

# 基于贝叶斯网络的装配式建筑构件 质量溯源与监控

笪可宁<sup>1,2</sup>, 彭一峰<sup>1</sup>, 郭宝荣<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳化工大学人文社会科学学院, 辽宁 沈阳 110142)

**摘 要:**基于贝叶斯网络(Bayesian Network, BN), 针对装配式建筑每个构件中间环节质量信息, 构建了此类建筑工程质量监控和追溯体系, 并探析了装配式建筑构件质量影响因素间的因果联系以及质量风险变化规律。首先, 通过德尔菲法对装配式建筑构件质量的影响因素进行识别; 其次, 构建装配式建筑构件质量 BN 结构, 并进行风险分析, 以确定主要影响因素与关键影响控制点; 最后, 通过业务数据和专家调查结果来获得 BN 中的参数, 构建了装配式建筑构件质量的数据采集流程及溯源与监控的 BN 模型。研究发现: 在针对典型装配式建筑构件溯源系统通过 BN 来追溯与监控构件质量时, 若风险高至预设阈值, 通过启动溯源与监控机制能够从技术层面保障装配式建筑构件的质量。

**关键词:**装配式建筑; 贝叶斯; 质量溯源; 质量监控

**中图分类号:** TU241.91      **文献标志码:** A

预制装配式建筑因其施工周期短、成本消耗少、结构能耗低等优势, 成为我国建筑业新的发展方向。但是与传统建筑项目相比, 装配式建筑项目在施工过程中存在新技术新方法应用要求高、技术难度高等特点, 对于相关技术和管理的要求也相应提升。装配式建筑项目的设计、制图, 预制构配件生产、运输、存储、现场吊装等主要环节较传统建筑项目更有可能产生质量问题, 导致项目整体工期延误、成本上升。因此, 现实情况要求装配式建筑项目具备不同于传统建筑项目的高水平质量管理。一方面, 预制构配件是装配式建筑的关键构成部分, 构配件质量在较大程度上影响装配式建筑结构施工的总体质量目标、建筑工业化目标的完成<sup>[1]</sup>; 另一方面, 现有装配式建筑构件技术不规范、管理体系不完善等不足日渐明显。可见, 针对装配式建筑, 怎样成功解决其构件质量控制问题成为近年研究热点和亟待解决的现实问题。因此, 笔者分析了装配式建筑构件质量的影响因素, 以期获得一套可控的构件质量溯源与监控机制, 达到完善装配式建筑构件质量控制手段的研究目的。

通过分析我国与装配式建筑质量有关的研究资料, 可发现其发展趋势是从装配式建筑单纯预制构件质量分析发展至当前的装配式建筑总体质量分析。一是装配式建筑单一预制构件质量研究方面。以 6 $\sigma$  理论为基础, 李晨光等<sup>[2]</sup>完成了混凝土构件质量控制体系的构建; 针对建筑结构部品, 吴水根

等<sup>[3]</sup>实施了相关质量评价。二是装配式建筑全过程质量研究方面。夏海兵等<sup>[4]</sup>将BIM技术应用于装配式建筑全过程,以具体项目为案例展示执行状况,从而明确了装配式建筑应用BIM技术所能实现的成果;基于BIM研究,李天华等<sup>[5]</sup>在装配式建筑施工控制中运用RFID,完成了此类建筑整个生命周期应用架构的构建,使得此类建筑每个管理环节能够有机联合与衔接,提升了其建筑施工管理水平与管理效率;曹江红等<sup>[6]</sup>研究了在装配式建筑施工场所、作业方式发生变化的情况下,质量管理过程中信息丢失、传递延迟等问题,并基于BIM技术提出了装配式建筑施工全过程质量管理理论。三是综合装配式建筑整体质量研究。针对装配式建筑,邱芬等<sup>[7]</sup>建立了以采集树为基础的质量检测信息采集技术,可以明显提升信息的采集效率、降低采集能耗;针对装配式建筑,曹新颖等<sup>[8]</sup>结合BIM方法以及RFID方法的核心技术,完成了质量管理体系的构建,设计了将BIM-RFID技术应用于构件生产的质量管理流程模型。

