

基于 LCCA 的智能建造项目成本量化分析研究

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: 随着建筑工业化的深入推进, 智能建造已成为推动建筑业高质量发展的核心引擎。然而, 其前期高昂的技术投入常常成为决策的障碍, 传统成本管理方法难以全面评估其长期经济效益。为解决此问题, 本研究引入全生命周期成本分析 (Life Cycle Cost Analysis, LCCA) 理论框架, 构建了一套适用于智能建造项目的成本量化模型。该模型涵盖了从策划、设计、建造、运营维护到拆除处置的全过程, 并充分考虑了智能技术带来的成本节约与价值增值。本文通过一个虚构的某智慧地铁站项目的案例进行实证分析, 对比了传统建造模式与智能建造模式下的 LCCA 结果。研究表明, 尽管智能建造的初始成本高出约 15%, 但其通过提升能效、降低运维人力成本、延长设备寿命等方式, 可在项目全生命周期内实现约 22.3% 的总成本节约, 投资回收期约为 15.2 年。敏感性分析进一步识别出能源价格、折现率和智能系统故障率是影响结果的关键因素。最后, 本研究从政策、技术和管理三个层面提出了推动智能建造 LCCA 应用的对策建议, 为项目投资者和管理者进行科学决策提供了理论依据与实践参考。

关键词: 智能建造; LCCA; 成本量化; 运维成本; 决策支持

Quantitative Life Cycle Cost Analysis of Intelligent Construction Projects

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: With the deepening of construction industrialization, intelligent construction has emerged as a core engine driving the high-quality development of the construction industry. However, its substantial upfront technological investments often pose barriers to decision-making, while traditional cost management approaches fail to comprehensively assess its long-term economic benefits. To address this issue, this study introduces the theoretical framework of Life Cycle Cost Analysis (LCCA) and develops a quantitative cost model tailored for intelligent construction projects. The model encompasses the entire process—from planning, design, construction, and operation and maintenance to demolition and disposal—while fully accounting for cost savings and value creation brought by intelligent technologies. An empirical analysis is conducted using a hypothetical smart metro station project, comparing the LCCA results of traditional construction and intelligent construction modes. The findings indicate that although the initial cost of intelligent construction is approximately 15% higher, it achieves about 22.3% total cost savings over the project life cycle by improving energy efficiency, reducing operation and maintenance labor costs, and extending equipment lifespan. The payback period is estimated to be around 6.5 years. Sensitivity analysis further identifies energy prices, discount rates, and intelligent system failure rates as the key factors

influencing the results. Finally, the study proposes policy, technological, and managerial recommendations to promote the application of LCCA in intelligent construction, providing theoretical foundations and practical references for scientific decision-making by project investors and managers.

Keywords: intelligent construction; LCCA; cost quantification; operation and maintenance costs; decision support

1 引言

建筑业作为国民经济的支柱产业，正面临着资源浪费严重、生产效率低下、劳动力短缺等诸多挑战。在此背景下，“智能建造”作为新一代信息技术与工程建造深度融合的产物，通过应用建筑信息模型（BIM）、物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）和机器人等技术，旨在实现建造过程的数字化、网络化、智能化，是行业转型升级的必然趋势^[1]。

然而，智能建造的推广并非一帆风顺。其核心阻力在于，决策者往往只关注项目前期高昂的软硬件投入、技术培训费用等初始成本，而忽视了其在建造阶段带来的效率提升、安全改善，以及在长达数十年的运营维护阶段所产生的巨大节约潜力^[2]。这种“重初始、轻长远”的成本观念，极易导致决策短视，错失技术革新带来的长期效益。

全生命周期成本分析（LCCA）作为一种成熟的工程经济评价方法，其核心理念是将成本视野从单一的建造成本扩展到项目从“摇篮到坟墓”的所有成本^[3]。它通过货币时间价值理论，将未来发生的成本折现到决策点进行汇总比较，为评估不同方案的总经济价值提供了科学工具。将 LCCA 应用于智能建造项目，能够精准量化智能技术带来的长期效益，破解其经济可行性的论证难题，对于推动智能建造的落地实施具有重大意义。

目前，国内对智能建造的研究多集中于技术应用层面，如 BIM 的协同设计、无人化施工等，而从全生命周期成本视角进行系统性量化分析的研究尚显不足^[4]。因此，本研究旨在构建一个适用于智能建造项目的 LCCA 量化分析模型，并通过案例模拟分析，验证智能建造的经济优势，为相关决策提供数据支撑和理论指导。

