

高速公路沥青路面预防性养护时机选择研究

蒋昌盛

云南交投集团云岭建设有限公司 云南 昆明 650300

【摘要】：随着道路交通量的激增，要求高速公路有一定的承载力与通行力。要达到这一目的，要求高速公路在使用过程中注重预防与保养，高速公路沥青路面预防性养护时机的选择非常重要，必须确保高速公路沥青路面的稳定性与安全性。对于高速公路沥青路面预防性养护时机选择问题，可对路面病害类型、成因及发展规律系统性分析，并与路面性能衰变模型与多源数据融合技术相结合，以构建基于路况指标、交通荷载及气候条件的预防性养护决策体系。本文提出了动态阈值设定方法，对于量化路面破损指数（PDI）、结构强度系数（SSI）等关键参数与养护时机的关联性，形成了涵盖数据采集、状态评估、措施匹配的全流程技术框架。相关实践表明，所提方法可对路面性能突变点有效识别，为预防性养护提供了科学依据，这对于延长高速公路路面的使用寿命、降低全生命周期的成本具有重要价值。

【关键词】：高速公路；沥青路面；预防性养护；时机决策；多源数据融合

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.030

引言

高速公路沥青路面在长期服役过程中，会受到诸多因素的影响，如交通荷载、环境因素及材料老化等，则极易出现不同程度的病害现象，如裂缝、车辙、松散等。传统的养护模式主要是矫正性养护模式，存在一些不容忽视的问题，如滞后性高、成本大等。预防性养护更重视高速公路路面性能未呈现明显衰减现象时对其进行干预，侧重于精准把握养护时机。当前的研究多侧重于单一指标阈值的设定，未系统性分析多因素耦合作用，因此，可以多元化路径来构建动态决策模型，对路况、交通及气候数据等整合，并提出基于性能衰变规律的预防性养护时机的选择方法，以为高速公路的养护策略的优化及完善提供重要的理论支撑。

1 高速公路沥青路面病害分析

沥青路面病害包括两类，一是结构性损坏；二是功能性损坏。结构性损坏主要分为几大类型，如裂缝（横向裂缝、纵向裂缝、网裂）、车辙及坑槽等，其成因与荷载重复作用、基层材料性能的退化等有着密切关联。如半刚性基层沥青路面在重载交通下极易产生反射性裂缝，裂缝扩展中会侵入水分，让路界面基层加速软化，并形成由表及里的破坏链。功能性损坏主要包括抗滑性能下降、平整度劣化、渗水系数增大等方面，其根由是沥青路面出现了老化，集料出现了剥落现象，施工出现了缺陷等。病害发展有着明显的阶段性特征：初期主要是微裂缝，宽度在2mm内，对于行车舒适性影响不高；中期裂缝会扩展至5mm以上，还会伴随着轻度的车辙，深度区域5-10mm，路面渗水系数会明显提升；后期裂缝连通后会形成网状，车辙深度若超过15mm，结构性承载能力会出现明显下降。病害演化过程中，会受到各种因素的共同影响，如温度、湿度及交通量等。高温环境下，沥青黏度会降低，重载车辆作用下易引发车辙；低温条件下会增加材料的脆性，裂缝的扩展速率会加快。

2 高速公路沥青路面预防性养护时机选择路径分析

2.1 路面数据的收集

2.1.1 养护路段基本信息的调研

养护路段基本信息调研过程中，相关人员要对核心数据系统性收集，如结构类型、材料组成、施工时间及历史养护记录等。路面结构类型会对病害模式产生影响，如半刚性基层容易出现反射裂缝，复合式基层则需对层间粘结退化关注；材料组成中，沥青标号会对高温稳定性造成直接影响，集料级配会对抗滑性、耐久性等过程影响。历史养护记录要对类型、时间及效果等更明确，如高速公路某路段碎石封层后，则可对PDI、IRI等指标量化养护作用进行对比。调研内容还涵盖排水系统状况，如边沟堵塞率、排水管完好率，积水会加速水损害等。数据来源于设计文件、施工日志等，需进行交叉式验证，让数据更精准，以为后续状态评估提供可靠基础。

2.1.2 路况数据分析

路况数据分析主要借助无损检测技术，以获得核心指标，其中路面破损指数（PDI）可以自动化裂缝来对系统计算精准识别，此系统可使用高分辨率工业相机（分辨率达0.1mm）与图像处理算法，可对宽度大于0.2mm的微裂缝精准识别，并会自动分类裂缝类型，如横向、纵向及网状裂缝，还会生成裂缝密度、长度及面积的统计结果。国际平整度指数（IRI）可通过激光断面仪测得，此设备可以发射激光束的形式来对路面纵向高程变化进行测量，采样间隔为5cm，可对100m范围内的标准差实时计算，以更好地反映行业的舒适性。结构强度系数（SSI）可以落锤式弯沉仪（FWD）对动态模量推算进行检测，FWD施加50kN冲击荷载，记录距加载点0-1.2m范围内9个测点的弯沉盆数据，可引入反演算法来对各结构层模量来计算，SSI定义为实测模量与设计模量的比值。数据采集频率设定为200m一个断面，还可对GPS坐标同步记录，以确保空间

