

中文引用格式:李知健,余健俊,路聪,等. 基于 FRAM-BN 的施工安全突发事件应急管理能力评价[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 199–208.

英文引用格式:LI Zhijian, SHE Jianjun, LU Cong, et al. Evaluation of emergency management capability for construction safety accidents based on FRAM-BN[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 199–208.

基于 FRAM-BN 的施工安全突发事件 应急管理能力评价*

李知健^{1,2}, 余健俊^{**1,2} 教授, 路聪^{1,2}, 郭子豪^{1,2}, 周逸伦³

(1 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816; 2 中建-南工智慧建造研究中心,
江苏 南京 211816; 3 南京中建八局智慧科技有限公司, 江苏 南京 211800)

中图分类号: X913.4; TU17 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.1492

资助项目: 住建部专项课题(ZLAQ(2019)AQ-4)。

【摘要】 为科学评估并提升建筑企业对突发安全事件的应急管理能力, 针对既有静态评估难以刻画功能耦合且易受主观赋权影响的问题, 提出一种融合定性分析与定量评估的综合模型。首先, 基于应急管理全过程均衡理论, 从准备与预防、监测与预警、响应与处置、恢复与学习 4 个阶段, 结合轨迹交叉理论与突变理论, 提炼 12 个二级指标, 建立完整的评价指标体系; 其次, 采用功能共振分析法(FRAM)识别各指标关键功能与耦合路径, 结合改进 K-shell 算法与贝叶斯网络(BN)建立应评估模型; 最后, 在实际工程案例中进行应用, 并通过专家复核与情景模拟验证其有效性。结果表明: 所选建筑企业综合应急管理能力为 81.682%, 其应急机制能够有效响应并处置各类施工安全突发事件。其中, 恢复与学习能力表现最佳(90.855%), 而监测与预警能力相对薄弱(76.616%)。敏感性结果显示, 专业队伍建设 F_3 与现场指挥决策 F_7 对综合能力贡献较为显著。

【关键词】 功能共振分析法(FRAM); 贝叶斯网络(BN); 施工安全; 突发事件; 应急管理能力评价; 改进 K-shell 算法

Evaluation of emergency management capability for construction safety accidents based on FRAM-BN

LI Zhijian^{1,2}, SHE Jianjun^{1,2}, LU Cong^{1,2}, GUO Zihao^{1,2}, ZHOU Yilun³

(1 School of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China;
2 CSCEC-Nanjing Tech University Smart Construction Research Center, Nanjing Jiangsu
211816, China; 3 Nanjing China Construction Eighth Engineering Division Smart
Technology Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211800, China)

Abstract: To scientifically evaluate and enhance construction enterprises' emergency management capabilities for sudden safety incidents, a comprehensive model integrating qualitative analysis and quantitative evaluation was proposed, addressing the limitations of traditional static assessment methods,

* 文章编号: 1003-3033(2026)02-0199-10; 收稿日期: 2025-10-14; 修稿日期: 2025-12-23

** 通信作者: 余健俊(1975—), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 主要从事工程管理、应急管理、安全科学方面的研究。E-mail: shejj1016@njtech.edu.cn。

which struggle to capture functional coupling and are easily influenced by subjective weighting. First, based on the theory of balanced emergency management throughout the entire process, a complete evaluation indicators system was established by identifying 12 secondary indicators across four stages, including preparation and prevention, monitoring and early warning, response and disposal, and recovery and learning, and integrating the trajectory intersection theory and catastrophe theory. Subsequently, FRAM was employed to identify key functions and coupling paths among these indicators. An evaluation model was then developed by integrating an improved K-shell algorithm with BN. Finally, the model was applied to a practical engineering case and its effectiveness was validated through expert review and scenario simulations. The results demonstrate that the selected construction enterprise has a comprehensive emergency management capability of 81.682%, indicating its emergency mechanism can effectively respond to and handle various construction safety incidents. Among the capabilities, recovery and learning performs best (90.855%), while monitoring and early warning remains relatively weak (76.616%). Sensitivity analysis shows that professional team development (F_3) and on-site command decision-making (F_7) contributed most significantly to the overall capability.

Keywords: functional resonance analysis method (FRAM); Bayesian network (BN); construction safety; emergency; emergency management capability; improved K-shell algorithm

0 引言

建筑业作为高风险行业,其安全生产状况长期受到广泛关注。施工现场作业环境复杂,参与主体多、交叉作业频繁,突发安全事件易发且危害性大,常造成严重的人员伤亡与财产损失,对工程进度和社会稳定带来重大影响。国际研究表明:建筑行业的从业人员较其他行业面临更高的重大事故风险^[1]。我国建筑业的安全生产形势亦较为严峻,仅2024年就发生房屋市政工程生产安全事故317起,造成607人死亡,其中,较大及以上事故7起、死亡24人^[2]。在此背景下,系统评估建筑企业的应急响应与处置能力,对于提升安全管理水平、防范突发事件风险具有重要意义。

施工安全突发事件具有突发性强、发展迅速和多因素耦合等特征,使得建筑企业的应急管理呈现出高度的不确定性、非线性与动态性^[3-4]。在多主体协作、资源配置与信息交互高度复杂的背景下,科学有效的应急能力评价方法显得尤为重要。近年来,学者们提出多种方法用于施工安全应急管理评价,如多准则妥协解排序法^[5]、模糊层次分析法^[6]、认知可靠性和误差分析法^[7]、失效模式与效应分析法^[8]。这些方法虽具有一定实用性,但多数依赖专家赋权^[9],主观性较强^[10],难以系统刻画应急过程中的功能关联与传播路径^[11]。此外,已有研究多聚焦静态指标构建,缺乏对系统动态演化的建模支持,影响了评价的科学性与适应性。

鉴于此,笔者拟基于应急管理全过程均衡理论,构建覆盖“准备与预防-监测与预警-响应与处置-恢复与学习”4阶段的评价指标体系,引入功能共振分析法(Functional Resonance Analysis Method, FRAM)识别各阶段功能耦合关系,结合改进K-shell算法与贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)建立综合评价模型,以期提升建筑企业对突发事件的应急响应能力,也为复杂工程系统的应急管理评价提供新思路。

