

基于DEMATEL-ISM的装配式建筑项目成本风险管理研究

程子聪

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年8月5日; 录用日期: 2024年8月29日; 发布日期: 2024年9月5日

摘要

本文研究了基于DEMATEL-ISM模型的装配式建筑项目成本风险管理。随着城市化进程的加快, 装配式建筑作为高效、环保的新型建筑方式逐渐受到关注, 但其高成本成为市场推广的主要障碍。文章首先分析了装配式建筑成本的构成及主要风险因素, 包括设计、生产、运输、施工及运营维护等阶段。通过物理-事理-人理(WSR)系统方法, 识别并构建了装配式建筑成本风险因素指标体系。随后, 采用DEMATEL-ISM模型, 建立了直接影响矩阵, 评估各因素间的相互影响关系, 并邀请专家进行打分, 以确定关键影响因素。研究表明, 该方法能有效识别装配式建筑成本风险的关键环节, 为项目管理者提供决策支持, 降低项目成本风险。

关键词

装配式建筑, 成本风险管理, DEMATEL-ISM, WSR系统方法

Research on Cost Risk Management of Prefabricated Construction Projects Based on DEMATEL-ISM

Zicong Cheng

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 5th, 2024; accepted: Aug. 29th, 2024; published: Sep. 5th, 2024

Abstract

This paper investigates the cost risk management of prefabricated construction projects based on the DEMATEL-ISM model. With the acceleration of urbanization, prefabricated construction, as an

efficient and environmentally friendly new construction method, has gradually attracted attention. However, its high cost has become a major obstacle to market promotion. The article first analyzes the composition and main risk factors of prefabricated construction costs, including design, production, transportation, construction, and operation and maintenance phases. Using the Wuli-Shili-Renli (WSR) system methodology, a cost risk factor indicator system for prefabricated construction is identified and constructed. Subsequently, the DEMATEL-ISM model is employed to establish a direct impact matrix, assessing the mutual influence relationships among various factors. Experts are invited to score the factors to determine the key influencing factors. The research results show that this method can effectively identify the critical links in prefabricated construction cost risks, providing decision support for project managers to reduce project cost risks.

Keywords

Prefabricated Construction, Cost Risk Management, DEMATEL-ISM, Wuli-Shili-Renli (WSR) System Methodology

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加速推进，建筑业作为国民经济的重要支柱，正面临着前所未有的发展机遇与挑战。在这个宏观背景下，传统的现浇式混凝土建筑已难以满足现代社会对于高效率、环保和可持续发展的需求。因此，装配式建筑作为一种新型的建筑方式，逐渐受到业界的广泛关注。

近年来，学者们从不同的角度和不同的层面对装配式建筑的成本进行了讨论和研究。从装配式建筑的不同阶段，杨玉胜通过构件风险分析模型分析了装配式建筑设计阶段的成本风险因素，发现构件设计标准化程度、统一的行业标准和规范等是装配式建筑设计阶段成本的关键影响因素[1]。Chang, C.G.探讨了运输阶段的成本风险因素，构建了运输装载方案的优化模型，指出运输效率是影响运输阶段成本的关键因素[2]。

高成本是世界范围内装配式建筑中普遍存在的问题。一般来说，当预制率越高时，成本就会越高。Hong, J.K.探讨了预制率与装配式建筑成本之间的关系，发现预制率与成本几乎呈线性关系[3]。

本研究旨在对装配式建筑的成本风险进行全面评估，并帮助建筑承包商管理和控制成本。同时，引入了适当的数学模型来处理问题，并阐明了全生命周期装配式建筑成本风险因素之间的相互关系。

2. 成本风险因素识别

装配式建筑成本是指在项目实施过程中发生的所有费用，如：预制构件设计费、生产费、运输费、装卸费、吊装费、后续运营维护费等。一般而言，项目实施阶段的成本包括预制构件设计费、生产费、运输施工费、运营维护费。根据成本构成的特点，实施阶段可分为设计、生产、运输、施工，以及预制构件的运行和维护。主要讨论了成本风险在预制构件的生产、运输和施工中的演化作用。成本经历不断的动态变化，各种因素交织、复杂多样。物理-事理-人理(WSR)系统方法是中国学者提出的解决复杂问题的重要工具[4]。因此，从系统科学的角度来看，WSR方法符合装配式建筑成本风险因素的多角度、多层次、多维度的特征。