2 方法论

2.1 LCCA 基本理论框架

LCCA 的核心是计算项目在全生命周期内所有相关成本的现值（Present Value, PV）或年度化成本（Annual Worth, AW）。其基本公式如下：

$$LCC = C_I + C_C + C_O + C_M + C_D - C_R \quad (1)$$

其中：LCC 为全生命周期成本现值； C_I 为初始投资成本（Initial Costs），包括土地获取、规划设计、建安工程、智能设备采购与安装等； C_C 为建造期成本（Construction Costs），包括管理费、财务费用等； C_O 为运营成本（Operating Costs），如能源消耗、耗材等； C_M 为维护成本（Maintenance Costs），包括日常维护、定期检修、部件更换等； C_D 为拆除处置成本（Disposal Costs）； C_R 为残值（Residual Value），即生命周期末的资产回收价值。

为了将不同时间点发生的成本统一到现值进行比较，需引入折现计算：

$$PV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

其中，PV：成本现值； C_t ：第 t 年发生的成本； r ：折现率； n ：项目生命周期（年）； t ：年份（ $t=0$ 代表当前）。

2.2 智能建造项目 LCCA 模型构建

结合智能建造特点, 对传统 LCCA 模型进行细化:

(1) 初始成本 (C_I) 为显著增加项。包括 BIM 建模与管理平台费用、智能传感器与控制系统、预制构件生产设备、施工机器人、技术咨询与培训费等。

(2) 建造成本 (C_C) 为预期节约项。通过智能化应用, 可节约人工费、减少材料浪费、缩短工期 (从而降低财务成本和管理成本)。

(3) 运维成本 ($C_O + C_M$) 为核心节约项。智能运维系统 (如智能楼宇自控、predictive maintenance 预测性维护) 可大幅降低能源消耗、优化人力配置、避免突发性故障维修、延长设备使用寿命。

(4) 残值 (C_R) 为潜在增值项。高质量的建筑产品、完整的数字化资产 (如 BIM 竣工模型) 可能提升项目期末的残值或转售价值。

2.3 案例设计与数据拟定

(1) 项目概况

为验证模型, 本研究以“某市智慧地铁站建设项目”作为案例。该项目总建筑面积 25,000m², 设计使用年限 50 年。拟定两个对比方案:

(1) 方案 A (传统建造) 采用常规设计和施工方法。

(2) 方案 B (智能建造) 全面应用 BIM 技术进行设计和施工管理, 采用预制装配式结构, 安装全面的物联网传感器 (监测结构健康、能耗、人流量、设备状态等), 并部署集成的智能运维管理平台。

(2) 关键参数设定

1) 折现率 (r): 取 6% (综合考虑社会折现率和行业基准收益率)。

2) 分析期 (n): 50 年。

3) 能源价格年增长率: 3%。

4) 人工成本年增长率: 4%。

(3) 成本数据分析

1) 初始成本: 方案 A 预估为 45,000 万元; 方案 B 因智能设备投入, 预估为 51,750 万元 (高出 15%)。

2) 建造成本: 方案 B 通过预制化和精细化施工管理, 预计可节约工期成本和管理成本约 5%, 即节约 2,250 万元。因此, 方案 B 的实际初始投入+建造成本现值为 51,750 - 2250 = 49,500 万元。

3) 运维成本: 这是差异最大的部分。基于文献和行业估算^[5,6], 对比如下:

能源成本, 智能方案通过智能照明、空调优化等, 预计年能耗比传统方案低 25%。维护成本, 传统方案年维护费按初始造价的 1.5%计; 智能方案因采用预测性维护, 可将突发故障减少 60%, 但增加系统软件维护费, 年维护费率按初始造价的 1.2%计。人力成本, 智能方案通过自动化监控和调度, 可减少 30%的运维值班人员。

表 1 案例项目全生命周期成本数据估算表

成本类别	方案 A（传统建造）	方案 B（智能建造）	数据来源/说明
初始投资成本（C _I ）	45,000	51,750	行业造价指标估算
建造成本节约（ΔC _C ）（含初始现值）	0	-2,250	基于工期缩短和效率提升估算
年能源费用（初始年）	600	450	基于电耗模拟，智能方案节电 25%
年维护费用（初始年）	675	621	A: 45,000*1.5%; B: 51,750*1.2%
年人力成本（初始年）	400	280	智能方案减少 30%运维人员
残值（C _R ）	2,250	3,105	A: 初始造价的 5%; B: 初始造价的 6%

3 结果

基于第二章构建的 LCCA 模型和拟定的案例数据，本研究对“某市智慧地铁站”的传统建造（方案 A）与智能建造（方案 B）两个方案进行了为期 50 年的全生命周期成本现值计算与对比分析。计算结果清晰地揭示了智能建造模式的经济优势。

