

基于 DEMATEL-ANP-FCE 模型的智能建造技术应用风险研究

刘月君 郭慧玲 林展鹏 闫佳蕾 赵星轩

河北建筑工程学院 河北张家口 075000

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17675

[摘要] 本文旨在识别施工项目智能建造技术应用中的主要风险。基于改进的 TOE 框架, 综合运用 DEMATEL、ANP 与模糊综合评价方法, 对 15 位专家打分数据进行分析。结果显示整体风险水平较高, 关键风险包括技术人员短缺、数据交互度低、信息安全与收益不确定性。研究构建了系统化、多方法融合的风险评估模型, 为施工企业风险管理与政策优化提供参考。

[关键词] 智能建造; 应用风险评价; DEMATEL; ANP; 模糊综合评价

Research on the Application Risks of Intelligent Construction Technologies Based on the DEMATEL-ANP-FCE Model

Abstract: This paper aims to identify the primary risks in the application of intelligent construction technologies for construction projects. Based on an improved TOE framework, the DEMATEL, ANP, and fuzzy comprehensive evaluation methods were comprehensively applied to analyze the scoring data of 15 experts. The results indicate a relatively high overall risk level, with key risks including a shortage of technical personnel, low data interoperability, information security concerns, and uncertain benefits. The study constructs a systematic and multi-method integrated risk assessment model, providing references for construction enterprises in risk management and policy optimization.

Keywords: Intelligent Construction; Application Risk Assessment; DEMATEL; ANP; Fuzzy Comprehensive Evaluation

1 引言

建筑业数字化水平相对较低, 研发投入不足, 劳动力短缺与安全要求提升促使智能建造成为行业发展方向^[1]。自 2020 年《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》发布以来, 全国已开展多项试点与示范工程。然而, 新技术的引入伴随不确定性, 受经验匮乏与专业人才不足影响, 施工项目在智能建造应用中面临多重风险。

现有研究多集中于智能建造中单项技术的风险评估, 而对多技术融合及整体应用风险的系统性研究相对不足。例如, Yong 等^[2]基于 BIM 提出风险等级评估系统, Kim 等^[3]构建了 4DBIM 驱动的风险评估框架, 主要探讨施工安全与时间维度

的耦合; Namianl^[4]和 Jeelani^[5]等研究无人机在施工中的安全风险识别与影响因素分析; 谭铮^[6]则从物理、软件、人机交互与环境等方面构建了智能机器人风险评估体系。总体而言, 这些研究在特定技术领域具有一定借鉴意义, 但多局限于单一场景或单项技术, 缺乏对施工项目整体智能建造技术应用风险的综合识别与系统分析。

基于此, 本文在传统 TOE 框架基础上细化为技术、人员、协同、经济与政策五个维度, 结合 DEMATEL、ANP 和模糊综合评价方法构建风险评估模型, 以揭示施工项目智能建造的关键风险, 为企业管理与政策制定提供参考。

表 1 建筑施工项目智能建造技术应用风险评价指标体系

一级指标	二级指标	一级指标	二级指标
A 技术风险	A1 技术的成熟度	D 人员风险	D1 技术人员短缺
	A2 数据接口兼容性		D2 人员项目经验不足
	A3 数据的交互度		D3 操作人员回避新技术
	A4 技术具备的难度		D4 人员技术素养
	A5 数据质量和准确性问题		E1 政策支持不足
B 经济风险	A6 信息储存安全风险	E 政策风险	E2 地方政府政策落实不到位
	B1 前期成本投入高		E3 相关法律法规的完备性
	B2 收益的不确定性		E4 行业规范标准的完善度
	B3 新增加的额外成本		E5 相关政策的导向性
	B4 软件维护费用		

- C1 管理模式问题
- C 协同风险
 - C2 参建方的沟通协作能力
 - C3 技术管理难度
 - C4 企业内部驱动力

2 建筑施工项目智能建造技术应用风险指标识别

本文通过文献研究与典型案例分析，初步识别了施工项目智能建造应用中的潜在风险因素。基于 TOE 理论框架，将风险划分为技术、组织与环境三类：技术风险主要涉及技术成熟度与系统集成复杂性^[7]，组织风险涵盖人员能力与管理机制^[8]，环境风险则包括政策法规与行业标准不完善等^[9]。

结合专家访谈结果与施工实际，本文在 TOE 框架基础上进行细化，将组织维度拆分为人员、协同与经济风险，将环境维度扩展为政策风险，最终形成技术、人员、协同、经济与政策五个维度，为构建系统化的风险评价指标体系奠定基础（见表 1）。

