

基于模糊贝叶斯网络装配式施工风险评价

Risk Assessment of Prefabricated Construction based on Fuzzy Bayesian Network

张全权, 王育德, 郑兆阳

(河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038)

摘要: 装配式建筑施工风险因素较为复杂, 且不易量化。为更好的对装配式施工风险进行评价, 提出“PALE”风险识别法识别风险因素, 再经因子分析法检验筛选, 建立施工风险评价指标体系。明确贝叶斯网络节点后, 经解释结构模型理论构建贝叶斯结构模型。基于三角模糊理论确认根节点参数后, 通过加权距离结合概率分配的方法计算各非根节点参数, 建立了基于模糊多态贝叶斯网络的装配式建筑施工风险评价模型, 并通过实例验证。结果表明: 机械设备风险、管理风险和材料风险引发装配式施工风险概率较大, 需重点关注。

关键词: 装配式建筑; 施工风险; 三角模糊理论; 贝叶斯网络

中图分类号: TU711

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0149-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.026

ZHANG Quanquan, WANG Yude, ZHENG Zhaoyang

(Hebei University of Engineering School of Civil Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The construction risks of prefabricated buildings are relatively complex and difficult to quantify. In order to better evaluate the risk of prefabricated construction, this paper puts forward the "PALE" risk identification method to identify the risk factors, and then establishes the construction risk evaluation index system through the factor analysis method. After the Bayesian network node is defined, the Bayesian structure model is constructed by explaining the structural model theory. After confirming the root node parameters based on triangular fuzzy theory, the non-root node parameters are calculated by weighted distance combined with probability distribution, and the risk assessment model of prefabricated building construction based on fuzzy multistate Bayesian network is established, and verified by an example. The results show that the risk of mechanical equipment, management risk and material risk lead to the risk of prefabricated construction, which should be paid more attention to.

Key words: prefabricated building; construction risk; triangular fuzzy theory; bayesian network

0 引言

我国装配式于上世纪 90 年代中期发展停滞。21 世纪后, 再迎来快速发展期, 由于发展断层, 现有施工风险评价体系主要针对传统现浇建筑, 对装

配式适用性不足, 诸如机械伤害、物体打击、起重伤害等施工安全事故频出, 因此建立合理的施工风险评价十分必要。

高先务等^[1]从人、环、管理与技术四层面出发, 通过熵权法和模糊评价法进行装配式建筑施工风险评价; 常立新^[2]以人、材、机、管、技术五层面建立风险指标, 使用改进前景理论的区间毕达哥拉斯模糊 TOPSIS 法进行风险评价; 武永峰等^[3]依据施工工序识别人、材、机、技术、环境五类风险, 通过物元可拓与信息熵理论分析施工风险评价; 刘晓初

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52278171); 河北省自然科学基金资助项目 (E2020402079)。

作者简介: 张全权 (1998—), 男, 硕士, 研究方向: 结构项目管理。

收稿日期: 2023-10-23

研究与应用

等^[4]将风险因素引入云模型,进行施工安全风险评价;张立新等^[5]基于熵权 DEMATEL 和 TOPSIS 模型进行装配式施工风险评价,并结合案例验证分析结果;方前程等^[6]针对装配式建筑吊装施工模糊性特点,引入盲数理论和物元可拓法,构建了吊装施工风险评价模型,为装配式建筑吊装施工过程中的风险评价提供了理论依据;王丹等^[7]使用变权理论和贴近度改进了物元可拓方法,有效的评价了项目风险状况;汪军^[8]从人、机、材、技术、环境和政策六方面识别装配式施工风险,通过构建结构方程模型,使用路径系数明确指标权重后,得到了模糊综合评价模型,并通过了模型可行性的验证分析;李杨等^[9]以人、物、技术、管理和环境五类作为分类标准,通过分析构建了风险评价指标体系,最后建立以G1 – COWA 组合赋权为基础的风险评价法;刘占坤^[10]根据 4M1E 理论得出装配式建筑施工的五类风险因素,通过 Vensim 仿真软件分析得到风险因素间的因果关系,并根据识别风险的反馈模型构建了风险流图模型,最后通过实例分析加以验证模型;高思^[11]通过直觉模糊层次分析法进行分析,依据分析结果构建了装配式施工阶段的风险评价模型;李春博^[12]利用组合数 COWA 算子分析出各指标对应的权重后,构建了以 PCA – COWA 为基础的灰色聚类施工风险评价模型;张程城等^[13]利用灰色聚类结合模糊综合评价的方法进行装配式风险分析,构建了相应的风险评价模型。

