

浅谈装配式建筑项目管理中预制构件供应链协同影响因素的评价体系

韦海东¹ 戴兴伟²

泰国格乐大学, 泰国曼谷, 10220;

摘要: 在国家“双碳”战略推动下, 装配式建筑成本控制成为实现建筑业绿色转型的关键环节。本研究基于《“十四五”建筑业发展规划》^[1]和 GB/T 51129-2017《装配式建筑评价标准》^[2], 针对装配式建筑项目成本超支问题, 构建了四阶段成本控制评价体系。通过 Delphi-AHP 专家评价法确定前期阶段关键要素指标权重: 决策与设计 (0.46)、构件生产 (0.29)、构件运输 (0.07)、施工安装 (0.17)。后期阶段综合权重研究发现: 1) 数字化设计集成度 (0.23) 后期最高权重, 表明设计-生产-施工的数据协同是降本增效关键; 2) 构件质量 (0.12) 权重相对较低, 但质量问题可能导致施工延误; 3) 运输准时率 (0.03) 权重最低, 但准时率低可能引发施工链式延误; 4) 施工安全管理 (0.07) 反映安全风险对装配式高空作业的特殊影响。创新性地将全生命周期成本理论与模糊综合评价相结合, 运用 MATLAB 运算程式并在指标层面确定综合权重评价指标, 为装配式建筑评价指标提供新思路, 研究成果为行业落实供应链协同要素提供量化依据。

关键词: 装配式建筑; 项目管理; 影响因素; 专家评价法; 指标体系

An Exploratory Analysis of the Assessment Framework for Coordinative Determinants in Prefabricated Component Supply Chains within Modular Construction Project Management

WEI HAIDONG¹, DAI XINGWEI²
Kirk University, Thailand Bangkok, 10220;

Abstract: Under the impetus of China's "Dual Carbon" strategy, cost control in prefabricated construction has become a critical component in achieving the green transformation of the construction industry. This study, grounded in the 14th Five-Year Plan for the Construction Industry and the national standard GB/T 51129-2017 Assessment Standard for Prefabricated Buildings, addresses the issue of cost overruns in prefabricated construction projects by establishing a four-phase cost control evaluation system.

Through the Delphi-Analytic Hierarchy Process (Delphi-AHP) method, the key factor weights in the preliminary phase were determined as follows: decision-making and design (0.46), component manufacturing (0.29), component transportation (0.07), and on-site assembly (0.17). The comprehensive weight analysis in the post-construction phase revealed that: (1) Digital design integration (0.23) exhibited the highest weight, indicating that data synergy across design-production-construction is crucial for cost reduction and efficiency enhancement; (2) Component quality (0.12) showed relatively lower weighting, yet quality issues may lead to construction delays; (3) Transportation punctuality rate (0.03) demonstrated the lowest weight, though delays could trigger cascading schedule disruptions; (4) Construction safety management (0.07) reflected the particular impact of safety risks on elevated prefabrication operations.

Innovatively integrating life-cycle cost theory with fuzzy comprehensive evaluation, this research employed MATLAB computational algorithms to determine comprehensive weighting evaluation metrics at the indicator level. The study provides a novel methodological framework for assessing prefabricated building performance indicators and delivers quantitative evidence for implementing supply chain coordination elements in the industry.

Keywords: prefabricated construction; project management; influencing factors; expert evaluation method; indicator system

DOI: 10.69979/3029-2727.25.05.042

引言

随着绿色建筑理念的深入和可持续发展要求的提高, 传统现浇施工模式已难以满足现代建筑业的需求。装配式建筑凭借施工周期短、环境污染小、资源利用率高等优势, 成为建筑行业转型升级的重要方向。近年来, 国家大力推动装配式建筑发展, 出台政策《关于促进建筑业持续健康发展的意见》(国办发〔2017〕19号)主

