

预防性养护在高速公路路面工程中的应用实践

原 浩

河南省大道路业有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：随着我国高速公路网络的日益完善与服役年限的增长，传统的“被动式、矫正性”养护模式已难以满足新时代对道路基础设施高质量、高效率、长寿命、低扰动的管理需求。预防性养护作为一种主动、前瞻、科学的养护理念，正成为推动高速公路养护事业转型升级的核心驱动力。本文系统论述了预防性养护的基本内涵、理论基础与核心原则，详细梳理并分类阐述了适用于高速公路沥青路面的主流预防性养护技术体系，深入探讨了基于全生命周期成本分析的养护决策机制，并从经济效益、社会效益与环境效益三个维度全面剖析了其综合价值。最后，文章展望了预防性养护与数字化、智能化技术深度融合的发展趋势，旨在为构建现代化、可持续的高速公路养护管理体系提供理论参考与实践指引。

关键词：预防性养护；高速公路；路面工程；沥青路面；全生命周期成本

引言

高速公路作为国家经济发展的大动脉和现代化交通体系的关键骨架，其安全、畅通与高效运行直接关系到国民经济的命脉与社会民生的福祉。经过数十年的高速发展，我国已建成全球规模最大的高速公路网。然而，庞大的路网规模也带来了日益严峻的养护挑战。早期建设的高速公路陆续进入性能衰减期，而持续增长的交通量与重载化趋势进一步加速了路面结构的损伤进程。在此背景下，若仍沿用“坏了才修、修了再坏”的传统被动养护模式，不仅会导致高昂的修复成本、漫长的施工周期和严重的交通干扰，更会大幅缩短道路的使用寿命，造成巨大的资源浪费。交通运输部发布的《公路“十四五”发展规划》及《“十四五”公路养护管理发展纲要》等文件，明确提出了“强化预防性养护”、“推动公路养护管理高质量发展”的战略要求，标志着我国公路养护工作正从以事后修复为主向以事前预防为主的深刻转型。预防性养护（Preventive Maintenance, PM）的核心思想源于“治未病”的东方智慧，即在路面结构尚处于完好或仅有轻微功能性病害的阶段，通过科学、有计划地实施一系列干预措施，有效阻断或延缓病害的发展路径，从而最大限度地保持和恢复路面的服务功能，延长其使用寿命，并实现全生命周期内养护成本的最优化。本文将围绕这一核心主题，对预防性养护在高速公路路面工程中的应用实践进行系统性的理论探讨。

1 预防性养护的理念、定义与基本原则

1.1 理念溯源与概念界定

预防性养护并非简单的日常小修小补，而是一种建立在科学评估与系统规划基础上的先进养护哲学。该理

念于20世纪90年代初由美国率先提出，并在全球范围内得到广泛认同与实践。根据美国各州公路和运输官员协会（AASHTO）的经典定义，预防性养护是指“在不显著增加路面结构承载能力的前提下，对结构状况良好的现有道路系统，有计划地采取一系列具有成本效益的措施，以延缓路面性能的劣化、维持或改善其使用功能”。在我国，《公路沥青路面预防养护技术规范》（JTG/T 5142-01—2021）的颁布实施，首次在行业标准层面确立了预防性养护的技术框架。该规范将其界定为：在路面结构强度充足、整体状况良好，仅存在轻微病害或病害隐患时，为延缓性能衰减、保持良好服务状态而预先采取的主动性养护工程。其本质特征在于“主动性”、“计划性”和“经济性”，核心目标是“治早、治小”，防患于未然。

1.2 实施的基本原则

成功实施预防性养护需遵循一套相互关联、相辅相成的基本原则。其中，时机适宜性原则是决定成败的关键所在，它要求养护干预必须精准地把握在路面性能衰减曲线的“拐点”之前，即当路面技术状况指数仍处于高位区间时果断行动，过早则徒增成本，过晚则失去预防意义^[1]。与之紧密相连的是技术匹配性原则，这意味着养护方案的选择绝非随意为之，而是需要综合考量路面的具体病害形态、交通荷载特性、区域气候环境以及预期的性能恢复目标，做到精准施策、对症下药。在此基础上，全周期经济性原则为决策提供了根本的价值尺度，它引导管理者超越单次工程的直接支出，着眼于整个设计使用年限内的全生命周期成本，认识到前期合理的预防投入能够带来长远的、巨大的经济效益。最终，所有这些原则的落地都依赖

