



土木工程与管理学报  
*Journal of Civil Engineering and Management*  
ISSN 2095-0985, CN 42-1816/TU

## 《土木工程与管理学报》网络首发论文

题目： 装配式建筑施工安全风险评估与控制的 BN-MNA 模型及应用  
作者： 丁垚, 王人龙, 李灵芝, 袁竞峰, 申玲  
DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2022.20211019  
收稿日期: 2021-11-11  
网络首发日期: 2022-06-10  
引用格式: 丁垚, 王人龙, 李灵芝, 袁竞峰, 申玲. 装配式建筑施工安全风险评估与控制的 BN-MNA 模型及应用[J/OL]. 土木工程与管理学报.  
<https://doi.org/10.13579/j.cnki.2095-0985.2022.20211019>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 装配式建筑施工安全风险评估与控制的 BN-MNA 模型及应用

丁 焱<sup>1</sup>, 王人龙<sup>1</sup>, 李灵芝<sup>1</sup>, 袁竞峰<sup>2</sup>, 申 玲<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 为了系统、有效地对装配式建筑施工安全风险进行评估与控制, 文章建立了 BN-MNA 模型并开展实证研究。首先, 构建包括风险源、工种、管理责任、时间和空间等关联要素的建筑施工安全风险系统; 然后, 基于系统框架, 构建装配式建筑施工安全风险的元网络分析(MNA)模型; 随后, 通过贝叶斯网络(BN)引入概率以构建 BN-MNA 模型, 进行风险源重要度分析和风险源节点的风险评估值定量计算; 最后, 针对风险性较大风险源节点, 输出风险控制路径以明确相关责任主体, 做到事前关联事件精准控制, 同时, 对已发生风险事件反向诊断, 实现事后有效控制。研究表明: BN-MNA 模型能够有效实现装配式建筑施工安全风险评估与控制一体化目标, 通过关键风险概率推演为装配式建筑施工安全风险控制提供现实依据。

**关键词:** 装配式建筑; 施工安全; 风险评估与控制; 元网络分析(MNA); 贝叶斯网络(BN); BN-MNA  
**中图分类号:** TU741; TU714 **文献标识码:** A

## Safety Risk Assessment and Control of Prefabricated Building Construction Based on BN-MNA Model

DING Yao<sup>1</sup>, WANG Renlong<sup>1</sup>, LI Lingzhi<sup>1</sup>, YUAN Jingfeng<sup>2</sup>, SHEN Ling<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** In order to systematically and effectively assess and control the safety risks of prefabricated building construction, a BN-MNA model is established and conducted an empirical study. Firstly, a building construction safety risk system including risk sources, work types, management responsibilities, time and space and other associated elements is constructed; secondly, based on the system framework, a meta-network analysis (MNA) model of prefabricated building construction safety risks is constructed; thirdly, probability is imported to construct the BN-MNA model through Bayesian networks (BN), and risk source importance analysis and risk assessment values of risk source nodes are carried out. The result shows that the BN-MNA model can realize the integration and precision of safety risk assessment and control of prefabricated building construction, and provides a realistic basis for safety risk control through key risk probability derivations.

**Key words:** prefabricated building; construction safety; safety risk assessment and control; meta-network analysis (MNA); Bayesian network (BN); BN-MNA

2020年,我国新开工装配式建筑共计6.3亿m<sup>2</sup>,较2019年增长50%,约占新建建筑面积的20.5%,超额完成了《“十三五”装配式建筑行动方

案》制定的工作目标<sup>[1]</sup>。装配式建筑摒弃传统粗放落后的建筑生产方式,具有建造速度快、劳动效率高、生产成本低、绿色环保等优点<sup>[2-4]</sup>。装配式

收稿日期: 2021-11-11 修回日期: 2022-03-14

作者简介: 丁 焱(1996—),女,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为工程项目管理(Email: Dingyao0369@163.com)

通讯作者: 李灵芝(1987—),女,山东滨州市人,讲师,博士,研究方向为工程项目管理(Email: 6370@njtech.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金(71901120)

建筑施工虽然以现场装配为主,但在构件生产、构件运输、构件吊装、构件安装等全过程都存在安全管控要点,施工安全风险因素更为复杂,这对建筑施工安全管理提出了新的挑战<sup>[5,6]</sup>。如何系统、有效地对装配式建筑施工安全风险进行评估与控制是亟需解决的难题。