综上多数学者以不同视角和方法进行装配式施工风险评价研究,但目前我国装配式施工风险评价体系仍不完善,因此通过模糊理论结合贝叶斯网络,建立基于模糊贝叶斯网络的装配式施工风险评价体系,并结合实例分析,对装配式施工风险评价具有一定意义。

1 确定装配式施工风险评价指标体系

总结常见风险识别法建立“PALE”风险分析法,涵盖项目概况 (Project Profile)、事故分析 (Accident Analysis)、文献分析 (Literature Analysis) 及专家判断 (Expert judgment) 四流程,名称取各流程英文首字母,形成闭环,可一次操作,也可循环使用。共识别风险因素 35 项,划分为人员、材料、机械设备、技术、管理以及环境风险六类。

依据李克特 5 级量表设计问卷,收集各因素对装配式施工风险影响程度,数值 1~5 对应“可忽略、影响小、影响适中、影响大、影响极大”,共发放 263 份,回收有效问卷 220 份,信度检验人员风险中“作业人员操作规范性 R6”Cronbach’s alpha 系数低,予以删除,剩余 34 项。经探索性因子分析得到总方差解释表,前 6 项特征值均大于 1,累计贡献率 69.356%,验证风险因素分为 6 类合理性。后进行验证性因子分析,聚敛效度和区分效度均符合要求,最终指标见表 1。

表 1 风险指标
Table 1 Risk indicators

一级指标	风险因素	风险来源
人员风险 R	作业人员安全意识 R1	A 阶段
	作业人员技术水平 R2	L 阶段
	作业人员受教育水平 R3	L 阶段
	作业人员工作时长 R4	P 阶段
	作业人员安全防护措施 R5	P 阶段
材料风险 C	材料供应与使用合理性 C1	P 阶段
	材料与构件进场质量检验 C2	A 阶段
	预制构件尺寸强度 C3	E 阶段
	预制构件标准程度 C4	L 阶段
	预制构件连接强度 C5	L 阶段
	安装后构配件保护 C6	P 阶段
机械设备风险 J	临时支撑体系稳定性 J1	A 阶段
	机械设备与吊具选择 J2	E 阶段
	机械设备检查与维护 J3	P 阶段
	机械设备运行状态 J4	L 阶段
	机械设备及吊具安拆与控制 J5	L 阶段
	吊装设置平面布置合理性 J6	L 阶段
管理风险 M	安全生产管理制度 M1	P 阶段
	施工安全教育及培训 M2	P 阶段
	施工安全监督检查 M3	E 阶段
	事故预防及应急管理完善情况 M4	E 阶段
	项目相关方协调性 M5	A 阶段
	现场材料及危险源管理 M6	A 阶段
	施工组织计划合理性 M7	P 阶段
技术风险 T	方案设计 T1	L 阶段
	构件吊装技术 T2	L 阶段
	构件连接技术 T3	E 阶段
	构件定位技术 T4	E 阶段
	安全检测技术 T5	L 阶段
环境因素 E	自然气候、天气影响 E1	P 阶段
	施工现场与周边作业环境 E2	L 阶段
	构件运输环境 E3	L 阶段
	材料、构件堆放环境 E4	L 阶段
	政策与经济环境 E5	E 阶段

2 建立模糊多态贝叶斯网络模型

2.1 确定结构节点

风险因素作为风险事件发生的潜在原因，两者关系密不可分，依据该领域相关知识结合历史资料进一步识别装配式施工中可能发生的风险事件，将已识别风险因素作为结构节点基础上增加了物体打

