

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.07.015

多阶段维修养护的沥青路面性能衰变模型研究

倪自成, 阮晓波

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为了科学测度道路路面的潜在病害程度,合理制定路面全生命周期的维护策略,探究多阶段维修养护的道路路面性能衰变模型的构建形式。文章基于现有模型建立多阶段沥青路面性能衰变模型,调整该模型的性能折减系数、决定维修的时刻和衰变模式因子,分析不同参数条件下性能衰变特性,构建不同维修养护阶段下的衰变模型;探讨多阶段模型参数的引入合理性及其取值范围,讨论不同参数对性能的影响;当某阶段相关参数已知时,预测下一阶段的性能衰变曲线。研究发现:使用性能指数的大小与折减系数、模式因子有关,而曲线衰变趋势与三者均相关;结合道路性能等级划分方式,确定不同维修水平与道路性能等级的定量关系,有利于从道路路面全生命周期内多阶段维修养护的多种策略中获取最优策略,为后续的资源配置和道路施工提供可靠参考。

关键词:道路工程;多阶段养护;衰变曲线;沥青路面;使用性能预测

中图分类号:U416.26

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)07-0964-06

Research on decay model of asphalt pavement performance with multi-stage maintenance

NI Zicheng, RUAN Xiaobo

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to scientifically measure the potential disease degree of road pavement, reasonably formulate maintenance strategies for the full life cycle of road pavement, this paper explores the construction form of road pavement performance decay model for multi-stage maintenance. Based on the existing models, a multi-stage asphalt pavement performance decay model is established. By adjusting the performance reduction coefficient of the model, the maintenance time and decay mode factor are determined, the decay characteristics of pavement service performance with different parameter conditions are analyzed, and the decay models of pavement service performance in different maintenance stages are derived. The rationality and value range of the parameters of multi-stage model are discussed, and the influence of different parameters on pavement performance decay is probed. The decay curve of pavement performance with time in the next stage is predicted when the relevant parameters are known. It is found that the pavement performance index is related to the reduction coefficient and decay mode factor, and the decay trend of pavement performance is related to all three. The quantitative relationship between different maintenance levels and road performance levels is determined by using the road performance grade classification methods, which is conducive to obtaining the optimal strategy from the multi-stage maintenance strategies for the full life cycle of road pavement, and providing a reliable reference for the subsequent resource allocation and road construction.

收稿日期:2024-08-30; **修回日期:**2024-12-03

基金项目:江苏省地质工程环境智能监控工程研究中心开放基金资助项目(2023-ZNJKJJ-03)

作者简介:倪自成(2000—),男,安徽霍山人,合肥工业大学硕士生;

阮晓波(1984—),男,安徽滁州人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者, E-mail: xiaoboruan@hfut.edu.cn.

Key words: road engineering; multi-stage maintenance; decay curve; asphalt pavement; performance prediction

道路基础设施自建成通车起,由于降雨、高温、冰冻、运营磨损等原因,其路面性能会逐渐降低。随着路面使用性能的衰变,会逐渐导致路面质量降低,沥青材料老化,车辙、裂缝等不良损坏现象的形成^[1-2]。若未能及时处理早期的病害,路面的损坏则会更快、更严重,这不仅不利于驾驶员的驾驶舒适度,还会降低道路的通行能力和通行效率,甚至存在交通安全隐患,造成严重后果。一旦路面的累计损坏超过阈值,就不得不进行大修甚至需要翻新重建,此时不仅影响交通的正常出行,还会造成巨大的经济损失。

路面技术状况对于公路技术状况的影响占70%^[3],因此可以重点研究路面技术状况的具体内容和相关特性。目前,立足于单项指标研究的有采取双参数衰变模型,建立了路面损坏状况指数(pavement condition index, PCI)、路面行驶质量指数(riding quality index, RQI)或路面车辙深度指数(rutting depth index, RDI)的预测模型^[4-6];文献[7-8]选择S型模型来模拟路面使用性能的衰变,分析模型参数对PCI、RQI的影响;文献[9-10]提出能够描述路面使用性能衰变模式的余弦模型;文献[11-13]基于综合指标研究主要包括以双参数衰变模型评价路面技术状况指数(pavement quality index, PQI)和单项指标PCI、RQI;文献[14-15]采用社会科学统计软件包分析、神经网络等拟合各单项指标,并加权得出PQI衰变模型。

