

# 灰色理论在沥青路面质量控制中的应用研究

邬晓光,<sup>1\*</sup> 吕文全,<sup>2</sup> 曾明春,<sup>2</sup> 徐祖恩<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西西安 710064; 2. 甘肃白银公路总段, 甘肃白银 730090)

**摘要:** 分析沥青路面工程项目的质量特点和现行质量控制中数理统计方法的局限性后, 提出了一种基于灰色系统理论的沥青路面质量控制方法, 建立了  $GM(1, 1)$  模型, 并对模型精度进行检验, 针对沥青路面施工过程中的实际情况, 引入新陈代谢预测模型的概念, 对  $GM(1, 1)$  模型作了适当的修正, 使得模型具有更强的适应性和更好的预测效果。

**关键词:** 沥青路面; 灰色理论; 质量控制; 预测模型; 新陈代谢

**中图分类号:** U416.217; U415.12 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-716X(2004)02-0055-05

近20年来, 我国高等级公路建设迅速发展, 高速公路里程逐年增加。沥青路面作为一种无缝隙的连续式路面, 因其具有足够的力学强度、行车平稳、舒适、无扬尘、振动和噪音小等优越性而被普遍采用, 在已建成和将要建成的高等级公路路面中占绝大部分。我国近几年沥青路面施工技术水平也有了很大提高, 但要修筑高质量的精品工程, 施工质量控制与管理是最重要的环节, 这一环节的任何一个分部、分项工程出问题, 都会给工程的整体质量带来严重后果, 直接影响到工程的施工进度、费用和使用效益, 甚至返工重建造成巨大的经济损失。因此, 沥青路面工程质量是公路工程建设中质量控制的关键。

## 1 课题的研究背景

### 1.1 沥青路面项目质量特点

沥青路面工程项目的质量特点, 主要体现在以下几方面:

1) 影响质量的因素多, 如设计、材料、机械、地形、地质、水文、气象、施工工艺、操作方法、技术措施、管理制度等, 均直接影响施工项目的质量;

2) 容易产生质量变异, 由于影响工程质量的因素众多, 任何一个因素出现问题都会引起工程质量的变异, 从而造成质量控制系统的的不稳定;

3) 质量检查不能通过解体、拆卸的方式, 来检查工程的内部质量, 因此更应注重质量的控制, 把不合格产品消除在萌芽状态;

4) 质量问题的暴露性, 公路工程质量受全社会

关注和监督, 质量问题非常敏感。

### 1.2 数理统计方法的局限性

目前在沥青路面工程项目的质量控制与管理中普遍采用的是  $\bar{X}-R$  控制图法, 即通过大量取样, 从中找出统计规律, 继而达到研究质量控制系统状态的目的。此种方法在工程项目质量管理中得到了广泛的应用, 但是由于其自身的局限性, 这种方法实质上还是一种事后控制的方法, 没有预测功能, 对工程质量问题不能做到防患于未然。归纳起来, 数理统计方法存在以下几方面的问题:

1) 统计方法需要抽取大量测定值, 而工程项目的取样往往难以满足大样本容量的要求, 即使能满足, 也要花费巨大的人力物力;

2) 从定量角度分析, 统计方法只能分析至检查日时质量控制系统的状态, 不能预测系统未来状态, 也不能寻找影响质量控制系统行为特征量的主要因子;

3) 统计方法是通过系统已经发生的行为是否符合要求来进行判断和控制的; 实际还是一种事后控制, 因而没有预见性, 不能做到防患于未然;

4) 统计方法没有考虑质量控制系统中的“灰现象”。

### 1.3 灰现象分析

公路工程沥青路面施工是一个复杂的系统工程, 在施工过程中受到许多确定和不确定性因素的影响, 在这些影响因素中, 有些是可以测定量化的,

\* 收稿日期: 2003-03-18; 修订日期: 2003-06-19

作者简介: 邬晓光(1961—), 男, 湖北黄冈人, 教授, 博士生, 从事路基路面教学科研工作。

如路面的弯沉值、路面的平整度、压实度、材料的强度等,而大部分还是不能测量量化的,至少目前只能做定性的分析,也就是说系统的信息是部分明确,部分不明确的,因此,沥青路面施工过程的质量控制属于灰色系统理论的研究范畴,该系统可看作是一个灰色系统.

2 预测模型的建立

将沥青路面施工过程和影响因素作为一灰色系统,对决定其系统行为变化的主要参数随时间变化做出预测.选定路面垫层的压实度、基层的压实度、平整度、强度和面层的压实度、平整度、弯沉值和摩擦系数摆值为主要控制参数.首先根据已有观测资料建立灰色预测模型  $GM(1,1)$ .