1 应急管理能力评价指标体系构建

施工安全事件是指在施工过程中发生的、难以预见的突发事件,通常会导致人员伤亡或财产损失,具有不可预测性、突发性以及对项目目标产生重大影响等特征^[12]。为有效应对此类事件,应急管理需以系统论为指导思想,综合考虑诱发事件的微观与宏观因素,科学识别其诱导效应、联动效应与叠加效应,并通过制定防范措施以最大程度降低损失。因此,建筑企业在开展应急管理工作时,应将重点放在事件的预防与影响控制2个方面。为完善应急管理理论基础,张海波^[13]提出应急管理全过程均衡理论,包括6项分阶段机制和一项跨阶段机制,即“准备-预防-减缓-响应-恢复-学习”以及“监测”构成的“6+1”过程机制。在此基础上,构建施工安全突发事件应急管理的4阶段模型,将全过程划分为准备与预防、监测与预警、响应与处置、恢复与学习4个阶段,并据此开展系统研究。进一步地引入轨

迹交叉理论^[14]与突变理论^[15]分析施工安全事件的发生机制。最终,结合《国家安全生产事故灾难应急预案》^[16]所揭示的事件演化路径,并综合应急组织与预案^[17-18]、应急资源与信息共亨^[19-20]以及灾后恢复与学习^[21-22]等方面的国内外研究成果,同时

融入专家访谈要点,将施工安全突发事件应急管理过程划分为 4 个阶段,提炼形成涵盖组织管理、资源调配、人员培训、技术支持等方面的 12 项二级指标,构建出施工安全突发事件应急管理能力和评价指标体系,见表 1。

表 1 施工安全突发事件应急管理能力和评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system for emergency management capability in construction safety incidents			
目标层	一级指标	二级指标	二级指标说明
施工安全突发事件应急管理能力和 A	准备与预防能力 B ₁	应急组织建设 F ₁	构建职责明确的应急组织体系,完善岗位分工、协调机制与通信网络
		应急预案制定 F ₂	制定涵盖主要风险的应急预案,明确响应流程、职责分配与资源配置策略
		专业队伍建设 F ₃	建立常设的专业应急队伍,强化岗位培训与跨部门协同能力
		应急教育培训 F ₄	组织常态化培训与演练,提升员工应急意识、自救互救及逃生能力
	监测与预警能力 B ₂	危险源识别与监测 F ₅	实施风险排查与设备监控,构建动态化危险源识别与管理机制
		风险预警机制 F ₆	建立预警系统,完善信号识别、信息传递与响应联动机制
	响应与处置能力 B ₃	现场指挥与决策 F ₇	明确指挥体系与响应流程,提升快速决策与调度能力
		应急救援处置 F ₈	规范应急救援程序,保障人员救护、装备支持与物资供应
		应急资源调配 F ₉	建立资源储备与调配机制,提升关键资源的可用性与调度效率
		应急信息传递 F ₁₀	构建多渠道、快速的信息发布与反馈机制,确保信息畅通与精准传达
	恢复与学习能力 B ₄	灾后恢复重建 F ₁₁	制定结构修复与秩序重建方案,保障灾后恢复的系统性与及时性
		经验总结改进 F ₁₂	建立事件复盘与知识更新机制,持续改进应急计划与管理体系

2 应急管理能力和评价模型构建

2.1 FRAM 方法定量分析

FRAM 是一种探讨复杂技术-社会系统安全性的系统分析方法^[23]。与失效模式与影响分析、故障树分析等侧重于物理方面的传统方法不同,FRAM 专注于分析系统的功能特性、动态交互以及功能变异性^[24],具体步骤如图 1 所示。

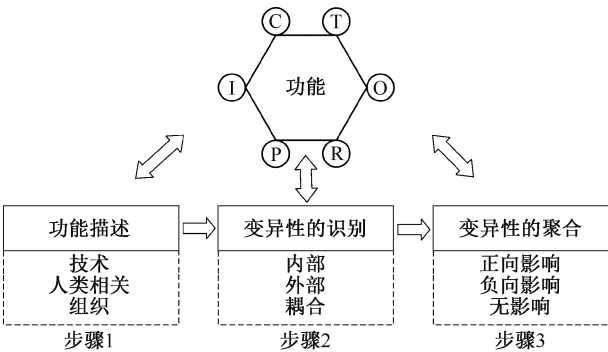


图 1 FRAM 流程
Fig. 1 FRAM flowchart

步骤 1:系统基本功能描述。“功能”指系统为达成目标所需的关键活动(真实可操作的任务)。FRAM 通过输入(I)、输出(O)、前提条件(P)、资源(R)、时间(T)、控制(C)6 个参数,精确描述系统功能,以揭示其对实现目标的直接影响。

步骤 2:变异性识别。复杂系统的功能变异性

主要来自技术、人类与组织 3 类要素^[25]。对变异性的描述有助于理解功能间作用机制及上游变异对下游的影响,变异性识别的原理见表 2。

表 2 变异性识别的原理

Table 2 Principles of variability identification		
类型	变异性来源	描述
技术	内部	技术内部功能原理可能复杂且难以理解,或随着时间推移,技术设备可能因老化而功能退化
	外部	不当的设备维护或极端环境条件可能导致技术性能的变异性
人类	内部	个体心理和生理状态可能引起其功能表现的变异
	外部	个体行为可能受到技术、组织和社会环境影响,从而产生变异
组织	内部	组织内部的通信、结构和文化可能导致功能变异性
	外部	组织外部的因素,如用户需求变化和监管环境的严格程度,可能导致功能变异性
耦合		下游功能的变异性可能会直接受到上游功能变异的影响,这种现象在不同功能之间形成复杂的依赖关系网络