综上所述,虽然外部环境不同,采用的衰变模型不同,数据分析方法也不同,但都是对现阶段路面使用性能的老化预测,较少考虑引入的维修养护策略对路面使用性能变化趋势的影响。由文献[16]调研可知,现阶段常用的路面性能衰变方程模型主要有S型模型、双参数模型、余弦模型等。通过对模型适用范围的比较,本文选择在双参数衰变模型的基础上加以改进,建立多阶段维修养护的沥青路面性能衰变模型。

1 性能衰变模型

路面使用性能的概念最早由美国州公路及运输协会提出^[17]。对于使用性能的预测,建模方法各异,通常以回归方法等为代表的经验性模型居多,但是在结果分析时还需要与标准中的衰变模型作比较^[18-20]。目前路面使用性能的性能衰变模型

总结归纳为4种典型的衰变模型,根据统计,我国路面的衰变情况大多符合凹形衰变模型^[21]。

1.1 单阶段衰变模型

根据《公路技术状况评定标准》,通过对PCI和RQI的研究或者单独研究PQI,都可以描述道路投入运营后的路面性能衰变情况。因此本文考虑PCI、RQI或PQI均可作为沥青路面性能的评估指标,并忽略了评定道路技术状况中权重较低的指标,因此选择双参数衰变模型作为基础,并加以改进。衰变预测模型的原始形式^[22]为:

$$P = P_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{y} \right)^\beta \right] \right\} \quad (1)$$

其中: P 为自然衰减下路面性能指标(包括PCI、RQI或其综合指数); P_0 为路面新建或大修后的性能初始值; y 为路龄; α 、 β 为参数。

参数 α 定义为路面衰变的寿命因子,即路面性能衰变到初始值的63.2%时的路面使用年数,反映了路面使用寿命的长短;参数 β 定义为路面衰变的模式因子,决定了曲线的形状。因此,路面衰变的寿命因子 α 的取值范围通常为3~15;路面衰变的模式因子 β 的取值范围一般为0.2~1.8^[23]。

1.2 多阶段衰变模型

1.2.1 初始阶段的衰变模型

在建立多阶段衰变模型时,可以参考数列中的递推思维,因此,初始阶段即第1次养护前的沥青路面性能衰变模型为:

$$P^{(0)} = P_0^{(0)} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{y^{(0)}} \right)^{\beta^{(0)}} \right] \right\} \quad (2)$$

其中: $P^{(0)}$ 为第1次养护之前的道路性能指数; $P_0^{(0)}$ 为道路投入运营时的初始性能指数; $y^{(0)}$ 为道路在第1次养护之前的运营时间; $\beta^{(0)}$ 为第1次养护之前的路面衰变模式因子。

式(2)描述了道路开始投入运营后至第1次养护间的道路性能衰变函数,初始的沥青路面技术状况可以根据路面损坏和路面平整度进行加权估算^[24-25]。因此,初始阶段的路面使用性能模型可以通过数据拟合并标定参数,即式(2)中的参数 α 、 β 可知。

1.2.2 后续阶段的衰变模型

由1.2.1节可以得到递推方法的初始值,即采用现有衰变模型来描述路面初始阶段的性能退化,因此只要确定后续每个维修养护阶段之间的

关系,理论上可以建立多阶段维修养护的沥青路面性能衰变模型,即

$$P^{(k)} = \lambda^{(k)} P_0^{(0)} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\mu^{(k-1)}}{y^{(k)}} \right)^{\beta^{(k)}} \right] \right\} \quad (3)$$

其中: $P^{(k)}$ 为第 k 次养护后的道路性能指数; $y^{(k)}$ 为第 k 次养护后道路的运营时间; $\beta^{(k)}$ 为第 k 次养护后的路面衰变模式因子; $\lambda^{(k)}$ 为第 k 次养护后的初始性能折减系数; $\mu^{(k-1)}$ 为道路第 $k-1$ 次养护后至第 k 次养护前的运营时间。