3 建筑施工项目智能建造技术应用风险评价模型构建

3.1 Dematel 分析过程

在风险评价指标体系中，各因素之间并非孤立存在，而是呈现复杂的相互影响关系。为揭示风险指标间的因果关系与影响程度，本文采用 DEMATEL 方法，基于专家打分构建直接与综合影响矩阵，以识别各因素的驱动与受控特征。

(1) 采用调查问卷的方式收集专家意见，打分采用 0 - 4 标度，其中 0 表示“无影响”，1 表示“弱影响”，2 表示“中等影响”，3 表示“较强影响”，4 表示“很强影响”。将专家意见取算术平均后，得到初始的直接影响矩阵 X，采用最大值法对矩阵进行标准化处理，得到标准化直接影响矩阵 N。

$$N = X / \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (1)$$

(2) 计算综合影响矩阵 T，其中 I 为单位矩阵。在此基础上，进一步计算每个指标的影响度 R（行和）、被影响度 D（列和）、中心度 R+D 与原因为度 R-D。最后，将各指标的中心度与原因度绘制在二维平面上，形成因果图。

3.2 基于 ANP 的指标权重计算

在明确指标关系后，本文采用 ANP 方法对各指标进行成对比较与一致性检验，量化其权重，为后续综合评价提供依据。

(1) 基于网络结构，采用 1 - 9 标度法对相关指标之间的重要性进行成对比较（当元素 i 相对元素 j 更重要时，赋值为 1、3、5、7、9，若相对不重要则取其倒数，见表 2）。

本文邀请专家对各一级与二级指标分别进行评分，整理后形成判断矩阵。对矩阵进行一致性检验（CR<0.1）以保证结果的合理性。

表 2 相对重要性等级表

标度	含义	标度	含义
1	i 与 j 相同重要	9	i 比 j 极其重要
3	i 比 j 略重要	2, 4, 6, 8	介于相邻标度之间
5	i 比 j 明显重要	各标度倒数	i 与 j 交换位置
7	i 比 j 重要得多		

(2) 构建并计算超矩阵。判断矩阵一致性检验通过后构建超矩阵，对超矩阵进行处理得到极限超矩阵，极限超矩阵任意一列项就是各指标的权重，用向量 W 表示。将各个元素极限矩阵求得的权重与准则层权重相乘得到最终权重。

3.3 模糊综合评价法进行综合评价

在完成权重计算后，本文采用模糊综合评价法，将专家评价与权重体系结合，构建隶属度矩阵并加权计算，以确定整体风险水平。

(1) 根据指标体系构建因素集，并结合 ANP 计算结果确定各指标的权重，同时设定评语集，依据评价对象的特点与实际情况的不同可以把评价标准设置为不同等级，本文将评语集设为 V={高, 较高, 中等, 较低, 低}，各评价等级分别对应分值（见表 3）。

表 3 评价等级分值区间表

评价标准	高	较高	中等	较低	低
量化分值	95	85	70	50	20
分值区间	(90 , 100]	(80, 90]	(60, 80]	(40, 60]	(0, 40]

(2) 邀请多位专家依据设定的评语集对各指标进行评分，并据此构建模糊关系矩阵。随后采用加权平均法将权重集与模糊矩阵逐层运算，计算各层隶属度值 Z，并通过隶属度与评语集加权求得综合得分，从而确定各指标及总体的风险等级。得分计算公式如下：

$$Y_{ij} = [z_{ij}^1 \ z_{ij}^2 \ z_{ij}^3 \ \dots \ z_{ij}^n] \times [95 \ 85 \ 70 \ 50 \ 20]^T \quad (2)$$

4 实证分析

在前文构建的风险评价指标体系及 DEMATEL-ANP-FCE 风险评价模型的基础上, 本文选取某智能建造工程项目为案例, 运用专家问卷数据进行风险实证分析, 以验证所构建模型的合理性与有效性。

4.1 确定风险评价指标影响关系

首先, 邀请 15 位专家填写调查表, 整理调查问卷得到直接影响矩阵, 计算出综合影响矩阵, 并进一步计算出二级指

标中心度与原因度, 以识别关键驱动因素, 并得出因果关系图 (见图 1)。

4.2 计算风险评价指标权重

基于 ANP 方法, 本文依据 DEMATEL 分析得到的综合影响矩阵, 确定风险因素间的关联关系, 并利用 yaanp 软件构建网络层次模型 (见图 2), 实现模型建构与权重计算。