WSR方法学的具体步骤是

- (1) 根据 WSR 理论, 根据物理 - 事理 - 人理理论对因素进行分类, 得到初始影响因素。
- (2) 根据相关文献中对成本风险指标的分析 and 预制建筑的特点, 本研究在施工现场实际调查的基础上并结合德尔菲法总结了成本风险因素, 形成了装配式建筑的成本风险因素指标体系[5]-[7]。详见表 1。

Table 1. Cost risk factor indicator system
表 1. 成本风险因素指标体系

设计阶段	物理	国家建设标准	W1
	事理	过度追求装配率	S1
		构件拆分设计不合理	S2
		设计师专业素质低	R1
	人理	设计变更	R2
生产、运输、施工阶段	物理	预制构件的混凝土强度不足	W2
		建筑材料供应延误	W3
		混凝土开裂	W4
		对预制构件工厂的精益管理不足	S3
	事理	预制构件尺寸偏差较大	S4
		预计构件的堆放和运输保护不当	S5
		施工现场管理水平较低	S6
		工期较长	S7
		施工和安装人员技术水平较低	R3
		人理	
完工维护阶段	物理	装配式建筑性能稳定性差	W5
	事理	装配式建筑未达到预期运行性能	S8
	人理	物业公司缺乏合理、科学的维护	R4

3. DEMATEL-ISM 模型构建

3.1. 建立直接影响矩阵

本文采用了 DEMATEL-ISM 模型, 通过对数据进行处理并应用模型进行分析, 得出了不同因素的层次和权重, 进而识别出关键影响因素。

模型构建的第一步是建立直接影响矩阵。这一步骤涉及到对第三章筛选出的 17 个影响因素进行评分, 以评估这些因素之间的相互影响关系。具体来说, 我们需评定每两个因素间的影响力度, 构建一个 17×17 的初始矩阵 A 。在这个矩阵中, 比较 x_i 对 x_j 的影响, 自身没有影响, 对角线为 0。为了进行这种评级, 邀请建筑领域内的专家、经验丰富的建筑从业人员、政府执法人员、高校教授等对各因素之间的作用关系打分, 采用四层次的量级系统, 包括: 0 分(无影响)、1 分(较小影响)、2 分(一般影响)和 3 分(较大影响)。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & 0 & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

本次调查邀请了 8 位具备装配式建筑工程建设相关知识的专家和经验丰富的从业人员组成专家小组。向专家们发放电子问卷并回收汇总后, 将八位专家对 x_{ij} 打分取平均值, 采用四舍五入的方法取整, 得到直接影响矩阵 A 。如表 2 所示。

Table 2. Direct impact matrix **A**
表 2. 直接影响矩阵 **A**

	W1	S1	S2	R1	R2	W2	W3	W4	S3	S4	S5	S6	S7	R3	W5	S8	R4
W1	0	2	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
S1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	1	0
R2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
W2	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	2	1	0
W3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
W4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0
S3	0	0	1	0	0	2	1	2	0	2	0	0	0	1	1	1	0
S4	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
S7	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	1	0	1	1	0
W5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.2. 建立综合影响矩阵

第二步是将直接影响矩阵规范化得到规范影响矩阵。本文采用行最大值法。将矩阵 **A** 的每一行求和，取其中的最大值，将矩阵 **A** 中所有元素除以最大值，得到规范影响矩阵 **B**。

$$B = \frac{x_{ij}}{\max\left(\sum_{j=1}^n x_{ij}\right)} \quad (2)$$

再由规范影响矩阵求得综合影响矩阵。综合系统矩阵体现系统中各个元素间的影响的综合效应。

$$T = (B + B^2 + \dots + B^k) = \sum_{k=1}^{\infty} B^k = B(I - B)^{-1} \quad (3)$$

