

数智化转型背景下建筑企业AI安全技术采纳的组态路径研究

陶庆浩, 孙继德

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2026年4月19日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月19日

摘要

建筑业安全管理正经历由传统模式向人工智能(AI)驱动的数智化转型, 但企业实践中普遍面临“高预期、低渗透”的采纳鸿沟。现有基于微观个体视角的理论难以解释复杂工程情境下的技术采纳逻辑。鉴于此, 本研究引入“技术-组织-环境”(TOE)分析框架, 重构了建筑施工企业AI安全技术采纳的影响因素模型。基于232份企业有效样本数据, 运用模糊集定性比较分析(fsQCA)方法探究多维前因条件驱动技术采纳的复杂联动机制。研究表明: 任何单一因素均无法构成高水平采纳的必要条件; 驱动高水平采纳存在三条“殊途同归”的典型组态路径, 即“技术系统驱动型”、“高管-易用双核驱动型”以及“低阻力-管理护航型”。研究揭示了多重约束下建筑企业的技术决策逻辑, 为推动行业数智化转型及政府制定分类治理政策提供了坚实的理论依据与实践指导。

关键词

施工安全, 人工智能, 技术采纳, TOE框架, fsQCA

Research on the Configurational Paths of AI Safety Technology Adoption in Construction Enterprises under the Background of Digital and Intelligent Transformation

Qinghao Tao, Jide Sun

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: April 19, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 19, 2026

Abstract

Safety management in the construction industry is undergoing a digital and intelligent transformation from traditional models to artificial intelligence (AI)-driven approaches. However, enterprises commonly face an adoption chasm characterized by “high expectations and low penetration” in practice. Existing theories based on a micro-individual perspective struggle to explain the logic of technology adoption within complex engineering contexts. In view of this, this study introduces the “Technology-Organization-Environment” (TOE) framework to reconstruct the influencing factor model for AI safety technology adoption in construction enterprises. Based on valid sample data from 232 enterprises, the fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA) method is applied to explore the complex linkage mechanisms of multi-dimensional antecedent conditions driving technology adoption. The results indicate that: no single factor constitutes a necessary condition for high-level adoption; there are three typical configurational paths that drive high-level adoption, representing “different routes to the same destination”, namely the “technology-system driven” path, the “top management-ease of use dual-core driven” path, and the “low resistance-management safeguarded” path. This study reveals the technology decision-making logic of construction enterprises under multiple constraints, providing a solid theoretical foundation and practical guidance for promoting the industry’s digital and intelligent transformation and for the government to formulate classified governance policies.

Keywords

Construction Safety, Artificial Intelligence, Technology Adoption, TOE Framework, fsQCA

Copyright © 2026 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

建筑行业作为国民经济的支柱产业, 长期以来面临着生产管理粗放、安全事故频发等问题。在工程项目规模庞大、工序交叠的动态环境下, 过度依赖“人工巡查 + 被动防护”的传统安全管理模式, 已暴露出严重的时空盲区与管理滞后性, 难以从根本上扭转事故高频并发的严峻形势[1]。随着“智能建造”战略的深入推进, 以人工智能(AI)、物联网(IoT)和数字孪生为代表的新一代信息技术, 正在重塑施工安全管理的底层逻辑。AI 技术的深度赋能, 使得安全管理从“事后追责”向“事前预防”、从“单点感知”向“多模态智能决策”的跨越成为可能[2] [3]。

然而, 尽管 AI 安全技术展现出了巨大潜能, 但在行业实践中却陷入了“高预期、低渗透”的采纳问题[4]。大量理论与行业观察表明, 新兴技术的应用多局限于少数资金雄厚的标杆示范项目, 广泛的规模化落地仍面临深层阻力[5]。与传统标准 IT 软件不同, AI 安全预警系统(如计算机视觉违规抓拍、高危工况数字孪生推演)具有极高的技术复杂度与集成难度。一方面, 其部署通常伴随着高昂的软硬件初始投资、数据隐私隐患以及算法“黑盒”带来的责任界定难题; 另一方面, 新技术的引入必然触及现有组织权力架构与业务流程的重组, 对企业的财务储备、跨部门协同及一线人员的数字素养提出了严苛考验。这种“技术高门槛”与“高沉没成本”并存的矛盾, 使得建筑企业对 AI 技术的采纳早已超越了单纯的产品采购范畴, 演变为一项受多重因素约束的复杂战略决策[6]。

现有的技术采纳研究在解释这一现象时存在明显的理论局限。传统的经典模型多根植于个体心理学视角,侧重于评估用户对技术的“感知有用性”与“感知易用性”。这些模型隐含着“自愿使用”的前提假设,难以契合建筑施工领域高度规制化、项目制协同以及带有强制性特征的行业情境[7]。在复杂的工程实践中,单凭技术的先进性不足以促成实质性的落地,企业决策必然受到组织内部资源禀赋的牵制,以及外部政策导向与同业竞争压力的深刻倒逼。鉴于此,本研究引入“技术-组织-环境”(TOE)[8]分析框架,从更宏观、系统的视角重构建筑企业AI安全技术采纳的影响因素模型。

在方法论层面,传统基于线性回归的定量研究往往局限于探究单一变量的“净效应”,忽视了管理现实中多维因素的协同与互补关系[9]。为此,本研究结合模糊集定性比较分析(fsQCA)方法,从组态视角探究内外部前因条件如何通过“非线性联动”共同驱动企业的高水平采纳行为。本研究旨在揭示复杂情境下企业技术决策的“殊途同归”机理,为政府制定分类治理政策及施工企业规划差异化转型路径提供坚实的理论支撑与实证依据。

