

中文引用格式:陈伟,赵卓雅,牛力,等. 强降雨情景下附着式升降脚手架事故致因 IFRAM-BN 模型[J]. 中国安全科学学报,2024,34(7):44-52.

英文引用格式:CHEN Wei, ZHAO Zhuoya, NIU Li, et al. IFRAM-BN model for causes of accidents in attached lifting scaffolding under heavy rainfall scenarios [J]. China Safety Science Journal,2024,34(7):44-52.

强降雨情景下附着式升降脚手架事故致因 IFRAM-BN 模型*

陈伟¹教授,赵卓雅^{**1},牛力²,温道云³,罗浩³

(1 武汉理工大学 土木与建筑学院,湖北 武汉 430070;2 武汉市市政工程质量安全中心,湖北 武汉 430021;3 武汉市房屋征收和名城保护中心,湖北 武汉 430021)

中图分类号:X952

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.07.0237

资助项目:武汉市城建局科技计划项目(202319)。

【摘要】 强降雨事件频发造成附着式升降脚手架事故剧增,为提高强降雨情景下施工安全性,降低事故发生率,提出一种基于改进的功能共振分析模型(IFRAM)和贝叶斯网络(BN)相结合的事故致因分析模型。首先,从定性角度,利用IFRAM识别事故机制并深度挖掘系统功能共振情况;其次,将IFRAM映射至BN定量分析模型,并引入联系云优化计算各根节点的先验概率;最后,以西安“9·10”事故为例,进行实证研究并提出相应预防措施。结果表明:事故在安全状态为IV级时,发生的可能性最大。工人违规操作、未进行旁站等强制性监督、强降雨等是导致爬架事故的核心致因;强降雨环境→雨后架体载荷超载等致因组合是诱发爬架事故的关键。

【关键词】 强降雨; 附着式升降脚手架; 事故致因; 改进的功能共振分析模型(IFRAM); 贝叶斯网络(BN); 联系云

IFRAM-BN model for causes of accidents in attached lifting scaffolding under heavy rainfall scenarios

CHEN Wei¹, ZHAO Zhuoya¹, NIU Li², WEN Daoyun³, LUO Hao³

(1 School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China; 2 Wuhan Municipal Engineering Quality and Safety Center, Wuhan Hubei 430021, China; 3 Wuhan Housing Expropriation and Famous City Protection Center, Wuhan Hubei 430021, China)

Abstract: Frequent heavy rainfall events cause a dramatic increase in attached elevator scaffolding accidents. In order to improve construction safety and reduce the accident rate under heavy rainfall scenarios, an accident causation analysis model based on combination of IFRAM and BN was proposed. The model first qualitatively identified accident mechanisms and explored system functional resonance using IFRAM. Next, IFRAM was mapped to a BN quantitative analysis model, and the prior probabilities of each root node were computed using cloud optimization. Finally, taking the Xi'an "9.10" accident as an example, empirical research was conducted, and corresponding preventive measures were proposed. The results indicate that accidents are most likely to occur when the safety status is IV. The core causes of

* 文章编号:1003-3033(2024)07-0044-09; 收稿日期:2024-01-15; 修稿日期:2024-04-21

** 通信作者:赵卓雅(2000—),女,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向为工程项目管理。E-mail: 2917081247@qq.com。

climbing accidents include workers violating regulations, failure to conduct mandatory supervision such as standing by and heavy rainfall. The combination of factors such as heavy rainfall environment and overloading of the frame after rain is the key to inducing frame climbing accidents.

Keywords: heavy rainfall; attached lifting scaffolding; causes of accidents; improved functional resonance analysis model (IFRAM); Bayesian network (BN); contact cloud

0 引言

近年来,全球气候变化加剧,强降雨事件在许多地区越发频繁,这给建筑行业带来极大的安全隐患^[1]。随着建筑业不断发展、施工技术不断进步,附着式升降脚手架(简称爬架)作为当代一种新型脚手架技术,在我国高层及超高层建筑施工中得到广泛应用。然而,强降雨事件对爬架的安全性却产生严重影响,引发了一系列安全事故。因此,研究强降雨情景下爬架事故致因,对提高施工安全性,降低事故发生率具有重要意义。

目前,针对爬架事故,国内外学者利用各种风险分析方法开展了研究。裴兴旺等^[2]基于综合权重-灰色相对欧几里得加权关联度理论,评价全钢型爬架安全性;冯壮等^[3]采用 T-S 模糊故障树,构建了贝叶斯网络(Bayesian Networks, BN)模型,以正反向推理分析爬架倾覆和坠落风险;韦东^[4]利用 ANSYS 软件建立爬架架体水平风载力学模型,通过有限元方法和试验验证,评估了爬架的防倾覆性能;SAWICKI 等^[5]从波兰建筑业发生的脚手架事故数据中获得 10 个参数,使用层次分析法评估脚手架作业的风险状态;NOWOBILSKI 等^[6]从技术、组织和人员 3 方面分析爬架事故原因,利用 Python 编程确定每种重大原因组合事故造成不同后果的概率,从而制定具体预防措施。传统风险分析往往是从风险致因的角度分解整体系统,而未结合功能角度定性分析事故。

