

# 基于马尔可夫理论的高速公路桥梁性能衰变预测应用研究

王珊珊 尹新刚 宋伟伟

山东高速集团有限公司 山东济南 250098

中路高科交通检测检验认证有限公司 北京 100088

山东高速集团有限公司 山东济南 250098

**摘要:** 桥梁性能预测对于保障桥梁安全和科学养护都至关重要, 本文基于马尔可夫相关理论, 并结合某公司管养的桥群数据, 对桥梁技术状况等级进行了预测, 然后通过分析预测结果, 提出了一些合理化的养护建议。

**关键词:** 马尔可夫; 高速公路桥梁; 性能; 衰变预测; 应用

## Research on the Application of Highway Bridge Performance Decay prediction Based on Markov Theory

Wang Shanshan, Yin Xingang, Song Weiwei

Shandong High-speed Group Co., Ltd. Shandong Jinan 250098

Middle Road High-tech Traffic Testing and Certification Co., LTD. Beijing 100088

Shandong Expressway Group Co., LTD. Shandong Jinan 250098

**Abstract:** Bridge performance prediction is very important to ensure the safety and scientific maintenance of the bridge. This paper is based on the Markov related theory, and combined with the data of the bridge group managed by a company, the technical condition level of the bridge is predicted, and then some reasonable maintenance suggestions are put forward.

**Keywords:** Markov; highway bridge; performance; decay prediction; application

### 引言:

桥梁安全至关重要, 尤其对于特大桥梁的安全而言, 除了需要正常的养护以外, 有必要依照科学的方法对桥梁的性能和技术状况进行预测。

桥梁性能退化预测方法及理论, 目前常用的主要有四大类, 回归分析模型、灰色系统模型、神经网络模型与马尔可夫模型。回归分析方法分类多样, 不同的回归类型所建立的计算模型各不相同, 在桥梁技术状况退化预测中常用的回归模型是线性回归模型, 其计算采用的是GLS(最小二乘法)模型。灰色系统理论适用于部分桥梁技术状况数据缺失不完整的情况, 所需原始数据较少, 但是会受原始数据序列波动较大的影响。神经网络模型目前在桥梁技术状况退化预测方面也逐渐应用, 通过采用BP神经网络训练算法对桥梁进行预测, 并可以通过误差反馈调节权重和阈值。马尔可夫模型属于概率型预测模型, 其核心是状态转移矩阵的计算, 根据状态转移矩阵的求解方法不同可以将马尔可夫模型分

为多种不同的类型, 既有一些桥梁管理系统中采用离散的马尔可夫模型预测桥梁技术状况, 其中离散状态空间为[1, 2, 3, 4, 5], 1至5分别表示桥梁的技术状况等级。

在实际桥梁管养期技术状况预测中, 能用于预测的基础数据往往较为有限, 在这种情况下, 概率型预测模型就显得更为实用可行。并且, 桥梁性能衰变过程也都不是自然衰变, 每座桥梁几乎都经历过不同程度的维修, 从桥梁检测中得到的技术状况数据, 既包含桥梁的自然衰变特性, 又包含了人工维修过程, 因此基于桥群统计数据马尔可夫链预测模型, 不失为一种比较好的桥梁性能预测方式。

马尔可夫链预测模型只需要历年来路网内需要预测的桥梁技术状况等级数量分布向量数据等, 就可以预测出未来该路网内桥梁技术状况数量各年度分布情况以及桥梁技术状态的变化趋势, 从而有效辅助预防性养护与科学决策。

## 1 理论介绍

基于统计数据的齐次马尔可夫链模型<sup>[1]</sup>,就是利用同一条路线或者地区、相同结构类型的n座桥梁的历史状况变化情况,进而确定桥梁总体技术状况转移概率矩阵。通俗来讲就是通过从统计数据中提取出的规律,并依此为参考,进行桥梁性能的预测。采用离散的马尔可夫模型预测桥梁技术状况,其中离散状态空间主要依据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)<sup>[2]</sup>中的桥梁总体技术状况等级分类,主要包含1、2、3、4、5类,如表1所示。

表1 桥梁技术状况分类界限

桥梁技术状况评分	桥梁技术状况等级	状态空间值
95 ≤ Dr ≤ 100	1类	1
80 ≤ Dr ≤ 95	2类	2
60 ≤ Dr ≤ 80	3类	3
40 ≤ Dr ≤ 60	4类	4
0 ≤ Dr ≤ 40	5类	5