一旦出现问题,应用综合装配式建筑质量管理机制可以通过溯源明确责任方,从而进一步有效实施相关调整和控制工作。然而只应用于建筑建设过程中与建成后的质量监控,无法做到开工前的溯源及监控。而装配式建筑构件设计、生产、运输与吊装过程中的质量监控从源头构成了装配式建筑项目质量管理的事前指导性质量管理体系。因此,笔者以目前典型装配式建筑构件生产供用链为例,对装配式建筑质量监控观点进行分析,讨论装配式建筑构件质量追溯BN网络模型的构建途径,同时,运用所收集的日常业务信息对供应链内某环节(或组合)导致较大风险的可能机制进行推导,以期实现该模型对装配式建筑构件质量的溯源与监控功能。

## 一、装配式建筑构件质量监控关键点分析

### 1. 装配式建筑构件质量问题

装配式建筑普及推广背景下,材料、工

艺、设备、技术上的创新不断涌现,对于装配式建筑构件质量的要求也不断提高,与我国建筑产业施工质量意识淡薄、技术人员专业知识欠缺、监控可回溯性低、监测手段相对滞后、监控信息延迟丢失、监控过程无序粗放之间的冲突日益凸显。就当前的装配式建筑施工而言,相关构件主要存在以下质量问题:

(1)构配件供应环节缺乏规范性。此环节涵盖了设计、制造、运输、堆放、检验以及保养,操作中均存在不规范问题,某种程度上损害了构件性能与品质,直接降低了装配式建筑总体质量。

(2)未充分开展构件监控准备工作。由于缺乏科学的构件质量计划、监测方案等,对装配式建筑构件质量标准设定缺乏必要的预见性,在监控时未充分做好所需人力、设施以及物力等因素的准备工作,因而无法全面控制整个施工期间构件质量。

(3)缺乏标准化的机械操作。对装配式建筑的核心连接处未进行必要的加工操作,使得构配件之间未牢固搭接;混凝土浇筑未达到规定强度,搭接钢筋操作缺乏规范性,建筑结构缺乏较好的整体性。

(4)上级部门或建设单位不合理干涉过多。针对工程验收,施工单位和监理单位未做到充分协调,没有全面、系统管控各分包方,导致分包工作质量未满足规定标准,影响了施工质量高标准目标的实现。

### 2. 装配式建筑构件全过程质量影响因素概念框架

为达到多维度监控装配式建筑构件质量的效果,笔者尝试探索装配式建筑构件设计、生产、吊装过程,确定各环节影响因素。基于研究资料分析、调研探讨总结以及专家访谈识别装配式建筑构件质量的影响因素,要先对与此类工程项目相关的施工周边环境资料、施工方案、施工要点、施工技术、核心工艺等信息(或材料)进行收集,装配式建筑的技术资料包括基坑开挖施工技术、核心施工工艺的作业强度与复杂程度等。

首先,建立了装配式建筑构件全过程质

量影响因素概念框架(见图 1),该供应链包括生产、加工/包装、吊装、物流运送等环节,具有典型性。之后,就此概念框架,邀请了高校学者、行业相关专家以及政府相关部门人员进行了两轮次的德尔菲法(Delphi Method)调查研究,对装配式建筑构件质量的关键影响因素进行筛选、讨论、分析。在第一轮次关键影响因素评价结果的基础上,调整影

响因素列表,更新调查问卷,进行第二轮次的问卷调查。最后,在第二轮次调查问卷结果的基础上,分析已构建的影响因素概念框架。最终分析了该供应链条中的影响因素(见表 1),并依据相互独立完全穷尽原则(Mutually Exclusive Collectively Exhaustive, MECE)确定其中的关键影响控制点。

