

# 公路工程全生命周期成本与长期性能均衡优化方法探析

章 永

江西省森威建设有限公司 江西萍乡 337000

**摘 要:** 本文围绕公路工程全生命周期成本与长期性能之间的均衡优化问题展开探讨,指出当前普遍存在的“成本失控”与“性能不足”矛盾,并分析其成因。文章提出构建“成本—性能”双维度评估体系,结合现值分析与层次分析法量化两者关系,并分阶段提出设计、施工与运营养护的优化策略,引入 BIM、物联网与多目标优化算法等技术手段。通过实际案例验证,表明该方法能有效实现成本控制与性能保障的统一,推动公路工程向高质量、可持续方向发展。

**关键词:** 全生命周期成本; 长期性能; 均衡优化; 公路工程

## 引言

公路工程作为高投入、长周期的基础设施,其全生命周期成本含初始建设成本(设计、施工)与运营阶段成本(养护维修、能耗、交通延误)且长期性能体现为路面平整度、结构承载能力、抗灾耐久性等核心指标的持续稳定性;据交通运输部统计,我国每年超 3000 亿元的公路养护资金中 60% 用于修复因初期设计不合理或施工质量缺陷导致的性能衰减问题,同时部分项目为追求“百年工程”过度提升材料标准致初始成本超出预算 20%–30%,却因后期养护策略滞后性能未达预期。例如,某平原地区高速公路设计阶段为压缩成本选用低标号沥青混合料,虽初始建设成本降低 8%,但通车 3 年后路面出现大面积车辙与裂缝且 5 年内累计养护成本达初始投资的 65%,还使通行舒适度显著下降;另一山区公路为提升抗灾性能采用超高强度水泥混凝土基层,初始成本增加 25%,却因当地交通荷载较低致结构性能冗余度达 40% 造成资金与资源浪费。由此可见,实现公路工程全生命周期成本与长期性能的均衡是破解“成本失控”与“性能不足”双重困境的关键,探索科学的优化方法对提升公路工程综合效益、推动交通基础设施高质量发展具有重要现实意义。

## 1 公路工程全生命周期成本与长期性能的矛盾关系

### 1.1 核心矛盾表现

公路工程全生命周期成本与长期性能的矛盾,本质为“短期投入”与“长期产出”的时空错配,这种错配构成了项目全周期管理的核心挑战。首先,它体现在成本构成与性能衰减的不同步性上。初始建设成本高度集中于项目前期,

决策者面临巨大的短期资金压力,而易忽视运营中期因性能衰减所引发的巨额养护成本、能源消耗成本及社会交通延误成本。这种“重建设、轻养护”的短视思维,导致许多项目为压缩初期投资而牺牲材料与工艺标准,正如引言中的平原高速案例,虽初始成本降低 8%,却导致后期养护成本激增,形成“省小钱、花大钱”的被动局面。

其次,矛盾源于性能指标的多维度与成本投入的单一性。长期性能是一个涵盖结构承载能力、路面行驶功能、环境适应性及抗灾耐久性等复杂系统,而成本投入往往是单一的货币计量。这使得有限的资金难以同时满足所有维度的性能需求,甚至可能产生内部冲突。例如,为提高结构强度而过度增加路面厚度,可能会影响路基排水效率,反而加速水损坏,最终损害长期性能。这种“按下葫芦浮起瓢”的现象,凸显了在多目标约束下进行资源优化配置的复杂性。

最后,不确定性因素的干扰是打破预设平衡的重要变量。交通量的超预期增长、极端天气事件的频发、材料性能的加速老化等动态因素,均会使基于历史数据和静态模型建立的“成本—性能”平衡关系失效。例如,一场超越设计标准的暴雨可能迅速诱发大规模的路面水损害,迫使养护大修计划大幅提前,导致生命周期成本失控。这种不确定性要求优化方法必须具备足够的鲁棒性和动态适应性。

### 1.2 矛盾成因分析

从行业实践深究,上述矛盾的根源在于三个层面的系统性缺失。

其一,全周期数据贯通机制缺失,导致决策依据碎片化。当前,公路工程的设计、施工与运营养护各阶段常处于“信

息孤岛”状态。如施工阶段关键的材料配合比、压实度等质量数据未能完整、标准地传递至养护管理系统,致使后期养护策略缺乏精准的数据支撑,只能依赖于固定的时间周期或粗略的表现状况进行决策,无法实现“按需养护”,这正是施工阶段 BIM 技术应用旨在解决的痛点。

