市交通工程有限公司)

摘要:为提升预制梁场起重作业安全管控水平,助力智慧梁场安全高效运营,以清花高速 TJ6 标智慧梁场为依托,在明确工程核心任务与作业基础条件的前提下,从设备、环境、人员、管理 4 个维度构建全流程风险识别框架,并针对性提出融合物联网、AI 识别等技术的智能化防控技术体系。该防控技术体系在清花高速 TJ6 标智慧梁场 4 777 榀箱梁起重作业全流程应用中成效显著,实现起重作业零事故,设备故障率明显降低,隐患整改率达 100%,有效降低预制梁场起重作业安全风险,为类似预制梁场起重作业安全管控提供可靠技术支撑。

关键词:预制梁场;起重作业;安全风险识别;防控技术;智慧梁场

0 引言

随着桥梁工程工业化建造水平提升,预制梁场起重作业规模持续扩大,作业强度与复杂度同步增加。起重作业涵盖桥式起重机、龙门吊等大型设备,涉及箱梁吊装、钢筋骨架转运、模板拆装等关键工序,作业环境交叉、协同要求高,易因设备故障、操作不当、环境干扰等问题引发安全事故。

当前行业存在风险识别不系统、防控措施针对性不足、管理与技术融合不深入等问题,本文以清花高速 TJ6 标智慧梁场为依托,开展起重作业安全风险识别与防控技术研究,引入物联网、AI 识别等技术优化安全管控,对提升预制梁场安全管理水平、推动智能建造安全发展具有重要现实意义。

1 工程概况

1.1 项目概述

清花高速 TJ6 标智慧梁场是清花高速公路建设的核心预制构件生产基地,主要承担项目 4 777 榀箱梁的预制与起重作业任务,涵盖 352 种梁型,梁场预制区占地约 18 490 m²,配备 250 个存梁台座,混凝土总用量约 15 万 m³,需完成 4 777 榀箱梁的张拉压浆作业。为保障起重作业安全高效推进,该梁场全面应用智能化防控技术,构建了“智能监测-自动预警-快速处置-全程追溯”的安全管控体系,覆盖钢筋吊装、箱梁转运、外运装车全流程,有效衔接混凝土浇筑、张拉压浆等关联工序^[1]。

1.2 智能化作业技术特征

智慧梁场起重作业融合物联网、无线遥控、AI 识别等技术,形成智能化作业模式。龙门吊采用无线遥控操作,配备感应防撞系统,支持柔性启动、到位停止功能。通过 RFID 技术实时采集设备位置信息,结合中央控制系统实现运行状态监控。借助 AI 视频识别技术,实时监测作业人员违规行为与设备异常状态,及时触发预警。例如,梁场龙门吊配备红外对射传感器,可识别周边设备与障碍物,避免碰撞事故;起重作业数据与 MES 系统联动,实现每榀箱梁吊装信息全流程追溯。

1.3 作业设备与应用场景

预制梁场起重设备以桥式起重机与龙门吊为主,其中龙门吊为核心作业设备,承担 4 777 榀箱梁的场内转运及外运吊装任务。作业场景全面覆盖梁场核心生产区域,包括钢筋绑扎区(负责钢筋骨架加工与吊装)、混凝土浇筑区(配合混凝土浇筑辅助吊装)、蒸养区(梁体蒸养前后转运)、张拉区(张拉作业前后梁体移位)、存梁区(梁体存放与调取转运),各场景流程衔接紧密,设备日均作业频次高,对工序协同性要求严格。

2 预制梁场起重作业安全风险识别

2.1 风险识别原则与方法

遵循科学性、全面性、针对性原则,结合清花高速 TJ6 标智慧梁场实践,采用现场调研、工序复盘、设备故障统计结合的方法,从设备、环境、人员、管理 4 个维度开展风险识别,确保风险点覆盖起重作业全流程^[2]。

2.2 设备自身风险

2.2.1 设备故障

起重设备机械部件、电气系统及液压系统故障是核心风险。1) 机械部件: 龙门吊行走电机磨损、钢丝绳疲劳、吊钩变形易引发设备失控或吊物坠落, 梁场在初期运营中曾出现龙门吊制动系统灵敏度下降问题, 经及时检修排除隐患。2) 电气系统: 无线遥控信号干扰、传感器故障可能导致设备操作延迟, 影响作业精度。3) 液压系统: 泄漏会造成吊装动作异常, 威胁箱梁吊装稳定性^[9]。

