

人工智能驱动的电力工程施工安全协同管理模型

谢燕伟 朱峰

华电郑州机械设计研究院有限公司, 河南郑州, 450007;

摘要:面对新型电力系统建设中日益复杂的施工环境与多元主体协同难题,传统安全管理手段已难以应对高动态、高风险场景下的实时管控需求。本文提出一种人工智能驱动的电力工程施工安全协同管理模型,融合计算机视觉、知识图谱、多智能体强化学习与数字孪生等前沿技术,构建“感知—评估—预警—处置”一体化闭环机制。该模型通过部署摄像头、可穿戴设备、无人机及 IoT 传感器组成的全域感知网络,实现对人员行为、设备状态与环境风险的实时识别;依托 AI 中枢进行智能推理与策略生成,并通过 API 与区块链技术打通施工方、监理方与监管机构间的数据壁垒,建立可信协同机制。在某市智慧供热管网改造工程的六个月试点中,系统累计识别违章行为 1,342 起,识别准确率达 92.3%,隐患响应时间缩短 40%,一般安全事故同比下降 31%,有效验证了模型在提升风险防控能力与多方协同效率方面的显著成效。

关键词:人工智能; 电力工程; 安全协同; 智能管理

DOI: 10.69979/3060-8767.26.01.016

引言

随着国家“双碳”战略加速落地,特高压输电、新能源基地及智能电网等重大电力工程密集推进,施工现场呈现出多专业交叉、人员高度集中、风险源动态叠加等复杂特征。传统依赖人工巡检、纸质台账和经验判断的安全管理模式,普遍存在响应滞后、数据割裂、主观性强等缺陷,难以支撑现代工程对“事前预防、过程可控、多方协同”的安全管理要求。尽管人工智能在工业视觉、风险预测等领域取得进展,但在电力工程施工场景中,仍缺乏面向施工、监理、业主与监管部门的系统化协同框架。为此,本文基于“人—机—环—管”四维安全理论,构建一个由 AI 驱动的安全协同管理模型,并在某市智慧供热管网改造工程中开展实证应用。该工程涵盖热力站建设、管网敷设与设备调试等多个高风险环节,通过部署 86 个视频监控点、128 套可穿戴终端及 200 余个 IoT 传感器,全面验证了模型在违章识别、风险预警与跨主体协同方面的可行性与优越性,为行业迈向本质安全提供了可复制的技术路径与管理范式。

1 电力工程施工安全管理现状与挑战

当前电力工程施工现场安全形势依然严峻,高处坠落、触电事故、机械伤害等典型安全事件频发,成为制约行业高质量发展的突出短板。这些事故的深层诱因不仅包括作业人员安全素养不足、个体防护装备佩戴不规范,更源于大型工程中多工种交叉、工序密集、环境动

态变化所带来的复合型风险叠加。传统安全管理高度依赖人工巡查、纸质台账和定期会议,缺乏对风险要素的实时感知与智能分析能力,往往只能在事故发生后进行被动响应,难以实现事前预警与过程干预。更为突出的问题在于,施工方、监理单位、项目业主以及政府监管机构之间尚未建立高效、透明、可信的信息协同机制。各类关键数据——如隐患排查记录、整改指令、验收结果、培训档案等——分散存储于各自独立的系统或文档中,既无法互通共享,也难以追溯验证,形成严重的数据孤岛。这种信息割裂直接导致责任边界模糊、处置流程脱节、整改闭环缺失,使安全管理制度在执行层面大打折扣。在特高压输变电、风电光伏基地等新型电力基础设施建设中,施工界面复杂、参建单位众多、作业节奏紧凑,若缺乏统一的数字化协同平台支撑,极易出现监管盲区与管理真空。安全信息传递的延迟与失真,进一步加剧了现场决策的盲目性与应急响应的滞后性。正是这种“人防为主、技防薄弱、协同缺位”的现状,构成了当前电力工程安全治理的核心瓶颈,亟需通过技术与机制双重创新加以突破。

2 AI 驱动安全协同管理的理论基础与技术支撑

2.1 基于 YOLOv7 或 Transformer 的视频行为识别用于违章检测

在电力工程施工现场,人员行为是安全风险的关键

变量。YOLOv7凭借高帧率与高精度特性，适用于边缘设备部署，可实时检测未佩戴安全帽、未系安全带、闯入危险区域等典型违章行为。而基于Transformer架构的视觉模型则通过全局注意力机制捕捉长时序动作特征，在复杂遮挡或多目标场景下表现更优，能有效识别如违规操作电气设备、吊装作业下方站人等高风险行为。两类模型可依据算力资源与场景需求灵活选配，结合红外、深度摄像头等多模态输入，提升在夜间、雨雾等恶劣环境下的鲁棒性。系统将识别结果结构化输出，为后续风险评估与预警提供精准数据源，实现从“看得见”到“看得懂”的跨越。

