

# 市政道路桥梁全寿命周期成本优化分析

邹玉阳

广东悦置建设管理有限公司南昌分公司 江西南昌 330000

**摘要：**市政道路桥梁作为城市基础设施的核心组成部分，其全寿命周期成本（LCCA）涵盖规划设计、建设施工、运营维护及拆除回收等阶段，具有周期长、成本构成复杂、影响因素多样等特点。本文基于全寿命周期理论，构建市政道路桥梁LCCA分析框架，通过识别各阶段关键成本要素，结合案例数据验证成本优化模型的有效性。研究表明，通过设计阶段的方案比选、施工阶段的技术创新、运营阶段的预防性养护及拆除阶段的资源循环利用，可实现全寿命周期成本的系统性降低，为市政工程决策提供科学依据。

**关键词：**市政道路桥梁；全寿命周期成本；优化分析；成本驱动因子；动态计算模型

## 引言

随着我国城市化进程加速，市政道路桥梁建设规模持续扩大，但其高投入、长周期的特性导致全寿命周期成本问题日益突出。传统成本管理多聚焦于建设阶段，忽视运营维护及拆除阶段的隐性成本，易造成“重建设、轻养护”的资源浪费。全寿命周期成本优化以“全过程、系统性”为核心，通过整合各阶段成本要素，实现资源配置的动态平衡，对提升市政工程投资效益、推动基础设施可持续发展具有重要意义。

## 一、市政道路桥梁全寿命周期成本构成与特征

### （一）全寿命周期阶段划分

基于项目生命周期理论，将市政道路桥梁划分为四个阶段：

规划设计阶段：包括可行性研究、方案设计、施工图设计等，成本占比约5%–10%，但决定全周期成本的70%以上；

建设施工阶段：涵盖材料采购、工程施工、质量检测等，成本占比最高（约50%–60%），受市场价格、施工工艺影响显著；

运营维护阶段：包括日常养护、大中修、应急抢修等，周期最长（可达30–50年），累计成本占比约20%–30%；

拆除回收阶段：涉及结构拆除、材料回收、场地清理等，成本占比虽低（约1%–3%），但环境成本（如建筑垃圾处理）不可忽视<sup>[1]</sup>。

### （二）成本构成要素

按成本性质将全周期成本分为直接成本与间接成本：

直接成本：各阶段实际发生的经济支出，如设计费、人工费、材料费、养护机械费等；

间接成本：未直接计入财务账目的隐性成本，包括环境成本（噪声污染、碳排放）、社会成本（交通延误、事故风险）、机会成本（资金时间价值损失）等。

### （三）成本特征分析

长期性与累积性特征：基础设施运营维护阶段的成本支出呈现出明显的非线性增长规律，特别是在桥梁结构达到设计使用寿命的中后期阶段（通常为投入使用30年之后），其养护维修成本在生命周期总成本中的占比会呈现几何级数上升趋势<sup>[2]</sup>。这种成本增长曲线主要源于结构性能的自然劣化、材料老化以及累积损伤效应，使得后期的大中修工程频率和规模都显著增加。

不确定性与风险性特征：在项目全生命周期内，原材料市场价格波动、极端气候事件频发、工程技术标准更新以及政策法规调整等多重不确定性因素，都会对运营维护成本预测的准确性造成显著影响。为应对这种复杂性，需要引入蒙特卡洛模拟等风险概率模型工具，通过建立概率分布函数来量化各类风险因素对成本的影响程度，从而提高成本管控的科学性。

外部性与社会性特征：作为典型的准公共产品，道路桥梁项目的成本评估不能仅局限于<sup>[3]</sup>直接经济投入的核算，还必须充分考虑其产生的正外部性效应。这包括提升区域交通效率、优化城市空间结构、促进经济社会发展等显性效益，以及减少碳排放、改善生态环境等隐性价值。因此，需要通过构建多维度指标体系，

采用成本-效益分析法 (CBA) 或成本-效用分析法 (CUA) 进行综合评估, 才能全面反映项目的真实社会价值。

## 二、全寿命周期成本优化模型构建

### (一) 成本驱动因子识别与筛选

通过系统性的文献计量分析法与专家德尔菲法相结合的研究方法, 对桥梁全生命周期各阶段的关键成本影响因素进行科学识别与筛选。具体而言: 在设计阶段, 主要考虑结构耐久性指标 (包括混凝土强度等级、钢筋保护层厚度等关键参数) 以及设计方案的技术经济合理性 (涉及桥梁跨度设计、桥型结构选择等决策因素); 在施工阶段, 重点考察施工工艺选择 (预制拼装技术与现浇施工的对比)、建筑材料实际损耗率以及可能发生的工期延误风险; 在运营维护阶段, 主要关注交通流量增长趋势、日常养护维修频率以及环境腐蚀因素 (如氯离子渗透、二氧化碳碳化作用等侵蚀机理); 在拆除回收阶段, 则着重分析建筑材料可回收利用率以及废弃物处理所遵循的环保标准要求<sup>[4]</sup>。

