

渝湛高速公路路面使用性能预测及 预防性养护时机研究

林利聪

(广东能达高等级公路维护有限公司, 广东 广州 510030)

摘要: 以渝湛(重庆—湛江)高速公路近 5 年路面性能指标监测数据为基础,采用灰色预测法、灰色马尔可夫预测法进行路面性能指标预测,依据预测结果建立 PCI 指标衰变方程,基于综合效益、等额年度费用、效益指数、服务寿命变化 4 个指标分析其最佳预防性养护时机。结果表明,灰色马尔可夫预测法的预测结果比灰色预测法更接近实测结果;该高速公路在第 4 年进行微表处处治可获得最佳收益;预测模型及可靠的实测数据决定路面性能指标的发展趋势,也决定预防性养护时机的确定。

关键词: 工程管理;高速公路;路面使用性能;预防性养护;灰色预测法;灰色马尔可夫预测法

中图分类号:U415.12

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)04-0160-04

对路面性能进行预测有助于了解路面性能发展状况,目前常用的预测方法有回归分析法、时间序列法、灰色预测法、马尔可夫法等。李金龙在分析沥青路面使用性能的基础上,将马尔可夫模型与神经网络模型相结合对沥青路面性能进行预测,获得了具有一定函数规律的指标随时间的发展关系式;李勇基于衰变递减理论构建路面破损状况、平整度、车辙深度等路面性能马尔可夫链预测模型,结合某地区道路交通量、养护历史等信息,采用全寿命周期效益—费用比确定了沥青路面最佳养护时机。不同地区的路面性能有差异,需结合实际指标数据分析路面性能指标的发展,不能说采用哪种分析方法更好。从分析方法的多样性方面讲,采用多种分析方法进行预测对比分析,可获得更准确的预测结果。该文采用灰色预测法及灰色马尔可夫法建立预测模型,分析高速公路路面关键指标的衰减规律,进行两种预测方法的准确性比较,并对后期关键指标值进行预测,以同济大学孙立军教授提出的衰变方程为基础获得 PCI 指标衰减函数式,求得最佳养护时机。

1 预测模型

灰色理论分析法可解决分析数据少、数据存在明显上下波动趋势的问题,非常适宜于路面使用性能预测。考虑到路面调查数据存在部分缺失的现状,选择灰色理论 GM(1,1)模型进行高速公路沥青路面使用性能预测。

灰色马尔可夫模型建立在灰色模型基础上,采用灰色模型预测结果进一步分析路面使用性能的发展趋势,结合路面状态的转移概率矩阵和不同时刻的转移概率对灰色理论模型预测值进行修正,得到更贴近实测值的预测结果。采用马尔可夫模型分析沥青路面使用性能时作如下假设:1) 将路面使用性能划分为几种状态;2) 忽略路面过去状态对后续发展的影响;3) 转移概率矩阵固定不变。

假定 $X^{(0)}(k)$ ($k=1, 2, \dots, \rho$) 为原始序列, $\hat{X}(k)$ 为 GM(1,1) 建模获得的 k 时刻下预测值, $X^{(0)}(k)$ 符合马尔可夫链特点,将其划分为 n 为种状态,用 \otimes_i 表示,则有:

$$\otimes_i = [\tilde{\otimes}_{1i}, \tilde{\otimes}_{2i}], \tilde{\otimes}_i \in \otimes_i, \tilde{\otimes}_{1i} = \hat{x}(k) + A_i, \\ \tilde{\otimes}_{2i} = \hat{x}(k) + B_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$\tilde{\otimes}_{1i}$ 、 $\tilde{\otimes}_{2i}$ 随时间 k 的变化而变化。假定 $M_{ij}(m)$ 为状态 \otimes_i 转移到状态 \otimes_j 的原始数据样本数,其中 m 为转移步数, M_i 为状态 \otimes_i 下的原始数据样本数,则状态转移概率的计算公式为:

$$P_{ij}(m) = \frac{M_{ij}(m)}{M_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

灰色马尔可夫模型的预测步骤如下:1) 初始化预测数据,并去掉量纲,获得原始序列;2) 采用灰色预测模型将原始序列转为预测值;3) 划分马尔可夫状态;4) 计算转移概率矩阵,确定系统未来转移状态;5) 比较预测值与实测值,进行结果评价。

