

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.007

考虑公路等级的沥青路面性能衰变预测方法

周育名¹, 李金明², 李平¹, 陈致远¹, 段筱娟¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中国公路工程咨询集团有限公司)

摘要: 为了研究沥青路面使用性能的衰变规律,准确预测未来路面病害发展状况。根据沥青路面面层厚度、基层厚度的不同,将某省国省干线 2011—2014 年路面病害检测数据进行归类,分别采用 4 种路面性能衰变模型,以时间和累计当量轴次作为自变量进行回归分析,根据回归模型预测了 2015 年路面 PCI(路面损坏状况指数)值,与实际检测值进行了对比。结果表明:在不同类别中,以累计当量轴次为自变量时,拟合的衰变曲线相关系数均高于以时间为自变量的模型;在 2015 年路面状况预测值与实际值的对比分析中,高速公路指数形模型的差值最小,其他等级公路 S 形模型相对较好,但整体情况劣于高速公路;因此,对于高速公路路面性能,推荐采用累计当量轴次为自变量的指数形模型进行预测;对于其他等级公路,推荐采用累计当量轴次为自变量的 S 形模型进行预测。

关键词: 道路工程;性能衰变模型;回归;沥青路面;累计轴载次数

1 前言

近年来,中国公路建设取得了飞速发展,截至 2017 年底,中国公路总里程为 477.35 万 km,养护里程 467.66 万 km,占总里程的 97.9%。伴随着公路大规模建设接近尾声,公路的养护与管理越来越得到了

人们的重视。交通运输部“十二五”公路养护管理发展规划提出,在“十二五”期间要基本建立国道及高速养护管理科学决策体系,这期中关键的一步就是路面使用性能的预测,科学决策是建立在准确预测路面性能的基础上,没有准确的性能预测,决策往往会造成养护资金的浪费、路面使用质量下降及使用费用上升等现象。

- *****
- [2] 章佩佳,何兆益.复合碾压混凝土路面荷载应力分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2010(3).
- [3] 黄淮生.碾压混凝土基层切缝效应模拟研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2012.
- [4] 谢光宁.碾压混凝土基层在高速公路中的应用研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2014.
- [5] Delatte, Norbert. Simplified Design of Roller-Compacted Concrete Composite Pavement[J].Journal of Transportation Research Record, 2004:57-65.
- [6] Plati, Christina. Influence of Different Roller Compaction Modes on Asphalt Mix Performance[J].International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(1):64-70.
- [7] 艾长发,邱延峻,毛成,等.考虑层间状态的沥青路面温度

- 与荷载耦合行为分析[J].土木工程学报,2007(12).
- [8] 艾长发,黄大强,高晓伟,等.高寒地区沥青路面温度行为数值分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2017(2).
- [9] 国家气象局数据中心.地面气象资料数据集[Z],2017.
- [10] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [11] 陈宝,吴德军,刘翥.沥青路面结构的最大剪应力[J].长安大学学报:自然科学版,2010(6).
- [12] 肖川,曾杰,艾长发.基于动力特性的典型沥青路面性能评价与结构优化[J].中外公路,2016(6).
- [13] 郭芳,付宏渊,邵腊庚.基于环境温度变化的混合式基层沥青路面结构疲劳损伤分析[J].中南大学学报:自然科学版,2015(5).

收稿日期:2018-03-24

基金项目:长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金项目(编号:kfj150108);湖南省教育厅科学研究项目(编号:16C0054);国家自然科学基金资助项目(编号:51878075);广西科技计划项目(编号:桂科 AC16380111);广西交通科技项目(编号:桂交科 2013-100-28)