2. 基于 TOE 框架的影响因素识别

经典技术采纳模型(如 TAM [10]、TPB [11]及 UTAUT [12])虽在个体层面具备较高解释力,但难以解释施工企业受制于内部权力架构与外部市场生态的系统性决策行为。为突破单一技术维度的理论桎梏,本研究采用 Tornatzky 和 Fleischer 提出的“技术-组织-环境”(TOE)框架作为基础,将组织支撑能力与外部环境等多重情境因素系统融入。结合施工安全管理的行业特质与 AI 技术的系统属性,本研究从技术、组织、环境三个维度,完整识别出影响企业采纳决策的 10 项关键前因变量,以更精准地解构复杂工程情境下企业的技术决策机制。

2.1. 技术层面的驱动因素识别

技术维度主要关注技术本身的属性及其与企业现有业务流程的契合度。在评估 AI 安全管理技术时,企业本质上是在进行一场收益与代价的综合考量。本研究将技术维度的影响因素细化为感知有用性、感知易用性、感知成本与感知风险四个变量。

感知有用性源于 TAM 模型,指用户认为采用某项特定技术能够提升其工作绩效的程度[10]。在施工安全管理情境下,感知有用性直接映射为 AI 技术在解决行业痛点上的实际效能。传统的安全管理高度依赖人工巡查,存在明显的时空盲区。AI 技术(如计算机视觉识别、多模态风险预测)能够实现全天候、无死角的违规抓拍与隐患前置预警,这不仅能显著降低现场安全事故的发生率,还能大幅提升安全管理流程的执行效率。感知易用性同样是 TAM 模型的核心变量,指用户认为使用某项技术的便捷程度[10]。建筑施工现场具有劳动力密集且受教育程度参差不齐的现实特征,如果引入的 AI 安全系统操作繁琐、界面复杂,将显著增加一线人员的使用负担,极易在基层引发隐性抵触。反之,若技术具备极高的易用性,能够无缝融入现有的施工管理流程,将大幅降低组织内部的学习成本与执行阻力。

根据感知价值理论,经济主体在做出采纳决策时必然会权衡技术投资的回报率,这就涉及对成本的考量[13]。AI 安全管理技术的部署往往需要建立在庞大的硬件基础(如高清 AI 摄像头集群、海量物联网传感器)之上,企业不仅需要承担高昂的初始采购与定制开发成本,还需面对长期的系统运维与云服务器租赁(SaaS 服务费)等费用。对于利润空间本就微薄、现金流紧张的中小型施工企业而言,这种显性与隐性的高昂经济代价构成了技术采纳的首要壁垒[14]。

此外, AI 技术固有的系统性不确定性,衍生出企业在采纳过程中不容忽视的感知风险[15]。AI 底层深度学习算法存在一定的“黑盒”特性,在复杂恶劣的施工环境下可能出现识别精度下降或系统崩溃,一旦导致误报或漏报,可能引发严重的管理混乱与责任推诿;另一方面,海量采集现场敏感数据也使得

企业面临潜在的数据泄露与隐私合规风险。对这些风险的负面预期,会严重削弱企业对新技术的信任度,进而阻碍采纳决策。

2.2. 组织维度因素识别

建筑行业的行为高度依赖于组织化的运作模式,因此企业对新兴技术的采纳决策必然深受组织本身固有特征的深刻影响。人工智能技术的引入并非简单的技术迭代,而是对传统管理模式与业务流程的全面革新。本研究立足于建筑施工企业的实际组织情境,将组织层面的影响因素细化为高层管理支持、组织创新文化与组织资源准备三个关键变量。

在企业采纳创新技术的进程中,高层管理支持发挥着无可替代的“自上而下”破局作用。建筑施工企业通常具有科层制管理色彩浓厚的特征,重大技术变革的推进高度依赖决策层的权威意志。依据高层梯队理论,AI技术的引入往往伴随着既有工作流程的重组与部门利益的重新分配[16]。面对这些潜在的组织震荡与内部摩擦,高层管理者是否愿意展现出坚定的战略定力,提供强有力的权威背书、预算倾斜与试错兜底,将直接决定技术推行的成败[17]。

组织创新文化作为企业长期积淀的隐性规则与软实力,深刻塑造着员工对颠覆性新事物的认知与态度。根据动态能力理论,在面临AI技术带来的未知挑战与学习门槛时,拥有包容试错、鼓励跨部门协作创新文化的企业,往往展现出更强的环境适应力与技术吸收能力[18]。这种“软性”的文化土壤能够自内而外地显著提升组织整体对新技术的实际采纳意愿。

组织资源准备涵盖了企业引入复杂AI系统所必须具备的综合实力:在财务层面,要求企业具备充沛的资金储备以应对高昂的软硬件初始投入;在基础设施层面,要求项目现场已提前布局并完善视频监控网络等底层IT设施;在人力资本层面,更离不开兼具建筑施工经验与数字化素养的专业技术团队。基于资源基础观,资金链的紧绷与复合型数字人才的匮乏,往往是阻碍众多传统中小型施工单位跨越技术鸿沟的致命短板[19][20]。