根据指标关联关系设计问卷, 邀请专家评分形成判断矩阵, 经一致性检验后计算极限超矩阵, 得到二级指标权重, 并汇总形成整体评价指标体系权重表 (见表 6)。

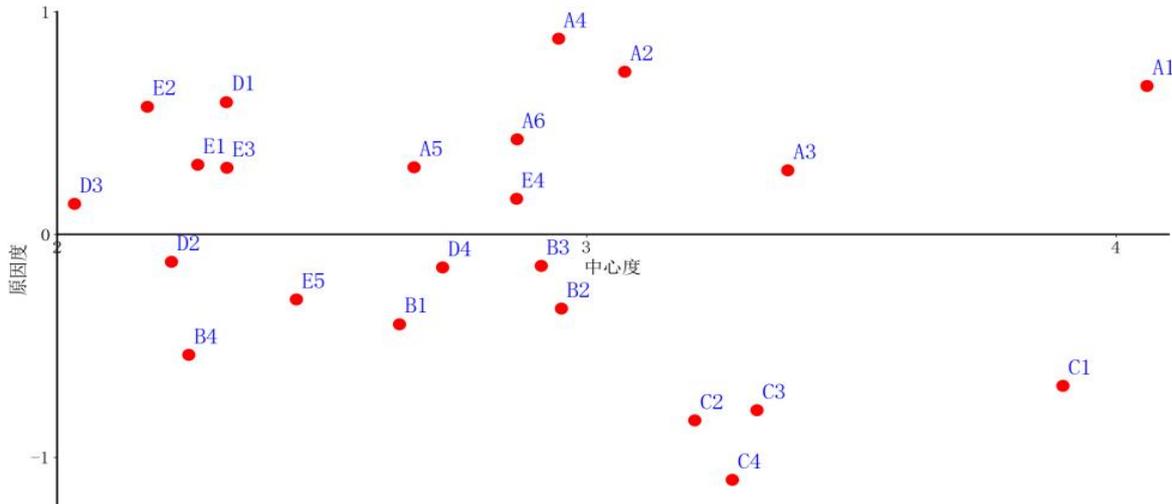


图 1 因果关系图

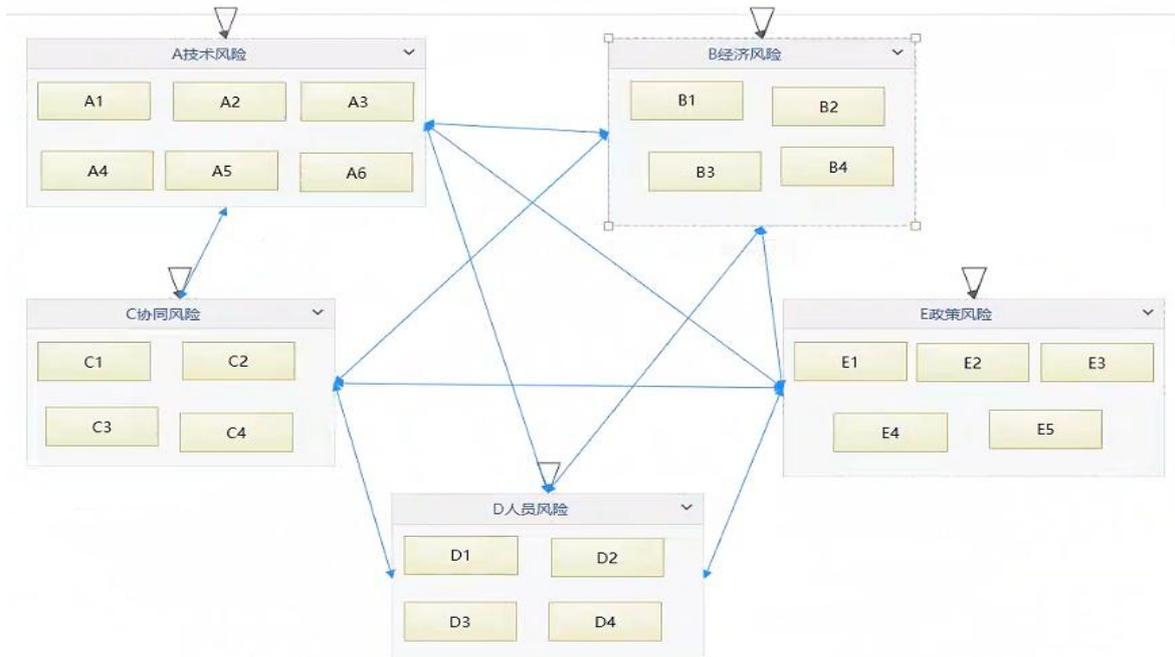


图 2 网络层关系

表 6 指标权重汇总表

一级指标	权重	二级指标	相对权重	权重
A 技术风险	0.4513	A1 技术的成熟度	0.3520	0.1588
		A2 数据接口兼容性	0.2717	0.1226
		A3 数据的交互度	0.1283	0.0579
		A4 技术具备的难度	0.1148	0.0518
		A5 数据质量和准确性问题	0.0494	0.0223
		A6 信息储存安全风险	0.0838	0.0378
B 经济风险	0.0636	B1 前期成本投入高	0.1211	0.0077
		B2 收益的不确定性	0.4465	0.0284
		B3 新增加的额外成本	0.2814	0.0179
		B4 软件维护费用	0.1509	0.0096
C 协同风险	0.1255	C1 管理模式问题	0.6470	0.0812
		C2 参建方的沟通协作能力	0.1371	0.0172
		C3 技术管理难度	0.1689	0.0212
		C4 企业内部驱动力	0.0470	0.0059
D 人员风险	0.1122	D1 技术人员短缺	0.5665	0.0635
		D2 人员项目经验不足	0.1160	0.013
		D3 操作人员回避新技术	0.1427	0.016
		D4 人员技术素养	0.1748	0.0196
E 政策风险	0.2474	E1 政策支持不足	0.0853	0.0211
		E2 地方政府政策落实不到位	0.1875	0.0464
		E3 相关法律法规的完备性	0.2206	0.0546
		E4 行业规范标准的完善度	0.4663	0.1154
		E5 相关政策的导向性	0.0404	0.01

4.3 整体模糊综合评价

在设定评价等级与标准的基础上,邀请 15 位具有相关经验的专家对施工项目智能建造技术应用风险进行评价,根据每个指标评价人数与总人数的比值得到各项指标的隶属度,根据统计结果对一级指标 A 技术风险进行模糊评价,其权重集和模糊矩阵分别为 W_A 和 F_A

$$W_A = [0.352 \quad 0.2717 \quad 0.1283 \quad 0.1148 \quad 0.0494 \quad 0.0838]$$

