

基于衰变-Markov模型的沥青路面性能预测研究

武昭融, 李秀君, 李梦晨, 许光孝

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为解决在路面使用性能各项指标的预测过程中,预测值与实测值间误差波动较大这一问题,采取同济大学孙立军教授提出的标准衰变方程作为预测模型的基础,充分调查浙江省S101省道嘉兴段现有路况,根据收集的公路路面结构、厚度和交通量轴载数据等资料,对其沥青路面性能变化进行预测,即对路面损坏状况指数PCI和行驶质量指数RQI这两个在路面使用性能指数PQI中占较大权重的指标进行预测,继而采用Markov模型对其预测结果进行修正,建立与养护策略相对应的Markov转移矩阵而得到衰变-Markov预测模型,为之后能准确掌握沥青路面使用性能变化趋势并得到合理的养护决策提供可靠依据。

关键词: 路用性能; 预测模型; 标准衰变方程; Markov转移矩阵

中图分类号: U 416.217 **文献标志码:** A

Pavement Performance Prediction of Highway Based on the Decay-Markov Prediction Model

WU Zhaorong, LI Xiujun, LI Mengchen, XU Guangxiao

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the forecasting process of pavement performance indicators, there is usually the error fluctuation between the predicted value and measured value because of using different maintenance methods. In order to solve this problem, the prediction model based on the standard decay equation suggested by Professor Sun Lijun of Tongji University was taken as the basis of prediction model for forecasting the performance variation of a certain number of sections on the Jiaying part of S101 provincial road. According to the data about the pavement structure, its thickness and the volume of traffic, the weight values of pavement surface condition index (PCI) and riding quality index (RQI) which are the most dominant among the commonly used pavement quality indices (PQI) were predicted. The predicted data of decay equation were further revised by adopting the Markov transfer matrix method, which provides a reliable basis for the next maintenance decision.

Keywords: pavement performance; prediction model; standard decay equation; Markov transfer matrix

收稿日期: 2014-12-24

第一作者: 武昭融(1990-),女,硕士研究生.研究方向:道路材料设计、路面预防性养护研究. E-mail: wuzhaorong110@126.com

通信作者: 李秀君(1976-),女,副教授.研究方向:沥青路面材料、机械化养护技术. E-mail: junzixiu@163.com

公路在投入运营后,路面状况会受到交通荷载、地理环境及人为因素的综合影响,其服务能力随着使用年限的上升而不断下降,当低于某一指标时就需要采取改建、重建等措施恢复和提高道路的服务水平.提前掌握路面状况的下降趋势,有利于为养护措施的选取提供建议,因而路面使用性能的预测模型也成为路面管理系统中的主要组成部分.路面在使用的过程中所受到的影响因素类型是不确定的,而这些影响因素本身的变化情况也具有很大的偶然性,所以采用确定性模型模拟路面性能变化有时会出现很大偏差.因此,不确定性的概率型模型便被引入到道路工程的预测中,目前较为完善的是 Markov 概率预测模型,也是现阶段国内外应用较广泛的模型.然而,Markov 预测模型虽考虑了路况预测的不确定性,能在缺少数据的情况下根据工程经验建模来提高预测精度,但是对状态转移概率矩阵进行预测不如对路况指标进行预测直观.为解决这一问题,本文将衰变方程^[1]与 Markov 预测模型^[2]相结合,综合两者的优点,通过修正衰变值来提高预测精度^[3].

本文选取 S101 省道嘉兴段高等级公路为例,对研究路段的材料类型、路面结构和交通轴载等数据进行了收集,构建路面使用性能衰变模型,衰变方程可以基本模拟出路况状况的下降程度.但由于各地养护方法和策略的不同,预测结果与实际情况误差波动较大,尤其在多次养护后,衰变方程无法给出准确预测值.因此,在分析了计算结果与历史检测数据间的误差后,再采用 Markov 状态转移矩阵^[4]对衰变方程的计算精度进行修正,建立与养护策略相对应的 Markov 转移矩阵,以此来减少误差,并由此建立衰变-Markov 预测模型,以期达到更高的预测精度.

1 衰变-Markov 预测模型建立

Markov 过程模型表示的是路面使用性能所处状态的概率分布,Markov 概率模型的主要工作是建立空间状态的转移概率矩阵.它用来描述路网内同一组别路段(按技术等级、路面材料、交通量级别以及地理环境等因素的不同分组)^[5]的路用性能指标在未来某一时间不同状态间转变的概率.该模型在预测过程中,体现了路用性能的不确定性,并在缺少数据量的情况下也能达到较好的预测精度.

