

# 基于灰色理论的沥青路面使用性能预测研究

程 锐<sup>1</sup> 王立超<sup>2</sup>

1. 黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司 哈尔滨 150090
2. 黑龙江省交投公路建设投资有限公司 哈尔滨 150000

**摘要:** 路面使用性能是其进行养护维修决策的关键指标, 受多种因素影响, 路面使用性能一直处于衰减变化状态, 因此需要对路面使用性能的沉降规律进行准确的预测, 为路面养护维修的科学决策提供依据。本文根据灰色理论基础, 建立了基于灰色理论的路面使用性能预测模型, 通过现场实测数据验证了该预测方法的准确性。

**关键词:** 灰色理论; 路面使用性能; 预测

## Prediction of asphalt pavement performance based on grey theory

Rui Cheng<sup>1</sup>, Lichao Wang<sup>2</sup>

1. Heilongjiang Transportation Planning and Design Research Institute Group Co., LTD., Harbin 150090
2. Heilongjiang Communications Highway Construction Investment Co., LTD., Harbin 150000

**Abstract:** The pavement serviceability is a crucial indicator for making maintenance and repair decisions, and it is subject to deterioration due to various factors. Therefore, it is necessary to accurately predict the settlement pattern of pavement serviceability to provide a basis for scientifically informed decisions regarding pavement maintenance and repair. This paper, based on the grey theory, has developed a pavement serviceability prediction model. The accuracy of this prediction method has been validated through on-site measured data.

**Keywords:** Grey Theory; Pavement Performance; Prediction

### 引言:

路面服务水平的高低直接反映在路面的状况上, 路面的性能指标可以作为评判路面性能状况的标准。预防性养护是在路面服务水平较高时进行的养护, 因此应该根据预防性养护指标来判断路面是否应该实施预防性养护。路面是一个复杂的综合结构, 路面状况好坏反映在许多方面, 如平整度、抗滑能力、路面破损状况等, 因此路面状况不能单纯的由单个性能指标来判断。国内外通常将路面的性能指标分为单项性能指标和综合性能指标。单项指标通常用来反映路面某一项性能, 如平整度, 如果某一路段实施预防性养护的侧重点是某一项指标, 此时就可以用单项指标来判断实施预防性养护的时机。综合指标是由多个单项指标综合而成, 可以反映路面的综合性能, 如果实施预防性养护的路段需要考虑路面的总体性能, 此时就应该使用综合指标来判断实施预防性养护的时机。

不同养护技术对原路面病害的处置程度和针对性不同是致使其使用性能衰减规律不尽相同的原因。我国开展大规模公路建设较晚, 在我国公路建设早期, 主要的工作是道路建设工作。目前我国公路的建设工作已经基本结束, 许多公路都要进行预防性养护, 实施预防性前需要根据路面性能指标判断路面是否适合进行预防性养护, 因此进行路面使用性能预测就非常重要<sup>[1]</sup>。

路面的结构和材料不同以及交通环境等因素的不同都会导致路面的使用性能差异。因此分析这些影响因素就显得尤为重要。

高速公路预防性养护要进行合理的养护, 建立沥青路面性能预测模型是非常有必要的。

### 一、路面使用性能的影响因素

路面性能的衰变时主要的影响因素就是道路自身因素, 包括路面类型、工程因素、路龄因素等。

路面类型的不同主要体现在结构和材料两方面。结

构方面主要体现在路面面层、道路基层、道路垫层的类型不同, 以及路面是否有封层等。

高速公路的建设水平是直接影响沥青路面性能的工程因素, 道路竣工后管养单位进行的预防性养护及日常养护等养护措施也是影响路面性能的工程因素。路面使用性能的衰变速度和路面的施工质量好坏有很大关系, 尤其在路面早期, 路面性能的变化较为明显, 施工质量越高, 高速公路的性能下降越慢, 相反, 施工质量越差, 高速公路的性能下降越快。管养单位如果可以在道路竣工后进行合适的预防性养护和日常养护, 并且施工质量较高, 沥青路面的性能下降也会变缓<sup>[2]</sup>。

