

公路预防性养护技术应用与经济效益研究

吴建华

阿拉善盟交通运输事业发展中心 内蒙古 阿拉善盟 750306

摘要：为解决传统公路养护成本高、工期长、路面寿命短等问题，本文梳理公路预防性养护核心理论与主流技术体系，结合不同等级、不同环境公路养护实践案例，分析当前技术应用、管理实施及人员设备方面的现存问题。从多维度构建经济效益评估体系，对比预防性养护与传统养护的综合效益，提出技术、管理、成本优化策略及发展保障措施，为公路养护提质降本、长效运维提供参考。

关键词：公路；预防性养护技术；应用；经济效益

引言：公路是交通运输体系的核心基础，长期服役下路面易出现裂缝、车辙、老化等病害，传统矫正性养护存在滞后性、高成本、高干扰等弊端，难以适配公路长效运营需求。预防性养护凭借主动干预、低成本、高效率的优势，成为现代公路养护的主流模式。本文基于全寿命周期理念，系统研究预防性养护技术应用要点与适配场景，量化分析其经济效益，针对性提出优化路径，助力公路养护工作科学化、高效化发展。

1 公路预防性养护核心理论与技术体系

1.1 预防性养护核心概念与养护原则

（1）定义：预防性养护是在路面尚处良好状态时，主动采取的周期性、计划性措施，旨在延缓性能衰减、延长寿命，核心为“提前介入、主动干预”，区别于矫正性养护，追求全寿命周期成本最小化。（2）四大原则：时机适宜（把握衰变曲线拐点）、技术适配（匹配路面类型与病害）、经济最优（全寿命成本最低）、绿色高效（节能低碳、快速通行）^[1]。（3）与传统养护对比：初期投入低，全寿命成本显著降低；施工快、开放交通早；可延长路面寿命 5-8 年；多采用半幅或局部封闭，交通干扰小。

1.2 主流公路预防性养护关键技术

（1）表面封层技术：微表处采用专用改性乳化沥青、集料和水按比例拌和摊铺，厚度 5-10mm，适用于轻度车辙、抗滑不足路段；稀浆封层厚度 3-6mm，用于封水抗磨；超薄磨耗层厚度 15-25mm，兼具抗滑与修复功能。施工要点在于材料配比精准、摊铺均匀、早期养护到位。（2）裂缝处置技术：灌缝适用于缝宽 3-25mm 的纵向裂缝，采用开槽、清缝、灌胶工艺；贴缝适用于缝宽小于 3mm 的细微裂缝，直接粘贴压缝带；封缝适用

于网裂区域，喷涂封缝材料形成封闭膜。操作规范强调裂缝干燥清洁、材料加热温度准确、灌注饱满^[2]。（3）病害预处理技术：针对轻微车辙（深度小于 15mm），采用微表处填补找平；针对松散病害，采用含砂雾封层固结表面松散骨料；针对老化病害，采用再生还原剂涂刷，恢复表层沥青性能，延缓反射裂缝产生。

1.3 预防性养护技术适用条件与筛选依据

（1）道路工况依据：高速公路和一、二级公路优先选用微表处、超薄磨耗层；三、四级公路适用稀浆封层、碎石封层。路面结构强度指数 PSSI 需大于 80，病害程度为轻度方可实施预防性养护。（2）环境交通依据：气候潮湿多雨地区选用封水性能优异的稀浆封层；寒冷地区选用抗冻裂性能好的贴缝材料。交通流量大的路段选择快凝型微表处；重载比例高于 15% 的路段需采用改性沥青类加强型封层。（3）成本管控依据：初期投入较低的技术包括稀浆封层、灌缝，适用于资金有限的一般路段；中期投入包括微表处、贴缝，适用于重要干线公路；长期效益最优的技术包括超薄磨耗层，适用于高等级公路和桥面铺装养护。

2 公路预防性养护技术应用实践与效果分析

2.1 公路预防性养护技术应用流程

（1）路面病害检测与性能评估：采用多功能路况检测车、探地雷达、激光平整度仪等智能化设备，对路面破损状况、平整度、车辙深度、抗滑性能及结构强度进行全面检测，获取高精度空间定位数据与路面性能指标。同时配合人工徒步复核，对智能检测识别的典型病害进行现场确认与补充记录，重点核查裂缝类型、松散范围、泛油程度等细节信息，形成“智能筛查 + 人工精核”的综合检测评估报告，为养护决策提供可靠

