

基于灰色系统理论的沥青路面使用性能预测

杜二鹏^{1,2}, 马松林³, 景海民³

(1. 同济大学 道路与交通工程系, 上海 200092; 2. 天津市市政公路管理局, 天津 300050;
3. 哈尔滨工业大学 交通学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用灰色系统理论方法, 分别对路面强度指数、路面状况指数和路面平整度指标进行了建模和预测。利用实际路面检测数据进行模型的检验和修正, 并与传统的回归分析模型进行对比。结果表明, 对于公路路面这种比较离散的技术状况评价指标值, 采用灰色预测方法精度有较大的提高, 能够满足路面使用性能预测的要求。

关键词: 公路养护; 半刚性沥青路面; 路用性能; 预测模型; 灰色理论

中图分类号: TU 528.42

文献标识码: A

Asphalt Pavement Performance Prediction Model Based on Gray System Theory

DU Erpeng^{1,2}, MA Songlin³, JING Haimin³

(1. Department of Road and Traffic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tianjin Municipal Highway Administration Bureau, Tianjin 300050, China; 3. College of Transportation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Based on the method of the gray system theory, the prediction models of pavement structure strength index, pavement conditions index and the pavement roughness are obtained respectively. The prediction models are validated and modified through the actual road test data, and compared with the traditional model of regression analysis. The results show that for predicting such discrete target value of pavement surface condition, the gray prediction method can improve the accuracy, and meet the requirements of pavement performance prediction.

Key words: highway maintenance; semi-rigid asphalt pavement; pavement performance; prediction model; gray theory

的研究越来越受到重视。从美国公路与运输员工协会(AASHTO)试验开始, 研究者们就开始对路面性能衰变规律进行研究, 以此为基础, 许多国家和地区建立了各自的路面性能衰变方程。路面使用性能衰变规律的研究, 对优化路面材料和结构设计、延长路面使用寿命至关重要, 同样路面使用性能的预测, 对路面养护维修的科学决策和提高路面养护投资效益具有非常重要的意义。影响路面使用性能变化的因素很多, 包括交通量等级、不同荷载作用、自然环境影响以及施工质量等因素, 而且影响因素随时间、地点的不同而存在差异。目前的科技水平还难以完全定量地分析这些因素的影响, 在这种情况下, 如果采用传统的回归分析模型进行预测, 由于数据的突变性、无序性和不完整性, 以及积累数据较少的情况下, 最终预测精确度势必会受到影响。

随着科技的进步, 灰色系统理论等各种新兴理论也逐渐被运用到路面养护管理领域。邓聚龙教授 1982 年提出的灰色系统理论^[1], 该理论是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的方法, 主要通过对“部分”已知信息的生成、开发, 提取有价值的信息, 实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。该理论的基本思路是: 认为客观系统无论怎样复杂, 但终究是相互关联的、有序的、有整体功能的, 作为系统行为特征的数据总是隐含着某种规律性。本文利用灰色系统理论, 从杂乱无章的、有限的、离散的公路检测数据中找出规律, 建立灰色系统模型, 然后对一些关键的路用性能指标作出相应的预测分析。

1 路面使用性能指标选取

随着各国公路建设的发展, 路面长期使用性能

根据历年的检测数据, 按照《公路沥青路面养护

技术规范》,选取反映路面使用品质的几个关键指标作为沥青路面使用性能预测的指标进行分析,主要包括路面强度指数(SSI)、路面状况指数(PCI)和反映路面行驶质量的平整度(σ)。

1.1 沥青路面强度指数

沥青路面强度指数(SSI)反映了路面结构的承载能力,公式如下:

$$SSI = \text{路面设计弯沉值} / \text{路面代表弯沉值} \quad (1)$$

路面弯沉不仅反映路面各结构层及土基的整体强度和刚度,而且与路面的使用状态存在一定的内在联系.竣工时,路面弯沉反映了新路面的整体强度和刚度,公路运营后,路面弯沉也是强度的一个重要反映,是决定养护维修策略的一个重要指标.因此,了解路面弯沉的变化规律,对正确评价路面质量和科学确定养护维修策略有着极其重要的作用。

1.2 路面状况指数

路面各种类型破损直接影响车辆行驶的舒适性和安全性.路面状况指数反映路面完好程度,由破损率计算得出.该指数越大,路况越好,服务水平越高。

$$PCI = 100 - 15 \cdot DR^{0.412} \quad (2)$$

式中:DR为沥青路面综合破损率,表示沥青路面各类破损面积之和占实际调查总面积的比例。

1.3 路面行驶质量指数

路面行驶质量指数(RQI)与国际平整度指数(IRI)的关系为

$$RQI = 11.5 - 0.75 \cdot IRI \quad (3)$$

一般讲,国际平整度指数(IRI)与目前常用的多轮仪及颠簸累积仪测定路面平整度均方差指标(σ)呈线性关系,故选取 σ 作为反映路面行驶质量的指标.平整度是诱使行驶车辆出现振动的指标,对车辆损耗、行车舒适性、路面损坏都会产生直接影响。