装配式建筑施工安全风险是一项由多主体构成的具有层次性的复杂系统问题<sup>[7,8]</sup>。近年来,学者们将多种方法应用于施工安全管理,主要包括基于指标体系的评价方法与复杂网络分析方法等。例如李文龙等人提出了基于可信性测度理论和结构熵权法的施工安全风险客观评估方法,并针对 10 个典型案例实证应用<sup>[9]</sup>。陈伟等联合应用层次分析法(AHP)及灰色聚类评价方法,构建施工安全评价指标体系以实现装配式建筑施工安全的定性评估<sup>[10]</sup>。Li 等<sup>[11]</sup>采用模糊综合评价法建立综合评价模型,并在层次分析法结果的基础上,就主要影响因素提出装配式建筑安全提升策略。以往研究表明基于指标体系的安全风险评估模型,能够识别影响施工安全的关键因素,指出风险控制的方向,但无法厘清安全风险因素之间的作用机理,以致尚不能提出安全风险控制的精准对策与实施路径<sup>[9~11]</sup>。为了进一步探求施工安全事故相关因素之间的关联,薛楠楠等基于贝叶斯网络实施诊断推理和敏感性分析,得到施工安全事故发生的最大可能性路径和关键因素,为安全管控和事故预防提供依据<sup>[12]</sup>。Jin 等<sup>[13]</sup>基于贝叶斯网络进行敏感性分析和风险计算,得到装配式施工安全风险评估中的重要风险因素并提出策略。姚浩等<sup>[14]</sup>针对安全风险演化过程构建网络拓扑结构模型,提出基于系统模型推演的耦合安全风险评估方法。这些网络分析方法虽然一定程度上分析了风险要素之间的关联,但是仍不能映射施工安全管理这一系统的多主体特征与复杂关联特性,无法将安全风险控制与责任主体精准匹配,对实际施工安全风险问题解决的作用有限<sup>[12~14]</sup>。

现有的装配式建筑施工安全风险评价相关研究内容具有以下共性:(1)一般基于典型的安全系统构成要素(人、物、环境与管理)进行风险因素划分;(2)较多考虑组织管理、操作行为等相关的直接安全风险源等,对技术工种、时间空间等关注较少<sup>[7~14]</sup>。基于此,本研究创新性地通过贝叶斯网络(Bayesian Networks, BN)的原理将概率引入元网络分析(Meta-network Analysis, MNA)模型中,综合考虑风险因素之间的关联关系、系统多主

体以及风险事件发生概率等问题,构建 BN-MNA 模型,就装配式建筑施工安全风险展开实证研究,并以“吊装阶段”为例,对装配式建筑施工安全风险展开定量评估。最后,针对风险性较大风险源节点,从风险事件“正向传递”与“反向诊断”双视角提出安全风险控制路径,明确相关责任主体,实现了评估与控制一体化。

## 1 BN-MNA 模型

BN-MNA 模型的核心是 MNA 模型。MNA 是一种能够处理大规模、多维度、多关系、多主体的复杂系统内部关联关系的新兴网络分析方法<sup>[15~17]</sup>。Pestov 认为社会、组织等任何现实系统都可以使用 MNA 方法进行建模<sup>[18]</sup>。已有多位学者将 MNA 模型分别用于项目风险评估<sup>[19]</sup>、施工安全事故致因分析<sup>[20]</sup>和风险控制<sup>[21]</sup>等研究。而 BN 则是一种模拟人类推理过程中因果关系的的不确定性处理模型<sup>[22]</sup>。基于 BN 的建模原理,将概率引入 MNA 模型建立的 BN-MNA 模型可在进一步厘清复杂系统中各异质与同质要素之间的复杂关联关系的基础上,将系统演化过程中的不确定性问题转化为可量化的概率问题,满足装配式建筑施工安全系统中多主体参与的复杂建模需求,实现安全风险评估与控制的一体化目标。

BN-MNA 模型的建模与应用流程如图 1 所示。

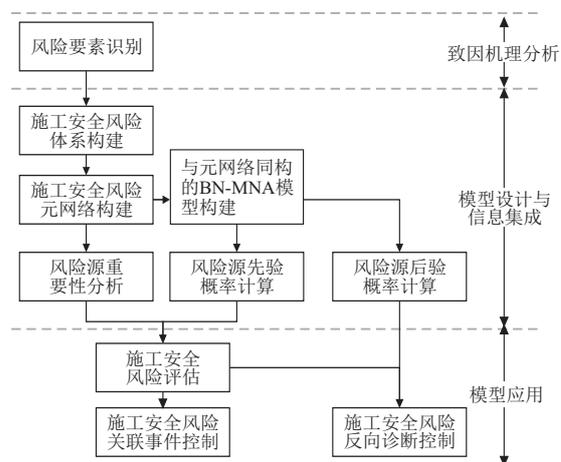


图 1 建筑施工安全风险评估与控制 BN-MNA 模型

根据装配式建筑施工安全风险演化的特点,应用 BN-MNA 模型进行装配式建筑施工安全风险评估与控制,详细步骤如下:

### Step 1: 建筑施工安全风险系统构建

采用工作分解结构法,基于典型的安全系统构成要素,从系统结构、关联关系与目标三个维度,将建筑施工安全风险要素进行解构<sup>[23]</sup>。并将解构所得要素重组为结构化的建筑施工安全风险

系统<sup>[24]</sup>。

Step 2: 装配式建筑施工安全风险元网络的构建。

基于建筑施工安全风险系统, 识别拟建元网络的关键节点, 并结合专家访谈确定节点间的关联关系, 并根据不同节点间的关联关系建立不同的装配式建筑施工安全风险关联矩阵。在关联矩阵中, “1”代表所在行对应的要素与所在列对应的要素有单向关联关系, 反之“0”代表没有关联关系。将所有的关联矩阵导入 ORA 软件转换为由多个子网络组成的元网络。

