

# 基于贝叶斯网络-多属性决策的装配式建筑预制构件 供应商选择研究

肖航

北京建筑大学 城市经济与管理学院, 中国·北京 100044

**摘要:** 随着全球城市化进程的加快, 建筑行业面临诸多挑战, 装配式预制建筑作为一种创新性的建筑模式受到广泛关注。本文旨在研究基于贝叶斯网络-多属性决策的装配式建筑预制构件供应商选择问题。文章首先介绍了贝叶斯网络和多属性决策的相关理论, 然后构建了评价指标体系, 确定了贝叶斯网络的拓扑结构和概率参数, 并对评价指标进行了预处理。通过熵权法确定各评价指标权重, 采用加权和法进行综合评价分析。实证研究以北京市房地产项目 E 地块为例, 通过 GeNIe 软件建立贝叶斯网络模型, 计算得出最优供应商选择方案。研究表明, 贝叶斯网络结合多属性决策方法能有效降低决策复杂度, 提高决策的准确性, 为装配式预制构件供应商选择提供技术支持与参考依据, 对建筑工业化规模效益具有重大战略意义。

**关键词:** 装配式建筑; 贝叶斯网络; 多属性决策; 供应商选择; 熵权法

## Research on the Selection of Prefabricated Building Component Suppliers Based on Bayesian Network-Multi-Attribute Decision Making

Xiao Hang

Beijing University of Civil Engineering and Architecture, School of Urban Economics and Management, China Beijing 100044

**Abstract:** With the acceleration of global urbanization, the construction industry faces numerous challenges, and prefabricated modular construction, as an innovative building model, has received widespread attention. This paper aims to study the problem of selecting suppliers for prefabricated construction components based on Bayesian network-multi-attribute decision-making. The article first introduces the relevant theories of Bayesian networks and multi-attribute decision-making, then constructs an evaluation index system, determines the topology and probability parameters of the Bayesian network, and preprocesses the evaluation indicators. The entropy weight method is used to determine the weights of each evaluation indicator, and the weighted sum method is employed for comprehensive evaluation and analysis. An empirical study is conducted using Plot E of a real estate project in Beijing as an example, establishing a Bayesian network model through GeNIe software to calculate the optimal supplier selection scheme. The results show that combining Bayesian networks with multi-attribute decision-making methods can effectively reduce decision-making complexity and improve decision accuracy, providing technical support and reference for the selection of prefabricated component suppliers, and having significant strategic significance for the scale efficiency of industrialized construction.

**Keywords:** Prefabricated buildings; Bayesian networks; Multi-attribute decision making; Supplier selection; Entropy weight method

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

近年来, 随着全球城市化进程的加快, 建筑行业面临着劳动生产率低、人力成本增加、环境污染、资源利用率和建筑质量不稳定等一系列挑战。在这一背景下, 装配式预制建筑 (Prefabricated Construction) 作为一种相对于传统建筑模式具有创新性的建筑模式, 受到广泛关注和

应用。在中国共产党第二十次全国代表大会报告中, 习近平总书记对建筑业的发展提出了明确要求, 习近平总书记强调要推动经济高质量发展, 建筑业作为国民经济的重要组成部分, 必须转变发展方式, 提升发展质量和效率。报告中提到要加快建设生态文明, 推动绿色发展, 建筑业应积极响应, 推广绿色建筑、节能减排和可持续发展理念, 推动建筑行业向绿色、低碳转型。截至 2023 年末中国常住人口城镇化率是 65.22%。参考日本、韩国等发达国家的发展经

验, 城市化率达到 70% 时建筑业发展将迎来拐点; 目前我国城镇化率是 65.22% 没达到 70%, 建筑业发展有所放缓但仍处于与城市化率同步上升阶段。

在国际上, 装配式建筑最初主要用于临时性建筑和低层建筑, 如今已广泛应用于高层住宅、公共建筑、商业设施等多个领域。尤其在德国、日本、美国等国家, 装配式预制建筑得到了积极推广<sup>[1]</sup>。随着建筑行业对环境保护和可持续发展的日益重视, 装配式建筑有着节能环保、减少建筑垃圾、提高施工速度等优势。

中国作为全球建筑市场最大的国家之一, 在建筑业中长期依赖传统施工方式, 面临着严重的劳动力短缺、环境污染和施工效率低等问题<sup>[2]</sup>。近年来, 随着国家对建筑产业现代化的推进, 装配式建筑逐渐成为提升建筑施工效率、实现绿色建筑和可持续发展的重要路径之一。