$$F_A = \begin{bmatrix} 0.4444 & 0.2222 & 0.1667 & 0.1111 & 0.0556 \\ 0.6667 & 0.1667 & 0.1111 & 0.0556 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3889 & 0.2222 & 0.2222 & 0.1111 & 0.0556 \\ 0.3333 & 0.3889 & 0.1111 & 0.1111 & 0.0556 \\ 0.7222 & 0.1111 & 0.1111 & 0.0556 & 0 \end{bmatrix}$$

计算 A 的隶属度

$$Z_A = W_A \times F_A = [0.5875 \quad 0.1775 \quad 0.1292 \quad 0.0771 \quad 0.0287]$$

计算 A 的得分

$$Y_A = Z_A \times V = [0.5875 \quad 0.1775 \quad 0.1292 \quad 0.0771 \quad 0.0287] \times \begin{bmatrix} 95 \\ 85 \\ 70 \\ 50 \\ 20 \end{bmatrix} = 84.37$$

同理可得其他因素的隶属度和得分,根据统计结果对目标层 T 进行模糊评价,其权重集和模糊矩阵分别为 W_T 和 F_T

$$W_T = [0.4513 \quad 0.0636 \quad 0.1255 \quad 0.1122 \quad 0.2474]$$

表 10 二级指标对应评语和得分

$$F_T = \begin{bmatrix} 0.5875 & 0.1775 & 0.1292 & 0.0771 & 0.0287 \\ 0.4303 & 0.2459 & 0.1411 & 0.0956 & 0.0872 \\ 0.5886 & 0.088 & 0.0948 & 0.139 & 0.0896 \\ 0.8011 & 0.0802 & 0.0594 & 0.032 & 0.0274 \\ 0.5838 & 0.189 & 0.1305 & 0.06 & 0.0369 \end{bmatrix}$$

计算 T 的隶属度

$$Z_T = W_T \times F_T = [0.6007 \quad 0.1625 \quad 0.1181 \quad 0.0768 \quad 0.0419]$$

计算 T 的得分

$$Y_T = Z_T \times V = [0.6007 \quad 0.1625 \quad 0.1181 \quad 0.0768 \quad 0.0419] \times \begin{bmatrix} 95 \\ 85 \\ 70 \\ 50 \\ 20 \end{bmatrix} = 83.82$$

