

装配式建筑全生命周期成本影响因素评价

魏滢欢, 霍海娥, 邓晓雪, 刘知博, 刘明蓉

(西华大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610039)

摘要:降低装配式建筑的成本是推动其快速发展的有效途径。然而,目前装配式建筑成本研究主要着眼于物化阶段,针对全生命周期的研究较少。因此,文章从全生命周期视角出发,构建了装配式建筑的成本影响因素指标体系,通过AHP-熵权法计算各指标的主客观权重,并用博弈论方法得到各指标最终权重,最后用灰色关联度分析法评价得到影响装配式建筑全生命周期成本的最主要因素。结果表明:装配率和预制率、设计的标准化程度、模具的周转次数和机械设备的利用率、施工人员水平、工程签证和计划性管理维护是影响装配式建筑成本最主要的因素,以这6个因素为切入点提出有效控制成本的建议,可为装配式建筑的发展提供借鉴。

关键词:装配式建筑; AHP-熵权法; 博弈论组合赋权; 灰色关联度分析法; 全生命周期

中图分类号: TU723.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)04-0075-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.04.054

Evaluation on cost-influencing factors of prefabricated building based on whole life cycle

WEI Yanhuan, HUO Haie, DENG Xiaoxue, LIU Zhibo, LIU Mingrong

(School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: Reducing the cost of prefabricated building is an effective way to promote its rapid development. The current research mainly focuses on the materialization stage, while there are few studies on the whole life cycle cost of prefabricated building. Therefore, this paper constructs the index system of influencing factors on the cost of prefabricated building from the perspective of the whole life cycle. The objective and subjective weights of each index are calculated by AHP-entropy weight method, then the final weights are obtained by game theory method. Finally, the most important factors affecting the life cycle cost of prefabricated building are evaluated by gray correlation analysis method. The results show that the assembly rate and prefabrication rate, the degree of standardization of design, the number of mold turnover and the utilization rate of mechanical equipment, the level of construction personnel, the engineering visa and the planned management and maintenance are the most important factors affecting the cost of prefabricated buildings. Taking these six factors as the starting point, suggestions for effective cost control are put forward to provide reference for the development of prefabricated buildings.

Key words: prefabricated building; AHP-entropy weight method; combination weight method of game theory; gray correlation analysis method; the whole life cycle

发展装配式建筑是推动我国建筑工业化的必然途径。2020年8月,我国印发了《关于加快新

型建筑工业化发展的若干意见》^[1],其中指出,“要大力推广装配式混凝土建筑,以新型建筑工业

收稿日期: 2023-05-18

作者简介: 魏滢欢(1999—),女,硕士研究生,从事土木工程建造与管理研究。

通信作者: 霍海娥(1974—),女,副教授,从事绿色建筑理论与技术研究。

化带动建筑业全面转型升级”。但作为新兴的产业模式,装配式建筑的发展并不顺利,其在实行过程中受到成本过高、技术标准和行业规范不完善等因素制约,导致很多企业对发展装配式建筑的积极性不高,业主购房意愿低。

因此,选择有效的方法找出装配式建筑关键影响因素,进而针对性地研究降低成本的策略显得尤为重要。吴梦茜^[2]以某装配式住宅小区为研究对象,发现装配式建筑投入成本过高,通过 AHP 法对影响装配式建筑经济效益的因素进行分析,得出新型管理技术、大机械设备用量增加、投入预制构件是其成本过高的主要因素。马明兴^[3]基于熵权-TOPSIS 法对网络分析法指标进行赋权,之后采用熵权法结合专家打分法求得影响因素指标熵权,得到物化阶段关键影响因素有材料费、设计变更、工程签证以及标准化程度。张艺媛等^[4]利用熵权法结合灰色关联度分析法得到装配式建筑物化阶段的主要影响因素有装配方案及装配率、标准和规范的完整度、构件生产方案和生产规模。田侑林^[5]以同一类型建筑为例,将装配式建筑和现浇建筑的建设及使用成本进行对比,得出前者的施工成本比后者的施工成本增长了约 9.8%,造价增加了约 320 元/m²,但装配式建筑使用成本较现浇工程减少了约 17%。文献^[6-8]也得到了类似结论。因此,仅对装配式建筑物化阶段成本过高的原因进行分析有失偏颇,应该以全生命周期为研究对象更为客观。彭军龙等^[9]构建了基于 FISM-ANP 的装配式建筑全寿命周期成本影响因素分析模型,并找出环境恢复、物业管理能力和工程建设标准是关键影响因素。

