

doi: 10.7690/bgzd.2025.01.009

基于前端智能感知的电力基建现场施工安全风险识别系统

李 贤, 吕 冰

(国网冀北电力有限公司信息通信分公司, 北京 100053)

摘要: 针对电力现场作业安全监督管理存在安全风险识别耗时较长的问题, 提出融合前端智能感知技术的电力基建现场施工安全风险识别系统。硬件方面, 进行了物联网前端感知设备和无人机飞行器设计; 软件方面, 依托于前端智能感知原理, 建立一个前端异构现场施工数据智能感知模块, 通过无人机搭载物联网前端感知设备, 高效采集电力基建现场的各种信息。在差分计算法的作用下提取异常感知数据, 再通过遗传算法进行异常修复。充分考虑电力基建现场各种风险因素, 确定施工安全风险评价指标, 与模糊聚类最大树算法相结合, 识别出施工安全风险级别。系统测试结果表明: 所提系统的风险识别时间平均值为 6.57 min, 为现场施工安全风险防范争取了更多时间。

关键词: 前端智能感知; 电力基建现场; 施工安全; 风险识别; 模糊聚类; 最大树算法

中图分类号: TU94 **文献标志码:** A

Safety Risk Identification System of Power Infrastructure Construction Based on Front-end Intelligent Perception

Li Xian, LYU Bing

(Jibe Information and Telecommunication Company of State Grid, Beijing 100053, China)

Abstract: In order to solve the problem of time-consuming safety risk identification in safety supervision and management of electric power field operation, a safety risk identification system for electric power infrastructure construction site is proposed, which integrates front-end intelligent perception technology. In terms of hardware, the front-end sensing equipment of the Internet of Things and the UAV aircraft are designed; in terms of software, based on the front-end intelligent sensing principle, a front-end heterogeneous site construction data intelligent sensing module is established, and various information of the power infrastructure site is efficiently collected through the front-end sensing equipment of the Internet of Things carried by the UAV. The abnormal sensing data are extracted by the differential calculation method, and then the abnormal data are repaired by the genetic algorithm. Fully considering all kinds of risk factors in the electric power construction site, the construction safety risk evaluation index is determined, and combined with the fuzzy clustering maximum tree algorithm, the construction safety risk level is identified. The system test results show that the average risk identification time of the proposed system is 6.57 min, which provides more time for the safety risk prevention of on-site construction.

Keywords: front-end intelligent perception; electric power infrastructure site; construction safety; risk identification; fuzzy clustering; maximum tree algorithm

0 引言

现代化建设步伐的加快, 使得电力成为百姓服务和城市运行的基础^[1]。近年来, 电力基建项目成倍增长, 电网覆盖范围也在逐渐扩大, 在施工环境越来越复杂、作业人员安全意识不足等因素的影响下, 电力基建现场施工安全风险问题也开始增多^[2]。实际施工建设过程中, 风险识别是安全防控的依据。为更好地保证人身及设备安全, 施工安全风险识别系统的设计势在必行。

文献[3]基于施工安全风险定义, 运用数理统计策略计算风险发生概率、风险发生损失, 再结合层次分析法和模糊综合评价法, 得到施工安全风险识

别结果, 但该系统的风险识别效率较低。文献[4]提出基于贝叶斯理论的风险识别系统, 确定施工风险识别指标, 通过动态赋权修正方法为每个指标赋予对应权重系数, 汇总所有指标评分结果, 再引入得分均衡度理论, 实现安全风险识别, 但该方法识别结果准确度不高。文献[5]针对风险评估问题建立对应的评估指标体系, 通过熵值法确定指标权重, 再结合以可拓理论为基础的风险量化评估模型, 获取施工安全风险识别结果, 但该方法识别结果主观性较强。

上述识别方法均存在不足之处, 无法满足电力基建现场施工安全风险识别要求。笔者以降低安全

收稿日期: 2024-07-12; 修回日期: 2024-08-09

第一作者: 李 贤(1983—), 男, 内蒙古人, 博士。

风险识别耗时为目标，提出融合前端智能感知的识别系统。

1 风险识别系统硬件

1.1 物联网前端感知设备

物联网前端感知设备是获取施工现场感知数据的基础，笔者设计的物联网前端感知设备主要包括 4 个硬件结构，如图 1 所示。

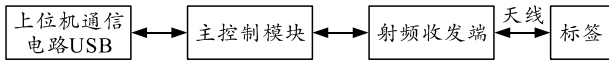


图 1 物联网前端感知设备主要结构

按照上图构建物联网前端感知设备，其射频收发端应用的芯片为 AS3992；此外，该结构内还包括信号隔离电路、信号放大电路和解调电路。而主控制模块主要包括一个主控制器，主要负责进行数据处理和数据通信。

