

基于模糊综合评价的智能建造技术选型研究

王金兵¹, 陈景镇¹, 张春莉¹, 林奋彬¹, 吕凯芳¹, 张卫¹, 戴兴伟^{2,*}

1. 中建四局建设发展有限公司, 福建 厦门, 361006.
2. 华侨大学, 土木工程学院, 福建 厦门, 361021.

摘要: 智能建造作为推动建筑业转型升级的核心动力, 其成功实施高度依赖于众多前沿技术的有效集成与选型。然而, 技术选型过程涉及技术、经济、管理及风险等多维度的模糊与不确定因素, 传统评价方法难以胜任。为解决这一问题, 本研究构建了一个适用于智能建造技术选型的模糊综合评价模型。该模型从技术适用性、经济可行性、管理协同性以及风险可控性四个维度建立了综合评价指标体系, 并综合运用层次分析法与熵权法确定组合权重, 以克服单一赋权法的局限性。通过引入模糊数学理论, 将定性评价转化为定量计算, 有效处理了决策过程中的模糊信息。研究以某大型预制构件生产基地的智能生产技术选型为例, 对三种备选方案进行了实证分析。结果表明, 方案二(基于工业机器人和物联网的柔性生产线)的综合评价得分最高, 其不仅在技术先进性和生产柔性上表现突出, 在长期经济效益上也展现出显著优势, 这与敏感性分析结果相互印证。该研究为企业在复杂环境下进行科学、客观的智能建造技术选型提供了可操作的方法论与决策工具。

关键词: 智能建造; 技术选型; 模糊综合评价; 组合权重; 决策分析

Research on Intelligent Construction Technology Selection Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

Jinbing Wang¹, Jingzhen Chen¹, Chunli Zhang¹, Fenbin Lin¹, Kaifang Lv¹, Wei Zhang¹, Tsingwei Tai^{2,*}

1. China Construction Fourth Bureau Construction and Development Co., Ltd, Fujian Xiamen, 361006.

2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian, 361021, China.

Abstract: As a core driving force for the transformation and upgrading of the construction industry, the successful implementation of intelligent construction relies heavily on the effective integration and selection of frontier technologies. However, the technology selection process involves multiple dimensions—technical, economic, managerial, and risk-related—that are characterized by fuzziness and uncertainty, making traditional evaluation methods inadequate. To address this issue, this study develops a fuzzy comprehensive evaluation model tailored for intelligent construction technology selection. The model establishes an integrated evaluation index system from four dimensions: technical applicability, economic feasibility, managerial compatibility, and risk controllability. A combined weighting approach, incorporating the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the entropy weight method, is adopted to overcome the limitations of single weighting schemes. By introducing fuzzy mathematics, qualitative assessments are converted into quantitative calculations, effectively handling fuzzy information in the decision-making process. Taking the intelligent production technology selection of a large prefabricated component manufacturing base as a case study, three alternative schemes were empirically analyzed. Results indicate that Scheme II—a flexible production line based on industrial robots and the Internet of Things—achieved the highest comprehensive evaluation score. It not only excels in technological advancement and production flexibility but also

demonstrates significant advantages in long-term economic benefits, which are further validated by sensitivity analysis. This study provides enterprises with a practical methodology and decision-making tool for conducting scientific and objective intelligent construction technology selection under complex environments.

Keywords: intelligent construction; technology selection; fuzzy comprehensive evaluation; combined weighting; decision analysis

当前,建筑行业正经历着以智能建造为核心的深刻变革。BIM技术、物联网、人工智能、机器人技术、大数据等新一代信息技术与传统施工工艺不断融合,催生了新的生产方式与管理模式^[1]。推动智能建造已成为提升工程质量安全、效益和品质,实现建筑业可持续发展的必然选择。然而,企业在推进智能建造的过程中,首先面临着一个普遍且关键的难题——如何从众多技术路径和解决方案中,选择最适合自身项目特点、资源条件和发展战略的技术体系。这一决策过程远非简单的技术优劣对比,而是一个涉及多目标、多准则的复杂系统工程。