作者简介:周育名,女,博士,讲师.E-mail:zhouyuming0503@163.com

对沥青路面使用性能的预测,国内外进行了大量的研究。美国公路与运输协会在 1993 年出版的 AASHTO 设计指南中以路面现时服务能力指数 PSI (Present Serviceability Index) 作为评价路面性能的重要指标,并提出 PSI 与交通轴载作用次数的函数关系;MS Sakhaeifar、M Karaşahin、Yang J D 先后采用神经网络、模糊逻辑、马尔可夫矩阵方法对路面衰变性能进行了研究;Hofko B 在室内对沥青混合料永久变形进行了预测研究;Gharaibeh 将路面性能衰变模型应用于路面养护管理系统;Chris Raymond 对加拿大路面性能衰减模型进行了研究。中国的一些专家学者们针对中国的国情,对中国沥青路面使用性能衰变规律也进行了相关研究,最早开始路面性能衰减模型研究的是刘伯莹、孙立军等;王春红采用指数形模型对路面预防性养护进行了研究;张占军、王笑风采用修正的双参数模型对路面长期性能进行了研究;王朝辉、武建民分别采用数据包络分析和时间序列分析法对路面性能进行了预测;张金喜、范灵雨对采用时间为自变量对指数形衰减模型进行了研究;肖金平通过对湖南省高速公路沥青路面使用性能衰变的研究,提出了余弦函数预测模型。在确定型模型研究较为成熟后,近年来,概率型模型研究也逐渐兴起,王艳丽、傅东阳等、王国晓等分别采用人工神经网络、马尔可夫模型、灰色理论对沥青路面衰变性能进行了研究。在确定型模型研究中,目前更多的预测模型自变量对应的是时间,多是以年为单位,导致交通量轴载对路面性能指标衰减的影响并不能完全体现出来,虽然在模型回归的过程中,回归出的参数能部分体现交通量轴载的影响,但这远远不够,成为了目前路面性能衰变模型研究过程中的一大缺陷。此外,路面性能衰变模型与路面类型、结构层厚度、基层类型、土基状况、路面材料等内在因素均具有一定的关系,但目前这些模型中,均以一个整体模型代表了路面性能的衰变规律,其他内在因素均在模型回归参数中体现,导致不同路面的性能预测值与实际值相差甚远,对未来决策无指导意义,甚至误导决策者的决策行为。

该文旨在通过对既有路面性能衰变模型的分析,实地交通量、轴重及路况数据收集,筛选出影响路面性能衰减的主要因素,对以时间和累计当量轴次为自变量的性能预测模型进行对比分析,然后研究不同面层厚度条件下 4 种衰变模型曲线,最终建立半刚性基层沥青路面不同面层厚度、基层厚度条件下以累计轴载作用次数为主要自变量的沥青路面性能衰变方程。

2 路面性能衰变规律

路面性能衰变是指路面在行车荷载、环境因素和时间的综合作用下所特有的使用性能变化规律。目前其主要形式有图 1 所示的 4 种。

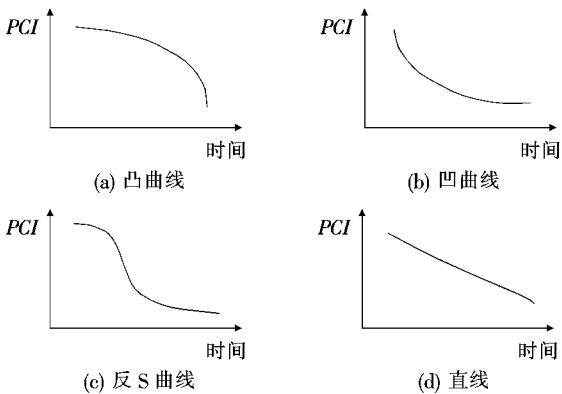


图 1 路面性能衰变曲线

图 1 中 4 条曲线代表 4 种不同的衰变速度,其共同特点是:随着使用时间或荷载作用次数的增加,使用性能呈下降趋势,即路况在不断恶化,所能提供的服务能力日益衰减,只是 4 种曲线反映的衰变过程有快有慢。在确定型路面性能预测模型中,目前主要有直线形、S 形、指数形、多项式形 4 种,每种模型均有其优缺点,4 种模型对比见表 1。