1.2 无人机飞行器

为提升智能感知数据采集速度，笔者提出应用无人机飞行器搭载物联网前端感知设备，获取电力基建现场施工数据。其中，本系统选用的无人机飞行器为四旋翼无人机，其自带飞行控制器和 GPS 模块，可以实现无人机按路线稳定飞行和 GPS 导航飞行，以便全方位、多角度采集现场施工数据。

物联网前端感知设备和无人机飞行器设计结束后，完成了安全风险识别系统主要硬件的设计，在硬件的支撑下进行软件设计。

2 风险识别系统软件

2.1 建立电力基建现场前端智能感知模块

为提升施工安全风险识别速度，笔者建立了一个前端智能感知模块，应用以物联网为基础的异构前端感知设备^[6]，快速采集电力基建现场施工信息。前端智能感知设备本体框架如图 2 所示。

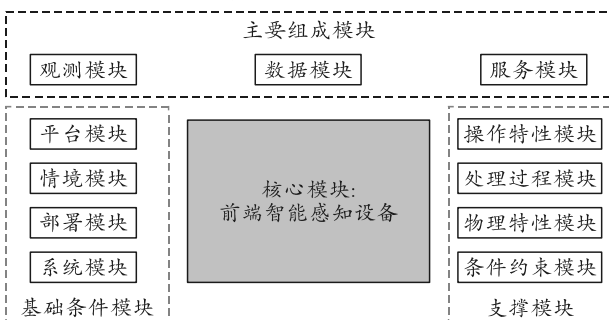


图 2 前端智能感知设备本体框架

上图中，前端智能感知设备本体框架中的核心模块为物联网前端智能感知设备，也是整个本体框

架中各个模块的连接桥梁^[7]，在无人机行驶过程中，能快速采集施工区域的现场数据。除核心模块外，该框架内 HIA 存在主要组成模块、基础条件模块、支撑模块 3 个子模块。

基建现场施工信息的前端智能感知，需要在多种传感器的共同作用下实现，而其中视频传感器始终处于核心地位，视频数据是现场施工安全风险识别的最可靠依据。笔者建立的电力基建现场前端智能感知模块，采用了视频感知器如图 6 所示。

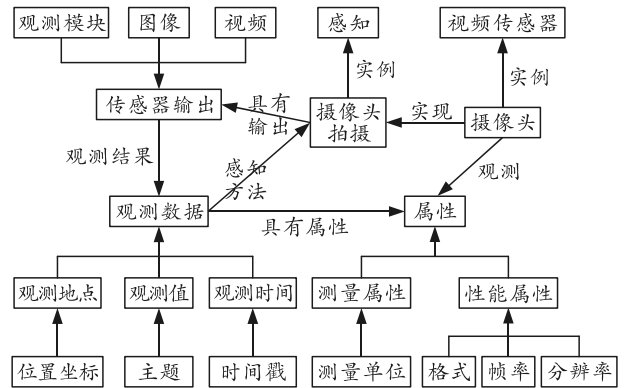


图 3 视频传感器感知模式

结合图 2 确定图 3 为视频传感器智能感知本体模型，其描述了视频传感器的感知全过程，输出可能为视频格式、图像格式或是音频格式的感知数据，作为后续施工安全风险识别的基础。

2.2 设计现场施工感知数据处理方案

考虑到当前电力基建项目现场施工环境越来越复杂，使得前端智能感知数据中极易出现异常数据，影响安全风险识别的准确性，为避免这种情况，笔者提出运用差分计算法对感知数据进行异常修复处理。运用一阶减法前向差分、相邻 2 项求和算法^[8]对采集的感知数据进行深入分析，确定数据的差分特征值和求和特征值：

$$\left. \begin{aligned} D_{u-1} &= x_u - x_{u-1} \\ D_u &= x_{u+1} - x_u \\ S_{u-1} &= x_u + x_{u-1} \\ S_u &= x_{u+1} + x_u \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： u 为电力基建现场施工感知数据样本； x 为感知数据点； D 为差分特征值； S 为求和特征值。

