

文章编号:1672-9331(2021)02-0057-09

基于 FISM-ANP 的装配式建筑成本影响因素分析

彭军龙,周 静

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要: 为了深入研究装配式建筑成本的影响因素,从决策—设计—生产—施工—运营与回收 5 个阶段,构建了全寿命周期的装配式建筑成本影响因素指标体系。将模糊解释结构模型(fuzzy interpretative structural model, FISM)与网络层次分析模型(analytic network process, ANP)相结合,建立了基于 FISM-ANP 的装配式建筑成本影响因素分析模型。研究表明:该模型不仅能定性找出影响装配式建筑成本的表层直接因素、中间层动力因素、深层导向因素,还能将各因素之间的内部逻辑关系用直观图的形式表示出来。此外,还可以定量地对装配式建筑成本影响因素的重要程度进行排序,并找出影响成本的关键阶段和因素。

关键词: 装配式建筑;全寿命周期;成本影响因素;模糊解释结构模型;网络层次分析模型

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

Analysis of influence factors of prefabricated building cost based on FISM-ANP

PENG Jun-long, ZHOU Jing

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the influence factors of prefabricated building cost in depth, the whole life cycle index system was constructed from five stages of decision-making, design, production, construction, operation and recovery. Combining the fuzzy interpretative structural model (FISM) with the analytic network process (ANP), the FISM-ANP model was established to analyze the influence factors of prefabricated building cost. The results show that the model can not only qualitatively find out the surface direct factors, middle dynamic factors and deep guiding factors that affect the prefabricated building cost, but also express the internal logic relationship among the factors in the form of visual graph. In addition, it can also quantitatively rank the importance of the influence factors of prefabricated building cost, and find out the key stages and factors that affect the cost.

Key words: prefabricated building; whole life cycle; influence factor of cost; fuzzy interpretative structural model; analytic network process

随着中国城市化进程的加快,传统现浇混凝土的施工方式因其生产效率低、资源利用率低、环境污染大、施工周期长,已无法满足建筑行业可持续发展的需要^[1-2]。而装配式建筑能最大限度地

缩短施工周期、提高资源利用率、减轻环境污染,符合建筑行业发展的要求^[3-5],但其成本过高一直限制着装配式建筑的发展^[6-7]。因此,挖掘影响因素之间的复杂关系,找出影响成本的关键阶段和

收稿日期:2020-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578080)

通讯作者:彭军龙(1976—),男,副教授,主要从事工程项目管理方面的研究。E-mail:375135287@qq.com

因素,采取有针对性的措施对成本进行管控,这对装配式建筑的成本管理和行业发展有重大意义。

已有学者对装配式建筑成本的影响因素进行了研究分析。陈伟等^[8]指出影响装配式建筑成本最关键的3个阶段是预制构件的生产、运输和安装;李辉山等^[9]运用决策实验室(decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)法,从外部建设环境、项目自身技术、项目人员的组织管理3个方面分析装配式建筑成本的关键因素;从外因潜在变量考虑,郑生钦等^[10]采用因子分析法和结构方程模型对装配式建筑成本外因潜在变量进行了排序;从项目的设计—生产—施工3个阶段分析,周景阳等^[11]运用解释结构模型(interpretative structural model, ISM)得出了影响装配式建筑成本的表层因素、中间层因素和深层因素;Xue等^[6]将项目经验、企业责任和参与者的职能作为影响装配式建筑成本的固定独立因素,认为预制房屋设计规范及标准、管理者相关经验、预制构件拆分的合理性是最关键的因素。以上研究为装配式建筑的成本管理提供了一定的参考,但大多数研究主要侧重于定性分析因素之间的复杂关系或定量分析因素的重要性水平,缺乏定性与定量的结合分析。此外,大多数学者只研究设计、生产、施工阶段各因素对成本的影响,很少有学者分析运营和回收阶段成本的影响因素,即没有从项目全生命周期角度去考虑问题。然而运营与回收阶段的时间跨度大,成本远高于全生命周期的其他阶段^[12-14]。