表 1 不同函数形式的衰变方程对比

函数形式	标准衰变方程	参数含义
直线形函数	$PPI = a + b \times t$	PPI : 路面性能指数; t : 路龄; a 、 b : 模型参数
S 形	$PPI = a + \frac{b-a}{1 + e^{\beta + k \times t}}$	PPI : 路面性能指数; a : PPI 的最大值; b : PPI 的最小值; t : 路龄; β 、 k : 模型参数
指数形	$PPI = PPI_0 \times \{1 - e^{-(\frac{a}{t})^b}\}$	PPI : 路面性能指数; PPI_0 : 初始使用性能指数; t : 路龄; a 、 b : 模型参数
二次多项式	$PPI = a \times t^2 + b \times t + c$	PPI : 路面性能指数; t : 路龄; a 、 b 、 c : 模型参数

3 路面性能衰变影响因素分析

影响路面使用性能的因素繁多,这些因素的差异

性和不稳定性使得路面状况的变化复杂多样,千差万别。影响使用性能的因素有:交通荷载、环境状况、施工和养护水平等外在因素;路面结构组合与厚度、基层类型、结构强度、土基状况、路面材料等内在因素。但鉴于目前研究技术的局限性,还未将上述因素全部定量地考虑到模型方程中。该文主要对影响路面性能衰变的主要因素进行分析。

(1) 面层类型

路面的面层类型包括沥青路面、水泥路面和砂石路面,不同的面层类型,其性能衰减曲线有所不同。该文针对某省国省干线历年检测数据,其 90% 以上均为沥青路面,因此,只针对沥青路面进行研究。

(2) 面层厚度

面层厚度较薄时,使用性能下降速率较大,随着面层厚度的增加,结构承载能力增强,路面有能力承受较大的破坏力,不至于很快损坏,能在较长时期内保持良好的行车舒适性。所以,随着面层厚度的增加,同样行车荷载的作用下,性能衰变由快到慢。该文针对某省国省干线,经统计分析,面层厚度主要为 0~5、5~10 和 15~20 cm 3 种,其中 0~5 cm 代表三级、四级公路,5~10 cm 代表二级、一级公路,15~20 cm 代表高速公路。

(3) 基层类型

分为半刚性基层、柔性基层和刚性基层,这 3 类基层的强度相差较大,其路面在相同的荷载条件下,损坏情况相差较大。而以同一类基层中的不同材料为基层的路段,损坏状况则没有明显的差别。目前中国应用最多的基层类型为半刚性基层,为了收集更多的数据,该文只考虑半刚性基层。

(4) 基层厚度

不同半刚性基层厚度的沥青路面衰减速率不一,一般规律是基层越薄,衰减速率越大。该文结合面层厚度分类方法,将半刚性基层厚度分为 15~25、25~35 和 35~45 cm 3 种,其中 15~25 cm 主要代表三级、四级公路,25~35 cm 主要代表二级、一级公路,35~45 cm 主要代表高速公路。

(5) 路龄

路龄是指公路建成通车年限,通常按年来预测路面性能,但由于不同公路的实际交通量及组成差别可能会很大,例如一条道路平均交通量为 10 000 pcu/d,另一条为 3 000 pcu/d,会导致随着路龄的增加,两条道路的路面性能差别越来越大;此外如果两条道路平均交通量均为 10 000 pcu/d,但车辆组成差别较大,一

条以小客车为主,另一条以大货车为主,同样会出现上述问题。因此,以时间为自变量预测路面性能存在一定的缺陷。

该文将时间转换为累计当量轴次,这样同时解决了不同道路交通量大小和交通量组成对路面性能衰减的影响,也与路面厚度设计时采用的未来年限累计当量轴载次数相呼应。为了对比分析,分别采用年和累计轴载次数作为自变量进行路面性能衰减预测。

