

公路养护工程中预防性养护时机与方案选择研究

李永兴

玉溪市交通监理咨询有限责任公司 云南 玉溪 653100

【摘要】：预防性养护在公路养护工程中对延缓路面劣化和保障行车安全具有关键作用。本文基于路况演变规律，构建预防性养护时机判定模型，分析不同病害类型的技术特性，提出针对性养护方案匹配机制，并构建时机与方案协同优化决策框架。通过连续监测与性能评价，实现养护策略的动态调整和精确实施，为路面寿命延长和养护资源合理配置提供技术支持。

【关键词】：公路养护；预防性养护；时机判定；方案匹配；性能评价

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.042

引言

随着交通量和车辆荷载持续增长，公路路面在服役过程中易出现裂缝、车辙及平整度下降等多类型病害，传统的周期性维护方式难以有效应对早期劣化风险。预防性养护通过在路面性能出现不可逆损伤前进行技术干预，可以延缓病害发展并提升结构耐久性。对不同病害类型和路段特征进行科学分析，并结合路况演变规律确定养护介入时机和技术方案，对于保障路网运行效率和优化养护资源具有重要价值。

1 公路养护工程中预防性养护时机判定的关键问题梳理

公路养护工程实践中，预防性养护时机的判定面临着技术复杂性与管理系统性交织的挑战。路面结构性能衰减呈现渐进性特征，表层功能退化与结构承载能力下降往往不同步，单纯依赖表观病害面积或破损率进行决策，容易导致养护介入偏早或滞后，从而影响路段长期性能^[1]。路面使用性能指数、路面状况指数、结构强度系数以及车辙深度、弯沉值等检测数据存在高度耦合关系，其变化趋势不仅受交通荷载等级影响，还受到气候环境区划和材料老化速率等多重因素的制约，使得单一指标难以全面反映路面真实技术状态。部分养护管理单位在全寿命周期成本控制上认识不足，将阶段性维修与预防性处置混同考虑，导致资源配置效率低下。

数据获取和监测方式也对时机判定精度产生显著影响。检测频率不足或数据连续性不强，均会削弱对性能演化规律的掌握，影响干预窗口的准确锁定。在重载交通高、温差循环频繁的路段，微裂缝发展迅速，基层和路基受水损害风险增加，若未建立基于性能衰减曲线的动态阈值体系，容易错过最佳干预时机。此外，不同路段结构类型、交通强度和条件环境的差异，也增加了时机判定的复杂性。路面病害的非线性发展

特征要求决策方法不仅要考虑表观损伤，还应结合结构性能指标和长期演变趋势，实现对技术状态的全局判断。

预防性养护时机判定不仅是技术问题，也涉及管理制度和资源调配。构建科学的判定体系，需要多指标融合分析、动态阈值设定以及对交通荷载和气候因素的量化考虑，使干预时机能够精准锁定路面性能衰减的关键阶段，从而为后续养护方案选择和资源优化提供可靠依据。

2 基于路况演变规律的预防性养护时机识别方法

基于路况演变规律的预防性养护时机识别，需要从路面性能随时间演化的内在机理出发，对技术状态的变化进行连续、动态刻画^[2]。在公路服役过程中，路面功能性指标和结构性指标呈现出明显的非线性衰减特征，其衰减速率在不同阶段存在显著差异，早期主要表现为材料老化和微观损伤累积，中后期则逐渐向宏观病害集中暴露转化。这种非线性演变特性决定了时机判定必须超越单一指标或静态阈值，需结合纵向历史检测数据建立路面使用性能指数、路面结构强度指数与交通荷载作用次数之间的动态关系，通过性能衰减曲线识别平缓段向加速段转折的临界区间。该区间通常尚未出现显著结构破坏，但劣化趋势已经具备不可逆性，是实施预防性养护的关键技术窗口。

在实际应用中，应采用多指标综合判别方法，将路面平整度（IRI）、抗滑性能（SFC）、弯沉值（L）及车辙发展速率（RD）纳入统一分析框架，通过加权模型或状态评分体系反映路段综合技术水平。本文明确采用层次分析法（AHP）确定各指标权重，构建判断矩阵并通过一致性检验（ $CR < 0.1$ ）确保权重合理性，具体权重设定结合玉溪市路网实际检测数据校准，最终确定PQI、PCI、SSI、SFC、RD、L六项指标权重分别为0.25、0.22、0.18、0.15、0.12、0.08，与实证