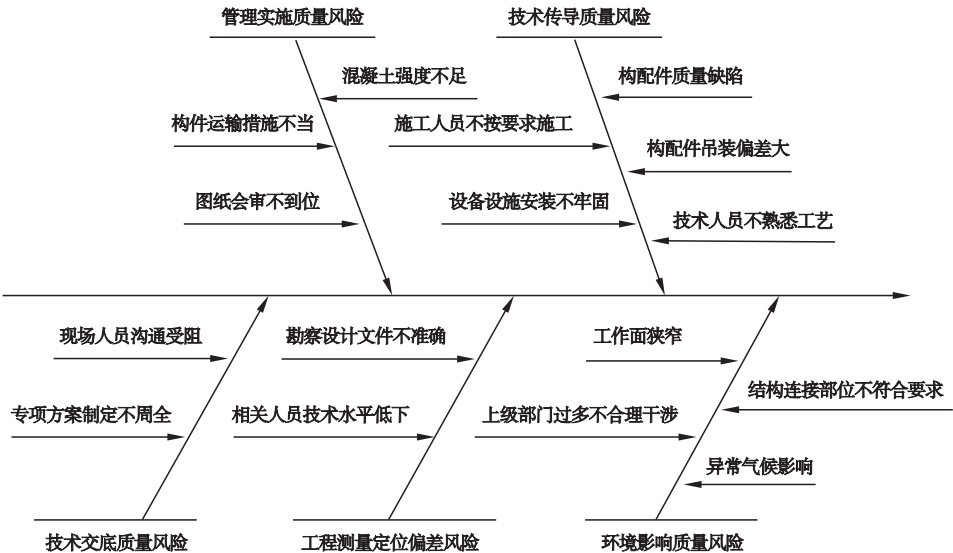


图 1 装配式建筑构件整个环节质量影响因素概念框架

表 1 装配式建筑构件质量关键影响控制点

子系统	潜在的影响因素			是否为关键影响控制点
	类型	是否显著	显著判断依据	
管理实施	构件运输措施	是	构件运输堆放时不变形,储藏过程中不损坏	否
	图纸会审	否	技术交底未达到工程建设程序设定效果	否
	混凝土强度	否	预制构件在运输及吊装过程中板面经常发生龟裂甚至断裂	否
环境因素	异常气候影响	是	工程合同中关于异常恶劣气候条件的界定范围参考	是
	结构连接部位	是	灌浆不饱满,套筒连接错位	是
	工作面	是	施工现场的人员比例和相关的施工机械配置不合理	是
技术传导	上级部门或建设单位管理环境	是	关键工序及重要部位缺乏相应的检查、记录	是
	构件质量	是	缺棱掉角、棱角不直、翘曲不平、飞出凸肋	否
	设备设施安装情况	否	致使预埋电线管常出现直角	否
	预埋件连接、预留孔洞	否	预制构件预埋管线堵塞、脱落、位置偏移	否

装配式构件质量影响因子内容丰富,涉及前期结构体系、工厂化制造等一系列环节,笔者围绕装配式施工过程存在的影响因子展开深入剖析。在其施工过程的基础上进行分

类,划分成管理实施、环境影响、技术传导 3 个子系统。上述子系统存在一系列的显著潜在影响因素,通过分析影响装配式建筑这些核心控制点的因素的风险水平,能够获取此

类建筑构件质量的关键信息。

当前,专门针对装配式质量管理的研究并不多,笔者将一些原始施工生产方法中的质量管理纳入探讨的范围,同时,还分析了一些有关项目的文献资料。围绕技术、环境、管理实施 3 个方面,借鉴文献资料给出的评估要素,展开汇总,构建了装配式建筑构件质量关键影响控制点体系。

由图 1、表 1 可知:施工现场气候条件、结构连接部位状况、工作面空间与施工组织结构之间并不是独立的,而是相互影响、耦合的因素间关系。如异常气候会影响工程测量定位的精度,最终导致实地施工中的工作面预留不足。上级部门与建设单位的施工组织结构也会影响预制构配件的连接工序设定,进而改变结构连接部位状况。在对装配式建筑溯源机制进行研究时,基于核心影响控制点,构建出此类建筑构件数据收集流程及溯源与监控的贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)模型,有助于获得各种影响因素的权值,进而对重要的影响因子加以控制,有效规避装配式建筑构件的质量风险,改善装配式建筑构件的质量。

二、装配式建筑构件质量追溯的贝叶斯网络模型

BN 模型能够较好地应用于装配式建筑构件质量相关研究,基于贝叶斯推理能够综合考量先验信息、误差及其不确定性。它是用概率分布来描述和刻画追踪溯源的结果,可以较好地实现装配式建筑构件质量风险追踪溯源研究,具有计算精度高、收敛速度快、误差小和抗噪能力强等特点,其可靠性和稳定性高于优化算法。同时,该方法能实现高维无明确数学表达式的追踪溯源研究,并能通过融合各种信息来应对不确定性问题

BN 模型属于有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG)模型,在 DAG 模型的基础上联合概率分布理论<sup>[9]</sup>推理得出的图形化网络又称为贝叶斯网络。有向无环图中,将各节点当作状态变量,有向边体现的是各状

态变量的概率依赖相关性。根据影响装配式建筑构件质量的状态变量(见表 1)及其概率依赖关系(见表 2),用 BN 表达状态变量之间的概率依赖关系(见图 2)。

表 2 影响装配式建筑构件质量的状态变量

变量	含义	直接影响变量
$X_1$	施工现场气候条件	—
$X_2$	结构连接部位状况	—
$X_3$	工作面空间状况	—
$X_4$	施工组织结构	—
$X_5$	环境影响质量状况	$X_1, X_2, X_3, X_4$
$X_6$	构配件质量状况	—
$X_7$	技术传导质量状况	$X_5, X_6$
$X_8$	构配件运输措施状况	—
$X_9$	管理实施质量状况	$X_7, X_8$

