

基于路面指标发展模型的使用性能预测分析

庄 成¹, 周之路²

(1. 江苏宁杭高速公路有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 江苏中路工程技术研究院有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 为科学准确地预测高速公路沥青路面服役性能的长期发展, 为养护决策提供指导支撑, 基于江苏省大量服役期内高速公路检测数据, 总结江苏省高速公路沥青路面车辙、裂缝两个关键指标的发展规律, 经方法比选后, 基于“S”型函数建立路面关键指标发展模型, 形成路面使用性能预测分析方法。研究结果表明, 江苏省半刚性基层沥青路面车辙呈现三阶段发展: 快-慢-快, 裂缝呈现三阶段发展: 慢-快-慢。基于发展规律建立的关键指标发展模型可较好地反映路面服役性能的发展, 并科学预测未来路面发展情况。研究成果为高速公路养护决策提供有价值的参考价值。

关键词: 道路工程; 路面指标; 发展模型; 养护决策

中图分类号: U418.6; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0059-04

Prediction and Analysis of Using Performance Based on Pavement Index Development Model

ZHUANG Cheng¹, ZHOU Zhilu²

(1. Jiangsu Ninghang Expressway Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 2. Jiangsu Zhonglu Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: To scientifically and accurately predict the long-term development of service performance for expressway asphalt pavements and provide guidance for maintenance decisions, the development patterns of two key indicators such as rutting and cracking on expressway asphalt pavements in Jiangsu Province are summarized according to the extensive in-service inspection data of expressways in Jiangsu Province. After comparing various methods, based on the “S”-shaped function, a development model of key pavement indicators is established, and a prediction and analysis method for pavement service performance is formed. The research findings indicate that rutting on semi-rigid base asphalt pavements in Jiangsu Province shows a three-stage development: fast - slow - fast. Cracks show a three-stage development: slow - fast - slow. The key index development model established based on the development law can better reflect the development of pavement service performance and scientifically predict the future pavement development situation. These research outcomes provide valuable reference for expressway maintenance decision-making.

Keywords: road engineering; pavement indicators; development model; maintenance decision-making

0 引 言

高速公路沥青路面使用性能随服役年限的提升会出现规律性衰减, 基于过往检测数据和研究成果, 总结分析关键指标的发展规律, 提出路面使用性能的发展模型, 对高速公路未来服役状况进行预测十分必要。

针对沥青路面服役性能发展预测问题, 大量学

者做出了大量的相关研究。夏俊^[1]以深度学习技术作为切入点, 构建了融合时空特征的预测模型体系。宋心斌^[2]通过四点弯曲疲劳试验和超景深显微镜试验, 探究沥青混合料疲劳特性以及疲劳损伤微观机理, 并构建寿命预测模型。任泽^[3]基于 2015—2024 年路面损坏状况指数 (PCI) 十年定期检测数据, 系统分析了路面使用性能衰变规律, 构建了各路线的路面性能衰变方程。于明明^[4]等使用随机森林回归模型建立了各项路面使用性能预测模型, 并用外部验证集验证了模型的精度。金添^[5]等研究基于实际参数建立刚柔复合式路面的有限元模型, 计算沥青层最大剪应力, 通过车辙预测模型计算并分析车辙深度。孙航^[6]依托实际工程, 开展了道路拓宽改造后

收稿日期: 2026-03-03

作者简介: 庄成(1975—), 男, 学士, 经济师, 从事高速公路养护工作。

通信作者: 周之路(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事路面结构设计工作。电子信箱: 1017518687@qq.com

新旧路基在车辆荷载作用下的差异沉降规律与累积沉降预测方法研究。褚丽晶^[7]通过全面综述现有沥青路面性能预测模型,明确各类预测模型的特征及适应条件。胡鹏坤^[8]通过因子分析等方法完成影响因素筛选降维,进而构建融合多源数据的高精度预测模型。

通过文献调研可以发现,现有研究有些没有结合实际路况信息的调查,只是从纯理论出发建立模型,同时存在对路面关键指标的把握不精准,多指标相互影响,揉在一起导致预测模型模糊的问题,对于预测模型的建模方法也存在较大的分歧,不同方法的优劣势有待分析,比选出具有显著科学性和代表性优势的模型方法十分重要。

可见,虽然针对路面服役性能及关键指标预测模型的大量工作被开展,但问题在实际工程中仍然没有被完全解决,仍然值得深入研究。本文首先基于江苏省近年来服役期内高速公路的裂缝、车辙检查数据开展分析,总结路面关键指标的发展规律,之后对不同预测方法进行比选,选择合适的建模方法,再结合江苏省高速公路路面的关键指标发展规律建立相应的发展模型,最后结合实际的工程应用,进行高速公路使用性能预测分析。研究形成的准确预测路面性能发展方法可为路面养护方案规划提供指导意义。