引入模型参数 $\lambda^{(k)}$ 。本文认为道路每次维修后的初始性能指数 $P_0^{(k)}$ 不会达到最初始的 $P_0^{(0)}$, 而是其 $\lambda^{(k)}$ 倍。参数 $\lambda^{(k)}$ 的变化反映了每次维修后初始性能指数的不确定性, 因此, 参数 $\lambda^{(k)}$ 定义为第 k 次养护后的初始性能折减系数。该折减系数是指在不同条件下路面性能与理想状态之间的差异所引起的修正系数, 这些系数根据路面材料、交通量、维护水平等因素的变化而不同。通过对文献[4, 7, 11-16]中大约 70 个路段维修后的路面初始使用性能数据的收集整理, 可得路面性能初期折减系数普遍在 0.8~1.0。

引入模型参数 $\mu^{(k-1)}$ 来替换参数 α 。参数 $\mu^{(k-1)}$ 的变化反映了在第 $k-1$ 次养护后至第 k 次养护前, 期间道路性能达到采取预期维修方案的运营时间, 即第 $k-1$ 阶段选择维修养护的时刻。

引入模型参数 $\beta^{(k)}$ 。与参数 β 的定义一致, 参数 $\beta^{(k)}$ 决定了道路第 k 次养护后路面性能衰变曲线的形状, 定义为第 k 次养护后的衰变模式因子。

参考道路性能指数划分不同评级的标准^[26]: 优 [100%, 90%]、良 (90%, 80%)、中 (80%, 70%)、次 (70%, 60%)、差 (60%, 0)。引入参数 $\beta^{(k)}$ 后, 可以通过调整参数 $\beta^{(k)}$ 来反映道路性能衰变曲线衰变至不同评级的现象。

综上所述, 多阶段维修养护的沥青道路路面性能衰变模型为:

$$\begin{cases} P^{(0)} = P_0^{(0)} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{y^{(0)}} \right)^{\beta^{(0)}} \right] \right\}, \\ P^{(k)} = \lambda^{(k)} P_0^{(0)} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\mu^{(k-1)}}{y^{(k)}} \right)^{\beta^{(k)}} \right] \right\} \end{cases} \quad (4)$$

参数 $\mu^{(k-1)}$ 表示第 $k-1$ 次养护后的路面使用性能衰变曲线上维修点的横坐标, 因此, $\mu^{(k-1)}$ 的取值范围为各阶段的时间区间。

2 模型参数分析

2.1 初始性能折减系数影响分析

假设保持第 $k-1$ 阶段维修时刻 $\mu^{(k-1)}$ 不变、

模式因子 $\beta^{(k)}$ 不变, 分析第 k 阶段养护后初始性能折减系数 $\lambda^{(k)}$, 对道路路面维修养护后的使用性能的影响。假设 $\mu^{(k-1)}$ 取 $9^{(0)}$ 、 $6^{(1)}$, 相应的模式因子 $\beta^{(k)}$ 取 0.8、0.7。

在给定初始道路路面使用性能衰变曲线的条件 ($\alpha=10.0676$, $\beta^{(0)}=0.9453$)^[17] 下, 第 1 次维修时刻取 $9^{(0)}$ 、模式因子 $\beta^{(1)}$ 取 0.8 情况下, 分析 $\lambda^{(1)}$ 值对第 1 次维修养护后路面使用性能指数的影响, 如图 1 所示。

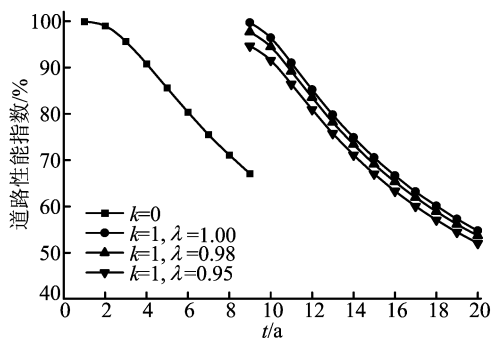


图 1 维修时刻 $\lambda^{(1)}$ 值对性能指数的影响

由图 1 可知, $\lambda^{(1)}$ 值越大, 第 1 次维修养护之后的道路路面使用性能指数越高, 且随着 $\lambda^{(1)}$ 值的减小, 性能指数越来越低。通过对比图 1 中 $k=1$ 阶段曲线, 可以看出随着 $\lambda^{(1)}$ 值的减小, 使用性能指数呈现比例降低, 通过数据计算和模型形式分析可以得出其比例为不同 $\lambda^{(1)}$ 的比值。并且通过对比图 1 中 $k=0$ 和 $k=1$ 阶段曲线, 可见维修后道路可以保持更高的性能, 进一步说明了维修养护的必要性。