Step 3: 装配式建筑施工安全风险评估

(1) 计算元网络中风险源交互子网络中各节点的原因度和接近中心性, 以表征风险源的重要度。原因度代表一个节点在整个有向网络中所起到的作用, 接近中心性则代表一个节点在控制网络中与其他节点之间进行交互的能力<sup>[25,26]</sup>。

节点  $i$  的原因度  $R_i$  计算公式见式(1):

$$R_i = \frac{\text{Outdegree}_i - \text{Indegree}_i}{n - 1} \quad (1)$$

式中:  $n$  为网络中的总节点数;  $\text{Outdegree}_i$ ,  $\text{Indegree}_i$  分别为节点  $i$  的出度和入度。如果  $R_i > 0$ , 则节点  $i$  为原因型节点; 反之, 则节点  $i$  为结果型节点。

节点  $i$  接近中心性  $C_i$  计算公式见式(2):

$$C_i = \frac{n - 1}{\sum_{k \neq i} d(i, k)} \quad (2)$$

式中:  $n$  为网络中的节点数;  $k$  为网络中任意一个非节点  $i$  的节点;  $d(i, k)$  是节点  $i$  和节点  $k$  之间的最短距离。

(2) 使用 GeNIe2.1 软件分阶段构建与元网络同构的贝叶斯网络, 通过数据采集、离散化处理和概率修正, 确定各根节点的先验概率、子节点与父节点的链接概率和各节点的条件概率。

其中节点  $i$  的先验概率计算见式(3):

$$P(X_i = Y | R = Y) = \frac{P(X_i = Y)P(R = Y | X_i = Y)}{P(R = Y)} \quad (3)$$

式中:  $P$  为概率;  $Y$  表示与  $X_i$  关联的上级节点。

$P(X_i = Y | R = Y)$  的值越大, 表示该风险源成为事故致因的可能性越大。

(3) 将概率计算结果与施工安全风险源重要度计算结果相结合, 计算装配式建筑安全风险评估值。

节点  $i$  对应的风险评估值  $D_i$  计算公式如下(4):

$$D_i = P(X_i = Y)(R_i^2 + C_i^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Step 4: 装配式建筑施工安全风险控制。

最后模拟特定风险源的发生, 输出相关施工安全风险控制回路, 识别关键风险源、相关工种和管理责任单位, 进行预防式关联事件控制。同时运行 GeNIe2.1 软件, 对关键风险源进行后验概率推演, 实现施工安全风险的反向诊断控制。

## 2 装配式建筑施工安全风险系统

在装配式建筑施工安全风险评估与控制的过程中, 人、组织、事件等众多因素之间存在着不可忽视的关联关系。本文采用工作分解结构法, 从预制构件施工流程的角度, 将装配式建筑施工安全风险按构件生产阶段、运输与存放阶段、吊装阶段和安装阶段进行解构。以能量意外释放理论为依据, 将解构所获得的零散的、非结构化的信息重组为系统的、结构化的建筑施工安全风险系统, 概念图如图 2 所示。

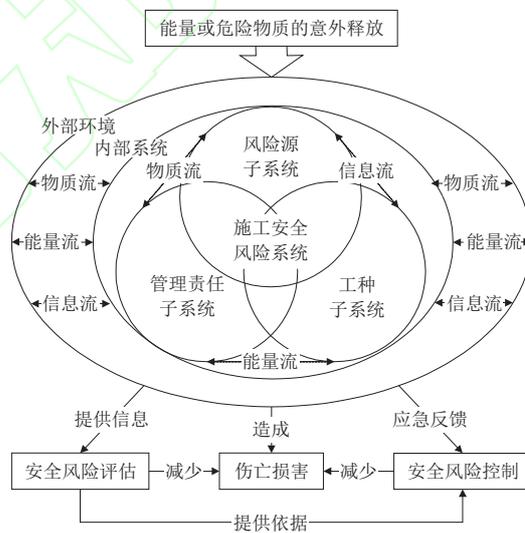


图2 装配式建筑施工安全风险系统

(1) 系统构成子系统维度: 本文将建筑施工安全风险系统划分为三大内部子系统(风险源子系统、工种子系统和管理责任子系统)和外部环境(时间和空间)。危险源子系统是指导致安全风险的状态因素的集合, 是风险评估与风险控制的对象, 风险源的识别与风险源子系统的建立将直接关系到安全风险评估与控制的效果, 因此风险源子系统是安全风险系统的基础核心。工种子系统是具有专业技能的施工人员的集合, 工种既是安全风险产生的诱因, 又是安全风险发生的直接被伤害对象, 是装配式建筑施工安全风险控制的主导性支撑系统。管理责任子系统是安全事故

的直接责任对象。管理责任单位是安全风险控制的决策核心,也是事故追责的对象,明确安全事故的管理责任是装配式建筑施工安全风险有效控制的重要前提。时间和空间环境分别对应装配式建筑施工阶段和作业空间,是装配式建筑施工安全风险控制的主要依据。