1 路面服役关键指标发展规律分析

基于近年江苏省大量服役期高速公路检测数据分析,总结路面车辙、横向裂缝的时间序列下发展规律。

1.1 横向裂缝发展规律分析

基于近年江苏省国检中横向裂缝检测数据,对江苏省在役高速公路的裂缝发展状况进行分析,得到江苏省高速公路的横向裂缝随服役时间的变化情况,见图1。

结合图1,基于长期数据对江苏省在役高速公路裂缝历年发展规律的统计分析,可以得到随着服役年限的增加,路面横向裂缝发展大致呈现“缓慢—爆发—稳定”的3阶段发展规律:

(1)第1阶段为通车初期的2年内,这一阶段路面基本无裂缝,每公里不到1条裂缝;

(2)第2阶段为通车3—8年内,这一阶段裂缝稳定发展,其中,在通车3—5年后裂缝开始出现,且在通车7年左右,每公里裂缝达10条;

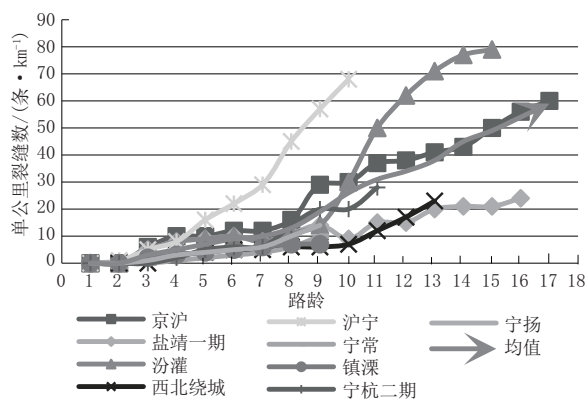


图1 江苏省在役高速公路横缝发展规律统计

(3)第3阶段为通车9年以后,这一阶段裂缝开始加速发展;

(4)10年期时路面每公里裂缝条数为30条左右,15年期时路面每公里裂缝条数为50条左右。

1.2 车辙发展规律分析

基于近年江苏省国检中车辙检测数据,对江苏省在役高速公路的车辙发展状况进行分析,得到江苏省高速公路的车辙深度随服役时间的变化情况,见图2。

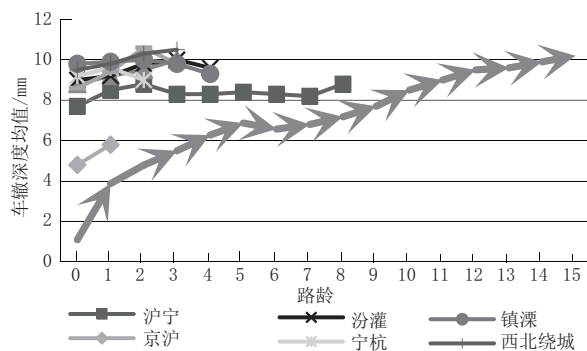


图2 江苏省在役高速公路车辙发展规律统计

结合图2,对江苏省在役高速公路车辙历年发展规律的统计分析,可以得到,通车初期路面车辙发展大致呈现“迅速—稳定—快速”的三阶段发展规律:

(1)第1阶段为通车初期2年内,这一阶段车辙迅速发展,车辙深度达到5 mm;

(2)第2阶段为通车3—6年,这一阶段车辙稳定发展;

(3)第3阶段为通车7年以后,这一阶段车辙快速增长,在服役8年左右达到8 mm。

随着服役时间的增加,由于及时车辙养护作用,路面车辙得到有效控制,整体车辙控制在9 mm以下。

2 发展模型比选

科学的发展模型有助于更好地反应路面关键性

能指标的发展规律,为性能预测提供较好的科学性和可信度。针对发展模型的研究,现有的常见方法有:回归法、灰色模型法、时间序列法、神经网络法、马尔可夫模型法等。应对不同发展模型方法进行研

