

地铁上盖复杂工况下智能化群塔作业与顶升降节安全管控技术研究

王俊石¹ 卢建光¹ 孙飞¹ 成欣² 杨振桥²

1.上海浦东建设股份有限公司 上海 200120

2.上海市浦东新区建设（集团）有限公司 上海 200120

【摘要】：针对地铁上盖项目群塔密集交叉作业、周边轨道交通保护标准严苛、塔吊顶升降节工序风险突出的管控难题，以上海金桥地铁上盖 J9A-05 地块公寓式酒店及商业项目为工程依托，搭建了“智能防碰撞制动+保护区精准限位+AI 作业行为管控+顶升全流程数智监控”的一体化安全管控体系。文章系统阐述了群塔分级智能化管控、AI“十不吊”多场景识别、地铁保护区区域限位管控、顶升降节多维度风险监测等核心技术的实施路径与管控逻辑。工程实践结果显示，顶升降节数智监控系统可覆盖该环节 77% 的危险源，整套管控体系实现了碰撞风险主动干预与顶升工序全程可追溯，有效降低了对人工操作的依赖与安全事故发生概率，可为同类地铁上盖、密集群塔施工项目提供技术参考。

【关键词】：地铁上盖工程；群塔作业；智能防碰撞；顶升降节；安全管控；AI 视觉识别

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.070

1 引言

随着城市更新推进与土地集约利用水平提升，地铁上盖综合开发已成为高密度城区建设的重要形态。此类项目多在既有地铁运营场站盖板上续建，普遍具有场地局促、环境敏感、单体密集的典型特征^[1]。为满足多单体同步施工的物料运输需求，群塔交叉作业成为主体施工标配；但多塔作业空间重叠、设备协同复杂，安全管控难度大幅上升。

建筑起重机械安全是施工安全管控的核心。据行业统计，塔吊倾覆与高空坠落事故占房屋市政工程生产安全事故总量的 30% 以上，其中顶升降节作业不规范引发的事故占比超 40%，违章操作、销轴缺失、配平失当是主要诱因^[2]。传统管控高度依赖塔司经验与人工旁站，存在预警滞后、视野盲区多、追溯困难等短板，难以适配地铁上盖高复杂度场景的管控需求。

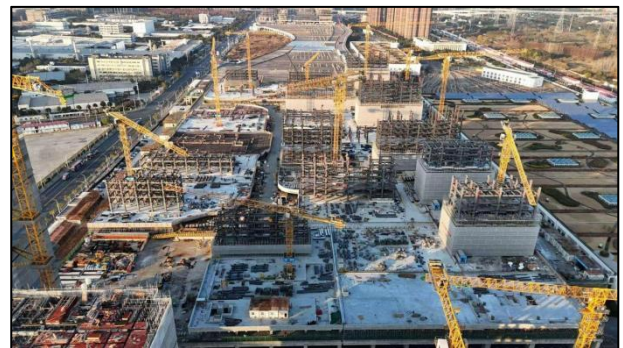
近年来，吊钩可视化、塔机黑匣子等监控设备逐步普及，但多数仍停留在数据采集与事后复盘阶段，缺乏主动制动与多场景协同管控能力^[3]。针对地铁上盖特殊工况，如何在保障地铁设施安全的前提下兼顾群塔作业效率与顶升高危工序管控，是工程实践亟待突破的问题。本文依托上海金桥地铁上盖 J9A-05 地块项目，集成智能化群塔防碰撞与顶升降节数智监控技术，形成适配地铁上盖复杂工况的闭环安全管控方案，为同类工程提供实践借鉴。。

2 工程概况与核心管控难点

2.1 项目基本概况

本项目位于上海市浦东新区金桥镇，共包含 23 栋建筑单体，总用地面积 8.4 万平方米，总建筑面积 17.8 万平方米。项目共配置 11 台大型塔式起重机，所有塔吊基础均架空设置在