(2)系统关联关系维度:关联是施工安全风险系统的子系统之间通过某一介质所建立的特定风险关系,如管理责任-工种关联。内部系统不断地与外部环境进行物质、能量和信息传递,形成某种协同效应,进而获得系统在特定施工阶段、施工作业空间下的安全风险作用结构,塑造建筑施工安全风险系统模型可描述系统受到风险冲击后在内外环境下的运作机理。

(3)系统目标维度:根据系统安全风险内涵,以建筑施工安全风险评估与控制为目标,构建系统运行体系框架。

### 3 装配式建筑施工安全风险元网络的构建

根据装配式建筑施工安全风险系统,依据相关技术规范、政府文件和相关文献<sup>[9,27-29]</sup>,并结合装配式建筑施工现场的考察和专家访谈记录,共识别出 28 个风险源(R)、12 个工种(A)、3 个管理责任单位(O)、4 个施工阶段(P)和 4 个施工作业空间(S)。将上述要素转化为元网络节点,网络节点代码及其含义见表 1。

表 1 装配式建筑施工网络节点代码及其含义

节点类型	节点代码	节点名称
风险源(R)	R1	生产单位未对出厂构件进行检查
	R2	生产过程中预埋件的规格参数不符合要求
	R3	吊点设计不合理或生产过程出现较大偏差导致吊点位置偏差较大
	R4	吊点被污染,导致吊钉不能拧紧到位
	R5	施工单位未对进场的预制构件进行检查验收
	R6	预制构件卸载前,未对卸载条件进行检查
	R7	运输车辆处于不安全行驶的状态
	R8	运输计划不合理
	R9	预制构件装车时绑扎固定不牢固
	R10	预制构件堆放区未采取隔离措施
	R11	预制构件需求点位置不合理
	R12	预制构件放置不安全
	R13	起重机械缺陷
	R14	起重机械操作失误
	R15	起吊叠合板时未使用专用安全吊具
	R16	吊具与吊点连接不到位

续表 1

节点类型	节点代码	节点名称
风险源(R)	R17	临时支撑体系不到位
	R18	起吊范围内有障碍物
	R19	交叉作业协调管理不到位
	R20	人员在未经计算、试吊的起吊机具下行走或者逗留
	R21	外防护架搭设未制定专项方案
	R22	在预制构件上架体、机械设备的附着点未经设计复核同意
	R23	竖向构件临时固定措施不到位
	R24	水平构件支撑系统搭设缺陷
工种(A)	A1	构件装配工
	A2	吊装人员
	A3	运输人员
	A4	施工方案设计师
	A5	施工质检员
	A6	施工安全员
	A7	专业监理工程师
	A8	监理员
	A9	构件质检员
	A10	构件深化设计师
	A11	构件工艺工程师
	A12	构件制作工
管理责任单位(O)	O1	施工单位
	O2	监理单位
	O3	构件生产单位
施工作业空间(S)	S1	生产空间
	S2	作业空间
	S3	运输空间
	S4	构件堆放空间
施工阶段(P)	P1	构件生产阶段
	P2	构件运输与存放阶段
	P3	构件吊装阶段
	P4	构件安装阶段

本文根据已建立的建筑施工安全风险系统、工地调研等,初步梳理各节点对应实体之间的关联关系,并通过专家访谈法进一步对其修正。专家访谈对象包括 6 名具有博士学位的相关领域的高校教授,5 位具有五年以上相关经验的装配式建筑生产单位负责人以及 6 位具有五年以上装配式建筑施工经验的项目经理共 17 位专家。访谈的主要内容是对数据进行辅助修正。最终将已确认的节点及关联关系转换为关联矩阵,并用 ORA