然而, 尽管装配式预制建筑具有诸多优点, 如绿色低碳环保、工期短、施工质量高、资源利用率高等, 但在实际应用中, 仍然存在着诸如成本控制、设计标准化、运输与产品合格率等一系列问题和挑战<sup>[3]</sup>。其中如何选择装配式建筑预制构件供应商将成为施工项目控制成本与运输的关节手段。

### 1.2 研究目标与内容

在装配式建筑项目中, 供应商的选择直接影响项目的质量、成本和工期。然而, 由于外部环境的不确定性(如市场波动、运输风险等), 以及供应商评价标准的多样性, 传统多属性决策方法存在局限性。为此, 基于贝叶斯网络的不确定多属性决策方法为解决这一问题提供了新思路。

本文接下来将会首先介绍贝叶斯网络以及多属性决策的相关理论, 然后研究基于贝叶斯网络-多属性决策解决装配式建筑预制构件供应商选择问题的分析步骤, 最后运用该方法解决一个实例。

## 2 相关理论

### 2.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络 (Bayesian network), 又称概率网络、信度网、因果图是一种基于概率的图论模型。是一个有向无环

图用于不确定知识的表达与推理, 其结构中包含变量节点以及与之相连的定向边。节点划分为父节点和子节点。无父节点的节点信息由先验概率来表示, 节点间的逻辑关系则由有向的边来表达, 条件概率量化父节点对子节点的影响程度, 是一种自然的因果信息表示方法<sup>[4]</sup>。

(1) 贝叶斯定理<sup>[5]</sup>。贝叶斯网络使用概率积分表示不确定性, 这称为条件概率, 其表达式为:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \tag{1}$$

其中: P(A| B) 为后验概率 ;P(B| A) 为条件概率 ;P(A) 与 P(B) 为先验概率。

(2) 联合概率公式  $P_{\alpha}(X_i)$  中为变量  $X_i$  的所有父节点的集合, 贝叶斯网络中一组不确定变量  $U=X_1, X_2, \dots, X_n$  的联合概率公式为:

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P[P_{\alpha}(X_i)] \tag{2}$$

### 2.2 多属性决策方法

多属性决策 (Multi-Attribute Decision Making, MADM) 是运筹学和决策分析中的重要分支, 主要用于解决有限可行方案下, 针对多个评价指标 (属性) 进行方案排序和选择的问题。在实际决策过程中, 决策者往往需要面对多个甚至冲突的属性, 通过科学的方法权衡各属性的重要性, 从而做出最优或满意的决策<sup>[6]</sup>。

多属性决策广泛应用于工程管理、经济分析、环境评估、供应链管理等领域。例如, 在供应商选择决策中, 需要根据价格、质量、交货周期和售后服务等多个属性来选择供应商。

(1) 多属性决策的特点<sup>[7]</sup>。有限的决策方案集合: 候选方案是有限且已知的。多属性评价体系: 决策目标通常由多个评价指标构成, 这些指标可能存在互相独立或相互影响的关系。定量与定性评价相结合: 评价指标可以是定量指标 (如成本、时间) 或定性指标 (如用户满意度)。决策结果的主观性: 决策者的偏好和权重分配会影响最终的决策结果。

表1 预制构件供应商选择评价指标

符号	含义	符号	含义
A1	市场占有率	A7	预制构件标准化程度
A2	付款条件响应度	A8	供应商产能
A3	长期合作意愿	A9	准时交货率
A4	项目团队人员素质	A10	运输成本率
A5	节能环保水平	A11	产品合格率
A6	构件报价水平	A12	生产工艺

(2) 多属性决策方法分类。在多属性决策中, 权重代表各个属性的重要程度, 主要的权重确定方法分为主观赋权法和客观赋权法, 主观赋权法主要有: 如层次分析法 (AHP)、专家打分法等。而客观赋权法主要有: 如熵权法、标准差法等。多属性决策的决策方法有加权法和法 (WSM), 通过对各属性的标准化值与权重进行加权求和, 计算各方案的总得分并排序。

### 3 研究方法

#### 3.1 建立评价指标体系

基于实地考察、专家咨询和相关规范, 并结合装配式建筑的特点, 从构件拆分设计阶段、构件的预制生产阶段、构件的运输阶段和构件现场装配施工阶段 4 个阶段进行评价指标选择, 总结得到 12 项指标, 如表 1 所示。