2.3. 环境维度因素识别

环境维度强调企业所处的外部宏观规制与微观业务生态对其技术采纳决策的制约与倒逼作用。依据DiMaggio与Powell提出的新制度主义理论,组织的决策行为为受到来自外部环境的强制性、模仿性与规范性压力的深远影响[21]。本研究结合建筑业高度依赖项目制与政策强管制的现实情境,将环境维度的影响因素归纳为政府支持、竞争压力与合作方支持三个关键变量。

建筑业作为国民经济的传统支柱,始终是一个受宏观政策与政府监管高度约束的行业。在此背景下,政府在企业技术采纳的初期往往扮演着“破冰者”与“护航者”的双重角色,这构成了新制度主义中的强制性压力与合法性机制[22]。一方面,政府出台的财政补贴或智能建造研发奖励等实质性激励措施,能够直接缓解企业引入昂贵AI系统的资金负担,有效降低试错成本;另一方面,官方层面发布的智慧工地建设标准与数字化应用指南,为企业在技术选型中提供了清晰的路径参考,极大降低了前期的不确定性。

在市场化程度极高的建筑行业,同质化竞争异常激烈,这种市场环境带来的竞争压力构成了理论中的模仿性压力[23]。一旦行业内的主要竞争对手率先引入了先进的AI安全管理技术并实现了显著的降本增效,甚至将其转化为招投标过程中的技术加分项与核心竞争力,其他同业企业便会迅速产生“避免落后”的生存焦虑。为了维持现有的市场地位,企业往往会被迫打破原有的管理舒适区,快速模仿并跟进采纳同类新兴技术。

此外,建筑工程项目本质上是一个高度复杂的生态系统,这种紧密交织的业务生态网络构成了技术采纳的规范性压力。如果在实际工程项目中,占据主导地位的业主方或总承包方对智慧工地建设提出了

明确的合规要求, 大力支持使用 AI 技术, 并愿意在数据接口、平台对接上提供实质性的协作, 将显著打破企业间的信息孤岛, 降低技术整合的难度[24]。合作方积极的配合态度能够极大增强企业采纳新技术的应用信心与落地可行性。

2.4. 组态视角的理论模型构建

综合上述分析, 本研究基于 TOE 框架系统识别了影响建筑施工企业 AI 安全技术采纳的 10 项前因变量。其中, 技术维度包含感知有用性、感知易用性、感知成本与感知风险; 组织维度包含高层管理支持、组织创新文化与组织资源准备; 环境维度包含政府支持、竞争压力与合作方支持。本研究的理论框架模型见图 1。

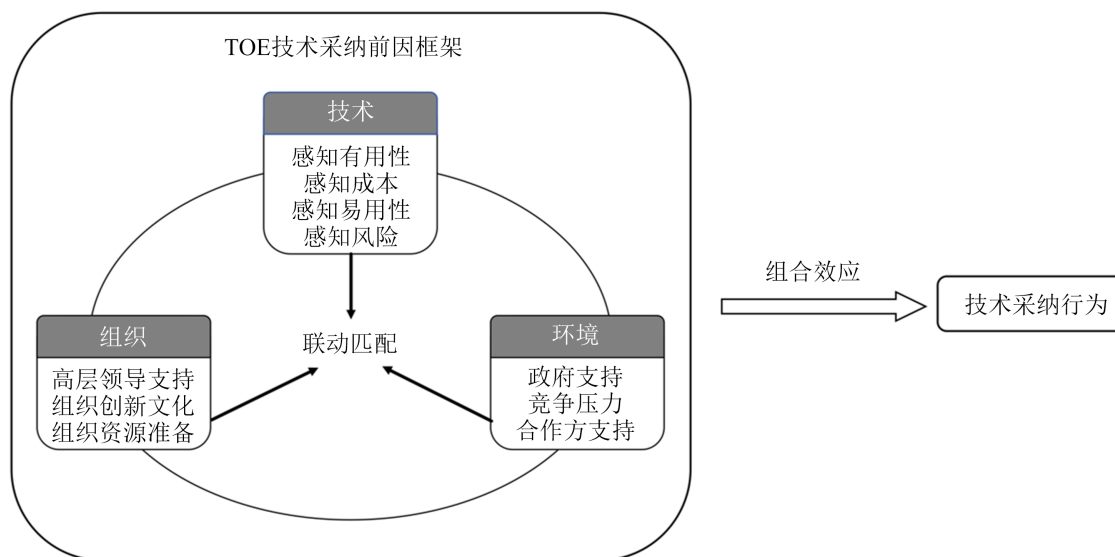


Figure 1. Theoretical framework diagram of technology adoption
图 1. 技术采纳理论框架图

3. 研究设计与数据收集

3.1. 量表设计

本研究的数据收集主要通过结构化问卷调查开展。问卷量表的开发严格立足于现有国内外成熟文献(如 TAM、UTAUT 等经典量表), 并结合施工安全管理与人工智能技术的特性进行了情境化修订, 所有题项均采用 Likert 5 级计分法。

1) 技术维度。基于 Davis [10]、Xue 等[25]、Ahuja 等[26]的研究, 确定了测度感知有用性的 3 个题项, 代表性题项为“引入 AI 安全管理技术能有效提升施工现场的安全监测能力”; 基于 Davis [10]、Xue 等[25]、Ahuja 等[26]的研究, 确定了测度感知易用性的 3 个题项, 代表性题项为“在施工过程中引入 AI 安全管理技术不会显著增加管理和操作负担”; 基于 Ahuja 等[26]、Pan 等[27]、蔡雯怡[28]的研究, 确定了测度感知成本的 3 个题项, 代表性题项为“购买和部署施工安全 AI 技术的初始投资非常高”; 基于 Cheng 等[29]、Abioye 等[2]、Oesterreich 等[15]的研究, 确定了测度感知风险的 4 个题项, 代表性题项为“AI 安全管理技术在识别准确性或系统稳定性方面存在风险”。

