

预防性养护策略对公路使用寿命的影响与实施路径

郭 琪

苍溪县交通工程建设事务中心 四川 广元 628000

摘要：预防性养护策略通过融合多源数据驱动病害预测模型与数字孪生决策系统，实现对公路性能衰减的前瞻性干预，显著提升结构耐久性与服役效能。基于LSTM-图神经网络的多因子耦合模型有效整合气候、荷载与材料老化因素，提升病害演化的预测精度，支撑养护时机的精准判断。结合BIM+GIS与物联网技术构建的闭环管理系统，实现从数据采集、模型仿真到方案生成的全流程数字化协同。多目标优化模型在寿命延长、成本节约与碳排放控制间达成平衡，实证表明组合策略可使公路使用寿命延长7.2年，成本效益比提升1.8倍。该体系为公路全生命周期管理提供了可复制的技术范式，适用于重载交通与气候敏感区域的养护决策支持。

关键词：多因子耦合预测；数字孪生决策；全生命周期成本；病害演化模型；智能养护系统

引言：公路交通作为国家基础设施的核心组成部分，其服役性能直接影响区域经济运行效率与可持续发展能力。随着交通荷载持续增长与气候环境变化加剧，传统“被动修复”模式已难以满足长寿命、低维护的工程需求。预防性养护策略通过早期干预与主动维护，有效延缓路面性能衰减，成为提升公路全生命周期效益的关键路径。

近年来，基于材料修复与结构强化的技术体系逐步完善，封层技术、薄层罩面及裂缝修复等手段在实际工程中得到广泛应用。其作用机制在于阻断水损害路径、延缓沥青老化并提升表面抗滑能力，从而维持路面功能完整性。同时，全生命周期成本（LCC）动态评估框架逐步引入动态折现率与碳排放成本因子，实现经济性、环境性与社会效益的综合权衡。然而，病害预测精度仍受制于传统模型对交通荷载与气候变化耦合效应的捕捉能力不足。尽管机器学习与数字孪生技术为病害演化模拟提供了新方法，其模型可靠性仍依赖高质量数据支撑与闭环验证机制。

1 预防性养护策略的技术体系与作用机制

预防性养护策略通过材料修复与结构强化实现公路性能衰减的主动干预，其技术体系涵盖封层技术、薄层罩面及裂缝修复等表面处治手段，旨在延缓病害发展进程，提升路面使用品质。该策略以“治早治小”为核心理念，强调在路面尚处良好状态时即实施干预，从而避免进入结构性破坏阶段。通过科学识别病害前兆与性能退化趋势，可有效延缓疲劳开裂、车辙形成与水损害等典型劣化路径。研究表明，早期干预可使路面寿命延长20%以上，显著降低后期大修频率。

1.1 表面处治技术的功能分类与适用场景

封层技术包括雾封层与微表处，通过在沥青表面形成致密保护膜，减缓氧化老化过程，提升抗渗能力。该类技术适用于轻度裂缝、表面松散及泛油等表层病害，尤其在高温多雨地区可显著延缓沥青材料性能衰减。微表处因具备良好抗滑性与快速开放交通特性，常用于城市道路或交通繁忙路段。薄层罩面则通过增加薄层沥青结构厚度，提升路面整体抗滑性能与承载能力，适用于重载交通路段的功能性修复，尤其在车辙深度未超过15mm时实施效果最优。裂缝修复技术如灌缝与贴缝，通过填充裂缝空隙阻断水分侵入，防止基层软化与剥落，对纵向裂缝与网状裂缝治理具有明确成效。此类技术在裂缝扩展初期实施，可有效抑制水损害演化链。

1.2 全生命周期成本（LCC）的动态评估框架

全生命周期成本评估需综合初始建设成本、养护成本、交通延误成本以及碳排放成本四类关键要素。传统静态评估方法难以反映时间价值变动与外部性成本，而引入动态折现率机制可有效整合资金时间价值与通货膨胀影响，使成本预测更具现实意义。江苏实测数据显示，采用动态折现率模型后，养护成本节约率达23.4%。进一步构建“投资-性能-寿命”三维关联模型，可实现养护策略的经济性与耐久性协同优化。该模型通过量化不同干预时机与技术组合的综合效益，支持决策者在有限预算下实现资源配置最优化。碳排放成本因子的纳入，使评估体系涵盖环境外部性，推动绿色养护理念落地。

1.3 病害预测技术的演进与局限性

传统病害预测模型依赖经验阈值与静态参数设定，难以捕捉交通荷载波动与气候变化的动态影响，预测精度受限。近年来，机器学习模型如LSTM与图神经网络被引入，通过融合车载检测数据、气象记录与交通流量信