#### 3.2 贝叶斯网络模型的构建

##### 3.2.1 确定贝叶斯网络的拓扑结构

多属性决策在工程设计、经济和管理等诸多领域中具有广泛的实际应用, 面对可供选择的备选方案数量为有限多个, 每个方案存在有限个用于评价方案的属性 (指标), 决策者要对方案做出决策, 但在复杂的决策环境下决策者往往要面对很多相互影响的因素, 很难直接估算属性值在不确定性环境下的概率分布。为了更有效地评估装配式构建供应商, 更好地估算属性值在不确定性环境下的概率分布, 确定影响这些属性的所有因素的因果关系, 将其转化为贝叶斯网络的拓扑结构。

给定了“供应商 X”, “市场占有率 A1” “付款条件响应度 A2” “长期合作意愿 A3” “项目团队人员素质 A4” “节能环保水平 A5” “构件报价水平 A6” “预制构件标准化程度 A7” “供应商产能 A8” 和 “生产工艺 A12” 都能确定, 因此 “A1” “A2” “A3” “A4” “A5” “A6” “A7” “A8” 和 “A12” 受 “X” 的直接影响。“运输时间 TT” 与 “运输工具 V” “沿途道路情况 RC” 和供应商到施工现场距离有关, 而供应商到施工现场距离唯一的变量就是 “供应商 X”, 因此 “TT” 受 “V” “RC” 和 “X” 的直接影响。“交通管制情况 TC” 由运输车辆型号及 “运输工具 V” 和供应商到施工现场计划路线确定, 供应商到施工现场计划路线唯一的变量就是 “供应商 X”, 因此 “TC” 受 “V” 和 “X” 的直接影响。“准时交货率 A9” 与 “供应商产能 A8” “运输时间 TT” “交通管制情况 TC” 密切相关, 因此 “A9” 受 “A8” “TT” 和 “TC” 直接影响。“运输工具 V” 和 “供应商 X” 共同决定了 “运输成本率 A10”, 因

此 “A10” 受 “V” 和 “X” 的直接影响。“生产工艺 A12” 决定产品本身的质量而 “沿途道路情况 RC” 决定了运输过程中产品是否发生破坏, 两者共同决定了 “产品合格率 A11”, 因此 “A11” 受 “A12” 和 “RC” 的直接影响。根据上面的分析可以得到选择装配式构建供应商的贝叶斯网络拓扑结构, 如图 1 所示。

##### 3.2.2 确定贝叶斯网络概率参数

通过咨询相关领域专家或者分析历史统计资料等方法确定贝叶斯网络中每个节点的概率参数, 确定贝叶斯网络中每个节点的条件概率表 (CPT)。

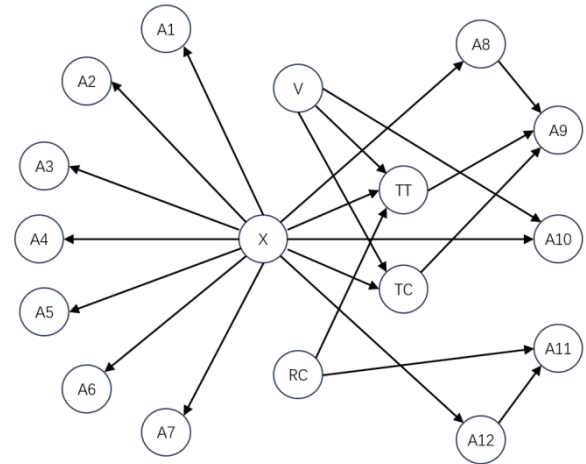


图1 选择装配式构建供应商的贝叶斯网络拓扑结构

##### 3.2.3 推理求解各个属性在每个方案下的取值分布

把决策节点设置为证据节点, 把各个属性节点设置为观察节点; 改变决策节点的概率分布, 使该节点取某一方案  $X_i$  的概率设置为高, 即将节点状态的概率设置为 100%, 利用网络进行推理, 得到在此条件 ( $p(X_i) = 1$ ) 下, 各个属性的条件概率分布, 如第  $j$  个属性的分布, 这是一个随机变量, 设有  $K$  种取值 (记  $\alpha \triangleq \{1, 2, \dots, K\}$ ), 其概率分布已知, 其中第  $k \in \alpha$  种取值  $Z_j^k$  的概率就为  $p(Z_j^k | p(X_i) = 1)$ 。不断地改变决策节点的分布就可以得到在每个方案下各个属性的取值分布。