2) 组织维度。基于 Ahuja 等[26]、Xue 等[25]、Zhang 等[30]的研究, 确定了测度高层管理支持的 3 个题项, 代表性题项为“我单位高层明确支持推进 AI 技术在安全管理中的应用”; 基于 Xue 等[25]、蔡

雯怡[26]、吴芊凝[31]的研究, 确定了测度组织创新文化的 3 个题项, 代表性题项为“我单位具有创新性和灵活性, 能根据市场环境变化迅速做出战略调整”; 基于 Xue 等[25]、Zhang 等[30]的研究, 确定了测度组织资源准备的 3 个题项, 代表性题项为“我单位有专业的技术团队支持 AI 安全管理技术的应用与优化”。

3) 环境维度。基于 Pan 等[27]、蔡雯怡[28]的研究, 确定了测度政府支持的 3 个题项, 代表性题项为“政府出台的政策鼓励施工单位引入 AI 安全管理技术”; 基于 Pan 等[27]、Zhang 等[30]的研究, 确定了测度竞争压力的 3 个题项, 代表性题项为“我单位在行业内的主要竞争对手, 已经开始使用或正在计划使用 AI 技术来提升他们的施工安全表现”; 基于 Zhang 等[30]、Xue 等[25]的研究, 确定了测度合作方支持的 3 个题项, 代表性题项为“与我单位合作的总包、分包或监理单位积极支持在项目中引入 AI 安全管理技术”。

4) 结果变量。基于 Zhang 等[30]、Venkatesh 等[12]的研究, 确定了测度采纳行为和采纳意愿的 4 个题项, 采纳行为代表性题项为“我单位已经在施工安全管理中尝试使用 AI 相关技术”, 采纳意愿的代表性题项为“我单位计划在未来采用或进一步扩大 AI 技术在施工安全管理方面的应用”。

3.2. 数据收集与分析

数据收集工作分为预调研与正式调研两阶段。正式调研主要面向建筑施工企业中具备技术决策或实际使用经验的一线管理人员及中高层管理者。本次调研共回收问卷 298 份, 剔除作答时间过短、呈现明显规律性及关键信息缺失的无效问卷后, 最终获得有效问卷 232 份(有效回收率 77.85%)。样本特征统计见表 1, 样本企业覆盖了国有企业(62.5%)与民营企业(31.5%), 业务类型涵盖房建、市政与基础设施等主流领域, 样本分布具有良好的异质性与行业代表性, 符合 fsQCA 对中小样本规模的统计学要求。

Table 1. Statistical analysis of sample characteristics

表 1. 样本特征统计分析表

测量题项	条目	数量	占比
职位/岗位	一线管理人员(如安全员、施工员等)	97	41.80%
	中层管理人员(如项目副经理、安全主管等)	24	10.30%
	高层管理人员(如项目经理、总工等)	61	26.30%
	企业总部管理人员(如技术中心、安全部等)	21	9.10%
	其他	29	12.50%
工作年限	1 年以下	53	22.80%
	1~3 年	90	38.80%
	3~5 年	53	22.80%
	5~10 年	28	12.10%
	10 年以上	8	3.40%
您所在企业的性质	国有企业	145	62.50%
	民营企业	73	31.50%
	合资/外资企业	4	1.70%
	其他	10	4.30%

续表

企业的主要业务类型	房建工程	50	21.70%
	市政工程	150	64.50%
	基础设施工程(如道路、桥梁、轨道交通等)	32	13.80%
	其他	0	0.00%
企业规模	小型企业(员工 < 300 人或年产值 < 3 亿元)	117	50.40%
	中型企业(员工 300~1000 人或年产值 3~10 亿元)	45	19.40%
	大型企业(员工 > 1000 人或年产值 > 10 亿元)	70	30.20%

3.3. 数据信效度检验

利用 SPSS 软件对收集到的 232 份有效样本进行信度与效度评估。检验结果见表 2, 所有潜变量的 Cronbach's α 系数均处于 0.744 至 0.911 之间, 组合信度(CR)位于 0.855 至 0.944 之间, 远高于 0.7 的判定基准, 表明量表具有极高的内部一致性。在效度检验方面, 各题项的标准因子载荷均大于 0.7, 且所有潜变量的平均方差提取量(AVE)均分布在 0.663 至 0.873 之间, 显著超过 0.5 的底线标准。综合表明, 本研究的测量工具在信度与效度上均达到严谨的统计要求, 为后续的组态分析奠定了可靠的数据底座。

Table 2. Statistical analysis of reliability and validity of variables

表 2. 变量信效度统计分析表

变量	AVE	CR	Cronbach's α
感知有用性	0.689	0.869	0.772
感知易用性	0.739	0.895	0.822
感知成本	0.663	0.855	0.744
感知风险	0.694	0.901	0.850
高层领导支持	0.85	0.944	0.911
组织创新文化	0.773	0.911	0.850
组织资源准备	0.773	0.911	0.851
组织资源准备	0.773	0.911	0.851
政府支持	0.832	0.937	0.898
竞争压力	0.746	0.898	0.828
合作方支持	0.775	0.912	0.854
采纳意愿	0.838	0.912	0.806
采纳行为	0.873	0.932	0.853

