

基于生命周期理论的公路养护方案经济性评价的理论与实践路径

王欢

乌鲁木齐公路事业发展中心, 新疆乌鲁木齐市, 830000;

摘要: 在公路养护需求持续增长与资源约束日益趋紧的双重背景下, 传统以短期成本为核心的评价模式已难以适应可持续发展要求。本文立足生命周期理论, 以文论述为主要方式, 系统梳理公路全生命周期的阶段特征与经济性评价的核心内涵, 探讨多维度评价框架的构建逻辑, 分析层次分析与模糊综合评价相结合的方法应用思路, 并通过工程案例的定性分析验证评价路径的可行性, 最终提出优化公路养护决策的实践建议, 为公路养护方案的经济性评价提供理论支撑与实践指引。

关键词: 生命周期理论; 公路养护; 经济性评价; 评价框架; 决策优化

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 08. 008

引言

我国公路建设已从“大规模新建”转向“建养并重”的发展阶段, 早期建成的大量公路逐步进入养护高峰期, 养护资金的供需矛盾日益突出。据交通运输部相关统计, 近年来全国公路养护支出年均增长率超过8%, 但部分地区仍存在养护方案选择不合理、资金使用效率偏低等问题。追根溯源, 传统评价模式的局限性是重要诱因——其往往聚焦于养护施工阶段的直接成本, 忽视了公路从规划设计到废弃回收全过程的综合影响, 导致部分看似“低成本”的养护方案, 在全生命周期内反而因频繁维修、通行效率低下等问题造成更大的资源浪费。

生命周期理论的引入为破解这一困境提供了新的思路。该理论将公路视为一个动态发展的有机整体, 强调从全周期视角统筹考量成本、效益与环境的协同关系, 推动养护方案评价从“短期成本导向”向“全生命周期价值导向”转型。这种转型不仅符合新时代公路工程可持续发展的要求, 更能通过系统性评价优化养护资源配置, 提升公路运营的综合效益。因此, 深入探讨基于生命周期理论的公路养护方案经济性评价逻辑, 具有重要的理论与实践意义。

1 理论溯源: 生命周期理论与公路养护的适配性分析

1.1 生命周期理论的核心要义

生命周期理论起源于20世纪60年代的产品管理领域, 其核心思想是将产品从概念提出、设计研发、生产制造、市场销售到废弃回收的全过程视为一个完整的“生命周期系统”, 通过对系统内各环节的资源消耗、成本投入与价值产出进行统筹分析, 实现产品全周期的资源优化配置与价值最大化。随着理论不断发展, 其

应用范围逐渐从工业产品延伸至基础设施、生态环境等领域, 成为衡量复杂系统可持续性的重要理论工具。

1.2 公路全生命周期的阶段划分与特征

将生命周期理论应用于公路工程, 需结合公路的建设与运营规律, 对其生命周期进行科学划分。从实践来看, 公路全生命周期可分为四个相互关联的阶段, 各阶段具有鲜明的特征:

其一, 规划设计阶段。这是公路生命周期的起点, 决定了公路的功能定位、技术标准与建设规模。该阶段的核心任务是通过方案论证、地质勘察、设计优化等工作, 在满足交通需求的同时, 为后续施工、养护阶段的经济性奠定基础。例如, 合理的路面结构设计可减少后期养护频率, 优化的路线规划能降低施工阶段的生态破坏成本。

其二, 施工建设阶段。该阶段是将设计方案转化为实体工程的过程, 涉及材料采购、施工组织、质量管控等环节。此阶段的成本投入具有集中性特征, 同时施工工艺的选择直接影响公路的使用寿命与养护需求——如沥青路面的摊铺温度控制不当, 可能导致早期裂缝病害, 增加后期养护成本。

其三, 运营养护阶段。这是公路生命周期中持续时间最长的阶段, 也是养护方案选择的核心环节。该阶段涵盖日常养护(如路面清扫、边沟疏通)、专项维修(如路面铣刨重铺、桥梁加固)与应急处置(如暴雨后的路面抢修)等工作, 其成本投入具有分散性、反复性特征, 且养护方案的合理性直接影响公路的通行能力与安全水平。

其四, 废弃回收阶段。当公路达到设计使用寿命后, 进入废弃回收阶段, 主要涉及构件拆除、材料回收与场

地恢复等工作。随着绿色交通理念的深入,该阶段的经济性评价不仅关注拆除成本,更强调废旧材料的回收利用率——如沥青路面材料的再生利用,可显著降低新材料采购成本,减少资源消耗。

1.3 公路养护方案经济性评价的内涵拓展

基于生命周期理论的公路养护方案经济性评价,并非简单的成本核算,而是对养护方案全周期影响的综合性判断。其内涵可从三个维度拓展:

