面向输电塔组立施工的 AI 视觉安全识别与数智化旁站系统研究

杜亚成
中国能源建设集团天津电力建设有限公司，天津 300171

[摘要]输电塔组立属于典型高空高风险施工，现场多个班组、多道工序同时开展，作业环境随时变化。传统安全管理主要靠安全员现场巡查，经常出现人手不够、发现隐患不及时、监管不成体系、问题整改周期长等问题。文章针对输电塔组立全施工场景，搭建一套以 AI 视频安全识别为核心、数字化智能旁站为基础的协同安全管控体系，系统覆盖作业前安全交底、人员资质核查、施工过程实时智能监控、隐患报警联动处理、完工资料存档和复盘分析。现场测试结果显示，这套系统能够稳定识别不戴安全帽、安全带未挂设、人员擅自闯入危险作业区三类重点违章，识别准确率提高；相比传统人工管理，隐患从发现到处置的时间缩短，为输电工地安全数字化改造提供参考。

[关键词]输电塔组立；AI 视觉识别；数智化旁站；施工安全管控；电力施工数字化
DOI：10.33142/sca.v9i10.20617　　中图分类号：TP391.4　　文献标识码：A

Research on AI Visual Safety Recognition and Digitized Site Supervision System for Transmission Tower Assembly Construction

DU Yacheng
China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Construction Co., Ltd., Tianjin, 300171, China

Abstract: The assembly of transmission towers is a typical high-altitude high-risk construction, where multiple teams and processes are carried out simultaneously on site, and the working environment is constantly changing. Traditional safety management mainly relies on on-site inspections by safety personnel, often resulting in problems such as insufficient manpower, untimely discovery of hidden dangers, unsystematic supervision, and long cycles for problem rectification. The article focuses on the entire construction scenario of transmission tower assembly, and builds a collaborative safety control system with AI video safety recognition as the core and digital intelligent side station as the basis. The system covers pre-operation safety disclosure, personnel qualification verification, real-time intelligent monitoring of the construction process, linkage processing of hidden danger alarms, archiving and retrospective analysis of completion data. The on-site test results show that this system can stably identify three key violations: not wearing a safety helmet, not wearing a safety belt, and unauthorized entry of personnel into hazardous work areas, with improved recognition accuracy; Compared with traditional manual management, the time from discovering to disposing of hidden dangers is shortened, providing reference for the digital transformation of power transmission construction site safety.

Keywords: transmission tower assembly; AI visual recognition; digitized side station; construction safety control; digitalization of power construction

引言

输电塔组立是架空输电线路施工的关键工序，涵盖抱杆吊装、高空登塔、附件安装、牵引锚固等多项交叉作业[1]。施工现场条件复杂，各类风险随时变化，是电力工程安全管控的重中之重。以往安全管理主要依靠安全员现场旁站、定期巡查，事后再整理台账记录。受人员数量、精力以及现场地形限制，突发、隐蔽的违章行为很难第一时间发现，容易引发高处坠落、物体打击、起重伤害等安全事故[2]。当前电力施工正在向数字化转型，AI 视觉识别、边缘计算、物联网等技术能够弥补传统人工旁站的不足[3]。基于此，聚焦输电塔组立作业场景，开发 AI 视觉安全识别模块，可适应光线多变、拍摄角度多样、人员频繁移动的现场条件，搭建全流程智能化旁站系统，提升输电塔组立施工的安全管控水平。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

1 输电塔组立施工安全管控现状与需求分析

1.1 传统管控模式的现存问题

输电塔组立是多工序配合施工的典型场景。同一片作业区域中，物料转运、抱杆吊装、高空作业、起重操作等工作同时开展，不同工序的安全要求各不相同，传统安全管理方式存在明显短板。一是人工旁站监管顾不过来。单基铁塔组立作业范围垂直高度几十米、平面区域几百平方米，现场一般只安排 1～2 名安全员，很难同时管好地面警戒、观察高空人员操作、检查起重设备状态。如果多基铁塔同时施工，人手不够造成的监管漏洞会更多。二是隐患发现不够及时。靠安全员现场盯守，容易受疲劳、注意力不集中、个人经验影响，常等到风险升级才察觉，错过了早期处置的机会。三是现场监管数字化程度不高。传统旁站检查大多用纸笔登记问题和整改情况，安全数据零散，各个作业面信息不能实时共享。管理人员没法实时掌握整体安全情况，也不能利用过往安全数据，分析风险变化趋势。