路段指标权重保持一致，形成可直接复用的权重计算流程：1.建立目标层（综合性能评价）-准则层（6项核心指标）-方案层（不同养护时机）的层次结构；2.邀请5名公路养护高级工程师、2名检测专家对指标重要性进行两两对比，填写判断矩阵；3.计算矩阵最大特征值及对应特征向量，归一化后得到初始权重；4.进行一致性检验，若 $CR \geq 0.1$ 则重新调整判断矩阵，直至满足要求。

对路况演变规律的精准识别，需充分结合交通运行特性展开分析。重载交通占比、轴载频谱及通行密度的变化，会对路面性能衰减速率产生显著影响，在特定条件下还会加剧路面劣化趋势，进而导致养护干预窗口提前或延后。本文引入轴载换算系数（K）量化交通荷载影响， $K = \sum (\text{实际轴载} / \text{标准轴载})^{4.35} \times \text{轴载次数} / \text{总轴载次数}$ ，通过现场交通监测（连续72小时，每小时记录1次轴载数据）计算得到玉溪市G213线实证路段K值为1.82，据此修正性能衰减曲线，修正公式为：修正后衰减速率=初始衰减速率 $\times (1+0.3 \times K)$ ，使干预窗口判定更贴合实际交通荷载特征。通过将交通参数与路面性能曲线进行耦合分析，可修正传统基于单一时间尺度或平均指标的判断误差，提高时机识别的准确性与可靠性。

基于路况演变规律建立的时机识别方法，不仅可确定路面性能尚处于可恢复区间的最佳干预点，还能够将技术状态变化与养护投入进行合理匹配。在此基础上，可为后续养护方案选择提供数据支持，使养护策略在延缓病害发展、保持行车舒适性与优化资源投入之间实现平衡。见图1。

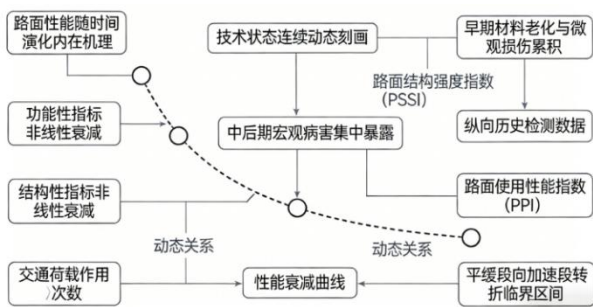


图1 预防性养护时间识别方法

3 不同病害类型下预防性养护方案的匹配机制

不同病害类型下预防性养护方案的匹配机制，应建立在病害成因分析与结构响应特征判别基础之上。公路路面在服役过程中所呈现的裂缝类、变形类及功能衰减类病害，其形成机理与发展路径存在明显差异，对应的技术处置方式亦不具备通用性^[3]。对于以温缩

与疲劳累积为主导的早期裂缝，应结合裂缝宽度、分布密度及延伸趋势，优选灌缝封闭或微表处技术，通过改善表层密封性能阻断水分侵入通道，减缓结构层受损风险。

在功能性指标下降而结构承载能力尚处于稳定区间时，应侧重提升抗滑性能与表面摩阻系数，选取雾封层或薄层罩面等措施，以改善行车安全条件并抑制老化扩展。针对轻度网裂或局部松散区域，则需通过局部铣刨修补与整体表层处置相结合的方式，防止病害由点状向片状扩散。方案匹配过程中，应综合考虑路面结构类型、交通荷载等级与环境条件差异，避免单一工艺在不同区域机械套用。养护材料性能与施工工艺参数同样影响匹配效果。改性沥青黏结性能、骨料级配结构及施工温度控制，均会改变处置后的耐久性表现。