鉴于此,本研究建立了全生命周期装配式建筑成本影响因素指标体系,并对其进行定量与定性分析。构建了基于模糊解释结构模型—网络层次分析模型(fuzzy interpretative structural model-analytic network process, FISM-ANP)的装配式建筑成本影响因素分析模型,首先运用FISM定性得出装配式建筑成本影响因素的递阶有向图;然后通过ANP定量地计算出各因素的权重和综合排序;最终找出影响装配式建筑成本的关键阶段和因素。该研究不仅能形象地揭示影响因素之间的内部复杂结构,而且还能定量地找出影响成本的关键阶段和因素,从而可以采取有针对性的措施来控制成本,这为分析和管控装配式建筑成本提供了一种有效且可行的新方法。

1 影响因素体系构建

1.1 全生命周期划分

国内对工程项目全生命周期的研究起步较晚。近几年来,随着人们低碳生活及环保意识的不断加强,部分项目的前期规划和设计才开始考虑社会资源利用率和可持续发展理念。一般工程项目全生命周期是指从项目前期规划、设计、施工、竣工、生产、运营、维修保养,直到报废的整个过程^[15]。而决策设计、施工建造、维护使用和回收报废成本是绿色建筑全生命周期最主要的成本^[16-17]。本研究将装配式建筑全生命周期划分为5个阶段,分别为决策、设计、生产、施工、运营与回收,并从这5个阶段分析、识别装配式建筑成本的影响因素。

1.2 影响因素识别

目前,已有较多学者对装配式建筑成本影响因素的划分和选取进行了研究。在Web of science、知网和万方等数据库中输入“prefabricated building”“预制构件成本因素分析”“装配式建筑成本”等关键词,共检索出250篇与装配式建筑成本有关的文献,从中筛选出20篇具有代表性的文献进行分析。从决策—设计—生产—施工—运营与回收5个阶段进行统计、归纳,删除一些影响较小的因素,同时增加未被识别的因素,初步得到23个装配式建筑成本的影响因素。采用专家咨询法和发放问卷调查的形式,运用Likert 5级量表,让受访者根据自己对专业的理解,按照1~5的重要程度对23个因素进行评分,受访者信息如表1所示。共发放调查问卷200份,实际回收问卷120份,其中有效问卷81份,有效回收率为67.5%。

通过数据分析软件SPSS 25.0完成问卷的信度检验和指标筛选。首先计算出 α 信度系数为0.867,表明数据的内部一致性较高;然后通过T值检验,剔除设计阶段的设计方案选择和设计人员经验两个影响因素;最后根据方差检验剔除生产阶段的质量标准和施工阶段的二次拆分两个影响因素,具体流程见图1。最终从23个影响因素中剔除设计方案选择、设计人员经验、质量标准和施工阶段的二次拆分4个影响因素,得到全生命周期的装配式建筑成本影响因素指标体系,如图2所示。

表 1 受访者基本信息汇总

Table 1 Summary of interviewees' basic information

项目	类别	所占比例/%
学历	专科及以下	7.9
	本科	49.2
	硕士	36.1
	博士	6.8
从事装配式建筑相关行业的工作年限	2 年以下	9.1
	2~4 年	40.5
	4~6 年	39.7
	6 年以上	10.7
所在单位	建设单位	15.4
	施工单位	10.2
	设计单位	9.8
	监理单位	18.4
	高等院校	20.7
	预制构件生产单位	18.9
	其他	6.6