在成本维度,突破“施工成本”的局限,涵盖公路全生命周期的所有成本投入,包括规划设计阶段的勘察设计费、施工阶段的材料与人工费、养护阶段的维修与管理费、废弃阶段的拆除与处置费。

在效益维度,不仅关注直接的经济效益(如通行时间缩短带来的物流成本节约),还包括社会效益(如交通事故率降低带来的生命财产安全保障)与使用效益(如路面使用性能提升带来的使用寿命延长)。

在环境维度,将环境影响纳入经济性评价范畴,考量养护方案在材料生产、施工过程、运营阶段产生的碳排放、能源消耗与生态破坏,通过“环境成本内部化”实现经济与环境的协同发展。

2 框架构建:公路养护方案经济性评价的逻辑与维度

2.1 评价框架构建的基本原则

构建基于生命周期理论的评价框架需遵循三项核心原则:一是系统性原则,需覆盖公路规划设计、施工建设、运营养护、废弃回收全生命周期,统筹成本、效益、环境三维度,避免因片面关注短期成本导致决策偏差,如低成本微表处罩面方案因寿命短、重复养护反而推高全周期成本。二是关联性原则,需考量各阶段、维度间的相互影响,例如施工采用再生沥青虽可能增加初期成本,但可降低废弃处置成本与环境影响,需从全周期视角综合评判。三是适应性原则,需匹配不同公路类型特征,如高速公路侧重通行能力提升效益,农村公路则优先考量养护成本可控性。

2.2 多维度评价指标的逻辑梳理

基于上述原则,构建“一级—二级—三级”层级式指标体系:一级指标为“全生命周期经济性”,作为核心评价目标;二级指标包括“生命周期成本”“生命周期效益”“生命周期环境影响”,体现协同考量逻辑;三级指标按阶段与维度细化:成本维度涵盖规划设计、施工建设、运营养护、废弃处置成本,反映全周期累积投入;效益维度从功能提升(通行能力提升、事故率降低)与价值延长(PQI 提升、寿命延长)设置指标;环

境维度兼顾资源消耗(碳排放、能源消耗)与生态保护(废旧材料回收率、生态破坏程度)。

2.3 评价方法的选择与应用逻辑

评价方法采用“主观与客观结合、定性与定量互补”体系,层次分析法与模糊综合评价法的结合应用最为适配。层次分析法用于解决指标权重分配问题,通过构建层次模型、专家两两比较形成判断矩阵,经一致性检验后计算权重,实现主观判断的量化,如山区公路评价中可将“生态破坏程度”的重要性转化为具体权重。模糊综合评价法用于处理指标不确定性,通过确定“优秀—差”评价等级、明确指标隶属度,结合层次分析法权重计算综合隶属度,实现定性指标量化,确保评价结果可比。

3 实践验证:基于工程案例的评价路径分析

3.1 案例背景与养护方案概况

选取某省道二级公路养护工程为案例,该路段建成于 2010 年,全长 5 公里,为双向两车道沥青混凝土路面。由于长期承受重载交通作用,路面出现明显的车辙、裂缝与坑槽病害,PQI 指数降至 65 以下,需通过养护方案修复路面性能。结合路段实际情况,拟定三种养护方案:

方案 A: 沥青路面就地热再生。该方案通过现场加热、铣刨、再生剂添加等工艺,将旧沥青路面材料再生利用后重新摊铺,具有施工周期短、材料回收率高的特点。

方案 B: 铣刨重铺。该方案将破损路面铣刨至一定深度后,重新摊铺新的沥青混凝土面层,施工工艺成熟,路面性能恢复效果显著。

方案 C: 微表处罩面。该方案在原路面上摊铺薄层改性沥青混合料,施工成本低、工期短,但使用寿命相对较短。

3.2 基于全生命周期的方案对比分析

从生命周期视角出发,对三种方案的经济性进行多维度对比分析:

在成本维度,方案 C 的初始施工成本最低,但由于其使用寿命仅 3-5 年,未来需频繁重复养护,导致全周期内的养护成本累积较高;方案 A 的初始成本高于方案 C,但低于方案 B,且材料再生利用降低了废弃阶段的处置成本;方案 B 的初始施工成本最高,但由于路面性能恢复彻底,使用寿命可达 8-10 年,全周期内的养护频率较低,长期成本优势逐渐显现。

在效益维度,方案 B 的路面平整度、抗滑性能提升最为显著,可使通行能力提升 20%以上,交通事故率降

低30%左右, PQI指数恢复至90以上;方案A的效益次之, 通行能力与安全水平均有明显改善;方案C仅能短期改善路面外观, 对通行能力与安全水平的提升有限, 且3年后需再次养护, 影响公路的持续运营效益。