击、高空坠落、机械伤害、起重伤害、坍塌等 15 种常见风险事件，最后确立 56 项结构节点。

2.2 建立贝叶斯网络结构模型

依据解释结构模型，分析风险因素与事件间的因果层级关系，建立邻接矩阵，使用矩阵运算公式，得到可达矩阵，构建装配式建筑施工风险贝叶斯网络拓扑图，如图 1 所示。

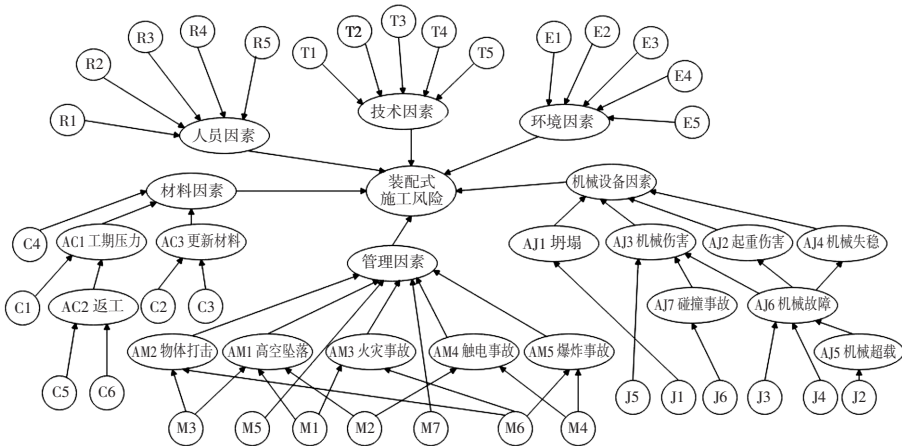


图 1 贝叶斯网络拓扑图
Fig. 1 Bayesian network topological diagram

常见贝叶斯网络模型软件有 GeNIe、Netica、BayesiaLab、Hugin Expert 等，其中 GeNIe 多见于教学和研究，采用可视化操作，有多种推理算法，拥有较强学习推理能力，因此，将拓扑图导入 GeNIe2.3 软件建立了装配式施工风险贝叶斯网络结构模型。

2.3 贝叶斯网络参数确定

确定贝叶斯参数主要有两种方式：通过专家经验确定；在大量数据基础上通过机器学习得到。第一种方法快速便捷，操作高效实用，因此，采用第一种方法确定先验概率，再通过概率分配结合“加权距离”方式计算条件概率，明确贝叶斯网络参数。

2.3.1 根节点先验概率

GeNIe 软件中节点默认两种状态，即：“state0”和“state1”，代表事件发生“是”与“否”，随研究对象改变可赋予不同含义。装配式施工风险评价问题相对复杂，两种评价状态过于笼统，为提高精确度，将节点进行风险概率等级划分为多态，见表 2。

邀请七名专家，采用匿名函询法获取节点参数数据。由于定性指标较多，风险指标评价时难以给出明确的分级界限和范围，所以采用自然语言进行模糊评价，通过“极高、高、偏高、中等、偏低、

表 2 节点状态与概率等级划分表				
Table 2 Node states and conditional probability table				
风险状态	证据节点	中间节点	目标节点	概率范围
S1	风险小	风险小	风险小	(0.0, 0.2]
S2	风险较小	风险较小	风险较小	(0.2, 0.4]
S3	风险适中	风险适中	风险适中	(0.4, 0.6]
S4	风险较大	风险较大	风险较大	(0.6, 0.8]
S5	风险大	风险大	风险大	(0.8, 1.0]

低、极低”七个语言变量衡量各因素对装配式施工风险的影响程度；使用三角模糊数解决语言变量转化具体数值的难题，将语言变量与三角模糊数对应，见表 3。

表 3 语言变量与三角模糊数对应表			
Table 3 Correspondence table of linguistic terms to triangular fuzzy sets			
序号	风险可能性	模糊数	语言变量
1	极高 (VH)	(0.9, 1.0, 1.0)	几乎必出现，后果极严重
2	高 (H)	(0.7, 0.9, 1.0)	极会出现，后果严重
3	偏高 (FH)	(0.5, 0.7, 0.9)	很可能出现，后果较重
4	中等 (M)	(0.3, 0.5, 0.7)	可能出现，后果一般
5	偏低 (FL)	(0.1, 0.3, 0.5)	很少出现，后果较轻
6	低 (L)	(0.0, 0.1, 0.3)	极少出现，后果很轻
7	极低 (VL)	(0.0, 0.0, 0.1)	几乎不出现，后果极轻