4 路面性能衰变模型建立

综上所述,针对某省国省干线半刚性基层沥青路面性能衰减规律进行研究,根据 2011—2014 年不同路段的检测数据,其中高速公路路段共 44 个、一、二级公路路段 34 个,三、四级公路路段 27 个。对比不同面层厚度、不同基层厚度、不同模型形式、不同自变量时路面性能衰减曲线的变化,具体见表 2。

表 2 不同代表公路等级计算模式

公路等级	面层厚度/cm	基层厚度/cm	模型形式	自变量
高速	15~20	35~45	直线形、二	年累计轴次
一、二级	5~10	25~35	项式、S 形、	
三、四级	0~5	15~25	指数形	

4.1 高速公路

通过对 2011—2014 年部分高速公路路段检测数据的收集,分别以时间(年)和累计当量轴载次数为自变量,路面 *PCI* 为纵坐标进行回归分析,回归结果见表 3,性能衰减变化图见图 2。

表 3 不同模型形式及自变量的回归系数和相关系数

模型形式	自变量	回归系数			相关系数
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
直线形	时间	-2.338	100		0.68
	累计轴次	-2.452	100		0.78
二项式	时间	0.070	-2.838	100	0.70
	累计轴次	0.117	-3.320	100	0.84
S 形	时间	-0.533	3.476		0.59
	累计轴次	-0.515	3.215		0.68
指数形	时间	18.297	0.586		0.78
	累计轴次	40.434	0.346		0.86

对比表 3 和图 2,分析可知:

(1) 4 种模型中以指数形相关性最好,最高为

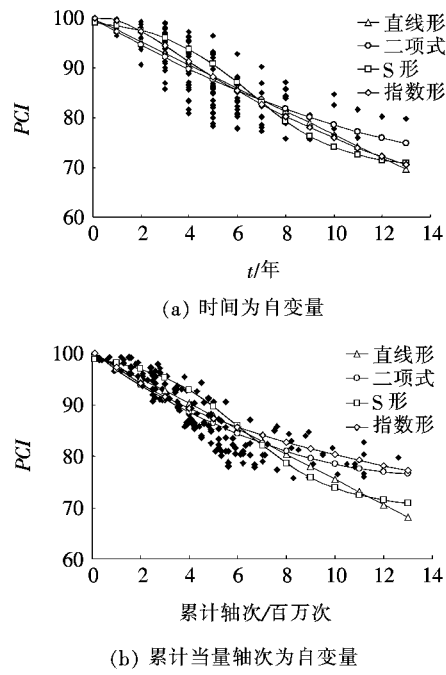


图 2 不同模型性能衰减图(高速公路)

0.86,S形相关性最差,最低为 0.59。究其原因这是由于 S 形模型后期性能衰减较慢,但高速公路的路面性能一般较高,养护资金也较为充足,当路面性能降低到一定水平后,就已经进行了相关的养护,使其路面性能提高到原来的水平。

(2) 4 种模型中采用累计当量轴次为自变量的相关系数均高于采用时间为自变量的相关系数,提高 0.08~0.14,平均提高 0.1。

(3) 无论采用何种模型,高速公路的相关系数均相对较高,分析原因:① 与高速公路施工过程中的规范性有一定的关系,包括原材料选择、施工过程控制等环节;② 与数据采集的准确性有关。

4.2 一、二级公路

通过对 2011—2014 年部分一级公路、二级公路路段检测数据的收集,分别以时间和累计当量轴载次数为自变量,路面 PCI 为纵坐标进行回归分析,结果见表 4,性能衰减变化见图 3。

对比表 4 和图 3,分析可知:

