

道路桥梁工程全生命周期成本分析与优化决策研究

杜泳诗

广州市花都区道路养护中心 广东 广州 510000

摘要: 道路桥梁工程全生命周期成本分析涵盖规划、设计、施工、运营、维护至拆除各阶段费用总和。通过量化初始建设、运营维护、拆除及环境、社会等成本,结合蒙特卡洛模拟、BIM技术等工具构建动态成本模型,并运用净现值、内部收益率等指标评估成本效益。研究提出标准化设计、耐久性优化、绿色施工及预防性维护等策略,旨在实现全生命周期成本最小化与效益最大化,为工程决策提供科学依据。

关键词: 道路桥梁工程;全生命周期;成本分析;优化决策

引言: 随着城市化进程加速,道路桥梁工程作为交通基础设施的核心,其建设与运维成本日益攀升。传统成本分析多聚焦于施工阶段,忽视了全生命周期内设计、运营、维护及拆除等环节的隐性成本与长期效益,导致资源浪费与效益失衡。为此,本研究立足全生命周期视角,系统剖析各阶段成本构成与驱动因素,结合动态预测模型与多目标优化方法,探索成本优化策略,旨在为道路桥梁工程提供科学决策框架,推动行业可持续发展。

1 道路桥梁工程全生命周期成本理论框架

1.1 全生命周期成本概念界定

(1) 定义与内涵: 道路桥梁工程全生命周期成本指工程从规划立项开始,历经设计、施工建造、运营使用、维护养护直至最终拆除处置的全阶段所产生的各类成本总和。该概念突破传统仅关注施工阶段成本的局限,强调各阶段成本的关联性与整体性,通过全流程成本管控实现工程价值最大化。(2) 成本分类: 主要分为四类,直接成本含材料、设备、人工等直接投入;间接成本涵盖管理、监理、税费等间接支出;环境成本指工程对生态环境造成的影响及治理费用;社会成本包含交通管制、周边居民干扰等衍生成本。

1.2 成本影响因素分析

(1) 内部因素: 材料选择直接决定成本基数与耐久性;设计标准影响工程规模与施工难度;施工质量把控不当易引发返工,增加额外成本。(2) 外部因素: 政策法规调整可能提高环保、安全标准;自然灾害会造成工程损毁与修复成本;交通流量变化影响维护频率与运营投入。

1.3 全生命周期成本分析流程

(1) 目标设定: 明确成本分析的核心目标,如最小化全生命周期成本、优化成本分配等,同时界定分析范

围和时间跨度。(2) 成本分解: 将全生命周期成本按阶段、成本类型进行细化拆分,形成层级清晰的成本分解结构。(3) 数据采集: 收集各阶段成本相关数据,包括历史工程数据、市场价格信息、政策文件等,确保数据的准确性和完整性。(4) 模型构建: 基于采集的数据构建成本分析模型,量化各因素对成本的影响,预测全生命周期成本走势。(5) 结果评价: 对成本分析结果进行综合评估,对比不同方案的成本效益,为工程决策提供科学依据^[1]。

2 道路桥梁工程全生命周期成本分解与建模

2.1 成本分解结构(CBS)设计

(1) 基于工作分解结构(WBS)的成本科目划分: 以道路桥梁工程全生命周期各阶段工作任务为核心,参照WBS分层拆解逻辑构建CBS体系。按“工程总项—单项工程—单位工程—部分分项工程”层级划分成本科目,覆盖规划、设计、施工、运营、维护、拆除全流程。例如,施工阶段可拆解为基础工程、主体结构、附属设施等一级科目,再细分材料采购、设备租赁、人工费用等二级科目,实现成本与工作任务的精准匹配,为后续成本管控提供清晰的核算单元。(2) 关键成本要素识别: 聚焦全生命周期核心成本构成,重点识别三大关键要素。建设期成本是基础核心,涵盖工程勘察设计费、建安工程费、设备购置费等直接与间接支出;运维成本贯穿运营全阶段,包括日常养护费、设施维修费、安全检测费等持续性支出;残值处理成本含拆除工程费、废弃物处置费、土地恢复费等收尾阶段成本,同时需兼顾残值回收收益,实现成本要素的全流程覆盖。