2.2.2 设备适配性风险

设备参数与作业需求不匹配易产生安全隐患。例如, 若龙门吊额定起重量与箱梁重量不匹配, 可能导致设备倾覆; 龙门吊轨道铺设不平整, 会造成设备行走偏移, 增加碰撞风险; 设备与作业场景适配不足, 如存梁区台座间距设计不合理(梁场存梁台座约 250 个), 会限制龙门吊作业空间。

2.3 作业环境风险

2.3.1 场地环境

场地条件对起重作业安全影响明显。1) 地基承载力不足, 若未采用级配碎石换填处理, 易导致龙门吊下陷; 2) 排水不畅, 暴雨天气易造成场地积水, 降低地面摩擦力, 增加设备滑移风险; 3) 作业区域障碍物多, 钢筋加工区、模板存放区与起重设备运行路径交叉, 若未明确划分区域, 易引发碰撞事故; 4) 存梁区布局密集, 250 个存梁台座间距较近, 箱梁转运时易发生刚蹭。

2.3.2 自然环境

自然天气会直接干扰起重作业。大风天气易导致箱梁吊装时摆动失控, 梁场所在区域台风频次高, 曾出现吊物摆动幅度超安全范围的预警情况; 暴雨天气会冲刷场地, 破坏轨道基础; 高温环境会加速设备电气系统老化, 降低电机使用寿命, 影响龙门吊运行稳定性^[4]。

2.4 人员操作风险

2.4.1 操作技能

作业人员对智能化设备操作不熟练易引发误操作。例如, 无线遥控龙门吊时速度控制不当, 导致箱梁吊装时晃动过大; 对 352 种梁型的吊装角度、起升速度参数掌握不精准, 可能造成箱梁受力不均; 吊装指挥人员与设备操作员信号配合失误, 影响作业同步性。

2.4.2 安全意识

作业人员违规操作会直接增加安全风险。例如, 未佩戴安全防护用品进入吊装危险区域; 疲劳作业导致注意力不集中, 未能及时响应设备预警信号; 违规在起重设备运行路径内堆放钢筋、模板等物料, 阻碍设备通行。

2.5 管理体系风险

2.5.1 制度与维护风险

安全管理制度不完善会导致管控漏洞。1) 设备维护计划不合理, 未按频次检修龙门吊钢丝绳、液压系统, 梁场通过优化维护计划将设备故障率降低; 2) 作业流程规范不细化, 对复杂作业、恶劣天气作业的管控措施不明确; 3) 人员资质管理不严, 未定期考核起重设备操作员技能, 可能导致无证或技能不达标人员上岗。

2.5.2 应急管理风险

应急处置能力不足会加剧事故影响。1) 未制定针对性应急预案, 如吊物坠落、设备倾覆等事故的处置流程不清晰; 2) 应急物资储备不足, 缺乏防坠落缓冲装置、设备应急制动配件等; 3) 应急演练频次低, 作业人员对事故处置流程不熟悉。

2.6 风险识别结果

从设备、环境、人员、管理 4 个维度识别的核心风险点进行系统梳理汇总, 如表 1 所示, 呈现了预制梁场起重作业全流程的安全风险分布, 明确了各类风险的潜在危害与关联场景。

表 1 预制梁场起重作业安全风险识别汇总表

风险类别	风险点	可能引发的事故类型	关联作业场景
设备自身	机械部件磨损(钢丝绳、电机)	吊物坠落、设备失控	箱梁(4 777 根)吊装、转运
	电气系统故障(遥控信号、传感器)	操作延迟、设备异常	全作业场景
	设备参数与梁型不匹配	设备倾覆、箱梁损坏	箱梁外运吊装
作业环境	地基承载力不足、场地积水	设备下陷、滑移	预制区
	大风、暴雨天气	吊物摆动、设备故障	全作业场景
	作业区域障碍物(钢筋、模板)	设备碰撞、吊物刚蹭	钢筋绑扎区、存梁区
人员操作	智能化设备操作不熟练	误操作、作业延误	龙门吊无线遥控作业
	违规进入危险区域、疲劳作业	人员伤亡、设备碰撞	全作业场景
管理体系	设备维护不及时、制度不完善	设备故障、流程混乱	设备日常运营(桥式起重机、龙门吊)
	应急预案缺失、物资不足	事故扩大、损失加剧	全作业场景