结合玉溪市G213线实证路段的病害特征，2023年7月（处于临界干预窗口）对该路段不同病害区域实施差异化预防性养护方案，具体匹配情况及实测效果如下：1.裂缝类病害（裂缝宽度0.1-0.3mm，分布密度0.32-0.45m/m²）：采用改性沥青灌缝封闭技术，选用SBS改性沥青灌缝料，施工温度控制在160-180℃，共处置裂缝820m，养护后12个月监测显示，裂缝扩展率降至3.5%，较未处置路段（裂缝扩展率28.7%）降低87.8%；2.轻度车辙病害（车辙深度3-6mm，无基层剪切破坏）：采用同步碎石封层技术，选用13mm玄武岩骨料+SBS改性沥青，封层厚度0.8-1.0cm，处置长度12.3km，养护后车辙深度平均降至2.1mm，平整度IRI从2.3m/km降至1.5m/km，抗滑性能SFC从42增至58，均达到优良标准；3.功能衰减类路段（PQI=82-85，无明显裂缝和车辙）：采用雾封层技术，选用乳化沥青雾封料，喷洒量0.8-1.0kg/m²，处置长度7.7km，养护后路面抗滑性能提升23.8%，沥青老化速率减缓40%以上。通过不同方案的精准匹配，实现了病害的针对性控制，验证了本文提出的方案匹配机制的可行性。

4 时机与方案协同优化的决策模型构建

时机与方案协同优化的决策模型构建，需要在路况演变特征与病害处置技术之间建立动态耦合关系，使养护介入时间与技术措施形成系统匹配。单独确定干预时点或孤立选择养护工艺，均难以实现资源利用效率与路面性能恢复效果的同步提升^[4]。基于全寿命周期理念，应以路面性能衰减曲线为主线，将结构承载能力指标、功能性指标与交通荷载预测结果纳入统一分析框架，通过构建多目标决策模型实现综合评价。

模型核心变量明确为：路面状况指数（PCI）、弯沉代表值（Lr）、车辙发展速率（vRD）、抗滑衰减系数（kSFC），约束条件量化设定为：养护成本≤年度养护预算的30%、施工周期≤15天、交通影响程度≤20%（即施工期间路段通行能力下降不超过20%）。

在模型构建过程中，采用层次分析法确定指标权重，构建3层层次结构（目标层：协同优化决策；准则层：结构安全性、行车舒适性、经济合理性；指标层：PCI、Lr、vRD、kSFC、养护成本、施工周期、交通影响程度），通过一致性检验后，准则层权重分别为0.4、0.3、0.3，指标层权重根据准则层分配，最终确定PCI=0.16、Lr=0.14、vRD=0.10、kSFC=0.08、养护成本=0.15、施工周期=0.08、交通影响程度=0.07。同时采用模糊综合评价方法对不同指标进行权重分配，使结构安全性、行车舒适性与经济合理性在决策中得到均衡体现。马尔可夫链预测设定状态等级为优（CPI≥85）、良（82≤CPI<85）、中（75≤CPI<82）、差（CPI<75），状态转移矩阵通过2020-2023年实证路段CPI数据计算得出，预测步长为1年，可精准预测未来3年路面性能走势。通过建立状态转移矩阵，刻画路面在不同技术等级之间的转化概率，并结合马尔可夫链预测未来性能走势，可为时机选择提供量化依据。

养护方案的技术效果应以性能恢复幅度和耐久周期为参数输入模型，使不同处置方式在相同时间节点下的长期效益得以比较。进一步的优化过程可通过建立目标函数，目标函数设定为： $\max F=0.6 \times \text{路面性能保持率} + 0.4 \times (1 - \text{年度养护资金消耗} / \text{年度预算})$ ，在上述约束条件下，采用线性规划方法求解最优解，明确不同CPI区间对应的最优养护方案及介入时点。对重载路段与一般交通路段分别设定不同阈值区间，重载路段CPI临界干预区间下调至80-83，一般路段保持82-85，有助于提升模型适应性。

5 预防性养护实施效果评估与策略优化路径

预防性养护实施效果评估与策略优化路径需要建立在多维数据监测与性能分析基础之上，对路面在干预前后技术状态变化进行全方位量化。路面结构性能的恢复幅度、表层平整度改善水平以及功能性指标提升效果，是衡量预防性养护成效的重要技术参数^[5]。通过连续监测弯沉、车辙、裂缝宽度及分布密度等指标，并结合路面材料模量、层间黏结性能及表面抗滑系数，可对养护实施效果形成定量描述，明确养护措施对结构延寿、功能保持及安全性能提升的具体贡献。评价过程需采用时间序列分析方法，对干预前后性能