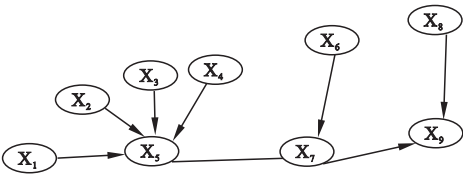


图 2 贝叶斯网络图

影响程度,即度量某主要因素状态变量情况的标准<sup>[10]</sup>。基于实际构件的不同应用场合,能够更为具体地划分各状态变量的影响程度,可将其影响程度细化为 1 级、2 级、3 级,依次代表轻微影响、中度影响、重度影响。

可将质量风险理解为由某状态变量取值集合所致影响程度的几率度量,即可将质量风险当作状态变量取值与同状态变量取值有关的概率的元组,BN 模型的条件概率分布状况即属于质量风险。针对装配式建筑构件质量问题,描绘出 1 个此类建筑构件质量风险概率分布状况(见表 3、表 4),由于空间约束省略部分数据。因为 BN 模型具备统计数据参与、便于陈述专家知识的优势,能够通过统计样本数据或相关资深人员的先验知识掌握这些概率分布状况。通常由该领域资深人员根据已有知识来明确 BN 内的因果关系,也可一起应用这两种途径,在应用资深人员的先验概率之后完善统计样本数据。



表 3 状态变量风险的先验概率

影响程度	$P(X_1)$	$P(X_2)$	$P(X_3)$	$P(X_4)$	$P(X_5)$	$P(X_6)$	$P(X_7)$	$P(X_8)$	$P(X_9)$
1 级	0.91	0.92	0.70	0.87	0.95	0.92	0.95	0.88	0.89
2 级	0.06	0.05	0.20	0.11	0.03	0.05	0.03	0.10	0.10
3 级	0.03	0.03	0.10	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01

表 4  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  的先验条件概率

状态变量组合				$P(X_5 X_1,X_2,X_3,X_4)$		
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	1 级	2 级	3 级
1	1	1	1	0.92	0.05	0.03
1	1	1	2	0.88	0.10	0.02
1	1	1	3	0.70	0.10	0.20
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3	3	3	1	0.10	0.04	0.89
3	3	3	2	0.02	0.06	0.92
3	3	3	3	0	0.01	0.99

注:表中 1,2,3 分别表示影响程度为 1 级,2 级,3 级。

三、基于贝叶斯网络模型和样本数据的装配式建筑构件质量追溯与监控

对于装配式建筑而言,构件设计、制造、加工、物流与吊装等环节均可对装配式建筑

构件质量产生直接影响,所以可根据构件在装配式建筑构件全过程质量影响因素概念框架中的状态流转关系进行贝叶斯推理,从而对装配式建筑构件中的质量风险进行主动管理和控制,具体流程如图 3 所示。

1. 业务数据的获取

对于追溯与风险监控,此项工作在基础层面发挥着非常关键的作用<sup>[11]</sup>。此项工作的实现途径为,完成供查询所需的建设项目(如装配式建筑)业务系统(如构件溯源系统)内构件供应链每项施工内容工程验收记录表。原材料验收记录需要涵盖下述内容:品种、生产数据编号、进场数量与时间、验收记录、风险以及备注等;构配件产品物流记录