设置差分特征和求和特征分别作为横、纵坐标，绘制感知数据特征点的 2 维散点图。再采用无监督学习算法进行异常检测，根据离群因子与 1 的距离，判断该数据点是否存在异常，异常点判断过程如图 4 所示。

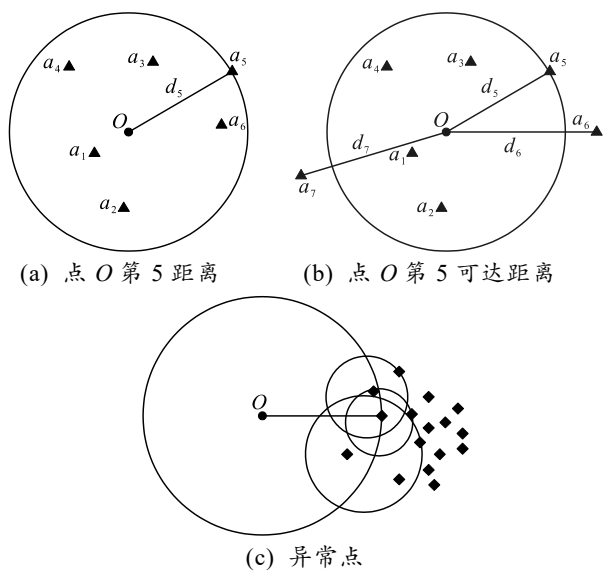


图 4 异常点与距离

如图 4(a)所示, 点 a_5 在圆圈的边界位置上, 与点 O 之间距离最远, 定义 d_5 为第 5 距离。再确定点 O 与点 a_5 的连接距离, 确定点 O 的第 5 可达距离, 如图 4(b)所示, 此时 a_7 与 a_6 所在位置超出了第 5 可达距离。设置标准距离为 3, 此时各数据点的分布情况如图 4(c)所示, 当前点 O 属于局部离群因子, 与其他点之间的距离远大于 1, 则可以判断该点存在异常的概率极大。

在完成异常数据点判断后, 笔者采用遗传算法进行迭代计算, 将所有感知数据转换为二进制编码, 通过搜索适应度最大值、自然选择、交叉操作、变异操作等环节, 对异常感知数据进行修复。

2.3 选取施工安全风险评价指标

施工安全风险影响因素的提取, 是完成风险识别的基础, 为充分考虑电力基建现场施工各项元素之间的互相影响, 笔者提出深入分析施工现场环境, 选取施工安全风险评价指标^[9]。首先, 根据异常修复后所有的感知数据, 建立数据集。再针对各样本信息中存在的量化指标, 建立初始数据矩阵:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{B} 为初始数据矩阵; n 为评价对象数量; m 为施工安全风险量化指标数量; b_{nm} 为第 n 个对象的第 m 个指标值。

在推理出初始数据矩阵后, 为了解不同风险指标之间的关联性, 通过绝对值减数法构建模糊相似

矩阵, 并结合电力基建现场施工实际情况, 确定相似度计算数学公式:

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 1 - \tau \times \sum_{l=1}^n |b_{li} - b_{lj}| & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

式中: i, j 为随机选取的 2 个风险指标; λ 为相似度; τ 为聚类参变量; l 为评价对象。

而后, 运用平移-极差变化策略^[10], 对每一项风险指标进行处理, 确定不同施工安全风险评价指标的重要程度。在最大树算法的作用下, 对所有风险指标样本进行分类, 并将样本分类的期望信息表示为:

$$\eta = - \sum_{q=1}^Q p_q \log_2(p_q) \quad (4)$$

式中: η 为期望信息; q 为随机样本类; Q 为风险类别数量; p 为样本类属于某个风险的概率。

考虑到电力基建现场施工环境较为复杂, 其安全风险识别涉及很多方面的内容, 在明确不同因素对风险等级识别结果的作用后, 确定风险指标评价数学公式:

$$E = \sum_{k=1}^K w_k h_k \quad (5)$$

式中: E 为施工风险评价指数; k 为风险元素; K 为施工风险元素总数量; w 为权重系数; h 为影响值函数。

2.4 识别电力施工安全风险级别

在确定施工安全风险评价指标后, 笔者采用模糊聚类最大树算法, 对所有的评估指标进行分离, 明确不同风险元素之间的交互影响作用。其中, 风险影响匀速的权重计算公式为:

$$w_k = (\psi_k + R_k) / \left(2 \sum_{k=1, t=1}^K X_{kt} \right); \quad (6)$$

$$\psi_k = \sum_{t=1}^K X_{kt}; \quad (7)$$

$$R_k = \sum_{t=1}^K X_{tk} \quad (8)$$

式中: k, t 为风险元素; ψ, R 为影响和; X_{kt} 为风险识别过程中元素 k 对元素 t 的作用带来的影响; X_{tk} 为指标评价系统应用时元素 t 对元素 k 的作用带来的影响。