式中 **I** 为单位矩阵。

3.3. 计算各个要素的影响度、被影响度、中心度、原因度和权重

第三步为根据计算出的综合影响矩阵 **T**，计算各个要素的影响度、被影响度、中心度、原因度和权重。影响度指矩阵 **T** 中各行之和，表示各行要素对其他所有要素的综合影响值，记作 D_i 。

$$D_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

被影响度指矩阵 **T** 中各列之和，表示各列要素对其他所有要素的综合影响值，记作 C_i 。

$$C_i = \sum_{j=1}^n x_{ji}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

中心度表示因素在评价体系中的位置及其所起作用的大小，某要素的中心度为其影响度与被影响度之和，记作 M_i 。

$$M_i = D_i + C_i \quad (6)$$

原因度由某要素的影响度和被影响度相减得到，记作 R_i 。

$$R_i = D_i - C_i \tag{7}$$

将中心度进行归一化处理，即可得到指标的权重。结果见表 3。

Table 3. Analysis of risk factors using DEMATEL
表 3. 风险因素 DEMATEL 结果分析

因素	影响度	被影响度	中心度	原因度	权重	排序	因素属性
W1	1.153	0	1.153	1.153	0.054	9	原因因素
S1	0.267	0.553	0.82	-0.286	0.038	14	结果因素
S2	0.27	0.732	1.002	-0.462	0.047	11	结果因素
R1	0.939	0	0.939	0.939	0.044	12	原因因素
R2	0.67	2.087	2.757	-1.417	0.129	1	结果因素
W2	1.061	0.719	1.78	0.342	0.083	3	原因因素
W3	0.252	0.351	0.603	-0.099	0.028	15	结果因素
W4	0.474	0.999	1.473	-0.525	0.069	7	结果因素
S3	1.563	0.413	1.976	1.15	0.092	2	原因因素
S4	0.304	0.801	1.105	-0.497	0.052	10	结果因素
S5	0.353	0.221	0.574	0.132	0.027	16	原因因素
S6	0.593	0.308	0.901	0.285	0.042	13	原因因素
S7	0.385	1.111	1.496	-0.726	0.07	6	结果因素
R3	1.39	0.128	1.518	1.262	0.071	5	原因因素
W5	0.304	1.299	1.603	-0.995	0.075	4	结果因素
S8	0.304	0.961	1.265	-0.657	0.059	8	结果因素
R4	0.402	0	0.402	0.402	0.019	17	原因因素

根据表 3 分析的结果，绘制出风险因素因果图，其中 x 轴表示中心度，y 轴表示原因度。在这张图中，原因因素位于坐标轴上方，这些因素直接影响装配式建筑项目的成本风险；而结果因素则位于坐标轴下方，这些因素受到了原因因素的影响，间接地影响成本风险的发生。中心度数值越大的因素，其重要程度也就越大。如图 1 所示。

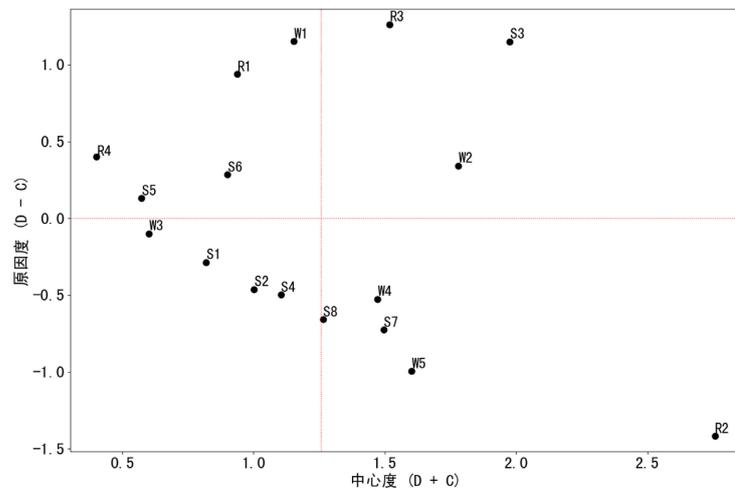


Figure 1. Causality scatter plot of risk factors
图 1. 风险因素因果散点图

3.4. 建立可达矩阵

计算可达矩阵。整体影响矩阵 $H = T + I$ ， T 为综合影响矩阵， I 为单位矩阵。在矩阵 H 中令小于阈值 λ 的数为 0，其他为 1，得到可达矩阵 F 。如表 4 所示。

$$h_{ij} = \begin{cases} 1 & h_{ij} \geq \lambda(i, j=1, 2, \dots, n) \\ 0 & h_{ij} < \lambda(i, j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