为弥补这一不足, HOLLNAGEL^[7]提出功能共振分析模型(Functional Resonance Analysis Model, FRAM),即人员、技术和组织 3 大功能之间的耦合分析系统^[8]。但由于 FRAM 自身存在定性分析的限制,学者们常采用事故原因分析与分类法^[9]、蒙特卡罗模拟方法^[10]、Tropos 目标风险框架^[11]和关联规则^[12]等定量方法与 FRAM 相结合,开展研究。鉴于此,笔者拟改进 FRAM,增加环境功能,利用改进的 FRAM(Improved FRAM, IFRAM)从系统的角度定性分析强降雨情景下爬架事故演变机制及各功能间耦合关系,在此基础上构建 BN 模型量化分析,确定事故关键致因,并结合西安“9·10”爬架事故

实证研究,以期为强降雨情景下爬架事故致因分析提供理论参考。

1 基于 IFRAM 和 BN 致因分析模型

1.1 IFRAM

FRAM 是一种从整体考虑事故发生的系统性分析方法,主要从输入 I、输出 O、前提 P、时间 T、资源 R 和控制 C 这 6 方面描述功能模块。强降雨情景下爬架系统是一个受人、机、管、环 4 大因素作用的复杂系统,FRAM 没有对环境单独划分功能模块,而是间接体现环境变化的影响,这极大地弱化了环境与其他功能间的耦合作用。因此,在充分考虑强降雨环境的影响下,改进 FRAM,增添环境功能。

强降雨下爬架事故危险源层风险诸多,故将其归纳为因素层中的人员、技术、组织和环境 4 大类,再将 4 大因素划分到功能模块中分析,通过功能层中功能间的耦合作用^[13]影响系统层,强降雨情景下爬架事故致因层级如图 1 所示。

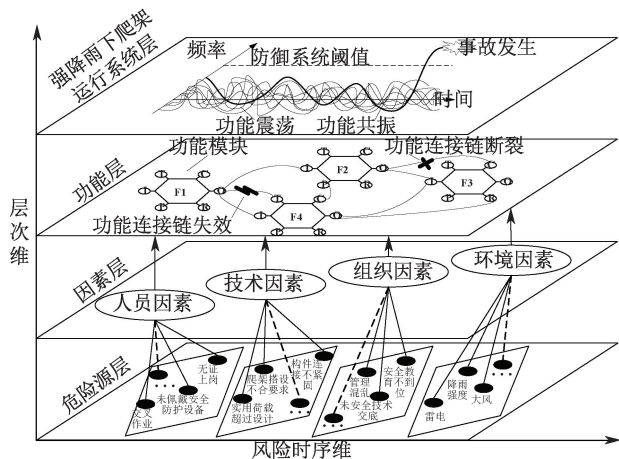


图 1 事故致因层级

Fig. 1 Accident causation hierarchy diagram

1.2 BN 模型

BN 是基于概率的不确定性推理方法,主要由有向无环图(Directed Acyclic Graphical, DAG)和条件概率表(Conditional Probability Table, CPT)组成^[14],用三元组 $\langle X, E, P \rangle$ 表示,其中, $G = \langle X, E \rangle$ 为 DAG, $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为强降雨下爬架事故致因

节点集合, E 为有向边集合, 表示节点间的条件依赖关系, P 为 CPT, 表示各节点的概率影响关系。

相对传统的 BN 致因分析中只考虑是否发生 2 种安全状态, BN 将节点划分为多个不同安全状态并分析节点的概率。为将定性指标量化, 引入联系云^[15]的概念, 具体分析过程如下:

步骤 1: 根据专家主观经验, 结合专家权重 (表 1), 获取定性指标 S 得分。

$$S = \sum_{a=1}^n c_{ai} w_a = \sum_{a=1}^n c_{ai} \cdot (V_a / \sum_{a=1}^n V_a) \quad (1)$$

式中: V_a 和 w_a 分别为第 a 个专家的总得分和权重; c_{ai} 为第 a 个专家对第 i 个指标的打分。

表 1 专家权重标准

Table 1 Expert weight standard

标准	类别	取值	标准	类别	取值
职称	正高级工程师/教授	10	工作年限/a	>20	10
	高级工程师/副教授	8		10~20	8
	工程师/讲师	6		5~10	6
	助理工程师	4		3~5	4
	技术员	2		1~2	2

步骤 2: 根据联系云计算各根节点不同安全状态的标准云数字特征值 ($E_x^i, E_n^i, \lambda_i, H_e^i, \varepsilon_i^i$)。

$$\begin{cases} E_x^i = (L_{\max}^i + L_{\min}^i) / 2 \\ E_n^i = \varepsilon_i / \sqrt{2\lambda_i + 3} \\ \lambda_i = \lg 0.5 / \lg [1 - [(x_i - E_x^i) / \varepsilon_i^i]^2] \\ H_e^i = \beta \\ \varepsilon_i^i = E_n^i \sqrt{2\lambda_i + 3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E_n^i, H_e^i, L_{\max}^i, L_{\min}^i$ 分别为等级 i 左、右半支联系云的熵、超熵和区间的上下限; E_n^i 满足 $E_n^i \sim \text{Normrnd}(E_n^i, H_e^i)$; $\beta = 0.01$ ^[15] 为云漂浮模糊阈值; $\varepsilon_i, \varepsilon_i^i$ 分别为修正前后的联系云半区间长度; λ_i 为 ε_i^i 相对应的分布密度函数阶数。

步骤 3: 由于指标区间值有随等级增大而增加或减少 2 种形式, 故其左右区间长度计算如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_i^L = E_x^i - L_{\min}^{i-1} \\ \varepsilon_i^R = L_{\max}^{i+1} - E_x^i \end{cases} \text{和} \begin{cases} \varepsilon_i^L = E_x^i - L_{\min}^{i+1} \\ \varepsilon_i^R = L_{\max}^{i-1} - E_x^i \end{cases} \quad (3)$$