步骤 3:变异性聚合。通过分析功能之间的耦合与交互来表征“功能共振”。耦合强度与交互特性决定上游变异对下游产生正向、负向或中性影

响^[26],如图2所示。

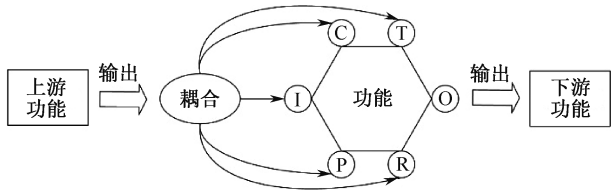


图2 FRAM的变异性聚合

Fig. 2 Variability aggregation in FRAM

2.2 改进 K-shell 算法确定指标权重

K-shell 算法是一种基于网络全局结构的粗粒度分解方法,通过分析节点的网络位置确定节点间的关系强度。引入加权度的概念,基于节点间的关系强弱,综合评价其相邻节点的重要性,从而改进 K-shell 算法在粗粒度判断方面的能力,识别关键影响力节点。此外,还根据节点的影响力确定其在 BN 模型中的概率分布。相关定义如下:

1) 边权重。用以区分不同连边在结构与功能上的相对重要性,避免未加权分析将全部连边等同处理的偏差。

$$W_{ij} = K_i + K_j \tag{1}$$

式中: w_{ij} 为边的权重,是节点 i 和 j 度值的和; K_i 和 K_j 分别为节点 i 和 j 的度值。

2) 边影响系数。反映 2 节点共享邻点的重合度(取值 0~1),重合度越高,连接越紧密、边越重要。

$$I_{ij} = \frac{|N_i \cap N_j| + 1}{|N_i \cup N_j| + 1} \tag{2}$$

式中: I_{ij} 为节点 i 和 j 之间边的影响系数; N_i 和 N_j 分别为节点 i 和 j 的邻点集合; $N_i \cap N_j$ 为 i 和 j 的共同邻点集合; $N_i \cup N_j$ 为除 i 和 j 外它们的总邻点集合。

3) 度中心性。衡量节点在网络中影响力的局部指标,通过考虑邻点的贡献,引入加权度概念。

$$W_{k(i)} = \sum_{j \in N_i} I_{ij} k_s(j) + \sum_{j \in N_i} w_{ij} \tag{3}$$

式中: $W_{k(i)}$ 为加权度; $k_s(j)$ 为节点 j 经过 K-shell 分解后所在层次。

据此,提出一种改进 K-shell 算法,具体步骤如下:

步骤 1:计算网络中所有 K_i ,并确定所有节点的 $k_s(i)$ 。

步骤 2:为每条边计算 w_{ij} 和 I_{ij} 。

步骤 3:进一步计算 K-shell 值为 1 的节点的加权度,并移除与这些节点相连的边,保留 K-shell 值

大于 1 的节点。

步骤 4:逐步类似处理 K-shell 值为 2、3 等的节点,直至所有节点均被考虑。

步骤 5:基于加权度对节点进行排序,并赋予相应的值。孤立节点被归类为 KS-0 层,以标示其在网络边缘的位置。

2.3 BN 模型确定节点概率

为克服 FRAM 在定量分析中的局限性,引入 BN 模型。BN 能在不确定性条件下整合改进 K-shell 算法得到节点概率与专家经验判断,实现系统性推理,并支持前向与后向分析。通过操作条件概率表更新叶节点的概率分布,识别对目标节点影响显著的关键变量。具体步骤如下:

步骤 1:确定先验概率。鉴于施工安全突发事件应急阶段数据稀缺,采用德尔菲法结合专家意见确定 BN 模型根节点的先验概率。为保证专家意见的一致性与可靠性,使用克隆巴赫系数(Cronbach's α)进行一致性检验, α 值大于 0.9 表示数据可靠^[27]。

步骤 2:确定条件概率。中间及叶节点的条件概率由根节点先验概率加权计算。权重依据改进 K-shell 算法确定节点影响力,以反映上层节点对下层节点概率分布的影响强度,从而保持网络推理的一致性与精度^[27]。

3 实例应用分析

以江苏省南京市某 X 建筑企业为例,该企业覆盖从高风险地区的基础设施建设到城市中心的商业开发等多个领域。依据代表性和权威性的原则邀请应急管理行业、建筑企业安全管理相关领域的 12 位专家参与施工安全突发事件应急管理能力的讨论,并应用 FRAM-BN 模型进行评价。

3.1 FRAM 网络模型建立

通过 FRAM 评价施工安全突发事件应急管理能力指标。邀请 12 位专家进行 2 轮讨论,首轮详述各评价指标,次轮探讨指标间相互作用和变异性。专家组基于功能变异性原则分析指标的关键参数,重点关注其功能间的上游与下游耦合关系,见表 3,并构建 FRAM 模型,如图 3 所示。

3.2 复杂网络拓扑分析

利用 FRAM 确定复杂网络的邻接矩阵。基于此邻接矩阵,并应用改进的 K-shell 算法,计算各节点的度和加权度,如图 4、图 5 和图 6 所示。

表 3 应急管理能力评价指标的变异性聚合

Table 3 Aggregation variability of evaluation indicators for emergency management capability