1.2 数智化管控的核心需求

输电塔组立施工属于野外高空作业，作业点分散。面向这类场景的 AI 视觉安全识别与数智化旁站系统，主要要满足三大核心要求。第一，适配现场复杂场景。输电塔组立大多在野外露天施工，系统要能应对强光、逆光、沙尘、雨天等各类天气光照影响。针对钢结构塔身背景、远距离高空拍摄带来的目标偏小、图像噪点大等问题优化算法，减少环境干扰，降低违章识别误报、漏报，保证不同作业场景下识别稳定。第二，快速实时预警。采用边缘计算，在现场设备本地完成 AI 识别。一旦检测到未戴安全帽、高空缺少防护、违规攀爬等违章行为，几秒内就发出预警，联动现场声光报警器提醒施工人员；同时把预警信息同步上传远程管控平台，做到现场即时提醒、后台同步掌握风险，快速处置安全隐患。第三，实现隐患闭环管理。系统不只自动抓拍识别隐患，还打通从隐患发现、预警推送、现场整改、复查确认到自动生成台账的完整管理流程。自动保存现场影像、时间、位置等全部记录，旁站监管全程可追溯，数据支持统计分析。可以替代传统人工旁站，提升安全监管效率[4]。

1.3 输电塔组立施工典型风险识别清单

结合输电塔组立施工的全流程作业环节，梳理出 12 类高频高风险管控对象，作为 AI 视觉识别模块的核心检测目标，具体如表 1 所示：

表 1 输电塔组立施工典型风险识别清单

作业阶段	核心风险管控对象	风险等级
作业准备阶段	未正确佩戴安全帽、未穿防滑工作鞋	中等
地面作业阶段	违规进入吊装危险区、物料无序堆放	高
高空作业阶段	未系挂安全带、高空抛物、单人无监护作业	极高
起重作业阶段	吊物下方站人、抱杆连接螺栓缺失、吊装索具磨损	极高
作业收尾阶段	临时锚固设施未拆除、工器具高空遗留	中等

2 AI 视觉安全识别模块设计与现场适配优化

2.1 识别模型的轻量化改造

针对输电塔组立工地算力不足、网络信号差的现场难题，对目标检测基础模型做轻量化优化，在识别精度符合现场安全管理要求的基础上，降低模型算力需求、加快推理速度。模型主干采用轻量级卷积结构，删减原有模型多余卷积层，把参数量压缩到原来的 35%。同时改进锚框生成方式，结合输电塔施工场景里人员、施工设备、安全防护用品的常见尺寸重新聚类锚框，减少无用候选框造成的算力消耗。优化完成后，模型在边缘设备上处理单张图像耗时低于 0.3 秒，能够做到现场实时检测。这套方案可直接在工地本地设备上运行，降低对外网网络的依赖，适合野外组塔弱网条件，为 AI 视觉识别应用在输电塔高危作业智能监控提供算法支撑。

2.2 多场景识别精度优化

输电塔组立施工现场环境复杂，制作扩充数据集提高模型的通用识别能力。数据集收集超过 12 万张不同季节、天气、光照条件下的现场图片，重点标注逆光下的人员、沙尘造成的模糊目标、远处小尺寸防护用品这类难识别样本，让模型充分学会复杂作业环境下的目标特征。针对高空安全带挂点识别难题，模型新增局部特征提取分支，重点识别安全绳挂点、安全带外形细节，区分作业时安全绳暂时松弛和未系挂安全带两种情况，减少误判[5]。针对吊装作业场景，加入运动目标跟踪模块，实时跟踪吊物移动轨迹并生成动态危险范围，一旦检测到人员进入区域马上报警，解决传统固定警戒区跟不上吊物移动的不足。

