

# 智能化管控技术在电力线路 施工安全管理中的应用

何 勉

(南水北调中线信息科技有限公司河北分公司邯郸运维处, 河北 邯郸 056003)

**摘 要** 本文提出基于多源信息融合的智能化管理管控体系, 该体系采用“感知—传输—平台”分层架构, 融合 UWB 精确定位与惯性导航技术实现亚米级定位, 整合改进型 YOLOv5s 目标检测模型与无人机五镜头倾斜摄影技术, 实现“人一机一环”全要素动态监测。实际应用数据显示, 该系统将人员定位精度提升至  $\leq 0.8$  m, 设备缺陷识别准确率达 85.24%, 单条线路巡检耗时从 1.2 小时降至 0.4 小时, 为超大规模电力线路工程提供了可参考的安全管控技术解决方案。

**关键词** 电力线路; 施工安全管理; 智能化管控

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.033

## 0 引言

电力线路作为新型电力系统的核心物理载体, 其建设质量稳定性与施工安全管控水平, 直接决定大电网运行可靠性、负荷侧能源供应韧性, 以及沿线生态系统的长期稳定性。以南水北调中线配套电力线路工程为例, 工程涵盖 1 200 公里超长跨度网络, 施工周期紧、风险密度高, 包含 320 处跨渠施工节点与 180 个邻近水利枢纽、输水隧洞的高风险作业区段, 总投资额达 45.8 亿元。当前, 冷传飞等提出的质量控制体系仍侧重静态管理, 多依赖人工巡检与经验判断, 对临时搭建的高空作业平台稳定性、导线弧垂异常等动态隐患难以实现实时监测; 花佳耀等引入的智能控制技术虽尝试融合机器视觉与物联网传感器, 但存在定位精度不足、设备缺陷识别滞后等问题, 此类误差可能导致绝缘子串间距误判, 进而引发导线碰撞风险; 靳雨柱等对施工安全管理进行分析, 建立了风险评估矩阵, 但在极端工况下的预警机制仍有不足之处<sup>[1-3]</sup>。针对复杂工程安全防控与生态保护的双重挑战, 本研究创新性地提出多源异构信息融合的智能预警解决方案, 形成具备“人一机一环”全要素动态感知能力的主动预警系统, 通过智能分析快速识别潜在风险因素, 使复杂场景下的人员违规行为识别准确率提升。

## 1 工程概况

南水北调中线工程配套电力线路系支撑输水调度系统稳定运行、保障沿线城乡用电需求及维护生态廊道

完整性的关键基础设施, 其工程规模涵盖 1 200 公里超长跨度网络体系, 穿越山地、平原、城镇建成区及生态保护区等复杂地理单元。本工程包含 320 处跨渠施工节点与 180 个邻近水利枢纽、输水隧洞的高风险作业区段, 建设周期限定为 18 个月, 总投资额达 45.8 亿元。线路设计采用 JL/G1A-630/45 型大截面钢芯铝绞线作为主导体, 组立 3800 基定制化杆塔架构, 配置 XP-70C 标准型瓷绝缘子与 FXBW4-110/100 型硅橡胶复合绝缘子形成双重绝缘防护体系, 关键连接部件选用 M16-M24 系列热镀锌高强度螺栓以确保机械可靠性。

## 2 智能定位系统

本工程针对电力线路施工场景构建了基于多源信息融合的智能安全管控体系, 重点研发了具备泛在感知能力的智能定位系统。系统基本结构如图 1 所示, 采用分层式架构设计, 由感知层、传输层、平台层构成闭环技术路径, 其中感知层通过集成嵌入式传感模组的安全帽终端实现生物特征识别与环境参数采集, 传输层依托 LoRa+5G 混合组网技术构建低时延通信链路, 平台层则运用三维地理信息系统 (3D GIS) 与时空大数据引擎建立动态数字孪生模型。

系统创新性地将 UWB 精确定位算法与惯性导航技术相结合, 在复杂线状施工区域内实现亚米级定位精度, 同步开发了多维度预警决策模块, 可对人员异常行为 (倒地、脱帽、静默等)、设备越界作业及环境风险因子进行实时态势感知。通过部署分布式边缘计

作者简介: 何勉 (1985-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 生产安全、电力设备安全。