3.4. 变量降维与模糊集校准

在进入 fsQCA 组态分析前, 必须对数据进行方法学处理。若直接将前文识别出的 10 个微观变量投入真值表运算, 会产生 2 的 10 次方(1024)种逻辑组合, 在现有 232 个样本的规模下, 将引发严重的“有限多样性”问题, 导致模型输出大量缺乏实际经验支撑的逻辑余项[32]。因此, 遵循 QCA 最佳实践规范, 本研究以经典管理理论为依据, 采用等权重算术平均法对底层内涵相近的微观变量进行了“理论降维”与合并, 具体降维与合并逻辑见表 3。

Table 3. Dimension reduction and aggregation mapping of fsQCA variables
表 3. fsQCA 变量降维与聚合映射表

维度	原始微观变量 (量表测度项)	聚合后宏观条件 (fsQCA 前因)	聚合的理论依据与逻辑说明
技术	感知成本、感知风险	感知阻碍(BARRIER)	基于创新阻力理论, 将经济代价与系统风险合并, 反映技术采纳过程中的负向阻力[33]
	感知有用性	感知有用性(PU)	属于 TAM 理论的核心驱动因素, 具有较强的独立性, 故予以保留
	感知易用性	感知易用性(PE)	体现技术操作的难易程度, 作为 TAM 核心变量独立保留
组织	组织创新文化、组织资源准备	组织准备度(ORG_READ)	参考 Iacovou 等人的观点, 将文化软环境与资源硬条件整合, 反映企业内部的基础水平[34]
	高层领导支持	高层领导支持(MS)	考虑到建筑行业自上而下的管理特点, 该变量对决策有关键影响, 独立保留
环境	竞争压力、合作方支持	外部市场压力(EXT_PRESS)	依据新制度主义理论, 同业模仿压力与市场规范压力同属外部驱动力[21]
	政府支持	政府支持(GS)	鉴于建筑业受政策管制程度高, 政府引导具有独特作用, 作为外部强制因素独立保留
结果变量	采纳意愿、采纳行为	综合采纳水平(ADOPT)	综合考量企业从主观意向到实际操作的转化, 反映技术落地的整体状态

经过降维处理, 本研究最终确立了 7 个核心前因条件。随后, 采用直接校准法(Direct Calibration) [35], 结合样本数据的客观分布, 将 7 个前因条件与结果变量(技术采纳水平)的 5 点量表得分转换为 0 至 1 之间的模糊隶属度。校准锚点严格设定为样本的 95%分位数(完全隶属)、50%分位数(交叉点, 并添加 0.001 微调以规避样本丢失)和 5%分位数(完全不隶属), 从而完成了从连续数据向集合数据的逻辑转换。各变量具体校准点见表 4。

Table 4. Statistical table of variable calibration points
表 4. 变量校准点统计表

变量类型	条件/结果变量	完全隶属阈值	交叉点阈值	完全不隶属阈值
技术维度	感知有用性(PU)	5.00	4.33	3.33
	感知易用性(PE)	5.00	4.00	2.67
	感知阻碍(BARRIER)	5.00	3.88	2.69
组织维度	高层领导支持(MS)	5.00	4.00	2.52
	组织准备度(ORG_READ)	5.00	3.83	2.67
环境维度	政府支持(GS)	5.00	3.67	2.00
	外部市场压力(EXT_PRESS)	5.00	3.83	2.67
结果变量	综合采纳水平(AM)	5.00	4.00	2.75

4. 组态分析

在完成变量降维与模糊集校准后, 本研究运用 R 软件对 232 个企业样本进行组态运算。与传统回归分析着眼于单个变量的“净效应”不同, 组态分析旨在揭示前因条件之间的复杂交互作用, 即探究技术、组织与环境要素如何通过不同的排列组合形成驱动企业高水平技术采纳的充分路径。分析过程严格遵循必要性检验与充分性分析的标准操作范式。

4.1. 前因条件的必要性检验

必要性分析是组态分析的先决步骤, 其核心目的在于判定是否存在某一个单一的前因条件, 构成了结果发生(即高水平技术采纳)的必经之路。在集合论的语境下, 如果结果集合是某一条件集合的子集, 且该条件的一致性(Consistency)分数大于 0.9 的学术通用阈值[36], 则可认定该条件为必要条件。本研究分别对 7 个前因条件及其非集(采用逻辑非符号“~”表示)进行了必要性检测, 分析结果见表 5。检验结果显示, 在所有被检测的条件变量中, 单一条件的一致性最高值仅为 0.864 (组织准备度), 均未能跨越 0.9 的判定阈值。这一统计学结果确凿地表明, 建筑施工企业对 AI 安全管理技术的采纳并非由任何单一因素(如单纯的技术有用或单纯的高层支持)所能独立决定的。这种单一必要条件的缺失, 进一步印证了技术采纳是一个受多重条件交织影响的复杂管理现象, 充分证明了本研究从“多因并发”的组态视角展开深层分析的必要性及科学性。

Table 5. Analysis of necessity for conditional variables
表 5. 条件变量必要性分析表

条件变量	一致性	覆盖度	条件变量	一致性	覆盖度
PU	0.767	0.808	~PU	0.531	0.526
PE	0.764	0.803	~PE	0.554	0.548
BARRIER	0.719	0.698	~BARRIER	0.635	0.681
MS	0.793	0.885	~MS	0.553	0.519
ORG_READ	0.864	0.855	~ORG_READ	0.494	0.52
GS	0.843	0.818	~GS	0.482	0.519
EXT_PRESS	0.843	0.867	~EXT_PRESS	0.498	0.504