于系统规划性原则,即将预防性养护纳入高速公路养护的长期战略规划之中,形成一个动态更新、滚动实施的科学计划体系,彻底摒弃零散、随机的应急式操作,确保养护工作的前瞻性与连续性。

2 高速公路沥青路面预防性养护技术体系

针对高速公路沥青路面常见的功能性病害,业已形成一套成熟、多元的技术体系。根据作用机理和施工工艺,可主要分为封层类、罩面类和再生类三大技术。

2.1 封层类技术

封层类技术主要通过在原路面上铺设一层或多层薄层材料,起到封闭表面、阻止水分侵入、恢复抗滑性能和改善外观的作用。其特点是施工快捷、成本较低、对交通影响小。雾封层通过喷洒稀释的慢裂乳化沥青来封闭微裂缝并延缓老化,而含砂雾封层则在此基础上融入细砂以同步提升抗滑能力。碎石封层,特别是同步碎石封层工艺,通过将热沥青或改性乳化沥青与单一粒径碎石同步撒布碾压,不仅能有效封闭裂缝,还能提供优异且持久的抗滑表层^[2]。微表处作为高速公路应用最为广泛的预防性养护技术之一,采用聚合物改性乳化沥青与精心设计的级配集料在专用设备中现场拌和摊铺,凭借其快速成型、开放交通迅速的优势,能高效地填充车辙、修复泛油并全面提升路面的防水与抗滑性能。为了追求更优的综合效果,复合封层技术应运而生,例如“开普封层”便巧妙地结合了碎石封层的结构性优势与微表处的平整美观特性,先以碎石封层处理深层病害,再覆以微表处形成高品质行车表面。

2.2 罩面类技术

罩面类技术是在原路面上加铺一层新的沥青混合料面层,厚度通常在1.5cm至4.0cm之间,不仅能解决功能性问题,还能在一定程度上改善路面的平整度。超薄磨耗层以其1.5至2.5厘米的极致厚度,采用高性能改性沥青和间断级配粗集料,在高温下摊铺后能形成构造深度大、抗滑性能卓越、降噪效果显著且耐久性强的优质表层,特别契合高速公路对抗滑与行车舒适性的严苛要求。相比之下,薄层罩面的应用范围更为宽广,其2.5至4.0厘米的厚度使其能够应对稍为严重的病害状况,如中等程度的车辙和裂缝,在功能性恢复与成本控制之间取得了良好的平衡。

2.3 再生类技术

再生类技术通过就地加热、翻松、添加再生剂和新料后重新摊铺压实,实现对旧路面材料的循环利用,兼具功能性恢复和结构性补强的效果,符合绿色可持续发展理念。就地热再生技术利用专用机组对路面表层进行

一体化的加热、铣刨、拌和与摊铺作业,不仅能有效消除车辙、裂缝等各类病害,更能实现旧路面材料的百分之百循环利用,大幅减少新材料消耗和碳排放,充分体现了资源节约与环境友好的现代工程理念,尽管其对原路面状况和施工工艺精度有着较高的要求。

3 预防性养护的决策机制与评价体系

科学的决策是预防性养护发挥最大效益的前提。一个完整的决策流程包括路况检测与评价、养护需求分析、技术方案比选和最终决策四个环节。

3.1 路面状况检测与评价指标

决策的基础是准确、全面的路况数据。依据《公路技术状况评定标准》(JTG 5210),高速公路沥青路面的状况主要通过路面使用性能指数(PQI)来综合评价,PQI由多个分项指标加权计算得出。这些指标共同构成了对路面健康状况的立体画像:路面损坏状况指数(PCI)量化了各类破损的严重程度,路面行驶质量指数(RQI)反映了行车的平稳舒适性,路面车辙深度指数(RDI)和跳车指数(PBI)则分别关注轮迹带变形和局部纵断面不连续的问题。对于高速行车安全至关重要的抗滑性能,则由路面抗滑性能指数(SRI)和磨耗指数(PWI)共同衡量。而作为判断是否适用预防性养护的根本前提,路面结构强度指数(PSSI)必须通过弯沉检测确认其处于良好水平,这表明路面的承载能力尚无结构性损伤。只有当PSSI达标,而其他功能性指标出现下降趋势时,才标志着进入了实施预防性养护的最佳窗口期。