综上所述,目前对装配式建筑物化阶段成本影响因素的研究较多,但由于运营维护和报废拆除阶段时间跨度较大、影响因素众多以及成本远高于其他阶段等原因,致使从全生命周期角度出发的相关研究较少,且全生命周期影响因素的研究方法局限于 1 种或两种,并未对其适用性和有效性进行分析,也很少尝试两种以上的组合方法进行综合评价。因此,本文从全生命周期角度出发,通过收集文献资料和专家意见,在建筑全生命周期不同阶段选取 25 个因素,运用 AHP-熵权

法确定权重,再结合灰色关联度分析法进行经济效益综合评价,找出对装配式建筑全生命周期成本影响最大的因素,以期为装配式建筑的成本管理提供借鉴。

综上所述,目前关于装配式建筑物化阶段成本影响因素的研究较多,但由于运营维护和报废拆除阶段时间跨度较大、影响因素众多以及成本远高于其他阶段等原因,致使从全生命周期角度出发的相关研究较少。在现有文献中,全生命周期视角下的装配式建筑成本影响因素研究方法局限于 1 种或两种,并未对其使用方法的适用性和有效性进行分析,也很少尝试将两种及以上的方法组合在一起进行综合评价。因此,本文从全生命周期角度出发,通过收集文献资料和专家意见,在建筑全生命周期不同阶段选取 25 个因素,运用 AHP-熵权法确定权重,再结合灰色关联度分析法进行经济效益综合评价,找出对装配式建筑全生命周期成本影响最大的因素,以期为装配式建筑的成本管理提供借鉴。

1 装配式建筑成本因素指标体系及评价模型建立

1.1 装配式建筑成本因素指标体系构建

对近年来的文献资料进行梳理,初步筛选出一些因素后,再结合专家访谈法从设计阶段、生产阶段、运输阶段、施工安装阶段、运营维护阶段、拆除报废阶段以及其他因素 7 个方面确定了 25 个因素,建立了装配式建筑的成本影响因素指标体系,结果如表 1 所示。

1.2 评价模型构建

1.2.1 层次分析法计算指标主观权重值

(1) 结构层次化。确定评价指标,按照各指标的隶属关系,将装配式建筑的成本影响因素指标分为目标层、准则层及指标层。

(2) 两两比较,构造判断矩阵。邀请 15 位专家用“1-9”标度法对指标进行两两对比后打分,得到每一层的比较判断矩阵。

(3) 计算相对权重 w_i 。用行元素几何平均法求得权重并归一后得各个影响元素的权重值。

$$w_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}{(\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n})} \quad (1)$$

表 1 装配式建筑的成本影响因素指标体系

一级指标		二级指标
装配式建筑的成本影响因素指标体系	设计阶段 A_1	装配率和预制率 B_1
		设计的标准化程度 B_2
		设计员工的专业素质 B_3
		工人技术 B_4
		预制构件加工工艺 B_5
	生产阶段 A_2	生产规模及生产能力 B_6
		模具的周转次数和机械设备的利用率 B_7
	运输阶段 A_3	运输距离 B_8
		车辆配置 B_9
		装载方案 B_{10}
		运输环境 B_{11}
	施工安装阶段 A_4	施工方案 B_{12}
		项目管理经验 B_{13}
		施工人员水平 B_{14}
		机械设备的选用 B_{15}
	运营维护阶段 A_5	工程签证 B_{16}
		计划性管理维护 B_{17}
		故障性维修 B_{18}
	报废拆除阶段 A_6	使用期耗能 B_{19}
		建筑拆除方法 B_{20}
		构配件回收 B_{21}
		建筑垃圾回收 B_{22}
	其他因素 A_7	新技术、新设备、新材料的应用 B_{23}
		国家政策和法规 B_{24}
		相关产业链完整性 B_{25}