2.2 动态成本预测模型构建

(1) 基于蒙特卡洛模拟的随机成本预测: 针对道路桥梁工程成本的不确定性,引入蒙特卡洛模拟方法构建随机预测模型。通过梳理材料价格、人工成本、工期延

误等随机变量, 设定各变量概率分布, 经大量迭代模拟生成多组成本预测结果, 输出成本期望值、方差及置信区间, 为风险决策提供量化依据。(2) 结合BIM技术的4D成本动态管理: 整合BIM三维模型与时间进度维度, 构建4D成本动态管理模型。将CBS成本科目与BIM模型构件精准关联, 实现工程进度与成本消耗的实时联动, 可动态追踪各阶段成本偏差, 提前预警超支风险, 同时支持施工方案的成本优化对比。(3) 考虑通货膨胀与折现率的资金时间价值计算: 引入资金时间价值理论, 在模型中嵌入通货膨胀率与基准折现率参数。对不同阶段的成本与收益进行折现处理, 将未来运维成本、残值等转化为现值, 确保全生命周期成本核算的科学性与可比性, 避免因忽视时间价值导致的成本评估偏差^[2]。

2.3 不确定性分析方法

(1) 敏感性分析: 选取材料价格波动、工期变化、折现率调整等核心变量, 通过单因素或多因素变动分析其对全生命周期总成本的影响程度。绘制敏感性分析图, 量化各变量的敏感度系数, 精准识别关键成本驱动因素, 为成本管控重点方向提供依据。(2) 风险概率分析: 针对自然灾害、政策突变、材料供应链断裂等极端事件, 采用概率统计方法分析其发生概率及对成本的冲击程度。通过构建风险矩阵, 评估极端事件的风险等级, 量化极端场景下的额外成本增量, 为制定风险应对预案提供数据支撑。

3 道路桥梁工程全生命周期成本优化决策方法

3.1 多目标优化模型构建

(1) 目标函数: 构建多维度目标函数体系, 核心目标包括全生命周期成本最小化、工程可靠性最大化及环境影响最小化。成本最小化覆盖各阶段全成本总和; 可靠性最大化聚焦结构安全与使用功能保障, 量化为结构耐久性、抗灾能力等指标; 环境影响最小化则针对污染排放、生态破坏等负面效应设定控制目标, 实现经济、安全与生态的协同优化。(2) 约束条件: 明确三类核心约束边界, 预算限制划定全生命周期总投资上限及各阶段资金分配额度; 技术规范约束涵盖材料标准、施工工艺、结构安全等级等工程技术要求; 政策法规约束需契合环保、土地利用、安全生产等相关法律法规及行业政策, 确保优化方案的可行性与合规性。(3) 求解算法: 选用适配多目标优化的算法工具, 遗传算法通过模拟生物进化过程实现多目标最优解搜索, 适用于复杂约束下的全局优化; 粒子群优化算法收敛速度快, 可高效求解连续型优化问题; 层次分析法(AHP)能将定性与定量指标结合, 精准处理各目标间的权重分配问题,

为决策提供科学依据。

3.2 基于数据包络分析(DEA)的效率评价

(1) 输入指标(建设成本、运维成本)与输出指标(使用寿命、服务水平): 构建DEA评价指标体系, 输入指标选取建设期总投资、全生命周期运维成本等核心成本要素; 输出指标涵盖工程实际使用寿命、通行能力、行车舒适度等服务水平指标, 通过量化输入输出关系, 客观反映工程全生命周期的成本效益效率。(2) 效率前沿面分析与标杆管理: 通过DEA模型计算各决策单元的相对效率值, 绘制效率前沿面, 识别处于前沿面的最优决策单元作为标杆案例。针对非有效决策单元, 分析其成本冗余或产出不足的短板, 借鉴标杆案例的优化经验, 提出针对性的改进方案, 提升工程全生命周期成本使用效率^[3]。

3.3 全生命周期成本-效益分析(LCCA)

(1) 净现值(NPV)与内部收益率(IRR)计算: 基于资金时间价值理论, 计算全生命周期内成本与收益的净现值(NPV), 直观反映工程投资的净收益水平; 内部收益率(IRR)作为动态盈利指标, 衡量工程投资的实际收益能力, 当IRR高于基准收益率时, 表明项目具有经济可行性。(2) 成本效益比(BCR)与投资回收期分析: 计算成本效益比(BCR), 通过总效益与总成本的比值判断项目性价比, BCR大于1时说明效益高于成本; 投资回收期分析分为静态与动态两种方式, 动态回收期更贴合实际, 可量化收回初始投资所需的时间, 为投资决策及资金规划提供关键参考。

4 道路桥梁工程全生命周期成本优化策略

4.1 设计阶段优化策略

(1) 标准化设计降低建设成本: 推行道路桥梁工程标准化设计体系, 整合常见桥型、路段结构的设计方案, 建立标准化构件库与通用设计模板。通过重复利用成熟设计成果, 减少设计冗余工作量, 降低勘察设计成本; 同时标准化构件可实现批量生产采购, 提升施工效率、减少材料浪费, 进一步压缩建设阶段的人工与材料成本。此外, 标准化设计能简化施工工艺, 降低技术难度, 减少因设计差异化导致的返工整改费用, 实现建设成本的源头管控。(2) 耐久性设计延长运维周期: 以全生命周期视角强化耐久性设计, 结合工程所处地质环境、气候条件及交通荷载特性, 科学选用高耐久性材料, 优化结构构造设计。例如, 针对腐蚀环境采用防腐涂层、钢筋阻锈剂等技术, 提升结构抗老化、抗腐蚀能力; 合理设计排水系统, 减少雨水对结构的侵蚀。通过延长工程使用寿命、降低运维频次与强度, 大幅减少全