变化趋势进行比对，使路面性能恢复效果在动态演变中得以准确呈现。

在病害演化规律与干预措施匹配的基础上，可引入结构可靠性指标和性能衰减速率分析，将局部处置效果与整体路段性能变化进行耦合评估，使策略优化不仅关注单点干预，更重视区间整体效益。通过构建路段级性能综合评价体系，结合交通荷载分布及环境因素对结构影响的量化分析，能够揭示不同养护方案在不同环境与交通条件下的适用性边界。沥青路面在微裂缝萌生期实施表面密封处理，其抗水损性能和疲劳裂缝扩展抑制效果，可通过实验室材料性能与现场路况监测数据的联合分析加以验证；混凝土路面在早期板端剥离或接缝松散阶段实施局部修补和表面罩面，其承载力恢复及裂缝扩展延缓效果，可通过弯沉分布和裂缝扩展曲线的跟踪评估得到体现。

策略优化路径需在效果评估基础上建立闭环管理机制，将实施效果反馈至时机判定与方案匹配模型中，形成循环迭代。性能评估结果能够指导干预时机的调整，使养护介入窗口更加贴合路面真实衰减阶段，同时可优化技术措施组合，实现不同病害类型与路段特征的精准匹配。动态数据驱动下的优化路径应结合施工可操作性、交通组织约束及年度预算分配，将长期性能收益与年度资源消耗进行综合权衡，构建多目标优化框架，使策略选择在技术可行性、经济合理性和交通影响控制之间达到协调。

评估与优化路径应充分考虑不同交通荷载等级与环境条件下的差异化表现。重载路段表层与基层损伤累积速度较快，早期介入能够显著延缓病害扩展，但若干预措施选择不当，则可能造成局部应力集中或施工周期延长，影响整体路段服务性能。通过引入交通荷载频谱和气候区划修正系数，可对养护效果进行加权评价，使优化路径具备针对性和适应性。在策略迭代过程中，应利用路面性能衰减预测模型，将不同方案在未来一定周期内的效果进行模拟对比，为后续养护计划提供决策支撑。

在具体操作中，策略优化还应关注材料性能与施工工艺对实施效果的影响。改性沥青黏结性能、施工温度与压实质量直接关系到表层恢复效果和耐久性；混凝土路面修补料强度、粘结层厚度与固化条件则影响板块整体承载能力及裂缝再生速率。通过将材料性能参数纳入评估体系，并结合现场施工监测数据，可实现效果评价的高精度量化，同时为优化施工工艺提供技术依据。长期绩效评估与策略优化需以全寿命周期成本最小化为目标，将短期干预效果与长期路段服

务水平结合分析。养护效果评价不仅应关注表层平整度或局部裂缝控制，更应通过路面可靠性指标、性能维持周期和结构延寿幅度等综合指标反映干预的整体价值。

6 结语

公路养护工程中预防性养护的时机判定与方案选

择展开，分析了路面性能衰减规律、病害特征及交通荷载影响，构建了多指标综合判定模型和时机与方案协同优化机制。通过连续监测和效果评估，实现了养护策略的动态调整和精准匹配，为延长路面寿命、提升行车安全和优化养护资源配置提供了科学依据。结论表明，合理把握干预时机并选用针对性技术措施，是提高养护效能和保障路网稳定运行的关键路径。

参考文献：

- [1] 叶建英,贾金伟,席铭隆.微表处技术在公路预防性养护工程中应用的质量控制[J].交通世界,2025,(32):108-110.
- [2] 师会刚.纤维沥青碎石封层在公路预防性养护工程中的应用[J].交通世界,2025,(31):67-69.
- [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] 李富旭.预防性养护技术在公路养护工程中的应用[J].汽车画刊,2025,(09):128-130.
- [5] 葛卫华.公路养护工程中的预防性维护与修复方法[J].居业,2025,(09):61-63.