

交通荷载作用下高速公路路面养护时机决策研究

吕永涛

河南省大道路业有限公司 河南 郑州 450003

摘要:为解决高速公路路面养护决策经验化、时机把控不准的问题,本文剖析交通荷载致损机理与路面病害演化特征,选取核心损伤指标,依托有限元模拟与智能算法,构建交通荷载耦合的路面损伤预测模型。结合路面性能、经济成本与通行安全多维度因子,搭建养护时机决策模型,划分分级养护阈值。工程实例表明,该模型可精准判定最优养护时机,规避养护滞后与资源浪费问题,可为高速路面精细化养护提供技术支撑。

关键词:交通荷载作用;高速公路;路面养护;时机决策

引言:高速公路路面长期受循环交通荷载与复杂环境耦合作用,易出现车辙、裂缝等病害,造成路面性能衰减、通行安全隐患加剧。当前路面养护多依赖传统经验,存在决策片面、时机滞后、成本管控失衡等问题,难以适配重载交通下的路面养护精细化需求。为实现科学养护、延长道路服役寿命,本文聚焦交通荷载核心影响因素,开展路面损伤演化规律与养护时机决策研究,构建精准化决策体系,助力公路养护提质增效。

1 交通荷载下高速公路路面损伤机理及特征分析

1.1 高速公路路面交通荷载特征分析

(1) 交通荷载基本参数:高速公路路面交通荷载核心参数包含车辆轴载类型、轴重分布、行车速度及车流密度。路面荷载可划分为常规、重载及超载荷载三类,不同荷载类型的占比与轴重区间存在明显差异,重载、超载车辆是加剧路面损伤的核心荷载载体。(2) 交通荷载时空分布特性:交通荷载具备显著的时空差异性。时间维度上,高峰时段车流密集、荷载叠加效应突出;空间维度上,互通立交、坡道、车道变换路段为重载集中区域,荷载作用强度远高于常规路段,可为路面损伤模拟提供精准荷载边界条件。(3) 反复荷载疲劳作用特性:车辆往复行驶会对路面产生持续性循环荷载与瞬时冲击荷载,长期反复作用会打破路面结构受力平衡,引发材料内部微损伤累积,形成疲劳效应,是路面结构性破损的主要诱因。

1.2 高速公路典型路面病害类型及成因

(1) 路面常见病害类型:高速公路路面分为沥青与水泥路面两类,典型病害涵盖车辙、裂缝、坑槽、沉降、剥落等,各类病害外观特征不同,且多集中于行车道重载区域,呈现规律性分布。(2) 病害形成核心成

因:交通荷载反复作用引发的结构疲劳损伤是病害主因,长期循环荷载会导致路面结构层性能衰减。同时,温度、雨水等环境因素与荷载形成耦合作用,加速材料老化、结构破损,加剧病害发展。(3) 不同荷载工况下病害差异特征:轻载工况下路面病害发展缓慢、程度轻微;常规荷载下病害稳定萌生、缓慢扩展;重载及超载工况下,病害发育速度骤增、破损程度严重、分布范围更广,极易引发复合型路面损伤^[1]。

1.3 交通荷载与路面损伤耦合机制

(1) 路面结构受力响应规律:交通荷载作用下,路面面层、基层、底基层会产生差异化的应力、应变及位移响应,面层受力最直接、形变最明显,基层与底基层承担主要传力作用,是结构损伤的关键受力层。(2) 荷载累积损伤演化机理:循环交通荷载会引发路面材料微观裂隙萌生、扩展,逐步形成宏观裂缝、沉降等损伤,完成从材料性能衰减到整体结构破损的累积演化过程。(3) 路面性能衰减与荷载关联关系:荷载作用次数、荷载强度与路面核心性能指标直接相关,荷载强度越高、作用次数越多,路面平整度、压实度、结构强度衰减速度越快,二者呈现显著的负相关耦合规律。

2 交通荷载作用下高速公路路面损伤预测模型构建

2.1 路面损伤预测指标体系选取

(1) 指标选取原则:本次路面损伤预测指标筛选严格遵循科学性、针对性、可量化性及工程实用性四大原则。以交通荷载致损机理为核心依据,规避主观化、模糊化指标,确保所选指标能够真实反映荷载作用下路面的损伤状态,同时指标数据可通过现场检测、设备监测等方式获取,适配工程实际应用场景。(2) 核心预测指标确定:结合高速公路路面损伤特征,确定四项核心预