式中： i 为列指标次序 $i = (1, 2, \cdots, n)$ ， j 为行指标次序 $j = (1, 2, \cdots, n)$ ， a_{ij} 表示第 i 列第 j 行元素， $(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}$ 为每一行元素乘积， n 为指标个数。

(4) 计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i}$$

(2)

式中： A 是所对应的特征向量 $A = [a_1, a_2, \cdots, a_m]$ ； a_i 为特征向量 A 的第 i 个分量。

(5) 一致性检验。因为得到的矩阵是通过专家判断出来的，具有主观性，为了使矩阵满足一致性指标，需要用最大特征值进行一致性检验。

1) 计算一致性指标 CI ：

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

(3)

2) 计算满意一致性比例 CR ：

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(4)

其中， RI 平均随机一致性指标取值如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标 RI 值

矩阵阶数 n	RI
1	0
2	0
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.34
8	1.42
9	1.45

若 $CR < 0.1$ ，则判断矩阵通过一致性检验；若 $CR \geq 0.1$ ，则判断矩阵不合理，数据需要做适当调整。

为避免专家打分法的主观性太强,在此引入客观赋权方法——熵权法,根据指标数据的离散程度计算熵权,从而得到较为客观的权重。

1.2.2 熵权法计算指标客观权重值

(1) 构造原始矩阵。

15 位专家按照李克特量表“1-5”的分值进行打分,其中,5 分表示的是影响程度非常大,1 分则代表的是影响程度非常小,得到原始决策数据的决策矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times m}$ 。

(2) 对数据进行标准化处理。

$$B_{ij} = \frac{(f_{ij} - \min(f_j))}{(\max(f_j) - \min(f_j))} \quad (5)$$

转换后可得标准化矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times m}$, $\min(f_j)$ 为指标序列 f_j 最小值, $\max(f_j)$ 为指标序列 f_j 最大值。

(3) 求各指标权重。

1) 计算第 j 个指标下第 i 个专家的指标比重 P_{ij} :

$$P_{ij} = \frac{B_{ij}}{\sum_{i=1}^n B_{ij}} \quad (6)$$

式中: B_{ij} 为标准化矩阵。

2) 计算各项指标的熵值 H_i :

$$H_i = \frac{1}{-\ln(n)} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (7)$$

3) 确定各指标的熵权 W'_i :

$$W'_i = \frac{1 - H_i}{\sum (1 - H_i)} \quad (8)$$

确定指标权重的方法有主观赋权法和客观赋权法,但这两种赋权方法都不能既反映决策者的主观意见又反映客观事实。为了将主客观结合,在此使用博弈论组合赋权法得到装配式建筑的成本影响因素指标体系的最终权重值。

1.2.3 博弈论组合赋权

博弈论组合赋权可将层次分析法得到的主观权重和熵权法得到的客观权重进行线性组合,使各个方法得到的权重和最终的综合权重之间的偏差达到最小,综合权重的结果更科学合理,避免了两种赋权方法的弊端。具体过程如下:

(1) 根据矩阵微分性质,将对策模型变换为最优化一阶导数条件的线性方程组。

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \beta_1^T \\ \beta_2 \beta_2^T \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \beta_2^T \theta_1 \\ \beta_2 \beta_2^T \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \beta_1^T \\ \beta_2 \beta_2^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: β_1 为层次分析法计算出的权重值; β_2 为熵权