#### 3.3 评价指标预处理

为消除各个指标之间的量纲差异性, 需要对原始指标数据进行标准化处理。对原始评价指标进行分类, 分为定量指标数据以及定性指标数据。对定量指标的评价值进行标准 0-1 变换处理。定性指标的量化处理, 将定性指标依问题的性质划分为若干级别, 每一级别分别赋以不同的量值, 对效益型指标评价越高赋以量化值越高, 对成本型指标评价越高赋以量化值越低。

接受多位专家的意见并进行其整合对定性指标进行评

表2 专家分类标准与评分

项目	分类	权重
教育背景	学士	0.5
	硕士	1
	博士	1.5
从业年限	5~10a	0.25
	10~20a	0.5
	20~30a	0.75
	≥30a	1

价, 由于每位专家的知识与经验之间存在着差别, 为了保证专家评分的一致性以及可信度, 需要确定每位专家权重。每位专家的权重得分如表 2 所示, 每位专家的权重值  $W_{ei}$ , 可表示为:

$$W_{ei} = \frac{\text{该专家的权重得分}}{\text{所有专家的权重得分}}$$

根据每位专家评分  $e_i$  以及每位专家的权重值  $W_{ei}$ , 计算指标  $j$  的专家综合评价:

$$\delta_j = \sum_{i=1}^m e_i W_{ei} \quad (3)$$

### 3.4 确定各评价指标权重

利用熵权法确定各评价指标权重, 熵权法是一种根据指标差异程度来计算各项指标所占基础权重的客观赋权方法, 一般而言, 如果某个指标的熵值越小, 说明其指标值的变异程度越大, 提供的信息量越多, 在综合评价中起的作用越大, 其权重也就越高。如果某个指标的熵值越大, 说明其指标值的变异程度越小, 提供的信息量越少, 在综合评价中起的作用越小, 其权重也应越低。熵权重计算步骤如下。

(1) 构建原始数据矩阵。数据包括  $m$  个待评项目,  $n$  个评价指标, 形成原始数据矩阵  $R=(r_{ij})_{m \times n}$ :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n}$$

其中  $r_{ij}$  为第  $j$  个指标下第  $i$  个项目的评价值。

(2) 归一化矩阵。为了消除各指标间量纲上的差异, 对原始数据进行无量纲处理, 各指标间贴适度用规范化后的指标值来确定, 并得到各指标归一化矩阵。计算第  $j$  个指标下第  $i$  个项目的指标值的比重  $p_{ij}$ :

$$p_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad (4)$$

(3) 计算第  $j$  个指标的熵值  $e_j$ :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (5)$$

其中,  $k=1/\ln m$ 。

(4) 计算第  $j$  个指标的熵权  $W_j$ :

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (6)$$

### 3.5 综合评价分析

根据熵权越小所占权重越大的特点, 参照预制构件供应商选择评价指标的熵值和熵权, 可以得到影响供应商选择的关键因素。采用加权和法将多个指标评价值整理为一个整体性的综合评价价值。根据属性值  $Z_{ij}$  以及各指标的权重系数  $W_j$ , 各供应商的综合评价值:

$$C_i = \sum_{j=1}^n w_j z_{ij} ; (i = 1, \dots, m) \quad (7)$$

根据综合评价值的大小进行排序, 选定最佳供应商。

## 4 实证研究

### 4.1 工程概况

北京市房地产项目 E 地块, E 项目共 12 栋建筑, 1-8# 为住宅楼 (地上 19 层, 地下 2 层)、9#-11# 配套楼、12# 配电室。建筑面积 190848.96m<sup>2</sup>。项目的构件包括叠合楼板、空调板、预制楼梯。

根据供应商库内预制构件加工单位的往期业绩和履约评估表等信息, 并根据 E 项目具体要求进行初步筛选; 最终选定其中 3 家预制构件供应商作为备选 (分别用字母  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  表示), “供应商  $X_1$ ” 生产地点位于北京市; “供应商  $X_2$ ” 和 “供应商  $X_3$ ” 生产地点位于天津市。

### 4.2 确定工程实例参数

#### 4.2.1 确定贝叶斯网络节点的条件概率表

邀请了相关领域的 3 位专家, 以确定贝叶斯网络中每个节点的条件概率表 (CPT)。各专家对 E 项目实际调查和历史数据等资料充分研究的基础上, 对节点发生概率进行评价。对得到的评价意见进行处理, 计算得到各节点的先验概率。

“供应商 X” “运输工具 V” “沿途道路情况 RC” 是根节点, 因此只有先验分布。供应商有三个选择项, 每个选项的可能性都相等, 即先验概率为 0.33; V 有两个选项分别是大平板车 (Large flatbed truck)、小平板车 (Small

flatbed truck)，每个选项的可能性都相等，先验概率为 0.5；RC 有 Good 和 Normal 两个状态，先验概率分别为 0.7 和 0.3。X、V、RC 的 CPT 如表 3、表 4、表 5 所示。