3.2 基于全生命周期成本(LCC)的效益分析

预防性养护的核心优势在于其卓越的长期经济效益,而全生命周期成本分析法正是量化这一优势的有效工具。该方法突破了传统会计核算的局限,将视野拓展至资产的整个使用周期,全面考量初始投入、后续所有养护维修费用、因施工造成的用户延误成本以及期末残值等所有相关支出。大量研究与实践反复证实,在路面状况尚好时投入单位资金进行预防性养护,能够在未来节省数倍于此的矫正性养护或大中修费用^[3]。这种经济性源于多方面:首先,预防性养护工程本身具有工程量小、工艺简便的特点,直接成本低廉;其次,它能够有效推迟甚至避免昂贵的大规模重建工程,从而延长了资产的整体使用寿命;再次,其快速施工的特性极大减少了对交通流的干扰,显著降低了社会车辆因延误而产生的额外时间与燃油成本;最后,长期维持的良好路况本身就是对国有资产的一种有效保值与增值。因此,养护决策者必须摒弃短视的成本观念,建立起以全生命周期成本最小化为核心的科学决策模型。

4 预防性养护的综合效益分析

预防性养护的价值远不止于经济层面，其带来的社会效益和环境效益同样不可忽视。

4.1 经济效益

如前所述，预防性养护通过优化全生命周期成本，为养护资金紧张的现状提供了高效的解决方案。它使有限的养护资金能够覆盖更广的路网面积，实现养护效益的最大化，保障了高速公路网络的整体服务水平。

4.2 社会效益

预防性养护的社会价值体现在多个维度。通过及时修复抗滑性能不足、车辙、坑槽等安全隐患，它能显著降低雨天打滑、车辆失控等交通事故的发生率，从而有力地提升了行车安全。同时，其快速、高效的施工方式最大限度地减少了对正常交通的干扰，保障了路网的畅通无阻，提升了公众出行的便捷性和可靠性。此外，通过恢复路面的平整度和抗滑性能，预防性养护也为广大司乘人员创造了更加平稳、舒适的驾乘体验。

4.3 环境效益

预防性养护是践行绿色交通和可持续发展理念的重要途径。多数预防性养护技术，尤其是各类封层技术和再生技术，因其材料用量少且能高效利用旧料，大幅减少了对新矿石、沥青等自然资源的开采消耗，实现了资源的节约。与大规模铣刨重铺相比，预防性养护的施工过程能耗更低，产生的建筑垃圾和温室气体排放也显著减少^[4]。不仅如此，由于施工周期的缩短，因交通拥堵而产生的额外车辆尾气排放也随之降低，从全链条的角度为环境保护做出了积极贡献。

5 发展趋势与展望

面向未来，预防性养护将与新一代信息技术深度融合，迈向更高水平的智能化、精准化和绿色化。依托物联网、大数据、人工智能和无人机等前沿技术，构建“空-天-地”一体化的智能巡检体系将成为可能，这将实现对路面病害的自动识别、精准定位和实时监测。基于

海量历史数据和先进的机器学习算法，可以建立起高精度的路面性能预测模型，推动养护模式从“被动响应”向“主动预测”跨越，为预防性养护提供前所未有的科学决策支持。与此同时，材料与工艺的持续创新，如温拌/冷拌沥青、高掺量再生料乃至自修复材料的研发与应用，将进一步提升养护效果并降低环境足迹。在管理模式上，“预防化养护”将日益强调绩效导向，通过“按效付费”的机制，将养护资金拨付与实际达成的路况绩效指标紧密挂钩，从而倒逼从业单位不断提升技术水平和管理效能，确保预防性养护的各项措施能够真正落地见效。

6 结语

预防性养护代表了现代高速公路路面工程养护的先进方向和发展必然。它通过一套科学的理念、成熟的技术、严谨的决策和显著的综合效益，有效破解了传统养护模式面临的困境。在交通强国和高质量发展战略的引领下，持续推进预防性养护的标准化、规模化应用，并积极拥抱数字化、智能化浪潮，是保障我国庞大高速公路网络长期安全、畅通、高效、绿色运行的根本之策。未来的研究与实践应聚焦于深化智能决策模型、推广绿色低碳技术、完善绩效考核机制，从而将预防性养护推向一个更加精准、高效、可持续的新高度。

参考文献

- [1]董丽艳,杨春亮,王旭东.浅谈高速公路路面预防性养护维修工程现场作业的精细化管理[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2024,26(2):29-33.
- [2]俞晓明.公路工程沥青路面病害预防性养护技术探讨[J].价值工程,2026,45(12):29-31.
- [3]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.
- [4]万鹏,王建文.公路路面养护工程预防性养护技术研究[J].工程技术研究,2025,10(8):81-83.