法计算出的权重值; θ_1 、 θ_2 为待求线性组合系数。

(2) 对 θ_1 、 θ_2 进行归一化处理。

$$\begin{aligned} \theta_1^* &= \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2}; \\ \theta_2^* &= \frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2} \end{aligned} \quad (10)$$

(3) 计算博弈论组合赋权的综合权重。

$$W = \theta_1 \times \beta_1^T + \theta_2 \times \beta_2^T \quad (11)$$

1.2.4 确定灰色加权关联度

(1) 确定比较对象和参考序列。设评价对象 m 个,评价指标有 n 个,参考数列为 $x_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$, 比较数列为 $x_i = \{x_i(k) | k=1, 2, \dots, n\}, i=1, 2, \dots, m$ 。

(2) 对包括参考数列和比较数列的原始数据进行无量纲化处理,设无量纲化后参考数列为 $x_0' = \{x_0'(k) | k=1, 2, \dots, n\}$, $x_i' = \{x_i'(k) | k=1, 2, \dots, n\}, i=1, 2, \dots, m$ 。

(3) 计算关联系数。

$$r(x_0'(k), x_i'(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (12)$$

其中 $\Delta_{0i}(k) = |x_0'(k) - x_i'(k)|$ 为绝对差, $\Delta_{\min} = \min_i \min_k \Delta_{0i}(k)$ 为两极最小差, $\Delta_{\max} = \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)$ 为两极最大差, $\rho \in (0, 1)$ 为分辨系数,一般取值为 0.5。

(4) 计算灰色加权关联度。

$$r(x_0', x_i') = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n w_k r(x_0(k), x_i(k)) \quad (13)$$

为 x_0' 对 x_i' 的灰色是关联度,其中 $w_k \in [0, 1]$ 为指标 k 的权重, $\sum_{k=1}^n w_k = 1$;

2 算例分析

选择四川省成都市某装配式建筑住宅楼为例,邀请 15 位参与装配式建筑项目建设的专家和技术人员进行两轮打分,第一轮用“1-9”标度法对因素的重要程度进行两两对比后打分,第二轮按照因素的影响后果进行打分,分值范围为 1~5 分。

2.1 层次分析法指标权重确定

邀请 15 位专家依据各自的经验为影响装配式建筑成本的因素的重要程度打分,并运用 AHP 法分析数据得到 AHP 指标权重计算结果和指标层 AHP 层次分析法 W_2 权重值,分别如表 3、4 所示。