确定元素权重后, 结合模糊相似矩阵、施工安全风险评价指标, 应用最大树算法对初始数据矩阵

中包含的所有风险元素排列起来,形成最大树结构,其可以表示为无向连通赋权图形式:

$$\xi=(X, \lambda_{ij}) . \quad (9)$$

式中 ξ 为基于最大树算法的无向连通赋权图。

针对上述建立的最大树结构进行分析,明确最大树的截割水平,再次将最大树结构划分为多个子结构,将具有相同特征,能够相互连通的顶点分为一类,基于此得出施工安全风险级别。

3 系统测试

笔者针对以电力基建项目为研究对象,针对现场施工安全风险识别要求,提出以前端智能感知技术为核心的识别系统。为证明该系统具有良好的应用效果,对所提系统进行施工安全风险识别测试。

3.1 系统设计

选择某正在建设的 220 kV 输变电工程,作为本次系统测试对象。该电力基建工程建设区域的平均海拔高度和最大高度差分别为 300、175 m,预期施工长度为 180 km。考虑到该施工场景中覆盖的植被密度较高,使得整体现场施工难度成倍增长,随之而来的就是施工安全风险问题频繁发生。将本文中研究内容应用到该工程管理过程中,在 windows 2010 操作系统的基础上,应用 64 位网络操作系统,建立基于前端智能感知的电力基建现场施工安全风险识别系统。安全风险识别系统开发完成后,得到系统登录界面和项目管理界面如图 5 所示。



(a) 系统登录界面

电力基建现场施工安全风险识别系统						
项目管理	风险报警	电子地图查询	用户管理	退出		
项目名称:	<input type="text"/>	标段:	<input type="text"/>	时间:	<input type="text"/>	<input type="button" value="查询"/> <input type="button" value="添加"/> <input type="button" value="修改"/> <input type="button" value="删除"/>
项目编号	项目标段	开工时间	工期	负责人	联系电话	项目状态
1	III标段	2022/8/5	150	程似强	18613772926	施工中
2	II标段	2022/8/10	170	程似强	18613772926	施工中
3	I标段	2022/8/1	150	程似强	18613772926	施工中
4	II标段	2022/8/10	157	程似强	18613772926	施工中
5	输电部分	2022/8/14	175	韩凯	18696661422	施工中
6	通信部分	2022/8/20	175	韩凯	18696661422	施工中

(b) 项目管理界面

图 5 系统登录、项目管理操作界面

图 5(b)所示的项目管理界面,汇总了该电力基建工程的所有重点建设子项目,依次开展安全风险识别工作。

3.2 安全风险识别结果展示

由于笔者设计系统采用无人机搭载前端智能感知设备的方式,采集现场施工信息。为保证安全风险识别的全面性,本次安全风险识别测试从规划飞行器巡检航线开始,并在该航线上布置多个监测点,确保该路线可以全面覆盖电力基建施工区域,飞行器巡检航线规划结果如图 6 所示。

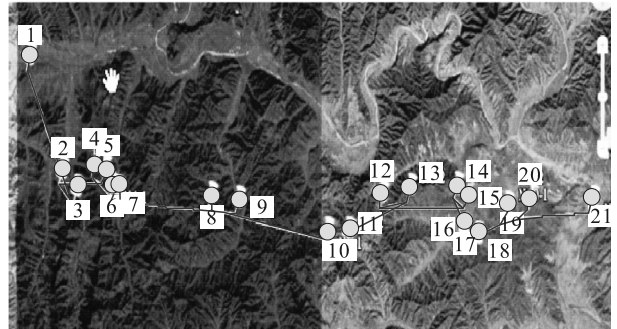


图 6 飞行器巡检航线

按照上图所示的路线驱动无人机,通过其上安装的前端智能感知设备采集现场施工信息,并将其传回系统,经过系统进行简单处理后,得到图 7 所示的现场施工图像,从这些图像中可以了解工程施工进度。再根据其他低空飞行传回的感知信息,作为本次系统测试所需的基础数据,进行施工安全风险识别。