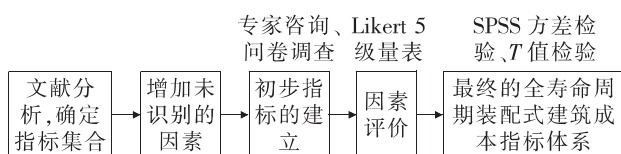


图 1 指标体系建立流程

Fig. 1 Establishing process of index system

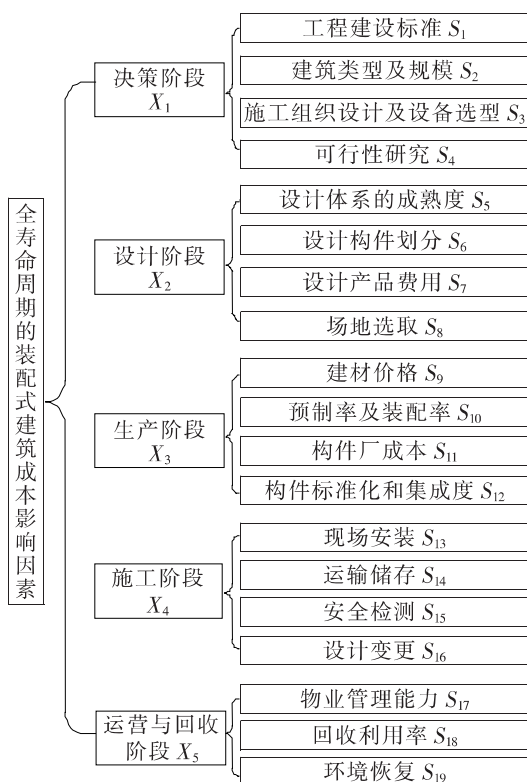


图 2 全寿命周期的装配式建筑成本影响因素指标体系

Fig. 2 Index system of influence factors of prefabricated building cost in the whole life cycle

2 FISM-ANP 模型构建

2.1 FISM 构建

ISM 由美国 Warfield 教授提出,用于分析与复杂经济系统结构有关的问题^[18]。将模糊数学引入 ISM,并对其进行改进,即得到 FISM^[19]。FISM 可在一定程度上避免专家打分的主观性,使分析结果更加准确、合理。通过与 MATLAB 结合对因素间的关联关系进行处理,反映出因素内部的复杂结构,最终得到清晰的层次结构和递阶结构有向图。步骤如下:

① 建立模糊关联矩阵。通过问卷调查和专家访谈的方式,初步确定因素之间的相互关系,得到模糊关联矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times n}$,其中, x_{ij} 为因素之间的关联强度。

② 选取隶属度函数。根据式(1),建立装配式建筑成本影响因素的模糊关联强度矩阵 $\mathbf{B}_n = (b_{ij})_{n \times n}$ 。

$$b_{ij} =$$

$$\begin{cases} x_{ij}/(x_i + x_j - x_{ij}), & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (1)$$

式中: b_{ij} 为因素 i 对因素 j 的模糊关联强度; x_i 为模糊关联矩阵 $\mathbf{X}$ 第 i 行的和; x_j 为模糊关联矩阵 $\mathbf{X}$ 第 j 列的和; $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

③ 选取阈值 λ 。通过式(2)确定邻接矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & b_{ij} > \lambda \\ 0, & b_{ij} \leq \lambda \end{cases} \quad (2)$$

④ 构建可达矩阵 $\mathbf{M}$ 。依据布尔矩阵运算规则,对邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 进行相关计算。当矩阵 $\mathbf{A}$ 满足式(3)时, $\mathbf{M}$ 为 $\mathbf{A}$ 的可达矩阵。 $\mathbf{M}$ 由 MATLAB 软件计算得到。

$$(\mathbf{A} + \mathbf{E})^1 \neq (\mathbf{A} + \mathbf{E})^2 \neq \dots \neq (\mathbf{A} + \mathbf{E})^{K-1} = (\mathbf{A} + \mathbf{E})^K = \mathbf{M} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为单位矩阵。

⑤ 层级要素划分。在可达矩阵 $\mathbf{M}$ 的基础上,求出可达集 $R(S_i)$ 、先行集 $A(S_j)$ 、交集 $R(S_i) \cap A(S_j)$ 、 $Q(S_i)$ (可到达 S_i 的全部因素的集合),最高层元素由式(6)确定,然后将确定的第一层因

素从矩阵中划去。重复以上做法,找出每个层次的最高层要素集,从而将所有的因素划分到相应的层级来构建装配式建筑成本影响因素之间的关联关系。最后得到装配式建筑成本影响因素的层次递阶结构有向图。

$$R(S_i) = \{S_j \mid S_j \in S, S_{ij} = 1\} \quad (4)$$

$$A(S_j) = \{S_i \mid S_i \in S, S_{ij} = 1\} \quad (5)$$

$$Q(S_i) = \{S_j \mid S_j \in S, R(S_i) \cap A(S_j) = R(S_i)\} \quad (6)$$

式中: S 为元素集。

2.2 ANP 构建

美国 Saaty 教授在层次分析法的基础上进行推广,得到了 ANP^[20]。它是一种新的科学决策方法,主要针对内部结构有依存性和反馈性的复杂决策系统。ANP 结构模型如图 3 所示。