表 3 AHP 指标权重计算结果

<i>A</i>	<i>A</i> ₁	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>A</i> ₄	<i>A</i> ₅	<i>A</i> ₆	<i>A</i> ₇	权重	
<i>A</i> ₁	1	2	4	2	3	4	3	0.302	<i>CI</i> = 0.072
<i>A</i> ₂	1/2	1	3	1	3	4	2	0.203	<i>RI</i> = 1.34
<i>A</i> ₃	1/4	1/3	1	1/2	1/2	1	1	0.070	<i>CR</i> = 0.054 < 0.1
<i>A</i> ₄	1/2	1	2	1	2	3	2	0.174	一致性检验通过
<i>A</i> ₅	1/3	1/3	2	1/2	1	2	2	0.108	
<i>A</i> ₆	1/4	1/4	1	1/3	1/2	1	1/2	0.057	
<i>A</i> ₇	1/3	1/2	1	1/2	1/2	2	1	0.085	
<i>A</i> ₁	<i>B</i> ₁	<i>B</i> ₂	<i>B</i> ₃	—	—	—	—	权重	<i>CI</i> = 0.005
<i>B</i> ₁	1	2	3	—	—	—	—	0.540	<i>RI</i> = 0.520
<i>B</i> ₂	1/2	1	2	—	—	—	—	0.297	<i>CR</i> = 0.009 < 0.1
<i>B</i> ₃	1/3	1/2	1	—	—	—	—	0.164	一致性检验通过
<i>A</i> ₂	<i>B</i> ₄	<i>B</i> ₅	<i>B</i> ₆	<i>B</i> ₇	—	—	—	权重	
<i>B</i> ₄	1	1/3	1	1/2	—	—	—	0.140	<i>CI</i> = 0.086
<i>B</i> ₅	3	1	1	1/3	—	—	—	0.219	<i>RI</i> = 0.890
<i>B</i> ₆	1	1	1	1/4	—	—	—	0.155	<i>CR</i> = 0.097 < 0.1
<i>B</i> ₇	2	3	4	1	—	—	—	0.485	一致性检验通过
<i>A</i> ₃	<i>B</i> ₈	<i>B</i> ₉	<i>B</i> ₁₀	<i>B</i> ₁₁	—	—	—	权重	
<i>B</i> ₈	1	1/2	1/2	3	—	—	—	0.193	<i>CI</i> = 0.001
<i>B</i> ₉	2	1	1	5	—	—	—	0.369	<i>RI</i> = 0.890
<i>B</i> ₁₀	2	1	1	5	—	—	—	0.369	<i>CR</i> = 0.002 < 0.1
<i>B</i> ₁₁	1/3	1/5	1/5	1	—	—	—	0.070	一致性检验通过
<i>A</i> ₄	<i>B</i> ₁₂	<i>B</i> ₁₃	<i>B</i> ₁₄	<i>B</i> ₁₅	<i>B</i> ₁₆	—	—	权重	
<i>B</i> ₁₂	1	2	1/5	1/2	1/5	—	—	0.084	<i>CI</i> = 0.084
<i>B</i> ₁₃	1/2	1	1/3	1/5	1/3	—	—	0.065	<i>RI</i> = 1.120
<i>B</i> ₁₄	5	3	1	3	1	—	—	0.343	<i>CR</i> = 0.075 < 0.1
<i>B</i> ₁₅	2	5	1/3	1	1/3	—	—	0.164	一致性检验通过
<i>B</i> ₁₆	5	3	1	3	1	—	—	0.343	
<i>A</i> ₅	<i>B</i> ₁₇	<i>B</i> ₁₈	<i>B</i> ₁₉	—	—	—	—	权重	
<i>B</i> ₁₇	1	3	2	—	—	—	—	0.540	<i>CI</i> = 0.005
<i>B</i> ₁₈	1/3	1	1/2	—	—	—	—	0.163	<i>RI</i> = 0.520
<i>B</i> ₁₉	1/2	2	1	—	—	—	—	0.297	<i>CR</i> = 0.009 < 0.1
									一致性检验通过
<i>A</i> ₆	<i>B</i> ₂₀	<i>B</i> ₂₁	<i>B</i> ₂₂	—	—	—	—	权重	
<i>B</i> ₂₀	1	1/3	1/2	—	—	—	—	0.163	<i>CI</i> = 0.005
<i>B</i> ₂₁	3	1	2	—	—	—	—	0.540	<i>RI</i> = 0.520
<i>B</i> ₂₂	2	1/2	1	—	—	—	—	0.297	<i>CR</i> = 0.009 < 0.1
									一致性检验通过
<i>A</i> ₇	<i>B</i> ₂₃	<i>B</i> ₂₄	<i>B</i> ₂₅	—	—	—	—	权重	
<i>B</i> ₂₃	1	1/2	1/3	—	—	—	—	0.164	<i>CI</i> = 0.005
<i>B</i> ₂₄	2	1	1/2	—	—	—	—	0.297	<i>RI</i> = 0.520
<i>B</i> ₂₅	3	2	1	—	—	—	—	0.540	<i>CR</i> = 0.009 < 0.1
									一致性检验通过