路龄就是竣工通车后, 道路的运行时间。道路的使用年限越大, 路面的结构承载能力越小。尤其是在道路竣工通车后, 随着道路使用年限的增大, 行车荷载作用次数逐渐增多, 路面的承载力逐渐下降, 路表车辙等问题不断加重, 路面使用性能逐渐下降; 并且沥青材料也会逐渐老化, 路面的损坏程度会逐步加重, 从而致使路面平整度下降。因此, 预测沥青路面的使用性能时, 首要考虑要素是路龄。

交通因素的直接体现就是行车荷载在路面上的作用次数以及荷载的大小。道路竣工投入使用之后, 行车荷载就是影响路面性能的主要因素之一。行车荷载的作用次数和大小主要受到交通量和交通荷载的影响, 交通量越大, 交通荷载越多路面性能恶化越严重。

沥青路面处于露天环境中, 饱受氧、温度、光照、水等多种自然因素的影响, 而在一些冰冻区域, 还应考虑冻融循环这一要素对路面性能的作用。沥青路面应用过程中, 许多病害的产生都和环境要素有关, 如北方冰冻地区气温下降时, 由于积水等原因产生的翻浆病害, 春融时冻水融化导致的松散病害; 气温骤降时由于沥青等材料的温缩导致横向裂缝的产生。

## 二、路面使用性能的预测方法

美国的LTPP数据库是道路养护方向的权威数据库, 包含有2400多个测试段的观测数据, 各国在建立沥青路面衰变模型时都参考了这个数据库。当今世界, 许多国家都确立了适合于各地道路情况的路面性能预测模型。美国AASHTO协会在2002的AASHTO设计指南中建立了沥青路面的衰变模型; 美国的爱达荷州和亚利桑那州也建立了对应的路面性能衰变模型<sup>[3]</sup>。这些模型在建立时都是首先对试验段的路面性能进行长期观测, 进而通过回归分析等方法建立预测模型。

1982年邓聚龙教授提出灰色理论。这是一种对数据要求低、对信息量要求少、解决不确定性问题的研究方

法。这种方法是一种对小样本, 少信息量的研究对象进行规律预测的方法<sup>[4]</sup>。这种建模方法把客观的实验方法和手段转移到抽象系统; 为解决本征性灰色系统的实体化、物理化找到了途径, 并且能够把工程技术系统的微分、积分和惯性等概念引入到社会经济系统, 成为了连接自然科学和社会科学的纽带。灰色系统模型对数据要求低, 且该方法能够从有限离散的数据中找出一些规律, 从而构造灰色模型, 在此基础上进行数据分析和预测, 得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。

在高速公路沥青路面的使用性能方面, 确定性的使用性能指标有RQI、抗滑系数、PCI等, 而对沥青路面性能有影响的不确定性因素主要有交通轴载、环境因素、工程建设水平等<sup>[6]</sup>, 这些因素使高速公路沥青路面使用性能变化差异较大, 适合于通过灰色理论进行预测。本文通过建立GM(1, 1)模型来进行沥青路面性能预测。

## 三、路面使用性能的灰色预测模型

灰色模型是灰色理论中的核心部分。通常是根据部分已知信息建立起反映系统发展规律的微分数学模型。常用的灰色模型为GM(n, h)模型, 它表示h个变量的n阶微分方程。路基预测中常采用的GM(1, n), 即n个变量的一阶微分方程。一般来说, 灰色模型具有如下性质:

- (1) 灰色模型具有微分、差分、指数兼容的性质;
- (2) 灰色模型参数是可调节的, 非唯一的;
- (3) 灰色模型的结构具有弹性, 即是可以变化的;
- (4) 灰色模型是常系数性质, 其参数分布是灰色的。

### 1. 建模过程

灰色理论的GM(1, n)模型在路基沉降中的建模步骤如下:

- 1) 取沉降观测点在相同的观测时段内沉降量为原始序列:

$$S^{(0)} = [S^{(0)}(1), S^{(0)}(2), \dots, S^{(0)}(n)], S^{(0)}(k) \geq 0, k=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

- 2) 将原始序列进行一次累加, 各时刻的沉降量的时间序列表示为:

$$S^{(1)} = [S^{(1)}(1), S^{(1)}(2), \dots, S^{(1)}(n)], S^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k S^{(0)}(i) \quad (2)$$