智能建造技术选型决策的复杂性主要体现在三个方面。首先,评价准则具有多重性,需综合考量技术因素(如成熟度、兼容性)、经济因素(如成本、投资回报)以及管理因素(如技能要求、组织变革)^[2]。其次,信息具有模糊性,诸如“技术前瞻性”“系统稳定性”等指标难以精确量化,多依赖专家经验和语言描述。第三,各类因素常需权衡,例如某项技术可能先进但昂贵,另一项则成本低但扩展性差,增加了决策的不确定性。传统评价方法如净现值法、投资回收期法偏重于经济指标,难以处理大量定性信息^[3-4];而德尔菲法、加权评分法在权重设定和模糊量化方面主观性强、精度有限。因此,亟需一种能够系统整合定性定量信息、科学处理模糊性的评价方法。模糊数学由Zadeh教授提出,为处理此类模糊现象提供了数学工具。基于该理论发展的模糊综合评价法,通过隶属度函数将定性评价转化为定量数值,支持复杂系统的全面评判^[5-6],已广泛应用于工程、管理及环境评估等领域。

本研究将模糊综合评价法引入智能建造技术选型,旨在构建一个科学、系统且实用的决策模型,并结合案例演示从指标建立、权重确定到综合评价的全过程,以验证其有效性,为企业决策提供理论参考和实践依据。

1 方法论

本研究运用模糊综合评价法构建智能建造技术选型模型,流程涵盖建立指标体系、确定权重、构建评价集与隶属度矩阵,以及模糊合成与决策四个步骤。该方法系统性强,能有效融合定性定量信息,为工程决策提供可靠依据。模型结构简单、便于操作,易于工程人员理解应用,有助于早期风险管理。尽管不同项目类型在指标和风险特征上差异显著,但该方法可通过调整因素集、权重和隶属度灵活适应,通用性良好。

1.1 模糊综合评价模型框架

模糊综合评价的核心思想是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,综合考虑所有相关因素,对评价对象做出一个总体的评判。设评价因素集为 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$,评价等级集为 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。首先通过单因素评价,构建一个从 U 到 V 的模糊关系矩阵 R 。然后,赋予各因素一个权重向量 $A=(a_1, a_2, \dots, a_m)$ 。最终通过模糊合成运算,得到综合评价结果向量 B 。通过对 B 的分析,即可对评价对象做出判断。

1.2 评价指标体系构建

建立科学合理的评价指标体系是成功应用该模型的基础。本研究通过文献分析、专家访谈并结合智能建造技术特点,本研究从四个维度构建了递阶层次的评价指标体系。(1) 目标

层 (A)：智能建造技术选型综合评价。 (2) 准则层 (B)：包含 4 个一级指标：技术适用性 (B1)、经济可行性 (B2)、管理协同性 (B3)、风险可控性 (B4)。 (3) 指标层 (C)：对每个一级指标进行细化，共衍生出 14 个具体可操作二级指标。完整的指标体系结构如表 1 所示。

表 1.智能建造技术选型评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for intelligent construction technology selection			
目标层	准则层	指标层	指标说明
智能建造技术选型 A	技术适用性 B1	技术先进性 C11	技术与行业前沿的契合程度
		功能匹配度 C12	技术功能对项目需求的满足程度
		系统集成度 C13	与现有系统（如 BIM、ERP）的对接能力
		标准化与开放性 C14	技术接口、协议的标准化程度
	经济可行性 B2	初始投资成本 C21	设备购置、软件授权、部署安装等一次性投入
		运营维护成本 C22	能耗、耗材、软件升级、日常保养等持续性费用
		投资回收期 C23	预计收回全部初始投资所需的时间
		综合效益提升 C24	在效率、质量、安全等方面带来的综合价值
	管理协同性 B3	操作便捷性 C31	人机交互界面友好程度，学习成本
		人员技能要求 C32	对现有人员技术能力的挑战程度
		组织变革适应性 C33	对现有工作流程和组织架构的影响程度
	风险可控性 B4	技术成熟度与稳定性 C41	技术本身是否经过充分验证，故障率高低
		供应商支持能力 C42	供应商的技术实力、售后服务和持续开发能力
		数据安全与隐私风险 C43	技术应用可能带来的数据泄露、网络攻击等风险