表 4 指标层 AHP 层次分析法 W_{2j} 权重值

指标	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
W_{2j}	0.163	0.090	0.049	0.029	0.045	0.032	0.099	0.014	0.026	0.026
指标	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	B_{18}	B_{19}	B_{20}
W_{2j}	0.005	0.015	0.011	0.060	0.028	0.060	0.059	0.018	0.032	0.010
指标	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}	B_{25}	—	—	—	—	—
W_{2j}	0.031	0.017	0.014	0.025	0.046	—	—	—	—	—

2.2 熵权法确定权重

15 位专家按照李克特量表“1-5”的分值对影响装配式建筑成本的因素进行打分，1 分表示影响程度非常小，5 分表示影响程度非常大，打分结果汇总后得到装配式建筑成本影响程度指标评价数据如表 5 所示。

根据表 5 数据及公式(5)、(6)、(7)、(8)，可计算出装配式建筑成本的各影响因素的熵值和熵权，如表 6 所示。

2.3 博弈论组合赋权法

影响装配式建筑成本因素的综合权重由式(9)、(10)、(11)计算得到，结果如表 7 所示。

表 5 装配式建筑成本影响程度指标评价数据

编号	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	B_{18}	B_{19}	B_{20}	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}
1	3	5	5	4	2	4	5	3	4	3	2	4	5	5	5	5	5	3	3	2	4	4	3	5
2	5	4	5	4	3	5	4	5	3	3	3	4	4	5	4	4	4	3	4	4	4	4	5	4
3	3	5	5	4	3	4	4	3	3	3	3	3	5	4	4	5	5	5	5	3	5	5	3	3
4	3	5	5	5	5	4	5	5	4	5	3	5	4	5	5	4	5	4	5	3	4	5	5	4
5	5	5	5	5	3	3	5	5	2	3	2	3	5	3	4	5	4	2	3	3	5	3	5	3
6	4	4	5	4	4	5	3	4	3	4	4	4	4	4	5	4	3	4	4	4	4	4	4	5
7	5	4	5	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	5	5	3	4	2	5	3	4	3
8	4	4	4	4	4	4	4	4	5	3	3	4	4	4	5	4	5	4	4	4	5	4	4	3
9	5	5	4	3	4	5	5	3	3	3	3	4	3	4	4	5	4	3	4	4	3	4	4	4
10	4	5	5	5	5	4	4	4	3	3	2	5	4	5	4	4	3	4	5	3	4	4	3	2
11	3	5	4	4	4	4	3	4	3	5	4	4	4	3	3	4	4	3	4	3	3	4	4	4
12	3	5	5	5	4	3	5	4	3	3	4	5	4	4	4	4	3	3	4	4	5	3	4	3
13	4	5	4	5	4	4	3	3	2	2	2	4	5	4	4	4	5	3	3	3	4	4	5	3
14	4	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	5	3	5	3	3	4	2	3	4	4	4
15	5	5	5	5	3	5	2	4	3	2	3	4	3	4	4	5	3	3	3	4	5	5	3	2

表 6 各因素的熵值和熵权

因素	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
熵值	0.798	0.850	0.850	0.889	0.920	0.896	0.863	0.865	0.915	0.904
熵权	0.069	0.051	0.051	0.038	0.028	0.036	0.047	0.046	0.029	0.033
因素	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	B_{18}	B_{19}	B_{20}
熵值	0.915	0.928	0.926	0.925	0.926	0.719	0.832	0.909	0.865	0.893
熵权	0.029	0.025	0.025	0.026	0.025	0.097	0.058	0.031	0.046	0.037
因素	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}	B_{25}	—	—	—	—	—
熵值	0.897	0.898	0.863	0.914	0.925	—	—	—	—	—
熵权	0.035	0.035	0.047	0.029	0.026	—	—	—	—	—