指标	变异性聚合
F_1	$F_5(O), F_{12}(O) \rightarrow F_1(O) \rightarrow F_2(I), F_3(I), F_4(I)$
F_2	$F_1(O), F_3(O), F_{10}(O), F_{12}(O) \rightarrow F_2(O) \rightarrow F_6(I), F_7(C), F_8(C), F_9(C), F_{11}(C)$
F_3	$F_1(O), F_4(O), F_{12}(O) \rightarrow F_3(O) \rightarrow F_2(R), F_5(I), F_6(R), F_7(R), F_8(R), F_9(R), F_{10}(R), F_{11}(R)$
F_4	$F_1(O), F_5(O) \rightarrow F_4(O) \rightarrow F_3(C), F_6(C), F_7(C)$
F_5	$F_3(O), F_6(O), F_{10}(O) \rightarrow F_5(O) \rightarrow F_1(I), F_4(C), F_8(P)$
F_6	$F_2(O), F_3(O), F_4(O), F_9(O), F_{12}(O) \rightarrow F_6(O) \rightarrow F_5(C), F_7(I)$
F_7	$F_2(O), F_3(O), F_4(O), F_6(O), F_{12}(O) \rightarrow F_7(O) \rightarrow F_8(I), F_9(I), F_{10}(I)$
F_8	$F_2(O), F_3(O), F_5(O), F_7(O), F_9(O), F_{10}(O), F_{12}(O) \rightarrow F_8(O) \rightarrow F_{11}(P),$
F_9	$F_2(O), F_3(O), F_7(O), F_{10}(O), F_{12}(O) \rightarrow F_9(O) \rightarrow F_6(C), F_8(R), F_{11}(I)$
F_{10}	$F_3(O), F_7(O) \rightarrow F_{10}(O) \rightarrow F_2(C), F_5(P), F_8(P), F_9(P),$
F_{11}	$F_2(O), F_3(O), F_8(O), F_9(O) \rightarrow F_{11}(O) \rightarrow F_{12}(I)$
F_{12}	$F_{11}(O) \rightarrow F_{12}(O) \rightarrow F_1(C), F_2(P), F_3(P), F_6(C), F_7(C), F_8(C), F_9(C)$

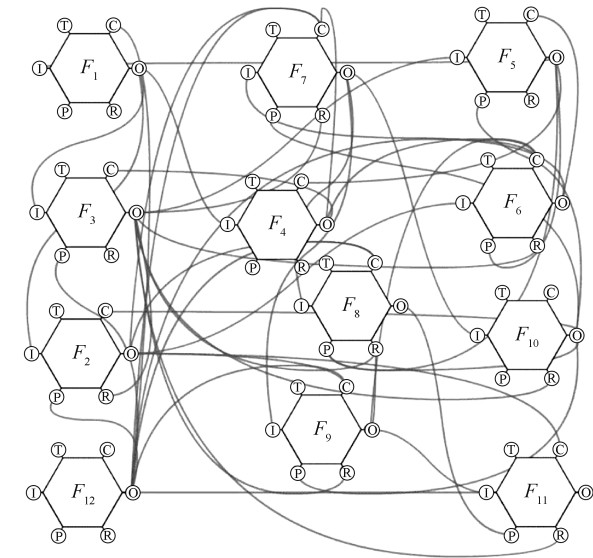


图 3 FRAM 模型
Fig. 3 FRAM model

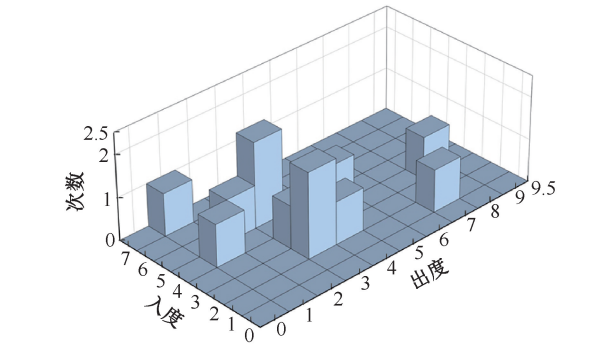


图 4 复杂网络度分布
Fig. 4 Degree distribution of complex network

网络中大多数节点的入度和出度均不超过 5, 约 58% 的节点总度集中在 6~8, 表明指标间联系紧密、互动频繁。所有节点的 k_s 值均为 5, 说明指标分布

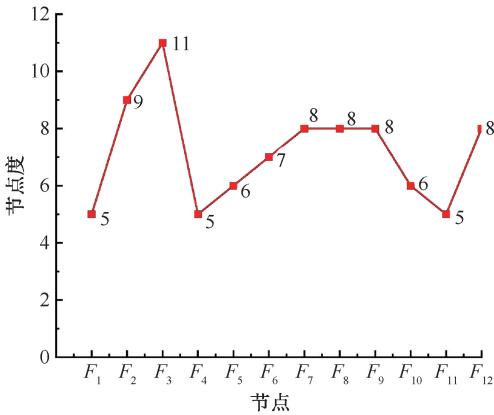


图 5 节点度
Fig. 5 Node degree graph

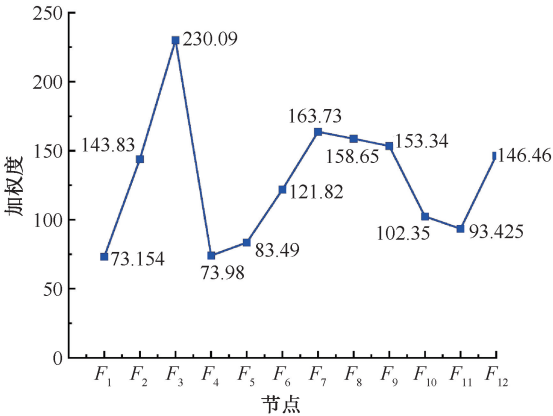


图 6 节点加权度
Fig. 6 Node weighted degree graph

均衡、体系构建合理。
然而, 仅凭度值与 k_s 值的宏观分析难以区分节点间的相对影响力。节点 F_7 、 F_8 、 F_9 、 F_{12} 的度值和 k_s 值均相同, 难以辨别其重要性。改进的 K-shell 方法通过计算节点加权度, 可在微观层面揭示各指标

的重要性。

3.3 BN 模型建立

依据施工安全突发事件应急管理能力评价指标体系,运用贝叶斯建模软件 AgenaRisk 可视化处理建模结果,如图 7 所示。根据专家评分汇总得出最终的先验概率结果,见表 4。为确保数据一致性和可靠性,采用 Cronbach’s α 作为评价工具,计算得出 Cronbach’s α 为 0.910,表明所收集的数据显示出高度的一致性和可靠性。