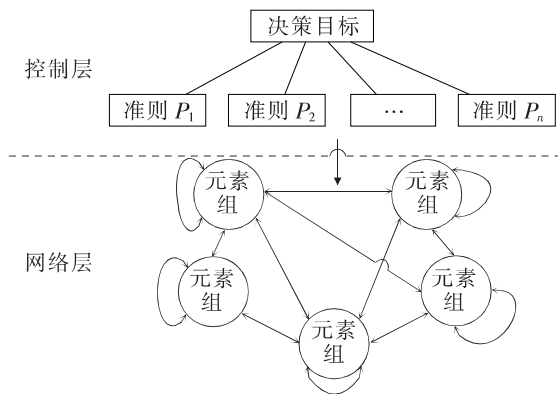


图3 ANP 结构模型

Fig. 3 ANP structural model

1) 未加权超矩阵 $\bar{W}$ 。

设 ANP 控制层中的各元素为 $P_1, P_2, \dots, P_n$; 网络层元素集为 $S_1, S_2, \dots, S_n$, 其中 S_i 的元素为 $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in_i} (i = 1, 2, \dots, n)$ 。控制层元素 $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为准则; $S_{jk} (k = 1, 2, \dots, n)$ 为次准则。将元素集 S_i 的元素按其对 S_{jk} 的影响程度进行比较, 得出判断矩阵。在进行一致性检验后, 依照特征根法计算出特征向量, 并进行归一化处理为 $(w_{i1}^{(jk)}, w_{i2}^{(jk)}, \dots, w_{in_i}^{(jk)})^T$, 得到矩阵 $\bar{W}_{ij}$ 。

$$\bar{W}_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \cdots & w_{i1}^{(jn_j)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \cdots & w_{i2}^{(jn_j)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{in_i}^{(j1)} & w_{in_i}^{(j2)} & \cdots & w_{in_i}^{(jn_j)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

在式(7)中, $\bar{W}_{ij}$ 的列向量为 S_i 的元素, 是 $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in_i}$ 对 S_j 中元素 $S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jn_j}$ 重要程度的排序向量。若 S_i 对 S_j 的元素无影响, 则 $w_{ij} = 0 (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$ 。采取上述步骤, 可计算出 P_i 的超矩阵 $\bar{W}$ 。

2) 加权超矩阵 $\bar{W}$ 。

将元素组作为元素, 在 P_i 下两两比较各组元素的重要性, 得出加权矩阵 A , 加权超矩阵 $\bar{W} = (\bar{w}_{ij})$, 其中: $\bar{w}_{ij} = A_{ij} \times w_{ij}$ 。

3) 极限超矩阵 W_S 。

$$W_S = \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{w}^k \quad (8)$$

3 实例分析

3.1 基于 FISM 确定指标之间的关联关系

采用德尔菲专家评分法确定 19 个指标之间的关联关系, 按照 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.0 (值越大说明关联度越大) 进行打分。根据已有的研究, 一般 4~10 人组成 ISM 小组, 就能得到理想的预期结果^[12]。因此, 本研究邀请 12 位经验丰富的专家, 分别为 5 位有 5 年相关工作经验的工作人员 (项目经理 2 人, 技术员 1 人, 施工员 1 人, 预算员 1 人), 3 位相关专业的高校教授, 2 位高级工程师, 2 位咨询公司相关从业人员, 进行了 6 次问卷调查, 并查阅相关研究文献, 比较、确定 $S_1 \sim S_{19}$ 两两因素之间的关联关系。对没有形成统一意见的关联关系, 遵循少数服从多数的原则, 最终得到各因素之间的模糊关联强度。阈值 λ 取值越小, 则因素层级关系划分越细, 反之越粗。因素层级关系划分得过细或过粗都无法反映因素之间的关系, 因此 λ 取值要合适。对于本研究案例, 取 $\lambda = 0.04$, 在层级为 7 时, 模型具有较好的解释性。由式(1)和式(2)建立邻接矩阵。在邻接矩阵的基础上, 用式(3)在 MATLAB 2018a 平台上计算可达矩阵 M 。通过式(4)~(6)计算出可达集、先行集、交集和层级 (见表 2)。最终, 得到装配式建筑成本影响因素的递阶结构有向图, 如图 4 所示。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \end{bmatrix} \\ \mathbf{M} = & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