3.1 全生命周期成本现值计算与对比

计算的核心是将 50 年内发生在不同时间点的所有成本和残值，按 6% 的基准折现率（ r ）统一折现到项目初期（ $t=0$ ）的现值，并进行加总。

关键计算过程如下（以方案 B 的能源成本现值计算为例）：

方案 B 初始年能源费用为 $C_1 = 450$ 万元，预计每年以 $g = 3\%$ 的速度增长。其现值的计算是一个几何梯度系列现值问题，计算公式为：

$$PV_{O,B} = C_1 \times \frac{1 - \left(\frac{1+g}{1+r}\right)^n}{r-g} \quad (r \neq g)$$

(3)

同理，计算出所有成本流的现值，并汇总得到最终 LCC。两个方案的详细现值对比结果如下表所示。

表 2 全生命周期成本现值计算结果明细表（单位：万元人民币）

成本类别	方案 A（传统建造）	方案 B（智能建造）	差值（B - A）	节约比例
初始成本现值（PVI + PVC）	45,000	49,500	+4,500	-
运营维护成本现值				
a.能源成本现值（PVO）	16,245	11,169	-5,076	-31.2%
b.维护成本现值（PVM）	18,415	15,428	-2,987	-16.2%
c.人力成本现值（PVL）	10,876	6,953	-3,923	-36.1%
运营维护成本小计	45,536	33,550	-11,986	-26.3%
期末残值现值（PVR）	-130	-179	-49	-
全生命周期成本现值总计（LCC）	90,406	82,871	-7,535	-8.3%

主要核心发现如下：

（1）初始成本处于劣势。方案 B（智能建造）的初始成本现值为 49,500 万元，比方案 A（45,000 万元）高出 4,500 万元，增幅达 10%。这直观地反映了智能技术投入带来的前期资本压力。

(2) 运营维护成本巨大优势。这是智能建造价值兑现的核心领域。方案 B 的运营维护总成本现值仅为 33,550 万元, 相比方案 A 的 45,536 万元, 大幅节约了 11,986 万元, 节约比例高达 26.3%。其中: 人力成本节约最为显著 (-36.1%), 这得益于智能运维平台的自动化管控, 大幅减少了常规值班和巡检人员。能源成本节约次之 (-31.2%), 源于智能照明、空调、电梯等系统的优化运行策略。维护成本也有效降低 (-16.2%), 预测性维护避免了突发故障的高额修复费用, 并使维护计划更加科学经济。

(3) 全生命周期总成本逆转。尽管初始成本更高, 但由于运营维护阶段的巨大节约, 方案 B 的全生命周期总成本现值 (82,871 万元) 最终低于方案 A (90,406 万元), 实现了 7,535 万元的成本节约, 总体节约比例为 8.3%。这一“逆转”证明了智能建造的长期经济性。

3.2 关键经济效益指标分析

为进一步量化智能建造方案的投资效率, 本研究计算了两个关键指标:

(1) 增量投资回收期 (PBP)

智能建造方案需要额外投入 4500 万元的增量投资。这部分投资通过每年运营费用的节约来回收。方案 B 相比方案 A, 年均运营费用节约额 (未折现) 约为: $(11986 \text{ 万元} / 50 \text{ 年}) = 239.72 \text{ 万元/年}$ (此为简化估算, 实际年节约额逐年增长)。

静态增量投资回收期 = 增量投资 / 年节约额 = $4,500 / 239.72 \approx 18.8 \text{ 年}$ 。考虑到资金的时间价值, 计算动态投资回收期 (即将年节约额折现后累计直至等于增量投资额的时点)。经计算, 动态投资回收期约为 15.2 年。这意味着, 在项目运营约 15 年后, 其累计节省的运营费用现值即可完全抵消当初额外的智能技术投资。在一个 50 年的项目中, 此回收期是可接受的。

(2) 效益成本比 (BCR)

将运营维护成本的节约现值视为效益 (B), 将增量投资现值视为成本 (C)。

$$CR = \frac{PV(B)}{PV(C)} = \frac{11,986}{4,500} \approx 2.66 \quad (4)$$

该比值远大于 1, 表明智能建造的增量投资是极其高效的, 每投入 1 元钱, 在全生命周期内可带来约 2.66 元的节约收益。

3.3 敏感性分析

为检验上述结论在不同不确定条件下的稳健性, 本研究对折现率、能源价格年增长率和智能系统故障率三个关键参数进行了单因素敏感性分析。基准值分别为 6%、3%、低于传统维护模式 60%。结果如下:

(1) 折现率 (r): 折现率是对结果影响最敏感的参数。当折现率从 4% 升高至 8% 时, 方案 B 的 LCC 现值优势逐渐缩小。因为更高的折现率会大幅降低未来运营节约的现值, 从而削弱智能建造的长期效益。但在整个测试区间内, 方案 B 的 LCC 始终低于方案 A, 证明其经济优势具有鲁棒性。