本文使用综合影响矩阵的均值加上标准差作为的 λ 值，以此来增强其客观度与可信程度。

Table 4. Reachability matrix F

表 4. 可达矩阵 F

	W1	S1	S2	R1	R2	W2	W3	W4	S3	S4	S5	S6	S7	R3	W5	S8	R4
W1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
S1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
R2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
W2	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
W3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
W4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
S3	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
S4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
S7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
W5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
S8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

3.5. 影响因素划分层级结构

首先将影响因素标号， a_1 为 W1， a_2 为 S1， a_3 为 S2， a_4 为 R1， a_5 为 R2， a_6 为 W2， a_7 为 W3， a_8 为 W4， a_9 为 S3， a_{10} 为 S4， a_{11} 为 S5， a_{12} 为 S6， a_{13} 为 S7， a_{14} 为 R3， a_{15} 为 W5， a_{16} 为 S8， a_{17} 为 R4。

再次计算可达集、前因集和交集。

可达集 $R_i = \{f_j | F_{ij} = 1\}$ 。每行中值为 1 的列对应的因素，表明该因素出发可以到达的所有因素集合。

前因集 $S_i = \{f_j | F_{ji} = 1\}$ 。每列中值为 1 的行对应的因素，表明可以到达该因素的所有因素集合。

然后计算交集 $R_i \cap S_i$ 。

当某个因素 a_i 满足其 $R(a_i) = R(a_i) \cap S(a_i)$ 时，表明 a_i 为最高层级的因素。删除可达矩阵 F 里因素 a_i 对应的行和列，重新计算可达集、前因集和交集，继续按此方法找下一层，直到所有因素划分完毕，形成最终的因素分层。层级划分详细过程如下。

Table 5. Division of the first-level elements

表 5. 第一层要素划分

a_i	可达集 $R(a_i)$	前因集 $S(a_i)$	$R_i \cap S_i$
1	1,2,5,6,13,15	1	1
2	2,5	1,2	2

续表

3	3,5	3,4,5,9	3,5
4	3,4,5,10,15	4	4
5	3,5,13	1,2,3,4,5,6,9,10,13,14,15,16	3,5,13
6	5,6,8,15,16	1,6,9	6
7	7,13	7,11	7
8	8,15,16	6,8,9,17	8
9	3,5,6,8,9,10,15,16	9,14	9
10	5,10	4,9,10,14	10
11	7,11,13	11,14	11
12	12,15,16	12,14	12
13	5,13	1,5,7,11,13,14	5,13
14	5,9,10,11,12,13,14,15,16	14	14
15	5,15	1,4,6,8,9,12,14,15	15
16	5,16	6,8,9,12,14,16	16
17	8,17	17	17

通过表 5 得到第一层要素， $L_1 = [3、5、13]$ 。将 $a_3、a_5、a_{13}$ 所在的行和列中的要素划去，根据原则再次划分，进而得到第二层要素。重复以上步骤得到二到六层要素， $L_2 = [2、7、10、15、16]$ ， $L_3 = [4、8、11、12]$ ， $L_4 = [6、17]$ ， $L_5 = [1、9]$ ， $L_6 = [14]$ 。最终将系统模型划分为六个层级 $L = \{L_1、L_2、L_3、L_4、L_5、L_6\}$ 。

3.6. 建立多层递阶结构模型

根据影响因素划分层级结构的结果，可以构建多层递阶结构模型。将 17 个装配式建筑项目成本风险因素自上而下划分为 6 层，最终得到装配式建筑项目成本风险因素的多层递阶结构模型如图 2 所示。