数据基础。(2) 养护时机精准判定: 基于路面使用性能衰变曲线规律, 以路面状况指数 (PCI)、行驶质量指数 (RQI) 为主要判定指标, 结合路面结构强度指数 (PSSI) 和车辙深度指数 (RDI), 确定路面性能下降速率拐点。一般选取 PCI 处于 80-90 分区间、路面尚未出现结构性损坏的阶段作为最佳养护窗口期。通过建立路面性能衰变预测模型, 结合年度检测数据动态调整养护计划, 实现从“按时间排期”向“按路况决策”的科学转变^[3]。(3) 养护方案设计与施工实施: 根据检测评估结果和窗口期判定, 开展多方案技术经济比选, 确定最优养护技术方案。施工组织方面, 编制专项施工方案和交通组织方案, 明确材料配比、施工温控、摊铺碾压等关键工艺参数。质量管控贯穿全过程, 实施原材料进场检验、工序交接验收、成品质量检测三级管控体系, 确保施工质量满足规范要求, 完工后开展效果跟踪观测。

2.2 不同场景下养护技术应用案例分析

(1) 高等级公路养护应用: 某高速公路单车道日均交通量超 2 万辆, 路面 PCI 值降至 85, 采用微表处技术进行预防性养护, 施工厚度 8mm, 施工期间半幅封闭、半幅双向通行, 48 小时内完成全幅施工并恢复交通。养护后路面抗滑摆值提升 22%, 路面渗水系数为零, 跟踪两年 PCI 年衰减速率由养护前的 6.3 分/年降低至 2.1 分/年, 延长路面大修周期约 5 年。(2) 普通干线公路养护应用: 某省道二级公路重载交通比例 12%, 路面出现轻微网裂和松散病害, 采用稀浆封层+贴缝组合方案, 单平米造价仅 28 元, 施工后路面防水效果显著, 次年春季翻浆病害同比减少 65%, 路面使用寿命预计延长 3-4 年, 经济效益显著。(3) 特殊环境公路养护应用: 多雨地区高速公路采用高黏改性乳化沥青微表处, 确保早期强度快速形成、抵抗雨水冲刷; 高寒地区采用低温型灌缝胶和抗裂贴, -20℃ 条件下仍保持良好柔韧性; 高温地区采用高模量超薄磨耗层, 60℃ 动稳定度超过 8000 次/mm, 有效抵抗高温车辙病害。

2.3 养护技术应用现存问题

(1) 技术应用问题: 部分养护单位技术选型缺乏科学依据, 存在“一刀切”现象, 未根据路面实际病害类型和程度选择适配工艺。施工过程中材料加热温度控制不严、摊铺厚度不均匀、碾压遍数不足等工艺不规范问题时有发生, 直接影响养护工程质量和使用寿命。(2) 管理实施问题: 养护时机把控存在滞后性, 多以路面出现明显病害后才启动养护程序, 错失最佳窗口期。常态化养护机制不健全, 预防性养护未纳入年度刚性养护计划, 受资金拨付、招标流程等因素制约, 养护时机与最

佳窗口期偏差较大。(3) 人员设备问题: 一线专业养护技术人员短缺, 技术交底和技能培训不到位, 操作人员对新型材料和工艺掌握不够。智能化养护检测设备如多功能路况检测车、探地雷达等购置和维护成本高, 基层养护单位配置率低, 设备闲置与利用率不足并存。

3 公路预防性养护经济效益分析与优化策略

3.1 经济效益评估体系构建

(1) 评估核心维度: 经济效益评估涵盖直接经济效益、间接经济效益和长期综合效益三大维度。直接经济效益体现为养护工程节约的材料费、人工费及设备台班费等可量化货币收益; 间接经济效益体现为减少交通拥堵、降低车辆磨损、缩短运输时间带来的社会效益; 长期综合效益体现为路面大修周期延长、全寿命周期成本降低及资源利用效率提升等可持续价值^[4]。(2) 成本核算内容: 初期养护成本包括材料采购费、设备租赁费、人工费及交通组织费等一次性投入; 后期运维成本包括日常巡查费、小修保养费、定期检测费等持续性支出; 病害修复增量成本指若未及时养护导致病害加深后, 实施矫正性修复所需额外追加的费用, 即“拖延成本”。(3) 效益核算标准: 路面寿命延长效益以养护前后路面服务年限差值乘以年均养护费用节省额量化; 交通通行提质效益以养护后行车速度提升、交通事故率下降及车辆燃油消耗降低等指标换算; 资源节约效益以养护工程节约的沥青、集料等不可再生资源用量与废旧材料循环利用率综合衡量。评估体系具体指标构成见下表:

核算维度	具体指标	计量单位
初期养护成本	材料费、人工费、设备费	元/m ²
后期运维成本	年养护经费、检测费	万元/年
直接效益	养护费用节省额	万元
间接效益	通行效率提升、事故降低	万元/年
长期效益	大修周期延长年限	年