根据桥梁管养与结构退化特点分析,可以假设在一个退化阶段下,总体技术状况只下降到相邻的下一个等级,由此建立转移概率矩阵如下公式(1-1)所示。转移矩阵P是由5×5个转移概率元素组成,表示由状态转移到状态的概率。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & 1-p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 1-p_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & 1-p_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 1-p_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

桥梁技术状况状态转移矩阵的求解是马尔可夫预测模型的核心和重点,状态转移矩阵P的准确性直接影响预测结果的精度。目前确定转移概率矩阵主要有以下几种方法:基于统计数据的马尔可夫链模型<sup>[3]</sup>、基于统计转换频率的权马尔可夫模型<sup>[4]</sup>、基于牛顿迭代法的马尔可夫模型、基于逆阵的改进方法的马尔可夫模型等。

建立基于统计数据的齐次马尔可夫链模型的基本步骤如下:

(1) 定义状态空间:在马尔可夫链理论中的状态空间为离散集,桥梁在退化过程中桥梁总体技术状况逐年逐渐下降,将连续的评分区间划分为桥梁技术状况的离散状态空间。按照《公路桥梁技术状况评定标准》(JTGT H21-2011)将桥梁技术状况等级分为1~5类,根据标准中分类将桥梁的技术状况分成1~5个状态,即状态空间S={1, 2, 3, 4, 5}。

(2) 确定初始状态向量:桥梁退化预测模型的状态分布向量表示路线或地区内所有同类桥梁技术状况的状

态分布情况,即在某个时刻处于各个状态的桥梁数量分别占桥梁总数的比例。

(3) 计算转移状态概率矩阵:状态转移矩阵P的准确性直接影响预测结果的精度。根据定义的状态空间S,明确了状态转移矩阵是由5×5个转移概率元素组成,表示由状态转移到状态的概率。对于的求解,目前最简单和常用的方法是基于统计的频率转换法,转移状态概率的公式如公式(1-2)所示:

$$p_{ij}(d) = \frac{n_{ij}(d)}{n_i(d)} \quad (1-2)$$

式中:  $n_{ij}(d)$ —桥梁在退化阶段d中,桥梁技术状态由状态i转移到状态j的次数;

$n_i(d)$ —桥梁在退化阶段d中,在状态i停留的次数和从状态i转移到状态j的次数的总和。

(4) 计算桥梁技术状态预测值

如果所要预测的年限在同一个退化阶段内,要预测m年后的桥梁状态向量,可采用公式(1-3):

$$\pi(m) = \pi(0) \cdot P(d)^m \quad (1-3)$$

式中: P(d)—桥梁在退化阶段d中的状态转移矩阵;  
 $\pi(0)$ —桥梁当前的状态向量,如果桥梁的初始技术状况等级为1类,那么 $\pi(0) = \{1, 0, 0, 0, 0\}$ ;

$\pi(m)$ —桥梁在同一个退化阶段中m年后的状态向量;  
d—退化阶段;

如果所要预测的年限跨越了多个退化阶段,则可采用公式(1-4):

$$\pi(m) = \pi(0) \cdot P(d_1)^{m_1} \cdot P(d_2)^{m_2} \cdots P(d_i)^{m_i} \quad (1-4)$$

式中:  $d_i$ —桥梁第i个退化阶段;  
 $\pi(0)$ —桥梁当前的状态向量,如果桥梁的初始技术状况等级为1类,那么 $\pi(0) = \{1, 0, 0, 0, 0\}$ ;

$m_i$ —桥梁在第i个退化阶段所经历的年数,  $\sum_{i=1}^m m_i = m$ ;

$\pi(m)$ —桥梁m年后的状态向量;

桥梁在第m年的状态值计算如公式(1-5)所示:

$$D_r(m) = \pi(m) \cdot S^T \quad (1-5)$$

式中:  $D_r(m)$ —m年后的状态值;

S—桥梁的状态空间;