表3 节点X的CPT

X	P(X)
1	0.33
2	0.33
3	0.33

表4 节点V的CPT

V	P(X)
L	0.5
S	0.5

表5 节点RC的CPT

RC	P(X)
Good	0.7
Normal	0.3

“供应商产能 A8”和“生产工艺 A12”在给定“供应商 X”后就是确定的数值，根据领域专家确定数值，如表 6 所示。

表6 节点A8和A12的评价

X	A8	A12
1	M	M
2	H	M
3	H	H

注：L、M、H 分别为低、中等、高。

“交通管制情况 TC”有两个父节点，分别是“供应商 X”“运输工具 V”其 CPT 的形式为  $p(TC)(X,V)$ ，如在给定供应商  $X = 1, V = L$  的条件下，根据实际调查和历史经验这种情况交通管制的概率为 1，不交通管制的概率为 0，即 TC 的条件概率为：

$$p(TCX=1, V=L) = (p(YesX=1, V=L), p(NoX=1, V=L)) = (1, 0)$$

其他的情况同样按照此方法设定得到 TC 的 CPT 如表 7 所示。同理可以得到 TT、A9、A10、A11 的 CPT 分别如表 8、表 9、表 10、表 11 所示

表7 节点TC的CPT

X	V	p(TC   X,V)	
		Yes	No
1	L	1	0
2	L	0	1
3	L	0	1
1	S	0	1
2	S	0	1
3	S	0	1

表8 节点TT的CPT

RC	X	V	p(TT   RC,X,V)		
			RC=1:Good RC=2:Normal		
			60~90min	90~120min	120~150min
1	1	L	0.75	0.25	0
2	1	L	0.65	0.35	0
1	2	L	0	0.8	0.2
2	2	L	0.05	0.3	0.65
1	3	L	0	0.3	0.7
2	3	L	0	0	1
1	1	S	0.9	0.1	0
2	1	S	0.8	0.2	0
1	2	S	0.3	0.7	0
2	2	S	0.1	0.8	0.1
1	3	S	0	0.5	0.5
2	3	S	0	0.25	0.75

表9 节点A9的CPT

A8	TT	TC	p(A9   A8,TT,TC)	
			TC=1:Yes TC=2:No	
			Yes	No
M	60~90	1	0.85	0.15
M	60~90	2	0.9	0.1
M	90~120	1	0.85	0.15
M	90~120	2	0.9	0.1
M	120~150	1	0.65	0.35
M	120~150	2	0.9	0.1
H	60~90	1	0.9	0.1
H	60~90	2	0.95	0.05
H	90~120	1	0.8	0.2
H	90~120	2	0.95	0.05
H	120~150	1	0.7	0.3
H	120~150	2	0.9	0.1

表10 节点A10的CPT

X	V	p(A10   X,V)		
		15%	16%	17%
1	L	1	0	0
1	S	0.5	0.5	0
2	L	0	1	0
2	S	0	0.5	0.5
3	L	0	0	1
3	S	0	0	1

表11 节点A11的CPT

A12	RC	p(A11   RC,A12)		
		92%~94%	94%~96%	96%~98%
M	Good	0	1	0
H	Good	0	0	1
M	Normal	1	0	0
H	Normal	0	0.5	0.5

运用 GeNIe 软件建立贝叶斯网络，将所有数据赋值

到贝叶斯网络中，得到了选择装配式构建供应商的贝叶斯网络模型，如图 2 所示。“准时交货率 A9”“运输成本率 A10”与“产品合格率 A11”是我查询变量因此设为观察节点；而“供应商 X”和“运输工具 V”是决策者可控制的变量设置为证据节点。通过改变“供应商 X”和“运输工具 V”的状态可以推理计算得到在给定“供应商 X”和“运输工具 V”状态条件下“准时交货率 A9”“运输成本率 A10”与“产品合格率 A11”的概率分布。由于“供应商 X”和“运输工具 V”分别有 3 种和 2 种备选选项，因此共有 6 个方案可供选择

借助 GeNIe 软件进行计算，将供应商 X<sub>1</sub> 状态设置为高，即将供应商节点状态 X1 的概率设置为 100%，将运输工具 L 状态设置为高，即将运输工具节点状态 L 的概率设置为 100%，可得到方案 1 的 p(A9 | X,V)、p(A10 | X,V)、p(A11 | X,V)。其他的情况同样按照此方法设定推理得到表 12 中的 p(A9 | X,V)、p(A10 | X,V)、p(A11 | X,V)。利用加权法得出其综合评价价值。