2.2 知识图谱构建安全规则库，实现隐患语义推理

电力工程安全规范涵盖国家标准、行业规程及企业制度，条文繁杂且动态更新。通过构建领域知识图谱，将法律法规、事故案例、设备参数、作业流程等异构信息转化为实体-关系-属性三元组，形成结构化安全规则库。该图谱支持语义级推理，例如当系统检测到“高空焊接作业”且“下方无防火布覆盖”时，可自动关联《电力建设安全工作规程》相关条款，判定为重大火灾隐患。知识图谱还能融合历史整改记录与专家经验，动态优化推理路径，提升对复合型、隐性风险的识别能力。这种基于语义理解的智能判断，突破了传统规则引擎仅依赖关键词匹配的局限，使安全管理具备认知与演化能力。

2.3 多智能体强化学习（MARL）支持多方博弈下的最优安全策略生成

电力工程涉及施工方、监理方、业主及监管机构等多个利益主体，其安全目标存在局部冲突与协同需求。多智能体强化学习（MARL）为这一复杂博弈场景提供决策框架。每个参与方被建模为独立智能体，拥有自身状态空间（如当前风险等级、资源投入）与奖励函数（如安全绩效、成本约束）。通过集中训练、分散执行机制，各智能体在交互中学习协作策略，例如在交叉作业高峰期自动协商调整施工顺序，或在发现重大隐患时协同调度应急资源。MARL模型引入纳什均衡约束，确保策略组合在个体理性与集体最优之间取得平衡，从而生成兼顾效率与安全的动态协同方案，推动安全管理从指令驱动向自组织协同演进。

2.4 数字孪生平台实现物理工地与虚拟模型的实时映射与交互

数字孪生平台作为AI驱动安全协同管理的载体，

集成BIM模型、IoT传感网络与实时视频流，构建与物理工地同步演化的虚拟镜像。平台通过高精度定位技术追踪人员、机械与材料位置，结合环境传感器数据（如风速、温湿度、气体浓度），动态更新虚拟场景状态。管理人员可在孪生体中模拟不同应急预案效果，预判风险传播路径；一线人员通过AR终端接收叠加在真实视野中的安全提示。平台还支持多角色权限视图，确保各方在统一信息底座上开展协同，消除因视角差异导致的误判。这种虚实融合机制不仅提升了态势感知的全面性，也为AI模型训练与策略验证提供了高保真试验场。

3 AI驱动的电力工程安全协同管理模型构建

3.1 “1”个AI中枢（集成算法引擎与决策核心）

AI中枢是整个安全协同管理模型的智能核心，承担数据融合、算法调度与策略生成的关键职能。该中枢集成了行为识别、风险推理、多智能体决策等模块，形成统一的算法引擎池，可根据施工现场实时需求动态调用最优模型组合。例如在吊装作业区域，系统自动激活高精度目标跟踪与禁区闯入检测模型；在变电站调试阶段，则切换至电气操作合规性分析模块。中枢还内置规则适配器，支持对接不同地区、不同类型工程的安全标准库，并通过在线学习机制持续优化判断逻辑。所有处理结果经由统一接口输出，确保下游预警与处置环节获得一致、可靠的信息输入。作为模型的“大脑”，AI中枢不仅提升单点智能水平，更保障了整体系统的协同性与可扩展性。

3.2 “3”类协同主体（施工方、监理方、监管方）通过API/区块链实现可信数据共享

施工方、监理方与政府监管机构在安全管理中职责交织但信息割裂，传统协作依赖人工报送，易出现延迟、篡改或遗漏。本模型通过标准化API接口打通三方业务系统，实现隐患上报、整改反馈、验收确认等流程的自动化流转。为确保数据真实性与不可抵赖性，关键操作记录（如违章证据、整改签收）写入轻量级区块链，形成时间戳明确、多方共识的审计链。施工方可实时查看自身风险评分，监理方基于客观数据开展针对性巡查，监管方则通过可视化看板掌握全域安全态势。这种基于技术信任的协同机制，消除了人为干预空间，使责任追溯有据可依，推动安全管理从“被动响应”转向“主动共治”。