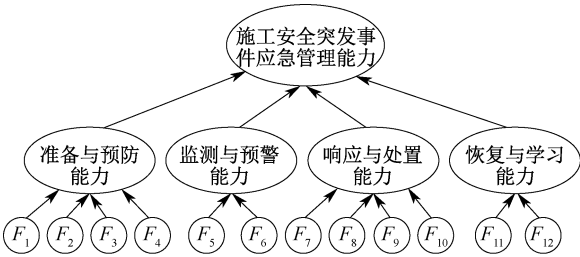


图 7 BN 建模

Fig. 7 BN modeling

表 4 根节点先验概率

Table 4 Prior probabilities of root nodes

节点	先验概率	
	真	假
F_1	0.794	0.206
F_2	0.790	0.210
F_3	0.804	0.196
F_4	0.814	0.186
F_5	0.816	0.184
F_6	0.732	0.268
F_7	0.800	0.200
F_8	0.770	0.230

续表 4

节点	先验概率	
	真	假
F_9	0.800	0.200
F_{10}	0.920	0.080
F_{11}	0.842	0.158
F_{12}	0.951	0.049

结合根节点先验概率和图 6 中的加权重,推导出 4 个中间节点和顶端节点的概率分布式,见表 5。

表 5 节点概率分布式

Table 5 Probability distributions of nodes

节点	概率分布
B_1	$0.140\ 4F_1+0.276F_2+0.441\ 6F_3+0.142F_4$
B_2	$0.406\ 6F_5+0.593\ 3F_6$
B_3	$0.283\ 2F_7+0.274\ 4F_8+0.265\ 3F_9+0.177F_{10}$
B_4	$0.389\ 4F_{11}+0.610\ 5F_{12}$
A	$0.337\ 4B_1+0.132\ 9B_2+0.374\ 3B_3+0.155\ 3B_4$

4 应用结果分析

通过对 X 建筑企业应急管理能力的 BN 模型模拟,构建一个基础模型,如图 8 所示。使用占比衡量应急管理能力的表现,其中,值越高表明应急管理能力越强。该模型涵盖准备与预防、监测与预警、响应与处置、恢复与学习 4 个方面,其性能表现分别为 79.879%、76.616%、81.301%、90.855%,代表相对于理想应急管理能力的实际表现比率,100%代表完全理想状态。这些数据揭示了企业在各方面的能力水平及其改进的潜力,尤其是在恢复与学习方面的高表现,强调企业在事件后的恢复和吸取教训方面的优势。然而,监测与预警能力的相对较低表现指

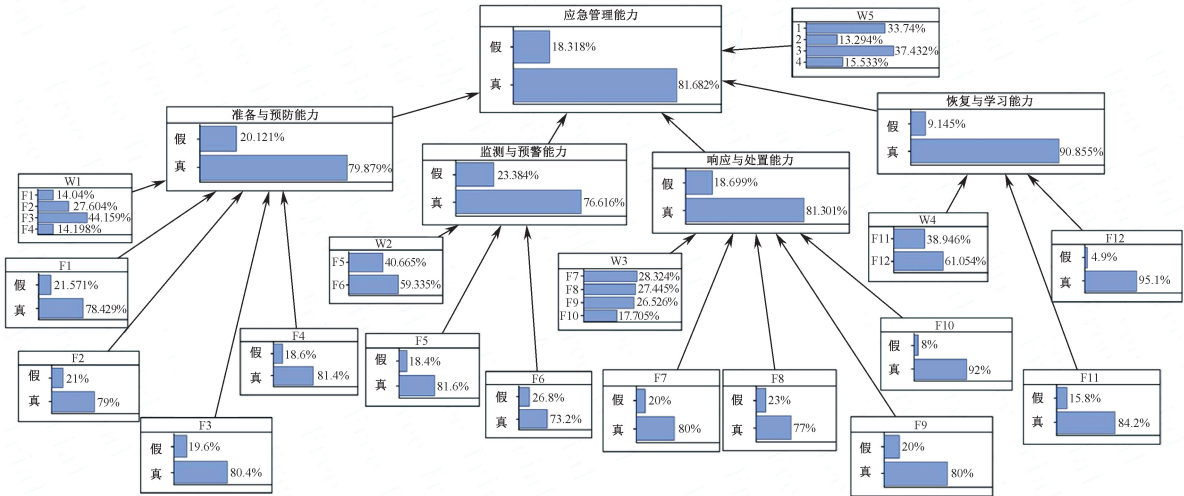


图 8 BN 基本模型

Fig. 8 Basic BN model

出改进的必要性。企业的综合得分经过加权平均后为 81.682%, 表明其具备一定的应急管理能力。

4.1 前向传播分析

通过 BN 模型的前向传播分析, 评价施工安全突发事件应急管理中关键节点失效的影响。选取 4 个影响度较高的节点: F_3 、 F_6 、 F_7 和 F_{12} , 并在假设上述节点失效的情况下, 设计 4 种模拟场景, 具体结果见表 6。场景 4 的模拟结果如图 9 所示。由表 6

可知: F_3 节点的失效将准备与预防能力从 79.879% 降至 44.375%, 综合应急管理能力从 81.682% 降至 69.703%。 F_3 和 F_6 同时失效导致监测与预警能力从 76.616% 降至 33.183%, 综合应急管理能力下降至 63.929%。进一步加上 F_7 节点失效, 响应与处置能力降至 58.642%, 综合应急管理能力降至 55.448%。4 节点同时失效时, 综合应急管理能力急剧下降至 46.429%。

表 6 不同场景下的正向分析

Table 6 Forward analysis under different scenarios

场景	F_3	F_6	F_7	F_{12}	准备与预防能力/%	监测与预警能力/%	响应与处置能力/%	恢复与学习能力/%
基础	—	—	—	—	79.879	76.616	81.301	90.855
场景 1	假	—	—	—	44.375 (↓)	76.616	81.301	90.855
场景 2	假	假	—	—	44.375	33.183 (↓)	81.301	90.855
场景 3	假	假	假	—	44.375	33.183	58.642 (↓)	90.855
场景 4	假	假	假	假	44.375	33.183	58.642	32.792 (↓)