测指标,分别为路面破损率、平整度指数、车辙深度、结构强度衰减率。各指标均配套标准化检测与量化规范,其中路面破损率表征路面整体破损程度,平整度指数反映路面行车舒适性能,车辙深度体现荷载反复碾压的塑性变形,结构强度衰减率衡量路面结构整体性能退化水平^[2]。(3)指标影响权重分析:通过数据统计分析与相关性分析法,梳理各影响因子与损伤指标的关联程度。重点剖析交通荷载强度、荷载作用次数、车流密度等核心因子的主导作用,同时兼顾温度、降雨等环境因素及路面服役年限、施工质量等辅助因子,精准界定各类因子对不同损伤指标的影响权重,为模型构建提供数据支撑。

2.2 基于交通荷载的路面损伤数值模拟

(1)模拟模型搭建:依托专业有限元模拟软件,贴合高速公路真实路面结构形式,分层构建面层、基层、底基层及路基一体化数值模型。结合工程实测资料录入各结构层材料弹性模量、泊松比、疲劳参数等核心参数,还原路面真实物理力学特性,保障模型贴合实际工程工况。(2)荷载工况设置:基于前文交通荷载统计结果,差异化设置轻载、常规、重载及超载等多种轴重工况,同时设定不同荷载循环作用次数、行车速度参数,模拟车辆往复碾压、瞬时冲击的动态荷载效果,全面覆盖高速公路各类真实荷载作用场景。(3)模拟结果分析:提取不同荷载工况下路面结构的应力、应变、形变及损伤演化数据,系统分析荷载强度、作用时长、循环次数与路面塑性变形、疲劳损伤的关联规律,明确不同工况下路面损伤的萌生、扩展及加剧过程,为预测模型提供模拟数据基础。

2.3 路面损伤演化预测模型建立与求解

(1)模型算法选择:对比分析回归分析、机器学习、灰色预测等主流算法的适配性,结合路面损伤数据的非线性、时效性特征,筛选出抗干扰性强、预测精度高的算法,有效适配交通荷载动态变化下的路面损伤演化规律。(2)预测模型构建:以交通荷载轴重、作用次数、车流密度等参数为核心输入变量,以路面四大损伤指标为输出变量,整合环境、服役年限等修正参数,搭建多因子耦合的路面损伤动态预测模型,实现损伤状态的动态推演。(3)模型参数校准与求解:依托高速公路实测荷载监测数据、路面定期检测数据,对模型初始参数进行迭代校准与修正,消除模拟与实际工况的偏差,通过算法迭代运算完成模型求解,实现对路面损伤发展趋势的精准预判^[3]。

2.4 模型精度验证

(1)验证数据选取:选取不同路况、不同车流特征的典型高速公路路段作为验证样本,采集样本路段的实时交通荷载数据、不同服役周期的路面损伤检测数据,构建多元化、全覆盖的验证数据集。(2)模型精度检验:将实测基础数据代入预测模型,输出对应的损伤预测结果,与现场实测损伤数据进行逐一对比,从误差范围、拟合程度两个维度,检验模型的预测准确性、运行稳定性和工程适用性。(3)模型优化调整:针对局部工况下出现的预测误差,溯源误差成因,针对性优化模型算法参数、因子权重配比,修正多场耦合作用下的计算偏差,进一步缩小预测值与实测值差距,全面提升模型整体预测精度与通用性。

3 交通荷载作用下高速公路路面养护时机决策模型及工程应用

3.1 养护时机决策影响因素与决策准则

(1)核心决策影响因素:高速公路路面养护时机的判定受多维度因素共同制约,其中交通荷载强度为核心主导因素,重载、超载车流会加速路面损伤累积,直接影响养护周期。同时,路面现有损伤程度、结构性能衰减状况、剩余服役寿命是判定养护节点的基础依据。此外,养护工程经济成本、后期运维投入、道路通行安全需求及交通通行效率要求,均是平衡养护决策的关键因素,共同决定养护方案的可行性与时效性。(2)养护时机决策类型:结合路面损伤发展阶段与病害严重程度,将养护时机划分为预防性养护、矫正性养护与应急养护三类。预防性养护适用于路面无明显结构性破损、仅存在轻微性能衰减的阶段;矫正性养护针对已出现车辙、裂缝等常规病害,结构性能小幅受损的路面;应急养护则针对路面坑槽、大面积沉陷等突发严重病害,用于快速消除道路安全隐患,三类养护方式形成完整的路面养护时序体系^[4]。(3)多目标决策准则:为兼顾道路运营安全与工程经济效益,确立多目标综合决策准则。以通行安全优先为核心底线,杜绝破损路面引发行车风险;以养护效益最优为核心目标,最大化恢复路面结构性能与通行能力;秉持成本最低原则,合理控制养护投入,避免资源浪费;同时追求路面服役寿命最大化,通过精准把控养护时机,延缓路面损伤演化,提升道路长期运营价值。