三角模糊数由上限、下限以及中间可能值三个部分组成，假设 A 为装配式建筑施工风险隶属集，

研究与应用

a 代表上限, c 为下限, b 代表隶属度为 1 时取值, 则三角模糊数可表示为 $\tilde{A} = (a, b, c)$, 对应三角隶属度函数为:

$$\tilde{A}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-a}, & b < x \leq c \\ 0, & x < a \text{ 或 } x > c \end{cases} \quad (1)$$

对风险因素数据, 首先进行均值化处理, 减少异常数据对结果影响程度, 保证模糊概率合理性; 其次, 解模糊处理, 算出精确值; 最后, 进行归一化, 保证概率归一性。

均值化处理: 采用算数平均法, 见下式:

$$\tilde{P}(\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n a}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n b}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n c}{n} \right) \quad (2)$$

解模糊处理: 利用均值面积法, 见下式:

$$P_t = \frac{\tilde{a} + 2\tilde{b} + \tilde{c}}{4} \quad (3)$$

归一化处理: 基于五种风险状态, 见下式:

$$P_l = \frac{P_t}{\sum_{t=1}^5 P_t} \quad (4)$$

由上述公式求出先验概率见表 4。

2.3.2 非根节点条件概率

为提高精确度, 对风险等级进行细化。因此, 求解条件概率时区别于传统研究使用条件概率公式: $P(B|A) = P(AB) / P(A)^{[14]}$, 而是确定“加权距离”后结合概率分配的方法求解。

(1) 基于专家经验确定各非根节点所对应所有根节点对其产生的影响权重, 经归一化得到相对影响权重 W_i 。假设某非根节点对应 n 个根节点, 则归一化结果如下式。

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1, W_i \in [0, 1] \quad (5)$$

明确相对影响权重后, 通过“加权距离”绝对值, 基于各根节点所假定风险等级, 可解出非根节点对应不同风险等级概率。公式为:

$$D_j = \sum_{i=1}^n |D_{ij} \times W_i| \quad (6)$$

式中: D_{ij} 为根节点 i 风险状态与非根节点假定状态间“距离”; n 为根节点数量; j 为非根节点可能风险状态, $j = S_1、S_2、S_3、S_4、S_5$ 。

表 4 先验概率表

Table 4 Prior probability table

风险因素	先验概率				
	S1	S2	S3	S4	S5
R1	0.23	0.37	0.21	0.12	0.07
R2	0.12	0.27	0.34	0.21	0.06
R3	0.34	0.26	0.18	0.16	0.06
R4	0.31	0.34	0.18	0.12	0.05
R5	0.18	0.29	0.29	0.20	0.04
C1	0.14	0.18	0.34	0.26	0.08
C2	0.12	0.18	0.34	0.25	0.11
C3	0.13	0.25	0.31	0.20	0.11
C4	0.06	0.15	0.27	0.33	0.19
C5	0.10	0.18	0.23	0.30	0.19
C6	0.13	0.19	0.30	0.28	0.10
J1	0.10	0.19	0.26	0.28	0.17
J2	0.12	0.23	0.23	0.32	0.10
J3	0.12	0.19	0.25	0.33	0.11
J4	0.06	0.14	0.19	0.34	0.27
J5	0.11	0.26	0.32	0.21	0.10
J6	0.09	0.16	0.29	0.31	0.15
M1	0.09	0.11	0.29	0.33	0.18
M2	0.10	0.17	0.26	0.30	0.17
M3	0.08	0.12	0.24	0.33	0.23
M4	0.07	0.13	0.27	0.31	0.22
M5	0.14	0.20	0.28	0.31	0.07
M6	0.09	0.20	0.27	0.27	0.17
M7	0.14	0.24	0.24	0.31	0.07
T1	0.15	0.29	0.30	0.17	0.09
T2	0.11	0.20	0.26	0.23	0.20
T3	0.12	0.19	0.25	0.26	0.18
T4	0.14	0.24	0.31	0.22	0.09
T5	0.14	0.23	0.29	0.21	0.13
E1	0.28	0.28	0.21	0.16	0.07
E2	0.27	0.30	0.23	0.12	0.08
E3	0.31	0.24	0.15	0.20	0.10
E4	0.24	0.28	0.22	0.15	0.11
E5	0.27	0.26	0.14	0.22	0.11

