

沥青路面预防性养护技术应用效果与质量评价分析

邓中强

德宏公路局芒市公路分局 云南 德宏 678400

摘要:传统的“坏了再修”被动式养护模式已难以适应新时代高质量发展的要求。在此背景下,预防性养护作为一种前瞻性的养护策略,因其能有效延缓路面性能衰减、延长使用寿命、降低全寿命周期成本等优势,正受到越来越广泛的关注与应用。本文系统梳理了雾封层、微表处、稀浆封层、碎石封层及超薄磨耗层等主流沥青路面预防性养护技术的原理、适用条件与施工要点;构建了涵盖功能性、耐久性、经济性与环保性四个维度的综合评价指标体系,并深入探讨了基于现场检测数据、实验室性能试验与用户满意度调查的多源信息融合评价方法;最后,针对当前预防性养护实践中存在的决策机制不完善、施工质量控制薄弱、后评价体系缺失等问题,提出了优化建议。研究表明,科学实施预防性养护是实现公路资产保值增值、保障行车安全舒适、推动行业绿色低碳转型的关键路径。

关键词: 沥青路面; 预防性养护; 应用效果; 质量评价; 路面性能

引言

公路庞大的基础设施体系在支撑经济社会发展的同时,也面临着严峻的养护挑战。早期公路进入性能衰减期,重载超载车辆和极端气候加速路面损伤,若继续采用矫正性养护模式,会导致成本攀升、交通中断,影响路网运行与公众出行。预防性养护理念源于设备维护领域,能在路面良好或轻微病害时采取措施,防止或延缓病害发展,具有“治未病”优势,在路面优良区间实施投入产出比最高。但预防性养护成功实施受多重因素影响,我国在此领域虽取得进步,仍存在决策缺乏数据支撑、施工市场混乱、缺乏后评价体系等问题。因此,深入研究沥青路面预防性养护技术应用效果并构建质量评价框架,对指导实践、提升效益、推动养护管理转型意义重大。

1 主流沥青路面预防性养护技术概述

1.1 表面封层类技术

此类技术主要通过路表形成一层致密的保护膜,起到防水、封闭微裂缝、恢复表面功能的作用。

1.1.1 雾封层

将慢裂或中裂的乳化沥青以较低的洒布量(通常为 $0.2-0.6\text{ L/m}^2$)喷洒于路面上。其主要功能是封闭路表微孔隙与细小裂缝,防止水分下渗,同时补充老化沥青中的轻质油分,延缓沥青老化。雾封层施工简便、成本低廉,适用于 $\text{PCI} > 80$ 、无明显车辙与结构性病害的路面。但其缺点是初期抗滑性能会有所下降,且对已有较宽裂缝的封闭效果有限。

1.1.2 微表处

由聚合物改性乳化沥青、级配良好的集料、矿物填

料、水及添加剂按特定比例拌和而成的稠浆混合料,经专用摊铺机摊铺于路面上形成的薄层。微表处具有优异的抗滑、耐磨、防水及抗老化性能,能有效修复车辙(深度 $< 15\text{ mm}$)、改善平整度,并可快速开放交通(通常1-2小时)。其适用范围广,对原路面状况要求相对宽松($\text{PCI} > 70$),是目前应用最广泛的预防性养护技术之一。但其施工对原材料质量和环境温度($> 10^\circ\text{C}$)要求较高,且初期可能存在噪音较大的问题,微表处施工需严格把控工艺,才能更好的满足路面使用性能。

1.1.3 稀浆封层

与微表处类似,但通常采用普通乳化沥青而非聚合物改性乳化沥青,且混合料的稠度较低。其成本低于微表处,主要用于改善低交通量道路的抗滑性和密封性,适用于 $\text{PCI} > 75$ 的路面。其耐久性和抗车辙能力弱于微表处。

1.1.4 碎石封层

先在路面上喷洒一层热沥青或乳化沥青,随即撒布一层单一粒径的预裹覆碎石,经碾压后形成一层嵌挤结构的磨耗层。碎石封层防水性能极佳,能有效阻止反射裂缝,并显著提升抗滑性能。其成本低、施工快,特别适用于中低等级公路。但其缺点是初期易产生飞散(碎石脱落),行车舒适性较差,且对原路面平整度要求较高。

1.2 薄层罩面类技术

此类技术通过加铺一层较薄(通常 $1.5-3.0\text{ cm}$)的高性能沥青混合料,从根本上恢复路面的结构强度与表面功能。超薄磨耗层(UTFC)是其中的代表,它采用间断级配或开级配的热拌沥青混合料(如Novachip、SMA-10等),通过专用设备实现粘层油与混合料的同步摊铺,从而形成一个整体性良好的功能层^[1]。UTFC能够提供卓