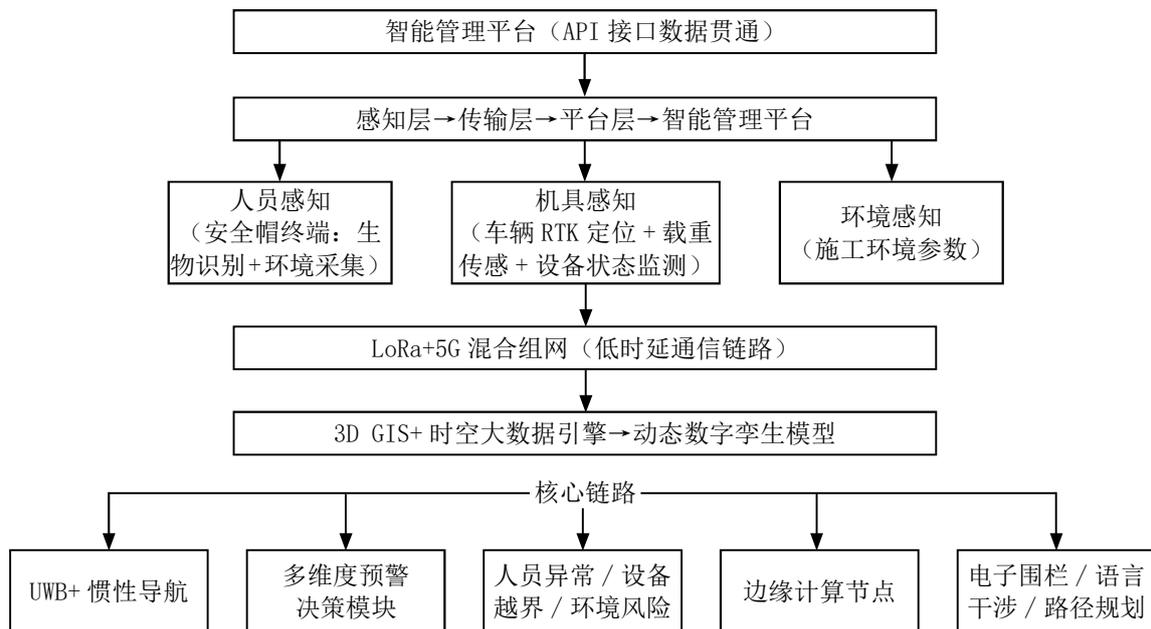


图1 系统基本结构

算节点，系统能自动执行安全策略矩阵，包括动态电子围栏生成、违规操作语音干预、应急撤离路径规划等功能，并将处理结果推送至移动监管终端。

机具管理方面引入载波相位差分技术（RTK）构建专项定位模块，构建起全方位、无死角的主动安全防护网络。前期系统可基于历史数据和实时环境数据预判不同作业场景下的安全风险点，并借助通过融合卫星实时信号与地面基准站差分校正数据，为管理人员掌握机具作业范围提供精准依据。该网络打破了传统机具管理中“事后处置”的被动模式，有效降低了安全事故发生率，形成全方位、无死角的主动安全防护网络<sup>[4]</sup>。

### 3 安全识别系统

#### 3.1 图像采集与智能处理

针对当前输电线路关键组件状态辨识精度不足、参数检测效率低下及易受环境干扰等难点，本文构建了基于几何特征匹配的对称性校验框架，获取瓷绝缘子钢脚形变、复合绝缘子材料特性等核心参数。

建立形变比对模型解析钢脚的偏移量、弯曲度等关键形变参数，同步引入高光谱成像技术，采用400~1 000 nm波段范围覆盖可见光至近红外光谱区，利用不同健康状态下材料对特定波段光谱的反射差异，捕获复合绝缘子表层材料的光谱反射特性变化。为解决线路挂接点空间定位难题，运用目标检测模型集成非接触式三维测量技术，规避传统接触式检测对线路运行造成的安全风险。

依托无人机平台搭建移动检测系统，采用光束法区域网平差算法进行空三加密处理，数据采集采用Z字形航线规划，构建多影像间的几何约束关系，生成的数字正射影像图；最终形成12万帧图像。基于“图像由入射光、反射光分量构成”的核心原理，灰度 $V_{gray}$ 转换函数定义为（灰度输出值为 $[0, 255]$ ）<sup>[5]</sup>：

$$V_{gray} = \frac{9798V_{red} + 19235V_{green} + 3735V_{blue}}{32768} \quad (1)$$

式（1）中， $V_{red}$ 为红通道的输入亮度值； $V_{green}$ 为绿通道的输入亮度值； $V_{blue}$ 为蓝通道的输入亮度值。

针对输入图像函数 $f(x, y)$ 的滤波处理任务，算法在以目标像素为中心通过精准界定邻域范围（ $S$ ）实现噪声抑制与图像保真度的动态平衡。依据空间邻近度与灰度相似度联合确定邻域内每个采样点的权值 $w(i, j)$ ，计算输出图像函数 $g(x, y)$ 需定义任意中心点 $(x, y)$ ，其邻域 $S$ 内的每个采样点通过坐标偏移量 $i$ 和 $j$ （表示相对于中心点的水平与垂直位移）定位，引入归一化因子：

$$g(x, y) = \left(\frac{1}{K}\right) \sum_{(i, j) \in S} w(i, j) f(x + i, y + j) \quad (2)$$

这种融合空间域与灰度域特征的加权滤波机制，传统滤波算法多采用固定权值或单一维度的权值分配策略，高斯噪声抑制效果有限，且无法适配复杂噪声分布场景。而该机制通过双维度权值自适应调整，通过降低噪声像素的权值实现自适应抑制，为后续关键组件状态辨识与参数检测的高精度实现提供了可靠的图像质量保障。

