 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i5.10273

Safety Risk Assessment of Urban Viaduct Construction Based on FTA-FBN

Zhirui Ouyang Chunming Qi

Nanhua University, Hengyang, Hunan, 421000, China

Abstract

To reduce safety accidents during viaduct construction in complex urban traffic areas, an FTA-FBN-based risk assessment model is developed. Risk factors are identified from six aspects—man, machine, material, method, environment, and management—to construct a fault tree (FTA), which is then mapped to a Bayesian network (BN). Trapezoidal fuzzy numbers and the Noisy-or Gate model are introduced to optimize node probabilities, leveraging expert experience while reducing subjectivity. The model is validated through a viaduct project in Guangzhou. Results show that unreasonable design drawings, violation of construction regulations, poor site and surrounding environment, unauthorized construction, and substandard component quality significantly affect accident occurrence. Targeted control measures should be developed for these key risks to reduce the accident rate.

Keywords

viaduct; fault tree analysis; bayesian network; trapezoidal fuzzy number; Noisy-or Gate model

基于 FTA–FBN 城市高架桥施工安全风险评价

欧阳枝蕊 綦春明

南华大学，中国·湖南 衡阳 421000

摘　要

为降低城市交通复杂区域高架桥施工安全事故发生率，构建基于FTA-FBN的城市高架桥施工安全风险评价模型，在人、机、料、法、环、管六个方面识别风险因素构建施工安全风险故障树（FTA），并将其映射为贝叶斯网络（BN）。分别引入梯形模糊数和Noisy-or Gate模型来优化贝叶斯网络中的节点概率，该方法在充分利用专家经验的同时避免了专家判断的主观性。以广州市某高架桥项目为例，验证模型的合理性。结果表明，图纸设计不合理、违章施工、施工区域及周边环境不佳、擅自施工、构建质量不合格等对安全事故发生的影响较大，应针对关键风险制定有效的管控措施，减少事故发生率。

关键词

高架桥；故障树；贝叶斯网络；梯形模糊数；Noisy-or Gate模型

1 引言

随着我国经济快速增长，交通需求大幅增加，传统平面路网已难以满足出行需要，高架道路系统在国内外的应用日益广泛。高架道路施工面临多种安全风险，一旦发生事故，往往危害大、后果严重。因此，构建科学的高架道路施工安全风险评价模型，对有效防控风险、保障工程顺利实施具有重要意义。

在施工安全风险方面，王连广等 [1] 通过改进层次分析法计算指标权重来评估桥梁施工风险等级，消除了传统赋权模式的主观性。陈士通等 [2] 通过三值耦合辨识出最大风险源，为复杂艰险地区大跨桥梁安全风险评价提供理论支撑和方法借鉴。刘永莉等 [3] 通过专家对样本数据预处理以及 BP 神经网络对样本进行训练，为高铁桥梁项目的施工风险等级评估提供方法借鉴。Wu, Han 等 [4] 提出了基于 CRITIC-TOPSIS 方法识别出工程关键技术方案以及最大关键技术。但这些方法主观性都较强且无法处理事故复杂因果关系，较难得出较为准确的结果，存在一定的局限性。[5][6]

【作者简介】欧阳枝蕊（1999–），女，中国湖南衡阳人，硕士，从事工程管理与灾害防治研究。

【通讯作者】綦春明（1965–），男，中国湖南衡阳人，硕士，教授，从事工程管理与灾害防治研究。

2 研究方法

2.1 风险识别

通过阅读相关文献以及查找相关事故的调查报告，借鉴全面质量管理中 4M1E 五个方面，同时结合管理因素，分析高架桥施工特点得到了影响高架桥施工的六个方面因素。

2.2 风险分析

利用故障树（FTA）直观的结构为构建贝叶斯网络（BN）奠定基础，借助 BN 强大的推理能力，突破 FTA 的假设限制，实现动态、双向的不确定性分析。

2.2.1 故障树模型构建

故障树分析法主要用事件符号、逻辑门及转移符号描述事件发生的潜在原因及其内在的逻辑。在建树时，将致因因素按照逻辑关系分成中间事件和底事件，各类事件通过“与”、“或”门等逻辑关系连接 . 本文以故障树分析法为基础，将城市高架桥施工安全事故设为顶事件，中间事件由人、机、料、法、环、管六方面因素构成，底事件为识别出的 26 个二级风险。绘制出的故障树如图 1 所示。

2.2.2 贝叶斯网络模型节点概率优化

贝叶斯网络是一种用于描述随机变量间条件依赖关系的概率图模型。贝叶斯节点概率包括先验概率和条件概率，先验概率指基本事件的发生概率，条件概率反映节点间的相互影响关系。通过问卷采集专家意见，并利用梯形模糊函数进行模糊化处理，等级对应参数如表 1 所示。