在环境维度, 方案A的废旧材料回收率达90%以上, 碳排放较方案B减少25%, 能源消耗降低20%, 环境友好性最强;方案B的碳排放与能源消耗最高, 但由于使用寿命长, 单位时间内的环境影响相对可控;方案C的施工过程碳排放较低, 但频繁养护导致全周期的环境影响累积效应明显。

3.3 评价结果与决策建议

结合层次分析法确定的指标权重(其中“交通事故率降低”“使用寿命延长”“全周期成本”权重较高), 通过模糊综合评价法对三种方案进行综合评判: 方案B的综合评价等级为“良好”, 在效益维度的优势显著, 全周期成本可控, 符合路段重载交通的长期需求;方案A的综合评价等级为“中等”, 环境效益突出, 但路面强度恢复有限, 适用于交通量较小的路段;方案C的综合评价等级为“较差”, 仅适用于短期应急养护或资金极度紧张的情况。

基于评价结果, 建议该路段选择方案B(铣刨重铺)作为最优养护方案。同时, 为进一步提升经济性, 可在施工阶段采用部分再生沥青材料, 兼顾成本控制与环境效益, 实现全生命周期的价值最大化。

4 反思与展望: 基于生命周期评价的公路养护决策优化方向

4.1 当前评价实践中存在的问题

尽管基于生命周期理论的公路养护方案经济性评价已展现出显著优势, 但在实践中仍存在三方面问题:

一是指标量化的局限性。部分环境影响指标(如生态破坏的长期影响)难以用精确数值衡量, 只能依赖定性描述, 影响评价结果的准确性;部分效益指标(如通行舒适度提升带来的间接经济效益)缺乏统一的量化标准, 导致不同方案之间的可比性降低。

二是数据获取的难度。全生命周期评价需要收集规划设计、施工、养护、废弃等各阶段的数据, 但部分早期建设项目的资料归档不完整, 养护阶段的成本与效益数据分散在不同部门, 难以实现系统整合, 增加了评价工作的难度。

三是专家判断的主观性。层次分析法与模糊综合评价法均依赖专家咨询, 专家的知识背景、实践经验不同, 可能导致判断矩阵与隶属度赋值的偏差, 影响评价结果的客观性。

4.2 未来优化方向与发展路径

针对上述问题, 未来可从三个方面推动基于生命周期理论的评价实践优化:

其一, 完善指标量化体系。加强对环境影响与社会效益的量化研究, 引入“环境成本货币化”方法, 将碳排放、生态破坏等转化为可核算的经济成本;建立全国统一的公路养护效益量化标准, 明确通行能力提升、安全改善等指标的计算方法, 增强评价的科学性。

其二, 构建数据共享平台。依托大数据技术, 整合交通、住建、环保等部门的公路建设、养护、运营数据, 建立全生命周期数据共享平台, 实现数据的实时采集、动态更新与高效利用, 为评价工作提供数据支撑。

其三, 优化评价方法组合。结合机器学习技术, 通过历史数据训练模型, 对专家判断进行修正, 降低主观偏差;探索层次分析法、模糊综合评价法与生命周期成本分析(LCCA)、生命周期环境影响评价(LCA)的融合应用, 构建更全面的评价方法体系。

4.3 结语

基于生命周期理论的公路养护方案经济性评价, 是推动公路养护从“粗放式”向“精细化”转型的重要抓手。通过构建全周期、多维度的评价框架, 采用科学的评价方法, 结合工程实践的定性分析, 可实现养护方案的最优选择。尽管当前评价实践仍存在不足, 但随着理论研究的深入、技术手段的进步与数据体系的完善, 该评价模式将在公路养护决策中发挥更加重要的作用, 为实现公路交通的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 王小凤. 基于全生命周期分析的沥青路面预防性养护时机及策略研究[D]. 兰州交通大学[2025-09-05].
- [2] 胡根生, 施公佐, 陈剑锋. 基于周期性养护总承包的沥青路面养护绩效管理实践[C]//中国公路学会养护与管理分会第十二届学术年会. 浙江交投高速公路运营
- [3] 余国凯. 基于全寿命周期理念的高速公路养护分析[J]. 2021. DOI:10.12229/j.issn.1672-5719.2021.18.007.
- [4] 陈涛, 洪盛祥, 蔡海泉. 重载交通高速公路大中修养护方案经济性分析[J]. 现代交通技术, 2021, 18(2): 7. DOI:10.3969/j.issn.1672-9889.2021.02.003.
- [5] 张妍, 李露, 马壮林, 等. 公路养护组织方案优化与效益评估[J]. 中外公路, 2021(S02):041.

作者简介: 王欢, 1980年3月, 男, 汉族, 山西, 研究生。