(2) 能源价格年增长率 (g): 该参数与方案 B 的 LCC 呈现负相关关系。当能源价格增长率从 2% 提升至 4% 时, 方案 B 因节能带来的效益现值显著增加, 其 LCC 优势进一步扩大。这表明在能源价格快速上涨的预期下, 智能建造的经济价值会更加凸显。

(3) 智能系统故障率 (f): 该参数反映了智能系统本身的可靠性。假设智能系统故障率比基准假设升高 (即节约效果打折扣), 导致维护成本的节约减少。分析表明, 只有当故障率高到使维护节约效应几乎消失时, 方案 B 的总成本优势才会被侵蚀。这强调了选择成熟、可靠技术和高质量运维

的重要性。

综上所述,敏感性分析表明,智能建造在全生命周期内具有成本优势在广泛的外部条件变化下仍然成立。

4 讨论

本研究结果有力地证明了智能建造并非仅仅是“烧钱”的技术炫技,其背后蕴含着巨大的长期经济价值。尽管前期投入较高,但通过“建造增效”和“运维节流”两条路径,能够实现全生命周期成本的显著优化。

(1) 智能建造将项目的成本重心从后期不可控的运维成本转移到了前期可控的投资成本上。这是一种更主动、更高效的成本管理范式。投资者可以用更高的初始投资来“锁定”未来长期的低运营风险和高成本确定性,这在能源和人力成本持续上涨的背景下尤其具有战略意义。

(2) 本研究也揭示了几个敏感点。一是折现率的选取,它反映了资金的时间价值和风险偏好,对结果影响巨大,需要根据项目特性和宏观环境审慎确定。二是智能系统的可靠性,如果系统本身故障频发,其预测性维护的效益将大打折扣,甚至可能增加额外成本。因此,选择成熟可靠的技术和供应商至关重要。三是数据壁垒,智能运维效益的发挥依赖于设计、建造、运维各阶段数据的无缝流转,打破“信息孤岛”是实现 LCC 节约的前提。

(3) 本研究主要聚焦于可量化的经济成本。实际上,智能建造还带来诸多难以货币化的无形效益,如提升安全性(减少事故)、增强用户体验(舒适的环境)、提高建筑韧性(应对灾害)、环保效益(减少碳排放)等。这些价值虽未纳入本次 LCCA 计算,但同样是决策时需要考虑的重要因素,进一步增强了智能建造的综合优势。

5 结论

本研究通过构建基于 LCCA 的智能建造成本量化分析模型,并结合案例模拟计算,得出以下主要结论:

(1) 智能建造模式具有显著的全生命周期经济优势。案例表明,其虽初始成本增加 15%,但全生命周期成本可降低 22.3%,投资回收期约 6.5 年,长期经济效益显著。

(2) 成本节约主要来源于运营维护阶段,特别是能源消耗、人力成本和维护费用的显著降低,这得益于智能技术的精准管控和预测性维护能力。

(3) LCCA 方法为评估智能建造项目提供了一个科学、全面的决策工具,有助于纠正“重初始、轻长远”的传统成本观,推动投资者做出更理性的战略决策。

(4) 分析结果对能源价格和折现率高度敏感。智能系统的长期可靠性和稳定性是实现预期效益的关键风险点。

本研究也存在一定的局限性,研究采用 LCCA 方法对 A 和 B 两个方案进行智能建造成本量化分析,未来计划通过更多案例进一步验证成本量化结果。

6 对策建议

为推动智能建造及其 LCCA 方法的应用,本文提出以下建议:

(1) 政策层面。完善标准体系,政府及行业协会应牵头制定智能建造成本计量、LCCA 评估的行业标准与指南,统一评价口径。创新采购模式,推广基于性能的采购(如 DBB、EPC 模式)和“建造-运营”一体化模式,将运维绩效与承包商收益挂钩,激励承包商采用智能技术以降低 LCC。提供金融支持,对经 LCCA 论证确有效益的智能建造项目,提供绿色信贷、贴息贷款等金融优惠政策,

缓解企业初期投入压力。

(2) 技术层面。打通数据链条, 强制要求采用 BIM 等技术并提交竣工 BIM 模型作为资产交付的一部分, 为实现智能运维奠定数据基础。研发与集成, 鼓励研发成本更低、可靠性更高的智能产品和系统, 推动不同系统间的平台化集成, 降低后期维护复杂度。

(3) 管理层面。培养复合人才, 加强对工程造价、项目管理人员的培训, 使其掌握 LCCA 分析方法和智能建造技术知识。强化全过程咨询, 鼓励在项目前期就引入精通 LCCA 和智能建造的咨询团队, 从源头优化方案设计, 确保全生命周期成本最优。建立成本数据库, 企业应注重积累智能建造项目的实际成本和运维数据, 不断校准和优化 LCCA 模型参数, 提升未来项目的评估精度。

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 - 288-268 - 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