步骤 4: 利用正向云发生器计算各根节点所处不同安全状态的隶属度 $\alpha(x)_i$ 。

$$\alpha(x)_i = [1 - [(x_i - E_x^i) / \varepsilon_i^i]^2]^{\lambda_i} \quad (4)$$

步骤 5: 采用隶属度—概率转换公式^[16] 计算各根节点不同安全状态的先验概率 P_F 。

$$P_F = P[\alpha(x)_i] = \alpha(x)^{1/b} / \sum_{i=1}^n \alpha_i^{1/b} \quad (5)$$

式中 $b=1$ 为一致性参数, 即隶属度与概率的转换中保持完全一致。

步骤 6: 基于根节点不同安全状态的组合形式, 求出中间节点和叶节点 T 在不同安全状态的概率。

$$\begin{aligned} P(T = T_d) = & \sum_{X_1, X_2, \dots, X_n; M_1, M_2, \dots, M_n} P(X_1, X_2, \dots, \\ & X_n; M_1, M_2, \dots, M_n; T = T_d) = \\ & \sum_{\delta(T)} P[T = T_d | \delta(T)] \cdot \sum_{\delta(M_1)} P[M_1 | \lambda(M_1)] \cdot \\ & \dots \cdot \sum_{\lambda(M_n)} P[M_n | \delta(M_n)] \cdot P(X_i = e_i) \cdot \\ & \dots \cdot P(X_i = e_f) \end{aligned} \quad (6)$$

步骤 7: 利用 BN 反向推理, 计算 T 不同安全状态下, 各根节点 X_i 在不同安全状态 e_f 的后验概率 P_L 。

$$P_L = P(X_i = e_f) P(T = d_f | X_i = e_f) / P(T = d_f) \quad (7)$$

步骤 8: 通过根节点重要性度量 Q ^[16] 评估各事故致因变化对爬架事故发生的影响敏感程度。

$$Q(X_i) = \frac{1}{j} \sum_1^j \left| \frac{P(X_i = e_f | T = d_f) - P(X_i = e_f)}{P(X_i = e_f)} \right| \quad (8)$$

IFRAM-BN 事故致因分析网络流程如图 2 所示。

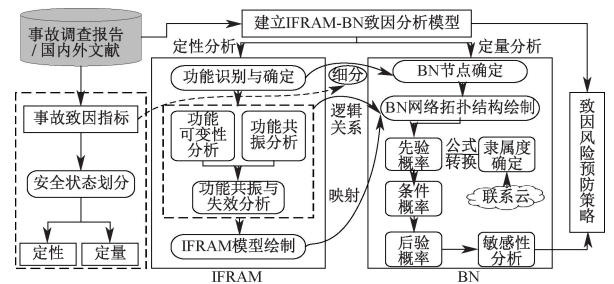


图 2 IFRAM-BN 事故致因分析网络流程

Fig. 2 IFRAM-BN accident caused to analyze the network flowchart

2 事故致因 IFRAM-BN 模型构建

2.1 爬架结构原理与功能识别

目前, 爬架可按升降方式或升降设备等分类, 但基本构造大致相似, 主要为架体结构和附着支承、安全防护、同步升降以及控制 4 大系统。其施工工艺流程涵盖准备、搭设、检验、使用和拆卸 5 步。准备阶段包括专项施工方案编制审批论证、材料准备等, 搭设阶段包括架体安装、操作平台搭设等, 检查阶段包括架体搭设完成后的联合验收等, 使用阶段包括架体正常提升运行等, 拆卸阶段包括架体使用后的

依次拆解、现场材料清退等。以此顺序确定爬架系统基本功能,分别为施工准备 F_1 、架体搭设 F_2 、检查验收 F_3 、升降使用 F_4 、拆除退场 F_5 。

2.2 功能可变性分析

在 IFRAM 中,功能模块输出变化的原因存在功能内部变化和外部功能间上下游耦合变化 2 种。前者源于功能自身特性的随机改变,后者则由变化后的上游功能输出端作为 O、P、T、R、C,通过功能连接链输入下游功能,导致其变化。对于强降雨情景下爬架系统,主要通过功能层和系统层发生变化的功能模块对其产生影响,而因素层和危险源层则是功能层和系统层发生变化的实际原因,爬架系统功能可变性分析具体见表 2。

表 2 功能可变性分析

Table 2 Functional variability analysis

功能	因素	相关危险源	原因
F_1	组织	人员未安全教育培训	内部
	技术	设备材料缺陷	
F_2	组织	专项施工方案未论证	内部
	人员	未持证上岗	耦合
F_3	组织	各单位检查验收趋于形式	内部
	技术	搭设存在安全隐患	耦合
F_4	环境	强降雨造成架体失稳等	内部
	技术	防倾防坠装置失效	
	人员	安全意识薄弱、违规操作	耦合
	组织	监管疏忽	
F_5	组织	未设置警戒区域	内部
	人员	人员未全部撤出	耦合