注: “↓”表示能力下降。

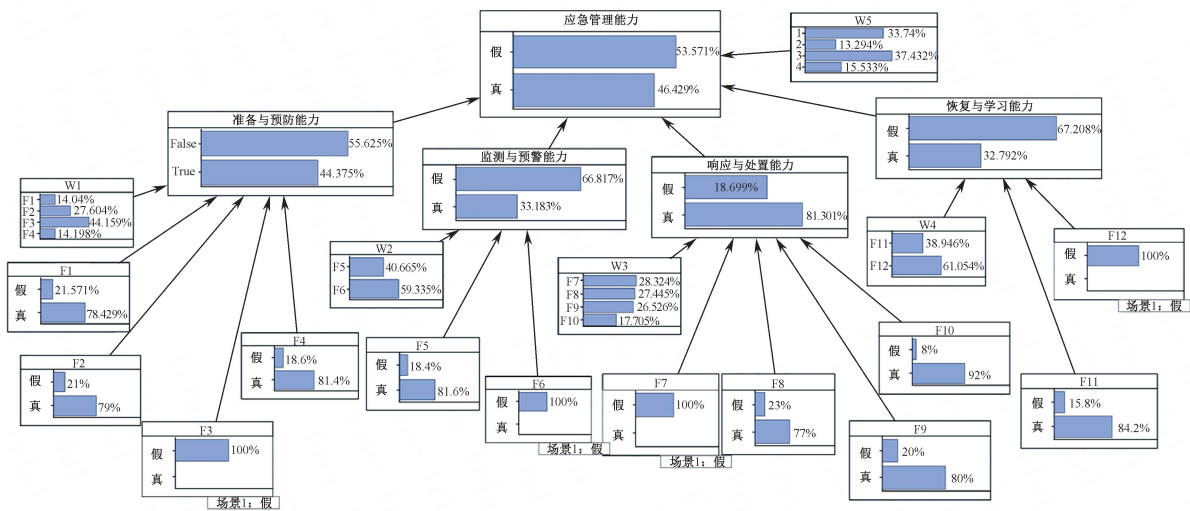


图 9 BN 正向传播分析

Fig. 9 Forward propagation analysis of BN

4.2 后向传播分析

通过 BN 模型的后向传播分析, 在已知特定结果的基础上, 逆向推断这些结果的潜在原因或条件的概率。模拟结果如图 10 所示, 将 X 建筑企业的突发事件应急管理能力设定为理想状态 (100%) 进行分析, 关键能力领域中, 准备与预防、监测与预警、响应与处置、恢复与学习的性能分别提高至 86.518%、79.532%、88.268% 和 92.435%。其中, 响应与处置能力的增长最为显著, 达 6.967%, 标志着其在应急管理中处理紧急情况的关键性和有效性。这一结果突出了响应与处置能力在应急管理系统中

的重要性。此外, 通过设置不同的应急管理能力水平, 进一步后向传播分析揭示各种条件下关键节点对应急管理能力的具体影响。

4.3 敏感性分析

利用 AgenaRisk 软件进行敏感性分析, 目标节点为应急管理能力, 探讨 12 个指标节点的敏感性, 如图 11 所示, 其中, p 表示概率。节点 F_3 对应急管理能力影响最显著, 其影响值从 0.697 增至 0.846, 变化率达 17.61%, 强调了专业队伍在应急管理中的重要性。节点 F_7 、 F_8 、 F_9 、 F_{12} 同样对应急管理能力有显著影响, 变化率分别为 12.65%、12.14%、11.94%、