以图 2 为例, V 为非根节点, $V_1、V_2、V_3$ 为根节点, 专家给定相对权重为 $W_{V1} = 0.1、W_{V2} = 0.5、W_{V3} = 0.4$, 假定 $V_1、V_2、V_3$ 风险等级分别为 $S_1、S_2、S_3$, 则 V 处于 S_1 状态时与 $V_1、V_2、V_3$ 给定状态距离分别为 0、1、2, 即 $D_{V1S1} = 0、D_{V2S1} = 1、D_{V3S1} = 2$, 代入公式, 节点 V 在 S_1 状态“加权距离”为: $D_{S1} = 0 \times 0.1 + 1 \times 0.5 + 2 \times 0.4 = 1.3$ 。同理: $D_{S2} = 0.5、D_{S3} = 0.7、D_{S4} = 1.7、D_{S5} = 0.7$ 。

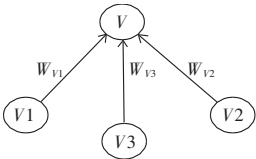


图 2 例图

Fig. 2 Example diagram

(2) 确定条件概率，通过概率分配的方式^[15]进行计算，公式如下。

$$P_j = \frac{e^{-KD_j}}{\sum_{j=1}^5 e^{-KD_j}}, P_j \in [0,1]$$
 (7)

式中：K 为结果分布指标，用于分配可能结果之间概率。

在非根节点对应的所有根节点均处于最小风险状态时，计算非根节点最小风险状态和中间风险状态概率的差值，通过专家指定分配因子进行计算得到分配指数 K。实践中，专家指定分配因子数值一般取风险分配过程中默认区间值^[16]。共划分 5 个风险等级，即分配因子取 20，代入公式 $e_{S1}^{-KD} = 20e_{S3}^{-KD}$ ，可得 $K = 1.5$ 。

以高空坠落 AM1 为例，可求所有根节点 M1、M2、M3 任意风险状态下，AM1 节点不同风险状态的条件概率。见表 5。

表 5 AM1 条件概率表

Table 5 AM1 table of conditional probabilities

根节点风险状态			高空坠落 AM1 各风险状态下的概率				
M1	M2	M3	S1	S2	S3	S4	S5
S1	S1	S1	0.777 3	0.173 4	0.038 7	0.008 6	0.001 9
S1	S1	S2	0.549 8	0.350 6	0.078 2	0.017 5	0.003 9
S1	S1	S3	0.464 0	0.295 9	0.188 6	0.042 1	0.009 4
S1	S1	S4	0.423 5	0.270 0	0.172 2	0.109 8	0.024 5
S1	S1	S5	0.405 1	0.258 3	0.164 7	0.105 0	0.067 0
S1	S2	S1	0.622 5	0.294 0	0.065 6	0.014 6	0.003 3
S1	S2	S2	0.365 9	0.493 9	0.110 2	0.024 6	0.005 5
S1	S2	S3	0.290 2	0.391 8	0.249 8	0.055 7	0.012 4
S1	S2	S4	0.257 6	0.347 7	0.221 7	0.141 4	0.031 5
S1	S2	S5	0.243 3	0.328 5	0.209 5	0.133 6	0.085 2
...							
S5	S4	S4	0.005 5	0.024 6	0.110 2	0.493 9	0.365 9
S5	S4	S5	0.003 3	0.014 6	0.065 6	0.294 0	0.622 5
S5	S5	S1	0.067 0	0.105 0	0.164 7	0.258 3	0.405 1