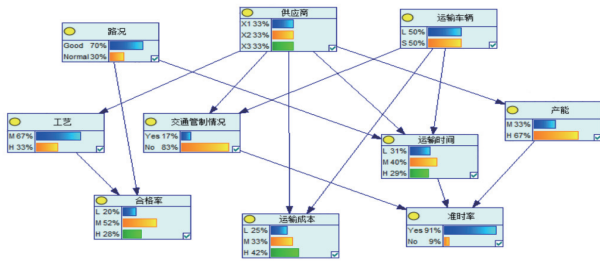


图2 选择装配式构建供应商的贝叶斯网络模型

4.2.2 原始数据预处理

(1) 定量指标数据确定。定量指标是由企业组织专家进行实地考察、电话咨询等相关调研方式，并测量决策所需的实际数据，利用实际测量数据计算并梳理汇总搜集到的资料，得到 5 个定量指标数据，见表 13。

对预制构件供应商定量指标的评价值进行标准化处理，以消除各个指标之间的量纲差异性。为使每个指标变换后的最优值为 1 且最差值为 0，对指标数据进行标准 0-1 变换。其中，对效益型属性使用公式 (8)，对成本型属性使用公式 (9)， $Z_{ij}$  是第 i 个评价对象的第 j 个指标的评价值， $y_{ij}$  为其对应元素。标准化处理后预制构件供应商定量指标数据，见表 14。

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij} - y_j^{min}}{y_j^{max} - y_j^{min}} \quad (8)$$

$$Z_{ij} = \frac{y_j^{max} - y_{ij}}{y_j^{max} - y_j^{min}} \quad (9)$$

(2) 定性指标数据确定。对于定性指标值，为了科学选出最优供应商需要利用专家的专业知识和工作经验在充分了解每个备选方案的基础上进行评定，现邀请来自 3 个不同单位的 4 位专家学者，包括 E 项目施工总承包项目经理、总工程师、设计院专家以及高校科研人员组成专家团队 E=(e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, e<sub>3</sub>, e<sub>4</sub>) 对定性指标进行评价，量化表如表 15 所示，用“非常高”“高”“偏高”“中等”“偏低”“低”“非常低”7 个评价等级定性描述每项定性指标，得到 4 位专家的评价信息如表 16.1~ 表 16.4 所示。专家信

表12 推理结果

X	V	p ( A9 X,V )		p ( A10 X,V )			p ( A11 X,V )			综合评价价值(%) ( A9,A10,A11 )
		Yes	No	15%	16%	17%	92%~94%	94%~96%	96%~98%	
1	L	0.85	0.15	1	0	0	0.3	0.7	0	( 85,15,94.4 )
1	S	0.9	0.1	0.5	0.5	0	0.3	0.7	0	( 90,15.5,94.4 )
2	L	0.93	0.07	0	1	0	0.3	0.7	0	( 93,16,94.4 )
2	S	0.95	0.05	0	0.5	0.5	0.3	0.7	0	( 95,16.5,94.4 )
3	L	0.91	0.9	0	0	1	0	0.15	0.85	( 91,17,96.7 )
3	S	0.92	0.8	0	0	1	0	0.15	0.85	( 92,17,96.7 )

表13 预制构件供应商定量指标数据

编号	指标名称	X1	X2	X3
A1	市场占有率	9	7	10
A6	构件报价水平	3100	2900	3300
A9	准时交货率 (%) ( V=L, V=S )	( 85, 90 )	( 93, 95 )	( 91, 92 )
A10	运输成本率 (%) ( V=L, V=S )	( 15, 15.5 )	( 16, 16.5 )	( 17, 17 )
A11	产品合格率 (%) ( V=L, V=S )	( 94.4, 94.4 )	( 94.4, 94.4 )	( 96.7, 96.7 )

表14 标准化处理后预制构件供应商定量指标数据

编号	指标名称	X1	X2	X3
A1	市场占有率	0.67	0	1
A6	构件报价水平	0.5	1	0
A9	准时交货率 ( V=L, V=S )	( 0, 0 )	( 1, 1 )	( 0.75, 0.4 )
A10	运输成本率 ( V=L, V=S )	( 1, 1 )	( 0.5, 0.33 )	( 0, 0 )
A11	产品合格率 ( V=L, V=S )	( 0, 0 )	( 0, 0 )	( 1, 1 )