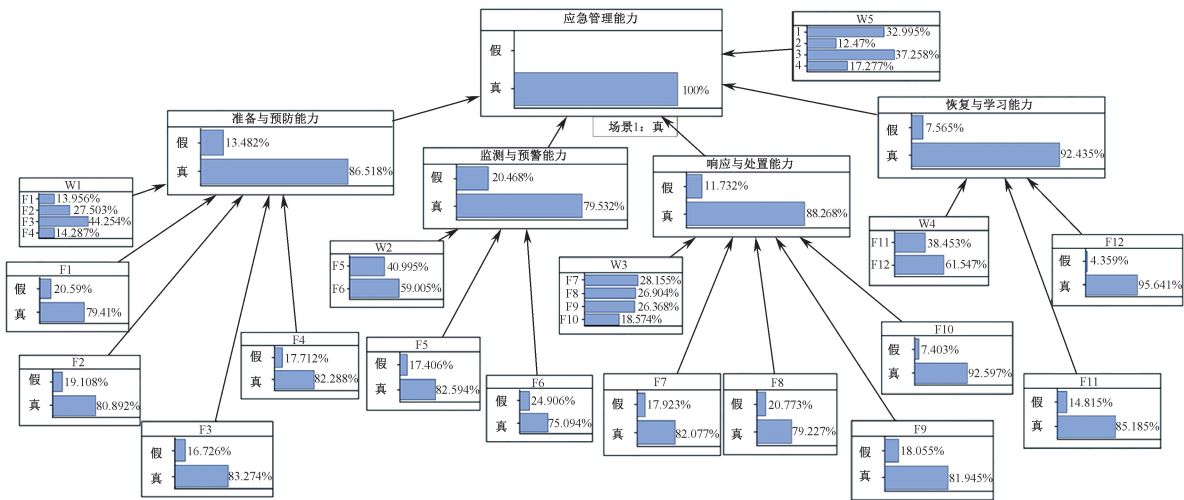


图 10 BN 的反向传播分析

Fig. 10 Backward propagation analysis of BN

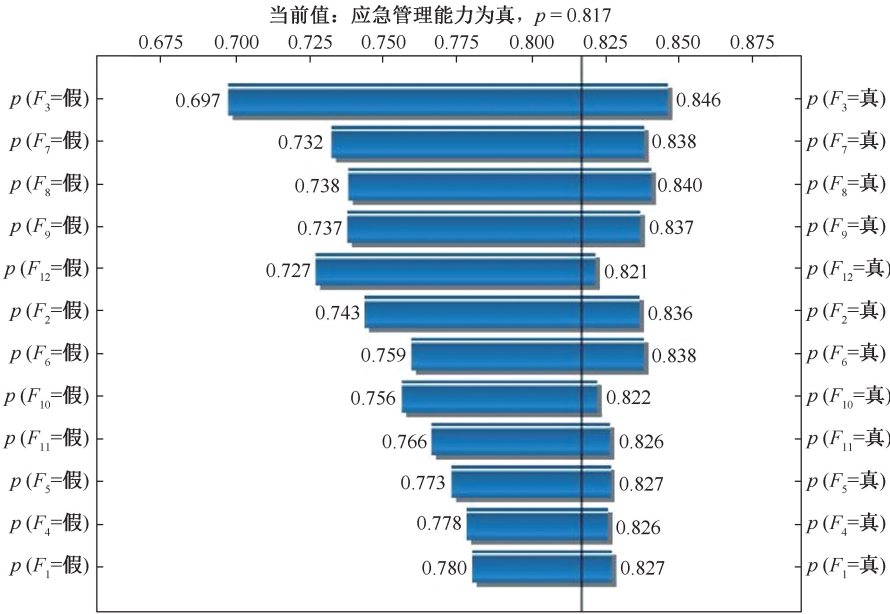


图 11 BN 的敏感性分析

Fig. 11 Sensitivity analysis of BN

11.45%,反映了在响应和处置能力上的节点关联性。

4.4 模型结果验证

为验证 BN 模型评估结果的科学性与现实契合度,采用专家复核与情景模拟相结合的方法开展验证分析。将模型输出反馈给 12 位建模专家进行复审,结果显示,多数专家认为模型得分与企业实际应急管理水平基本一致,整体具有较高的合理性与可信度,专家意见反馈见表 7。此外,专家基于模型输出结构,模拟设置关键节点失效情景(如 F_6 与 F_8),指出模型推理逻辑清晰,结果变化符合实际预期,体现了模型在应急响应情境中的有效性。结合前向传

播与后向诊断测试,模型表现出良好的敏感性与结构稳定性,表明该模型具备较强的应用推广潜力。

表 7 专家意见反馈

Table 7 Expert feedback form

专家编号	主要反馈意见	是否认同模型结果
E_1	模型结构清晰,逻辑合理,结果基本符合实际	认同
E_2	结果合理,建议加强关键节点权重影响说明	基本认同
E_3	输出趋势与现场情况一致,建议推广使用	认同

续表 7

专家编号	主要反馈意见	是否认同模型结果
E ₄	可进行情景模拟,提升了模型的应用潜力	认同
E ₅	建议补充各阶段指标的操作性定义	基本认同
E ₆	指标设置完整,风险预警机制评估较为精准	认同
E ₇	模型层级科学,具备较高可信度	认同
E ₈	结果基本合理,部分节点推理过程建议可视化展示	基本认同
E ₉	模型简洁直观,得分结构清晰,有一定实用性	认同
E ₁₀	得分反映企业应急能力短板,具有参考价值	认同
E ₁₁	应用性强,建议在更多工程项目中试点验证	认同
E ₁₂	评价结果基本吻合实际,术语建议进一步标准化	基本认同

5 结 论

1) 构建基于 FRAM-BN 的施工安全突发事件应急管理能力和评价方法,融合 FRAM 的功能耦合分析与 BN 的定量推理机制,兼具定性解释力与定量评估能力,有效提升了评价的科学性与客观性。

2) 模型在实际工程中应用并经专家复核与情景模拟验证,结果显示结构合理、逻辑一致,具备较强的适应性和可推广性,可为建筑施工及相关领域的应急能力评估提供参考。

3) 当前模型尚未引入动态反馈机制,难以全面刻画应急响应过程的演化特征。后续研究将拓展至动态过程与更细化的三级指标体系,进一步提升模型的适用性与实用价值。

4) 构建的 FRAM-BN 模型不仅兼顾了系统功能的耦合逻辑与指标之间的概率推理关系,具备较好的定性解释力与定量分析能力,而且具有较强的通用性与推广价值。该模型可适用于建筑施工领域中不同类型突发事件的应急管理能力和评估,亦可为交通、水利、市政等工程场景提供理论支撑与方法参考。

参 考 文 献

[1] CHIANG Y H, WONG F K W, LIANG Shulan. Fatal construction accidents in Hong Kong[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2018, 144(10): DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001433.

[2] 全国工程质量安全监管信息平台公共服务门户[EB/OL]. [2024-07-03]. <https://zlaq.mohurd.gov.cn/fwmh/bjxcjgl/fwmh/pages/default/index.html>.

[3] 李雪松. 建筑施工突发安全事故应急管理能力和评价研究[D]. 唐山:华北理工大学,2022.

LI Xuesong. Research on emergency management capability evaluation of construction sudden safety accidents[D]. Tangshan:North China University of Science and Technology, 2022.

[4] 陈永鸿,武蕾,雷雯心,等. 建筑施工企业应急管理能力和驱动因素及影响机理研究[J]. 工程管理学报,2024,38(1): 142-147.

CHEN Yonghong, WU Lei, LEI Wenxin, et al. Study on driving factors and influencing mechanism of emergency management capability of construction enterprises[J]. Journal of Engineering Management, 2024, 38(1): 142-147.

[5] 苏克,吕淑然. 基于组合赋权 VIKOR 法的建筑施工企业应急能力评价方法[J]. 建筑安全,2021,36(1):56-59.

SU Ke, LYU Shuran. Evaluation method for emergency response capability of construction enterprises based on combined weighting VIKOR method[J]. Construction Safety, 2021, 36(1): 56-59.

[6] 陶俐言,吴倩倩. 建筑企业应急能力评价研究[J]. 杭州电子科技大学学报:社会科学版,2021,17(1):8-14.

TAO Liyan, WU Qianqian. Research on emergency response capability evaluation of construction enterprises[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University:Social Sciences, 2021, 17(1): 8-14.