要提出到 2027 年装配式建筑占比达 30% 的目标, 要求完善标准体系、推广 EPC 模式、强化绿色低碳和供应链协同^[3]。因此, 研究预制构件供应链协同的影响因素, 旨在通过标准化、工业化、信息化手段提升建筑产业现代化水平, 对优化装配式建筑项目管理具有重要意义。

1 装配式建筑概念与特性

装配式建筑成本控制是指通过工业化管理手段,对预制构件设计、生产、运输、安装全过程的成本要素进行系统化管控。

基于中国建筑标准设计研究院《装配式建筑成本分析报告》(2022)和住建部《装配式建筑评价标准》等结合最新行业调研、具体项目参数数据,其表明了60-70%成本在预制阶段即已确定。供应链协同要素上主要特征包括高度集成性、强时效性、质量可追溯性、动态调整能力和成本敏感性。

与传统现浇建筑相比,其成本结构呈现前端集中特征,发展趋势呈现数字化、精益化和价值化特征,推动建筑业向制造业级精细化管理转型。这种模式通过系统化规划、监控和优化,实现成本与品质的协同提升。

2 影响因素评价指标体系构建

2.1 影响因素评价指标选择研究综述

文章系统梳理国内外相关装配式建筑研究成果,对装配式建筑的核心环节对要素的评价指标选择进行综述,旨在为构建科学合理的评价体系提供理论依据。

何芳,张润峰,王依婷等研究文献聚焦于装配式建筑成本影响因素,从装配式建筑项目管理的多个环节出发,运用专家打分法确定了设计阶段、生产阶段、运输阶段和施工阶段等不同阶段各类成本影响因素的权重,这有助于项目管理者明确在成本控制中应重点关注的因素,为装配式建筑项目成本控制提供了有效的量化依据^[4]。

陈勇,周亮,黄莎等文献从全寿命周期理论出发,深入研究装配式建筑成本控制,构建了包含规划设计、构件生产、施工安装、运营维护和拆除回收阶段的成本控制指标体系,运用AHP法确定各指标权重,利用MATLAB软件进行计算,提高了权重计算的准确性和效率,通过综合评价法对装配式建筑全寿命周期成本进行分析,为项目管理者在不同阶段采取成本控制措施提供了科学依据,有助于降低装配式建筑全寿命周期成本^[5]。

表1 装配式建筑供应链协同要素评价指标表

目标层	准则层	指标层	具体说明
装配式建筑供应链协同要素评价体系	决策与设计 A	标准化设计程度 A1	衡量设计方案的标准化和模块化水平
		设计协同效率 A2	评估各专业设计团队间的协作效率和信息共享程度
		数字化设计集成度 A3	评估数字技术在设计过程中的应用水平及各系统的集成程度
		前期方案优化 A4	衡量设计阶段优化方案的能力和效果
	构件生产 B	生产自动化 B1	评估构件生产过程中自动化设备的应用程度
		构件质量 B2	测量生产的构件质量达标情况
		生产计划执行 B3	衡量生产计划的执行准确性和及时性
		资源利用效率 B4	评估生产过程中材料、能源和人力资源的利用效率
	构件运输 C	物流信息化 C1	衡量运输环节信息系统的应用程度
		运输准时率 C2	评估构件按计划时间到达工地的准确率

2.2 指标选取原则

在装配式建筑项目管理中,针对预制构件供应链协同影响因素4个维度16个方面的评价体系,指标选取需遵循以下主要原则:

(1) 系统性原则。涵盖决策与设计、生产、运输、施工的各阶段,避免局部优化导致整体失衡并用MATLAB构建“目标层-准则层-指标层”的递阶结构。

(2) 成本控制导向原则。聚焦对总成本影响显著的指标并通过专家法或实证研究筛选高敏感度指标。

(3) 行业特殊性原则。突出预制构件独有指标并纳入符合“双碳”目标的指标。

(4) 可操作性原则。优先选择行业通用或企业可采集的指标和避免因数据采集成本过高导致评价体系失效。

2.3 指标选取

文章以4个维度研究对象着重探讨和16个方面提取因素进行重点分析,充分构建评价指标体系。文章数据全程使用MATLAB进行计算,所选取指标在多阶段产生细微偏差可忽略不计。