生命周期内的维修、更换成本,实现“前期少量增投、长期大幅节支”的成本优化目标。

4.2 施工阶段优化策略

(1) 绿色施工技术减少环境成本:推广应用绿色施工技术,降低工程对周边环境的影响,从而减少环境治理与补偿成本。具体可采用节能型施工设备降低能耗,推行装配式施工减少现场扬尘与噪音污染;建立建筑垃圾资源化利用系统,将废弃混凝土、钢材等回收再加工,减少废弃物处置费用与资源消耗;针对施工污水、泥浆进行专项处理,避免水体污染引发的环保处罚与治理成本,实现施工与环境的协同发展。(2) 智能化监控降低质量风险成本:构建智能化施工监控体系,运用物联网、大数据等技术对施工全过程进行实时监测。对混凝土浇筑、钢筋绑扎、结构吊装等关键工序的质量参数进行动态追踪,及时发现质量隐患并预警,避免因质量问题导致的返工、加固甚至拆除重建等额外成本。同时,智能化监控可精准把控施工进度,减少工期延误引发的资金占用成本与违约成本,提升施工阶段成本管控的精准性与有效性^[4]。

4.3 运维阶段优化策略

(1) 预防性维护替代事后修复:转变运维理念,建立全生命周期预防性维护体系。通过定期检测、健康监测等手段,提前预判结构性能衰减趋势,针对潜在病害制定针对性维护方案,在病害萌芽阶段进行处理。相较于传统事后修复模式,预防性维护可大幅降低维修难度与成本,避免小病害发展为重大结构损伤,同时延长结构使用寿命,减少大修、改造的高频次投入,显著优化运维阶段成本结构。(2) 资产管理系统(EAM)提升运维效率:引入资产管理系统(EAM),对道路桥梁工程的设施设备、维护记录、成本数据等进行全流程数字化管理。通过系统实现维护计划的智能制定、资源的精准调配、成本的实时核算,减少人工管理的疏漏与冗余工作;同时借助系统数据分析功能,挖掘运维成本优化潜力,合理调整维护策略与资源分配,提升运维工作效率,降低运维管理成本与资源浪费^[5]。

4.4 政策与制度保障

(1) 完善全生命周期成本核算标准:建立健全道路桥梁工程全生命周期成本核算标准体系,明确成本核算的范围、口径、方法及指标体系。统一建设期、运维期、拆除期等各阶段的成本统计规范,细化直接成本、间接成本、环境成本、社会成本的核算细则,确保成本数据的准确性与可比性。通过标准化核算为成本优化决策提供可靠的数据支撑,避免因核算标准不统一导致的成本管控偏差。(2) 建立政府-企业成本共担机制:构建政府与企业协同的全生命周期成本共担机制,明确双方在工程建设、运维、拆除等各阶段的成本责任与分担比例。政府可通过财政补贴、税收优惠等政策引导企业加大全生命周期成本优化投入;企业则承担具体项目的成本管控实施责任,通过高效运营降低成本。同时建立风险共担与利益共享机制,激励双方共同推进全生命周期成本优化工作,保障工程长期稳定运行与成本可控。

结束语

道路桥梁工程全生命周期成本分析与优化决策研究,不仅深化了对工程成本内在规律的理解,更通过构建动态预测模型与多目标优化体系,为成本控制提供了科学工具。研究证实,标准化设计、耐久性提升、绿色施工及预防性维护等策略,可显著降低全周期成本并提升工程效益。未来,需进一步融合智能监测与大数据技术,完善政策保障机制,以推动道路桥梁工程向全生命周期精细化、可持续化管理迈进。

参考文献

- [1]温小伟.基于BIM技术的道路与桥梁全生命周期管理研究[J].安家,2025,(6):112-114.
- [2]马洪营.工程建设项目全生命周期成本优化与价值管理集成模型研究[J].砖瓦,2025,(5):136-138.
- [3]朱长远.市政工程道路与桥梁施工质量管理探析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(14):196-198.
- [4]徐尧,王全军.道路与桥梁施工建设管理的技术要点研究[J].工程与建设,2025,39(2):473-474.
- [5]孟昊.道路与桥梁过渡段设计施工问题与解决措施分析[J].运输经理世界,2025,(7):116-118.