[7] AHN S I, KURT R E. Application of a CREAM based framework to assess human reliability in emergency response to engine room fires on ships[J]. Ocean Engineering, 2020, 216: DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.01.007.

[8] CHANAMOOL N, NAENNA T. Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department[J]. Applied Soft Computing, 2016, 43: DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108078.

[9] TANG Shanrong, ZHU Ke, GUO Peiwen. Research on quantitative assessment and dynamic reasoning method for emergency response capability in prefabricated construction safety[J]. Buildings, 2023, 13(9): DOI: 10.3390/buildings13092311.

[10] 张月. 建筑施工企业突发事件应急能力评价及提升研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.

ZHANG Yue. Research on evaluation and improvement of emergency capability of construction enterprises for sudden incidents[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2023.

[11] 于敏,钟磊,董美廷,等. 大型施工现场应急能力影响因素分析与评估[J]. 四川建材,2022,48(6):227,229.

YU Min, ZHONG Lei, DONG Meiting, et al. Analysis and evaluation of influencing factors of emergency capability on large construction sites[J]. Sichuan Building Materials, 2022, 48(6): 227,229.

[12] 张伟,张潇,陈曦,等. 基于系统思维的施工安全管理可靠性模型与实证分析[J]. 土木工程与管理学报,2018,

- 35(5):46-54,59.
ZHANG Wei, ZHANG Xiao, CHEN Xi, et al. Construction safety management system reliability model and empirical analysis based on systems thinking[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(5): 46-54,59.
- [13] 张海波. 应急管理的全过程均衡: 一个新议题[J]. 中国行政管理, 2020(3): 123-130.
ZHANG Haibo. The full-process equilibrium of emergency management: a new issue[J]. Chinese Public Administration, 2020(3): 123-130.
- [14] 杨守国, 姚亚金, 庞拾亿, 等. 基于轨迹交叉理论的煤矿事故分析[J]. 煤炭工程, 2019, 51(5): 177-180.
YANG Shouguo, YAO Yajin, PANG Shiyi, et al. Analysis of coal mine accidents based on trace intersecting theory[J]. Coal Engineering, 2019, 51(5): 177-180.
- [15] 陈伟珂, 武晓燕. 基于突变理论的建筑工人不安全行为研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(5): 1 838-1 843.
CHEN Weike, WU Xiaoyan. Mechanism accounting for the rock bursts in mining the thick coal seam near the fault zone[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1 838-1 843.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 国家安全生产事故灾难应急预案[EB/OL]. (2006-01-25). https://www.mohurd.gov.cn/zthd/yjgl/qt/200601/20060125_160199.html.
- [17] 刘心男, 薛婷婷, 纪颖波. 预案视角下城市防汛应急组织间网络鲁棒性评价[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 216-221.
LIU Xinnan, XUE Tingting, Ji Yingbo. Networks robustness evaluation of urban flood emergency organizations from perspective of emergency plans[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 216-221.
- [18] PENADES M C, NUNEZ A G, CANOS J H. From planning to resilience: the role (and value) of the emergency plan[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2017, 121: DOI: 10.1016/j.techfore.2016.12.004.
- [19] 郑万波, 陈慧敏, 夏云霓. 突发事件应急救援队伍参与信息共享平台构建行为策略的演化仿真[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(1): 94-100.
ZHENG Wanbo, CHEN Huimin, XIA Yunni. Evolutionary simulation of behavioral strategy of emergency rescue team participating in information sharing platform construction[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(1): 94-100.
- [20] 王伟, 余志成, 王芸清, 等. 考虑经济损失的城市防汛应急物资调配多目标优化研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 173-181.
WANG Wei, YU Zhicheng, WANG Yunqing, et al. Multi-objective programming model for a class of flood disaster emergency materials transportation [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 173-181.
- [21] 蒋瑜阳, 向波, 王东, 等. 震后山区公路地质灾害风险评估体系研究: 以川九公路震后恢复重建为例[J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1 026-1 034.
JIANG Yuyang, XIANG Bo, WANG Dong, et al. Risk evaluation system for geological disasters of highways in mountainous regions after earthquakes: a case study of the post earthquake restoration and reconstruction of the Chuanzhusi-Jiuzhaigou highway[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(5): 1 026-1 034.
- [22] 骆毓燕, 黄琳岚, 颜旭辉, 等. 九寨沟 7.0 级地震受灾区灾后经济韧性测度及恢复效率研究[J]. 灾害学, 2024, 39(2): 26-33.
LUO Yuyan, HUANG Linlan, YAN Xuhui, et al. Post-disaster economic resilience measurement and recovery efficiency in Jiuzhaigou Ms 7.0 earthquake affected areas[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(2): 26-33.
- [23] HOLLNAGEL E. FRAM, the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems[M]. London: Engineering & Technology, 2012: 135-138.
- [24] SUJIAN M A, EMBERY D, HUANG Huayi. On the application of human reliability analysis in healthcare: opportunities and challenges[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 194: DOI: 10.1016/j.res.2018.06.017.
- [25] LI Weijun, HE Min, SUN Yiho, et al. A proactive operational risk identification and analysis framework based on the integration of ACAT and FRAM[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 186: DOI: 10.1016/j.res.2019.02.012.
- [26] PATRIARCA R, GRAVIO G D, COSTANTINO F, et al. An analytic framework to assess organizational resilience[J]. Safety and Health at Work, 2018, 9(3): DOI: 10.1016/j.shaw.2017.10.005.
- [27] 雷渝, 帅斌, 米荣伟, 等. 基于半定量的 FRAM 道路危险品运输事故分析方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(8): 29-35.
LEI Yu, SHUAI Bin, MI Rongwei, et al. Research on FRAM analysis of accidents in dangerous goods transportation by road based on semi-quantitative method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(8): 29-35.

作者简介: 李知健 (1999—), 男, 四川南充人, 博士研究生, 研究方向为应急管理、安全科学与减灾。E-mail: lizhijian@njtech.edu.cn.