3.2 多维度养护时机决策模型构建

(1)决策指标体系构建:基于多目标决策需求,整合四大维度指标构建全方位决策体系,包含路面

平整度、结构强度、破损率等路面性能指标,车辙深度、疲劳损伤度等荷载损伤指标,养护造价、运维成本等经济指标,以及行车安全系数、通行保障能力等安全指标。各指标相互耦合,全面覆盖路面状态、荷载影响、经济成本与通行安全,为精准决策提供数据支撑。(2)决策模型算法搭建:结合养护决策多指标、多层次的特征,采用层次分析法与多目标优化算法相结合的方式搭建决策模型。通过层次分析法量化各决策指标的权重,厘清交通荷载、路面损伤、经济成本等因子的主次影响关系,再依托多目标优化算法整合各项约束条件,构建动态化养护时机决策模型,适配不同交通荷载工况下的路面养护判定需求。(3)养护时机阈值确定:依托公路养护相关规范标准,结合大量工程实测数据与现场养护经验,划分路面损伤等级与交通荷载等级区间,针对性确定不同工况下的最佳养护时机阈值。明确预防性、矫正性、应急养护对应的损伤指标临界值、荷载累积作用次数阈值,为模型量化判定养护时机提供精准的取值标准^[5]。

3.3 工程实例应用分析

(1)工程概况:选取某省级高速公路典型行车路段作为研究实例,该路段路面采用常规沥青混凝土结构,基层与底基层结构完整,服役年限适中。路段通行车流以货运、客运车辆混合为主,重载车辆占比较高,长期受循环交通荷载作用,路面普遍存在轻微车辙、细微裂缝等病害,局部路段损伤累积明显,具备典型的荷载致损特征,适合开展模型验证与应用分析。(2)模型应用计算:全面采集实例路段的交通荷载监测数据、路面病害检测数据、结构性能参数及养护成本数据,将各项指标数据归一化处理后代入搭建的决策模型。通过权重计算、多目标优化求解,完成路段路面损伤程度预测、剩余寿命评估,精准判定该路段的最优养护时机与适配养护类型。(3)结果分析与方案对比:将本文模型决策结果与传统经验判定、单一指标判定的养护方案进行对比分析。结果表明,本文多维度决策模型综合考虑了荷载累积损伤、经济成本与通行安全,判定的养护时机更为精准,可有效避免过早养护造成的资源浪费和过晚养护引发的病害加剧、安全隐患增多等问题,方案的合理性与工程实用性显著优于传统决策方式。

3.4 养护决策优化建议与应用展望

(1)养护时机优化策略:针对不同荷载等级路段制定差异化精准养护策略,重载密集路段缩短养护监测周期,以预防性养护为主,提前干预微损伤发展;常规荷载路段遵循周期养护、动态监测原则,按需开展矫正性养护;轻载路段简化养护流程,以日常巡查和常规养护为主,实现分级管控、精准施策。(2)模型推广应用建议:该决策模型适配各类高速公路荷载工况与路面结构形式,稳定性与通用性较强。可推广应用于高速公路常态化养护管理工作中,结合道路监测系统实现养护时机动态预判,替代传统经验化决策模式,提升高速公路养护工作的标准化、精细化水平。(3)研究不足与未来展望:本次研究未充分考虑极端天气、突发交通事故等特殊工况对养护决策的影响,模型适配特殊场景的能力有待提升。未来可结合大数据、人工智能技术,融入多环境耦合因素,构建实时动态智能化养护决策系统,实现路面损伤预判与养护决策的自动化、精准化升级。

结束语

本文系统探究了交通荷载下高速路面损伤机理,完成损伤预测与养护决策模型的构建及验证,形成了多维度精准养护决策方法。研究实现了从经验养护到数据驱动养护的转变,有效提升了路面养护决策的科学性与实用性。研究仍存在特殊工况适配性不足的问题,后续将融合大数据与人工智能技术,优化多场耦合计算机制,构建智能化动态养护决策系统,全面提升道路养护运维水平。

参考文献

- [1] 赵旭. 高速公路沥青路面养护方案设计探讨 [J]. 工程建设与设计, 2025, 6(20): 74-76.
- [2] 陈海钊. 高速公路沥青路面超薄磨耗层预防性养护施工技术研究 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6(20): 137-140.
- [3] 刘敏, 瞿隆钰. 高速公路路面病害成因及养护施工技术 [J]. 云南水力发电, 2024, 40(S2): 32-34.
- [4] 赵云. 高速公路路面病害成因及养护施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2024, 11(29): 116-118.
- [5] 李红梅. 高模量沥青混合料在重载交通路面养护中的应用实践 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2024, 41(5): 88-93.