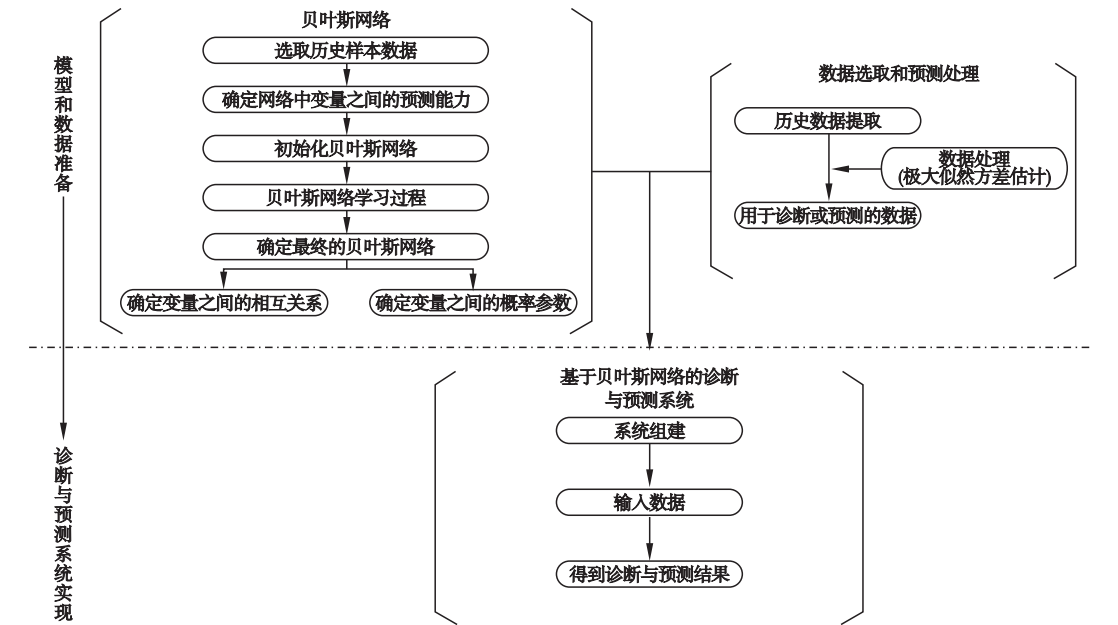


图 3 装配式建筑构件质量追溯与监控流程图

需要涵盖下述内容:批编号、运送数量、运送形式与时间、收货时间、施工吊装与风险等。

2. 贝叶斯推理

基于 BN 模型与所收集的样本信息研究建立的装配式建筑构件质量追溯机制与监控

机制分别应用到下述两种贝叶斯推理。在实际应用时,能够借助各类 BN 推理工具完成 BN 模型的推理、构建与应用编程,这些工具中应用率较高的为 GeNIe、BNJ<sup>[12-13]</sup>等。

(1) 贝叶斯诊断。此类贝叶斯推理为对

样本数据所含高风险因子推导出最高概率解释的状态变量。基于贝叶斯诊断结果,施工结构能够对目标高风险环节加大管控力度,避免构件质量问题更加严重。如,对 $X_9 = 3$ 的最高概率求解得到

$$\{X_1 = 1, X_2 = 1, X_3 = 1, X_4 = 1, X_5 = 1, X_6 = 1, X_7 = 1, X_8 = 1\}$$

此解释表明产品有高风险最高概率存在是由于构配件质量状况较差而导致最终装配式建筑构件质量存在高风险。因此,应该对构件生产使用的钢筋、水泥、砂、石等材料严格检验,同时,对加工设备加以优化,从而强化构件生产控制。

(2) 贝叶斯预测。此类贝叶斯推理指某部分环节的风险评价已明确,由此对后续环节与最后制成品的风险进行推断<sup>[14-15]</sup>。根据对随机变量未来观察值的统计推断结果,施工项目管理者能对某环节管理实施有针对性的强化或优化操作,防止构件质量问题的扩大,从而降低最终产品发生风险隐患的几率。例如,基于经验知识以及样本信息求解 $P(X_9 | X_1 = 1)$ ,可以获知当施工现场自然气候条件影响不明显时的最后制成品风险几率分布状况,由此能够判断出装配式建筑构件质量对其最终产品变量所表现出的风险敏感程度。

### 3. 系统结构确定

根据用于追溯装配式建筑构件质量的BN模型,参照此类建筑预制构件的生产工艺流程,对装配式建筑构件的质量追溯与监控体系加以梳理。本系统构成部分为5个,分别为传感器系统、数据收集和传送系统、数据处理和分析系统、通讯系统、监控与报警系统。其中,传感器系统构成以应力应变传感器、温度传感器、加速度传感器、风速风向仪、倾角仪等为主。数据收集和传送系统负责对传感器输送的数据进行采集,同时对数据实施信号处理操作,将传感器所测量的非电量信息转换为电量信息(便于测量),并将后者输送至电脑内。通讯系统则负责输送完成收集与处理操作的数据至监控中心,在实际运

用时,通过有线传输形式把数据输送至监控中心数据库内。数据处理和分析系统则负责诊断分析输送来的数据,对受损部位作出判断,评估构件健康水平。一旦发生异常,监控与报警系统会释放报警信号,在具体实践中通过短信形式完成预警操作。