2 基于灰色理论的预测模型建立

2.1 预测方法

灰色系统理论是在数据处理上提出“生成”的方法(累加或累减生成)^[2],通过生成使杂乱无章的数据列随机性弱化,从而转化为较有规律的数据列,便于建模并进行预测。

在任何一个灰色系统的发展过程中,随着时间的推移,将会不断地有一些随机扰动或驱动因素进入系统,使系统的发展相继受到影响,路面系统也不例外.因此需要随时将每一个新得到的数据置入 $X^{(0)}$ 中,建立新信息模型.另一方面,随着系统的发

展,老数据的信息意义将逐步降低,在不断补充新信息的同时,及时地去掉老数据,建立新陈代谢模型更能反映系统在目前的特征^[3]。

置入最新信息 $x_{(n+1)}^{(0)}$,去掉最老信息 $x_{(1)}^{(0)}$, $X^{(0)} = (x_{(2)}^{(0)}, \dots, x_{(n)}^{(0)}, x_{(n+1)}^{(0)})$ 即为GM(1,1)模型(即为灰色新陈代谢模型)。

基于灰色系统理论模型的预测称为灰色预测,灰色预测分为数列预测、灾变预测、季节预测、拓扑预测、系统预测五种.本文主要使用灰色数列预测。

GM(1,1)模型中的灰色作用量是从背景值挖掘出来的数据,它反映数据变化的关系,其确切内涵是灰的.灰色作用量是内涵外延化的具体体现,它的存在,是区别灰色建模与一般输入输出建模(黑箱建模)的分水岭,也是区别灰色系统观点与灰箱观点的重要标志^[4]。

2.2 模型形式及求解

灰色模型GM(1,1)模型形式:

$$\frac{dx_{(k)}^{(0)}}{dt} + ax_{(k)}^{(1)} = u \quad (4)$$

式中: a, u 为内生变量,分别是待辨识参数和内部变量,可由最小二乘法求得; $x_{(k)}^{(1)}$ 为原始数据 $x_{(k)}^{(0)}$ 经过累加生成处理得到的新数据列,累加过程如下:

已知数据列: $X_{(k)}^{(0)} = \{X_{(1)}^{(0)}, X_{(2)}^{(0)}, \dots, X_{(n)}^{(0)}\}$ 是随机过程,不平稳,令:

$$X_{(k)}^{(1)} = \sum_{m=1}^k X_{(m)}^{(0)} \quad (5)$$

一次累加,得到新数据列 $X_{(k)}^{(1)} = \{X_{(1)}^{(1)}, X_{(2)}^{(1)}, \dots, X_{(n)}^{(1)}\}$.进行 $n = N$ 次处理后,新数据列随机性将被弱化。

在实际计算时,一般采用5~8个数据进行预测,数据太多则会带来大的拟合误差,反而降低精度.GM(1,1)模型除旧纳新,始终将预测信息建立在最新的几个数据上,充分体现了这种思想。

3 路面使用性能预测及分析

下面以同一种典型路面结构的多条公路为例进行预测分析^[5].该类路面结构具有较厚的面层和模量较高的基层,面层厚度为10 cm(4 cm细粒式表面层+6 cm粗粒式下面层或3 cm细粒式表面层+7 cm粗粒式下面层),基层为18~20 cm水泥(石灰粉煤灰)稳定碎石,底基层采用30 cm石灰稳定土.分别对路面强度系数、路面状况指数和路面平整度进行了预测分析。

3.1 使用性能预测

3.1.1 原始数据

路面强度指数与累计标准轴次实际数据见表 1.

表 1 路面强度指数与累计标准轴次实际数据

Tab.1 Actual test data of pavement strength index and equivalent standard axle loads

年份	1998	2001	2002	2002	2002	2002
强度指数	0.84	0.50	0.68	0.53	0.37	0.31
累计标准轴次/ 10^7 次	0.47	2.08	1.07	1.12	2.59	2.61
年份	2003	2003	2003	2004	2004	2004
强度指数	0.55	0.67	0.30	0.38	0.52	0.23
累计标准轴次/ 10^7 次	1.73	2.20	3.21	2.36	3.40	3.85

注:表中的年份是不同公路路段在所列的年份测量路面弯沉,根据路面已使用的时间(年)计算累计标准轴载作用次数,再根据该路面设计弯沉计算路面强度指数.

