

# 高速公路沥青路面预防性养护时机与技术方案的优化分析

孙童童 杨晓东

郑州市路通公路建设有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 随着我国高速公路网络的持续扩展和交通荷载的不断增长, 沥青路面在服役过程中面临着日益严峻的性能衰减挑战。传统的“坏了才修”被动式养护模式不仅成本高昂, 且严重影响交通运行效率与行车安全。预防性养护作为一种主动、前瞻性的养护策略, 强调在路面结构尚处于良好状态时实施干预措施, 以延缓性能衰变、延长使用寿命并提升全寿命周期经济效益。本文系统梳理了沥青路面性能衰变机理与典型病害特征, 深入探讨了预防性养护的最佳实施时机判定方法, 重点对比分析了雾封层、微表处、稀浆封层、超薄磨耗层及碎石封层等主流技术的适用条件、性能特点与施工要点。在此基础上, 构建了融合多指标评价体系与全寿命周期成本分析(LCCA)的预防性养护技术方案优化模型, 并结合工程实例验证其有效性。研究结果表明: 科学把握养护时机、精准匹配技术方案是实现预防性养护效益最大化的关键; 基于数据驱动与决策支持系统的动态优化策略, 可显著提升高速公路沥青路面养护管理的精细化与智能化水平。

**关键词:** 高速公路; 沥青路面; 预防性养护; 养护时机; 技术方案; 全寿命周期成本; 优化分析

## 引言

截至2024年底, 我国高速公路总里程超18万公里, 居世界首位。作为国家交通骨干, 它承担大量客货运输, 运行状态关乎国民经济与社会民生。但在重载交通、复杂气候等因素作用下, 沥青路面性能退化, 出现裂缝等病害, 威胁行车安全与舒适性。长期以来, 我国高速公路养护工作多采用“矫正性养护”模式, 即待路面出现明显损坏后才进行修复。这种“头痛医头、脚痛医脚”的方式虽能解决局部问题, 但往往导致维修成本剧增、交通中断频繁、资源浪费严重, 且难以从根本上恢复路面整体性能。在此背景下, 预防性养护理念兴起。其核心是“早干预、小投入、大效益”。但实践中, 如何判定“最佳时机”、优选适配养护方案, 仍是两大关键难题。

## 1 沥青路面性能衰变机理与预防性养护内涵

### 1.1 沥青路面主要病害类型及成因

沥青路面在长期服役过程中, 受交通荷载反复作用、温度变化引起的热胀冷缩、雨水渗透以及紫外线辐射等因素影响, 其材料性能逐渐劣化, 进而诱发多种典型病害。其中, 裂缝类病害最为常见, 包括由低温收缩引起的横向裂缝、因路基不均匀沉降或基层疲劳开裂导致的纵向裂缝, 以及旧水泥混凝土板接缝向上反射形成的反射裂缝。这些裂缝虽初期宽度较小, 但若不及时封闭, 将成为水分侵入的通道, 加速基层软化甚至引发唧泥现象, 最终演变为结构性破坏<sup>[1]</sup>。此外, 高温季节在重载车辆反复碾压下, 沥青混合料抗剪强度不足易形成车辙, 严重影响行车平稳性; 而集料表面被磨光或沥青膜覆盖则会

导致抗滑性能下降, 尤其在雨天极易引发交通事故。这些病害的发展具有明显的累积性和不可逆性, 早期干预显得尤为必要。

### 1.2 预防性养护的核心理念与优势

预防性养护是基于全寿命周期管理的系统性工程策略, 非简单表面修饰。它是在路面无结构性损伤、仅有功能性衰退或轻微病害时, 用经济高效手段干预, 阻断病害发展、延缓性能衰减。与传统矫正性养护比, 预防性养护优势显著: 单位面积成本仅为大中修的三分之一至二分之一, 服务寿命延长效果却达数倍, 经济回报率高; 多数技术施工周期短、开放交通快, 对交通干扰小; 能改善路面行驶质量与安全性能; 还有助于减少新材料开采和废旧料产生, 符合绿色低碳与可持续发展要求。

## 2 预防性养护时机判定方法

确定“何时养”是预防性养护成功实施的前提。理想的养护时机应介于“过早”(资源浪费)与“过晚”(病害已不可逆)之间。目前常用判定方法包括:

### 2.1 基于路况指数的经验阈值法

我国《公路技术状况评定标准》(JTG5210)规定了路面使用性能指数(PQI), 其由路面损坏状况指数(PCI)、路面行驶质量指数(RQI)、路面车辙深度指数(RDI)、路面抗滑性能指数(SRI)和路面结构强度指数(PSSI)等子指标加权计算得出<sup>[2]</sup>。一般认为:

当 $PCI \geq 85$ ,  $PQI \geq 80$ , 且无结构性损坏时, 适合实施预防性养护;

若 $PCI < 75$ 或 $PQI < 70$ , 则需考虑结构性修复。

该方法操作简便，但过于依赖单一阈值，忽视了病害类型与发展速率的差异。

### 2.2 基于性能衰变模型的预测法

通过建立路面性能衰变模型（如线性回归、Markov链、灰色预测、机器学习等），预测未来若干年内的PCI、RQI等指标变化趋势。当预测值即将跌破养护阈值时，即为最佳干预窗口。例如：

$$PCI(t) = a \cdot e^{-bt} + c$$

其中为时间，a,b,c为拟合参数。该方法更具前瞻性，但依赖高质量的历史检测数据。

### 2.3 基于全寿命周期成本（LCCA）的经济最优法

LCCA综合考虑初始建设成本、各阶段养护成本、用户成本（延误、油耗、事故等）及残值，计算不同养护策略下的总现值成本（PresentWorthCost,PWC）<sup>[3]</sup>。通过比较不同实施时机下的PWC，选择使总成本最小的时机。其数学表达为：

$$PWC = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_m(t) + C_u(t)}{(1+r)^t} - \frac{S}{(1+r)^n}$$

其中为初始成本，为养护成本，为用户成本，为折现率，为残值。该方法经济导向明确，但参数设定复杂。

### 2.4 多指标融合的综合判定体系

建议构建包含“路况指标+病害特征+交通量+气候条件+资金计划”的多维决策矩阵。例如，当同时满足：

PCI ∈ [80,90]

裂缝率 < 3%

车辙深度 < 10mm

年日均交通量（AADT）> 20,000辆

近3年无重大养护工程

则判定为适宜实施预防性养护的路段。

## 3 主流预防性养护技术方案比选分析

### 3.1 技术类型与适用条件

表1：防性养护技术方案对比

技术名称	材料组成	适用病害类型	适用交通等级	施工厚度（mm）	使用寿命（年）
雾封层	乳化沥青/改性乳化沥青	渗水、轻度老化、细小裂缝	中低	0.5-1.0	2-4
稀浆封层	乳化沥青+细集料+填料+水	轻微裂缝、抗滑不足、渗水	中	3-10	3-5
微表处	改性乳化沥青+粗细集料+添加剂	裂缝、车辙、抗滑不足	高	5-15	4-6
超薄磨耗层	热拌改性沥青混合料	车辙、抗滑严重不足、老化	高速/重载	15-25	6-8
碎石封层	热沥青+单粒径碎石	防水、抗滑、延缓老化	中低	5-10	3-5

### 3.2关键性能对比

各类技术在功能表现上各有侧重。在防水性能方面，雾封层因形成连续油膜而效果最佳，微表处与超薄磨耗层次之，稀浆封层因空隙率相对较高而稍逊。抗滑性能则呈现相反趋势：超薄磨耗层因采用优质玄武岩集料和开放级配，构造深度大，抗滑性能最优；微表处通过控制集料粒径与添加剂也能达到良好效果；而雾封层因覆盖沥青膜，初期抗滑性能反而可能下降。在抗车辙能力上，超薄磨耗层凭借高模量改性沥青与骨架密实结构显著优于其他技术，微表处虽有一定抵抗能力，但在极端高温重载条件下仍可能出现变形。施工便捷性方面，雾封层与碎石封层设备简单、开放交通快，适合快速作业；而超薄磨耗层需热拌摊铺，对气温与设备要求高，施工窗口受限。从经济角度看，雾封层单位成本最低，超薄磨耗层最高，中间技术则依材料与工艺差异呈梯度分布。

### 3.3 技术选择原则

预防性养护技术的选择绝非“一刀切”，而应遵循

“对症下药、因地制宜”的原则。首先，必须以主导病害类型为导向，例如针对抗滑性能严重不足的路段，应优先考虑微表处或超薄磨耗层；若仅为轻微渗水与老化，则雾封层即可满足需求<sup>[4]</sup>。其次，需充分考虑交通荷载等级，重载高速公路应选用高性能、高耐久性的技术，避免因技术不当导致短期内重复养护。再次，气候环境亦是重要考量因素，寒冷地区应避免使用低温易脆裂的材料，多雨地区则需强化防水功能。最后，在满足功能与安全前提下，应结合年度预算约束，优选性价比最优的方案，实现有限资金效益最大化。