息,显著提升病害演化趋势的识别能力。然而,这类模型易出现过拟合问题,尤其在样本分布不均或数据噪声较大的情况下,泛化能力下降。数字孪生技术为病害演化提供了虚拟映射路径,实现从静态评估到动态模拟的跃迁。其通过构建高保真数字模型,支持多场景推演与干预策略预演。但该技术的推广仍受限于高质量数据采集、模型校准周期长与验证机制不健全等问题。

通过将智能预测模型与动态LCC评估框架深度融合,构建了覆盖“感知—预测—决策—执行—反馈”全链条的闭环体系。该体系不仅提升了病害识别精度,更实现了养护策略的自适应调整与长期绩效追踪。实证数据表明,采用该路径后,单位里程养护成本降低21.6%,全寿命周期总成本下降23.4%,路面平均服役年限延长7.2年,较传统模式提升43.5%。模型校正机制保障了策略在不同气候区与交通环境下的适用性。数字化平台与多源数据融合支撑了策略的可复制性与可推广性。最终,该体系在工程实践与理论创新层面均体现出显著价值^[1]。

2 预防性养护实施路径的关键问题与突破方向

当前预防性养护策略在实际应用中面临区域适应性不足、养护时机判断滞后及策略匹配效率偏低等核心瓶颈,制约了其在全寿命周期管理中的效能释放。现有技术路径多依赖经验判断与静态评估模型,难以应对复杂环境与动态交通荷载的耦合作用。亟需构建融合多源数据驱动与智能算法的闭环决策体系,以实现从被动响应向主动干预的范式跃迁。

2.1 多因子耦合病害预测模型构建

公路病害演化受气候条件、交通荷载与材料性能三重因素共同驱动,其时空非线性特征显著。温度波动、降雨量变化等气候参数直接影响路面水损害与冻融破坏进程;轴载谱分布与交通量波动则加剧结构疲劳损伤积累;材料老化指数与粘弹性退化程度进一步削弱结构承载能力。单一因子建模难以捕捉多源扰动下的耦合效应。基于LSTM-图神经网络的混合模型可有效处理高维时空序列数据,充分挖掘路段间空间相关性与时间演化规律。在江苏典型路段的实体验证中,该模型对裂缝扩展趋势与水损害风险的预测准确率提升至89.7%,显著优于传统回归与单一神经网络方法^[2]。

2.2 多目标优化决策模型设计

预防性养护决策需兼顾寿命延长、成本控制、碳排放降低与交通影响最小化等多重目标。传统单目标优化难以应对各指标间的非线性冲突与权衡难题。引入多目标优化框架,以LCC(全寿命周期成本)为核心评估体系,整合动态折现率与碳排放成本因子,量化环境与社

会外部性。该框架使养护方案不仅关注初始投入,更涵盖长期运维与生态影响。

遗传算法与模糊综合评价法的结合有效解决了非线性约束下的求解难题。算法通过多代进化搜索帕累托最优解集,模糊评价法则对定性因素进行量化处理,提升决策合理性。在典型路段的实证中,采用雾封层与微表处组合策略,使路面平均服役年限延长7.2年,成本效益比提升1.8倍。该策略在降低养护频率的同时,显著减少材料消耗与碳排放,体现经济、技术与环境的协同优化。多目标优化决策模型还具备良好扩展性,可根据不同地区、不同路况特点,灵活调整目标权重与约束条件。借助大数据与人工智能技术持续优化算法,能进一步提高决策精准度,为预防性养护提供更科学、全面的决策支持。

2.3 实施路径的系统性突破与闭环机制构建

预防性养护策略的落地需突破单一技术应用的局限,构建覆盖“感知—预测—决策—执行—反馈”全链条的智能体系。感知层依托IoT与BIM/GIS实现多源数据融合;预测层基于多因子耦合模型完成高精度时空研判;决策层通过数字孪生平台生成动态优化方案;执行层实现策略的精准投送与过程监管;反馈层则通过实时数据回传,驱动模型动态校正与策略迭代。

该路径已在多个省份试点应用,单位里程养护成本平均降低21.6%,全寿命周期总成本下降23.4%,路面平均服役年限延长7.2年,较传统模式提升43.5%。系统性解决方案不仅提升了公路性能维持水平,更推动了绿色养护理念的落地。通过量化环境成本与社会影响,决策过程更具透明度与可持续性。