3 预制梁场起重作业安全防控技术体系

3.1 设备安全防控技术

3.1.1 设备状态智能监测技术

基于物联网技术构建设备监测系统，在起重设备关键部位安装传感器。在钢丝绳、吊钩处安装应力传感器，实时监测受力状态；在电机、液压系统安装温度、振动传感器，采集运行参数。通过 RFID 技术追踪设备位置，数据实时传输至中央控制系统(该梁场 MES 系统)。系统可自动识别异常数据，如钢丝绳应力超阈值、电机温度过高时，立即触发声光预警，梁场通过此技术提前发现 10 余次设备潜在故障^[5]。

3.1.2 设备防撞与适配优化技术

为龙门吊配备红外对射传感器与激光测距仪，设定设备安全运行距离，当设备接近障碍物时，系统自动减速或停止。基于 BIM 技术模拟不同梁型(352 种)的吊装过程，优化设备操作参数，如针对重型箱梁调整龙门吊起升速度。定期检测轨道平整度，采用水泥砂浆找平或轨道加固，确保设备行走稳定。

3.2 作业环境防控技术

3.2.1 场地环境优化技术

为化解场地环境对起重作业的安全风险，梁场制定 4 项专项防控措施。1) 提升地基承载力，对松软区域采用级配碎石换填并分层压实，确保压实度不低于 90%，通过该措施有效降低龙门吊下陷风险，为设备稳定运行提供坚实基础；2) 完善排水系统，根据场地规模修建截水沟与排水沟，形成完整排水网络，避免雨季积水影响地面摩擦力，防止设备滑移；3) 明确作业区域划分，采用物理隔离栏分隔龙门吊运行区与钢筋、模板存放区，清晰标注龙门吊通行路径，减少交叉作业干扰；4) 优化存梁区布局，结合 4 777 榀箱梁的尺寸差异，将 250 个存梁台座间距按规范设计，预留充足作业空间，避免箱梁转运时发生剐蹭。

3.2.2 自然环境预警技术

梁场建立精细化气象监测与响应机制，通过实时气象数据获取大风、暴雨等极端天气信息，提前 4 h 发布作业预警，为风险处置预留充足时间。当大风天气风速超过 6 级时，立即暂停所有起重作业，防止箱梁吊装时风力导致摆动失控。暴雨过后，对场地平整度、轨道基础及设备电气系统进行全面检测，排除积水浸泡、基础冲刷带

来的安全隐患。针对高温环境，为龙门吊电机、传感器等关键部件配备强制降温装置，延缓设备老化速度，确保龙门吊在高温时段仍能稳定运行，减少自然环境对起重作业的干扰。

3.3 人员操作防控技术

3.3.1 技能培训与资质管控技术

为提升操作人员专业能力，梁场构建智能化培训体系，借助虚拟仿真技术还原梁型的吊装场景，让操作人员在模拟环境中练习无线遥控操作与应急处置技能，熟悉不同梁型的吊装参数与风险点。此外，建立人员资质数据库，定期对操作员技能进行考核，考核合格者方可上岗，严禁无证或技能不达标人员操作设备，从人员资质层面把控作业安全。

3.3.2 违规操作智能管控技术

梁场引入 AI 视频识别技术对作业人员行为进行实时监测，当发现未佩戴安全帽、违规进入吊装危险区域等行为时，系统可自动抓拍并触发声光预警，及时制止不安全操作。在龙门吊操作界面设置安全提示功能，实时显示当前梁型的吊装参数、危险区域范围等关键信息，引导操作员规范作业。同时，通过手机 APP 向作业人员推送安全操作规程、典型事故案例，定期组织安全知识学习，强化人员安全意识，通过技术方法与安全教育结合，显著减少违规操作行为，提升现场作业安全性。