究对比,优选合适的模型方法。几种常见模型方法对比见表 1^[8-15]。

表 1 不同模型方法对比

预测模型	模型特点	优势	缺陷
回归法	以大量实测数据为基础	简单明了,易于操作	受到地域条件限制,难以准确表达路面评价主客观间的复杂关系,需要的数据量大
神经网络法	以数学和物理的方法从信息处理的角度对 人脑神经网络进行抽象模拟	发现人脑所不能发现的数据内部规律, 具有超高速、容错和容差能力	计算比较繁琐
灰色理论法	从数据有限、杂乱无章的路面性能检测 数据中找出某种规律,建立灰色模型	需要数据少,对时间序列的趋势预测, 尤其是短期内的预测有着较高的预测 精度	对于较远期的预测,灰色预测模型数据序 列拟合较差
时间序列法	从时间序列中找出变量变化特征、趋势 以及发展规律,从而对变量未来变化进 行有效地预测	受主观因素影响较小,结果比较客观, 可预测在时间方面稳定延续的过程	反映对象间单项的联系,不适合长期预测
马尔可夫模型	根据现在所处的状态,采用马尔可夫链 理论得到系统未来可能达到的某种状态 的概率	具有无后效性,能客观反应路面因素的 不同,便于更新,并组织到新的优化过 程中	适合预测随机波动量大、不确定因素多的 长期预测;预测值不直接面向性能指标,结 果不够直观

总结分析了不同发展模型建模方法,可以发现各方法均具有各自的局限性,如回归法难以准确反映路面指标的复杂关系;神经网络法存在黑箱问题,可解释性差;灰色模型法及时间序列法拟合较差,不适合长期预测;马尔科夫模型误差大,无法准确反映客观规律。可见针对高速公路路面性能的预测由于其独特的特殊性,难以用已有的单一方法进行科学建模。基于纯时间序列的预测模型或是单纯的数学回归模型无法有效在道路工程行业中对客观规律及过往规律进行系统反应,故分析认为对于道路工程路面指标的发展模型建模,应基于关键指标的发展规律,采用机理模型为基础,引入道路关键指标参与模型之中并结合道路检测数据使用回归法确定模型关键参数,将关键指标客观发展规律纳入模型,最终得到定制化的路面使用性能的发展模型。

3 路面指标发展模型

结合前文总结的江苏省高速公路沥青路面横向裂缝及车辙的发展规律,选择典型的机理模型为基础,并引入调整参数得到相应的发展模型。

3.1 横向裂缝发展模型

基于路面横向裂缝的发展特征,采用具有相同特征的机理模型:“S”型函数。路面横向裂缝发展模型见式(1):

$$C=A_2+\frac{A_1-A_2}{1+\left(\frac{t}{t_0}\right)^p}$$

(1)

式中:C为公里段内横缝数量,条;t为路龄,年;A₁为

初始年公里段内横缝数量,条;A₂为服役末期稳定后公里段内横缝数量,条;t₀、p为增长率相关参数,采用非线性最小二乘法结合L-M优化算法回归得到。

发展模型与实际路面横向裂缝发展情况对照见图3。

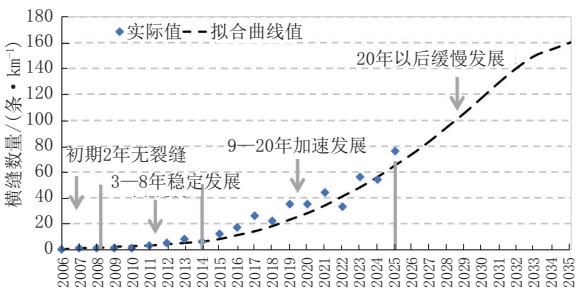


图 3 横向裂缝(每公里数量)发展趋势S型曲线拟合

3.2 车辙发展模型

基于路面车辙的发展特征,提出具有相同特征的机理模型:叠加的“S”型逻辑斯蒂函数。路面车辙发展模型见式(2):

$$RD=A_0+r_1t+\frac{r_2-r_1}{k_1}\ln\left[1+e^{k_1(t-t_1)}\right]+\frac{r_3-r_2}{k_2}\ln\left[1+e^{k_2(t-t_2)}\right]$$

(2)

式中:RD为车辙深度,mm;A₀为初始车辙深度;t为路龄,年;t₁、t₂为各阶段分界时间点,年;r₁、r₂、r₃为第1、2、3阶段车辙深度增长率;k₁、k₂为各阶段之间控制过渡速率的参数,值越大过渡越陡峭。