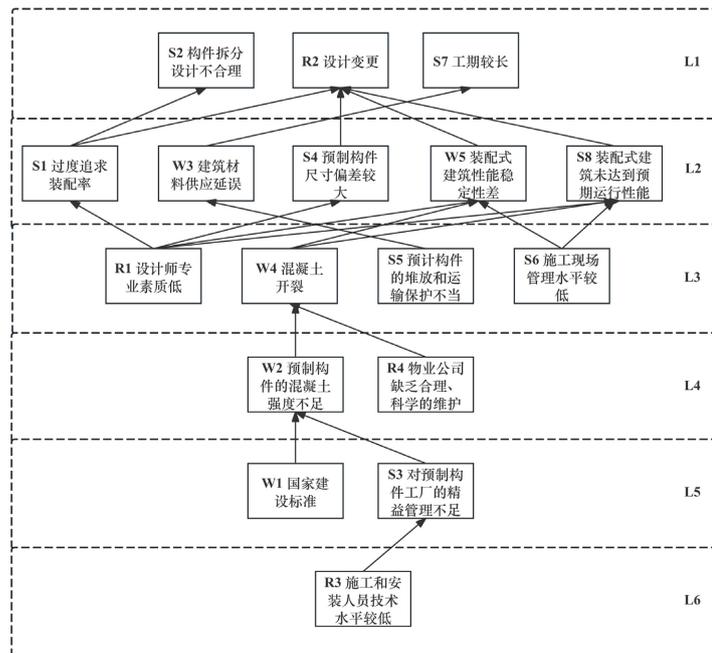


Figure 2. Multi-level hierarchical structure model
图 2. 多层递阶结构模型

4. 决策实验和评价实验模型分析及对策建议

根据分析,管理和维护因素显著影响装配式建筑成本风险。关键技术因素包括设计师和施工人员的技术能力、混凝土强度等。优先关注这些关键因素,如提升设计师素质、优化预制构件的生产和物流管理、提高现场管理水平,是降低成本风险的关键。

设计变更、建筑性能稳定性和工期等因素反映项目管理和执行效果。这些因素受设计合理性、施工质量、材料质量和供应等影响。通过优化设计、提高施工质量和确保材料供应,可减少这些结果因素的负面影响,从而降低项目成本风险。

5. 结语

装配式建筑成本风险管理研究是建筑行业转型升级的必然趋势,也是推动住宅产业化可持续发展的关键路径。通过建立 DEMATEL-ISM 模型对这些因素进行分析,本文揭示了它们之间的层次关系和中心度排序,这有助于项目管理者优先关注并干预那些具有最高影响力的因素。例如,通过优化设计、提高施工质量、保证材料供应的管理和维护策略,减轻或消除这些因素带来的不利影响,从而全面提升工程项目的经济价值与市场竞争力。

参考文献

- [1] 杨玉胜,王紫武. 基于模糊 DEMATEL-ISM 装配式建筑设计阶段成本影响因素研究[J]. 工程管理学报, 2023(6): 132-137.
- [2] Chang, C.G., Wu, F.F. and Liu, D. (2016) Optimization Model of Load and Transportation for Prefabricated Construction Components. *Proceedings of the International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD)*, Shenzhen, 16-17 April 2016, 1145-1148. <https://doi.org/10.2991/ifeesd-16.2016.207>
- [3] HONG, J.K., SHEN, G.Q.P., LI, Z.D., *et al.* (2018) Barriers to Promoting Prefabricated Construction in China: A Cost-Benefit Analysis. *Journal of Cleaner Production*, **172**, 649-660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.171>
- [4] 顾基发,唐锡晋,朱正祥. 物理-事理-人理系统方法论综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007(6): 51-60.
- [5] 柯燕燕,朱小珍,彭东勤,等. 全寿命周期视角下装配式建筑项目增量成本与增量收益研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(12): 41-46.
- [6] Peng, J.L., Zhou, J., Meng, F.Y., *et al.* (2021) Analysis on the Hidden Cost of Prefabricated Buildings Based on FISM-BN. *PLOS ONE*, **16**, 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252138>
- [7] 李颢,陈晓红,高玉洁. 装配式建筑成本控制难点与对策研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 109-111.