地铁盖板结构上部，承担施工阶段的垂直运输任务。同时项目紧邻地铁运营场站与出入口，周边环境敏感度高，塔吊施工作业受地铁设施保护相关规范的严格约束。



群塔作业布置图

2.2 核心安全管控难点

本项目为典型地铁上盖密集群塔施工场景，安全管控存在三大核心难点：

第一，群塔交叉作业风险高。项目 11 台塔吊覆盖 23 栋单体，单台最多与 5 台相邻塔吊存在作业交叉区，且与邻地块塔吊作业面相互覆盖。对比常规房建项目单项目塔吊不超 10 台、交叉作业塔吊不超 4 台的特征，本项目群塔协同管控难度大幅提升^[4]。第二，地铁设施保护管控严。项目毗邻地铁出入口，地铁管理方明令禁止塔吊大臂及起重小车侵入管控红线。人工目视判定作业边界易受环境干扰产生偏差，越界将直接威胁地铁运营安全，引发合规风险与运营纠纷。第三，顶升降节工序管控难。顶升、降节属高危作业，涉及液压操作、标准节吊装、销轴固定等关键环节，任一环节操作失范均可能引发塔身失稳、倾覆等重大事故。本项目塔吊多、顶升频次高，作业需动

态协调群塔高差，传统人工旁站存在视野盲区大、管控效率低、追溯性差等短板。

3 智能化群塔作业安全管控技术体系

针对以上三项管控难题，项目引入广联达塔机智慧直控系统，搭建“防碰撞主动制动-保护区精准限位-AI 作业行为管控-可视化辅助指挥”的多层级群塔安全管控架构，推动管控模式由被动事后记录向主动事前干预转变、由传统经验管控向数字化数据管控升级。

3.1 分级式智能防碰撞制动技术

项目采用 L2 级 AI 防碰撞系统，相较传统 L1 级塔机黑匣子，在算法能力、场景识别、运维模式上实现本质提升。该智能终端依托高算力芯片与安卓系统，内置全场景碰撞识别算法，传感器采样精度更高，预警准确率显著提升^[5]。

安装运维阶段采用专业标定工具现场调试校准，确保塔吊坐标、臂长、回转角度等参数准确；系统支持远程运维，可减少高空作业频次，降低安全风险。

系统设置三级预警联动主动制动机制：进入风险距离时，通过语音与界面颜色提示司机减速避让；风险升级时自动逐级降档；达到临界距离时触发机构强制制动，杜绝碰撞事故。系统可精准识别三类典型群塔碰撞场景，还支持动态障碍物识别，弥补了传统固定限位无法管控移动危险源的短板。

系统配置旁路功能，允许安全距离内塔吊低速作业，避免一刀切停工，兼顾安全与施工效率。同时具备完整的事件追溯能力，可同步存储运行参数、预警记录、监控画面与三维轨迹，为事件复盘、行为研判提供数据支撑。

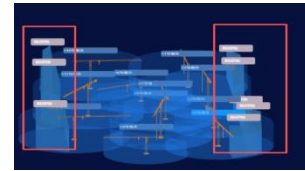
3.2 地铁保护区精准限位管控技术

针对地铁设施保护刚性要求，项目采用区域限位技术替代人工判界模式，精准约束塔吊作业范围。管理人员通过后台平台划定地铁管控区、办公生活区、钢筋加工区等禁入及限行区

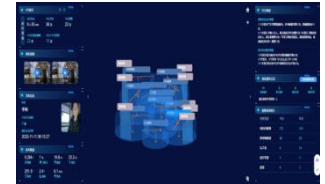
域，限位参数同步下发至各塔吊机载终端。

大臂临近边界时，系统通过语音与界面标识提醒司机调整作业路线；达到边界阈值时，强制制动回转与小车变幅机构，确保作业范围受控。该技术从根源解决肉眼判界的视觉误差问题，杜绝大臂越界侵入地铁保护区。

应用效果显示，项目未发生越界被地铁管理方约谈事件，有效保障地铁运营安全与施工合规性。该技术同样适用于场内临建、周边市政道路等敏感区域防护，实现全场危险源空间化、精细化管控。



区域限位



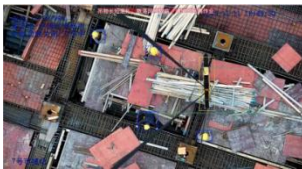
后台管理

3.3 AI “十不吊”智能行为管控技术

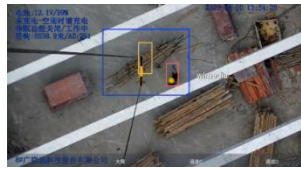
针对起吊作业违章操作风险，项目引入 AI 多模态“十不吊”智能识别系统，依托高清摄像与高精度传感器采集作业画面及设备运行数据，结合 AI 视觉算法自动识别违章吊装行为，可精准识别 7 类典型违章场景，覆盖起吊作业绝大多数风险点。