## 2 应用实例

某桥梁管养单位管养桥梁的通车时间集中在2002年,而首版桥涵养护规范《公路桥涵养护规范JTGT H11-2004》发布于2004年,因此从2005年首次获得桥梁技术状况数据记录开始到当前2019年,桥龄从3年发展到目前的17年,桥龄横跨了15年,将这15年划分为3个阶段,每个阶段5年,因此就形成了3阶的转移矩阵对。下面对该单位管养的其中154座桥梁技术状况等级变化过

程的数量进行统计分析, 如表2所示:

表2 某桥梁管养单位154座桥梁技术状况等级变化过程

阶段	桥龄	1		2		3		总数
		t	2	t	3	t	4	
1	3-7	154	64	0	0	0	0	154
2	8-12	90	32	64	1	0	0	154
3	13-17	58	47	95	1	1	0	154

假设该管养单位某一新建桥梁, 其在运营第1年的技术状况等级期望值为1.0, 在运营5年后的技术状况等级期望值为1.2, 那么:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.58 & 0.42 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.64 & 0.36 & 0 \\ 0 & 0.98 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0.19 & 0.81 & 0 \\ 0 & 0.99 & 0.01 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\pi(0) = \{1.2, 0, 0\}, S = \{1, 2, 3\}$$

根据状态转移概率矩阵, 计算得出:

$$\pi(2) = \pi(0) \cdot P_1 \cdot P_1 = \{0.41, 0.79, 0\}$$

该桥在运营第7年的状态期望值:

$$D(7) = \pi(2) \cdot S^T = 1.99。$$

同理, 桥梁运营到第12年时, 已经经历了第1退化阶段和第2退化阶段, 计算第12年(7年后)桥梁的状态如下:

$$\pi(7) = \pi(0) \cdot P_1^3 \cdot P_1^4$$

求得其在第12年的状态期望值  $D(12) = \pi(7) \cdot S^T = 2.25$ 。

由以上预测计算可知, 通过基于统计数据的马尔可夫链退化模型可预测该桥第7年和第12年的状态分别为1.99和2.25。

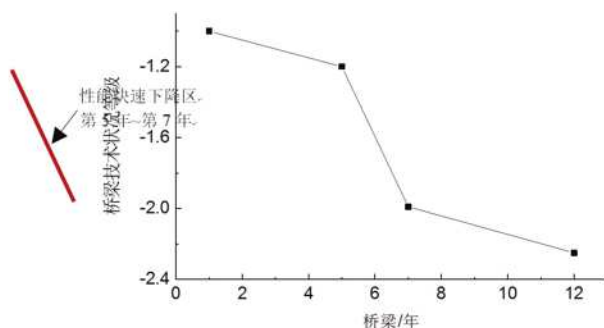


图1 某桥梁管理中心管养某桥的桥梁技术状况等级演变过程

根据结果分析, 按照目前该管养单位桥梁的管理现状分析如下:

该桥梁在第1年~第5年, 桥梁技术状况等级期望值从1.0下降到1.2, 降幅为0.2, 年均下降幅速率为0.04/年; 该桥梁在第6年~第7年, 望值从1.2下降到1.99, 降幅为0.79, 年均降幅速率为0.395/年; 该桥梁在第8年~第12年, 期望值从1.99下降到2.25, 降幅为0.26, 年均降幅速率为0.052/年;

### 3 相关结论

通过计算并分析桥梁的退化数据分析(图1), 可以发现: 按照现有的管理措施及桥梁自身的性能衰变规律, 该公司管养的桥梁有如下特征: 运营的前5年以及运营7年以后, 桥梁均维持在一个相对较低水平的性能衰变阶段, 而在运营的中期(第5年~第7年), 桥梁会进入一个较为快速的衰变退化阶段。所以, 桥梁管养公司应引起重视, 加强桥梁中前期养护, 做好预养护工作, 进而控制桥梁的性能的加速衰变。在加速衰变时间段, 提前采取预养护措施, 能够更好保证桥梁处在一个比较稳定的服役状态, 提升整体安全水平, 降低桥梁的运营养护成本。

### 参考文献:

- [1]马新颖.桥梁技术状况评定方法、退化模型及巡检养护管理系统的集成与开发[D].长安大学, 2016.
- [2]中华人民共和国交通运输部.公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21-2011[S].
- [3]戴宇文, 韩大建.桥梁管理系统中的桥梁退化模型实现[J].水运工程, 2005(09): 78-82.
- [4]季云峰.桥梁管理系统的研究[D].同济大学, 2003.