1.3 组合权重确定

为兼顾决策者的主观意图与客观数据信息，本研究采用层次分析法确定主观权重 W_s ，采用熵权法确定客观权重 W_o ，最后通过线性加权计算组合权重 W ，如式 1。

$$W = \alpha W_s + (1 - \alpha)W_o \tag{1}$$

其中，alpha 为偏好系数，通常取 0.5 以示公平。层次分析法通过构造判断矩阵、一致性检验等步骤计算权重。熵权法则根据各指标数据值的变异程度计算权重，变异程度越大，熵值越小，该指标提供的信息量越大，其权重也越大。

1.4 隶属度确定与模糊合成

组织专家小组（含技术专家、项目经理、财务顾问等）对各备选方案的指标进行等级评定。设定评价等级集 $V = \{\text{优,良,中,差}\}$ ，并对应相应分值。统计专家对某方案在某指标上的评价结果，经归一化得到该指标对各等级的隶属度，由此形成模糊关系矩阵 R 。采用如式（2）所示的加权平均型模糊合成算子进行计算，该算子能保留全部评价信息，适用于需全面综合评价的场合。

$$b_j = \sum_{i=1}^m (a_i \times r_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

其中， b_j 表示评价对象对第 j 个评价等级的隶属度， a_i 为第 i 个指标的权重， r_{ij} 为隶属度。

2.结果与分析

为验证所构建模型的有效性，本研究将其应用于一个实际案例——某大型建筑企业预制构件生产基地的智能生产技术选型。

2.1 案例背景与备选方案

该企业计划新建一条智能化 PC 构件生产线，以提高生产效率和产品质量。经过初步筛选，确定三个备选方案进行最终比选。**(1) 方案一 (S1):** 自动化流水线方案。采用成熟稳定的专用机床和传送带系统，自动化程度高，但柔性较差，适合大批量标准构件生产。**(2) 方案二 (S2):** 工业机器人柔性单元方案。以多台六轴工业机器人为核心，配备智能物料配送系统和物联网监控平台，柔性高，能适应多品种小批量生产。**(3) 方案三 (S3):** 半自动化+人工辅助方案。在关键工序采用自动化设备，其余环节依赖人工，初始投资最低，但效率和一致性对工人技能依赖度高。

2.2 权重计算

邀请 10 位专家，通过问卷形式分别进行 AHP 判断矩阵打分和指标熵值数据提供。经计算和一致性检验，最终得到各指标的组合权重如下表所示。

表 2.评价指标组合权重计算结果

Table 2 Calculation results of weights of evaluation indicator combinations				
准则层权重	指标层	AHP 主观权重	熵权法客观权重	组合权重
B1:0.285	C11:技术先进性	0.080	0.085	0.082
	C12:功能匹配度	0.075	0.065	0.070
	C13:系统集成度	0.065	0.072	0.068
	C14:标准化与开放性	0.065	0.058	0.062
B2:0.355	C21:初始投资成本	0.105	0.110	0.108
	C22:运营维护成本	0.090	0.095	0.092
	C23:投资回收期	0.085	0.090	0.088
	C24:综合效益提升	0.075	0.070	0.072
B3:0.195	C31:操作便捷性	0.070	0.065	0.068
	C32:人员技能要求	0.065	0.070	0.068
	C33:组织变革适应性	0.060	0.055	0.058
	C41:技术成熟度	0.060	0.055	0.058
B4:0.165	C42:供应商支持	0.055	0.060	0.058
	C43:数据安全风险	0.050	0.055	0.052

从权重结果可以看出，准则层中经济可行性（B2）的权重最高（0.355），表明专家们认为在技术选型中，经济因素是首要考量。在指标层中，初始投资成本（C21）和运营维护成本（C22）占据了最重要的地位，其次是技术先进性（C11）和投资回收期（C23）。这反映了企业在拥抱新技术的同时，对投资风险和财务稳健性的高度关注。