1.1 标准衰变方程

在考虑地区的适应性基础上,同济大学孙立军教授提出的标准衰变方程可作为预测模型的基础^[6].其特点是形式简单、适应性强,回归参数具有

明确的数学、物理意义,只需改变模型参数值,即可根据标准荷载情况、使用年限、面层结构类型等因素的不同,确定路面使用性能的衰变曲线,适用于本文省道公路路面使用性能的预测研究.

本文以标准衰变方程为基础^[3],对浙江省 S101 省道嘉兴段公路使用性能变化进行预测,衰变方程形式为

$$PPI = PPI_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{y} \right)^\beta \right] \right\} \quad (1)$$

式中: PPI 为使用性能指数(路面状况指数 PCI , 行驶舒适性指数 RQI , 或路面综合质量指数 PQI); PPI_0 为初始使用性能指数; y 为新建或改建路面的路龄; α, β 为模型参数.

由式(1)可见,模型表达形式不复杂且利于回归处理,只需代入路龄值即可获得最终的计算结果. PPI_0 根据竣工时的检测指标确定,通常采用 100. α, β 是两个回归参数,当 α, β 取不同值时,可模拟路面的各类衰变模式,如图 1 所示^[7].

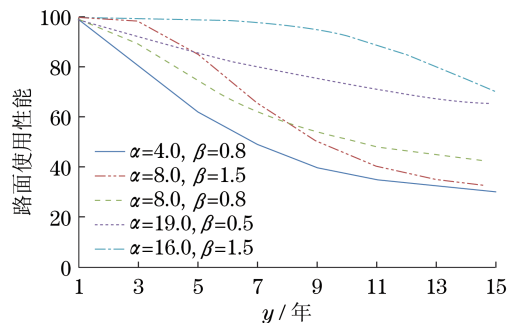


图 1 α, β 不同组合时的使用性能衰变曲线

Fig.1 Decay curve of pavement performance with different combinations of α, β

由此可见,参数 α, β 与路面使用性能衰变曲线有着——对应关系,一切对路面性能可能产生影响的因素均会导致 α, β 取值的不同,记为

$$\begin{aligned} \alpha &= f_1(\text{交通轴载、结构强度、面层厚度、} \\ &\quad \text{基层类型、基层厚度、环境状态、材料类型}) \\ \beta &= f_2(\text{交通轴载、结构强度、面层厚度、} \\ &\quad \text{基层类型、基层厚度、环境状态、材料类型}) \end{aligned}$$

Markov 概率模型的重点是建立状态转移概率矩阵^[8],状态划分是否合理是建模成功的关键,通常要根据初步预测结果的误差范围来确定修正时的状态区间.

若 $M_{ij}(m)$ 为由状态 E_i 经过 m 步,转移到状态 E_j 的原始数据样本本数, M_i 为处于状态 E_i 的原始数据样本,则可得到转移概率

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

根据式(2)得到一步转移概率矩阵 $\mathbf{P}$, 再结合相应的状态转移矩阵便可以计算出未来某一年的所属状态。

取各状态幅度范围的中值组成评价权值矩阵 $\mathbf{T}$, 对灰色预测结果进行修正, 得到

$$\mathbf{X}_{(k)} = \hat{\mathbf{x}}^0(k) + \hat{\mathbf{x}}^0(k) \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{T} \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}^0$ 为生成时间序列的预测值; $\mathbf{P}_{(i)} = \mathbf{P}_{(0)} \mathbf{P}$, $\mathbf{P}_{(0)}$ 为 $k-i$ 时刻所处状态。

1.2 路面破损状况衰变方程

S101 省道嘉兴段是总里程为 126 km 的一级公路, 于 1997 年修建并在 2005 年进行改建, 路面宽度有 22 m, 为双向四车道。路面结构是由 12 cm 的沥青混凝土和 46~48 cm 的水泥稳定集料构成, 采用沥青加铺罩面, 基层材料均为半刚性。据数据统计可知, 2006 年的交通荷载 $ESAL$ 为 5 788 次/日/车道, 交通荷载年增长率达到 2%。