发展模型与实际路面车辙发展情况对照见图4。

4 基于工程实践的使用性能预测

结合江苏省京沪公司所辖新扬高速公路历年路

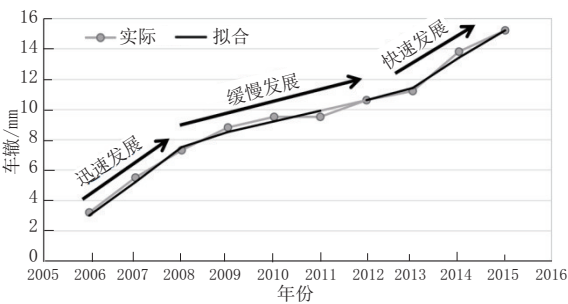


图4 车辙发展趋势双S型曲线拟合

表功能检测数据,使用本研究提出的路面指标发展模型从路表横缝状况、车辙状况两个维度,进行新扬高速公路沥青路面使用性能预测分析。

对新扬高速进行统计分析,回归得到横向裂缝发展模型回归参数,模型见图5和表2。

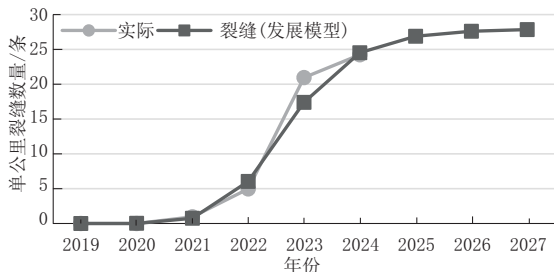


图5 新扬高速横向裂缝发展模型回归结果

表2 新扬高速横向裂缝发展模型

高速	类型	模型	R^2
新扬	横向裂缝	$C = 28 - \frac{28}{1 + \left(\frac{t}{4.7}\right)^8}$	95.27

发展模型与实际路面检测情况相关性较高,可很好的反应路面横向裂缝的发展趋势,根据模型预测,新扬高速在2025年后裂缝发展将进入相对稳定阶段,虽不会再爆发式增长,但裂缝间距已达到40 m,在后续的养护规划中仍需持续关注横向裂缝的发展。

对新扬高速路段进行统计分析,回归得到车辙发展模型回归参数,模型见图6和表3。

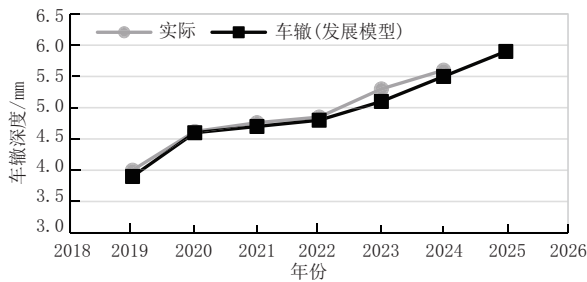


图6 新扬高速车辙发展模型回归结果

表3 新扬高速车辙发展模型

高速	类型	模型	R^2
新扬	车辙	$RD = 1.5t - 3\ln(1 + e^{5t - 10}) + 3\ln(1 + e^{5t - 30})$	92.65

发展模型与实际路面检测情况相关性较高,可很好的反应路面车辙的发展趋势,根据模型预测,新扬高速在2022年后车辙发展将进入相对较快的阶段,并且随着材料老化性能衰减,车辙深度将持续保持较快增速增加,故应在后续的养护规划中优先尽早对路面车辙进行处治,使其回到发展初期的较低水平。

2025年最新检测数据见表4。

表4 发展模型与实测值对比

类别	2026检测	预测模型	偏差
裂缝/条	26	26.89	3.4%
车辙/mm	5.7	5.9	3.5%

可见,新扬高速每公里横向裂缝数量为26条,车辙深度为5.7 mm,与预测模型预测值非常接近,偏差5%以内,验证了本研究提出的路况预测模型的科学性和指导意义。

5 结 论

本文基于服役期内高速公路检测数据总结横向裂缝及车辙发展规律,并结合机理模型提出高速公路沥青路面横向裂缝、车辙发展模型,得到以下结论:

(1)横向裂缝呈现“三阶段”发展趋势,初期无裂缝,通车几年后裂缝缓慢增长;之后会迎来一个加速发展期间,通车达一定年限后裂缝增长至某一程度,往后裂缝将缓慢增长。车辙呈现“三阶段”发展趋势,通车初期车辙深度迅速增大;之后路面完成压密车辙的形成,车辙深度缓慢增加;最后由于材料性能显著衰减,车辙深度再次快速增加。

(2)基于纯时间序列的预测模型或是单纯的数学回归模型无法有效在道路工程行业中对客观规律及过往规律进行系统反应,应基于关键指标的发展规律进行定制化的路面使用性能发展建模。

(3)根据高速公路沥青路面横向裂缝及车辙的发展规律,选择典型的机理模型为基础,并引入调整参数得到相应的横向裂缝、车辙发展预测模型。

(4)实际工程应用表明,本研究提出的基于路面指标发展模型的使用性能预测分析方法可真实反应沥青路面服役预期状态,为养护决策提供支撑。

参考文献:

[1] 夏俊.基于深度学习的交通流量与路面病害预测养护研究[J].信息系统工程,2025(12):68-71.
[2] 宋心斌.多因素耦合作用下沥青路面疲劳损伤微观机理及寿命预测模型研究[C]//2025年江西交通科技创新大会论文集.南昌:

(下转第92页)