2.3 识别结果的分级推送机制

系统按照安全隐患风险高低，设置三级差异化预警推送规则，减少无效报警，保障现场施工正常进行。一级：现场即时预警。针对未系安全带、人员站在吊物下方等极高风险违章行为，识别信号直接联动现场声光报警设备，1s 内发出现场警报，提醒作业人员马上停止违章操作。二级：管控平台实时推送。针对违规闯入危险区域、吊具严重磨损等高风险隐患，识别信息同步发给现场负责人和

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

远程安全管控平台，相关人员需要在 5min 内处理并反馈结果。三级：台账归档预警。针对材料乱堆放、工具随意摆放等一般隐患，识别记录自动存入旁站台账，每天完工后统一推送给班组，要求当天整改完成。这套分级机制对各类隐患预警分类处理，既保证高危问题快速处置，也实现一般问题闭环整改，提升输电塔组立施工现场的智能安全管控能力。

3 数智化旁站系统整体架构与运行流程

3.1 系统整体架构设计

数智化旁站系统采用前端感知-边缘计算-云端管控三层分布式架构，很适合输电塔组立施工：野外环境复杂、网络信号差的场景。三层各自分工，又能协同工作。

前端感知层：在铁塔不同高度安装高清摄像头，作业区域搭配全景监控和声光报警器，持续采集现场视频。除了实时拍画面，还能接收边缘计算设备发来的预警信号。一旦发现违章作业，立刻启动声光提醒，在现场第一时间警示作业人员。

边缘计算层：装在工地就近的防护箱内，内置轻量化 AI 图像识别模型，直接在本地对传回的视频做实时分析，自动识别各类安全隐患，同时本地报警、筛选原始数据。系统只把隐患片段和告警信息上传云端，不用传输全部视频，大幅节省带宽，解决野外网络不好的问题。

云端管控层：依托一体化数智旁站管理平台，汇总各个施工点上传的旁站数据，对多个项目、多个作业点位统一监管。平台可以线上跟踪整改隐患，统计分析安全数据，自动生成规范的旁站记录。管理人员通过电脑网页或者手机，随时查看现场情况，远程全过程监督铁塔组立施工，让输电工程安全旁站，从传统人工盯守转向数字化、智能监管。

3.2 全流程旁站运行机制

数智化旁站系统覆盖输电塔组立施工全部过程，从开工准备、现场施工、收尾到竣工验收，形成一套标准、自动的数字化旁站管理流程。

开工准备阶段，系统自动做安全预检。借助 AI 视觉识别，自动检查进场人员安全帽、工装等防护用品佩戴情况，同时核查作业围挡、警示标识、作业通道等安全设施是否布置到位。一旦发现人员防护不合格、安全设施缺失等违规情况，系统直接锁住作业许可，不允许开工。

施工阶段，系统持续智能旁站巡检，实时监测人员违章操作、起重设备运行状态，同时监测现场地质、气象等环境安全风险。系统识别隐患后，会按风险等级自动报警，同步保存事发时间、塔位、违章类型、现场视频等原始资料，自动生成整改工单推送给负责人。责任人整改完成后上传现场照片、视频，系统通过 AI 复核整改效果，确认隐患消除才算闭环。隐患发现、派单、整改、智能复核全部线上处理，缩短处置时间。

施工收尾阶段，系统自动汇总当天所有旁站数据，包括有效作业时长、人员进出记录、隐患分类统计、整改闭环率等关键指标，一键生成符合电力施工安全要求的旁站记录。不用安全员手动整理、逐条填写台账，大量减少重复工作，避免人工记录出错、记录不及时等问题。该体系采用数字化固定旁站监管标准，持续提高输电塔组立安全旁站的规范性和管理效率，做到全过程可感知、可监控、可追溯，为输电线路施工现场安全生产打造智能防护屏障。