- 3) 进行如下假设

$$Z^{(1)} = [Z^{(1)}(1), Z^{(1)}(2), \dots, Z^{(1)}(n)] \quad (3)$$
$$Z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} S^{(1)}(k-1) + \frac{1}{2} S^{(1)}(k), k=2, 3, \dots, n$$

根据灰色理论GM(1, n)模型, 其灰色微分方程如下:

$$S^{(0)}(k) + aZ^{(1)}(k) = b \quad (4)$$

其中, a和b是灰参数, 其值可通过方程(5)的最小二乘法求得:

$$\hat{a} = (a, b)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (5)$$

式中:

$$B = \begin{bmatrix} -Z^1(2) & 1 \\ -Z^1(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -Z^1(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} -S^0(2) \\ -S^0(3) \\ \dots \\ -S^0(n) \end{bmatrix}$$

4) 灰色微分方程 (4) 的白化方程求解:

$$S^{(1)}(t) = \left( S^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right) e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (6)$$

微分方程的时间相应序列为:

$$\hat{S}^{(1)}(k+1) = \left( S^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

取  $S^{(1)}(0) = S^{(0)}(1)$ , 则有:

$$\hat{S}^{(1)}(k+1) = \left( S^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

由公式 (7) 和 (8) 可知:

$$\hat{S}^{(0)}(k+1) = S^{(1)}(k+1) - \hat{S}^{(1)}(k) = (1 - e^{-a}) \left( S^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} \quad (9)$$

由公式 (9) 可知, 当  $k \rightarrow \infty, \hat{S}^{(1)}(k+1)$  表示的是最终的沉降量, 其值为  $\frac{b}{a}$ 。

## 2. 灰色模型预测结果

根据黑龙江省某高速公路2019~2023年的路面PCI和RQI检测数据, 建立GM(1, 1)模型, 进行模型求解和精度检验后预测沥青路面的使用性能, 进而验证灰色理论在路面性能预测方面的适用性, 检测数据如表1所示。

表1 黑龙江省高速公路路面性能历年检测数据

年份	2020	2021	2022	2023
PCI	92.3	91.2	89.4	87.4
RQI	96.8	96.1	95.2	94.4

以PCI指标为例, 建立灰色模型进行预测, 预测结果与实际结果如图1所示。

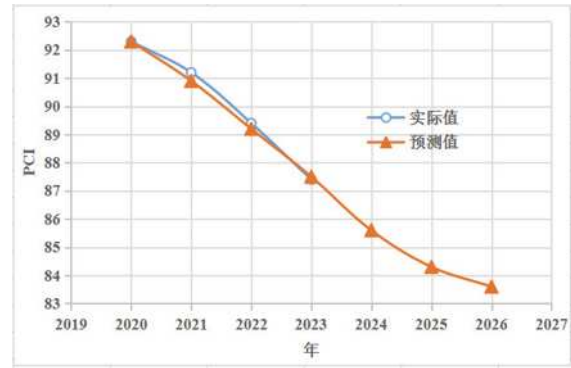


图1 预测结果与实际结果的对比

整体来看, 此模型预测出来的PCI起始值与实际值相同, 模拟PCI曲线变化趋势与实际PCI变化趋势较为接近, 模型误差较小, 说明灰色系统模型可以很好的预测路面使用性能。

## 四、结论

为了准确预估沥青路面使用性能的衰减行为, 本文建立了基于灰色理论的路面使用性能预测方法, 结果表明基于灰色理论的路面使用性能预测模型的精度更高, 预测路面使用性能衰减降过程更为准确, 能够用于确定路面使用性能的变化规律分析。

## 参考文献:

- [1]王菲. 辽宁省高速公路沥青路面大中修项目路面性能衰变模型的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
- [2]伍祥松. 高速公路沥青路面使用性能预测及预防性养护对策研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [3]Armstrong R D, Cook W D. The contract formation problem in preventive pavement maintenance: A fixed-charge goal programming model[J]. Computers Environment & Urban Systems, 1981, 6(3): 147-155
- [4]刘思峰、郭天榜、党耀国. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学出版社 1999.
- [5]张国平. 基于灰色系统理论的普通水泥砼路面养护决策模型及其应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- [6]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, 038(008): 1161-1164.