### (二) 敏感性分析模型构建与应用

采用灰色关联分析 (Grey Relational Analysis, GRA) 这一成熟的系统分析方法, 对各成本驱动因子与总成本之间的关联程度进行量化评估。具体实施步骤包括: 首先明确参考序列 (以桥梁全生命周期总成本为基准) 与比较序列 (各阶段成本驱动因子构成); 其次通过数据标准化处理消除各指标间的量纲差异, 建立关联系数矩阵; 最后计算得出各因子的关联度排序, 从而识别出对总成本影响最为显著的关键敏感性因素。以某典型市政桥梁项目为例, 经实证分析显示关联度排序前三位的驱动因子分别为: 设计阶段的结构耐久性参数 (关联度 0.87)、运营阶段的交通量增长预测 (关联度 0.79) 以及施工阶段的建筑材料价格波动 (关联度 0.75), 这一结果充分验证了结构设计质量和长期运营需求对项目经济性的决定性影响。

### (三) 动态成本计算模型

考虑资金时间价值, 引入净现值 (NPV) 法将各阶段成本折算至基准年, 公式如下:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

其中,  $C_t$  为第  $t$  年成本,  $(i)$  为基准收益率,  $(n)$  为全寿命周期年限。通过动态贴现可实现不同阶段成本的横向对比, 避免静态分析导致的决策偏差。

## 三、案例分析: 某市政桥梁全寿命周期成本优化实践研究

### (一) 项目概况与工程背景

该市政桥梁工程项目位于我国南方某沿海经济发达城市, 属于城市主干道重要交通节点工程。主桥采用三跨预应力混凝土连续梁结构体系, 桥梁全长 280 米, 标准跨径布置为 80+120+80 米, 设计基准期为 50 年。原设计方案采用传统现浇混凝土施工工艺, 桥面铺装层选用普通 AC-13 型沥青混凝土材料, 养护管理采用被动式的“故障维修”模式, 即在出现明显病害后才进行修复处理<sup>[5]</sup>。

### (二) 全周期成本核算与关键问题诊断

基于国际通行的全寿命周期成本分析模型 (LCCA), 采用 6% 的社会基准折现率, 对原设计方案各阶段成本进行详细核算与问题诊断:

设计阶段问题: 结构设计采用过于保守的安全系数 (由 1.4 提高至 1.6), 导致主梁配筋量增加 18%, 预应力钢束用量增加 12%, 直接造成设计成本增加 15%, 存在明显的过度设计问题;

施工阶段问题: 现浇工艺需要搭建大量支架模板, 受雨季影响导致有效工期延长约 3 个月, 现场人工费用和大型设备租赁费用分别超支 22% 和 18%, 施工组织效率低下;

运营维护问题: 在南方高湿度、高盐雾的海洋性气候环境下, 普通沥青铺装层抗车辙性能不足, 预计每 5 年就需要进行铣刨重铺的大修作业, 50 年使用期内累计养护成本高达初始建设成本的 85%, 维护费用占比显著偏高;

拆除处置问题: 传统现浇结构拆除时混凝土构件完整性差, 仅能实现约 30% 的再生利用率, 大量建筑垃圾需要外运填埋处理, 不仅增加处置成本, 还带来环境负担。

### (三) 系统性优化策略与实施效果验证

针对上述关键问题, 项目团队提出全过程的系统性优化方案:

设计优化措施: 采用工厂化预制桥墩节段拼装技术, 减少现场湿作业量达 60%; 主梁采用掺入硅粉的高性能混凝土 (HPC), 将氯离子扩散系数控制在  $1.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  以下。虽然新材料使设计成本增加 5%, 但结构耐久性显著提升, 设计使用寿命延长至 60 年;

施工技术优化: 引入 BIM+3D 激光扫描技术进行施工模拟和碰撞检测, 将材料损耗率从原方案的 8% 降至

3%以下；采用移动模架施工工艺，使主体结构施工工期缩短2个月，施工效率提升25%；

**养护策略创新：**建立预防性养护体系，每2年采用红外热像仪进行无损检测，结合每4年实施一次微表处养护（采用改性乳化沥青+陶瓷骨料），将大修周期从5年延长至8年。经测算，50年全周期养护成本可降低40%，节省养护资金约3200万元；

**拆除回收优化：**创新设计可拆卸式钢-混组合桥面系，采用高强螺栓连接技术，使钢材回收率达到90%以上；梁体采用分段切割工艺，配合移动式破碎筛分设备，实现混凝土再生利用率达60%，建筑垃圾减量50%。

经财务测算，优化方案的全周期净现值（NPV）较原方案降低22.3%，内部收益率（IRR）提高至7.8%，不仅验证了LCCA模型的有效性，也为同类工程提供了可复制的成本优化范例。

#### 四、市政道路桥梁全寿命周期成本优化策略研究

##### （一）设计阶段：源头控制与方案比选

**耐久性设计优化：**根据工程所处环境特征（如海洋盐雾腐蚀环境、工业污染区域、冻融循环地区等）进行差异化材料选择，优先采用耐候钢、环氧涂层钢筋等抗腐蚀材料，引入“全寿命周期设计系数”对传统安全系数进行动态调整，在确保结构安全的前提下避免冗余设计造成的资源浪费；