表 2 可达集、先行集、交集和层级

Table 2 Reachable set, antecedent set, common set and level

因素 S_i	$R(S_i)$	$A(S_j)$	$Q(S_i)$	层级
S_1	1~19	1,2,4,18,19	1,2,4,18,19	7
S_2	1~19	1,2,4,18,19	1,2,4,18,19	7
S_3	3,13,15~17	1~4,18,19	3	4
S_4	1~19	1,2,4,18,19	1,2,4,18,19	7
S_5	5~7,9~13,15~17	1~5,18,19	5	6
S_6	6,10~13,15~17	1~6,18,19	6	5
S_7	7	1~5,7,18,19	7	1
S_8	8,14~17	1,2,4,8,18,19	8	4
S_9	9	1,2,4,9,18,19	9	1
S_{10}	10,13,15~17	1,2,4~6,10,18,19	10	4
S_{11}	11	1,2,4~6,11,18,19	11	1
S_{12}	12,13,15~17	1,2,4~6,12,18,19	12	4
S_{13}	13,15~17	1,2,4~6,10~13,18,19	13	3
S_{14}	14,17	1,2,4,8,14,18,19	14	2
S_{15}	15,17	1~6,8,10,12,13,15,18,19	15	2
S_{16}	16	1~6,8,10,12,13,16,18,19	16	1
S_{17}	17	1~6,8,10,12~15,17,18,19	17	1
S_{18}	1~19	1,2,4,18,19	1,2,4,18,19	7
S_{19}	1~19	1,2,4,18,19	1,2,4,18,19	7

$W_s =$

[0.122	0.122	0	0.122	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.122	0.122]
0.023	0.023	0	0.023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.023	0.023
0.027	0.027	0	0.027	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.027	0.027
0.107	0.107	0	0.107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.107	0.107
0.092	0.092	0	0.092	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.092	0.092
0.007	0.007	0	0.007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.007	0.007
0.007	0.007	0	0.007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.007	0.007
0.036	0.036	0	0.036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.036	0.036
0.113	0.113	0	0.113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.113	0.113
0.001	0.001	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001
0.002	0.002	0	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.002
0.006	0.006	0	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.006	0.006
0.046	0.046	0	0.046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.046	0.046
0.035	0.035	0	0.035	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.035	0.035
0.060	0.060	0	0.060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.060	0.060
0.018	0.018	0	0.018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.018	0.018
0.129	0.129	0	0.129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.129	0.129
0.024	0.024	0	0.024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.024	0.024
[0.145	0.145	0	0.145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.145	0.145]

表 3 装配式建筑成本影响因素权重

Table 3 Weight of influence factors of prefabricated building cost					
一级指标	权重	二级指标	权重	归一化处理后的权重	排名
决策阶段 X_1	0.279	工程建设标准 S_1	0.122	0.437	3
		建筑类型及规模 S_2	0.023	0.083	12
		施工组织设计及设备选型 S_3	0.027	0.097	11
		可行性研究 S_4	0.107	0.383	5
设计阶段 X_2	0.142	设计体系的成熟度 S_5	0.092	0.649	6
		设计构件划分 S_6	0.007	0.049	15
		设计产品费用 S_7	0.007	0.049	16
		场地选取 S_8	0.036	0.253	9
生产阶段 X_3	0.122	建材价格 S_9	0.113	0.924	4
		预制率及装配率 S_{10}	0.001	0.008	19
		构件厂成本 S_{11}	0.002	0.020	18
		构件标准化和集成度 S_{12}	0.006	0.048	17
施工阶段 X_4	0.159	现场安装 S_{13}	0.046	0.291	8
		运输储存 S_{14}	0.035	0.219	10
		安全检测 S_{15}	0.060	0.375	7
		设计变更 S_{16}	0.018	0.115	14
运营与回收 阶段 X_5	0.298	物业管理能力 S_{17}	0.129	0.435	2
		回收利用率 S_{18}	0.024	0.077	13
		环境恢复 S_{19}	0.145	0.488	1