软件构建装配式建筑施工安全风险元网络模型，见图 3。

在元网络模型中，不同类型节点之间存在着不同意义的关联关系。本文构建的装配式建筑施

工安全风险评估与控制元网络模型由九个子网络构成，分别映射风险源、工种、管理责任单位、施工阶段和施工作业空间之间的九种关联关系，见表 2 与图 4。

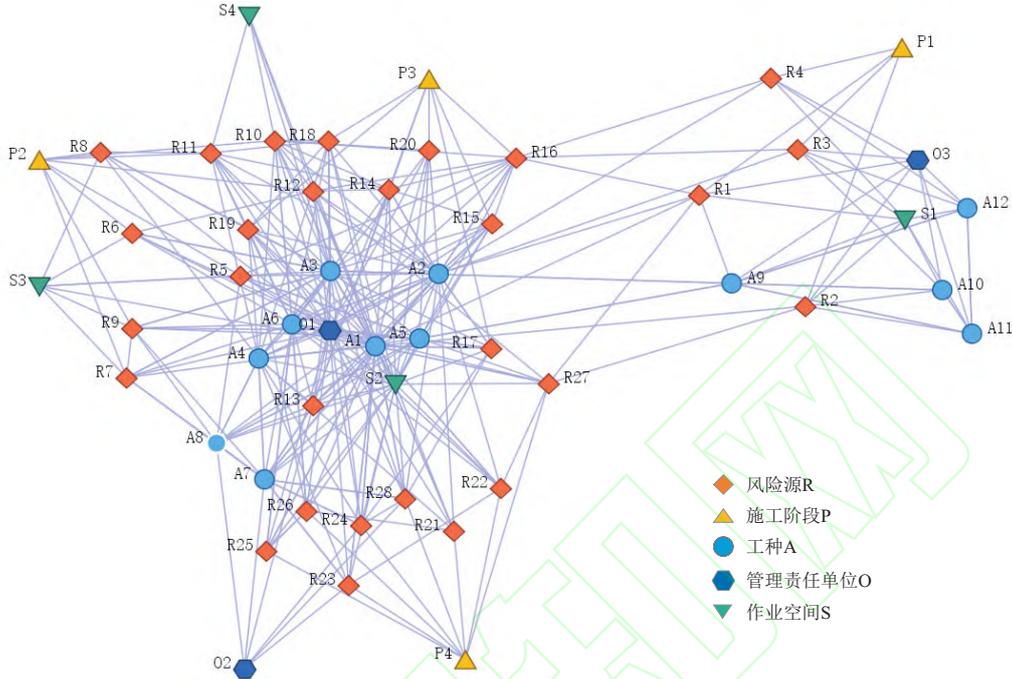


图 3 装配式建筑施工安全风险元网络

表 2 节点及网络类型

节点类型	风险源 R	工种 A
风险源 R	RR 网络(风险源交互网络)	AR 网络(工种 - 风险源因果网络)
工种 A	RA 网络(风险源 - 工种危险传递网络)	AA 网络(工种交互网络)
管理责任单位 O	RO 网络(风险源 - 责任单位交互网络)	AO 网络(工种 - 责任单位交互网络)
施工阶段 P	RP 网络(风险源时间定位网络)	—
施工作业空间 S	RS 网络(风险源空间定位网络)	AS 网络(工种空间定位网络)

其中,RR 网络为单模单向风险源交互网络,表示风险源之间可能存在的传递关联,即某个风险源的产生可能导致其他风险源的产生。RA 网络,为双模单向风险源 - 工种危险传递网络,其现实意义是风险源对各类工种产生的直接安全隐患,为施工安全风险控制的目的之一。AR 网络,为双模单向工种 - 风险源因果网络,代表工种的违规操作或操作失误与风险源产生之间可能存在的因果关系,是施工安全事故追责的重要依据。AA 网络,为单模单向工种交互网络,代表工种之间的协同关系。RO 网络,为双模单向风险源 - 责任单位交互网络,其意义是风险源与其所属管理责任单位的匹配,是实现安全事故预警与追责的重要依据。AO 网络,为双模单向工种 - 责任单位交互网络,表示工种与所属管理责任单位的对应关系,是工种违规操作或操作失误导致风险实际追责的参考。RP 网络与 RS 网络,分别为双模单向

风险源的时间与空间定位网络,代表风险源与所在施工阶段、施工作业空间的映射关系,是排查风险源的首要参考范围。AS 网络,为双模单向工种的时空定位网络,代表各工种与作业时空的对应关系,是在系统中对工种进行空间定位的依据。

## 4 基于 BN-MNA 的装配式建筑施工安全风险评估

### 4.1 装配式建筑施工安全风险源重要度计算

根据式(1)(2),计算 RR 网络(风险源交互网络)中的 28 个风险源节点的原因度和接近中心性,结果如图 5。结合 RP 网络(风险源时间定位网络)和 RS 网络(风险源空间定位网络)可知,装配式建筑施工安全的风险主要存在于 P2(构件运输与存放)和 P3(构件吊装)两个阶段。装配式建筑施工过程中垂直运输设备的作业较为频