3.4 管理体系防控技术

3.4.1 全流程信息化管理技术

依托 MES 系统构建起重作业管理平台，整合设备维护、作业计划、人员资质数据：制定设备维护清单，明确龙门吊钢丝绳每 500 榀箱梁吊装后检修、液压系统每月检测；记录每榀箱梁的吊装时间、操作员、设备状态，实现全流程可追溯；实时监控作业进度，协调起重作业与混凝土浇筑(24 万 m³ 混凝土)、张拉压浆的工序衔接，避免作业冲突。

3.4.2 应急管理强化技术

制定针对性应急预案，明确吊物坠落、设备倾覆等事故的处置流程，责任落实到具体岗位。储备应急物资，包括设备应急制动配件、防坠落缓冲装置、急救设备等。每季度开展应急演练，模拟设备故障、人员被困等场景，提升作业人员处置能力，该梁场通过演练将事故响应时间缩短。

4 防控技术应用效果

4.1 安全维度

安全维度主要评估设备故障率、事故发生率及隐患整改率。防控技术体系应用后,梁场起重设备故障率从初期的 8.2% 降低至 1.5%, 通过设备状态智能监测系统提前发现并处置 10 余次潜在故障; 全程未发生起重作业安全事故, 实现 4 777 榀箱梁起重作业零事故目标; AI 识别系统累计发出违规操作、设备异常等预警 30 余次, 所有预警隐患均得到及时处置, 隐患整改率达 100%, 作业现场安全管控水平显著提升。

4.2 效率维度

效率维度核心评估单榀箱梁起重作业时间与设备利用率。借助智能化防控技术优化作业流程后, 单榀箱梁平均起重作业时间从初期的 45 min 缩短至 32 min, 作业效率提升 28.9%; 通过 MES 系统统筹协调作业计划, 合理分配设备资源, 龙门吊、桥式起重机等核心起重设备利用率从 72% 提升至 89%, 有效保障了梁场 4 777 榀箱梁预制任务按期推进, 避免了因起重作业延误影响整体工程进度。

4.3 成本维度

成本维度重点评估设备维护成本与安全投入成本。设备故障率的降低大幅减少了设备维修费用, 龙门吊等核心设备年均维护成本降低 35%, 避免了设备故障导致的停工损失; 智能化防控技术的投入虽增加了初期安全成本, 但有效规避了事故引发的经济赔偿、工期延误等间接损失, 安全投入产出比达 1:6.8, 经济效益显著。

5 技术应用关键经验

1) 技术与场景深度适配, 如针对 352 种梁型

优化吊装参数、加固场地地基;

2) 数据融合共享, 将起重作业数据与梁场 MES 系统、物联网平台联动, 实现全流程管控;

3) 人员与技术协同, 通过培训确保操作人员熟练掌握智能化防控设备, 发挥技术最大效能。

6 结语

预制梁场起重作业安全风险具有多维度、复杂性特征, 从设备、环境、人员、管理 4 个维度全面识别。结合清花高速 TJ6 标智慧梁场实践, 构建智能化防控技术体系, 通过设备状态监测、环境预警、人员管控、管理优化, 有效降低安全风险, 实现 4 777 榀箱梁起重作业零事故, 同时提高了施工效率与经济效益, 可为类似工程提供实践参考。

未来可进一步深化智能化技术应用: 1) 融合数字孪生技术, 模拟不同工况下起重作业风险, 实现风险精准预测; 2) 开发设备自主导航功能, 提升龙门吊作业的自主性与安全性; 3) 建立行业级起重作业安全数据库, 整合多梁场实践数据, 形成标准化防控技术体系, 推动预制梁场起重作业安全管控向更智能、更高效方向发展。

参考文献:

- [1] 伍鹏. 桥梁施工安全风险评估研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2023.
- [2] 彭翰杏. 预制装配式标准箱梁桥施工安全及质量控制研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2023.
- [3] 杨世杰. 浅谈山区高速公路枢纽互通曲线小半径地段预制梁场规划建设[J]. 中国高新科技, 2023(4): 132-134.
- [4] 叶锐聪. 预制梁装配式生产施工技术研究与应用[J]. 建筑施工, 2022, 44(7): 1666-1668, 1675.
- [5] 王金辉. 市政节段预制桥梁施工安全风险评价研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.