灰色马尔可夫模型具有灰色模型和马尔可夫模型的优点。对于沥青路面使用性能预测,其运用过程为:1) 收集目标道路或目标区域内路面性能指标检测数据,并获得灰色模型预测结果;2) 进行路面状态划分,结合数据获得转移概率矩阵及未来转移概率;3) 利用步骤 2 的计算结果对步骤 1 中数据进行修正。

2 路面使用性能预测

渝湛(重庆—湛江)高速公路全长 1 384 km,为

西南地区的出海大通道。自建成通车以来,随着重载交通及超载现象的增加,部分路段陆续出现裂缝、车辙等病害,影响行车安全性和舒适性。表 1 为 2015—2019 年其路面性能指标变化情况,所有指标值均随着时间的增长逐渐减小,路面使用性能下降。为恢复病害严重路面的使用性能,提高路面的服务水平,需采用微表处进行维护。

2.1 建立灰色预测模型

以路面状况指数 PCI 为例。根据表 1, $X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3)] = [99.33, 94.21, 88.37]$,

表 1 渝湛高速公路路面性能指标数据

年份	行驶质量指数 RQI	路面状况指数 PCI	路面结构强度 指数 $PSSI$	抗滑性能指数 SRI	车辙深度指数 RDI	路面综合评价 指标 PQI
2015	95.22	99.33	98.28	99.79	97.22	97.23
2016	92.31	94.21	94.23	96.37	91.78	93.18
2017	90.11	88.37	90.11	92.18	85.38	89.55
2018	86.37	83.27	86.29	89.39	79.37	85.19
2019	75.73	78.26	82.19	85.76	73.27	81.21

将 $X^{(0)}$ 一次累计,得: $X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3)] = [99.33, 193.54, 281.91]$ 。最终得:

$$\frac{d(x)^{(1)}}{dt} - 0.0723x^{(1)} = 107.66 \quad (2)$$

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak} + \frac{b}{a} = -1217.55e^{-0.0776(k-1)} + 1277.69 \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得:

$$\hat{X}^{(1)} = [\hat{x}^{(1)}(1), \hat{x}^{(1)}(2), \hat{x}^{(1)}(3), \hat{x}^{(1)}(4), \hat{x}^{(1)}(5)] = [99.33, 193.31, 281.67, 361.85, 436.96]$$

$$\hat{X}^{(0)} = [\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \hat{x}^{(0)}(3), \hat{x}^{(0)}(4), \hat{x}^{(0)}(5)] = [99.33, 93.98, 88.36, 80.18, 75.11]$$

式中: $\hat{X}^{(1)}$ 为模拟值; $\hat{X}^{(0)}$ 为 $X^{(0)}$ 模拟值。

经检验,其序列光滑性满足要求,序列具有指数规律,可用来建立 GM(1,1)模型。从灰色预测模型的误差检验结果(见表 2)来看,其精度满足要求。

表 2 PCI 灰色预测模型误差检验结果

年份	实测数据	灰色预测模拟数据	误差/%
2015	99.33	99.33	0.000
2016	94.21	94.14	0.073
2017	88.37	88.32	0.056
2018	83.27	80.52	3.297
2019	78.26	75.11	4.026

2.2 建立灰色马尔可夫预测模型

(1) 划分路面使用性能状态。结合 GM(1,1)

模型预测值及路面情况,将路面使用性能划分为优、良、差 3 种状态(见表 3)。

表 3 PCI 路面使用性能状态划分标准

状态	误差范围
优	$[-4.5, -1.5]$
良	$[-1.5, 1.5]$
差	$[1.5, 4.5]$

(2) 构建转移概率矩阵。由表 3 构建状态间的转移概率矩阵如下:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 比较预测结果。按表 3 状态划分,2017 年 PCI 指标属于 E2 状态,求得 $P^{(0)} = [0, 0, 1]$,则 2018 年概率分布为 $P^{(1)} = P^{(0)} \times P = [0, 0, 0.5]$ 。按照灰色马尔可夫模型理论,取 3 种状态的中值构建评价矩阵 $B^T = [-0.03, 0, 0.03]$,则 2018 年的 PCI 值为 $\hat{X}(4) = \hat{X}^{(0)}(4) + \hat{X}^{(0)}(4) \times P^{(1)} \times B^T = 79.38$ 。同理可得 2019 年 PCI 值为 $X^{(5)} = 77.29$ 。2018、2019 年 PCI 实测值、灰色预测值、灰色马尔可夫预测值对比见表 4。