3.2 预防性养护与传统养护经济效益对比分析

(1) 短期成本对比: 预防性养护单次投入约 15-50 元/m², 仅为矫正性养护 (约 80-150 元/m²) 的 20%-40%; 施工工期短, 微表处施工 48 小时内可开放交通, 而矫正性养护需 7-15 天封闭施工; 交通延误成本显著低于传统养护模式, 单次养护交通影响时间减少 60% 以上。(2) 长期效益对比: 全寿命周期内 (按 20 年计), 预防性养护方案总成本约为传统“修补+大修”方案的

55%-70%，累计节省养护资金约 30%-45%。路面使用寿命方面，定期实施预防性养护可将沥青路面大修间隔由 8-10 年延长至 13-15 年，养护频次由传统模式的 3-4 次大中修减少为“预防性养护 +1 次大修”的组合模式。（3）综合效益总结：量化分析表明，预防性养护在全寿命周期成本、路面服役性能保持、交通通行效率及资源节约等方面均具有显著经济优势。以 100 公里二级公路为例，采用预防性养护方案较传统模式 20 年累计节省养护资金约 1200-1800 万元，同时减少因大修封闭施工造成的交通拥堵损失约 500 万元，综合经济价值突出。

3.3 提升预防性养护经济效益的优化策略

（1）技术优化：根据路况检测数据精准匹配养护技术类型，避免选型过高造成浪费或过低导致效果不佳；积极推广含砂雾封层、再生还原剂等绿色低碳低成本养护技术，降低材料能耗 15%-20%；严格规范施工工艺流程，确保材料用量精准、摊铺厚度达标，杜绝因质量问题导致的返工损失。（2）管理优化：建立动态养护监测数据库，利用路面性能衰变模型科学预测最佳养护时机，避免“早养”造成资金浪费或“晚养”增加修复成本；将预防性养护纳入年度刚性养护计划，实行“按路况决策”的精准管理；完善养护台账信息系统，实现养护投入、病害处治、效果跟踪等全过程可追溯、可分析。（3）成本优化：统筹安排养护资金，优先保障路况良好路段的预防性养护投入，形成良性资金循环；推广区域性集中养护和整线规模化施工，通过规模效应降低材料采购单价和机械调遣费用；加大沥青路面废旧材料（RAP）循环利用比例，利用再生技术将废旧料掺量提升至 30%-50%，有效降低原材料成本 25%-40%^[5]。

3.4 预防性养护发展保障措施

（1）人才保障：建立分层分级培训体系，针对管理人员、技术人员和一线操作人员分别开展养护决策、技术规范和实操技能专项培训，每年组织不少于 2 次现场技能比武和案例研讨。加强与高校、科研院所合作，定

向培养预防性养护技术骨干，提升基层单位技术应用与成本管控综合能力。（2）制度保障：制定和完善预防性养护管理办法、技术考核标准及资金使用规范，明确各层级职责分工和工作流程。将预防性养护实施率、养护质量达标率、路面使用寿命延长年限等纳入养护绩效考核指标体系，建立奖惩分明的激励约束机制，推动预防性养护工作制度化、常态化。（3）技术保障：大力推广多功能路况智能检测车、无人机巡查、路面探地雷达等先进检测设备在基层养护单位的配置与应用，利用物联网和大数据技术建立路面性能实时监测平台，实现养护决策从经验判断向数据驱动转型。搭建省级预防性养护技术交流平台，定期发布技术推广清单和典型案例库，促进先进成熟技术的规模化应用。

结束语

本文系统探究了公路预防性养护的技术体系、应用实效与经济价值，证实预防性养护可有效降低全寿命周期养护成本、延长路面寿命、减少交通影响。研究明确了当前养护工作的短板问题，从技术、管理、成本及保障层面制定了优化方案。未来需持续推广智能化检测与绿色养护技术，完善常态化养护机制，强化人才与制度支撑，充分释放预防性养护的经济与社会效益，助力公路交通高质量发展。

参考文献

[1] 陈思思. 基于非现场执法数据的公路预防性养护决策模型与经济研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(08): 45-48.

[2] 张彩虹. 山区高速公路沥青路面预防性养护技术应用研究 [J]. 交通节能与环保, 2025, 21(02): 179-182.

[3] 时志超. 预防性公路养护技术在现代高速公路养护中的应用 [J]. 运输经理世界, 2024, 25(10): 142-144.

[4] 明松. 公路养护中预防性养护技术的应用 [J]. 低碳世界, 2024, 14(06): 160-162.

[5] 刘富勤, 秦雅淇, 邬伟鹏, 等. 基于全寿命周期的国道养护综合效益分析 [J]. 公路, 2023, 68(05): 336-345.