同理可求出所有非根节点条件概率。将节点数据导入 GENIE2.3 软件进行参数学习后，建立完整的装配式施工风险评价模型，如图 3 所示。

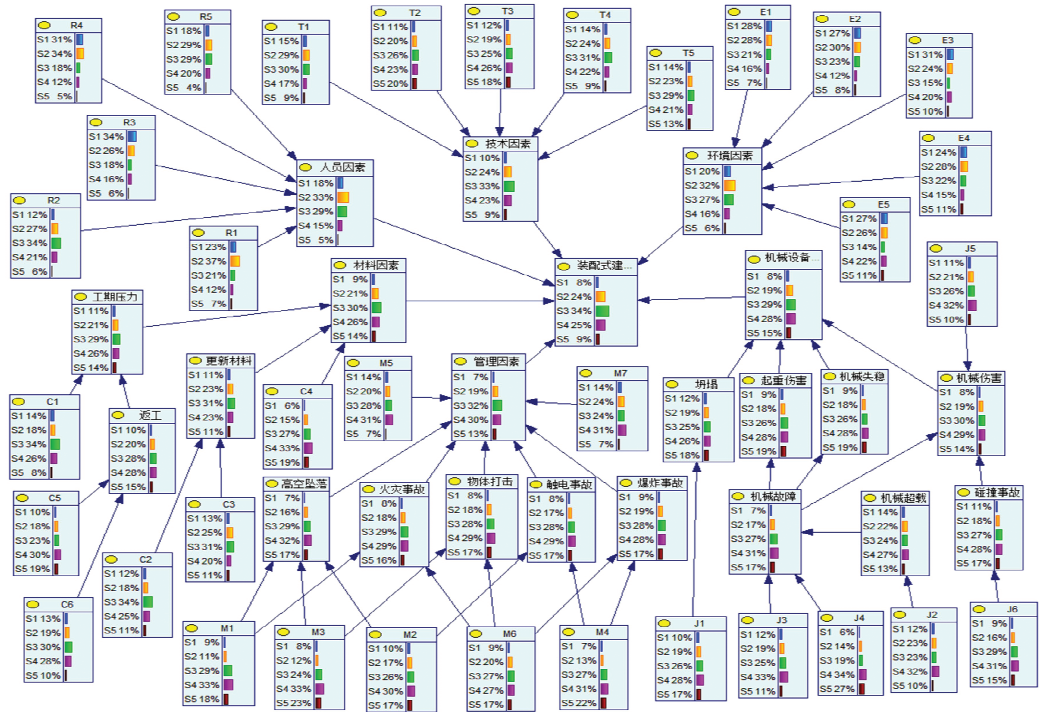


图 3 参数学习结果图

Fig. 3 Learning results of parameters

3 贝叶斯网络推理分析

3.1 诊断推理

诊断推理一般通过设定目标节点发生概率或状态，利用贝叶斯网络逆向推理功能，得到证据节点发生概率分布，进行风险研究。目前，贝叶斯网络

研究算法主要包括精度算法和近似推理算法两种，近似推理算法更适用于复杂贝叶斯网络模型。将装配式建筑施工风险等级 S5 设定为 100%，推理结果显示机械设备因素和管理因素风险状态为 S5 的概率为 27%，材料因素为 24%，技术因素 14%，环境以及人员因素分别为 9% 和 8%。即当施工过程中出现

研究与应用

较大风险事件时，原因出在机械设备因素与管理因素可能性最大，需重点关注。

3.2 敏感性分析

敏感性分析指改变某一风险因素来观察对最终指标影响大小程度，从而衡量敏感性因素，为决策者采取相应措施提供指导。分析结果显示机械设备运行状态 J4、现场材料及危险源管理 M6、预制构件标准程度 C4、预制构件连接强度 C5、作业人员安全意识 R1、施工现场与周边作业环境 E2 几项是对装配式施工风险最敏感的因素，该部分因素发生变化后可能对装配式建筑施工造成较为严重的影响，需特别关注。