越的抗滑、降噪、排水及抗车辙性能，极大地提升了行车的安全性与舒适性，其使用寿命通常可达5至8年。正因如此，它被广泛应用于高等级公路、城市快速路等对行车品质要求极高的路段。然而，其较高的造价以及对施工设备和技术极为严格的要求，也构成了推广应用的主要障碍。

2 预防性养护工程质量评价指标体系构建

本文从功能性、耐久性、经济性与环保性四个核心维度出发，构建评价指标体系。

2.1 功能性评价

功能性直接关系到用户的行车体验与安全，是评价的首要维度。其中，抗滑性能是预防性养护最核心的功能目标之一，通常通过摆式摩擦系数（BPN）或横向力系数（SFC）来衡量，尤其是微表处、碎石封层和UTFC对此有显著的提升作用。平整度则采用国际平整度指数（IRI）或标准差（ σ ）来评价，良好的平整度不仅能提升行车舒适性，还能有效减少车辆的磨损，微表处和UTFC在改善平整度方面效果尤为突出。此外，防水或渗水性能也是关键指标，通过渗水系数（mL/min）可以直观反映养护层阻止水分侵入路面结构的能力，有效的预防性养护应能显著降低路面的渗水性，从而保护基层免受水损害。最后，外观质量，包括色泽的均匀性以及是否存在泛油、松散、剥落、接缝不良等视觉缺陷，也是衡量施工精细程度和即时效果的重要方面，为构建安全、高效、绿色的现代化公路网络提供坚实支撑。

2.2 耐久性评价

耐久性反映了养护措施的长期有效性，直接决定了其真正的经济价值。使用寿命是从施工完成到需要再次进行养护的时间长度，这是衡量耐久性最直观的指标，但需要通过长期的跟踪观测才能获得准确数据。性能衰减速率则提供了更为动态的视角，通过定期检测抗滑、平整度等功能性指标，并绘制其随时间变化的衰减曲线，可以科学评估养护层抵抗交通荷载反复作用和环境侵蚀（如紫外线、雨水、冻融循环）的综合能力^[2]。病害抑制效果同样是耐久性的重要体现，即评价所实施的养护层对原路面已存在的裂缝、坑槽等病害的抑制或延缓其进一步发展的情况，这直接关系到预防性养护“防患于未然”这一根本目的的实现程度。

2.3 经济性评价

经济性是养护决策的关键依据，必须摒弃只看眼前投入的短视思维，而应引入全寿命周期成本（LCC）的理念进行全面考量。初始投资成本固然重要，它包括了材料费、人工费、机械费以及因施工造成的交通组织与

疏导费用等直接支出。然而，真正能体现预防性养护优越性的是其全寿命周期成本（LCC），该成本不仅包含初始投入，还涵盖了未来折算到当前价值的后续养护成本以及因路况不佳导致的用户延误成本（如额外的燃油消耗、时间损失和车辆磨损）。大量实践证明，科学的预防性养护虽然可能有较高的初始投入，但能显著降低未来的矫正性养护成本和巨大的社会成本。效益费用比（BCR）则是将预防性养护带来的综合经济效益（如延长道路寿命、减少交通事故、节约社会燃油等）与总成本进行量化比较，是判断项目是否值得投资的核心依据，助力公路养护向智能化精准化发展。

2.4 环保性评价

在国家“双碳”战略目标的引领下，环保性已成为评价养护技术不可或缺的重要维度。能耗与碳排放是首要考量因素，需要对比不同技术在材料生产、运输、现场施工等全链条环节的能源消耗与温室气体排放量。通常而言，常温施工技术（如微表处、雾封层）因其无需加热，在这方面具有显著优势，远优于需要高温拌和与摊铺的热拌技术（如UTFC）。资源循环利用能力也日益受到重视，部分先进的预防性养护技术（如某些再生型微表处）能够掺入一定比例的回收沥青路面材料（RAP），这不仅减少了对新矿石和沥青资源的开采消耗，也实现了建筑垃圾的资源化利用。此外，施工过程对周边环境的影响，例如产生的粉尘、噪音污染以及对沿线居民生活的干扰程度，也是衡量其环保友好性的重要方面。

3 应用效果与质量评价方法

构建了评价体系后，需要有效的评价方法来获取数据并进行分析。

3.1 数据采集方法

科学评价的基础是全面、准确的数据。现场快速无损检测是获取大范围、连续性数据的有效手段，利用多功能路况检测车，可以在正常车速下高效、连续地采集国际平整度指数（IRI）、横向力系数（SFC）、车辙深度（RD）以及路面损坏状况（PCI）等关键指标，为大规模、周期性的跟踪评价提供了坚实的数据基础。为了从微观层面深入了解养护层的内在性能，实验室性能试验同样不可或缺。通过从养护后的路面上钻取芯样，进行马歇尔稳定度、冻融劈裂、浸水马歇尔等试验，可以对其力学强度、水稳定性等核心性能进行定量分析，弥补宏观检测的不足。最后，用户的主观感受是客观数据的重要补充^[3]。通过设计合理的问卷或利用线上平台收集驾驶员对行车舒适性、安全性、噪音等方面的主观评