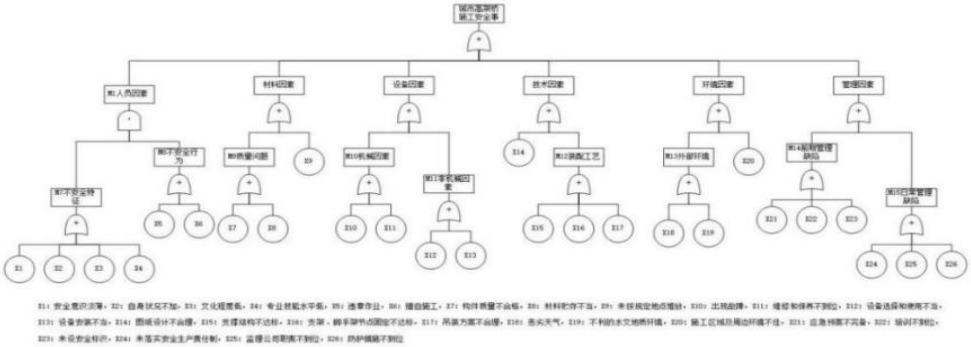


图 1 高架桥施工安全风险故障树

表 1 关于城市内高架桥施工安全风险等级对应模糊数

发生概率的水平	梯形模糊数	发生概率的水平	梯形模糊数
SL(极其低概率发生)	(0, 0, 0.02, 0.04)	MH(较高概率发生)	(0.4, 0.5, 0.6, 0.7)
VL(非常低概率发生)	(0, 0.1, 0.2, 0.3)	H(很高概率发生)	(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)
L(很低概率发生)	(0.1, 0.2, 0.3, 0.4)	VH(非常高概率发生)	(0.6, 0.7, 0.8, 0.9)
ML(较低概率发生)	(0.2, 0.3, 0.4, 0.5)	SH(特别高概率发生)	(0.7, 0.8, 0.9, 1)
M(一般概率发生)	(0.3, 0.4, 0.5, 0.6)	TH(极其高概率发生)	(0.8, 0.9, 1, 1)

获得相应的专家评分模糊数后，计算其算数平均值来获得模糊先验概率值 p_1。根据计算得到的模糊先验概率值，运用均值面积法计算其算数平均值来获得具体模糊先验概率值 p_2。再将先验概率值 p_2 通过公式 (1) 运用质心法去模糊转换为相关节点的模糊概率值 FPR, 作为最终的先验概率。

$$FPR=\begin{cases}0, & p_2=0\\ \dfrac{1}{10^k}, & p_2\neq 0, k=2.301\times\left(\dfrac{1-p_2}{p_2}\right)^{\frac{1}{3}}\end{cases} \quad (1)$$

为处理 n 个父节点共同作用于一个子节点的情形，引入 Noisy-or Gate 模型对条件概率进行修正。在模型中，设子节点 Y 有 n 个二值父节点 $X_1,X_2,...X_n$, 每个父节点 X_i 的激活概率 p_i。子节点 Y=1 的条件概率：

$$P(Y=1 \mid X_1,X,\ldots,X_n)=1-\prod_{i=1X_i=1}^{n}(1-p_i) \quad (2)$$

3 案例分析

与专家进行商讨制定最终风险清单。在 GeNIe2.1 中建立贝叶斯网络结构，邀请专家对节点概率评分，通过多次修正，将最终的节点概率数据输入贝叶斯仿真软件中进行推理计算，就可以得到顶事件发生概率。

3.1 工程概况

以广州市某立交桥为例，采用原位拆除重建方案，改造长度约 840m，包括拆除既有桥、新建双向四车道桥梁，对上下桥位衔接段地面道路及两侧地面辅道进行改造，新建桥梁全长 523.3m。

3.2 网络结构模型参数确定

邀请 7 名专家对所有父节点评分，以节点 X6、X7 为例，计算所得 FPR 如表 2 所示。

表 2 父节点先验概率

节点序号	专家序号								
	1	2	3	4	5	6	7	P_i^1	FPR
X6	MH	MH	M	M	L	MH	H	2.3230	0.00475
X7	VH	H	VH	VH	VH	VH	ML	1.7937	0.01608

在计算条件概率时，通过专家评分计算出激活概率 p_i，再用 Noisy-or Gate 模型来修正条件概率，以节点 M6 为例，计算出不同条件下的条件概率如表 3 所示。其余各节点的条件概率都可通过此方法修正。