表 4 定量指标安全状态等级划分

Table 4 Quantitative event safety status classification

指标		风险等级(等级越高,安全状态越低)					
		I	II	III	IV	V	
环境 A_1	强降雨 B_1	降雨强度 $X_1/(mm \cdot d)$	[0,25)	[25,50)	[50,100)	[100,250)	≥ 250
		短时降雨量 $X_2/(mm \cdot h)$	[0,2)	[2,4)	[4,8)	[8,20)	≥ 20
		降雨历时 X_3/d	[0,1)	[1,2)	[2,5)	[5,10)	≥ 10
	伴随天气 B_2	风力强度 $X_4/(m \cdot s^{-1})$	[0,1.5]	[1.6,3.3]	[3.4,5.4]	[5.5,7.9]	≥ 8
大雾(能见度) X_5/m		$[10^3, 10^4]$	$[500, 10^3]$	[200,500]	[50,200]	[0,50]	
雷电 X_6 (综合强度)		[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	≥ 0.8	
技术 A_2	高度差 B_3	相邻机位升降高度差 X_7/mm	[0,7.5)	[7.5,15)	[15,22.5)	[22.5,30)	≥ 30
		整体升降高度差 X_8/mm	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	≥ 80
	使用状态 B_4	升降载荷 X_9 (实际/设计)	[0,1]	[1,1.075)	[1.075,1.15)	[1.15,1.3)	≥ 1.3
		架体垂直度 $X_{10}/\%$	[0,1)	[1,2)	[2,3)	[3,4)	≥ 4
		水平支承桁架挠度 X_{11} (L为受弯构件跨度)	[0, L/1000)	[L/1000, L/750)	[L/750, L/500)	[L/500, L/250)	$\geq L/250$
人员 A_3	作业人员 B_5	持证上岗人数占比 $X_{12}/\%$	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)
		防护配备与使用率 $X_{13}/\%$	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[20,40)	[0,20)

2.3 功能共振分析与网络图绘制

功能内部自身变化以及上下游功能产生耦合后部分会发生不正常振荡,结合上述分析深度挖掘强降雨情景下爬架系统功能共振情况,见表 3。

表 3 功能共振分析

Table 3 Functional resonance analysis

功能	内部	外部	失效功能连接链
F_1	$F_1(P)$	—	—
F_2	$F_2(P)$	$F_1(P)$	$F_1(P)-F_2(O)$
F_3	$F_3(R)$	$F_2(C)$	$F_2(C)-F_3(O)$
F_4	$F_4(P)$	$F_1(P)、F_3(R)$	$F_1(P)-F_4(O)、F_3(R)-F_4(O)$
F_5	$F_5(P)$	$F_3(C)、F_4(R)$	$F_3(C)-F_5(R)、F_4(R)-F_5(P)$

2.4 IFRAM-BN 映射

为更精确地分析事故致因,细分 IFRAM 中各功能模块。由于细分时部分指标受个人差异和现场影响较大且无法精确量化,如强降雨导致爬架表面湿滑,从而降低结构稳定性和架体抗滑移性能,尤其在风力作用下更易发生结构倾斜或倒塌。架体抗滑移性能等指标的等级难以划分和量化,故用降雨强度、风力强度、升降载荷等指标表示。在此基础上,结合事故报告、国内外相关文献^[17-18],并参考国家气象局降水、大风、大雾和雷电等级划分,以及《建筑施工工具式脚手架安全技术规范》(JGJ202—2010)和《建筑施工用附着式升降作业安全防护平台》(JG/T 546—2019)等相关规定划分定量和定性指标安全状态,见表 4、表 5。

表5 定性指标安全状态等级划分

Table 5 Quantitative event safety status classification

指标			风险等级(等级越高,安全状态越低)			
			I	II	III	IV
			[0,2.5)	[2.5,5)	[5,7.5)	[7.5,10]
技术 A_2	保护装置 B_6	安全防护系统 X_{14}	完善	较完善	一般	不完善
		防倾防坠装置 X_{15}	良好	较好	一般	失效
		同步控制系统 X_{16}	符合	较符合	一般	不符合
	架体稳定性 B_7	架体构件不合格或失效 X_{17}	无	较少	一般	较多
		附着支座混凝土强度 X_{18}	$\geq C15$	$> C15$	$\approx C15$	$< C15$
		电动葫芦悬挂状态 X_{19}	符合	较符合	一般	不符合
人员 A_3	B_4	工人违规操作 X_{20}	无	较少	一般	严重
	监管人员 B_8	不安全行为未纠正制止 X_{21}	无	较少	一般	普遍存在
		管理者违章指挥 X_{22}	无	较少	一般	较多
组织 A_4	技术管理 B_9	专项施工方案 X_{23}	完善	较完善	一般	不完善
		安全技术交底 X_{24}	全面	较全面	模糊	极模糊
		安全教育培训 X_{25}	全覆盖	大部分覆盖	覆盖一半	覆盖极少
		定期维护保养 X_{26}	好	较好	一般	较差
	监督管理 B_{10}	旁站等强制性监督 X_{27}	好	较好	一般	较差
		检查验收及现场管理 X_{28}	强	较强	一般	较弱
	应急管理 B_{11}	应急预案 X_{29}	完善	较完善	较差	无
		及时救援 X_{30}	非常及时	较及时	一般	不及时

结合表2、表3,将IFRAM中功能对应的逻辑关系转换为BN中的有向边,完成IFRAM-BN的映射。以功能 F_1 和 F_4 为例, F_1 中人员未安全教育培训内部变化作为上游输入端导致下游功能 F_4 变化,即引发工人“安全意识薄弱、违规操作”。将两者分别转化为BN中根节点 X_{25} 和 X_{20} , $F_1(P) - F_4(O)$ 转化为 X_{25} 和 X_{20} 分别对应的中间节点 $B_9 \rightarrow B_5$ 的有向边。最终,将5大功能细分为30个根节点、15个中间节点和1个叶节点 T ,绘制BN网络拓扑结构如图3所示。