(1) 决策与设计阶段。该阶段重点关注“标准化设计程度、设计协同效率、数字化设计集成度、前期方案优化”。

(2) 构件生产阶段。该阶段重点关注“生产自动化、构件质量、生产计划执行、资源利用效率”。

(3) 构件运输阶段。该阶段重点关注“物流信息化、运输准时率、构件完好率、运输路径优化度”。

(4) 施工安装阶段。该阶段重点关注“安装效率、装配精度、现场协同、施工安全管理”。

综上所述,通过上述原则构建的评价体系,可精准识别供应链协同瓶颈,使成本控制策略能有效落实,提升装配式建筑项目的整体效益。装配式建筑评价指标体系,参见表1。

施工安装 D	构件完好率 C3	测量构件在运输过程中的完好程度	
		衡量运输路径规划的合理性和优化程度	
	安装效率 D1	测量单位时间内完成安装的构件数量或面积	
	装配精度 D2	评估构件安装的精确度和符合设计要求的程度	
	现场协同 D3	衡量施工现场各工种、工序间的协同配合程度	
	施工安全管理 D4	评估施工过程中安全管理的有效性和安全事故的控制情况	

3 装配式建筑评价的指标权重确定

3.1 专家评价法原理及评价重要性均值

专家评价法是一种基于专家知识、经验和主观判断的决策或评估方法，广泛应用于政策制定、项目管理、技术评估、科研评审等领域，其核心是通过领域专家的定性或定量分析，对复杂问题提供专业见解^[6]。以下是文章主要原理及在装配式建筑评价中应用：

(1) 德尔菲法 (Delphi Method) 是一种结构化、多轮次的专家调查方法，旨在通过匿名反馈和迭代过程达成专家群体的共识预测或决策^[7]。德尔菲法在应用上多用于确定装配式建筑评价指标权重或预测新技术对成本的影响。

(2) 层次分析法 (AHP)。AHP 是一种系统化决策方法，由 Saaty (1980) 提出，通过构建层次结构、两两比较矩阵和权重计算，解决多准则复杂决策问题^[8]。层次分析法在应用多适用于装配式建筑评价中多指标权重的分配。

(3) 基于文章收集的 25 份专家问卷对于各准则 (A~D)、指标层 (A1~D4) 重要性指标评价情况进行回答，问卷形式邀请了学术界 10 位专家和工程实践界 15 位专家，从而运用 MATLAB 进行运算和程式分析并确定各一

表 4 随机评价一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52

3.2 一致性检验的 MATLAB 场景模拟

取装配式前期成本阶段实验的指标数据进行检测，A~D 为 4 个一级指标的潜变量关键因素和 A1~D4 的 16 个观测变量的研究对象，据下表 5 所示。

考虑一级指标以下 4 个维度不同的情况，对评价阶段准则层进行确定及计算一致性检验和对权重比进行评价。

①情况 A~D：准则层的决策与设计 (A)、构件生产 (B)、构件运输 (C)、施工安装 (D)，重要性评价指标均值 (M) 分别为 4.08、3.84、3.28、3.72。对应判断矩阵 $[1 \ 2 \ 4 \ 3; 1/2 \ 1 \ 4 \ 2; 1/4 \ 1/4 \ 1 \ 1/3; 1/3 \ 1/2 \ 3 \ 1]$ 。利用 Matlab 进一步计算最大特征根值 $\lambda_{\max}=4.0875$ ，一致性指标 $CI=0.0292$ ，一致性比例 $CR=0.0328$ ，因为 $CR<0.10$ ，所以该判断矩阵 A 的一致性可以接受，故通过一致性检验。

②计算主观权重。情况 A~D 检验通过，经 MATLAB 对准则层权重运算后，主观权重汇总分别对应为 [0.456 5, 0.2917, 0.0784, 0.1734]。