由表 4 可知:同一年份时,与灰色预测值相比,灰色马尔可夫预测值与实测值更接近,误差更小。主要原因是灰色马尔可夫模型中增加了状态转移概

表4 PCI值对比

年份	实测值	灰色预测结果		灰色马尔可夫预测结果	
		预测值	误差/%	预测值	误差/%
2018	80.27	77.62	3.297	79.38	1.10
2019	78.26	75.11	4.026	77.29	1.23

率矩阵,该矩阵可解决数据的随机性和偶然性问题。图1~4为2015—2019年路面使用性能指标的实测值、灰色预测值、灰色马尔可夫预测值对比。

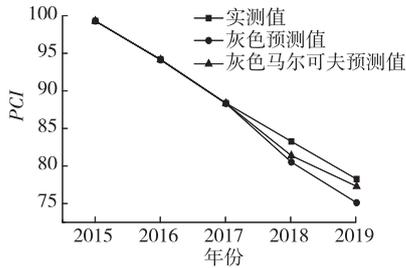


图1 2015—2019年PCI实测值与预测值对比

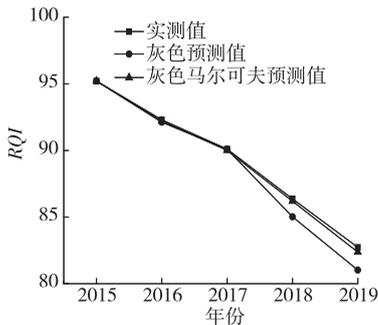


图2 2015—2019年RQI实测值与预测值对比

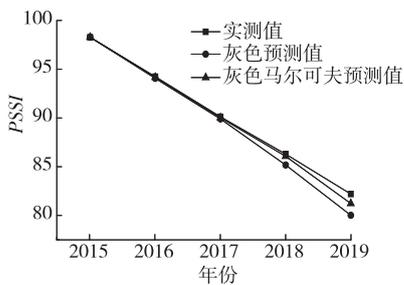


图3 2015—2019年PSSI实测值与预测值对比

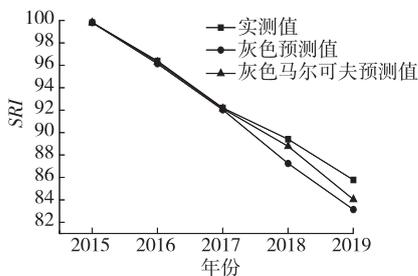


图4 2015—2019年SRI实测值与预测值对比

采用灰色马尔可夫预测模型对未来2年该高速公路路面使用性能进行预测,结果见表5。

表5 未来2年路面使用性能灰色马尔可夫预测值

年份	RQI	PCI	PSSI	SRI	RDI	PQI
2020	71.33	70.27	76.78	80.12	68.32	76.35
2021	67.39	64.62	72.17	75.33	63.79	71.27

3 预防性养护时机确定

3.1 确定养护时段

根据表1, PSSI在2019年已接近80。根据《公路技术状况评定标准》, PSSI > 80时,应对沥青路面进行预防性养护。因此,2019年应对该高速公路采取预防性养护措施。表1中其他指标在5年内下降较明显,故5年内整个道路需进行预防性养护,初步确定养护时机为3、4、5年。

3.2 决策指标

为分析简便,仅对PCI指标进行分析。以同济大学孙立军教授提出的衰变方程[见式(2)]为基础,对PCI指标进行最小二乘法系数回归,得到适合该高速公路PCI指标的养护方程:

$$PCI = 100 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{y} \right)^\beta \right] \right\} \quad (5)$$

式中, α 、 β 为回归系数; y 为使用年数。

结合该高速公路多年养护现状及PCI实测数据,假定经过3、4、5年后进行微表处处治,结合最小二乘法回归得到微表处预养护后的PCI衰减方程,其中回归系数见表6。

表6 不同养护时间下PCI衰减方程的回归系数

实施时间/年	α	β
0	10.533	0.876
3	12.127	0.967
4	11.672	0.952
5	9.123	0.866

考虑路面正常使用的养护服务费用,参考《公路建设项目经济评价方法与参数》确定采用微表处处治措施的养护费用净现值,得微表处实施路龄为3、4、5年时的养护费用净现值分别为15.7、11.8和9.1万元/(km·双车道)。

