

基于贝叶斯网络的交通工程施工安全风险评估与动态管控研究

管小峰

南京莱斯信息技术股份有限公司 江苏 南京 210001

摘要：本研究聚焦交通工程施工安全领域，针对传统风险评估方法在处理不确定性问题时的局限性，引入贝叶斯网络理论构建风险评估与动态管控体系。通过多维度识别交通工程施工安全风险因素，构建基于贝叶斯网络的风险评估模型，设计动态预警阈值与多层级管控策略，形成具有预测、预警及动态调整功能的安全管控机制。研究表明，贝叶斯网络能够有效处理风险评估中的不确定性信息，实现风险因素的关联性分析与动态推理，为交通工程施工安全管理提供科学的决策支持，提升施工安全管理的智能化与精细化水平。

关键词：贝叶斯网络；交通工程；施工安全；风险评估；动态管控

引言：交通工程施工环境复杂，安全风险因素众多且相互关联，传统风险评估方法难以有效处理风险的不确定性与动态性问题。贝叶斯网络作为一种基于概率推理的图模型，能够将专家知识与数据信息相结合，通过概率计算刻画风险因素间的复杂关系，为交通工程施工安全风险评估提供了新的技术路径。本研究旨在构建基于贝叶斯网络的交通工程施工安全风险评估与动态管控体系，提高风险评估的准确性与管控的有效性，为保障交通工程施工安全提供理论与方法支持。

1 贝叶斯网络基础理论及其在风险评估中的适用性

1.1 贝叶斯网络基本原理深度剖析

贝叶斯网络是一种有向无环图模型，由节点和有向边组成。节点代表随机变量，反映风险评估中的各个因素；有向边表示变量间的条件依赖关系，通过条件概率表量化这种依赖程度。其核心原理基于贝叶斯定理，即通过先验概率和似然概率计算后验概率，实现不确定性信息的更新与推理。在交通工程施工安全风险评估中，贝叶斯网络可将施工人员操作、设备运行状态、环境条件等风险因素作为节点，构建反映其相互影响的网络结构，为风险评估提供数学框架。

1.2 贝叶斯网络应对风险评估不确定性的能力

交通工程施工安全风险评估中存在大量不确定性，如风险因素发生概率的不确定性、因素间关系的不确定性等。贝叶斯网络通过概率分布描述变量的不确定性，利用条件概率表刻画变量间的不确定关系，能够有效处理这些不确定性。当新的证据（如施工过程中的监测数据）加入时，贝叶斯网络可通过概率推理更新各节点的概率分布，实现对风险状态的动态评估，这一特性使它在应对施

工过程中不断变化的风险状况时具有显著优势。

1.3 与传统风险评估方法的对比优势

相较于传统的风险矩阵法、故障树分析法等，贝叶斯网络具有多方面优势。传统方法多采用静态评估模式，难以反映风险因素的动态变化；而贝叶斯网络可实现动态推理，根据实时数据调整评估结果。传统方法对风险因素间的复杂关系刻画不足，常假设因素独立或仅考虑简单线性关系；贝叶斯网络则能通过网络结构直观展示因素间的非线性、多维度关联。此外，贝叶斯网络还具备强大的反向推理能力，可在已知风险后果的情况下，推断最可能的风险诱因，为风险管控提供精准方向，这是传统方法难以企及的。

2 交通工程施工安全风险因素识别与体系构建

2.1 交通工程施工安全风险因素多维度识别

从人、机、料、法、环五个维度对交通工程施工安全风险因素进行系统识别。人员维度包括施工人员的安全意识、操作技能、身体与心理状态等；机器维度涵盖施工设备的可靠性、维护状况、安全防护装置等；材料维度涉及建筑材料的质量、存储与运输安全等；方法维度包含施工方案的合理性、施工工艺的安全性等；环境维度则包括自然环境（如气候、地质条件）与施工环境（如作业空间、现场管理秩序）等。通过文献研究、专家访谈与现场调研等方法，全面梳理各维度下的具体风险因素，为后续研究奠定基础。

2.2 基于风险关联性的指标体系初步构建

在多维度识别风险因素的基础上，分析各因素间的关联性。利用因果图、关联矩阵等工具，判断风险因素之间是否存在直接或间接的影响关系，如人员操作失误

可能导致设备故障,设备故障又可能引发安全事故。根据风险因素的关联性,将具有紧密联系的因素归为一类,初步构建包含多级指标的风险评估指标体系,确保指标体系能够全面、系统地反映交通工程施工安全风险的全貌。