3.2 确定层次权重及一致性检验

3.2.1 计算步骤

根据判断矩阵，计算 W_1, W_2, \dots, W_n 的相对权重值，从而得到向量 $W=(W_1, W_2, \dots, W_n)$ ，运用一致性检验此向量的合理性，检查此判断矩阵是否能够使用。运用正规化求和法，含规范化处理矩阵的各列、各列之和、权重向量，来计算相对权重，以及最大特征根 λ_{\max} 。见以下正规化处理矩阵的各列实际的求解过程：

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

由于专家对因素进行两两比较时或许存在自相矛盾的可能，因此在进行层次单排序时为了避免出现这种现象，必须检验一致性，其步骤为：一致性的指标 CI、均值 RI、比率 CR。由此表 4，可知各阶判断矩阵的 RI 分别如下：

0875，一致性指标 $CI=0.0292$ ，一致性比例 $CR=0.0328$ ，因为 $CR<0.10$ ，所以该判断矩阵 A 的一致性可以接受，故通过一致性检验。

②计算主观权重。情况 A~D 检验通过，经 MATLAB 对准则层权重运算后，主观权重汇总分别对应为 [0.456 5, 0.2917, 0.0784, 0.1734]。

考虑二级指标以下 16 个方面不同的情况，指标层评价确定及计算各情形的一致性比例 CR 和相对权重比，步骤如下：

①以情形 A 的 A1~A4 检验点为例，M 分别为 3.80、3.84、4.20、3.60。确定及计算各指标的判断矩阵：判断矩阵 $A=[1 \ 1/2 \ 1/3 \ 2; 2 \ 1 \ 1/3 \ 2; 3 \ 3 \ 1 \ 4; 1/2 \ 1/2 \ 1/4 \ 1]$ ，Matlab 对二级指标进一步计算后， $\lambda_{\max}=4.0$

813, 一致性指标 $CI=0.0271$, 一致性比例 $CR=0.0304$, 因为 $CR<0.10$, 所以该判断矩阵 A 的一致性可以接受。

②以情形 B 的 $B1 \sim B4$ 检验点为例, M 分别为 3.84、4.08、3.80、3.96。确定各指标的判断矩阵: 判断矩阵 $B=[1 \ 1/2 \ 2 \ 1/2; 2 \ 1 \ 3 \ 2; 1/2 \ 1/3 \ 1 \ 1/2; 2 \ 1/2 \ 2 \ 1]$, Matlab 对二级指标进一步计算后, $\lambda_{max}=4.071$, 一致性指标 $CI=0.0237$, 一致性比例 $CR=0.0266$, 因为 $CR<0.10$, 所以该判断矩阵 A 的一致性可以接受。

③以情形 C 的 $C1 \sim C4$ 检验点为例, M 分别为 3.84、3.92、3.52、3.64。确定各指标的判断矩阵: 判断矩阵 $C=[1 \ 1/2 \ 3 \ 2; 2 \ 1 \ 3 \ 3; 1/3 \ 1/3 \ 1 \ 1/2; 1/2 \ 1/3 \ 2 \ 1]$, Matlab 对二级指标进一步计算后, $\lambda_{max}=4.071$, 一致性指标 $CI=0.0237$, 一致性比例 $CR=0.0266$, 因为 $CR<0.10$, 所以该判断矩阵 A 的一致性可以接受。

④以情形 D 的 $D1 \sim D4$ 检验点为例, M 分别为 4.16、4.0、3.64、4.20。确定各指标的判断矩阵: 判断矩阵 $D=[1 \ 2 \ 4 \ 1/2; 1/2 \ 1 \ 3 \ 1/2; 1/4 \ 1/3 \ 1 \ 1/4; 2 \ 2 \ 4 \ 1]$, Matlab 对二级指标进一步计算后, 一致性指标 $CI=0.0271$, 一致性比例 $CR=0.0304$, 因为 $CR<0.10$, 所以该判断矩阵 A 的一致性可以接受。