3.4 ANP 模型结果分析

各因素的权重代表其对装配式建筑成本的影响程度,权重越大表示对装配式建筑成本的影响越大,反之则越小。由表3可知,一级指标的权重分别为0.279,0.142,0.122,0.159,0.298。其中,运营与回收、决策、施工阶段所占权重排在前三,因此在装配式建筑施工过程中应重点管控这3个阶段的成本。二级指标权重排名前10的分别为环境恢复(0.145)、物业管理能力(0.129)、工程建设标准(0.122)、建材价格(0.113)、可行性研究(0.107)、设计体系的成熟度(0.092)、安全检测(0.060)、现场安装(0.046)、场地选取(0.036)、运输储存(0.035)。这10个影响因素是影响装配式建筑成本的关键因素,在装配式建筑项目的各阶段应对其优先分析和管理。

根据 ANP 结构模型分析得出装配式建筑全寿命周期的5个阶段之间是相互影响的。由图5可知决策阶段、运营与回收阶段相互影响,决策阶段对设计阶段、施工阶段有影响,设计阶段对生产阶段、施工阶段有影响,生产阶段对施工阶段有影响,施工阶段对运营与回收阶段有影响。根据 ANP 模型计算结果可知,各阶段和各因素对装配式建筑成本的影响程度各不相同,它们既相互联系,又存在差异。由于运营与回收阶段涉及的客观原因较多,有较大的不可控性,应重点加强该阶段的管理,引入新材料来提高回收利用率和促进环境恢复;项目决策阶段对其他阶段有着直接的影响,因此在项目前期应考虑到项目其他阶段可能出现的问题,谨慎地做出合理的决策;设计阶段涉及的专业较广,需做好相关设计人员的培训工作,提高其设计能力,同时需提升设计体系的成熟度;在生产阶段应选择合理的预制率和装配率,提高构件模数的集成度,使预制构件具有更大的通用性和可交换性,从而提高构件生产效率;施工阶段最主要的任务是现场安装,安装速度对该阶段的成本也具有较大的影响,因此需采用分段流水施工方法,同时尽量避免储存和二次搬运预制构件。在预制构件运输和储存的过程中,应规划出合理、适宜的运输路线,减少短期仓储费用。

4 结论

本研究从全寿命周期的角度识别了装配式建

筑成本的影响因素,将 FISM 与 ANP 相结合,建立了 FISM-ANP 装配式建筑成本影响因素分析模型,对装配式建筑成本影响因素进行了定性和定量分析,并得出以下结论:

1) 根据装配式建筑全寿命周期成本影响因素的特点,从决策—设计—生产—施工—运营与回收5个阶段,构建了全寿命周期装配式建筑成本影响因素的指标体系,共包含19个影响因素。从全寿命周期的角度分析成本影响因素更加全面和符合实际。

2) 为了避免专家打分的主观随意性,在传统 ISM 的基础上引入模糊数学,利用 FISM 模型定性地对成本影响因素进行分析,构建了全寿命周期装配式建筑成本影响因素7级递阶有向图,从中找出了表层直接因素、中间层动力因素、深层导向因素。用直观图的形式将各因素之间的内部关系清晰地反映出来,这为装配式建筑的成本管理提供了直接参考。

3) 将递阶结构有向图输入到 Super Decision 软件中,通过 ANP 模型定量地分析成本影响因素的权重与排序,得到了影响装配式建筑成本的关键阶段和关键因素。管理者在实际项目施工过程中,可针对关键因素采取相应措施进行成本管控。

FISM-ANP 模型既能定性地将成本影响因素之间的内部关系直观地用图形表示出来,又能定量地对装配式建筑成本影响因素的重要程度进行排序,同时也将因素之间的外部依赖和内部依存关系考虑进去。将定性分析与定量分析结合起来对成本的影响因素进行分析,更加直接、科学、合理。同时,也为以后装配式建筑成本的分析研究提供了一种新思路。但当影响因素过多时,运用 FISM 解决这类问题将比较烦琐,这是在今后的研究中需重视并解决的难题。