在图 1 所述条件的基础上, 选择 $\lambda^{(1)}=0.98$ 时的曲线作为 $k=1$ 阶段维修养护的沥青路面性能衰变曲线, 并保持第 2 次维修时刻 (取 $6^{(1)}$)、模式因子 $\beta^{(1)}$ (取 0.7) 不变, 分析 $\lambda^{(2)}$ 值对于第 2 次维修养护之后路面使用性能指数的影响, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出: $\lambda^{(2)}$ 值越大, 第 2 次维修养护之后的路面使用性能指数越高, 且随着 $\lambda^{(2)}$ 值的减小, 性能指数越来越低, 其变化特征与图 1 类似; 通过对比 $k=2$ 阶段的曲线, 可以得出随着 $\lambda^{(2)}$ 值的减小, 使用性能呈比例降低, 且与 $\lambda^{(2)}$ 值大小有关; 通过对比不同阶段曲线可以看出, 维修次数越多, 道路结构抗性逐渐降低, 因此随着路龄的增加, 路面性能指数衰变趋势越快。

综上所述, 第 k 阶段的初始性能折减系数 $\lambda^{(k)}$ 与性能曲线的高低有关, 与使用性能指数的变

化趋势无关。

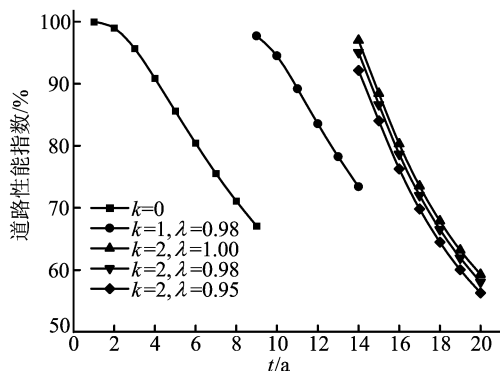


图2 $\lambda^{(2)}$ 值变化对性能指数的影响

2.2 维修养护时刻影响分析

假设 $\lambda^{(k)}$ 保持不变,模式因子 $\beta^{(k)}$ 不变,维修养护时刻 $\mu^{(k-1)}$ 变化,分析前一阶段中选择维修养护的时刻,对路面维修养护后的使用性能的影响,假设 $\lambda^{(k)}$ 取 0.98、0.95,相应的模式因子 $\beta^{(k)}$ 取 0.8、0.7。

在与 2.1 节中相同的初始条件下,保持第 1 次维修后的 $\lambda^{(1)}$ 不变、模式因子 $\beta^{(1)}$ (取 0.8) 不变,选取不同维修点对于第 1 次维修养护后路面使用性能的影响如图 3 所示。

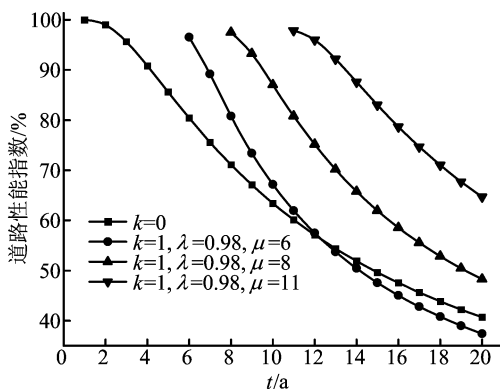


图3 参数 $\mu^{(0)}$ 变化对性能指数的影响

从图 3 可以看出,维修点选取越迟,第 1 次维修后前期的路面使用性能曲线下下降越缓慢。其原因可能是维修时间越早,道路进行的维修程度越低,其内部的结构化损坏并未修复。