(1) 4 种模型中以 S 形相关性最好,最高为 0.83,直线形和二项式相关性最差,最低为 0.51。

(2) 4 种模型中采用累计当量轴次为自变量的相关系数均高于采用时间为自变量的相关系数,提高 0.21~0.31,平均提高 0.28。

(3) 一、二级公路的回归系数较高速公路低,其施工水平、养护水平较高速公路差,且其各条公路交通量

表 4 不同模型形式及自变量的回归系数和相关系数

模型形式	自变量	回归系数			相关系数
		a	b	c	
直线形	时间	-4.006	100		0.51
	累计轴次	-5.393	100		0.82
二项式	时间	0.017	-4.099	100	0.51
	累计轴次	0.028	-5.522	100	0.82
S 形	时间	-0.449	2.522		0.54
	累计轴次	-0.587	2.463		0.83
指数形	时间	12.710	0.516		0.53
	累计轴次	11.039	0.430		0.74

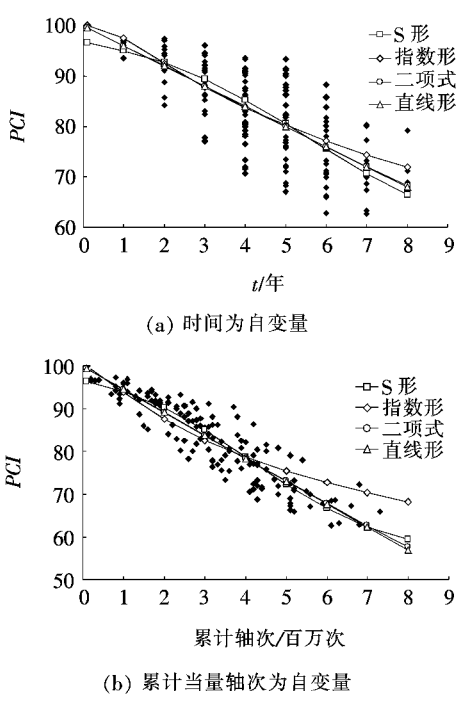


图 3 不同模型性能衰减图(一、二级公路)

差别很大,交通量较小的路段每天不足千辆,交通量较大的路段接近万辆,且重车较多,导致同样使用年限的路面,其病害发展速度相差很大,这也正是采用年为自变量回归的模型相关系数低,而采用累计当量轴次为自变量回归的模型相关系数高的原因。

4.3 三、四级公路

通过对 2011—2014 年部分三级、四级公路路段检测数据收集,分别以年和累计当量轴载次数为自变量,路面 PCI 为纵坐标进行回归分析,结果见表 5,性能衰减变化见图 4。

对比表 5 和图 4,分析可知:

(1) 4 种模型中以 S 形相关性最好,最高为 0.69,直线形相关性最差,最低为 0.34。

表 5 不同模型形式及自变量的回归系数和相关系数

模型形式	自变量	回归系数			相关系数
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
直线形	时间	-4.184	100		0.34
	累计轴次	-11.05	100		0.62
二项式	时间	0.326	-6.327	100	0.45
	累计轴次	1.351	-14.643	100	0.67
S形	时间	-0.242	1.844		0.44
	累计轴次	-0.699	1.957		0.69
指数形	时间	13.542	0.398		0.48
	累计轴次	5.494	0.360		0.62

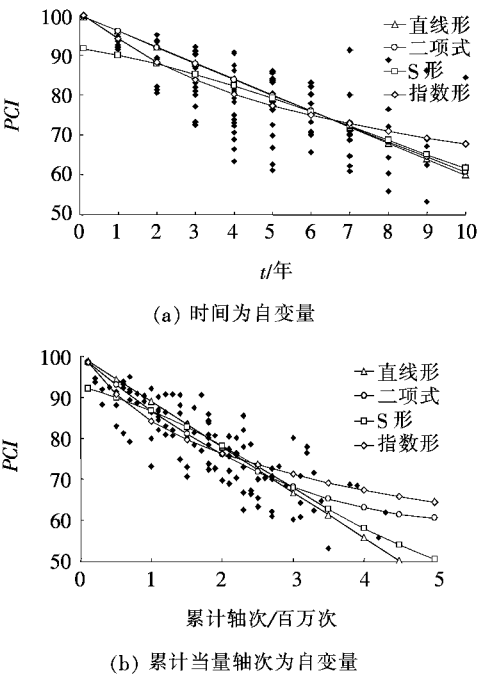


图 4 不同模型性能衰减图(三、四级公路)