〔参考文献〕

- [1] 胡庆国,蔡孟龙,何忠明. 基于组合赋权法与集对分析的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(4):16-26.
- HU Qing-guo, CAI Meng-long, HE Zhong-ming. Construction safety risk assessment of prefabricated building based on combination weighting method and

- set pair analysis[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2019, 16(4):16-26.
- [2] Baghdadi A, Heristchian M, Kloft H, et al. Design of prefabricated wall-floor building systems using meta-heuristic optimization algorithms[J]. Automation in Construction, 2020, 114:103156.
- [3] 蒋建林, 陈建国, 郑荣跃. 工程项目组织间壁垒问题分析: 以装配式建筑项目为例[J]. 软科学, 2019, 33(3):106-110.
- JIANG Jian-lin, CHEN Jian-guo, ZHENG Rong-yue. Research on the interorganization barriers of construction project: taking prefabricated building projects as an example[J]. Soft Science, 2019, 33(3): 106-110.
- [4] Hao J L, Cheng B, Lu W, et al. Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: a BIM-based life-cycle assessment approach[J]. Science of the Total Environment, 2020, 723:137870.
- [5] 刘贵文, 陶怡, 毛超, 等. 政策工具视角的中国装配式建筑政策文本量化研究[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2018, 24(5):56-65.
- LIU Gui-wen, TAO Yi, MAO Chao, et al. Textual and quantitative research on Chinese prefabricated construction policy from the perspective of policy tools[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2018, 24(5):56-65.
- [6] Xue H, Zhang S J, Su Y K, et al. Factors affecting the capital cost of prefabrication: a case study of China[J]. Sustainability, 2017, 9(9):1 512.
- [7] 陈伟, 江雪, 余杨清, 等. 装配式建筑工程增量成本测算[J]. 财会月刊, 2018(6):75-81.
- CHEN Wei, JIANG Xue, YU Yang-qing, et al. Calculation of incremental cost of prefabricated construction project[J]. Finance and Accounting Monthly, 2018(6):75-81.
- [8] 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.
- CHEN Wei, WU Ya-shuai, ZOU Song, et al. Construction cost factor analysis of prefabricated building based on structural equation model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(5):50-55.
- [9] 李辉山, 欧阳昱. 基于 DEMATEL 的装配式建筑成本影响因素分析[J]. 工程管理学报, 2019, 33(1):34-38.
- LI Hui-shan, OUYANG Tan. Influence factors analysis of cost for prefabricated buildings based on DEMATEL method [J]. Journal of Engineering Management, 2019, 33(1):34-38.
- [10] 郑生钦, 王德芳, 左清兰, 等. 基于 SEM 的装配式建筑成本影响因素研究[J]. 项目管理技术, 2016, 14(11):45-49.
- ZHENG Sheng-qin, WANG De-fang, ZUO Qing-lan, et al. Research on the factors influencing the cost of prefabricated building based on SEM[J]. Project Management Technology, 2016, 14(11):45-49.
- [11] 周景阳, 何鹏旺. 基于解释结构模型(ISM)的装配式建筑成本影响因素分析[J]. 工程管理学报, 2019, 33(1):39-44.
- ZHOU Jing-yang, HE Peng-wang. Analysis the influence factors of prefabricated building cost based on interpretative structural model (ISM)[J]. Journal of Engineering Management, 2019, 33(1):39-44.
- [12] 刘慧, 王孟钧, Mirosław J S. 基于解释结构模型的建设工程创新关键成功因素分析[J]. 科技管理研究, 2016, 36(3):20-26.
- LIU Hui, WANG Meng-jun, Mirosław J S. Analysis on the critical success factors of construction innovation based on integrated structural modeling[J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(3):20-26.
- [13] 袁东升. 工程建设项目全寿命周期造价管理研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- YUAN Dong-sheng. Research on the life cycle costing management of engineering project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [14] 王孟男. 装配式建筑全寿命周期成本分析及对策研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
- WANG Meng-nan. Analysis and countermeasure research on the life cycle cost of the assembled building[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.
- [15] 陈群, 雒燕, 成虎. 全寿命周期的项目管理模式研究[J]. 福建论坛(人文社会科学版), 2009(10):16-19.
- CHEN Qun, LUO Yan, CHENG Hu. Research on project management mode of life cycle[J]. Fujian Tribune (the Humanities & Social Sciences Bimonthly), 2009(10):16-19.