2.3 模糊综合评价计算

同一批专家根据评价等级集 V，对三个方案在各个指标上的表现进行打分。整理统计后的评价结果，归一化后得到三个方案各自的模糊评价矩阵 $R\{S1\}, R\{S2\}, R\{S3\}$ 。以方案二（S2）为例，其模糊评价矩阵如下表示意。

表 3.方案二（S2）部分指标隶属度矩阵示例

Table 3 Example of the affiliation matrix for selected indicators of scenario II (S 2)				
指标	优	良	中	差
C11	0.7	0.2	0.1	0.0
C12	0.6	0.3	0.1	0.0
...
C21	0.1	0.2	0.5	0.2

C22	0.6	0.3	0.1	0.0
...

将表2中的组合权重向量 W 与各方案的模糊评价矩阵 R 进行模糊合成运算($B=W \circ R$), 得到三个方案的综合评价结果向量 $B\{S1\}, B\{S2\}, B\{S3\}$, 如式3所示。

$$\begin{aligned} B_{S1} &= (0.312, 0.405, 0.233, 0.050) \\ B_{S2} &= (0.523, 0.327, 0.125, 0.025) \\ B_{S3} &= (0.210, 0.368, 0.342, 0.080) \end{aligned} \quad (3)$$

为便于比较, 将评价等级集 V 中“优、良、中、差”分别赋值为 95, 85, 65, 40 分, 计算各方案的综合得分, 如式4所示。

$$\begin{aligned} Z &= B \times V^T \\ Z_{S1} &= 0.312 \times 95 + 0.405 \times 85 + 0.233 \times 65 + 0.050 \times 40 = 81.52 \\ Z_{S2} &= 0.523 \times 95 + 0.327 \times 85 + 0.125 \times 65 + 0.025 \times 40 = 87.68 \\ Z_{S3} &= 0.210 \times 95 + 0.368 \times 85 + 0.342 \times 65 + 0.080 \times 40 = 76.84 \end{aligned} \quad (4)$$

2.4 评价结果分析

根据计算结果, 三个方案的优劣顺序一目了然: 方案二 ($S2$) 的综合得分最高 (87.68 分), 远高于方案一 (81.52 分) 和方案三 (76.84 分)。方案二在“优”等级的隶属度高达 0.523, 表明超过半数的专家意见认为该方案整体表现优秀。

进一步分析其准则层评价结果可以发现, 方案二在技术适用性 ($B1$) 和管理协同性 ($B3$) 上获得了极高的评价, 这得益于其机器人柔性单元带来的高适应性和相对友好的人机协作界面。虽然在经济可行性 ($B2$) 上, 其初始投资高于方案三, 但由于其出色的生产效率和较低的长期运维成本, 其投资回收期 and 综合效益指标得分很高, 最终在经济性上也获得了不错的评价。在风险可控性 ($B4$) 上, 工业机器人技术的成熟度和供应商的广泛支持为其提供了保障。方案一 ($S1$) 作为传统自动化方案, 技术成熟稳定, 风险低, 因此在经济性和风险性上表现尚可, 但其技术灵活性和对未来产品升级的适应性不足, 拉低了其综合得分。方案三 ($S3$) 虽然初始投资最低, 但其在技术先进性、生产效率、质量一致性以及长期人力成本上均无明显优势, 导致其综合得分最低。

2.5 敏感性分析

为检验评价结果的稳定性, 本研究对权重进行了敏感性分析。假设决策者是一个技术激进型企业, 将准则层“技术适用性 ($B1$)”的权重提高 20%, 同时相应降低“经济可行性 ($B2$)”的权重。重新计算后, 方案二 ($S2$) 的优势反而更加明显, 其综合得分进一步提升。反之, 若决策者是一个成本敏感型企业, 大幅提升经济性权重, 方案一的得分会有所提升, 但与方案二的差距缩小, 方案二因其长期经济性良好, 依然能保持领先。这表明, 本案例的评价结果对于权重的变化具有一定的鲁棒性, 方案二作为最优选择的结论是稳定的。