研究突破了单一技术集成与静态评估的局限,实现了从经验驱动向数据智能驱动的转型。构建的智能养护体系具备可复制、可量化的特征,为复杂交通基础设施的长期性能保障提供了理论支持与工程范式。其成果在交通强国战略背景下,对提升公路网韧性、降低碳排放与优化资源配置具有重要意义^[3]。

3 预防性养护策略的创新实践与推广路径

基于全生命周期管理理念的深化,预防性养护正从被动修补转向主动干预,其核心在于通过系统性策略延缓路面性能退化速率,实现公路服役年限的实质性提升。这一转变不仅依赖于技术层面的突破,更需配套管理机制与制度环境的协同演进。当前,国内外研究普遍指出,早期干预比后期修复具有更高的经济效率与社会价值。通过科学识别病害演化规律,结合气候、交通荷载与材料性能动态耦合关系,可实现养护时机的精准把握,

从而最大限度降低后期养护成本与服务中断风险。

3.1 闭环管理机制的构建要点

养护计划的科学编制需依托病害预测模型与资源约束的动态平衡。基于历史数据与实时监测信息，建立可更新的路面性能退化预测系统，使养护窗口期识别更加精确。该系统应具备自学习能力，能够随时间推移不断校正模型参数，提升预测稳定性。信息化管理平台的构建整合了多源异构数据，包括交通流量、环境温湿度、车载荷载谱等，通过机器学习算法实现状态评估与趋势推演。平台输出结果可直接支撑养护决策的可视化与可追溯化。绩效评价体系的完善是机制闭环的关键环节。引入寿命延长率作为核心指标，可量化预防性养护对服役年限的实际贡献。成本节约率则衡量经济性成效，用户满意度指标则反映服务品质提升。多维度评价体系的建立，使养护成效可比较、可验证，为政策制定与资源配置提供依据。该机制通过“感知—分析—决策—执行—反馈”的连续循环，实现养护策略的动态优化，推动管理模式由静态规划向动态适应转变。在闭环管理机制运行中，数据安全与隐私保护也不容忽视。需建立严格的数据访问权限与加密机制，保障多源数据在传输、存储和使用过程中的安全性。为确保机制持续有效运转，应定期对管理平台进行维护与升级，及时修复系统漏洞，优化算法性能。加强人员培训，提升养护人员对信息化管理平台和绩效评价体系的操作与应用能力，使其能精准依据平台输出结果执行养护决策，进一步保障闭环管理机制在公路预防性养护中的高效实施^[4]。

3.2 政策引导与行业协同模式

技术标准与验收规范的统一是预防性养护规模化推广的基础。现行标准中存在接口不一致、评估方法差异等问题，制约了技术成果的跨区域应用。通过制定统一的LCC建模规范与预测模型接口标准，可实现不同系统间的数据互通与结果可比。这有助于构建全国性养护数据库，

支撑更大范围的模型训练与政策模拟。政府、企业与科研机构的协同创新平台，推动了技术迭代与知识共享。在该平台上，企业提出实际需求，科研机构研发解决方案，政府部门提供政策支持与试点验证，形成多方共赢的创新生态。全生命周期养护理念的推广，促使养护决策不再局限于短期成本最小化，而是纳入碳排放成本与社会服务价值。将环境外部性纳入经济评估框架，使高碳排放的养护方式面临制度性约束。动态折现率结合碳排放因子的LCC模型，能够真实反映不同方案的长期成本结构。该模式推动公路养护向绿色化、可持续方向转型，为交通基础设施的高质量发展提供制度保障^[5]。

结束语：预防性养护策略通过融合多源数据与智能算法，构建了覆盖全生命周期的闭环管理体系，有效延长公路寿命、降低成本并减少碳排放。其成功实践不仅验证了技术体系的可行性，更凸显了政策引导与行业协同的重要性。未来，随着数字孪生、物联网等技术的深化应用，预防性养护将向智能化、绿色化方向加速演进，为提升公路网韧性、推动交通基础设施高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]吴心悦,谢槟槟.高速公路沥青路面裂缝成因分析与预防性养护策略——以厦蓉高速瑞赣段为例[J].江西交通科技,2025,48(02):21-27.
- [2]卢新兵,梁中魏.绿色高速公路养护策略对提升路面使用性能的影响分析[J].绿色中国,2025,14(08):145-147.
- [3]金涛.刍议预防性养护措施延长路面面层使用寿命[J].四川建材,2024,41(01):203-205.
- [4]孙广俊,焦阳,吴炳延,等.基于技术状况的混凝土公路桥梁周期性预防性养护策略研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2022,44(01):82-91.
- [5]李文江,曹伟杰.预防性公路养护技术在现代高速公路养护中的应用探讨[J].价值工程,2025,44(9):112-114.