- [9] 郭斌,李旭光,刘仁平,等.城市污泥混掺小麦秸秆制备活性炭的研究[J].热能动力工程,2011,26(6):764-767.
- GUO Bin, LI Xu-guang, LIU Ren-ping, et al. Research on preparation of activated carbon by sewage sludge mixed with wheat straw[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(6): 764-767.
- [10] Fu Y, Shen Y, Zhang Z, et al. Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption[J]. Science of the Total Environment, 2019, 646: 1 567-1 577.
- [11] Chen D, Chen X, Sun J, et al. Pyrolysis polygeneration of pine nut shell: quality of pyrolysis products and study on the preparation of activated carbon from biochar[J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 629-636.
- [12] Ahmadpour A, Do D D. The preparation of activated carbon from macadamia nutshell by chemical ctivation[J]. Carbon, 1997, 35(12): 1 723-1 732.
- [13] Zhang J, Gao J, Chen Y, et al. Characterization, preparation, and reaction mechanism of hemp stem based activated carbon[J]. Results in Physics, 2017, 7: 1 628-1 633.
- [14] 程松,张利波,夏洪应,等.响应曲面法优化 CO₂ 活化制备夏威夷坚果壳基活性炭[J].环境工程学报, 2015, 9(9): 4 495-4 502.
- CHENG Song, ZHANG Li-bo, XIA Hong-ying, et al. Preparation of activated carbon from hawaii nut shell via CO₂ activation using response surface methodology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(9): 4 495-4 502.
- [15] Tian H, Hu Q, Wang J, et al. Steam gasification of miscanthus derived char: the reaction kinetics and reactivity with correlation to the material composition and microstructure[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 219: 113026.
- [16] Köseoğlu E, Akmilbaşar C. Preparation, structural evaluation and adsorptive properties of activated carbon from agricultural waste biomass[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26(3): 811-818.
- [17] 李腾飞,王利平,杜嘉玮,等.污泥活性炭对亚甲基蓝吸附性能的研究[J].给水排水, 2017, 53(6): 20-25.
- LI Teng-fei, WANG Li-ping, DU Jia-wei, et al. Study on adsorption of methylene blue on sludge activated carbon[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(6): 20-25.
- [18] 赵文霞,张燕京,韩静,等.炼油厂和城市污泥基活性炭的制备及性能研究[J].环境科学与技术, 2015, 38(2): 130-133, 150.
- ZHAO Wen-xia, ZHANG Yan-jing, HAN Jing, et al. Preparation and characterization of activated carbons from refinery sludge and municipal sludge[J]. Environment Science & Technology, 2015, 38(2): 130-133, 150.

(上接第 65 页)

- [16] 孙鸣春.全生命周期成本理念下绿色建筑经济效益分析[J].城市发展研究, 2015, 22(9): 25-28.
- SUN Ming-chun. Green building economic benefits in the concept of whole life cycle cost analysis[J]. Urban Development Studies, 2015, 22(9): 25-28.
- [17] 姜帆.全生命周期成本视角下的绿色建筑经济效益分析[J].建筑经济, 2014, 35(12): 102-104.
- JIANG Fan. Economic efficiency analysis of green building under whole life cycle cost concept[J]. Construction Economy of China, 2014, 35(12): 102-104.
- [18] 刘家国,姜兴贺,赵金楼.基于解释结构模型的供应链弹性系统研究[J].系统管理学报, 2015, 24(4): 617-623.
- LIU Jia-guo, JIANG Xing-he, ZHAO Jin-lou. Resilience of the supply chain system based on interpretative structural modeling[J]. Journal of Systems & Management, 2015, 24(4): 617-623.
- [19] 王健,曹阳.基于模糊解释结构模型的客运交通结构优化方法[J].交通信息与安全, 2017, 35(4): 112-118.
- WANG Jian, CAO Yang. Optimizing passenger traffic structure based on a fuzzy interpretive structural model[J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2017, 35(4): 112-118.
- [20] Zhao X J, Chen L, Pan W, et al. AHP-ANP-fuzzy integral integrated network for evaluating performance of innovative business models for sustainable building[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2017, 143(8): 4017054.