连续性。相关人员在分析时,要对指标相关性重点关注,如 PDI 与 SSI 呈负相关(相关系数-0.75),这证明裂缝发展会随着结构强度衰减发生变化;IRI 与交通量正相关(相关系数 0.68),这就表明重载会让平整度加剧。数据应存储于数据库,以支持按路段、时间及指标类查询,以为状态评估提供量化依据。

2.1.3 路面交通数据收集

相关人员在收集路面交通数据时,可引入地磅系统、视频识别技术,以获取轴载谱,收费站或关键节点可安装地磅系统,可对车辆轴重、轴数及车速等实时记录,可对标准轴次(BZZ-100)及超载车辆比例进行统计。视频识别技术可引入高清摄像头(分辨率 1920×1080)、AI 算法等,会对车牌、车型及轴组类型等自动识别,并对地磅覆盖盲区进行补充。某高速路段监测显示,重载车辆(轴重大于 13t)占比为 35%,其等效轴次贡献率超过了 60%,这就表明少数重载车辆会产生路面损伤的集中效应。交通量数据会按小时、日、月的三级统计,小时数据主要对高峰时段的车辆荷载特征进行分析,日数据则对周循环规律精准反映,月数据则可对季节性变化生动揭示。数据要对标准轴次予以修正,可引入四次幂法,对等效损伤精准计算,如 13t 轴重车辆等效于 3.5 次 10t 标准轴次。交通量数据可应用于修正路面性能预测模型,如重载车辆每增加 10%,车辙发展速率会提升 0.3mm/年。数据收集要持续 1 年以上,会对不同季节与天气条件全覆盖,以保障采集样本的代表性。数据存储要对 GPS 坐标与时间戳紧密关联,支持与路况数据的时空匹配分析。

2.2 预防养护时机决策思路

决策流程包含数据预处理、状态评估与时机判定三部分。数据预处理阶段,需将异常值(如 IRI>10m/km 的极端值等剔除,可能由检测设备故障或路面突发破坏导致)及插补缺失值(采用邻近断面均值或线性插值法,确保数据连续性)。状态评估采用层次分析法(AHP),将 PDI、IRI、SSI 及交通量作为一级指标,下设二级指标,如裂缝率、车辙深度、抗滑值等。专家可对其打分,以确定指标权重,如 PDI 权重设为 0.4,反映破损对使用性能的影响;IRI 权重为 0.3,则与行车舒适性相关联;SSI 权重为 0.2,则充分凸显结构安全性;交通量权重为 0.1,修正荷载作用强度。各指标评分采用线性插值法,如 PDI<5 时评分为 90-100 分,5-10 时为 70-89 分,>10 时为 0-69 分。时机判定基于动态阈值模型,综合评分=Σ(指标评分×权重),当综合评分超过临界值(如 80 分)时触发养护预警。临界值需根据路段重要性、交通量及气候条件调整,如重载路段临界值可降低至 75 分,以对早期损坏提前干预。模型应定期校准,结合新检测数据优化指标权重与阈值,让决策更精准。

表 1 养护类型的确定方法

养护类型	判定条件
------	------

裂缝修补	单条裂缝宽度>3mm,且连续长度>5m,或网裂面积占比>5%
薄层罩面	IRI>4m/km 且 PDI<15, SSI>0.8
微表处	渗水系数>300m/min,抗滑值 BPN<45
碎石封层	基层顶面当量回弹模量<6000MPa,且面层厚度<8cm

表 2 路况标准值参考范围

指标	优(A)	良(B)	中(C)	差(D)
PDI(%)	0-5	5-10	10-15	>15
IRI(m/km)	<2	2-4	4-6	>6
SSI	>0.9	0.8-0.9	0.7-0.8	<0.7

2.3 预防养护措施

高速公路沥青路面预防养护中,相关部门要“对症下药”,基于路面病害类型、严重程度和路段条件等,精准匹配相应的预防性养护措施,让资源得以高效利用,让养护效果得到最优化。对于裂缝类病害,若裂缝为 2-5mm 的横向、纵向型,则先利用开槽机沿着裂缝来切割槽口,宽约 10-15mm、深约 15-20mm;将杂物清除后,将橡胶沥青或改性沥青灌缝材料填充进去,让裂缝封闭,以更好地适应温度变形,可防止水分侵入。对于面积超过 1m²的网裂,则可应用微表处技术,在路面铺设厚度为 8-10mm 的聚合物改性乳化沥青稀浆混合料,以形成密封层,这样路面的平整度、抗滑性得以恢复,让裂缝扩展进一步延缓。对于变形类病害,重载路段车辙深度为 8-12mm,并且无结构性破坏时,可应用高弹改性沥青薄层罩面,利用 SBS 改性剂、橡胶粉复合改性,摊铺厚度保持在 20-30mm 区间,可让路面几何尺寸恢复,以增强路面承载力。对于抗滑性能衰减的路段,如摆值 BPN<45 时,则可利用含金刚砂的薄层磨耗层技术,让摩擦系数得以提升。所有措施在实施前,对路面进行清洁,并喷洒粘层油;施工后将道路交通封闭 4-6 小时,等材料固化后再开放,通过有效的预防性养护来实现主动干预,让路面使用寿命得以延长。