⑤计算客观权重, 并求出综合权重。根据情形 A~D 对应的二级指标层, 用 MATLAB 进行加权平均法计算权重, 得出各情形对应二级指标判断矩阵的权重汇总结果: 确定的情形 A 相对权重为: $V=[0.1588, 0.2246, 0.5120, 0.1045]$, 根据情形 A 的主观权重: $W=[0.4565]$, 计算出综合权重: $\Delta=[0.0725, 0.1025, 0.2337, 0.0477]$; 确定的情形 B 相对权重为: $V=[0.1899, 0.4203, 0.1213, 0.2685]$, 根据情形 B 的主观权重: $W=[0.2917]$,

表 5 装配式建筑供应链协同要素权重评价指标表

评价阶段		评价指标			排序
准则层	主观权重	指标层	相对权重	综合权重	
决策与设计 A	0.4565	标准化设计程度 A1	0.1588	0.0725	6
		设计协同效率 A2	0.2246	0.1025	
		数字化设计集成度 A3	0.5120	0.2337	
		前期方案优化 A4	0.1045	0.0477	
构件生产 B	0.2917	生产自动化 B1	0.1899	0.0554	7
		构件质量 B2	0.4203	0.1226	
		生产计划执行 B3	0.1213	0.0354	
		资源利用效率 B4	0.2685	0.0783	
构件运输 C	0.0784	物流信息化 C1	0.2848	0.0223	13
		运输准时率 C2	0.4457	0.0349	
		构件完好率 C3	0.1051	0.0082	
		运输路径优化度 C4	0.1644	0.0129	
施工安装 D	0.1734	安装效率 D1	0.2993	0.0519	8
		装配精度 D2	0.1970	0.0342	
		现场协同 D3	0.0804	0.0139	
		施工安全管理 D4	0.4233	0.0734	

计算出综合权重: $\Delta=[0.0554, 0.1226, 0.0354, 0.0783]$; 确定的情形 C 相对权重为: $V=[0.2848, 0.4457, 0.1051, 0.1644]$, 根据情形 C 的主观权重: $W=[0.0784]$, 计算出综合权重: $\Delta=[0.0223, 0.0349, 0.0082, 0.0129]$; 确定的情形 D 相对权重为: $V=[0.2993, 0.1970, 0.0804, 0.4233]$, 根据情形 D 的主观权重: $W=[0.1734]$, 计算出综合权重: $\Delta=[0.0519, 0.0342, 0.0139, 0.0734]$ 。

⑥综合权重排序评价结果。综合评价结果排序与主观权重结果相符, 准则层和指标层每个阶段之间的综合关键评价结果来看, 结果可看三点评价内容: 一是核心影响因素。A3 和 B2 是供应链协同的最关键驱动因素, 需优先优化。A2 与 B4 次之, 需加强跨专业协作与生产资源配置。二是潜在改进方向。C1 和 C4 综合权重最低(排名 13 和 15), 可能成为精细化管理的突破点。D1 和 D2 权重中等, 需结合项目实际平衡效率与精度。三是权重分布特征。A 和 B 占据总权重的 64%, 表明前期规划与生产环节对供应链协同的累积影响更为显著。施工与运输阶段需关注局部优化, 但整体协同性更多依赖前端设计与生产管理。

综上所述, 准则层和指标层的每个阶段都有其独特的最优指标, 这些指标共同构成供应链协同的关键影响因素。评价体系通过权重分配明确供应链协同的优先级。强化数字化设计与质量管理是核心, 同时需兼顾生产资源优化与施工安全。运输阶段的低权重指标提示未来可探索降本增效的精细化策略, 但整体协同性仍以设计和生产为主导。通过关注这些最优指标, 可以有效地提高项目效率、质量和安全性。

3.3 结果分析

使用 Matlab 对两指标重要性平均分进行作差比较, 根据差值所处区间, 确定 Saaty 标度, 进而构造一、二级指标判断矩阵。

用层次分析法对 4 个维度 16 个方面检验点在四种阶段情形下的权重比排序进行评价。评价结果如下所示。

(1) 一级指标主观权重排序: A (0.4565) > B (0.1899) > D (0.0804) > C (0.2848)。其中, 决策与设计阶段占据主导地位, 表明其对供应链协同的全局性影响最大。