根据衰变方程(1), 可得到路面损坏状况指数方程为

$$PCI = PCI_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{y} \right)^\beta \right] \right\} \quad (4)$$

式中: PCI 为路面损坏状况指数; PCI_0 为初始损坏状况指数, 一般取 100。

$$\alpha = K_{\gamma a} K_{m a} \lambda \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\eta}{l_0} \right)^\zeta \right] \right\} \quad (5)$$

$$\lambda = a_1 h^{b_1} ESAL^{c_1} \quad (6)$$

$$\eta = a_2 h^{b_2} ESAL^{c_2} \quad (7)$$

$$\zeta = a_3 h^{b_3} ESAL^{c_3} \quad (8)$$

$$\beta = K_{\gamma \beta} K_{m \beta} a_4 h^{b_4} ESAL^{c_4} l_0^d \quad (9)$$

式中: α 为寿命因子; β 为形状因子; h 为路面沥青层厚度, cm; $ESAL$ 为日当量轴载作用次数, 次/日/车道; l_0 为初始弯沉, 0.01 mm; a, b, c, d 为回归系数或指数^[6], 取值见表 1; 标准轴载取 100 kN^[9]; $K_{\gamma a}, K_{\gamma \beta}$ 为环境影响系数, 浙江地区 $K_{\gamma a} = 0.783$, $K_{\gamma \beta} = 0.694$; $K_{m a}, K_{m \beta}$ 为沥青影响系数^[10], 取值见表 2。

通过对 S101 省道嘉兴段一级公路实地调查, 结

表 1 PCI 衰变方程回归参数值

Tab.1 Regression parameter values of the PCI decay equation

公式	a	b	c	d
(6)	15.723 8	0.586 1	-0.206 4	-
(7)	119.660 0	-0.112 4	-0.105 3	-
(8)	1.524 7	-0.101 6	-0.229 2	-
(9)	0.653 6	0.334 9	-0.025 5	-0.098 1

表 2 沥青影响系数

Tab.2 Asphalt influence coefficient

沥青类型	$K_{m a}$	$K_{m \beta}$
普通沥青	1.0	1.0
改性沥青	1.5	1.1

合路面基本数据, 采用式(4)~(9)计算 PCI 值, 结果如表 3 所示。

表 3 衰变方程 PCI 预测结果

Tab.3 PCI predicted data of the decay equation

年份	通车时间/年	路面厚度/cm	初始弯沉/0.01 mm	$ESAL$	α	β	PCI
2006	1	16.7	34.5	5788	8.731 3	0.947 7	99.97
2007	2	16.7	34.5	5905	8.690 2	0.947 2	98.37
2008	3	16.7	34.5	6022	8.650 1	0.946 7	93.48
2009	4	16.7	34.5	6142	8.609 9	0.946 2	86.95
2010	5	16.7	34.5	6265	8.569 8	0.945 7	80.23
2011	6	16.7	34.5	6391	8.529 7	0.945 2	73.91
2012	7	16.7	34.5	6518	8.490 3	0.944 7	68.21
2013	8	16.7	34.5	6649	8.450 6	0.944 3	63.12
2014	9	16.7	34.5	6782	8.411 3	0.943 8	58.61

1.3 行驶质量衰变方程

根据所采用的基本方程式(1), 将式中的 PPI 用 RQI 代替, 即得行驶质量 RQI 的衰变方程为

$$RQI = RQI_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{A}{y} \right)^B \right] \right\} \quad (10)$$

$$A = a_1 h^{b_1} ESAL^{c_1} l_0^{d_1} \quad (11)$$

$$B = a_2 h^{b_2} ESAL^{c_2} l_0^{d_2} \quad (12)$$

式中: RQI 为行驶质量指数; RQI_0 为初始行驶质量指数, 通常取 100; A, B 为方程的回归参数, 取值见表 4。 RQI 计算结果如表 5 所示(见下页)。

表 4 RQI 衰变方程回归参数值

Tab.4 Regression parameter values of the RQI decay equation

回归参数	a	b	c	d
A	19.492	0.339	-0.038	-0.019
B	0.368 6	0.350	-0.064	-0.050

综上所述, 衰变-Markov 预测模型所需数据已通过计算得到, 具体建模步骤可总结如下: 将衰变方程所得到的历年计算值与历史检测指标值进行对比, 根据误差范围来划分状态, 统计每年计算误差所属的状态分区, 然后通过以往数据确定状态转移概率矩阵, 在当前数据及已知的状态转移概率矩阵基础上, 便可得到将来某一时间的转移概率, 最后用转移概率矩阵对衰变方程的未来计算值予以修正。该