表 3 适合进行预防养护的沥青路面病害及损坏程度特征

病害类型	轻度特征	中度特征	重度特征
裂缝	单条裂缝<2mm,无渗水	裂缝 2-5mm,局部渗水	裂缝>5mm,连通成网
车辙	深度<5mm,轮廓清晰	深度 5-10mm,伴随侧向位移	深度>10mm,结构层变形
松散	集料剥落面积<10%	剥落面积 10%-30%	剥落面积>30%,骨料外露

表 4 预防养护措施选择

病害类型	轻度	中度	重度
裂缝	贴缝带	灌缝+密封胶	全断面挖补
车辙	稀浆封层	薄层罩面	铣刨重铺
松散	碎石封层	微表处	复合式罩面

3 气候数据分析

3.1 高速公路跟踪调查

相关人员对气候因素对沥青路面性能的影响系统性分析时,则可选取代表性的典型气候区,来进行长期跟踪调查,涵盖不同环境,如湿润区(年降雨量 $>1200\text{mm}$)、干旱区(年降雨量 $<400\text{mm}$)及寒区(年极端低温 $<-20^{\circ}\text{C}$)等。监测内容涵盖多种参数,如温度、湿度、降雨量、日照时长及风速等,借助自动气象站、便携式传感器等,以实现连续性数据的采集。如某寒区路段,其中一直持续 -10°C 以下的低温天气,则与裂缝扩展速率呈现显著正相关,让相关系数达到0.82,则表明主要诱因是低温天气下路面收缩应力引发了横向裂缝;湿润区路段在连续降雨后,路面渗水系数平均增加了40%,让基层含水率明显上升,并引发了水损害病害,如唧浆、坑槽等。干旱区路段则因紫外线辐射强、温差大,让沥青老化速率加快,主要表现在针入度下降、软化点升高了,集料剥落现象也增多了。对路面跟踪调查时间要持续3年以上,对不同季节与气候异常事件全覆盖,可建立气候参数与路面性能指标的关联数据库,以为后续模型构建提供基础性数据作为重要支撑。

3.2 最佳实施时机的选择

对于预防性养护时机的确定,要综合气候窗口与路面状态,以实现双重约束。北方地区冬季呈低温状态,让沥青路面的粘度增大,压实困难,适宜在春雪消融后(4-5月)来实施

路面封层,这个季节的气温迅速回升,升至 10°C 以上,冻融循环的影响得以消除,此时雨季尚未到来,可让路面封层材料充分固化。南方多雨地区,则应选择在雨季来临前的3-4月来进行沥青路面的排水层施工,以防止因降雨出现施工中断或层间粘结不良现象。日间施工温度要严控在 10°C - 30°C 范围内,若温度过低,则沥青混合料不能压实,若温度过高,则易引发老化。可构建气候一路况耦合模型,将相关参数(温度、湿度、降雨量等)与路况指标(路面破损指数(PDI)、结构强度系数(SSI)等)进行动态关联,可对未来3个月的路面性能衰变趋势进行预测。如当模型对某路段PDI将在雨季后突破临界值进行预测时,可提前1个月对养护计划实时调整,将原定秋季实施的微表处提前至雨季前完成。该模型可定期校准,可结合实时气候数据、路况检测结果等参数优化,让时机判定的精准性得以提升。

4 结语

总之,高速公路沥青路面预防性养护时机选择需融合多源数据与动态分析技术。研究提出以路况指标为核心、交通荷载为修正、气候条件为约束的决策框架,通过量化参数关联性实现养护时机精准判定。实际应用中,应建立长期路况数据库,结合BIM技术实现养护方案可视化模拟,进一步提升决策科学性。未来研究可探索基于深度学习的路面性能预测模型,推动预防性养护向智能化方向发展。

参考文献:

- [1] 王向峰.公路沥青路面预防性养护路况标准与时机决策研究[J].公路工程,2022,42(6):223-226.
- [2] 董瑞琨.基于沥青路面功能性能的预防性养护时机指标[J].地下空间与工程学,2022,1(2):292-295.
- [3] 刘芳.沥青路面预防养护时机的选择[J].城市建设与商业网点,2021(29):122-123.
- [4] 党彦武.高速公路沥青路面预防养护最佳时机的探讨[J].科协论坛(下半月),2021(2):19-20.
- [5] 叶俊.高速公路沥青路面预防性养护最佳实施时机及对策[J].交通标准化,2020(9):143-145.