(2) 4 种模型中采用累计当量轴次为自变量的相关系数均高于采用时间为自变量的相关系数,提高 0.14~0.28,平均提高 0.22。

(3) 无论采用何种模型,三级公路、四级公路的相关系数均较低,分析原因:① 低等级公路施工过程中相对不规范;② 路面检测数据采集准确性不高;③ 交通量及组成调查数据准确度欠佳。

5 性能预测

采用上述回归方法中相关系数最高的模型进行 2015 年路况性能指标的预测,并与 2015 年实际检测数据进行对比,将所有的路段结果值进行平均,见

表 6。

表 6 模型预测与实际值对比

公路等级	模型	自变量	PCI 值			百分比/%
			预测值	实际值	差值	
高速公路	指数形	时间	88.8	87.7	1.1	1.2
		累计轴次	87.6		0.1	0.1
一级、二级	S形	时间	82.3	82.8	0.5	0.6
		累计轴次	83.2		0.4	0.5
三级、四级	S形	时间	74.9	75.5	0.6	0.7
		累计轴次	75.4		0.1	0.1

由表 6 可知:不管是指数形,还是 S 形模型,采用累计当量轴次为自变量时,其 PCI 预测值与实际值都更为接近,具体到每个路段的实际差别见图 5。

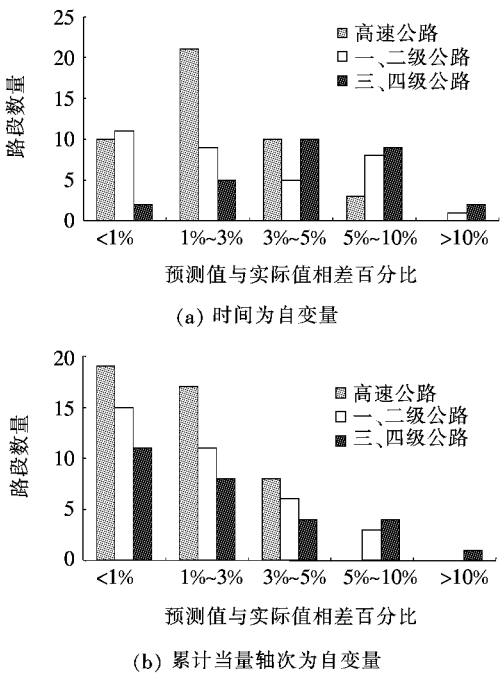


图 5 性能预测值与实际路况值差别百分比分布

由图 5 可知:以年为自变量时,高速公路的预测结果要好,其他等级公路较差,部分路段的预测值与实际值的差别甚至超过了 10%。当以累计当量轴次为自变量时,总体效果均较好,虽然存在预测值与实际值差别大于 5%的路段,但数量极少,且绝大多数路段预测值与实际值的差别均小于 3%。

6 结论

通过对某省国省干线 2011—2014 年沥青路面检

测数据的分析,通过建立不同的预测模型,并与实际检测结果进行了对比分析,得出如下结论:

(1) 累计当量轴次是路面性能衰减最为主要的影响因素,对于交通量差别较大的路面性能预测而言,采用累计当量轴次建立的路面衰减性能模型较采用时间建立的模型更为准确。分析表明:高速公路的相关系数能提高约0.1;一、二公路的相关系数能提高约0.28;三、四公路的相关系数能提高约0.22。

(2) 进行“十三五”路面养护规划过程中,针对高速公路路面性能预测,推荐采用累计当量轴次为自变量的指数形模型进行预测;对于其他等级公路的路面性能,推荐采用累计当量轴次为自变量的S形模型进行预测。能更加准确地预测未来路面发展状况,以便采取针对性的养护措施和进行准确的资金预算。