区别于单一规则判定方案，系统支持多场景混合识别，可同步提取吊物形态、人员距离、作业姿态等多维特征，经算法综合判定，有效降低误判概率。针对吊物周边人员违规靠近的高频风险，系统设置三级预警机制：三级预警提醒司机留意周边人员；二级告警提示起吊风险，同步以激光警示地面人员避让；一级报警触发起升机构限速，强制约束违规作业，从源头遏制风险升级。

该技术推动安全管控关口前移，将依赖信号工人工检查的模式转变为系统自动识别与主动干预模式，有效填补塔吊与信号工的视觉盲区，显著降低违章起吊发生率。



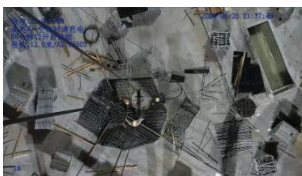
吊物上或周边有人不吊



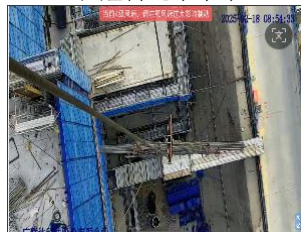
长短料混吊不吊



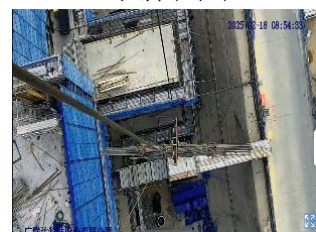
歪拉斜吊不吊



歪拉斜吊不吊



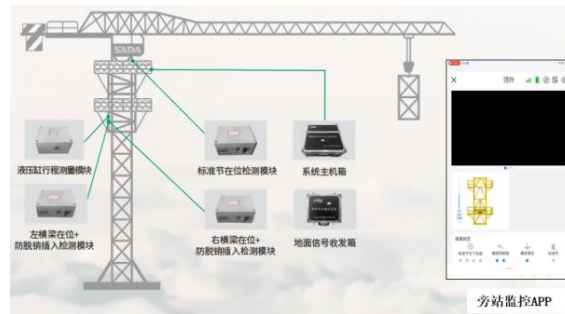
大风不吊



超重不吊

4 塔吊顶升降节数智能化监控技术

塔吊顶升降节是塔吊安全管控的核心高危工序，项目搭建“设备端感知-旁站端管控-云端分析”的三级数智监控系统，实现顶升作业全流程、全要素的闭环管控。



设备端组成

4.1 系统总体架构

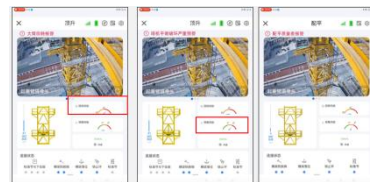
整套系统由设备端监控模块、旁站监控移动 APP 与云端管理平台三部分组成。设备端装置部署在塔吊套架与标准节作业区域，负责采集工序进度状态、作业人员行为、环境参数等底层数据；旁站端通过移动 APP 实现现场实时监控与作业流程规范化引导；云端平台汇总整合全量数据，为作业过程追溯、风

设备端监控

险统计分析与管理决策制定提供数据支撑。

云端

结合全国塔吊事故成因的统计分析结果，该系统可识别施工现场 77% 的顶升降节危险源，覆盖人员资质、工序流程、关键部件状态、环境条件等多个维度，以技术手段补齐了传统人工旁站管控的短板^[6]。



报告分析

大臂回转、配平质量、塔机倾斜监测

临时销插入监测

风速监测

4.2 多维度风险智能检测

4.2.1 人员与工序合规性检测

系统搭载人脸识别模块，对顶升作业人员开展身份与资质双重核验，严禁无资质人员上岗，从人员端规避违章作业与管理缺位风险。针对顶升核心工序，系统借助位移、位置传感器实时采集液压缸行程、横梁及标准节就位数据，自动识别工序节点，引导作业人员按规范流程操作，防止工序颠倒、关键步

骤漏项。

针对防脱销这一关键安全部件，系统采用 AI 图像识别技术，通过套架处摄像头采集销轴部位画面，自动检测临时销与固定销的插入状态，未按规定安装即刻触发报警，从技术上杜绝销轴漏装导致的塔身失稳隐患。

4.2.2 结构状态与环境监测

系统集成大臂回转、塔身倾斜双监测模块，实时采集回转

角度与塔身倾角数据。顶升前需完成起重臂配平,系统依托倾角数据动态校验配平质量;一旦回转角度、倾斜度超出设定安全阈值,同步向塔上作业人员、地面旁站及远程管理人员推送多端报警,及时制止违规作业。