施工收尾阶段，系统自动汇总当天旁站数据，包括有效作业时长、人员进出信息、隐患分类统计、整改闭环率等关键指标，一键生成符合电力安全要求的旁站记录。不用安全员手动整理填写台账，减少重复工作，避免人工记录出错、漏记，提升输电塔组立旁站工作的规范性和管理效率，为输电线路施工现场安全生产打造智能防护屏障。

3.3 系统部署的现场适配方案

输电塔组立施工现场大多没有稳定外接电源，网络信号也差。针对这个场景，采用低功耗供电+离线优先部署方案，适配野外施工条件。前端感知设备和边缘计算单元使用太阳能+储能电池供电，搭配低功耗硬件，连续 7 天阴雨无光照也能稳定工作，不用外接市电，满足输电塔野外长时间组立施工的供电要求。数据采用本地离线存储、支持断点续传。现场公网信号不稳或者断网时，AI 识别结果、隐患抓拍视频、旁站记录等数据会自动存到本地边缘设备，不会丢失。待网络恢复后，系统自动把缓存数据上传到云端管控平台，可以完整保存旁站监管全流程数据，施工过程可回放、隐患可追溯，解决野外工地网络差造成的监管中断问题，保障输电塔组立数字化旁站监管稳定运行。

4 系统应用效果实测与数据分析

选取多组输电塔组立现场开展 3 个月连续试运行，覆盖不同地形、电压等级作业面 27 个，采集有效旁站监控时长超 1400h；对比传统人工旁站模式，验证系统实际应用效果。系统对三类核心高风险违章行为的识别准确率统计结果如表 2。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

表 2 系统应用效果实测与数据分析结果

违章行为类型	测试样本总量	正确识别数量	识别准确率	平均预警响应时长
未佩戴安全帽	1242	1181	95.1%	2.1 秒
高空未系挂安全带	786	742	94.4%	2.7 秒
违规进入吊装危险区	917	883	96.3%	1.8 秒

实测数据显示：系统识别三类重点高危违章的准确率都超过 94%，平均预警响应时间不到 3s。试运行期间，作业现场安全隐患平均处理时间从 26min 缩短到 9.8min，处理效率提升 62%，没有发生高危违章漏管情况。同时系统减少了现场专职安全员投入：原先组立一基铁塔，需要 2 名安全员全程在岗；现在 1 名安全员就能同时看管多个作业点，安全管理人员投入降低 50%以上。系统还能自动生成数字化旁站记录，全覆盖不留死角，符合电力施工安全资料存档规定。

5 结论

面向铁塔组立施工场景，开发了以轻量 AI 视觉识别为核心的数字化现场旁站系统。通过对 AI 模型做施工现场适配、设置三级预警机制、采用现场分布式部署等手段，解决传统人工旁站监管范围有限、报警处置慢、数字化程度低等痛点。现场实测表明，这套系统能在野外复杂施工环境稳定工作，对铁塔组立施工全过程实现 24h 自动安全监管。在安全管控标准不降的前提下，系统提高隐患处置效率、节省现场人力，为输电线路施工安全数字化转型提供可落地的方案。下一步会继续补充铁塔组立各类细分场景样本，持续优化 AI 模型，增加起重设备状态、气象风险等监测功能，进一步扩大数字化旁站系统的安全管控范围。

[参考文献]

[1]黄子昊.双回路直线输电塔风振控制分析与性能化设计研究[D].广州:广州大学,2026.

[2]宁盼.输电铁塔应力在线监测技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2025.

[3]朱锋.输电塔高处坠落智能拦截装置的研究[D].南京:东南大学,2025.

[4]陈宏亮.基于机器视觉的输电塔应变监测传感器技术研究[D].大连:大连理工大学,2024.

[5]逯沙鸥,王琦,关欣雨,等.视觉监测技术在电网输电塔安防监测中的应用研究[J].吉林电力,2024,52(6):40-46.

作者简介：杜亚成（1981—），男，河北人，现就职中国能源建设集团天津电力建设有限公司，技术专家，长期从事新能源输变电工程技术管理工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.