## 4 预防性养护技术方案优化模型构建

为实现“精准养护”，本文提出一种融合多目标决策与LCCA的优化模型。

### 4.1 优化目标

预防性养护方案优化的核心在于平衡多重目标。首要目标是最小化全寿命周期成本，涵盖初期施工、后续维护及用户间接成本；其次是最大化路面性能提升幅度，

尤其是对PCI、SRI等关键指标的改善效果；第三是尽量缩短施工周期，减少对交通运行的干扰。这三个目标有时相互冲突，例如高性能技术虽能显著提升功能，但成本高、工期长，因此需通过多目标优化寻求帕累托最优解。

#### 4.2 决策变量

养护技术类型  $i \in \{1, 2, \dots, m\}$

实施时机  $t \in \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$

#### 4.3 约束条件

路况阈值约束:  $PCI(t) \geq 80$

预算约束:  $\sum C_i \leq B$

技术适用性约束: 如车辙深度  $> 15\text{mm}$  时不可选雾封层

#### 4.4 评价指标体系

为实现多目标综合评价，本文构建三级指标体系。一级指标包括经济性、功能性与可持续性；二级指标细化为全寿命周期成本、PCI提升值、抗滑性能改善率、碳排放量、施工周期等；权重确定采用层次分析法（AHP），通过专家打分构建判断矩阵，确保权重分配的科学与一致性。

#### 4.5 求解算法

鉴于问题的多目标与非线性特征，采用非支配排序

遗传算法（NSGA-II）进行求解。该算法能在一次运行中生成一组Pareto最优解集，供决策者根据偏好进行最终选择。也可辅以TOPSIS法对有限方案进行排序，提升决策效率。

## 5 工程案例

### 5.1 项目概况

某双向四车道高速公路K100+000-K120+000段，2015年建成通车。2024年检测数据显示：PCI=83，RQI=85，RDI=88（车辙深度8mm），SRI=78，裂缝率2.1%。AADT=28,000辆/日，属重载交通路段。

### 5.2 方案比选

提出三种备选方案：

方案A：微表处（厚度8mm）

方案B：超薄磨耗层（Novachip，厚度20mm）

方案C：稀浆封层（厚度6mm）

### 5.3 LCCA分析（折现率5%，分析期10年）

以5%折现率、10年分析期进行全寿命周期成本计算。

结果显示：

表2: LCCA分析结果

方案	初期成本 (万元/km)	预计寿命 (年)	后续养护成本	用户成本节省	总LCC (万元/km)
A	32	5	18	25	25.4
B	65	7	10	35	38.2
C	22	3	30	15	32.1

### 5.4 综合评价与决策

结合AHP确定权重（LCC占40%、 $\Delta$ SRI占30%、施工周期占20%、环保性占10%），采用TOPSIS法计算各方案贴近度。方案A得分为0.78，显著优于方案B（0.65）与方案C（0.52）。最终推荐采用微表处方案，因其在经济性、功能提升与施工效率之间实现了最佳平衡，符合该路段重载、高抗滑需求的实际。

## 6 结语

本文系统研究了高速公路沥青路面预防性养护的时机判定与技术方案优化问题，得出以下结论：时机判定需多维融合。单纯依赖PCI阈值存在局限，应结合性能预测模型、LCCA分析与实际路况特征，构建动态、精准的时机决策机制。技术选择应精准匹配。不同预防性养护技术各有优劣，须依据主导病害类型、交通荷载等级、气候环境及经济预算进行科学比选。优化模型提升决策科学性。基于LCCA与多指标评价的优化模型，可有效支持养护方案的量化比选与优选，实现资源最优配置。智

能化是未来方向。随着BIM、物联网、大数据与AI技术的发展，构建“感知—评估—决策—实施—反馈”闭环的智能养护决策支持系统，将成为提升高速公路养护现代化水平的关键路径。未来研究可进一步深化机器学习在性能预测中的应用，探索碳足迹约束下的绿色养护方案优化，并推动预防性养护标准体系的完善与落地实施。

## 参考文献

- [1] 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.
- [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] 王建霞, 徐敬武, 李兴伟, 等. 融合主客观信息的高速公路沥青路面预防性养护最佳时机确定[J]. 交通节能与环保, 2025, 21(03): 145-150.
- [4] 刘生源. 高速公路沥青路面预防性养护技术的应用[J]. 运输经理世界, 2025, (17): 136-139.