环境管控方面,系统搭载高精度风速采集模块,实时监测作业面风速。风速超出顶升安全限值时,立即触发现场声光报警与平台预警,强制叫停顶升作业,保障恶劣天气下的施工安全。

4.2.3 全视角视频监控

为弥补人工旁站的视野盲区,系统布设多路监控设备:起重臂、平衡臂摄像头覆盖作业全局,套架两侧摄像头聚焦标准节安装核心区,便携巡检仪捕捉作业细节。多路画面同步传输至旁站移动端与云端平台,实现顶升全过程无死角监控,提升旁站监管的覆盖范围与精准度。

4.3 云端管控与作业追溯

云端平台实时呈现全部塔吊的顶升作业状态,自动生成标准化电子作业报告,完整留存作业人员、时长、风险事件、工序节点等信息,实现作业全流程可记录、可追溯。平台支持按周期汇总行为、人员、环境等多维度风险数据,为安全管理优化提供量化依据,推动管理模式从经验驱动向数据驱动转变。

5 应用成效与价值分析

5.1 安全管控效能显著提升

智能化管控体系落地后,项目群塔作业与顶升工序的管控精度大幅提高。群塔防碰撞系统实现交叉风险主动预判与自动制动,有效规避多起潜在碰撞;AI“十不吊”系统自动识别违章起吊行为,显著提升隐患发现与整改效率。

顶升降节关键工序实现100%可追溯,核心危险源识别覆盖率达77%,从技术上遏制违章操作引发的倾覆风险。截至目前,项目未发生塔吊相关安全责任事故,群塔安全管控达到行业先进水平。

参考文献:

- [1] 中国城市规划设计研究院.城市轨道交通上盖物业开发技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [2] 住房和城乡建设部工程质量安全监管司.2023年房屋市政工程生产安全事故情况通报[R].北京:住房和城乡建设部,2024.
- [3] 李军,王亮.建筑塔式起重机智能监控技术研究现状与发展趋势[J].建筑安全,2024,39(2):45-49.
- [4] 中国建筑业协会.建筑施工群塔作业安全管理标准[M].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [5] 广联达科技股份有限公司.塔机智慧直控系统技术白皮书[R].北京:广联达科技股份有限公司,2025.
- [6] 中国建筑科学研究院有限公司.建筑施工塔式起重机顶升作业安全技术标准[M].北京:中国建筑工业出版社,2023.

5.2 施工效率得到有效保障

智能化技术在强化安全的同时同步优化作业效率。吊钩可视化自动变焦消除塔司视觉盲区,减少因视线受阻、沟通不畅导致的作业延误,吊装效率明显提升。防碰撞旁路功能允许安全距离内低速作业,避免一刀切停工;区域限位技术杜绝越界整改损耗,减少合规纠纷带来的工期延误。

5.3 安全管理模式转型升级

项目塔吊安全管理完成从“人防为主”到“技防+人防”的模式升级。传统模式下管理人员难以及时掌握设备运行状态,管控缺乏量化抓手;智能化平台上线后,项目及公司管理层均可通过云端实时查看运行数据、预警记录与监控画面,安全检查与隐患整改有了明确数据支撑。管理逻辑从事后追责转向事前预防、事中管控,管控颗粒度与效率显著提升。

5.4 行业推广应用价值

本项目形成的智能化管控方案,尤其适配地铁上盖、大型集群建筑等群塔密集、环境敏感的施工场景。其技术路径与管理经验可为同类工程提供参考,也为建筑起重机械安全规范完善提供实践支撑,具备较好的行业推广价值与社会效益。

6 结论与展望

本文以上海金桥地铁上盖J9A-05地块项目为依托,搭建集智能防碰撞、区域精准限位、AI行为管控、顶升全流程监控于一体的塔吊安全数智管控体系,有效破解了地铁上盖项目群塔作业风险高、地铁保护要求严、顶升工序管控难的痛点。实践证明,智能化技术集成应用可有效提升塔吊作业安全冗余度,降低人工依赖,同时兼顾施工效率,实现安全与效益的平衡。

后续将持续深化技术优化:一是开发手动参数输入模块,实现塔吊高度动态更新与高差碰撞精准预警;二是优化三维可视化展示效果,提升群塔直观管控能力;三是探索远程控制与人机协同自动驾驶技术,向更高等级智能驾驶升级,最终实现一人多塔集约化作业,推动建筑起重施工持续向智能化、安全化方向发展。