价,能够更全面地反映预防性养护工程的社会效益和用户体验。

3.2 评价模型与分析

面对多维度、多指标的复杂评价问题,需要借助科学的数学模型进行综合分析。灰色关联分析法(GRA)适用于评价指标信息不完全、样本量较小的实际情况,它通过计算各备选方案与理想最优方案的关联度,对不同养护方案进行排序和优选,具有较强的实用性。层次分析法(AHP)则是一种经典的多准则决策方法,它将复杂的评价问题分解为目标层、准则层和指标层,通过专家打分的方式确定各层级指标的相对权重,最终得出各方案的综合评分,特别适用于需要融合专家经验的多目标决策场景。数据包络分析法(DEA)作为一种非参数的效率评价工具,可以用来评价多个同类预防性养护项目(即决策单元)的相对有效性,通过投入(如成本)与产出(如性能提升)的对比,识别出投入产出效率最高的“标杆”项目,为后续项目的优化提供参照,未来需加强跨学科协作,提升路网运维效率。

4 存在的问题与优化建议

4.1 主要问题

当前,许多地方的预防性养护决策机制依然较为粗放,过度依赖管理者的主观经验,缺乏一个基于历史路况大数据、交通量、气象、材料价格等多源信息融合的科学化、精准化决策支持系统,导致“该养未养”造成病害恶化,或“过早养护”造成资金浪费的现象时有发生。与此同时,施工市场的质量参差不齐也是一个顽疾,从原材料的质量控制、配合比的科学设计到现场施工工艺的精准执行,任何一个环节的疏忽都可能导致“好技术”无法产出“好效果”,甚至出现劣质工程。此外,“重建设、轻评价”的观念普遍存在,缺乏对预防性养护项目长期效果的强制性跟踪与后评价制度,使得宝贵的实践经验无法转化为知识沉淀,难以形成“实践-评价-优化”的良性闭环。最后,部分新技术、新材料的标准规范更新滞后,给工程的质量控制、验收评定以及责任界定带来了困难,制约了行业的健康发展。

4.2 优化建议

为应对上述挑战,亟需采取系统性措施。首先,应大力构建智能化的预防性养护决策平台,整合各类静态与动态数据,利用机器学习等先进算法,建立能够精准

预测养护时机并智能推荐最优技术的决策模型,实现从“经验驱动”向“数据驱动”的转变。其次,必须强化全过程的质量管控,全面推行“首件工程认可制”,对原材料进场、生产配合比验证、现场摊铺碾压等关键工序实行严格监管,并积极推广信息化监管手段,如拌合站生产数据实时上传、施工过程视频AI监控等,确保施工质量始终处于受控状态^[4]。第三,要建立健全强制性的后评价制度,明确规定所有预防性养护项目必须在完工后1年、3年、5年等关键节点进行系统性后评价,并将评价结果与施工单位的信用评价体系挂钩,直接影响其未来参与项目招投标的资格,以此倒逼各方重视工程质量与长期效果。最后,行业主管部门应加快标准规范的更新步伐,鼓励产学研深度融合,及时将经过实践检验的成熟新技术、新工艺纳入行业或地方标准体系,为工程实践提供权威、清晰的技术指引。

5 结语

沥青路面预防性养护是现代公路养护管理的发展方向,能以较小前期投入换取路面性能长期稳定与全寿命周期成本显著降低。本文梳理主流技术特点与适用性,创新构建四维一体综合评价指标体系。研究发现,最优预防性养护方案需综合研判多方面因素,微表处因综合性能与成本适中应用最广,超薄磨耗层在高端场景长期效益卓越。未来,预防性养护发展将依赖数据驱动决策、精细化质量控制与闭环后评价反馈机制。随着智慧交通、绿色低碳理念普及,其技术将向高性能、多功能等方向演进。只有建立科学严谨可操作的质量评价与分析体系,才能发挥预防性养护潜力,实现公路基础设施品质提升,为交通强国建设筑牢路网根基,推动预防性养护与智慧监测融合,实现精准养护,提升运维效率与可持续性。

参考文献

- [1]方维雄.公路工程中的沥青路面预防性养护技术[J].中国科技信息,2025,(19):29-31.
- [2]王亮.高速公路沥青路面预防性养护管理[J].工程建设与设计,2025,(17):249-251.
- [3]王华.公路沥青路面预防性养护措施及现场应用分析[J].工程机械与维修,2025,(09):52-54.
- [4]邹容.高速公路沥青路面预防性养护技术研究[J].工程机械与维修,2025,(09):134-136.