### 3.2 图像特征提取

在电力线路施工安全智能监测系统中，图像特征提取环节需解决复杂环境条件下的目标识别可靠性问题。针对光照强度变化、背景噪声干扰等影响因素，系统采用基于形态学优化的导线定位策略，通过将输电线路几何中心投影至成像平面坐标系原点，建立具有尺度不变性的透视变换校正模型。

基于动态反馈机制的参数调控体系实时采集图像序列的多维特征量，运用改进型 Canny 算子结合自适应阈值分割算法，有效抑制自然背景中植被、建筑等非目标区域的光谱响应，强化金属导体因高反射率形成的显著灰度梯度特征。当视场内存在平行架设的多回路输电线束时，系统依据导线空间分布的拓扑约束关系，构建斜率一致性验证矩阵，同步执行连通域分析和骨架精修算法。在此基础上实施的二值化处理遵循 OTSU 准则确定的最优分隔阈值  $T$ ，其数学表达式为<sup>[6]</sup>：

$$f(x,y)=\begin{cases} 255g(x,y)\geq T \\ 0g(x,y)<T \end{cases} \quad (3)$$

### 4 智能管控效果

针对南水北调中线工程 18 个月紧工期、3800 基地制化杆塔架设的核心需求，通过智能定位、安全识别与智能巡检系统协同构建全要素管控体系，实现安全管理从被动应对向主动防御转型，破解传统施工人员管控难、隐患识别滞后等痛点，管控指标对比如表 1 所示。智能定位系统融合 UWB 精确定位与惯性导航技术，达成亚米级定位精度，依托 LoRa+5G 低时延链路，将人员异常行为识别响应时间控制在 2 秒内；采用 RTK 技术实现施工车辆厘米级轨迹追踪，结合载重传感器构建风险模型，将危险驾驶发生率从 15% 降至 1.5% 以下，通过与智慧工地平台数据贯通，实现“人一机一环”实时管控。

安全识别系统整合改进型 YOLOv5s 模型与无人机五镜头倾斜摄影技术，构建厘米级实景三维模型，为 320 处跨渠节点监测提供支撑。通过 Retinex 自适应亮度均衡与改进双边滤波算法，规范图像动态范围并抑制干扰，预处理效率提升 40%；结合 OTSU 二值化分割算法，导线定位误差控制在 1 像素内，设备缺陷识别准确率达 85.24%（传统 60%），高风险区段设备失稳、空间冲突预警准确率 95%，规避水利设施与生态廊道破坏风险。

智能巡检系统通过车载设备与无人机协同，实现 1 200 公里线路全覆盖巡检，效率提升 3 倍，单条线路巡检耗时从 1.2 小时缩至 0.4 小时；依托 GPS/北斗定位

与射频码识别，杆塔定位误差  $\leq 0.5$  m，隐患发现率提升 75%，闭环时间缩至 12 小时内。量化数据显示，人员定位精度达  $\leq 0.8$  m，隐患响应时间  $\leq 2$  分钟（见表 1）。

表 1 管控指标对比

管控指标	传统管理方式	智能化管控方式
人员定位精度 (m)	约 5	$\leq 0.8$
设备缺陷识别准确率 (%)	60	$\geq 85.24$
单条线路巡检耗时 (小时 / 条)	1.2	0.4
施工车辆违规率 (%)	15%	$\leq 1.5\%$
隐患响应时间 (min)	30	$\leq 2$
百万工时长事故发生率 (次)	2.3	0.1
图像预处理效率 (秒 / 帧)	5	3
杆塔定位误差 (m)	2	$\leq 0.5$

### 5 结束语

本研究针对南水北调中线工程配套电力线路施工场景的复杂性与高风险特性，构建了基于多源信息融合的智能安全管控体系。通过集成 UWB 精确定位（亚米级精度）、惯性导航增强技术及改进型 Retinex 自适应亮度均衡算法，实现了施工人员与设备的全要素动态监测；采用改进 YOLOv5s 目标检测模型与无人机三维建模技术，解决了复杂光照环境下导线拓扑关系建模难题，设备缺陷识别准确率达 85.24%；依托 LoRa+5G 混合组网与时空大数据引擎，构建动态数字孪生模型，使隐患响应时间缩短至 2 分钟以内。

### 参考文献：

- [1] 冷传飞. 浅析电力线路施工质量控制及安全管理措施 [J]. 电力设备管理, 2025(01):205-207.
- [2] 花佳耀,程前. 智能控制技术在电力线路施工安全管控中的应用 [J]. 电子技术, 2024,53(11):248-249.
- [3] 靳雨柱,王民,刘洋,等. 电力线路施工的问题与安全管理策略分析 [J]. 大众标准化, 2024(21):39-41.
- [4] 李环宇. 电力线路施工中的质量控制与技术创新 [J]. 家电维修, 2023(12):54-57.
- [5] 许正利. 电力系统信息安全管理建设技术分析 [J]. 电工技术, 2024(S2):478-480.
- [6] 穆丽君. WAPI 无线通信技术在电力安全生产管理中的应用 [J]. 电工技术, 2024(S2):317-319.