4.2. 真值表构建与充分性条件组态分析

充分性分析旨在识别出能够稳定导致高水平技术采纳发生的前因条件组态。该过程的基础是构建包含所有逻辑可能性的真值表(Truth Table)。为剔除缺乏实证案例支撑的逻辑组合或偶然的样本噪音, 本研究对真值表进行了严格的参数设定: 结合本研究的中等样本规模(232 份), 将案例频数阈值(n.cut)设定为 3; 为确保组态对结果具有极强的充分性解释力, 将原始一致性阈值(incl.cut)严格设定为 0.80; 同时, 为规避组态存在同时导致结果发生与不发生的逻辑悖论, 将 PRI 一致性指标阈值设定为 0.70。经过布尔逻辑最小化运算[37], 模型输出了复杂解、中间解和简约解。本研究遵循 Ragin 的组态分析规范, 汇报最具理论解释力的中间解, 并通过嵌套比对中间解与简约解, 界定出在组态中发挥决定性作用的“核心条件”以及发挥辅助作用的“边缘条件”。运算结果显示, 共有 3 条充分条件组态路径能够驱动建筑企业实现高水平的 AI 技术采纳, 模型的总体一致性(Solution Consistency)高达 0.956, 总体覆盖度(Solution Coverage)达到 0.673, 表明这三条路径对实证样本具有极强的解释力与拟合度。

4.3. 组态路径解析

根据各条路径中核心与边缘条件的嵌套构成特征, 本研究将这 3 条组态路径归纳为三种典型的“殊途同归”模式, 深刻揭示了不同资源禀赋与情境下的企业数字化转型逻辑。具体结果汇总于表 6。

Table 6. Results of configurational analysis

表 6. 组态分析结果表

TOE 维度	前因条件	组态 1 (C1)	组态 2 (C2)	组态 3 (C3)
技术(T)	感知有用性(PU)	●		●
	感知易用性(PE)	●	●	
	感知阻碍(BARRIER)			⊗
组织(O)	高层领导支持(MS)		●	●
	组织准备度(ORG_READ)	●	●	●
环境(E)	政府支持(GS)	●	●	●
	外部市场压力(EXT_PRESS)	●	●	●
模型拟合指标	一致性(Consistency)	0.972	0.968	0.973
	原始覆盖度(Raw Coverage)	0.564	0.599	0.382
	唯一覆盖度(Unique Cov)	0.024	0.059	0.050
总体拟合指标	总体一致性(Solution Consistency)		0.956	
	总体覆盖度(Solution Coverage)		0.673	

注: ●代表核心条件存在; ⊗代表核心条件缺席; ●代表边缘条件存在; 空白代表该条件在当前组态中无显著影响。

第一条路径为“技术系统驱动型”采纳模式。在该组态中, 感知有用性与感知易用性同时作为核心条件存在, 而组织准备度、政府支持及外部市场压力作为边缘条件发挥辅助赋能作用。这一路径的内在逻辑在于“全要素共振下的自发渗透”。当 AI 安全系统在技术端展现出卓越的场景适配性与精准度(有用), 且操作交互被设计得极其简便、学习成本极低(易用)时, 技术本身便具备了强大的内生驱动力。此时, 若企业内部拥有充沛的资金与数字化基础设施储备, 且外部面临强烈的政策引导与同侪竞争压力, 即便缺乏高层管理者的强力行政干预, 新技术依然能够通过业务流自下而上地自然渗透并被广泛采纳。这种模式高度契合于数字化底座稳固、人才储备充沛且市场敏锐度极高的行业领军企业(如大型建筑央企), 技术红利是其转型的第一牵引力。

第二条路径为“高管-易用双核驱动型”采纳模式。该组态表明, 高层管理支持与感知易用性构成了技术采纳的双核心驱动力, 组织准备度及外部双重压力(政府与市场)作为边缘条件辅助。依据高层梯队理论与组织行为学逻辑, 这一路径深刻描绘了“权力依附与认知降维”的行政推进机制。在技术引入的初期, 基层管理者与一线工人往往受制于视野局限, 难以充分认知复杂 AI 算法的长期系统性效益(即有用性在此组态中并未显现为核心)。此时, 打破组织惯性的唯一破局点在于高层领导展现出不容置疑的推行意志, 通过强制性的资源调配与考核制度施压。尤为关键的是, 这种高压推行必须配合技术工具的“极简化”处理(高易用性)。极低的操作门槛有效消解了基层的本领恐慌与隐性抵制, 使得技术得以在行政指令的护航下强行跨越采纳鸿沟。该路径是目前处于数字化转型爬坡期、组织架构庞大且带有强科层制色彩的大中型传统施工承包商最主流的转型缩影。

第三条路径为“低阻力-管理护航型”采纳模式。该组态的显著特征是,感知阻碍的缺失(即实质性消除阻力)与高层管理支持共同发挥了双核心驱动作用,而感知有用性、组织准备度及外部环境压力则作为边缘条件存在。结合创新阻力理论,建筑业具有极高的成本敏感性与极低的安全容错底线。针对风险厌恶型的施工企业,促发其采纳颠覆性技术的首要前提并非技术的绝对先进性,而是“安全感”的建立。通过引入轻量化的 SaaS 云服务租赁模式或争取政府全额定点补贴,企业实质性地削减了高昂的初始资金投入与系统崩溃风险(即阻碍消减)。在彻底排除了经济与合规的后顾之忧后,辅以高层管理者的责任兜底与协调,企业才敢于放开手脚,真正去追求和兑现 AI 技术的本质安全价值(边缘存在的有用性)。这一模式生动刻画了区域中型民营承包商在资金受限与风险规避双重约束下,“先控险、后图强”的稳健型技术扩散机制。