表5 衰变方程 RQI 预测结果Tab.5 RQI predicted data of the decay equation

年份	通车时间/年	A	B	RQI
2006	1	34.053 6	0.475 1	100.00
2007	2	34.027 7	0.474 5	99.97
2008	3	34.002 3	0.473 9	99.54
2009	4	33.976 8	0.473 3	98.21
2010	5	33.951 2	0.472 7	95.96
2011	6	33.925 6	0.472 1	93.07
2012	7	33.900 2	0.471 5	89.81
2013	8	33.874 6	0.470 9	86.39
2014	9	33.849 1	0.470 3	82.95

模型对于二级及以上等级公路沥青路面的使用性能预测均适用。

2 衰变-Markov 预测模型的计算

根据精度计算公式(13),对 PCI 的预测精度进行检验,如表6所示。

$$\varepsilon(k) = \frac{PCI_1 - PCI_2}{PCI_1} \times 100\% \quad (13)$$

式中: $\varepsilon(k)$ 为误差幅度; PCI_1 为 PCI 实测值; PCI_2 为 PCI 预测值。

表6 PCI 衰变方程计算值和实测值对比Tab.6 Comparison between the measured value and the calculated value by PCI decay equation

年份	PCI_1	PCI_2	误差	幅度
2006	99.55	99.97	-0.42	-0.43
2007	97.34	98.37	-1.03	-1.06
2008	94.40	93.48	0.92	0.98
2009	86.12	86.95	-0.83	-0.97
2010	82.00	80.23	1.77	2.16
2011	74.45	73.91	0.54	0.72
2012	70.50	68.21	2.29	3.25
2013	64.20	63.12	1.08	1.69
2014	60.45	58.61	1.84	3.05

根据衰变方程计算值的具体情况与历史数据进行误差及幅度分析,可将状态划分为优、中、劣3种状态,并划定各状态的幅度范围,确定处于每个状态的频数以及状态转移情况^[11],如表7所示,进而统计出 PCI 状态转移次数如表8所示。

表7 PCI 状态划分标准Tab.7 Dividing standard of PCI states

状态	幅度范围/%	处于该状态频数
E_1	$[-1.5, -0.5)$	4
E_2	$[-0.5, 0.5]$	1
E_3	$(0.5, 1.5]$	3

表8 PCI 状态转移情况Tab.8 Transition situation of PCI state

状态	E_1	E_2	E_3
E_1	0	0	3
E_2	1	0	0
E_3	3	0	0

根据式(2)得到 PCI 指标的转移概率为

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据得到的状态转移概率矩阵便可以进行 PCI 指标的预测。由表8可知2013年处于 E_1 状态,即 $P_{(0)} = [1 \ 0 \ 0]$,则下一年的概率分布为

$$P_{(1)} = P_{(0)}P = [1 \ 0 \ 0] \times$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0 \ 0 \ 1]$$

取各状态的中值组成评价权值矩阵 $T = [-0.01 \ 0 \ 0.01]$,得到2014年 PCI 预测误差幅度为: $P_{(1)}T = 0.01 = 1\%$,由式(13)可得

$$\frac{PCI_1 - PCI_2}{PCI_1} \times 100\% = 1\%$$

PCI_2 为2014年通过衰变方程得到的 PCI 预测值,经衰变模型计算后为58.61。则经Markov模型修正后的2014年 PCI 预测值为 $PCI_2 = 58.61/0.99 = 59.20$,此时与实测值相比得到的误差幅度为2.07%,计算精度显著提高。

用同样的方法,也可得到行驶质量 RQI 的衰变-Markov 预测结果。经衰变方程预测的 RQI 值及误差如表9所示。

表9 RQI 衰变方程计算值和实测值对比Tab.9 Comparison between the measured value and the calculated value by RQI decay equation

年份	实测值	预测值	误差	幅度
2006	99.97	100.00	-0.03	-0.03
2007	99.68	99.97	-0.29	-0.29
2008	98.89	99.54	-0.65	-0.65
2009	97.89	98.21	-0.32	-0.32
2010	96.20	95.96	0.24	0.25
2011	93.35	93.07	0.28	0.30
2012	88.78	89.81	-1.03	-1.16
2013	86.41	86.39	0.02	0.03
2014	83.32	82.95	0.37	0.45