其二,评估体系单一,缺乏全周期联动视角。传统的项目决策与评估普遍存在“两张皮”现象:成本评估往往只聚焦于初始建设投资,将其作为核心决策指标;而性能评估则侧重于通车初期的短期指标,如平整度。两者相互割裂,缺乏一个像文中提出的“LCC-LPP 双维度评估体系”那样,能将后期成本与长期性能进行量化关联和现值分析的统一框架,导致无法科学地评判不同方案在全生命周期内的真实价值。

其三,优化方法滞后,难以应对多目标协同的复杂性。在面对成本与性能的多重冲突目标时,行业长期依赖经验式决策。这种方法主观性强,难以在错综复杂的约束条件下,寻找到成本与性能的全局最优解或满意解集。正如运营养护阶段所指出,引入 NSGA-II 等多目标智能优化算法至关重要,因为只有通过科学的计算手段,才能在浩瀚的方案组合中,精准识别出那些在给定成本下性能最优、或在要求性能下成本最低的帕累托最优方案,从而实现从“经验驱动”到“数据与模型驱动”的决策升级。

## 2 公路工程全生命周期“成本-性能”均衡优化方法

### 2.1 构建双维度评估体系

为量化成本与性能的平衡关系,首先建立的全生命周期“成本-性能”双维度评估体系中,成本维度(LCC)量化是将全生命周期成本拆解为初始成本(C1)、养护成本(C2)、能耗与环境成本(C3)、交通延误成本(C4)四大模块,采用现值分析法(考虑资金时间价值)将各阶段成本折算为初始时刻现值,公式为:  $LCC = C1 + C2/(1+i)^{t2} + C3/(1+i)^{t3} + C4/(1+i)^{t4}$  (i 为基准收益率, t 为对应阶段时间),如某公路初始建设成本 10 亿元,年均养护成本 0.8 亿元,基准收益率 5%,服役 20 年时全生命周期成本现值约为 22.5 亿元;性能维度(LPP)量化是选取路面性能指数(PQI)、结构强度指数(SSi)、抗灾耐久性指数(RDI)为核心指标,采用层次分析法(AHP)确定权重(如 PQI 占 40%、SSi 占 35%、RDI 占 25%),构建综合性能指数:  $LPP = 0.4 \times PQI + 0.35 \times SSi + 0.25 \times RDI$ ,其中各指标按《公

路技术状况评定标准》分为 0-100 分,  $LPP \geq 85$  分为“优秀”、70-84 分为“良好”、60-69 分为“合格”、<60 分为“不合格”。

### 2.2 分阶段均衡优化策略

#### 设计阶段:源头协同优化

设计作为“成本-性能”均衡的关键起点,需从材料选型、结构设计、荷载预估三方面发力:材料选型上,采用“性能-成本”比排序法,如对比不同沥青混合料(改性沥青混合料性能评分 90 分、单位成本 800 元/吨,普通沥青混合料性能评分 75 分、单位成本 500 元/吨),通过计算“性能/成本”比值(1.125 vs 1.5)并结合项目交通荷载特征选择适配材料,避免盲目选用“高性价比”材料;结构设计上,引入有限元分析与全周期模拟,如通过 ABAQUS 软件模拟不同路面结构(4cm 沥青上面层+6cm 沥青中面层+8cm 沥青下面层 vs 5cm 沥青上面层+7cm 沥青中面层+9cm 沥青下面层)在 20 年服役期内的性能衰减曲线,对比两种方案的全生命周期成本与性能变化,选择“成本适中、性能稳定衰减”的方案;荷载预估上,结合区域经济发展规划预测未来 10-20 年交通量增长率,确保结构设计荷载与实际需求匹配,避免性能冗余或不足。

#### 施工阶段:过程成本与质量双控

施工阶段作为“成本-性能”均衡的落地环节,需建立“质量成本动态联动”机制,一方面通过 BIM 技术实现施工过程可视化管控,即把沥青摊铺温度、压实度等关键参数录入 BIM 模型并实时比对设计标准,在压实度低于 96% (规范要求)时自动预警并分析返工成本,若返工成本低于后期因压实不足产生的养护成本就触发返工指令<sup>[2]</sup>;另一方面优化施工工艺以降低隐性成本,如采用温拌沥青技术替代热拌沥青,尽管单位材料成本增加 5%,却能耗降低 30%、减少废气排放、延长施工窗口时间并降低因天气延误导致的额外成本,达成“成本微增、性能与环保双赢”。