5. 结论与管理启示

5.1. 主要研究结论

本研究基于 TOE 框架与 fsQCA 方法,对建筑施工企业采纳人工智能安全管理技术的复杂机理进行了实证探究,得出以下主要结论:第一,建筑企业对 AI 安全技术的采纳并非由单一维度的因素决定。无论是单纯的技术先进性、高层领导的行政命令,还是外部政策的施压,均无法单独构成高水平采纳的必要条件。技术的落地是多维条件非线性联动的“化学反应”。第二,驱动高水平技术采纳存在三条“殊途同归”的组态路径,即“技术系统驱动型”、“高管-易用双核驱动型”以及“低阻力-管理护航型”。这表明不同资源禀赋、不同所有制背景的施工企业,完全可以通过差异化的内外部条件组合,跨越采纳鸿沟,实现数智化转型。

5.2. 理论贡献

本研究的理论贡献主要体现在:一是突破了传统技术采纳研究中基于还原论的单一变量“净效应”分析局限,引入组态视角,揭示了前因条件之间的互补与替代关系,丰富了组织层面技术采纳的理论深度;二是证实了“感知易用性”与“高层管理支持”在打破建筑业传统组织惯性中的核心杠杆与权变作用,为理解高风险、重资产行业的新技术扩散规律提供了新的理论透镜。

5.3. 管理实践启示

本研究提供如下管理启示:1) 技术供应商应从“唯算法论”转向“极致易用”。研发不仅要追求底层算法精密,更应注重前端交互的轻量化,降低一线人员的学习成本与认知负荷,以打破基层隐性抵触。2) 建筑施工企业应精准锚定转型路径。头部央企可依托高组织准备度走“技术系统驱动”路线;资源受限的中小民营企业则应优先采取“避险-价值驱动”路线,通过租赁 SaaS 等方式降低试错风险,并在高管支持下稳健推进。3) 政府与行业主管部门应实施“分类治理”。对中小企业注重“清障兜底”(如提供设备贴息和明确免责边界);对头部企业侧重“生态培育”(如树立示范项目和完善招投标标准),倒逼技术向全行业外溢。

5.4. 研究局限与展望

本研究尚存一定局限性,未来可从以下三方面深化拓展:第一,样本与数据的局限。本研究样本中国企占比偏高,且依赖单一来源的主观问卷,存在共同方法偏差风险。未来研究可通过分层抽样优化样本代表性,并结合客观二手数据(如企业财报的信息化支出、研发投入等)进行多源数据交叉验证。第二,静态视角的局限。本研究基于横截面数据,但技术采纳是动态过程。未来研究可进一步细化结果变量,

区分“采纳意愿”与“采纳行为”，或划分为“局部试点”与“全面推广”等阶段，并建议引入面板数据定性比较分析(TSQCA)动态追踪技术扩散机理。第三，情境边界的局限。本模型未纳入总分包博弈等细粒度供应链变量。鉴于建筑业高度碎片化与多方协同特征，未来研究应充分考量供应链多主体间的互动关系对技术采纳的深层影响。

参考文献

- [1] 卢春房, 伍军, 王孟钧, 等. 高质量发展背景下中国建筑企业核心竞争力提升研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 79-86.
- [2] Abioye, S.O., Oyedele, L.O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J.M., Bilal, M., *et al.* (2021) Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities and Future Challenges. *Journal of Building Engineering*, **44**, Article 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103299>
- [3] Pan, Y. and Zhang, L. (2021) Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends. *Automation in Construction*, **122**, Article 103517. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- [4] Darko, A., Chan, A.P.C., Adabre, M.A., Edwards, D.J., Hosseini, M.R. and Ameyaw, E.E. (2020) Artificial Intelligence in the AEC Industry: Scientometric Analysis and Visualization of Research Activities. *Automation in Construction*, **112**, Article 103081. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>
- [5] 陈珂, 丁烈云. 我国智能建造关键领域技术发展的战略思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 64-70.
- [6] Nnaji, C. and Karakhan, A.A. (2020) Technologies for Safety and Health Management in Construction: Current Use, Implementation Benefits and Limitations, and Adoption Barriers. *Journal of Building Engineering*, **29**, Article 101212. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101212>
- [7] Chen, Y., Yin, Y., Browne, G.J., *et al.* (2019) Adoption of Building Information Modeling in Chinese Construction Industry: The Technology-Organization-Environment Framework. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **26**, 1878-1898. <https://doi.org/10.1108/ecam-11-2017-0246>
- [8] Tornatzky, L.G. and Fleischer, M. (1990) *The Processes of Technological Innovation*. Lexington Books.
- [9] 杜运周, 贾良定. 组态视角与定性比较分析(QCA): 管理学研究的一项新道路[J]. 管理世界, 2017(6): 155-167.
- [10] Davis, F.D. (1989) Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, **13**, 319-340. <https://doi.org/10.2307/249008>
- [11] Ajzen, I. (1991) The Theory of Planned Behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, **50**, 179-211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-t](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-t)
- [12] Venkatesh, V., Morris, M.G., Davis, G.B. and Davis, F.D. (2003) User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, **27**, 425-478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
- [13] Zeithaml, V.A. (1988) Consumer Perceptions of Price, Quality, and Value: A Means-End Model and Synthesis of Evidence. *Journal of Marketing*, **52**, 2-22. <https://doi.org/10.1177/002224298805200302>
- [14] Yap, J.B.H., Lam, C.G.Y., Skitmore, M. and Talebian, N. (2022) Barriers to the Adoption of New Safety Technologies in Construction: A Developing Country Context. *Journal of Civil Engineering and Management*, **28**, 120-133. <https://doi.org/10.3846/jcem.2022.16014>
- [15] Oesterreich, T.D. and Teuteberg, F. (2016) Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0: A Triangulation Approach and Elements of a Research Agenda for the Construction Industry. *Computers in Industry*, **83**, 121-139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>
- [16] Hambrick, D.C. and Mason, P.A. (1984) Upper Echelons: The Organization as a Reflection of Its Top Managers. *The Academy of Management Review*, **9**, 193-206. <https://doi.org/10.2307/258434>
- [17] Won, J., Lee, G., Dossick, C. and Messner, J. (2013) Where to Focus for Successful Adoption of Building Information Modeling within Organization. *Journal of Construction Engineering and Management*, **139**, Article 04013014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000731](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000731)
- [18] Teece, D.J., Pisano, G. and Shuen, A. (1997) Dynamic Capabilities and Strategic Management. *Strategic Management Journal*, **18**, 509-533. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0266\(199708\)18:7<509::aid-smj882>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0266(199708)18:7<509::aid-smj882>3.0.co;2-z)
- [19] Barney, J. (1991) Firm Resources and Sustained Competitive Advantage. *Journal of Management*, **17**, 99-120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>
- [20] Thong, J.Y.L. (1999) An Integrated Model of Information Systems Adoption in Small Businesses. *Journal of Management Information Systems*, **15**, 187-214. <https://doi.org/10.1080/07421222.1999.11518227>