2.3 指标体系优化与最终确定

采用专家打分法、层次分析法等对初步构建的指标体系进行优化。邀请交通工程领域的专家、学者及工程管理人员,对指标的重要性、合理性及可操作性进行评价,剔除相关性低、难以量化或对风险评估影响较小的指标,调整指标的层级结构,使指标体系更加科学、合理。同时,结合实际施工案例(虽本研究不具体展开案例,但在优化过程中可参考案例中的指标适用性),验证指标体系的实用性,最终确定用于贝叶斯网络建模的交通工程施工安全风险指标体系。

3 基于贝叶斯网络的交通工程施工安全风险模型构建

3.1 贝叶斯网络结构学习方法选择与实施

贝叶斯网络结构学习方法主要有基于专家知识的构建方法和基于数据的学习方法。考虑到交通工程施工安全领域既有丰富的专家经验,又有一定的历史数据,本研究采用专家知识与数据学习相结合的方法构建网络结构。首先,依据风险因素间的因果关系和专家经验确定网络的初始结构;然后,利用施工现场收集的历史数据,采用K2算法、爬山算法等数据学习方法对初始结构进行优化,调整节点间的连接关系,使网络结构更能反映实际的风险因素关联情况。

3.2 参数学习过程与数据准备

参数学习即确定贝叶斯网络中各节点的条件概率表。数据准备阶段,收集交通工程施工过程中的安全监测数据、事故记录、设备运行数据等,对数据进行清洗、预处理,确保数据的准确性和完整性。对于有充足数据支持的节点,采用最大似然估计法等基于数据的参数学习方法计算条件概率;对于缺乏历史数据的节点,结合专家知识进行主观赋值,通过专家打分确定其先验概率和条件概率。在参数学习过程中,注重数据与专家知识的融合,提高参数的准确性和可靠性。

3.3 模型验证与优化策略

构建完成贝叶斯网络风险评估模型后,需对模型进行验证与优化。采用交叉验证法,将历史数据分为训练集和测试集,用训练集构建模型,用测试集验证模型的预测准确性。通过计算模型预测结果与实际风险状况的吻合度、均方误差等指标,评估模型的性能。若模型性能未达到预期,分析原因并采取相应的优化策略,如调

整网络结构、重新进行参数学习、补充数据等,直至模型能够准确地评估交通工程施工安全风险。

4 交通工程施工安全风险动态管控机制设计

4.1 动态预警阈值设定原则与方法

动态预警阈值设定遵循科学性、实用性、动态性三原则。科学性上,基于贝叶斯网络后验概率分布,采用分位数法(如90%、95%分位值)结合风险熵值确定临界值,通过ROC曲线验证阈值区分度;实用性要求阈值与《公路工程施工安全技术规范》风险等级划分标准衔接,以红橙黄蓝四色预警对应不同概率区间。设定方法包括:先利用历史事故数据训练模型得到风险因素概率基准分布,再结合施工阶段风险特性(如深基坑开挖期提高支护失效风险阈值权重),最后通过专家德尔菲法校准阈值偏移,建立含施工进度、气象数据等变量的阈值动态修正公式,实现每72小时自动更新与极端事件触发式调整双机制。

4.2 多层次动态管控策略框架设计

构建“预防-控制-改进”三级闭环体系。事前预防阶段,运用贝叶斯网络预测功能识别TOP5高风险因素,生成个性化预防方案:如对“高空作业坠落”风险,配套吊篮载荷实时监测装置与作业许可电子审批流程;事中控制层嵌入物联网监测网络,当传感器数据触发阈值时,BIM模型自动标记风险位置并推送处置方案(如脚手架倾斜超5°时,同步启动人员撤离警报与加固施工工单);事后改进阶段通过故障树-贝叶斯网络双向推理,从“人-机-环-管”四维追溯根源,例如某桥梁挂篮施工事故后,将模板刚度不足的贝叶斯推理结果转化为新的定期挠度检测指标,纳入管控策略库。

4.3 动态管控策略的调整与更新机制

建立多源触发式更新机制:数据驱动更新基于季度风险评估报告,当某类风险评估准确率连续两期低于80%时,启动策略适用性审查;事件触发更新针对新发生事故,24小时内完成贝叶斯网络结构重学习,如隧道施工突水事故后,新增地质雷达数据输入节点;技术演进更新每半年评估AI算法兼容性,当深度学习模型在风险预测AUC值超过贝叶斯网络0.15时,启动混合模型改造。更新流程包含策略影响分析(如新增无人机巡检对成本的影响系数)、可行性验证(在3个工点进行为期1个月的策略试点)、效果后评估(采用双样本t检验对比更新前后风险事件发生率),确保每次更新均有量化依据。