根据衰变方程计算值的具体情况与历史数据进行误差及幅度分析,可将状态划分为优、中、劣3种状态^[12],并划定各状态的幅度范围,确定处于每个

状态的频数以及状态转移情况,如表10所示,进而统计出RQI状态转移次数,如表11所示。

表10 RQI状态划分标准

Tab.10 Dividing standard of RQI states

状态	幅度范围	处于该状态频数
E_1	$[-0.6\%, -0.2\%]$	4
E_2	$[-0.2\%, 0.2\%]$	2
E_3	$(0.2\%, 0.6\%]$	2

表11 状态转移情况

Tab.11 Transition situation of RQI state

状态	E_1	E_2	E_3
E_1	1	1	1
E_2	1	0	1
E_3	2	0	0

根据式(2)得到RQI指标的转移概率为

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据得到的状态转移概率矩阵便可以进行RQI指标的预测。由表11可知2013年处于 E_1 状态,即 $P_{(0)} = [1 \ 0 \ 0]$,则下一年的概率分布为

$$P_{(1)} = P_{(0)}P = [1 \ 0 \ 0] \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

取各状态的中值组成评价权值矩阵 $T = [-0.01 \ 0 \ 0.01]$,得到2014年PCI预测误差幅度为 $P_{(1)}T = 0$,由式(13)可得

$$\frac{PCI_1 - PCI_2}{PCI_1} \times 100\% = 0\%$$

以上结果说明误差幅度落在3个区间内的可能性均等,皆为 $\frac{1}{3}$,结合各状态的中值,修正后的幅度为0,所以对衰变模型的计算结果无需修正,即2014年RQI预测值是82.95。

3 结论

a. 结合S101省道嘉兴段公路的实际数据,提出了衰变-Markov预测方法,采用此方法对沥青路面使用性能的路面损坏状况指数PCI和行驶质量指数RQI这两个重要指标进行了预测,有效解决了

预测精度需求较高时,衰变方程预测精度不足的问题。

b. 衰变方程建模需要的数据易于采集,并且在工程上使用较成熟,对于网级路面管理系统的中、短期预测具有很好的可行性。而Markov模型则可以有效地修正衰变方程由于影响因素的不确定性造成的计算误差,将两个模型结合使用,能够保证有效地预测沥青路面的使用性能,为之后道路采取何种养护措施提供了参考依据^[13]。

c. Markov转移矩阵能否移植用于大修或改建路段的衰变方程预测模型的精度修正,从而在历年检测数据较少的情况下也能准确预测,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 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,1995,23(5):512-518.
- [2] 闫仙丽,李青宁,高昌.基于灰色马尔可夫预测模型的路面综合性能预测[J].四川建筑,2010,30(6):74-76.
- [3] 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),2005,33(4):518-522.
- [4] 刘思峰,党耀国.预测方法与技术[M].北京:高等教育出版社,2005.
- [5] 刘喜平,孙立军.环境因素对路面使用性能的影响[J].同济大学学报,1996,24(4):398-404.
- [6] 孙立军.沥青路面结构行为理论[M].上海:同济大学出版社,2003.
- [7] 曾胜,韦慧.基于路面使用性能衰变规律的再生实施时机研究[J].铁道科学与工程学报,2011,8(4):35-39.
- [8] 刘艳丽,余贻鑫.大系统马尔可夫模型状态转移概率矩阵的快速形成方法[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(9):791-798.
- [9] 武昭融,李秀君,谢思昱,等.泡沫沥青冷再生路面结构剪应力响应分析[J].上海理工大学学报,2013,35(3):302-306.
- [10] 刘黎萍,孙立军.旧沥青路面面层有效厚度模型研究[J].公路交通科技,2001,18(6):9-12.
- [11] 孙永雄,申晨,黄丽平,等.基于二阶马尔可夫模型的模糊时间序列预测[J].计算机工程与应用,2015,51(6):120-123.
- [12] Santero N J, Masanet E, Horvath A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 55 (9/10): 801-809.
- [13] 李秀君,李春龙,李梦晨,等.基于多层次模糊灰色耦合理论的高等级公路养护机械配置方案评价[J].上海理工大学学报,2014,36(1):86-90.

(编辑:丁红艺)