由表 1 看出,数据点中有两个点(2.20,0.67)、(3.40,0.52)偏离其他数据点较远,这两个数据点来源于津福公路 K148-K177 路段 2003 年和 2004 年的检测值,该路段 2000 年时进行了养护维修,维修措施为基层进行了局部挖补,面层重新铺筑 10 cm 沥青混凝土,该路段 2002 年检测点数据为(1.07,0.68).分析其路面结构能够保持相对较高的路面强度,可能存在以下两方面的原因:①路段补强后虽然初期强度不高,但是由于基层在局部补强前已经使用 6 年时间,基层因各种复杂因素产生的局部强度不足的问题重新暴露,进行局部补强,使基层强度提高,而后期的强度变化比较平稳;②也可能是累计当

量轴次推算存在误差,该路段并没有轴载称重检测设备,交通量调查时采用了人工观测的方法,而后按交通组成推算当年的轴次,按交通增长率推算其他年份的轴次.这两点并不能代表该路面结构的普遍规律,在预测中予以舍弃.

3.1.2 灰色预测结果

首先进行了路面强度指数 SSI 和累计标准轴次的灰色预测^[6],预测结果见表 2.

表 2 灰色预测路面强度指数与累计标准轴次结果汇总

Tab.2 Predicted data of pavement strength index and equivalent standard axle loads by gray theory

序号	强度系数			累计标准轴次/ 10^7 次		
	实际值	预测值	相对误差/%	实际值	预测值	相对误差/%
1	0.84	0.84	0	0.47	0.47	0
2	0.68	0.66	-2.5	1.07	1.22	14.5
3	0.53	0.59	11.1	1.12	1.41	25.6
4	0.55	0.52	-5.6	1.73	1.62	-5.9
5	0.50	0.46	-8.5	2.08	1.87	-10.2
6	0.38	0.41	6.6	2.36	2.16	-8.7
7	0.37	0.36	-3.2	2.59	2.49	-4.1
8	0.31	0.32	2.6	2.61	2.86	9.9
9	0.30	0.28	-4.2	3.21	3.30	2.8
10	0.23	0.25	9.1	3.85	3.80	-1.1

由表 2 可以看出,路面强度指数和累计标准轴次的灰色预测结果精度很高.根据实际值和预测结果建立路面强度指数 SSI 与累计标准轴次的关系曲线如图 1 所示,路面状况指数 PCI 的关系曲线如图 2 所示,路面平整度 σ 的关系曲线如图 3 所示.

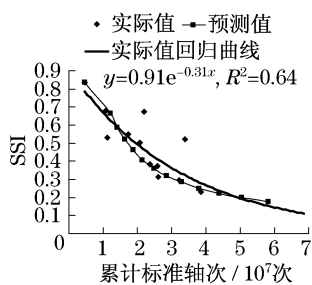


图 1 路面强度指数随累计标准轴载作用次数的变化规律

Fig.1 Variation of pavement strength index with equivalent standard axle loads

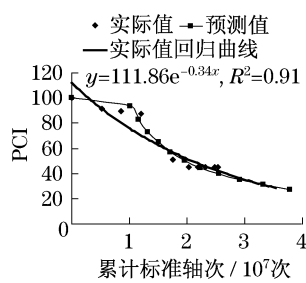


图 2 路面状况指数随标准轴载作用次数的变化规律

Fig.2 Variation of pavement conditions index with equivalent standard axle loads

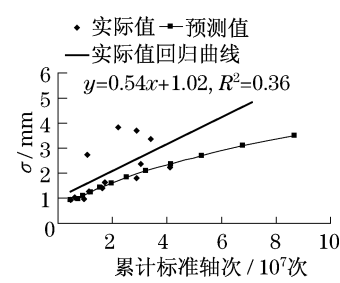


图 3 路面平整度随标准轴载作用次数的变化规律

Fig.3 Variation of pavement roughness with equivalent standard axle loads

图 3 中偏离直线较大的四个点是 G104 津福公路 K119-K130 路段在 2002 年~2004 年间的平整度测量值,该路段在 1995 年投入运营,路段平整度测量时间是路面在投入使用后的 8~10 年,其他数据来源路

段是杨北公路和津淄公路等,大多是投入使用后 4~6 年测得的平整度.比较来看,该路段投入运营时间较长,使用期内经过维修,实际路况较复杂,到 2004 年该路段属于使用末期,路面破损较严重,平整度状况也

比其他路段差,处中等水平,不能代表该典型结构平整度变化规律,在灰色预测时剔除.

3.2 灰色预测模型与传统预测模型的对比分析

这里仅以路面强度指数为例进行预测精度对比分析.表 3~表 5 分别为路面强度指数 SSI、路面状况指数 PCI 和反映路面行驶质量的平整度 σ 的传统预测模型与灰色预测模型精度对照表,通过表中数据可知,灰色预测模型在拟合精度上有了很大提高.