3 强降雨下爬架事故实例分析

3.1 工程概况

选取西安凯旋大厦“9·10”爬架事故为例,事故发生前该地区连续10余天降雨,事发当天仍是中到大雨且伴随微风。发生坍塌的爬架位于大厦19层(约为61.3m)东侧偏南,4个机位的架体全部坠落至地面,其中,架体周边总长182m,分为3个升降单元,长约22m、高14m。

3.2 BN模型参数确定

遴选出高校教授2人、爬架专家2人、现场技术人员3人和监理人员1人,在图3所示的BN拓扑结构基础上,根据专家现场经验和事故现场实际数据,利用式(1)一式(6)计算节点处于不同安全状态

下的隶属度与先验概率,见表6。

由于篇幅有限,仅展示中间节点 B_{11} 条件概率表相关数据,见表7,其余节点同理可得。

同理,根据BN联合概率分布和正向推理算法,进一步求出中间节点和叶节点处于不同安全状态下的发生概率,如图4所示。依据《建筑施工附着升降脚手架管理暂行规定》(建建[2000]230号),将爬架事故风险划分为轻微I、一般II、较大III、重大IV、特别重大V共5个等级。计算得到该爬架事故在IV状态发生的概率最大,为0.3921,其次为在III状态发生的概率0.3295。由此得出强降雨下爬架事故发生的风险等级处于III~IV极大,即较大和重大事故之间。当中间节点均处于IV状态时, A_3 和 A_4 相关风险引发事故概率远高于 A_2 和 A_1 ,对于 A_3 和 A_4 应加强培训和监管使其处于可控范围,而当其处于III状态时, A_2 和 A_1 相关风险引发事故概率又高于 A_3 和 A_4 ,此时应提高技术培训和强降雨下应急处置水平。

3.3 反向诊断

利用BN反向推理诊断事故致因,设置 T 发生等级为IV的证据节点,实现BN概率更新,根据式(7)计算各根节点处于安全状态最低的后验概率,文中仅展示出后验概率排序前10的根节点,如图5所示。结果显示,当 $P(T=d_4)=1$ 时,从安全状态上看, X_3 和 X_7 处于危险程度最高的V级, X_{19} 、 X_{20} 、 X_{27} 和 X_{28} 处