根据上述计算结果可得各项指标的模糊综合评价结果,具体见下表:

表 8 目标层对应评语和得分

目标层	得分	评语结果
T	83.82	较高

表 9 一级指标对应评语和得分

一级指标	得分	评语结果
A 技术风险	84.37	较高
B 经济风险	78.18	中等
C 协同风险	78.78	中等
D 人员风险	89.23	较高
E 政策风险	84.4	较高

二级指标	得分	评语结果	二级指标	得分	评语结果
A1 技术的成熟度	79.44	中等	D1 技术人员短缺	95.0	高
A2 数据接口兼容性	88.06	较高	D2 人员项目经验不足	89.45	较高
A3 数据的交互度	95.0	高	D3 操作人员回避新技术	79.44	中等
A4 技术具备的难度	78.05	中等	D4 人员技术素养	78.34	中等
A5 数据质量和准确性问题	79.16	中等	E1 政策支持不足	67.22	中等
A6 信息储存安全风险	88.61	较高	E2 地方政府政策落实不到位	74.73	中等
B1 前期成本投入高	81.95	较高	E3 相关法律法规的完备性	82.22	较高
B2 收益的不确定性	90.84	高	E4 行业规范标准的完善度	92.5	高
B3 新增加的额外成本	66.67	中等	E5 相关政策的导向性	83.61	较高
B4 软件维护费用	59.17	较低			
C1 管理模式问题	90.56	高			
C2 参建方的沟通协作能力	61.67	中等			
C3 技术管理难度	52.22	较低			
C4 企业内部驱动力	61.95	中等			

根据模糊综合评价结果，施工项目智能建造技术应用的整体风险得分为 83.82，等级为“较高”，说明整体风险水平不可忽视。在一级指标中，人员风险、政策风险和技术风险处于较高水平，是主要风险来源；而经济风险和协同风险则相对较低，但仍存在不确定性。

5 研究结论与展望

本文基于改进的 TOE 框架，从技术、经济、协同、人员与政策五个维度构建了施工项目智能建造技术应用的系统化风险评价体系。结合 DEMATEL、ANP 与模糊综合评价方法，建立了多方法融合的量化分析模型，实现了风险因素的因果识别、权重确定与综合评估。研究结果揭示了智能建造应用中主要风险来源及其相互作用，为施工企业制定风险防控策略和政府部门优化政策环境提供了科学依据。

研究仍存在一定局限：数据样本主要来源于单一案例与专家问卷，结论的普适性有待进一步验证；同时模型以静态分析为主，尚未充分反映风险的动态变化。未来可结合大数据与人工智能技术，构建动态监测与预测模型，并在不同地区、不同类型项目中开展对比研究，以进一步完善施工项目智能建造风险评价体系。

[参考文献]

[1] 罗丹, 黄晓琴, 冷费贤, 等. 数字孪生在交通基础设施智能建造中的应用与挑战[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(3): 33-64.

[2] Yongha Lee, Inhan Kim, Jungsik Choi. Development of BIM-Based Risk Rating Estimation Automation and a Design-for-Safety Review System[J]. Applied Sciences,

2020, 10(11).

[3] Kim D, Yoo T, Tran S V T, et al. Automated safety risk assessment framework by integrating safety regulation and 4D BIM-based rule modeling[J]. Buildings, 2024, 14(8): 2529.

[4] Namian M, Khalid M, Wang G, et al. Revealing safety risks of unmanned aerial vehicles in construction[J]. Transportation research record, 2021, 2675(11): 334-347.

[5] Jeelani I, Gheisari M. Safety challenges of UAV integration in the construction industry: Focusing on workers at height[J]. University of Florida, 2022.

[6] 谭铮. 工业制造智能机器人风险评估方法与策略——评《机器人交互安全技术》[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(05): 263.

[7] 应玲娟, 陈良华, 盖志海, 等. 电力企业数字化转型对 ESG 绩效的影响效应——基于 TOE 理论视角的分析[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版), 2025, 27(04): 121-132+160.

[8] 张慧颖, 吴童祯, 康开荣, 等. 数字治理生态何以赋能政商关系亲清化发展? ——基于 TOE 框架的组态研究[J/OL]. 电子政务, 2025, 1-16.

[9] 郝雅立, 阿忠萍, 胡峰. 基于 TOE 理论框架的事故灾难情报失误问题研究[J/OL]. 情报理论与实践, 2025, 1-14.

2024 年河北省省级研究生专业学位教学案例(库)立项建设项目, 项目编号: KCJSZ2024108, 项目名称: 数字建造教学案例(库)建设。