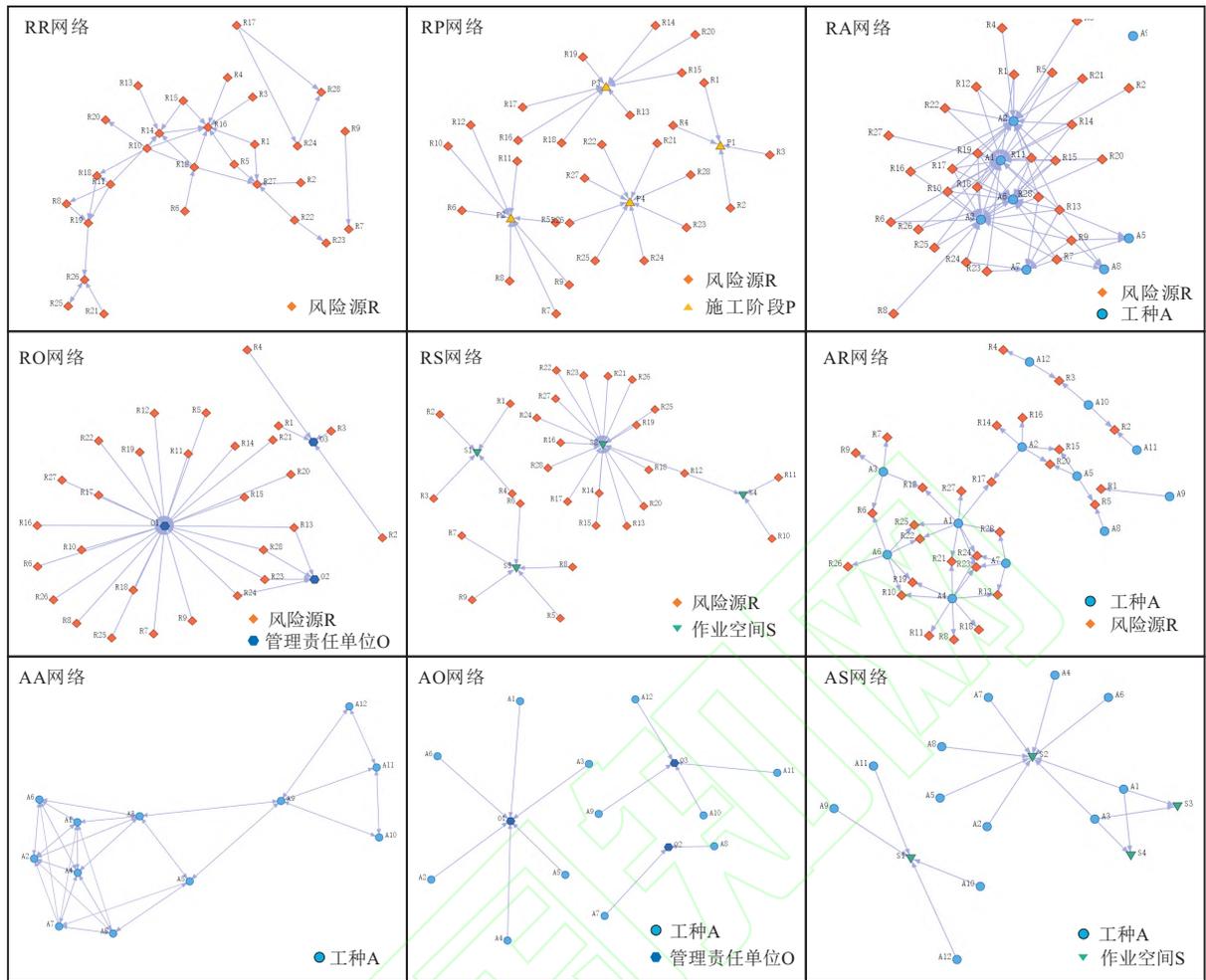


图4 装配式建筑施工安全风险元网络的子网络

繁,装配式施工过程中的风险将以预制构件作为风险载体进行传导,这就使得作为 P2(构件运输与存放)和 P3(构件吊装)的交集空间 S4(构件堆放空间)成为了重要安全控制区域。利用原因度和接近中心性表征 RR 网络中的风险源重要度,充分考虑了风险源在网络中的因果属性和交互属性,为实现施工安全风险的全过程评估与控制提供依据。

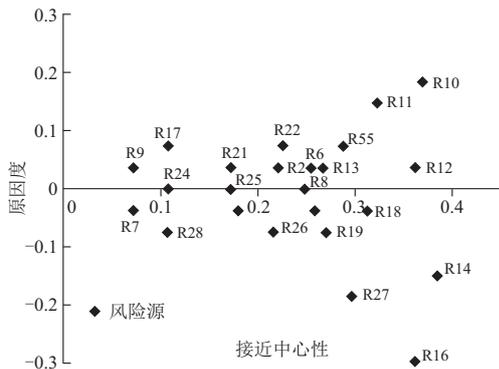


图5 风险源重要度

根据计算结果(图5),R10(风险源预制构件堆放区未采取隔离措施)、R12(预制构件放置不

安全)、R14(起重机械操作失误)、R16(吊具与吊点链接不到位),是装配式建筑施工过程中的关键风险源节点。R10 的原因度和接近中心性较大,说明其在装配式建筑施工安全风险交互传导中起着关键作用。R16 的原因度较小,该因素受其他因素影响较大,而该节点的接近中心性较大,可以在一定程度上反映出该节点是构件吊装阶段及其以前阶段各种风险源所产生的共同结果。R12 和 R14 的接近中心性较大,说明这两个风险源在装配式建筑施工风险传导过程中所占的比重更大,需要更多的关注。

#### 4.2 装配式建筑施工安全风险评估

由于篇幅原因,本文仅展示构件吊装阶段(P3)的安全风险评估过程。使用 GeNIe2.1 软件构建与装配式建筑施工安全风险元网络同构的贝叶斯网络,如图6。贝叶斯网络中每个节点对应元网络中的风险源节点,节点中的关联关系代表着元网络中的风险源交互关系,“Y”对应该节点对应的风险源发生,“N”对应该节点对应的风险源不发生,后面是概率值。