在图 3 所述条件的基础上,选择维修时刻 $6^{(0)}$ 时的曲线作为 $k=1$ 阶段维修养护的路面性能衰变曲线,并保持 $\lambda^{(2)}$ (取 0.95) 不变、模式因子 $\beta^{(1)}$ (取 0.7) 不变,分析不同维修点对第 2 次维修养护后路面使用性能的影响,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,维修点选取越迟,即维修时

间越晚,其变化特征与图 3 的规律类似。不同阶段曲线的对比可以看出, $k=2$ 阶段曲线的变化趋势与 $k=1$ 阶段曲线变化趋势相近,与初始阶段的曲线差异大。分析其原因是随着道路维修养护阶段的增加,道路结构抗性逐渐降低,路面使用性能衰变越来越快;同时同一阶段下,维修点选取越迟,其道路结构破坏越多,维修后初期沥青路面性能由于损坏修复和设备换新,性能下降缓慢,但超过一定时间后沥青路面性能衰变更快。

综上,第 $k-1$ 阶段的维修时刻 $\mu^{(k-1)}$ 与性能曲线的高低和变化趋势相关。

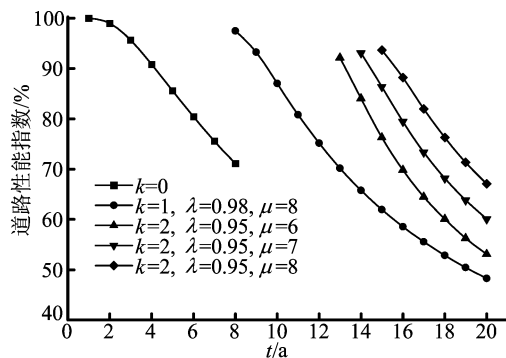


图4 参数 $\mu^{(1)}$ 变化对性能指数的影响

2.3 模型形状影响分析

假设 $\lambda^{(k)}$ 保持不变、维修时刻 $\mu^{(k-1)}$ 保持不变,分析第 k 阶段中衰变模式因子 $\beta^{(k)}$ 对路面维修养护后的使用性能的影响,假设 $\lambda^{(k)}$ 取 0.98、0.95,相应的维修时刻 $\mu^{(k-1)}$ 取 $8^{(0)}$ 、 $7^{(1)}$ 。在与 2.1 节中相同的初始条件下,保持第 1 次维修后的 $\lambda^{(1)}$ 不变,维修时刻 $\mu^{(0)}$ (取 $8^{(0)}$) 不变,分析模式因子对第 1 次维修养护后路面使用性能的影响,如图 5 所示。

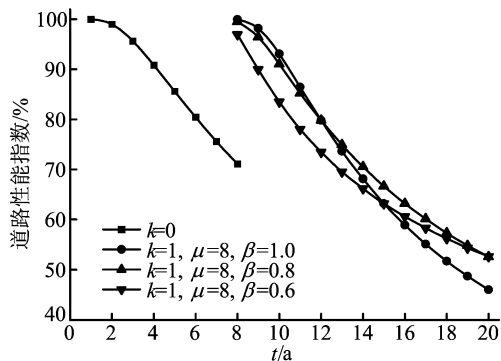


图5 参数 $\beta^{(1)}$ 变化对性能指数的影响

从图 5 可以看出,模式因子 $\beta^{(1)}$ 分别取 1.0、0.8、0.6 时,沥青路面性能曲线分别为反 S 型、类

直线型和凹型曲线。当模式因子 $\beta^{(1)}$ 越小时,初期的道路性能指数会越低,随着路龄的增加,下降速度更缓,下降趋势更弱,后期的道路性能指数反而更高。

不同模式因子对于后续维修养护阶段路面使用性能的影响与前文一致。综上可知,第 k 阶段的模式因子 $\beta^{(1)}$ 与性能曲线的高低和变化趋势相关。

3 多阶段维修养护策略

3.1 路面使用性能与维修方案划分

沥青路面养护工作分为日常巡视与检查养护、小修保养、中修、大修、改建和专项养护工程等 5 类^[27]。但在新规范中,将沥青路面养护工作按照养护目的和公路设施差异,分为预防养护、修复养护、专项养护和应急养护^[28-30]。