表15 专家表评价量化表

评价等级	符号	量化值
非常高	VH	0.98
高	H	0.84
偏高	FH	0.70
中等	M	0.56
偏低	FL	0.42
低	L	0.28
非常低	VL	0.14

表16.1 专家e<sub>1</sub>的评价信息

编号	指标名称	X1	X2	X3
A2	付款条件响应度	0.84	0.70	0.98
A3	长期合作意愿	0.84	0.56	0.98
A4	项目团队人员素质	0.70	0.84	0.56
A5	节能环保水平	0.56	0.28	0.70
A7	预制构件标准化程度	0.84	0.70	0.70
A8	供应商产能	0.56	0.70	0.84
A12	生产工艺	0.84	0.70	0.56

表16.2 专家e<sub>2</sub>的评价信息

编号	指标名称	X1	X2	X3
A2	付款条件响应度	0.84	0.70	0.84
A3	长期合作意愿	0.98	0.70	0.98
A4	项目团队人员素质	0.84	0.70	0.70
A5	节能环保水平	0.42	0.14	0.56
A7	预制构件标准化程度	0.98	0.84	0.56
A8	供应商产能	0.70	0.56	0.84
A12	生产工艺	0.98	0.70	0.70

表16.3 专家e<sub>3</sub>的评价信息

编号	指标名称	X1	X2	X3
A2	付款条件响应度	0.98	0.84	0.98
A3	长期合作意愿	0.84	0.70	0.84
A4	项目团队人员素质	0.70	0.98	0.56
A5	节能环保水平	0.42	0.42	0.70
A7	预制构件标准化程度	0.98	0.84	0.56
A8	供应商产能	0.56	0.70	0.70
A12	生产工艺	0.84	0.84	0.56

表16.4 专家e<sub>4</sub>的评价信息

编号	指标名称	X1	X2	X3
A2	付款条件响应度	0.84	0.70	0.84
A3	长期合作意愿	0.98	0.70	0.70
A4	项目团队人员素质	0.98	0.70	0.70
A5	节能环保水平	0.28	0.14	0.56
A7	预制构件标准化程度	0.84	0.56	0.56
A8	供应商产能	0.70	0.56	0.84
A12	生产工艺	0.70	0.70	0.42

表17 专家信息及权重

专家	教育背景	从业年限	权重得分	权重值
e1	学士	≥30	0.5+1=1.5	0.27
e2	学士	20~30	0.5+0.75=1.25	0.23
e3	硕士	10~20	1+0.5=1.5	0.27
e4	硕士	5~10	1+0.25=1.25	0.23

表18 专家综合评价信息

编号	指标名称	X1	X2	X3
A2	付款条件响应度	0.87	0.73	0.91
A3	长期合作意愿	0.90	0.66	0.87
A4	项目团队人员素质	0.79	0.81	0.62
A5	节能环保水平	0.42	0.25	0.63
A7	预制构件标准化程度	0.91	0.73	0.59
A8	供应商产能	0.62	0.63	0.80
A12	生产工艺	0.84	0.73	0.56

表19 预制构件供应商选择各个指标的熵值和熵权

指标	熵值 $e_j$	熵权 $w_j$	指标	熵值 $e_j$	熵权 $w_j$
A1	0.781	13.95%	A7	0.991	0.55%
A2	0.998	0.15%	A8	0.996	0.25%
A3	0.995	0.32%	A9	0.763	15.08%
A4	0.996	0.24%	A10	0.743	16.35%
A5	0.964	2.33%	A11	0.448	35.17%
A6	0.763	15.12%	A12	0.993	0.48%

息及权重如表 17 所示，根据表 17 得到 4 位专家的综合评价信息如表 18 所示。

#### 4.2.3 指标熵权确定

由定量指标数据以及定性指标数据建立决策矩阵：

$$R = \begin{pmatrix} 0.67 & 0.87 & 0.9 & 0.79 & 0.42 & 0.5 & 0.91 & 0.62 & 0 & 1 & 0 & 0.84 \\ 0 & 0.73 & 0.66 & 0.81 & 0.25 & 1 & 0.73 & 0.63 & 1 & 0.5 & 0 & 0.73 \\ 1 & 0.91 & 0.87 & 0.62 & 0.63 & 0 & 0.59 & 0.8 & 0.75 & 0 & 1 & 0.56 \\ 0.67 & 0.87 & 0.9 & 0.79 & 0.42 & 0.5 & 0.91 & 0.62 & 0 & 1 & 0 & 0.84 \\ 0 & 0.73 & 0.66 & 0.81 & 0.25 & 1 & 0.73 & 0.63 & 1 & 0.33 & 0 & 0.73 \\ 1 & 0.91 & 0.87 & 0.62 & 0.63 & 0 & 0.59 & 0.8 & 0.4 & 0 & 1 & 0.56 \end{pmatrix}$$