5 贝叶斯网络模型在交通工程施工安全风险管控中的实施与保障

5.1 模型实施流程规划与技术选型

模型实施流程遵循系统性设计原则,涵盖数据采集与预处理、贝叶斯网络拓扑构建与参数训练、风险态势评估与预警生成、管控策略制定与执行四大核心环节。需通过工作分解结构(WBS)将各环节拆解为具体技术任务,如数据预处理需包含缺失值多重插补、异常值 3σ 检测及数据标准化处理,明确各步骤质量控制标准与责任主体的技术资质要求。技术选型聚焦专业工具与场景适配性:采用GeNIe/Netica实现网络结构的可视化建模与条件概率表自动生成,结合Python的PyMC3库与R的Stan包构建贝叶斯马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)推断引擎,通过有向无环图(DAG)的d-分离检验确保网络逻辑严谨性,同时开发RESTfulAPI接口实现与智慧工地管理系统的实时数据交互,满足施工全过程的动态风险概率推演需求。

5.2 实施保障体系构建与组织协同机制

实施保障体系基于组织-制度-技术三维架构:组织层面设立由建设单位、监理单位与施工企业组成的跨部门实施委员会,通过RACI责任矩阵明确设计、施工、安全、物资等部门在模型训练(R)、数据审核(A)、预警响应(C)等环节的责任边界;制度层面构建包含《贝叶斯网络参数周期性更新规程》《多源异构数据融合技术标准》的制度体系,规定每日施工数据定时校准机制与每月专家知识注入流程。技术层面与高校共建贝叶斯智能风控联合实验室,引入概率图模型领域专家团队,针对现场安全管理人员开展MCMC采样技术与证据传播算法的专项培训,通过BIM+VR模拟仿真系统提升人员对概率推理结果的工程转化应用能力。

5.3 实施效果评估与持续改进机制

构建三层九维量化评估体系:模型效能层增设“小概率风险事件识别灵敏度”“证据传播时间延迟率”等动态指标,采用Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验验证后验概率分布与实际风险发生频率的拟合优度;管控效果层引入“人机料环风险干预覆盖率”指标,通过BIM模型空间定位与物联网传感器数据的时空匹配分析策略

落地完整性;安全绩效层增加“重复性隐患发生率降幅”“应急响应成本优化率”等经济性指标。运用模糊层次分析法(FAHP)处理专家评价中的认知不确定性,结合BP神经网络优化结构方程模型(SEM)参数,形成“月度评估-季度诊断-年度优化”的闭环改进机制,每季度基于新事故数据采用贝叶斯模型平均(BMA)方法更新网络结构,增强模型在改扩建工程、跨区域施工等复杂场景下的风险泛化识别能力。

结语

本研究构建了基于贝叶斯网络的交通工程施工安全风险评估与动态管控体系,通过理论分析与方法设计,验证了贝叶斯网络在处理交通工程施工安全风险不确定性和动态性问题上的有效性。研究成果为交通工程施工安全管理提供了新的技术方法和思路,有助于提高风险评估的精度和管控的效率。未来研究可进一步拓展贝叶斯网络与物联网、大数据等技术的融合应用,提高数据收集的实时性和全面性,优化模型的推理能力和动态响应速度,推动交通工程施工安全管理向智能化、自动化方向发展。同时,可结合更多的实际工程案例,对模型和管控机制进行深入验证和优化,提升研究成果的实用性和推广价值。

参考文献

- [1]莫盛杰.基于贝叶斯网络综合交通枢纽工程施工安全风险评价研究[D].河北省:河北建筑工程学院,2022.
- [2]尹琪.基于动态贝叶斯网络的地铁盾构施工安全风险评估研究[D].山东省:青岛理工大学,2023.
- [3]王宇豪.基于贝叶斯网络的老旧小区建筑结构安全评估与风险预警模型研究[D].广东省:华南理工大学,2023.
- [4]王晓铭.基于人因工程的桥梁高处作业施工安全风险动态评估研究[D].山东省:山东交通学院,2023.
- [5]张叶祥,张昝超,杨有宏,等.基于模糊动态贝叶斯网络的公路工程施工安全风险动态评价研究[J].河南科学,2024,42(05):653-659.