为揭示装配式建筑施工安全事故的普遍性规

律,本文通过文献检索与互联网搜集的方式尽可能广泛地搜集装配式建筑施工安全事故案例。最终从国家应急管理部,各省市应急管理厅、住建部

等网站整理得到 2019—2020 年部分装配式建筑生产安全事故调查报告共计 107 份,统计的安全事故占比如图 7 所示。

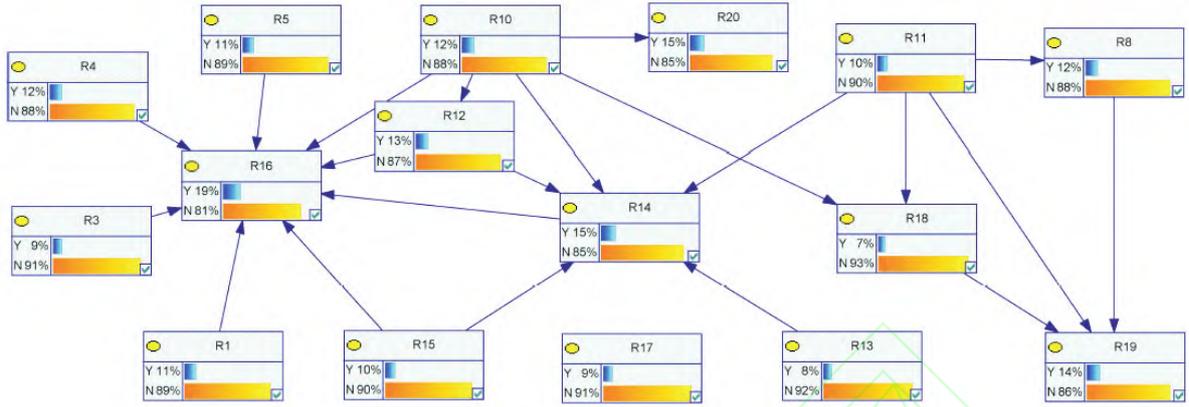


图 6 P3 阶段安全风险元网络同构贝叶斯网络模型

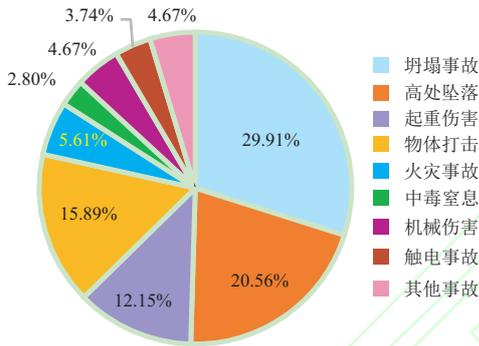


图 7 2019—2020 年部分装配式建筑生产安全事故统计

通过对事故报告进行统计分析,运行公式(3)计算并结合专家访谈进行数据修正,最终确定 P3(构件吊装)阶段各根节点的先验概率(如表 3)、子节点与父节点的连接概率和各节点的条件概率,表 4 为节点 R18(起吊范围内有障碍物)的条件概率示例。

综合考虑风险源的发生概率、原因度、接近中心性,绘制风险源危险性三维示意图,如图 8。根据式(4)计算各个风险源的风险评估值,其计算结果与排序如表 5 所示。

表 3 P3 阶段根节点的先验概率

因子	R1		R3		R4		R5		R10		R11		R13		R17	
	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N
先验概率/%	11	89	9	91	12	88	11	89	12	88	10	90	9	91	9	91

表 4 子节点 R18 的条件概率

因素	父节点状态				
	R10	Y		N	
		R11	Y	N	Y
R18 的条件	Y	21.1	10	14.8	5
概率/%	N	78.9	90	85.2	95

表 5 风险评估值与排序

节点代码	风险评估值	排序	节点代码	风险评估值	排序
R1	0.0326	9	R15	0.0296	14
R2	0.0268	16	R16	0.0888	1
R3	0.0231	17	R17	0.0117	25
R4	0.0309	12	R18	0.0220	18
R5	0.0326	10	R19	0.0392	5
R6	0.0386	7	R20	0.0391	6
R7	0.0080	27	R21	0.0194	21
R8	0.0297	13	R22	0.0285	15
R9	0.0056	28	R23	0.0146	23
R10	0.0495	3	R24	0.0086	26
R11	0.0355	8	R25	0.0155	22
R12	0.0472	4	R26	0.0205	20
R13	0.0215	19	R27	0.0314	11
R14	0.0618	2	R28	0.0143	24

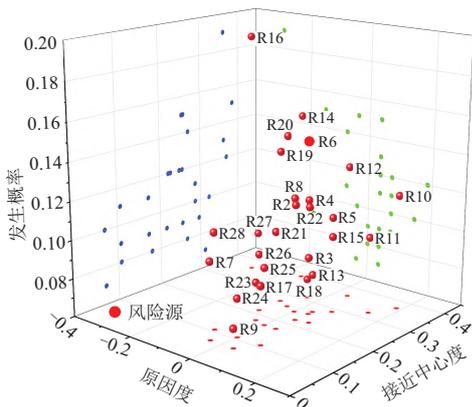


图 8 风险源危险性三维示意图



目标, 构建了装配式建筑施工安全风险系统, 为 BN-MNA 模型建立搭建了基础框架。

(3) 本文以 P3(构件吊装阶段) 为例开展 BN-MNA 实证, 并结合各风险源发生的概率, 通过计算风险评估值对各风险源进行定量评估。最后以 R16(吊具与吊点连接不到位) 为例, 应用 BN-MNA 实现了装配式建筑安全控制的双重目标。一方面, 依据风险评估结果, 确定安全风险的首要控制节点, 输出其相关控制路径与相关工种、管理责任单位、时空等要素, 实现对装配式建筑施工安全风险的事前精准控制。另一方面, 对已经发生的安全风险事故通过概率推演进行反向诊断, 可以及时且有针对性地进行预警和追责, 以防止安全风险的进一步传递扩散。