由式（4），预制构件供应商选择评价指标权重矩阵 B 为：

$$B = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.17 & 0.19 & 0.18 & 0.16 & 0.17 & 0.20 & 0.15 & 0.00 & 0.35 & 0.00 & 0.20 \\ 0.0 & 0.15 & 0.14 & 0.18 & 0.10 & 0.33 & 0.16 & 0.15 & 0.32 & 0.18 & 0.00 & 0.17 \\ 0.3 & 0.18 & 0.18 & 0.14 & 0.24 & 0.00 & 0.13 & 0.20 & 0.24 & 0.00 & 0.50 & 0.13 \\ 0.2 & 0.17 & 0.19 & 0.18 & 0.16 & 0.17 & 0.20 & 0.15 & 0.00 & 0.35 & 0.00 & 0.20 \\ 0.0 & 0.15 & 0.14 & 0.18 & 0.10 & 0.33 & 0.16 & 0.15 & 0.32 & 0.12 & 0.00 & 0.17 \\ 0.3 & 0.18 & 0.18 & 0.14 & 0.24 & 0.00 & 0.13 & 0.20 & 0.13 & 0.00 & 0.50 & 0.13 \end{pmatrix}$$

通过式（5）和式（6），根据 B 可计算预制构件供应商选择各个指标的熵值和熵权，运用 spssau 软件计算，结果如表 19 所示。

#### 4.3 综合评价分析

根据标准化的指标数据  $z_{ij}$  以及表 17 中各指标的熵权  $w_j$ ，运用加权和法求得各方案的综合值  $C_i$ ：

$$C_i = \sum_{j=1}^n w_j z_{ij} \quad (10)$$

利用公式（10）计算各个方案的综合值，可得  $(X_{1,L})=0.359$ ， $(X_{2,L})=0.404$ ， $(X_{3,L})=0.633$ ， $(X_{1,S})=0.359$ ， $(X_{2,S})=0.376$ ， $(X_{3,S})=0.579$ 。对各个方案进行排序，结果为： $(X_{3,L}) > (X_{3,S}) > (X_{2,L}) > (X_{2,S}) > (X_{1,L}) = (X_{1,S})$ ；显然，为最优供应商，且使用大平板车时方案最优。

### 5 结语

在装配式预制构件供应商选择中有许多不确定因素会对评价指标造成影响，如准时交货率、运输成本率、产品合格率。这些评价指标受到路况与运输车辆等环境因素影

响。借助贝叶斯网络来推理分析可以极大降低思考的复杂度，得出可靠的评价指标。之后利用多属性决策对方案进行评价选出最优供应商。

本文运用多属性决策选择装配式预制构件供应商，对指标体系、权重确定、决策方法进行了系统性的研究，为装配式预制构件供应商选择提供了技术支撑与参考依据。预制构件供应商选择是装配式建筑施工管理的重要环节，从装配式建筑的源头进行质量、成本与风险的对建筑工业化规模效益具有重大战略意义。建立明确的指标体系，有利于预制构件供应商的选择，既能保证施工总承包商的决策成果，也可以为供应商提供改进升级方向。本文结合了贝叶斯网络、多属性决策以及熵权法的装配式预制构件供应商选择研究，将提高决策的准确性。

#### 参考文献：

- [1] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41 (12): 1074-1077.
- [2] 李滨. 我国预制装配式建筑的现状与发展 [J]. 中国科技信息, 2014, (07): 114-115.
- [3] 李丽红, 耿博慧, 齐宝库等. 装配式建筑工程与现浇建筑工程成本对比与实证研究 [J]. 建筑经济, 2013, (09): 102-105.
- [4] Chan H, Darwiche A. When do numbers really matter? [J]. Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2001. DOI: 10.1613/jair.967.
- [5] 余东峰, 孙兆林. 基于贝叶斯网络不确定推理的研究 [J]. 微型电脑应用, 2004, (08): 6-8+63.
- [6] 徐泽水, 达庆利. 多属性决策的组合赋权方法研究 [J]. 中国管理科学, 2002, (02): 85-88.
- [7] 陈珽. 决策分析[M]. 北京: 科学出版社, 1997.