#### 运营养护阶段:动态调控与预防性养护

运营养护阶段通过“性能监测-成本调控”动态匹配以实现全周期均衡,即基于物联网监测设备(如路面传感器、无人机巡检)实时采集性能数据并构建性能衰减曲线,当 LPP 降至 80 分(预警阈值)时启动预防性养护(如微表处、裂缝灌缝)而非等性能恶化至 60 分后大修,因数据显示预防性养护可使单次养护成本降低 40%-50% 且延长性能稳

定期3-4年,同时采用多目标优化算法(如NSGA-II算法)以“成本最低、性能提升最高”为目标,输入养护措施(灌缝、罩面、铣刨重铺)的成本参数与性能提升系数来制定养护方案并输出Pareto最优解集供管理者按实际需求选择,如某路段养护中算法推荐“灌缝+局部罩面”方案相比全路段铣刨重铺成本降低32%且性能提升至85分;还建立养护成本动态分摊机制,按“性能衰减速率”将养护资金分配至不同路段,对衰减快、影响大的核心路段优先投入以避免平均分配导致的资源浪费<sup>[3]</sup>。

### 3 应用案例与效果验证

#### 3.1 案例背景

某省新建一条全长120公里、设计时速100km/h、预期服役寿命20年的双向四车道高速公路,项目初期面临两难选择:方案A采用常规材料与结构,有初始建设成本48亿元、预计年均养护成本2.5亿元且性能衰减较快、15年需进行大修的特点;方案B采用高性能材料与优化结构,具备初始建设成本55亿元、预计年均养护成本1.2亿元且性能稳定、20年内无需大修的特性。

#### 3.2 优化过程与结果

采用本文提出的“成本-性能”均衡优化方法,先计算两方案(基准收益率6%)的全生命周期成本现值:方案A的LCC经 $48 + 2.5 \times (P/A, 6\%, 20) + 30 \times (P/F, 6\%, 15)$ (其中30亿元为15年大修成本)计算得 $48 + 2.5 \times 11.4699 + 30 \times 0.4173 \approx 89.1$ 亿元,方案B的LCC经 $55 + 1.2 \times 11.4699$ 计算得 $\approx 68.8$ 亿元;接着评估长期性能:方案A 15年LPP降至65分(合格线),方案B 20年LPP仍保持78分(良好)。再通过NSGA-II算法优化提出方案C:在方案A基础上,对重交通路段(占总里程30%)采用方案B的高性能结构,其余路段保持方案A标准,其初始建设成本50.1亿元,全

生命周期成本现值72.3亿元,20年LPP平均值75分,该方案达成既避免方案A的高后期成本与性能不足,又降低方案B的初始投资压力的“成本-性能”最优平衡。项目实施5年后跟踪呈现方案C路段LPP达82分,优于方案A同期的75分,且累计养护成本仅0.8亿元,较方案A同期的1.25亿元降低36%,以此验证优化方法的有效性。

### 4 结论

结合公路工程全生命周期成本与长期性能的均衡并非简单“成本最低”或“性能最高”,而是基于全周期视角的动态协同,本文构建双维度评估体系与分阶段优化方法,通过量化成本与性能关系、分阶段精准调控,有效破解二者矛盾,且实践案例表明科学的均衡优化可在控制成本的同时保障长期性能,实现公路工程全生命周期价值最大化,以及随着技术迭代与理念升级,未来需进一步完善评估维度、强化数字赋能,推动公路工程向“成本合理、性能稳定、绿色可持续”的高质量发展模式转型。

### 参考文献:

- [1] 赵秀丽, 蒯佳婷. 公路工程全生命周期造价管控平台构建与应用[J]. 项目管理技术, 2024, 22(04): 106-111.
- [2] 黄诚程, 郭笑. 基于全生命周期的公路工程造价控制措施研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(03): 145-147.
- [3] 卢威. 全生命周期成本控制理论在公路工程施工设备管理中的应用[J]. 城市建设, 2025, (20): 74-76.
- [4] 张海峰. 基于全生命周期的国省道公路工程成本精细化管理研究[J]. 运输经理世界, 2025, (13): 28-30.
- [5] 张孝阳. GIS在公路工程造价管理全生命周期中的应用[J]. 石河子科技, 2025, (05): 72-73.

**作者简介:** 章永(1986.11-), 男, 汉, 大学本科, 江西人, 中级, 研究方向: 公路与桥梁工程