3.3 最大致因链分析

最大致因链分析可明确风险事件发生的主要节点与关键路径，依据节点条件概率对影响因素的成因及各成因间关联性推理，得到造成目标事件发生的关键路径。经分析得到主要致因链包括：临时支撑体系稳定性 J1→坍塌→机械设备因素→装配式建筑施工风险；机械设备与吊具选择 J2→机械超载→机械故障→起重伤害→机械设备因素→装配式建筑施工风险；现场材料及危险源管理 M6→爆炸事故→

管理因素→装配式建筑施工风险等。

不难发现，最大致因链源头主要有机械设备因素、管理因素和材料因素三类风险类别，包括临时支撑体系稳定性 J1、机械设备与吊具选择 J2、吊装设置平面布置合理性 J6、现场材料及危险源管理 M6、施工安全监督检查 M3、预制构件连接强度 C5 等风险指标，在施工风险管理中可特别注意。

综上所述，三种推理结果相似，其中机械设备风险、管理风险和材料风险三种是导致装配式建筑施工风险的主要原因，控制过程中要重点把握。

4 装配式建筑模型应用

以北京丰台区某装配式回迁房住宅项目为例，项目建筑框架抗震级别二级，工程设防烈度 8 度。主体结构形式为装配式剪力墙结构，预制构件包括预制剪力墙内外墙板、阳台板、叠合楼板以及楼梯板等。