表 7 AHP – 熵权法综合权重

因素	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
权重	0.170	0.092	0.049	0.028	0.046	0.031	0.102	0.011	0.026	0.025
因素	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	B_{18}	B_{19}	B_{20}
权重	0.003	0.014	0.010	0.062	0.029	0.057	0.059	0.017	0.031	0.008
因素	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}	B_{25}	—	—	—	—	—
权重	0.031	0.016	0.012	0.025	0.048	—	—	—	—	—

2.4 灰色加权关联度计算

由公式(12)，(13)计算出各影响因素的灰色加权关联度为 (0.170 0.066 0.035 0.018 0.027 0.023 0.064 0.009 0.017 0.017 0.002 0.010 0.007 0.040 0.018 0.038 0.038 0.012 0.023 0.005 0.022 0.011 0.010 0.015 0.033)。

由结果可得到排序： $r_{01} > r_{02} > r_{07} > r_{014} > r_{016} > r_{017} > r_{03} > r_{025} > r_{05} > r_{06} > r_{019} > r_{021} > r_{015} > r_{04} > r_{010} > r_{09} > r_{024} > r_{018} > r_{022} > r_{012} > r_{023} > r_{08} > r_{013} > r_{020} > r_{011}$ 。

由灰色关联法计算每项指标的关联系数后，根据表 7 中的指标综合权重，即可得到装配式建筑各影响因素的灰色加权关联度，进而可知对应各影响因素的重要程度排名前 5 位的分别为：装配率和预制率 0.170、设计的标准化程度 0.066、模具的周转次数和机械设备的利用率 0.065、施工人员水平 0.040、工程签证 0.038、计划性管理维护 0.038。

3 装配式建筑成本控制对策及建议

(1) 设置合理的装配率和预制率。过高或过低的装配率和预制率都不利于成本的把控。企业在设计阶段不应一味地增加装配率或者只是满足国家规定的最低预制率，要使它们在合理范围内且应综合考虑项目需求设置最优值。

(2) 提高设计的标准化程度。标准化的设计理念是降低成本的有效方式之一。在设计户型时力求方正与统一，对不同类型的构件进行合理拆分，加大通用部件的生产规模，减少异形模具的使用种类。提高设计的标准化程度可使设计生产效率提升、减少模板摊销费和材料费、降低施工难度。

(3) 增加模具的周转次数和机械设备的利用

率。可以采用工厂标准化生产，减少模具的种类并使模具的形式简单化，实现常规构件的量产来提高模具的周转次数以降低模具摊销费用。机械设备的利用率可通过提高生产企业的管理能力来增加，流水线生产的方式可减少因操作不当带来的成本损失。

(4) 提高施工人员水平。装配式建筑施工安装精度要求更高、技术更复杂，施工单位应重视对施工人员的培养，不断提高施工人员的专业水平。避免操作失误或后期返工造成不必要的成本浪费。

(5) 减少工程签证的发生。减少工程签证发生的最有效方法是降低合同风险带来的影响。在合同签订之前，就要进行细化谈判，对隐藏的风险进行识别并制定对策，有利于对成本的把控并降低无效成本。

(6) 提前制定管理维护计划。装配式建筑由于使用了新材料或新技术，导致后期的管理维护费比现浇建筑要高得多。不同部品使用寿命不同，计划性的管理维护可提高建筑的耐久性，有利于材料的回收和重复利用，在有效控制成本的同时满足建筑绿色发展需求。

4 结 论

文章从全生命周期的角度对影响装配式建筑成本的因素进行识别，通过文献研究法和专家访谈法最终确定 25 个影响因素，建立了装配式建筑全生命周期成本影响因素指标体系，采用主客观权重相结合的博弈论组合赋权法和灰色关联度分析法相结合的评估方法，得到影响因素最高的成本因素指标并提出针对性的建议。结果表明，文中采用的方法可充分发挥各赋权方法的优势，对装配式建筑全生命周期成本的影响因素进行真实

客观评价。装配率和预制率、设计的标准化程度、模具的周转次数和机械设备的利用率、施工人员水平、工程签证和计划性管理维护这 6 个因素是影响装配式建筑成本的最关键因素,在实际工程中应加强对这 6 个关键因素的控制,进而促进装配式建筑的高质量发展。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部等部门关于加快新型建筑工业化发展的若干意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-09/04/content_5540357.htm, 2020-08-28.
- [2] 吴梦茹. 基于 AHP 的装配式建筑经济效益分析[D]. 吉林: 长春工程学院, 2020.
- [3] 马明兴. 装配式住宅成本影响因素分析与控制对策

研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2021.