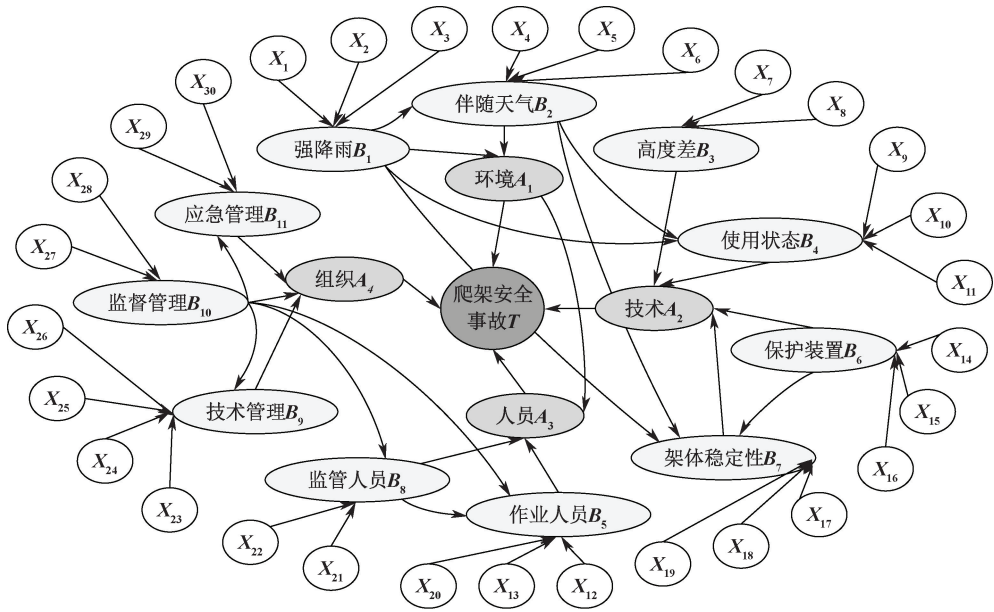


图 3 BN 网络拓扑结构

Fig. 3 BN network topology

表 6 根节点先验概率

Table 6 Root node prior probability

节点	安全状态	隶属度	先验概率	节点	安全状态	隶属度	先验概率	节点	安全状态	隶属度	先验概率
X ₁	Ⅲ	0.853 5	0.715 1	X ₁₁	Ⅰ	0.786 5	0.769 6	X ₂₁	Ⅱ	0.835 7	0.811 3
	Ⅳ	0.369 5	0.284 9		Ⅱ	0.235 4	0.230 4		Ⅲ	0.193 7	0.188 0
X ₂	Ⅲ	0.854 5	0.706 5	X ₁₂	Ⅱ	0.786 4	0.753 8	X ₂₂	Ⅰ	0.000 8	0.000 7
	Ⅳ	0.355 0	0.293 5		Ⅰ	0.256 6	0.245 9		Ⅲ	0.559 3	0.558 7
X ₃	Ⅴ	0.571 8	0.711 2	X ₁₃	Ⅲ	0.000 3	0.000 3	X ₂₃	Ⅱ	0.441 8	0.441 3
	Ⅳ	0.277 1	0.288 8		Ⅰ	0.642 4	0.641 9		Ⅰ	0.733 1	0.722 3
X ₄	Ⅲ	0.848 2	0.826 4	X ₁₄	Ⅱ	0.358 4	0.358 1	X ₂₄	Ⅱ	0.281 8	0.277 7
	Ⅳ	0.178 1	0.173 6		Ⅱ	0.778 9	0.758 5		Ⅰ	0.618 4	0.616 0
X ₅	Ⅱ	0.972 6	0.688 3	X ₁₅	Ⅲ	0.247 8	0.241 3	X ₂₅	Ⅱ	0.385 6	0.384 0
	Ⅰ	0.440 2	0.311 5		Ⅰ	0.000 2	0.000 2		Ⅱ	0.880 2	0.854 3
X ₆	Ⅲ	0.000 3	0.000 2	X ₁₆	Ⅱ	0.676 8	0.670 8	X ₂₆	Ⅲ	0.148 6	0.144 3
	Ⅰ	0.787 0	0.769 1		Ⅲ	0.332 2	0.329 2		Ⅰ	0.001 4	0.001 4
X ₇	Ⅱ	0.236 3	0.230 9	X ₁₇	Ⅰ	0.836 6	0.813 3	X ₂₇	Ⅲ	0.879 9	0.838 7
	Ⅱ	0.769 1	0.754 1		Ⅱ	0.192 1	0.186 7		Ⅱ	0.156 4	0.149 1
X ₈	Ⅰ	0.000 2	0.000 2	X ₁₈	Ⅳ	0.676 8	0.670 9	X ₂₈	Ⅳ	0.012 9	0.012 3
	Ⅲ	0.250 6	0.245 7		Ⅱ	0.332 0	0.329 1		Ⅲ	0.676 8	0.671 0
X ₉	Ⅱ	0.644 7	0.733 8	X ₁₉	Ⅲ	0.974 3	0.910 0	X ₂₉	Ⅳ	0.331 9	0.329 0
	Ⅰ	0.233 6	0.265 9		Ⅰ	0.014 0	0.013 1		Ⅲ	0.559 2	0.558 6
X ₁₀	Ⅲ	0.000 3	0.000 3	X ₂₀	Ⅲ	0.082 4	0.076 9	X ₃₀	Ⅲ	0.441 8	0.441 4
	Ⅴ	0.715 3	0.777 0		Ⅳ	0.786 4	0.769 5		Ⅳ	0.559 2	0.558 6
X ₁₁	Ⅳ	0.205 3	0.223 0	X ₂₁	Ⅳ	0.786 4	0.769 5	X ₂₂	Ⅲ	0.727 6	0.707 6
	Ⅱ	0.647 9	0.643 9		Ⅲ	0.235 5	0.230 5		Ⅳ	0.300 6	0.292 4
X ₁₂	Ⅲ	0.358 8	0.356 4	X ₂₃	Ⅳ	0.973 1	0.930 4	X ₂₄	Ⅲ	0.705 4	0.668 7
	Ⅰ	0.853 5	0.715 1		Ⅲ	0.072 8	0.069 6		Ⅳ	0.318 8	0.311 3

于危险程度较高的Ⅳ状态,这些是最可能导致事故发生的诱因。从概率上看,X₂₀的后验概率最大,为0.362 8,是最可能造成事故的直接原因,X₃、X₂₇、X₁₉

和X₂₈的后验概率较大且安全状态较低,也较容易诱发事故。这与西安“9·10”爬架事故调查报告^[19]基本相吻合。

表7 节点 B_{11} 条件概率

Table 7 Conditional probability of node B_{11}

组合		$P(B_{11} X_{29}, X_{30})$				
X_{29}	X_{30}	I	II	III	IV	V
I	I	1	0	0	0	0
I	II	0.9	0.1	0	0	0
I	III	0.7	0.2	0.1	0	0
I	IV	0.7	0.1	0.1	0.1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
IV	I	0	0.1	0.1	0.2	0.6
IV	II	0	0	0.1	0.1	0.8
IV	III	0	0	0	0.1	0.9
IV	IV	0	0	0	0	1

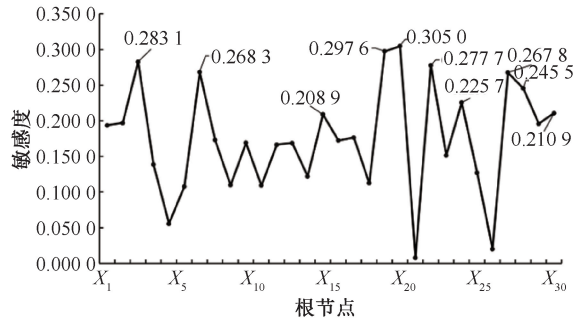


图6 根节点敏感性分析

Fig. 6 Root node sensitivity analysis

上岗、规范操作,提高工人的安全意识和操作技能,降低违规操作的发生可能性。

根节点 X_{19} 、 X_3 、 X_{22} 、 X_7 、 X_{27} 也对爬架事故有较高的带动效应,这些致因间的相互组合更会加剧事故发生,如降雨强度 X_3 较大→架体升降载荷 X_7 超载→爬架事故、现场未进行旁站等强制性监督 X_{27} →管理者违章指挥 X_{22} →爬架事故等。对于前者需要实时监测架体的升降载荷情况,一旦发现超载,立即停止升降操作,并进行相应的检修和维护。特别是强降雨情景下,现场监管人员要时刻注意降雨强度与历时、细化应急处置方案,作业人员在施工前加固架体结构,增强其抗风雨能力。雨后检测爬架的荷载、构件,排除隐患后再施工。而后者则要完善监管机制,设立旁站制度和管理责任制度,规定施工现场必须配备专职监管人员,并对监管不力的情况追责处理,以强化监管力度和责任意识。