因此结合新规范与老规范的联系与区别,对于路面状况使用性能优、良、中、次、差的评价等级,分别采取相应的维护方式^[31-32]:① 优[100%, 90%],路面状况好,仅需日常养护和预防养护;② 良(90%, 80%],路面出现少量变形和破坏,需加强日常养护和预防养护,适当采取低水平的修复养护;③ 中(80%, 70%],路面变形和破坏逐渐加重,平整度较差,需采用中等水平的修复养护,必要时可提高修复养护水平;④ 次(70%, 60%],路面各种病害较多,平整度差,采取较高的修复养护并结合专项养护进行修复;⑤ 差(60%, 0],路面状况差,需采取专项养护与应急养护方式相结合,以应对突发情况。

3.2 道路运营阶段维护方案组合案例

为了更直观地展现多阶段维修养护的道路路面使用性能衰变模型在道路运营阶段的预测能力,以及其与维修方案组合的联系,根据 1.2 节建立的衰变模型,假定一个运营生命周期为 30 a 的沥青道路,结合参数范围,通过合理给定不同阶段的模型参数,忽略其维修时间,最终模拟其多阶段维修养护的性能曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,整个道路的运营周期共维修 4 次,因此可以将道路路面使用性能的衰变分为 5 个阶段。其中初始阶段为 $k=0$ 的沥青路面性能曲线,分别确定参数 $\lambda^{(k)}$ 、 $\mu^{(k-1)}$ 和 $\beta^{(k)}$ 的值,得到第 1 次养护前的性能衰变曲线。同理,依次确定后一阶段的参数和模型,可以绘制出整个运营阶段的沥青路面性能衰变曲线。

根据 3.1 节的性能与维修方式的联系,并且

适当考虑初始性能折减系数 λ 和衰变模式因子 $\beta^{(k)}$ 对于维修策略的影响,图 6 中 4 次维修阶段依次采取的维修策略为中等水平修复养护、较高的修复养护及专项养护、中等水平修复养护、较高的修复养护及专项养护。

该结果可以为道路整个运营阶段的维修养护策略所涉及的资源配置、人员调动、资金投入和时间计划等提供参考。

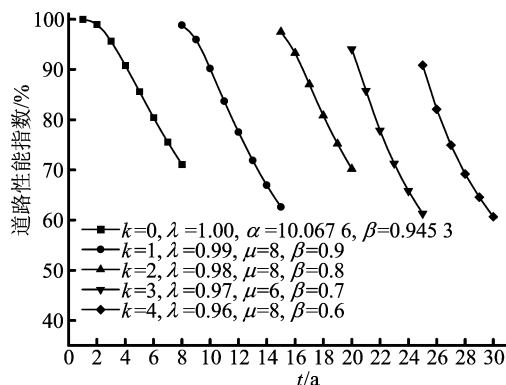


图 6 多阶段维修养护的道路路面性能衰变曲线

4 结 论

1) 本文选择在双参数衰变模型的基础上,增加初始性能折减系数、维修时刻因子和衰变模式因子,通过确定道路在任意阶段决定采取维修策略时刻,可以预测出下一阶段的路面使用性能,并建立了多阶段维修养护的沥青路面性能衰变模型。

2) 第 k 阶段的 $\lambda^{(k)}$ 与性能指数的高低有关,与使用性能指数的变化趋势无关;第 $k-1$ 阶段的维修点与性能指数的高低和变化趋势相关。

3) 通过划分使用性能的等级,将性能与不同水平的维修方式联系起来,可以预测多阶段维修养护的策略组合,理论上可以确定最优的维修养护策略,为后续人员安排和资源配置等实施工作提供参考。

4) 本文模型尚存在局限性,实际中沥青道路不同维修养护阶段参数 $\beta^{(k)}$ 的变化规律还有待进一步研究。本文只是推导了模型在理论上的合理性,还需要通过具体的试验验证其可行性,但仍可以作为沥青路面性能预测以及后续维修养护方案的参考。

[参 考 文 献]