3. 讨论

本研究成功将模糊综合评价模型应用于智能建造技术选型决策, 实证结果与行业专家评估基本一致, 验证了模型的有效性与实用性。该模型的优势在于其系统性的分析框架能够促使决策团队全面、结构化地考量各方面因素, 避免仅凭经验或单一因素 (如价格) 草率决策。同时, 模糊数学方法有效尊重并量化了专家经验中的模糊判断, 提升了决策的科学性和透明度。

然而, 本研究也存在一定局限性。首先, 评价指标体系及权重的确定虽结合了主客观方法, 但仍难以完全避免专家主观性的影响。不同企业因行业、规模与战略目标差异, 需灵活

调整权重,本研究提供的更应视为可扩展的模板而非统一标准。其次,尽管已进行敏感性分析,模型准确性仍高度依赖于专家的质量与代表性,因此选择兼具理论与实务经验的专家至关重要。未来研究可从以下方面展开:一是探索融入更多客观数据(如设备性能参数、市场价格、能耗仿真等),降低对主观评价的依赖;二是将本模型与数据包络分析、TOPSIS等方法结合或对比,以提升评价的准确性与可靠性;三是开发配套的决策支持系统,实现方法流程化与工具化,降低企业应用门槛。

4.结论与对策建议

4.1 研究结论

本研究围绕智能建造技术选型这一复杂决策问题,得出以下主要结论:第一,智能建造技术选型是一个多目标决策过程,必须综合平衡技术、经济、管理和风险四大类因素,任何单一维度的考量都可能导致决策偏差。第二,构建的模糊综合评价模型,结合 AHP-熵权法组合赋权,能够有效处理选型过程中的定性指标和模糊信息,为实现科学选型提供了行之有效的定量分析工具。第三,案例应用表明,基于工业机器人的柔性生产方案(S2)因其出色的技术适应性、良好的长期经济效益和可接受的风险水平,成为最优选择。而仅关注初始投资的低成本方案(S3)综合表现最差,这提示企业应摒弃“唯价格论”的短视思维,着眼于全生命周期的综合价值。

4.2 对策建议

基于以上研究,对企业智能建造技术选型实践提出以下建议:第一,建立系统化选型流程。企业可组建跨部门选型小组,遵循“明确需求—初筛方案—构建评价体系—详细评价—决策实施”的流程,保障决策全面与公正。第二,因地制宜制定评价标准。可参考本研究提出的指标框架,结合自身战略、项目特征与资源条件,个性化调整指标与权重,形成适用自身的标准。第三,注重定量与定性结合。在收集报价、参数等定量数据的同时,应通过实地调研、专家咨询和试用测试等方式,对技术稳定性、易用性等定性指标形成客观认知,并借助模糊评价实现有效量化。第四,强化决策后的管理协同。技术选型成功需配套管理变革,企业应在选定技术后统筹安排培训、流程优化和组织调整,以保障技术顺利落地并达到预期效果。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见[J]. 城乡建设, 2020(15): 10-15.
- [2] 刘璐. 智能建造背景下 BIM 驱动装配式建筑造价精益管控研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (08): 68-70.
- [3] 赵宸君, 唐润佳, 靳博雯, 等. 深圳工业软件园项目智能建造研究与实践[J]. 建筑施工, 2025, 47(07): 1079-1083.
- [4] 胡振中, 陈晓明, 李久林. 基于 BIM 的智能运维管理研究综述与发展趋势[J]. 图学学报, 2019, 40(01): 1-12.
- [5] 吕文娟, 张道卫, 胥玺, 等. 智能建造技术在市政交通工程中的应用价值分析[J]. 价值工程, 2025, 44(20): 33-35.
- [6] Lu K, Deng X, Jiang X, et al. A review on life cycle cost analysis of buildings based on building information modeling[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2023, 29(3): 268 - 288.

¹ 第一作者: 王金兵(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 中建四局建设发展有限公司, 研究方向: 工程管理。E-mail: 76553562@qq.com

* 通讯作者: 戴兴伟(1976-), 男, 博士, 教授, 华侨大学, 研究方向: 装配式建筑; 工程管理。E-mail: rt007204@gmail.com