总体来看,敏感性分析与反向诊断结果基本一致,这也验证了 IFRAM-BN 模型的有效性。

4 结论

1) 改进原有 FRAM,增加环境功能,利用 IFRAM 分析强降雨情景下爬架事故发生机制,可精确揭示系统中重要致因及耦合关系,更加有效和可行。

2) 基于 IFRAM 和 BN 的定性定量相结合事故致因分析模型,以 IFRAM 分析结果进行 BN 结构学习,有助于减少建模的主观性;引入联系云优化先验概率计算,可提高模型分析的准确性,更加贴合工程实际。

3) 正向推理结果显示,事故在安全状态 IV 时发生的可能性最大。通过反向诊断与敏感性分析,可有效识别出工人违规操作是事故发生最直接的因素,降雨强度、旁站等强制性监督等也是诱发事故的关键性因素,这为施工现场管理进行预防措施的设置以及应急管理提供了有力的依据。

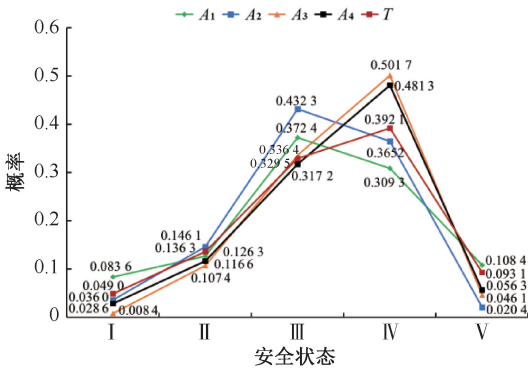


图4 节点 A 和 T 风险概率

Fig. 4 Node A and T risk probability map

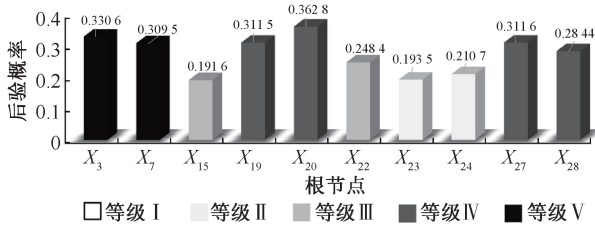


图5 T 处于IV等级下部分根节点后验概率分布
Fig. 5 Posterior probability distribution of root nodes at the lower level of level IV for T

3.4 敏感性分析

敏感性分析是一种验证 BN 模型参数的方法,主要通过节点先验概率和条件概率的微弱变化对后验概率的影响来实现,文中分析各根节点对叶节点 T 在重大风险等级下的敏感性,如图 6 所示。

由图 6 可知: X_{20} 的敏感度最显著,为 0.305 0,即工人违规操作是强降雨情景下爬架事故的核心致因,同时也说明工人规范作业是施工安全的前提与保障。因此,工程现场必须加大对工人的安全投入,如安全操作规程、工作流程和应急处置措施的培训等。加强资格审查与能力审查,定期考核,确保持证

参 考 文 献

- [1] 陈伟, 乔治, 王伟震, 等. 暴雨灾害引发施工安全事故应急处置 SD 模型[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6): 169-174.
CHEN Wei, QIAO Zhi, WANG Weizhen, et al. SD model for emergency disposal of construction safety accidents caused by rainstorm disasters [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27 (6): 169-174.
- [2] 裴兴旺, 赵向东, 周崇刚, 等. 基于灰色欧几里得的全钢型附着升降脚手架安全性评价[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 405-415.
PEI Xingwang, ZHAO Xiangdong, ZHOU Chonggang, et al. Safety evaluation of all steel type attached lifting scaffold based on the grey euclidean weighted correlation degree theory [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20 (2): 405-415.
- [3] 冯壮, 蔡东升. 基于 T-S 模糊故障树和 BN 的附着式升降脚手架倾覆和坠落事故易发性评价[J]. 数学的实践与认识, 2023, 53(2): 143-151.
FENG Zhuang, CAI Dongsheng. Probability assessment of capsizing and falling accident of attached lifting scaffold based on T-S fuzzy fault tree and BN [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2023, 53 (2): 143-151.
- [4] 韦东. 基于 ANSYS 的附着式升降脚手架的力学分析及实验验证[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
WEI Dong. Mechanical analysis and experimental verification of attached lifting scaffolding model based on ANSYS [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [5] SAWICKI M, SZÓSTAK M. Quantitative assessment of the state of threat of working on construction scaffolding[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(16): DOI: 10.3390/ijerph17165773.
- [6] NOWOBILSKI T, HOŁA B. Methodology based on causes of accidents for forecasting the effects of falls from scaffoldings using the construction industry in poland as an example [J]. Safety Science, 2023, 157: DOI: 10.1016/J. SSCI. 2022. 105945.
- [7] HOLLNAGEL E. Barriers and accident prevention (hardback): routledge[J]. Ergonomics, 2004, 50(6): 961-962.
- [8] 王涵宇, 谭钦文. 基于 FRAM 的有限空间作业安全职责半定量分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 88-95.
WANG Hanyu, TAN Qinwen. Semi quantitative analysis of safety duties in confined space operations based on FRAM [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (5): 88-95.
- [9] WEIJUN L, MIN H, YIBO S, et al. A proactive operational risk identification and analysis framework based on the integration of ACAT and FRAM[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 186: 101-109.
- [10] 张人友, 崔焕焕, 张进超, 等. 基于 FRAM-蒙特卡洛模拟的危化类实验安全分析和屏障管理[J]. 实验技术与管理, 2023(10): 223-228.
ZHANG Renyou, CUI Huanhuan, ZHANG Jinchao, et al. Safety analysis and barrier management of hazardous chemical laboratories based on FRAM-Monte Carlo simulation [J]. Experimental Technology and Management, 2023 (10): 223-228.
- [11] 尹德志, 帅斌, 黄文成, 等. Tropos-FRAM 法在道路客运事故分析中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(8): 151-157.
YIN Dezhi, SHUAI Bin, HUANG Wencheng, et al. Application of Tropos-FRAM method in road passenger traffic accident analysis[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30 (8): 151-157.
- [12] 郭进平, 马卓远, 孙寅峰, 等. 基于 FRAM 的煤矿生产系统应用[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 73-79.
GUO Jinping, MA Zhuoyuan, SUN Yinfeng, et al. Application of mine production system based on FRAM [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (6): 73-79.
- [13] JOOHEE L, HYUN C. A new methodology for accident analysis with human and system interaction based on FRAM: case studies in maritime domain[J]. Safety Science, 2018, 109: 57-66.
- [14] 疏学明, 颜峻, 胡俊, 等. 基于 Bayes 网络的建筑火灾风险评估模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2020, 60(4): 321-327.
SHU Xueming, YAN Jun, HU Jun, et al. Risk assessment model for building fires based on Bayesian network [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2020, 60 (4): 321-327.