## 四、结 论

(1) 装配式建筑构件质量追溯与监控系统的建立可有效提升装配式建筑工程质量监控的集成性与协同性。

(2) 装配式建筑构件质量追溯与监控系统可通过动态BN来构建每项工序的各影响因子的因果关系,同时借助多变量统计过程控制(Multivariate Statistical Process Control, MSPC)技术监控装配式建筑构件的所有工序,若出现失控问题,则启动报警程序。

(3) 针对失控问题,风险高至预设阈值时,装配式构件质量追溯与监控系统可启动误差溯源操作,并基于BN获取统一的分解形式,同时对每个分解形式的先验条件概率加以明确,实现了装配式建筑构件质量的误差溯源。

### 参考文献:

- [1] 雷克,赵瑞华,肖伟. 预制混凝土构件质量控制研究综述[J]. 建筑技术,2015,46(增刊): 40-42.
- [2] 李晨光,郭二伟,阎明伟. 产业化住宅项目装配式混凝土施工组织与关键技术体系研究与应用[J]. 建筑技术,2015,46(3):198-202.
- [3] 吴水根,柏建伟. 装配式建筑结构部品施工的质量评价[J]. 建筑施工,2013,35(2):116-117.
- [4] 夏海兵,辛佐先,熊诚,等. BIM技术在PC住宅全生命周期中的应用[J]. 施工技术,2013,42(2):157-160.
- [5] 李天华,袁永博,张明媛. 装配式建筑全生命周期管理中BIM与RFID的应用[J]. 工程管理学报,2012,26(3):28-32.
- [6] 曹江红,纪凡荣,解本政,等. 基于BIM的装配式建筑质量管理[J]. 土木工程与管理学报,2017,34(3):108-113.
- [7] 邱芬,彭小华,李萍. 装配式建筑质量检测信

- 息采集仿真研究[J]. 计算机仿真,2018,35(9):431-434.
- [8] 曹新颖,鲁晓书,王钰. 基于 BIM-RFID 的装配式建筑构件生产质量管理[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(4):102-106.
- [9] 陈为,朱标,张宏鑫. BN-Mapping:基于贝叶斯网络的地理空间数据可视分析[J]. 计算机学报,2016,39(7):1281-1293.
- [10] 张文博,苏秦. 基于模糊多目标规划的食品供应链质量风险控制决策研究[J]. 工业工程与管理,2018,23(1):30-37.
- [11] 樊新颖,陈滨. 我国建筑热工设计参数确定方法依据追溯研究[J]. 建筑科学,2017,33(12):159-164.
- [12] 田录林,刘沛盛. 改进贝叶斯网络 GO 法在高压直流输电系统的可靠性分析[J]. 高压电器,2017,53(7):53-59.
- [13] WU Z M, TIAN Z. Distribution function estimates by Wasserstein metric and Bernstein approximation for  $C \sim (-1)$  functions[J]. Applied mathematics: A journal of Chinese universities (series B),2015,30(2):141-150.
- [14] 王红军,汤银才. 具有稳定分布噪声的多重季节模型的贝叶斯分析[J]. 应用数学学报,2017,40(4):519-529.
- [15] 于龙飞,张家春. 基于 BIM 的装配式建筑集成建造系统[J]. 土木工程与管理学报,2015,32(4):73-78.

# Quality Traceability and Monitoring of Prefabricated Building Components Based on Bayesian Network

DA Kening<sup>1,2</sup>, PENG Yifeng<sup>1</sup>, GUO Baorong<sup>2</sup>

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. School of Humanities and Social Sciences, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** The research of this paper is based on the Bayesian Network (BN) for the quality information of the intermediate links of each component in the prefabricated building to construct such construction project quality monitoring and traceability system, and explore the causal relationship between the factors influencing the quality of the components of the prefabricated building and the law of quality risk change. Firstly, Delphi method is used to identify the influencing factors of the quality of prefabricated building components. Secondly, the Bayesian Network structure of the quality of prefabricated building components is constructed, and the risk analysis is carried out to determine the main influencing factors and key influencing control points. Finally, the parameters of Bayesian Network are obtained through business data and expert survey results, and the data acquisition process of the prefabricated components for the quality and the Bayesian model of traceability and monitoring are constructed. Based on this research, in the case that the traceability system of typical prefabricated building components traces and monitors the quality of components through BN, when the risk reaches the preset threshold, the quality of prefabricated building components can be guaranteed from the technical level through the start of traceability and monitoring mechanism.

**Key words:** prefabricated building; Bayesian; quality traceability; quality monitoring

(责任编辑:郝雪 英文审校:林昊)