- [21] DiMaggio, P.J. and Powell, W.W. (1983) The Iron Cage Revisited: Institutional Isomorphism and Collective Rationality in Organizational Fields. *American Sociological Review*, **48**, 147-160. <https://doi.org/10.2307/2095101>
- [22] Wang, Y.M., Wang, Y.S. and Yang, Y.F. (2010) Understanding the Determinants of RFID Adoption in the Manufacturing Industry. *Technological Forecasting and Social Change*, **77**, 803-815. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.03.006>
- [23] Zhu, K., Kraemer, K.L. and Xu, S. (2006) The Process of Innovation Assimilation by Firms in Different Countries: A Technology Diffusion Perspective on E-Business. *Management Science*, **52**, 1557-1576. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0487>
- [24] Cao, D., Wang, G., Li, H., Skitmore, M., Huang, T. and Zhang, W. (2015) Practices and Effectiveness of Building Information Modelling in Construction Projects in China. *Automation in Construction*, **49**, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.014>
- [25] Xue, H., Zhang, S., Yin, Y., *et al.* (2022) Effects of Organizational Elements on Emerging Information and Construction Management Technology Implementation in Building Professionals. *Journal of Management in Engineering*, **38**, Article 04021074.
- [26] Ahuja, R., Sawhney, A., Jain, M., Arif, M. and Rakshit, S. (2018) Factors Influencing BIM Adoption in Emerging Markets—The Case of India. *International Journal of Construction Management*, **20**, 65-76. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1462445>
- [27] Pan, M. and Pan, W. (2019) Determinants of Adoption of Robotics in Building Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, **145**, Article 04019054.
- [28] 蔡雯怡. 建筑施工企业智能建造技术采纳意愿影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2021.
- [29] Cheng, M., Chong, H.Y., Xu, Y., *et al.* (2024) Novel Blockchain Deep Learning Framework to Ensure Video Security and Lightweight Storage for Construction Safety Management. *Advanced Engineering Informatics*, **60**, Article 102434.
- [30] Zhang, J., Yin, J., Li, H., *et al.* (2022) A New Perspective to Evaluate the Antecedent Path of Adoption of Digital Technologies in Major Projects of Construction Industry: A Case Study in China. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **29**, 2636-2661.
- [31] 吴芊凝. 人工智能在智慧工地中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.
- [32] Rihoux, B. and Ragin, C.C. (2009) Configurational Comparative Methods: Qualitative Comparative Analysis (QCA) and Related Techniques. Sage Publications.
- [33] Ram, S. and Sheth, J.N. (1989) Consumer Resistance to Innovations: The Marketing Problem and Its Solutions. *Journal of Consumer Marketing*, **6**, 5-14. <https://doi.org/10.1108/eum000000002542>
- [34] Iacovou, C.L., Benbasat, I. and Dexter, A.S. (1995) Electronic Data Interchange and Small Organizations: Adoption and Impact of Technology. *MIS Quarterly*, **19**, 465-485. <https://doi.org/10.2307/249629>
- [35] Ragin, C.C. (2008) Redesigning Social Inquiry: Fuzzy Sets and beyond. University of Chicago Press.
- [36] Ragin, C.C. (2006) Set Relations in Social Research: Evaluating Their Consistency and Coverage. *Political Analysis*, **14**, 291-310. <https://doi.org/10.1093/pan/mpi019>
- [37] Fiss, P.C. (2011) Building Better Causal Theories: A Fuzzy Set Approach to Typologies in Organization Research. *Academy of Management Journal*, **54**, 393-420. <https://doi.org/10.5465/amj.2011.60263120>