(2) 二级指标综合权重排序: ①A: A3 (0.2337) 位列第一, 凸显数字化整合的核心作用。A2 (0.1025) 排名第三, 反映多专业协同的重要性。②B: B2 (0.1226) 排名第二, 强调质量管控是生产阶段的核心。B4 (0.0783) 排名第四, 体现生产资源优化的重要性。③C: C1 (0.0223) 和 C2 (0.0349) 权重较低, 表明运输阶段对整体协同影响相对较弱。④D: D4 (0.0734) 排名第五, 显示安全管理在施工中的关键地位。

评价指标 A1~D4 权重来看, 二级指标各阶段综合权重最优指标排序: A3 (0.2337) > B2 (0.1226) > D4 (0.0734) > C2 (0.0349)。其中 A2~B4 点综合评价结果大于 C1, 指标综合权重比达到合格标准, C1~C4 点综合评价结果来看, C3 未达到规定阈值标准。

以上作为对比, 采用层次分析综合评价方法, 对上述准则层和指标层数据进行了 MATLAB 场景运算实验所得出数据结论。文章所提出的层次分析权重综合评价方法评价方法, 对评价权重情况的评价结果的进行对比。

综上所述, 针对以上条件, 使用 MATLAB 对评价指标进行运算加权平均权重系数统计并确定各准则层权重值, 然后根据指标层相对权重比值及其权重系数确定各评价维度对应指标的分值, 再结合评价的 4 个维度 16 个方面的权重系数再确定各评价阶段综合权重的分值及权重排序顺序, 以此类推, 直至确定目标层所得分值为止。

4 结论

文章基于装配式建筑成本控制影响因素的指标特点, 结合预制构件供应链协同的关键环节, 构建了一套科学、系统的供应链协同影响因素评价体系。通过文献研究、Delphi-AHP 专家评价法、MATLAB 的程式运算分析, 识别了影响预制构件供应链协同的核心因素, 包括 4 维度 16 方面阶段成本, 并采用合理的权重赋值方法,

确保评价体系的客观性和可操作性。协同成本影响要素评价体系分析数据说明能最大程度推动装配式建筑高效、低碳发展并为未来可结合大数据和物联网技术, 构建动态供应链协同评价模型, 实现实时数据驱动的管理优化, 为后续进一步细化评价标准, 弥补了现有研究在评价方面的不足又增强了评价体系的科学性和行业适用性。

参考文献

- [1] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for the construction industry ("十四五"建筑业发展规划) [EB/OL]. (2021) [2023-01-10]. <http://www.mohurd.gov.cn/>.
- [2] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 51129-2017 Standard for assessment of assembled buildings (GB/T 51129-2017 装配式建筑评价标准) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [3] State Council of the People's Republic of China. Opinions on promoting the sustainable and healthy development of the construction industry (General Office Document No. 19) [EB/OL]. (2017-02-24) [2023-01-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/24/content_5170625.htm.
- [4] 何芳, 张润锋, 王依婷. 基于专家打分法的装配式建筑成本影响因素权重确定 [J]. 工程管理学报, 2017, 31 (6): 88-92.
- [5] 陈勇, 周亮, 黄莎. 基于全寿命周期成本理论的装配式建筑成本控制研究 [J]. 工程管理学报, 2018, 32 (2): 106-110.
- [6] 吕青, 王宏. 基于动态贴现率的装配式建筑设计优化成本模型 [J]. 建筑经济, 2016, 37 (8): 5-49.
- [7] LINSTONE H A, TUROFF M. The Delphi method: techniques and applications [M]. Reading: Addison-Wesley, 1975: 1-620.
- [8] HO W, MA X. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 267 (2): 399-414. DOI:10.1016/j.ejor.2017.09.007.