模型应用过程相对便捷，了解项目实际情况后，通过分析项目存在的施工风险因素及对应风险等级，将其导入评价模型即可得到直观的分析结果，如图 4 所示。

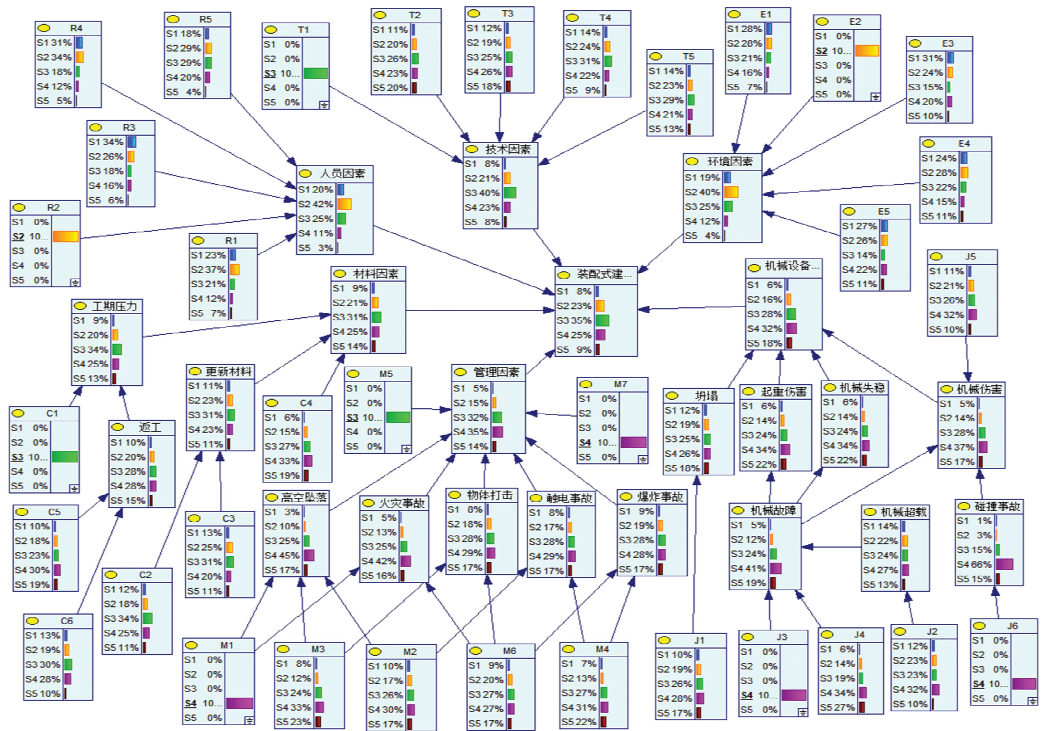


图 4 案例施工风险评价结果图
Fig. 4 The result of case construction risk assessment

案例和原模型对比可知,碰撞事故 S4 状态概率从原来 28% 提升到 66%,机械风险 S4 由 28% 提升到 32%;管理风险 S4 状态从原来 30% 增加到 35%,人员风险 S2 状态从 33% 提升到 42%;环境风险 S2 状态从 32% 提升到 40%,S4 状态由 16% 降低为 12%;技术风险 S3 状态从 33% 提升到 40% 等。

综合来看,装配式施工风险 S3 状态时概率为 35%;S4 状态为 25%;S1 状态概率最小为 8%。案例风险发生概率 S3 状态(风险适中)比例最大,结果与装配式施工风险评价原模型接近,也符合项目实况,项目也曾因管理不当和机械设备等原因导致机械伤害等事故,案例结果验证了装配式建筑施工风险贝叶斯网络模型可行性。

5 结论

以装配式建筑施工风险评价作为研究对象,通过模糊多态贝叶斯网络建立装配式施工风险评价模型,主要结论如下:

(1) 风险因素识别过程中提出“PALE”风险分析法,系统细化了风险因素识别过程,将探索性与验证性因子分析相结合,确立了装配式建筑施工风险评价指标体系。

(2) 通过解释结构模型理论分析贝叶斯网络结构,将软件 GENIE2.3 中默认评价状态改为 5 种,运用三角模糊理论、加权距离和概率分配相结合的方式确定节点参数,建立模糊多态贝叶斯网络的装配式建筑施工风险评价模型;经过诊断性推理、敏感性以及最大致因链分析,发现机械设备风险、管理风险和材料风险是导致装配式建筑施工风险发生的主要原因,需重点关注。

(3) 虽构建的模糊多态贝叶斯网络模型比传统贝叶斯模型更加具体细化,但未考虑时间因素等参量,相比建立动态贝叶斯网络分析更符合项目实际情况,今后研究可以采用。

参 考 文 献

- [1] 高先务,汪军,管杜娟. 基于熵权模糊综合评价法的装配式建筑施工风险评价[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 45-51.
- [2] 常立新. 装配式建筑施工风险评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [3] 武永峰,袁明慧. 装配式建筑施工安全风险评价模型的建立[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2023, 18(1): 108-113.
- [4] 刘晓初,谢翔,李映波,等. 基于云模型的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 中国水运(下半月), 2023, 23(1): 31-32, 74.
- [5] 张立新,岳美亭,赵衍春,等. 基于 DEMATEL 和 TOPSIS 的装配式建筑项目施工风险评价[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2023, 39(2): 221-227.
- [6] 方前程,李中原. 基于盲数理论和物元可拓法的装配式建筑吊装施工风险评估模型研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1): 8-16.
- [7] 王丹,梁靖涵. 装配式建筑施工风险评价模型构建及应用[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10): 69-75.
- [8] 汪军. 基于结构方程模型的装配式建筑施工风险评估与应用研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2022.
- [9] 李杨,侯晓娜. 基于 G1-COWA 组合赋权的装配式建筑施工风险评价[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 87-92, 99.
- [10] 刘占坤. 基于系统动力学的装配式建筑施工风险评价研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2020.
- [11] 高思. 装配式建筑施工阶段风险评价与控制研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- [12] 李春博. 基于 PCA-COWA 的装配式建筑施工风险灰色聚类评价研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [13] 张程城,郭海滨,孟霄,等. 装配式建筑施工风险评价[J]. 工程经济, 2018, 28(10): 31-34.
- [14] 李连进,任佩雅,陈红,等. 基于贝叶斯网络的重特大交通事故关键因素分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1504-1514.
- [15] 刘维华. 基于多态贝叶斯网络的城市快速路施工风险评价研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- [16] ROED W, MOSLEH A, VINNEM J E, et al. On the use of the hybrid causal logic method in offshore risk analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 445-455.