[1] 沈亦翀. 公路沥青路面使用性能预测研究[J]. 工程技术研

- 究,2022,7(3):116-119.
- [2] 田雁南. 基于沥青路面性能衰变模型的预防性养护措施选择[J]. 安徽建筑,2020,27(9):176,193.
- [3] JTG 5210—2018 公路技术状况评定标准[S].
- [4] 马进. 基于沥青路面使用性能衰变规律的养护规划技术研究[J]. 西部交通科技,2018,13(8):15-17,47.
- [5] 蒙世杰. 基于沥青路面性能衰变特征的养护技术研究[J]. 西部交通科技,2022,17(12):61-63.
- [6] 张友忠,许新权,王旺,等. 基于双参数模型的沥青路面使用性能预测[J]. 广东公路交通,2022,48(6):14-20.
- [7] 冀伟. 冀北地区高速公路沥青路面使用性能衰变规律研究[D]. 张家口:河北建筑工程学院,2018:75-82.
- [8] 薛海. 基于沥青路面使用性能衰变模型研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016,12(11):80-81.
- [9] 肖金平,韦慧,赵健,等. 湖南省高速公路路面使用性能衰变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(7):2686-2692.
- [10] Cao L, Li L, Chen Y, et al. Performance prediction of expressway pavement in high maintenance level areas based on cosine deterioration equation: a case study of Zhejiang province in China[J]. Journal of Road Engineering, 2022, 2(3):267-278.
- [11] 王丕栋. 冀西南地区高速公路沥青路面性能衰变研究[D]. 保定:河北大学,2020:77-90.
- [12] 周岚. 高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[D]. 南京:东南大学,2015:55-172.
- [13] 姚跃凯. 新疆地区沥青路面使用性能衰变规律研究[D]. 西安:长安大学,2010:43-91.
- [14] 张童童. 基于路面使用性能衰变规律的沥青路面预防性养护时机研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019:41-72.
- [15] 杨小叶. 浙江省高速公路沥青路面使用性能衰变规律及目标养护周期研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016:43-108.
- [16] 汪文宇. 基于使用性能衰变的重庆高速公路沥青路面大修时机与大修技术选择研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017:27-55.
- [17] Fahim A, Jay T, Dahae K, et al. Evaluation of pavement service life using AASHTO 1972 and mechanistic-empirical pavement design guides[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2023, 12(1):46-61.
- [18] 汪蓉,叶文亚. 养护干预下车道级沥青路面表面性能演变模型[J]. 交通科技,2022,29(3):1-5.
- [19] 王威娜,秦煜,支喜兰,等. 沥青路面早期性能指标权重非线性集化研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(6):801-806.
- [20] Xin J, Mitsuyoshi A, Dan F. Sustainability-informed management optimization of asphalt pavement considering risk evaluated by multiple performance indicators using deep neural networks[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2023:238:109448.
- [21] 李海莲. 西北寒旱地区高速公路沥青路面技术状况分析及养护决策方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019:13-132.
- [22] 孙立军,刘喜平. 路面使用性能的标准衰变方程[J]. 同济大学学报(自然科学版),1995,20(5):512-518.
- [23] 王茜. 基于寿命周期的江苏省高速公路中长期养护规划方案研究[D]. 南京:东南大学,2018:9-96.
- [24] 张超良. 湖南省高速公路典型沥青路面长期使用性能评价及预测研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018:53-84.
- [25] 杨雨童. 基于不平衡数据集的沥青路面使用性能预测研究[D]. 兰州:西北师范大学,2022:23-72.
- [26] 李岩,张久鹏,陈子璇,等. 基于 PCA-PSO-SVM 的沥青路面使用性能评价[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(6):1729-1735.
- [27] JTJ 073. 2—2001 公路沥青路面养护技术规范[S].
- [28] 周辉. 高速公路沥青路面大修养护时机研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018:120-141.
- [29] 马子媛,李海莲,蔺望东. 基于层次变权未知理论的沥青路面预养护评价模型[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(12):1668-1675.
- [30] JTG 5142—2019 公路沥青路面养护技术规范[S].
- [31] 崔玉姣. 甘肃省高速公路网级沥青路面养护决策研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2020:23-93.
- [32] 陈康. 湖南省高速公路沥青路面大修时机决策评判指标体系研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2019:53-73.

(责任编辑 吴 亮)