表 3 传统预测模型与灰色预测模型结果对比 (SSI)

Tab.3 Comparison of traditional model and gray prediction model (SSI)

实际值		传统模型		灰色模型	
累积轴载/ 10^7 标准轴次	SSI	结果	相对误差/%	结果	相对误差/%
0.47	0.84	0.79	- 6.0	1.10	31.5
1.07	0.68	0.66	- 3.7	0.63	- 8.0
1.12	0.53	0.64	21.9	0.60	14.4
1.73	0.55	0.54	- 2.9	0.45	- 18.5
2.08	0.50	0.48	- 4.7	0.39	- 21.7
2.36	0.38	0.44	15.1	0.36	- 5.5
2.59	0.37	0.41	10.0	0.34	- 9.2
2.61	0.31	0.41	31.0	0.34	8.3
3.21	0.30	0.34	14.8	0.29	- 1.1
3.85	0.23	0.28	21.5	0.26	12.2

表 4 传统预测模型与灰色预测模型结果对比 (PCI)

Tab.4 Comparison of traditional model and gray prediction model (PCI)

实际值		传统模型		灰色模型	
累积轴载/ 10^7 标准轴次	PCI	结果	相对误差/%	结果	相对误差/%
0	100.00	111.86	11.9	113.50	13.5
0.52	91.60	91.47	- 0.1	93.10	1.6
0.85	89.20	80.59	- 9.7	82.18	- 7.9
1.20	87.30	70.45	- 19.3	71.99	- 17.5
1.75	50.74	56.97	12.3	58.41	15.1
2.03	45.00	51.03	13.4	52.41	16.5
2.20	45.00	47.92	6.5	49.26	9.5
2.32	45.00	45.66	1.5	46.97	4.4
2.48	45.00	42.89	- 4.7	44.16	- 1.9
2.53	45.00	42.10	- 6.4	43.36	- 3.6

传统回归模型只追求离散点到回归曲线对应点的总方差最小,对于离散程度很高的路面数据,拟合出的曲线相关系数自然会很小,相关性很差.通过灰色模型进行预测,充分利用数据中的灰色信息,使原始数据的离散程度降低,更能体现其中隐含的规律性.由图 1 可以看出,灰色预测模型在 SSI 达到 0.3 以后减小的速度变缓,这跟路面实际强度的发展趋势接近,而传统回归模型就没能显示出该特点.

表 5 传统预测模型与灰色预测模型结果对比 (σ)
Tab.5 Comparison of traditional model and gray prediction model (σ)

实际值		传统模型		灰色模型	
累积轴载/ 10^7 标准轴次	σ/mm	结果	相对误差/%	结果	相对误差/%
0.45	0.95	1.27	33.3	0.81	-14.3
0.63	1.04	1.36	30.3	0.96	-8.5
0.94	0.96	1.53	58.5	1.16	20.3
1.12	1.26	1.63	28.9	1.26	0.2
1.64	1.41	1.90	34.7	1.52	7.4
1.73	1.63	1.95	19.7	1.56	-4.5
2.90	1.79	2.58	43.8	2.00	11.4
3.03	2.37	2.65	11.9	2.04	-13.8
4.11	2.22	3.23	45.4	2.36	6.5

4 结论

目前数路面使用性能预测模型大多采用统计回归模型,存在误差较大和模型形式不一的问题.因此,采用灰色理论建立了路面使用性能预测模型,并通过实际数据经过预测及对比分析,证明灰色预测方法通过提炼隐含在离散的原始检测数据中的规律性,能够有效降低因路面原始检测数据的离散而造成预测值与实测值的差异,预测精度优于传统的回归分析预测方法,适用于路面使用性能预测.

参考文献:

[1] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 第 2 版. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
DENG Julong. Gray control system [M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1997.

[2] 冯利华. 灰色预测模型的问题讨论[J]. 系统工程理论与实践, 1997(12): 125.
FENG Lihua. Discussion of gray prediction model problem[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 1997(12): 125.

[3] 陈世联. 灰色系统的几个理论问题[J]. 系统工程, 1997, 15(1): 20.
CHEN Shilian. Some theoretic problems of gray system [J]. Systems Engineering, 1997, 15(1): 20.

[4] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1999.
LIU Sifeng, GUO Tianbang, DANG Yaoguo. Gray system theory and its application[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1999.

[5] 杭飞. 半刚性沥青路面交通荷载适应能力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通学院, 2007.
HANG Fei. Analysis on the traffic load adaptability of semi-rigid base asphalt pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. College of Transportation, 2007.

[6] Chen C K, Tien T L. The indirect measurement of tensile strength by the deterministic grey dynamic model DGD(1,1,1) [J]. International Journal of Systems Science, 1997, 28(7): 683.