[15] 李岳, 周则圆, 蔡靖. 基于联系云的飞机轮胎滑水风险可拓评价模型[J/OL]. 北京航空航天大学学报:1-9[2024-03-29]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0136>.
LI Yue, ZHOU Zeyuan, CAI Jing. Extensible evaluation model of aircraft tire hydroplaning risk based on connection cloud [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-9[2024-03-29]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0136>.

[16] 陈钊, 袁航, 黄鹏宇, 等. 基于改进条件概率的贝叶斯网络隧道坍塌安全风险评价[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2023,54(1):327-340.
CHEN Zhao, YUAN Hang, HUANG Pengyu, et al. Safety risk evaluation of tunnel collapse based on Bayesian network of improving conditional probability [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2023, 54(1): 327-340.

[17] 刘剑锋. 基于物联网的附着式升降脚手架安全监控系统研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
LIU Jianfeng. Research on safety monitoring and management system for attached self-lifting based on the internet of things [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2017.

[18] BOŽENA H, TOMASZ N, ZUZANNA W, et al. Qualitative and quantitative analysis of the causes of occupational accidents related to the use of construction scaffoldings [J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): DOI: 10.3390/APP12115514.

[19] 陕西省应急管理厅. 陕西省安全生产委员会办公室关于西安“9·10”重大建筑施工坍塌事故调查处理情况的通报[EB/OL]. (2012-03-07). <http://yjt.shaanxi.gov.cn/c/2012-03-07/559897.shtml>.



作者简介: 陈伟 (1970—),男,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,主要从事工程项目管理方面的研究。E-mail: iamhappychen@163.com。

《中国学术期刊影响因子年报(2023版)》发布

中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2023版)
编号: C51-J1FR 2023 ZAK6

期刊名称: 中国安全科学学报
主办单位: 中国职业安全健康协会
CN/ISSN: CN 11-2262/X ISSN 1003-3033

计量指标统计表

一、影响力指数 (CI)

学科组别	复合影响因子	影响因子
影响因子指数	1424.214	1.178
C1学科排序	51	4453
分区	1.302	1.302

二、载文量、可被引文献量 (篇)

2023年	2022年	2021年						
载文量	可被引文献量	载文量	可被引文献量	载文量	可被引文献量			
403	331	0.82	464	314	0.76	410	328	0.80

三、影响因子

期刊名称	复合影响因子	影响因子	影响因子	影响因子	影响因子	影响因子	影响因子
中国安全科学学报	1.302	1.178	1.178	1.178	1.178	1.178	1.178

四、被引频次

期刊名称	2023年度被引频次	2022年度被引频次	2021年度被引频次	2020年度被引频次	2019年度被引频次
中国安全科学学报	4453	331	0.82	464	314

五、其他参考指标

期刊名称	2023年度被引频次	2022年度被引频次	2021年度被引频次	2020年度被引频次	2019年度被引频次
中国安全科学学报	4453	331	0.82	464	314

由《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社出版、中国科学文献计量评价研究中心编制的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术 2023版)》(简称《年报2023版》)发布。

《年报(2023版)》计量指标统计显示:

《中国安全科学学报》影响力指数 CI 为 1 414.214, CI 学科排序为 1/19,分区为 Q1。

其他指标如下:

他引总被引为 4 453, 他引影响因子为 1.302。2022 年载文量为 403, 可被引文献量为 331, 可被引文献比为 0.82。复合总被引频次为 11 854, 复合影响因子为 2.737, 复合他引影响因子为 2.164, 5 年影响因子为 2.619, 即年指标为 0.254。