(3) 影响路面使用性能衰减的因素也包含了气候环境、施工水平等,如何将诸多因素综合考虑在性能衰减模型中,是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] AASHTO Guide For Design of Pavement Structures[S].
- [2] MS Sakhaeifar, BS Underwood, YR Kim, et al. Development of Artificial Neural Network Predictive Models for Populating Dynamic Moduli of Long-Term Pavement Performance Sections[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2181(1): 88-97.
- [3] M Karasahin, S Terzi. Performance Model for Asphalt Concrete Pavement Based on the Fuzzy Logic Approach[J]. Transport, 2014, 29(29): 18-27.
- [4] Yang J D, Gunaratne M, Lu J J, et al. Use of Recurrent Markov Chains for Modeling the Crack Performance of Flexible Pavement[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(11): 861-872.
- [5] Hofko B. Addressing the Permanent Deformation Behavior of Hot Mix Asphalt by Triaxial Cyclic Compression Testing with Cyclic Confining Pressure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, English Edition, 2015, 2(1): 17-29.
- [6] Gharaibeh, Saliminejad, Menendez, R J. Weissmann. Implementation of New Pavement Performance Prediction Models in PMIS[R], 2012.
- [7] Chris Raymond, Susan Tighe, Ralph Haas, Leo Rothenburg. Development of Canadian Asphalt Pavement Deterioration Models to Benchmark Performance[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2003, 30(4): 637-643.
- [8] 刘伯莹,姚祖康.沥青路面使用性能预测[J].中国公路学报, 1991(2).
- [9] 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, 1995(5).
- [10] 孙立军.沥青路面结构行为理论[M].北京:人民交通出版社, 2005.
- [11] 王春红,魏远.基于预防性养护的沥青混凝土路面使用性能预测模型研究[J].公路, 2003(3).
- [12] 张占军,王笑风.沥青路面使用性能的双参数修正预测模型[J].交通运输工程学报, 2007(5).
- [13] 王笑风.沥青路面最佳预防性养护时机决策模型[J].长安大学学报:自然科学版, 2011(3).
- [14] 王朝辉,王丽君,白军华,等.基于时段的沥青路面预防性养护时机与对策一体化优化研究[J].中国公路学报, 2010(5).
- [15] 武建民,刘大彬,李福聪,等.基于时间序列分析法的沥青路面使用性能预测[J].长安大学学报:自然科学版, 2015(3).
- [16] 张金喜,孔祥杰,韩丁丁,等.不同养护模式下的高速公路沥青路面状况指数预测模型[J].北京工业大学学报, 2016(1).
- [17] 范灵雨.高速公路沥青路面性能衰变模型参数的标定[D].同济大学硕士学位论文, 2013.
- [18] 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(7).
- [19] 王艳丽,王秉纲.应用人工神经网络预测路面使用性能[J].西安公路交通大学学报, 2001(1).
- [20] 傅东阳,胡昌斌.高速公路沥青路面使用性能马尔可夫概率预测[J].福州大学学报:自然科学版, 2005(4).
- [21] 武昭融,李秀君,李梦晨,等.基于衰变-Markov模型的沥青路面性能预测研究[J].上海理工大学学报, 2016(2).
- [22] 王国晓,安景峰,陈荣生.灰色理论在路面使用性能预测中的应用[J].公路交通科技, 2002(3).
- [23] 刘秀菊,郑彦军.基于灰色理论的沥青混凝土路面使用性能多指标预测方法研究[J].公路, 2002(4).
- [24] 景海民.基于灰色理论的路面使用性能预测及路网养护策略研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2009.
- [25] 杜二鹏,马松林,景海民.基于灰色系统理论的沥青路面使用性能预测[J].同济大学学报:自然科学版, 2010(8).
- [26] 万年菊,赖应良,陈源.基于灰色理论的农村公路路面使用性能预测研究[J].价值工程, 2017(6).