- [4] 张艺媛, 钟春玲. 装配式建筑增量成本影响因素研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2022, 39(1): 61-66.
- [5] 田侑林. 全生命周期下装配式建筑与现浇建筑成本对比分析[J]. 四川建筑, 2020, 40(1): 290-291; 293.
- [6] 章国美. 装配式建筑全生命周期成本分析[J]. 项目管理技术, 2021, 19(8): 44-48.
- [7] 唐根丽, 王青筠, 张恒. 基于全生命周期的装配式建筑与传统现浇建筑的成本对比分析[J]. 武汉轻工大学学报, 2020, 39(3): 87-94.
- [8] 杨亚楠. 基于 BIM 技术的装配式建筑全生命周期成本控制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [9] 彭军龙, 周静. 基于 FISM-ANP 的装配式建筑成本影响因素分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 57-65; 98.

(上接第 11 页)

4.2 展望

结合 BIM 优势特征开发轻量化技术, 同时充分借助物联网技术、大数据技术等新技术进行研究与开发。重视 BIM 轻量化技术在运维管理阶段的运用, 进而推广到建筑全生命周期中的应用。通过更具针对性研发, BIM 轻量化技术惠及铁路、桥梁、道路等各个领域。未来, 数字时代必将引领建筑行业新发展。利用传感器技术收集建筑物相关数据, 采用数据融合等技术对海量数据进行处理, 人工智能与建筑产业深度融合, BIM 轻量化技术在这些新技术的协同应用下, 势必将建筑产业向信息化、数字化转型发展推向新的高度。

参考文献:

- [1] 陈良, 杨建林. BIM 技术在施工质量控制中的应用研究[J]. 工程建设, 2018, 50(8): 58-62.
- [2] 钟诚. BIM 在建设项目实施阶段的轻量化应用探析[J]. 工程造价管理, 2020(5): 85-89.
- [3] 李大平, 田华, 肖子沐. 基于 WebGL 的 BIM 轻量化解决方案[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(17): 21-26.
- [4] 权一梦, 陈强, 段龙奇, 等. 基于 BIM 技术的地铁基坑施工监测可视化管理系统研究与应用[J/OL]. 水力发电, 2023 [2023-12-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20231200.1527.002.html>.

- [5] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2011-2015 年建筑业信息化发展纲要[EB/OL]. (2015 年 5 月 10 日) [2023 年 9 月 15 日]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201105/20110518_203420.html.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于推进建筑信息模型应用的指导意见[EB/OL]. (2015-06-16) [2023-09-15]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201507/20150701_222741.html.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2016-2020 年建筑业信息化发展纲要[EB/OL]. (2016-08-23) [2023-09-15]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201609/20160919_228929.html.
- [9] 中华人民共和国中央人民政府. 城乡建设领域碳达峰实施方案[EB/OL]. (2022-06-30) [2023-09-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content_5700752.htm.
- [10] 孙玉梅, 曹思琪, 唐丽萍, 等. BIM 技术在实验研发中心楼运维管理阶段应用的研究[J]. 科技和产业, 2021, 21(5): 289-295.
- [11] 孙继清. 物联网技术在高层建筑消防监督管理中的应用研究[J]. 工程建设与设计, 2023, (17): 87-89.
- [12] 吴兴元. 智慧工地建设在平度某项目的应用分析[J]. 安徽建筑, 2024, 31(1): 86-88.