### 参考文献

- [1] 住房和城乡建设部标准定额司. 住房和城乡建设部标准定额司关于 2020 年度全国装配式建筑发展情况的通报: 建司局函标〔2021〕33 号 [A/OL]. (2021-03-12) [2021-08-31]. [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/tzgg/202103/20210312\\_249438.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/tzgg/202103/20210312_249438.html).
- [2] 中华人民共和国国务院办公厅. 国务院办公厅转发住房城乡建设部关于完善质量保障体系提升建筑工程品质指导意见的通知: 国办函〔2019〕92 号 [A/OL]. (2019-09-24) [2021-08-31]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2019-09/24/content\\_5432686.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2019-09/24/content_5432686.htm).
- [3] 陈伟, 武亚帅, 邹松, 等. 基于 SEM 的装配式建筑建造成本影响因素分析[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(5): 50-55.
- [4] CAO X Y, LI X D, ZHU Y M, et al. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 109: 131-143.
- [5] 杨杰. 装配式建筑的施工安全管理策略论析[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 230.
- [6] 马辉, 张文静, 董美红. 装配式建筑吊装施工空间冲突分析与多目标优化[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(2): 28-34.
- [7] 李英攀, 刘名强, 王芳, 等. 装配式建筑项目安全绩效云模型评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6): 115-120.
- [8] 陈伟, 乔治, 熊付刚, 等. 装配式建筑施工安全事故预防 SD-MOP 模型[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(1): 19-24.
- [9] 李文龙, 李慧民, 裴兴旺, 等. 基于结构熵权-可信性测度理论的装配式建筑吊装施工安全风险评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(5): 410-417.
- [10] 陈伟, 付杰, 熊付刚, 等. 装配式建筑工程施工安全灰色聚类测评模型[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(11): 70-75.
- [11] LI B, WANG Y W, LU Y X. Research on safety evaluation of prefabricated building construction based on analytic hierarchy process[C]//ICCREM 2020: Intelligent Construction and Sustainable Buildings. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020: 177-183.
- [12] 薛楠楠, 张建荣, 张伟, 等. 基于贝叶斯网络的建筑施工安全事故致因研究[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(4): 176-182, 194.
- [13] JIN Y C, ZHANG J L, SUN L. Safety risk assessment of prefabricated building construction based on Bayesian network[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 371(3): 032052.
- [14] 姚浩, 陈超逸, 宋丹妮. 基于复杂网络的超高层建筑施工安全风险耦合评估方法[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 957-968.
- [15] CARLEY K M. Dynamic network analysis[C]//Dynamic Social Network Analysis: Workshop Summary and Papers, Washington, D.C: The National Academies Press, 2003: 133-145.
- [16] CARLEY K M, HILL V. Structural change and learning within organizations[M]//LOMI A. Dynamics of Organizational Societies: Models, Theories and Methods. Cambridge: MIT Press, 2001.
- [17] CARLEY K M. ORA: A toolkit for dynamic network analysis and visualization[M]//ALHAJJ R, ROKNE J. Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining. New York: Springer, 2014: 1219-1228.
- [18] PESTOV I. Dynamic network analysis for understanding complex systems and processes[R]. Ottawa: Defence Research and Development Canada, 2009.
- [19] 汪涛, 高尚德, 李桂君. 基于元网络分析的重大基础设施建设项目风险评估框架与实证[J]. 中国管理科学, 2019, 27(7): 208-216.
- [20] 吴贤国, 冯宗宝, 王洪涛, 等. 基于动态元网络的地铁施工安全事故致因分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(3): 141-147.
- [21] GANBAT T, LIAO P C. Meta-network modelling for international construction risk management of multiple objectives[C]//ICCREM 2019: Innovative Construction Project Management and Construction Industrialization. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019: 273-280.
- [22] ONIŠKO A, DRUZDZEL M J, WASYLUK H. Learning Bayesian network parameters from small data sets: application of Noisy-OR gates[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2001, 27(2): 165-182.

- [23] 豪 根.有效的工作分解结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [24] 佚 名. 能量意外释放理论[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(6): 2.
- [25] FREEMAN L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. *Social Networks*, 1978, 1(3): 215-239.
- [26] WASSERMAN S, FAUST K. *Social network analysis: methods and applications*[M]. New York: Cambridge University Press, 1994.
- [27] 孙 伟, 李 卉. 基于熵权法的装配式建筑风险因素识别[J]. *价值工程*, 2018, 37(12): 63-65.
- [28] YUAN M Q, LI Z F, LI X D, et al. Managing stakeholder-associated risks and their interactions in the life cycle of prefabricated building projects: a social network analysis approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 323: 129102.
- [29] LI X J. Research on investment risk influence factors of prefabricated building projects[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2020, 26(7): 599-613.