表 3 节点 M6“管理因素”条件概率表

M14	M15	P(M6=1)	P(M6=0)
1	0	0.4643	0.4643
0	1	0.5357	0.5357
1	1	0.7513	0.2487

3.3 贝叶斯网络模型推理

将最终获得的节点概率数据输入到贝叶斯仿真软件，如图 2 所示。我们推理得出事故发生的概率为 7.61%，处于低风险状态，预测结果和实际情况吻合。将事故状态设为已发生，可以看出在事故发生时违章施工发生概率最大，安全意识淡薄和构建质量不合格的后验概率其次。其他风险发生的可能性略低，也不可忽略。敏感性分析主要用于分析节点条件概率表中参数变动对特定目标事件概率的影响。可以得到：X14、X6、X20、X6、X7、X22、X25、X10、X26、X24 这十个节点对顶事件发生的影响最大。

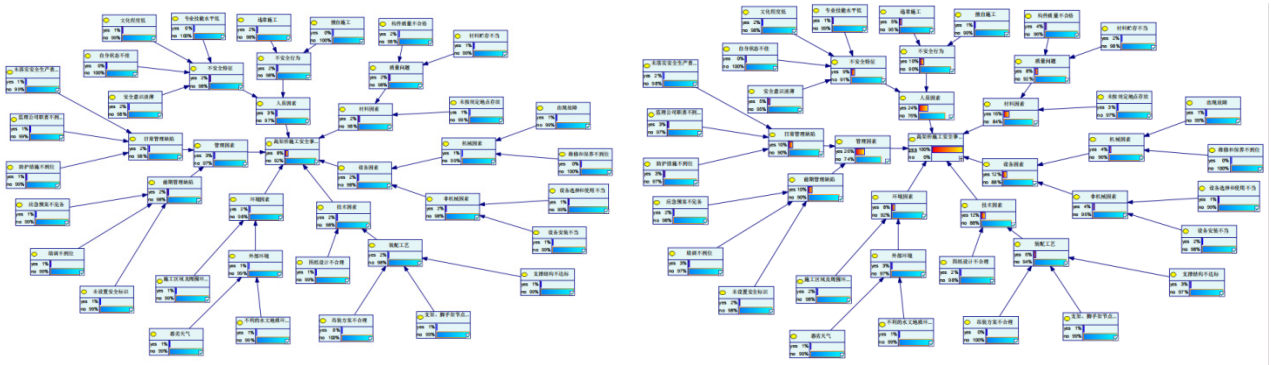


图 2 高架桥施工安全风险贝叶斯网络正向推理与逆向推理

4 控制措施

（1）健全全员全岗位安全生产责任制，明确职责分工；严格执行“检查 - 整改 - 反馈 - 验证”闭环管理，结合绩效考核与责任追究，推动各项管理要求落地，堵塞管理漏洞。

（2）应用 BIM、物联网等智能技术，构建与现场同步的智能模型，实现施工前风险预判、施工中实时监控、运营预备期健康预警，提升安全管理精准度与科学性。

（3）预制构件方面，落实材料进场联合验收，优化工艺并管控环境因素，规范运输吊装流程，建立质量追溯档案；机械设备方面，严格进场验收与报审，实行操作人员持证上岗，加强关键设备定期检修与实时监控，杜绝材料缺陷、机械故障引发的重大安全风险。

（4）强化人员管理，通过强制培训保障安全技能达标，以安全绩效正向激励规范作业习惯，建立作业前身心状态评估机制，从根源减少人为失误导致的安全风险。

5 结语

运用 FTA-FBN 模型，梳理了城市高架桥施工的安全风险因素及其内在逻辑关系。将专家判断分别引入梯形模糊数和 Noisy-or Gate 模型来优化，预测出事故发生概率为 7.61%。并开展敏感性分析，识别出影响安全事故的前十大敏感性因素。提出了四项有针对性的控制措施，为类似工程风险的管理提供参考。

参考文献

[1] 王连广, 姚博, 高海洋, 仁丽杰. 基于云模型改进AHP的桥梁施工风险评估 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2025, 46(02): 118-25.

[2] 陈士通, 孟祥宇, 李林浩. 深谷大跨桥梁下部结构施工安全风险评价 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41(11): 112-7.

[3] 刘永莉, 席铭洋, 朱方一, 柏华军. 基于AHP+BP法高铁桥梁施工安全风险评估模型研究 [J]. 世界桥梁, 2023, 51(03): 66-73.

[4] WU H, LIU S, WANG J W, YANG T Y. Construction Safety Risk Assessment of Bridges in the Marine Environment Based on CRITIC and TOPSIS Models [J]. J Coastal Res, 2020: 206-10.

[5] 刘宏，张明。桥梁施工安全风险评估方法研究进展 [J]. 公路工程，2024, 49 (02): 187-192.

[6] 周健，李刚。模糊贝叶斯网络在工程风险评价中的应用综述 [J]. 工程管理学报，2023, 37 (04): 106-111.