**模块化与标准化建设：**大力推广预制装配式桥梁结构体系，通过工厂化生产实现构件尺寸精度控制，显著减少现场浇筑施工的质量缺陷，同时为后期维护更换提供便利条件；

**多方案综合比选：**构建包含经济性指标（初期建设成本、运营维护成本、残值回收）、技术性能指标（承载能力、耐久性、抗震性能）和风险因素（施工难度、环境影响）的三维评价模型，例如针对50-100米中等跨度桥梁，钢混组合结构虽然初期造价较混凝土结构高出15%-20%，但考虑50年使用周期内的养护成本可降低30%-40%，且具有更好的可修复性。

##### （二）施工阶段：技术创新与过程管控

**绿色施工技术应用：**采用含30%再生骨料的环保混凝土配方，配置具有能量回收系统的智能化施工设备，通过施工工艺创新实现材料损耗率降低15%、碳排放减少20%的目标；

**精益建造管理体系：**基于BIM技术建立5D成本控制模型，结合物联网传感器实时采集人工、机械、材料消

耗数据，开发成本偏差预警系统（当实际支出超过预算5%时自动触发预警机制）；

**供应链协同优化：**与主要材料供应商签订3-5年的框架协议，采用“基准价+浮动调节”的定价机制对冲市场波动风险，实施区域化集中采购策略并建立150公里半径内的优选供应商名录，使物流成本控制在材料总价的3%以内。

##### （三）运营阶段：预防性养护与智能决策

**全周期监测系统建设：**在关键受力部位布设光纤应变传感器、GNSS位移监测点等智能感知设备，构建每分钟采集1次、精度达0.01mm的实时监测网络，基于机器学习算法建立桥梁性能退化预测模型；

**科学养护决策机制：**运用马尔可夫链理论模拟不同环境荷载作用下的材料性能衰减规律，建立“成本-效益”分析矩阵（例如当桥面铺装状况指数PCI降至70时实施微表处养护，较传统周期性养护可节省费用25%）；

**智慧管理平台开发：**集成历史检测数据（裂缝发展记录、支座老化情况）、实时交通荷载（日均通行量、重车比例）、环境参数（温湿度、氯离子浓度）等多元信息，运用深度学习算法自动生成针对特定病害的养护方案，避免“一刀切”式养护造成的资源浪费。

##### （四）拆除阶段：资源循环与低碳处理

**精细化拆除工艺：**采用“液压破碎+磁选分离+人工分拣”的阶梯式拆除流程，使钢材回收率达到95%、混凝土构件完整保留率达到60%，较传统爆破拆除方式提升资源利用率40%；

**再生材料高值利用：**通过三级破碎工艺将拆除混凝土加工成5-20mm级配的再生骨料，经活性激发处理后用于C30以下混凝土构件或道路基层材料，实现建筑材料闭环利用；

**全成本核算体系：**引入生命周期评价方法（LCA）量化拆除过程的碳排放、粉尘污染等环境成本，通过碳交易机制将环境外部性内部化，确保拆除阶段成本占全寿命周期总成本比例控制在8%以内。

#### 五、结论与展望

市政道路桥梁全寿命周期成本优化研究，揭示了各阶段成本构成与特征的复杂性，并通过实际案例验证了系统性优化策略的有效性。研究表明，设计阶段的决策对整体成本影响最为深远，科学合理的方案比选能够显著降低长期经济负担。施工阶段的技术创新和过程管控则直接决定了项目的实施效率与质量，而运营阶段的智

能化管理为成本控制提供了新的解决路径。拆除阶段的资源循环利用不仅减少了环境负担,还体现了可持续发展的理念。未来研究应进一步深化对成本驱动因子的动态监测与分析,尤其是在新材料、新工艺的应用方面,需建立更为完善的评估体系。同时,建议加强政策引导,推动全行业在成本优化方面的标准化建设,促进绿色低碳技术的广泛应用。此外,还需关注气候变化等外部因素对基础设施寿命的影响,构建更具韧性的成本管理体系。

#### 参考文献

[1] 邓娟红,杨朝琴,邱冰,等.基于全生命周期成本分析的桥梁设计分析[J].中文科技期刊数据库(引文

版)工程技术,2021(7):2.

[2] 胡铁山,王勇,夏俊波.全生命周期成本分析在不同材料桥梁方案比选中的应用[J].公路与汽运,2020(1):4.

[3] 吴哲.基于全生命周期成本分析的桥梁设计研究综述[J].科技资讯,2020,18(22):3.DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2003-5010-0870.

[4] 周祝兵.基于事件树的混凝土桥梁全寿命检测维修策略[J].低温建筑技术,2020,42(2):5.DOI:CNKI:SUN:DRAW.0.2020-02-031.

[5] 唐仁伟.基于全生命周期成本分析的桥梁设计研究综述[J].四川水泥,2020(9):2.DOI:CNKI:SUN:SCSA.0.2020-09-148.