图 7 电力基建现场施工图像

应用该系统进行一段时间的施工安全风险识别,选取 2022 年 9 月 10 日到 2022 年 9 月 17 日一周的风险识别结果,明确该周期内同工发送了 30 次风险预警信息,而每次预警对应的风险识别级别

如图 8 所示。

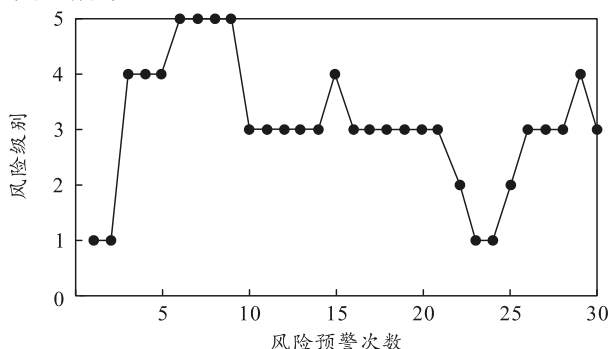


图 8 电力基建现场施工安全风险识别结果

上图中，风险级别 1~5 分别对应微弱风险、弱风险、中风险、强风险、高强风险。在选定时间范围内出现的 30 次施工风险预警中，微弱风险预警次数为 4，次弱风险预警次数为 2 次，中风险、强风险和高风险预警次数分别为 15、5 和 4 次。综上所述，采用笔者设计的安全风险识别系统，可以实现电力基建现场施工风险的准确识别和预警。

3.3 系统风险识别时间分析

为表明该系统在施工安全风险识别中具有优越性，应用部分感知数据对该系统进行 10 次安全风险识别测试，并记录每一次系统风险识别时间，得到如表 1 所示的统计结果。

表 1 系统风险识别时间统计结果 min

实验次数	风险识别时间	实验次数	风险识别时间
1	6.59	6	6.50
2	7.02	7	4.13
3	7.00	8	7.91
4	7.89	9	5.34
5	8.13	10	5.14

根据上表可知：在 10 次施工安全风险识别测试中，风险识别时间最长为 8.13 min，最短仅为 4.13 min，而整体来看，系统的安全风险识别平均值为 6.57 min，相比常规系统识别耗时得到大幅降低。究其原因，在于笔者采用了前端智能感知技术，可在短时间内得到全面、高质量的施工现场数据；因此，所提出系统的应用可更快识别施工安全

风险，提升电力基建施工的安全性。

4 结束语

以加强电力基建施工安全为目标，笔者提出结合前端智能感知技术的施工安全风险识别系统。该系统结合了现代化技术和标准化要求，使得风险识别效率得到大幅提升，表明其在电力现场施工安全监督工作中可以发挥巨大的作用。

参考文献：

- [1] 蒙国往, 黄劲松, 吴波, 等. 城市轨道交通建设工程施工安全风险信息化系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 90-95, 99.
- [2] 张楠. 大直径空推法盾构隧道施工风险模糊综合评判[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 364-369.
- [3] 蒙国往, 黄劲松, 吴波, 等. 基于数理统计的地铁车站深基坑施工风险评估[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 55-60.
- [4] 翟越, 杜菁, 高甲艳. 基于改进贝叶斯网络的高处作业施工风险评价方法[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(2): 541-549.
- [5] 吴波, 黄惟, 陈辉浩, 等. 基于熵权-可拓理论的瓦斯隧道施工安全风险评估[J]. 中国科技论文, 2022, 17(1): 99-104.
- [6] 蒋红妍, 张芳. 基于熵权物元法的旧工业建筑再生利用施工安全风险评价[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2378-2385.
- [7] 方俊, 郭佩文, 朱科, 等. 基于 N-K 模型的地铁隧道施工安全风险耦合演化分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 1-9.
- [8] 吴波, 赵睿, 蒙国往, 等. 基于模糊理论的地铁深基坑非对称施工安全风险评估[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 8-15.
- [9] 施洲, 刘东东, 纪锋, 等. 超大型沉井基础的施工风险评估[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1241-1249.
- [10] 陈大川, 王孜, 郭健. 基于模糊层次分析法的建筑物整体平移施工风险评估[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 57-65.