结合该高速公路实际使用要求,取PCI值为80,选取综合效益、等额年度费用、效益指数、服务寿命变化量4个决策指标进行计算,结果见表7。

表7 决策指标计算值

实施时间/年	综合效益	效益指数/%	等额年度费用/万元	服务寿命变化量
3	0.423	71.25	3.211	5.17
4	0.461	100.00	2.573	5.88
5	0.392	90.12	2.313	4.82

由表7可知:若第3年实施微表处,等额年度费用最高,效益指数最低,服务寿命变化量和综合效益排第2位;若第4年实施微表处,综合效益、效益指数、服务寿命变化量最大,等额年度费用仅比第5年少0.26万元,比第3年少0.688万元;若第5年实施微表处,综合效益和服务寿命变化量最低,效益指数排第2位,但等额年度费用最低。综合分析,第4年实施微表处时,4项指标中有3项指标最佳,仅年度等额费用次于第5年,故确定第4年实施微表处为最佳方案。

需说明的是,表6是确定表7的关键,决定路面性能效益指标的可靠性,只有准确获得路面性能指标的衰减规律才能得到准确的养护时机。采用灰色马尔可夫预测法可加强路面性能指标曲线的准确度,实现路面或桥梁养护时机的准确分析。

(上接第156页)

- [2] 张宇,黄必斌.大跨度岩洞跨度界定与跨度效应探讨[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):39-47.
- [3] 吕刚,刘建友,赵勇,等.超大跨度隧道围岩作用效应与支护结构设计方法研究[J].中国铁道科学,2019,40(5):73-79.

(上接第159页)

值比上限费用为25000元时第1年PCI值高6.5左右,且上限养护费用越低,规划期内PCI值下降越明显。3种养护费用下5年规划期内PCI最小值分别为92、86、81,均满足水平约束2的要求。

3 结论

(1) 可采用蚁群算法在确定路面养护费用上限值后对路面规划期内养护费用进行最大效益化分配;若养护费用不明确,可采用蚁群算法基于PCI值等指标提供多个养护水平进行养护费用分配。

(2) 湛徐高速公路的养护费用较充足及一般的情况下,规划期内第1年养护费用分配值均最大,超过总费用的90%,后期各年养护费用相当;规划期

4 结论

(1) 灰色马尔可夫预测法的路面使用性能预测结果比灰色预测法更接近实测结果。

(2) 渝湛高速公路在第4年采用微表处进行处治可获得最佳收益。

(3) 预测模型及可靠的实测数据决定路面性能指标的发展趋势,也决定预防性养护时机的确定。

参考文献:

- [1] 张文杰,袁红平.基于灰色马尔可夫模型的节能设备故障预测研究[J].系统科学与数学,2019,39(1):65-75.
- [2] 李金龙.重庆高速公路沥青路面使用性能评价预测及养护决策优化研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [3] 李勇.基于马尔可夫链的沥青路面大修时机预测[J].公路与汽运,2019(3):163-166.
- [4] 蔡素丽.灰色系统理论GM(1,1)预测模型应用实证分析[J].廊坊师范学院学报(自然科学版),2015,15(6):5-8+12.

收稿日期:2020-02-24

- [4] 肖丛苗,张顶立,朱焕春,等.大跨度地下工程支护结构研究[J].岩土力学,2015,36(增刊2):513-518+524.
- [5] 刘建友,赵勇,李鹏飞.隧道围岩变形的尺寸效应研究[J].岩土力学,2013,34(8):2165-2173.

收稿日期:2020-01-05

总的养护费用水平越高,各年度PCI均值越高;上限养护费用越低,规划期内PCI值下降越明显。

参考文献:

- [1] 杨永红,晋敏,白钰,等.公路养护资金分配方法优化研究[J].中外公路,2015,35(4):336-340.
- [2] 何平,朱荣军,石子石.高速公路养护资金的优化分配[J].江苏交通,2002(11):30-31.
- [3] 吴道新.基于 α -鲁棒的普通公路养护资金分配模型研究[J].科学决策,2016(8):84-94.
- [4] 向红艳,徐莲怡.基于分数阶拓展算子GM(1,1)模型的高速公路养护成本预测[J].中外公路,2020,40(1):278-282.

收稿日期:2020-04-27