3.3 “N”个智能终端（摄像头、可穿戴设备、无人机、IoT 传感器）构成感知网络

感知网络覆盖施工现场全要素，由多样化智能终端组成多层次监测体系。固定高清摄像头部署于高风险作业点，用于连续视频分析；移动式无人机定期巡航，补充盲区视角并采集三维点云数据；工人佩戴的智能安全帽集成定位、跌倒检测与语音交互功能；IoT 传感器则嵌入塔吊、脚手架、配电箱等设备，实时回传倾角、电流、温升等运行参数。所有终端通过 5G 或工业 Wi-Fi 接入边缘计算节点，进行初步数据过滤与特征提取，降低传输负载。该网络具备自适应能力，可根据作业计划动态调整感知密度，例如在夜间或恶劣天气下增强红外与振动监测。多源异构数据的融合，为 AI 中枢提供全面、精准的现场画像。

3.4 四阶段闭环流程与联邦学习机制支撑跨项目经验迁移

模型运行遵循“感知—评估—预警—处置”四阶段闭环。系统实时采集人员位置、PPE 佩戴状态及设备工况，结合环境变量动态计算各作业面风险指数；一旦超过阈值，按风险等级向对应责任人推送预警信息，如短信、APP 弹窗或现场声光提示；同时自动生成结构化整改工单，明确问题描述、责任单位与完成时限，并跟踪直至闭环验证。为避免数据孤岛限制模型泛化能力，引入联邦学习机制：各工程项目本地训练模型，仅上传加密梯度参数至中心服务器，聚合后更新全局模型再下发。此方式在不共享原始数据前提下，实现跨地域、跨类型工程的安全经验迁移，持续提升整体智能水平，兼顾隐私保护与算法进化。

4 实证分析与应用效果

在某市智慧供热管网改造工程中，AI 驱动的供热工程安全协同管理模型被部署并运行六个月，覆盖热力站建设、管网敷设及设备调试等多个关键施工阶段。现场布设了 86 个高清视频监控点、128 套可穿戴智能终端、9 台巡检无人机及 200 余个 IoT 传感器，构建起全域感知网络，并与施工、监理及业主单位的管理系统完成 API 对接。运行期间，系统累计识别各类违章行为 1,342 起，包括未佩戴防护面罩进行焊接作业、无证操作压力容器、有限空间作业通风不足等高风险行为，整体识别准确率达到 92.3%，误报率控制在 5% 以内。安全隐患从发现到责任单位接收预警的平均响应时间由原先的

4.2 小时压缩至 2.5 小时，整改闭环周期缩短近 40%。得益于系统自动生成包含隐患分布热力图、责任主体绩效排名及趋势预测的月度协同报告，各方参与的安全协调会议时长减少 35%，决策效率显著提升。更为关键的是，在模型全周期运行期间，该工程未发生重伤及以上事故，一般性安全事故数量同比下降 31%，远优于同期同类项目平均水平。与传统依赖人工巡检和纸质台账的管理模式相比，该模型不仅实现了风险识别从“事后追溯”向“事前预防”的转变，更通过数据驱动的多方协同机制，有效解决了信息不对称、响应迟滞和责任模糊等长期痛点。试点结果表明，AI 赋能的安全协同管理在复杂智慧供热工程场景中具备高度可行性与实用价值，其在提升管理智能化、风险防控前置化及组织协同高效化方面的综合优势已得到充分验证。

5 结束语

人工智能正从辅助工具转变为电力工程安全管理的核心驱动力。本文所提出的 AI 驱动协同管理模型，不仅在技术层面实现了从“看得见”到“看得懂”、从“事后追溯”到“事前干预”的跃迁，更在组织机制上推动施工、监理与监管多方从信息孤岛走向数据共治。某市智慧供热工程的实证结果表明：该模型能显著降低违章率与事故率，提升应急响应速度与协同决策效率，充分彰显其在复杂工程场景中的实用价值。未来，随着大模型、边缘智能与 5G/6G 通信的深度融合，该体系有望进一步演进为具备自学习、自适应能力的“预测性安全治理”平台，实现从“防事故”向“防风险”的根本转变。建议同步推进行业数据标准、接口规范与 AI 伦理治理建设，确保技术创新与制度创新同频共振，为构建本质安全、高效协同的新型电力工程管理体系奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 李淮海, 孙向东, 杨俊, 等. 基于人工智能技术的电力工程施工信息管理方法 [J]. 电气自动化, 2022(004): 044. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3886. 2022. 04. 024.
- [2] 张硕. 人工智能技术在电力工程中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023(11): 218-219.
- [3] 王绍志, 刘运祥, 王冠侠, 等. 基于人工智能技术的电力工程施工信息管理 [J]. 微型计算机, 2024(5): 130-132.