2.1  $GM(1,1)$  模型的建立

现以基层的平整度( $I$ ) 原始观测序列为例建立  $GM(1,1)$  预测模型.基层平整度( $I$ ) 原始序列  $I^0$  为  $I^0 = \{x^0(1), x^0(2), x^0(3), x^0(4), x^0(5), x^0(6), x^0(7), x^0(8), x^0(9)\} = \{5.6, 5.9, 6.2, 6.3, 6.5, 6.8, 6.7, 6.8, 7.3\}$

作一次累加生成,得:  
 $I^{(1)} = \{x^1(1), x^1(2), x^1(3), x^1(4), x^1(5), x^1(6), x^1(7), x^1(8), x^1(9)\} = \{x^0(1), x^0(1) + x^0(2), \dots, x^0(8) + x^0(9)\} = \{5.6, 11.5, 17.7, 24, 30.5, 37.3, 44, 50.8, 58.1\}$

则  $I^{(1)}(k)$  的  $GM(1,1)$  模型的白化形式的微分方程可以表示为  $dx^{(1)}/dt + ax^1 = b$  令  $Z^{(1)}$  为  $I^{(1)}$  紧邻均值生成序列,即  $Z^{(k)} = (x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1))/2 = 2, 3, \dots, 9$  则  $Z^{(1)} = \{Z^{(1)}(2), Z^{(1)}(3), Z^{(1)}(4), Z^{(1)}(5), Z^{(1)}(6), Z^{(1)}(7), Z^{(1)}(8), Z^{(1)}(9)\} = \{8.55, 14.6, 20.85, 27.25, 33.9, 40.65, 47.4, 54.45\}$

引入下述符号

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ x^{(0)}(9) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.9 \\ 6.2 \\ 6.3 \\ 6.5 \\ 6.8 \\ 6.7 \\ 6.8 \\ 7.3 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2)1 \\ -Z^{(1)}(3)1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ -Z^{(1)}(9)1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8.55 & 1 \\ -14.6 & 1 \\ -20.85 & 1 \\ -27.25 & 1 \\ -33.9 & 1 \\ -40.65 & 1 \\ -47.4 & 1 \\ -54.45 & 1 \end{bmatrix}$$

则灰色微分方程  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$  的最小二乘估计参数列满足

$$\hat{\alpha} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{bmatrix} -0.0259 \\ 5.7602 \end{bmatrix}$$

则  $GM(1,1)$  预测模型为  $x^{(0)}(k) - 0.0259Z^{(1)}(k) = 5.7602$ , 其时间响应函数为  $\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - b/a)e^{-\hat{a}k} + b/a = (5.6 + 222.4)e^{0.0259k}$ , 则  $I^{(1)}$  的模拟值为

$$\hat{I}^{(1)} = \{\hat{x}^{(1)}(1), \hat{x}^{(1)}(2), \hat{x}^{(1)}(3), \hat{x}^{(1)}(4), \hat{x}^{(1)}(5), \hat{x}^{(1)}(6), \hat{x}^{(1)}(7), \hat{x}^{(1)}(8), \hat{x}^{(1)}(9)\} = \{5.6, 11.58, 17.72, 24.02, 30.49, 37.12, 43.93, 50.92, 58.09\}$$

还原求出  $I^{(0)}$  的模拟值, 由  $\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{\alpha}^{(1)}x^{(1)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1)$  可得  
 $\hat{I}^{(0)} = \{\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \hat{x}^{(0)}(3), \hat{x}^{(0)}(4), \hat{x}^{(0)}(5), \hat{x}^{(0)}(6), \hat{x}^{(0)}(7), \hat{x}^{(0)}(8), \hat{x}^{(0)}(9)\} = \{5.6, 5.98, 6.14, 6.3, 6.47, 6.63, 6.81, 6.99, 7.17\}$

2.2 模型的精度检验

原始数列:  $I^{(0)} = \{5.6, 5.9, 6.2, 6.3, 6.5, 6.8, 6.7, 6.8, 7.3\}$ , 相应的模型模拟序列:  
 $\hat{I}^{(0)} = \{5.6, 5.98, 6.14, 6.3, 6.47, 6.63, 6.81, 6.99, 7.17\}$

残差序列:  $\epsilon^{(0)} = (\epsilon(1), \epsilon(2), \epsilon(3), \epsilon(4), \epsilon(5), \epsilon(7), \epsilon(8), \epsilon(9)) = (x^{(0)}(1) - \hat{x}^{(0)}(1), x^{(0)}(2) - \hat{x}^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(9) - \hat{x}^{(0)}(9)) = (0, -0.08, 0.06, 0.03, 0.17, -0.11, -0.19, 0.13)$

$$\Delta = (\left| \frac{\epsilon(1)}{x^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\epsilon(2)}{x^{(0)}(2)} \right|, \left| \frac{\epsilon(3)}{x^{(0)}(3)} \right|, \dots, \left| \frac{\epsilon(9)}{x^{(0)}(9)} \right|) = (0, 0.014, 0.0097, 0, 0.0046, 0.026, 0.016, 0.028, 0.018)$$

则平均模拟相对误差  $\bar{\Delta} = 1/n \cdot \sum_{k=1}^n \Delta_k = 0.013$ .

从残差和相对误差可看出, 模型满足了精度要求, 但是残差  $\epsilon$  和相对误差  $\Delta$  这二项指标还不能完全反映模型的精度, 故采用后验差比  $C$  和小误差频率  $P$ , 对模型进行进一步的检验.

其中后验差比可由下式计算而得:  $C = S_2/S_1$  式中:  $S_1$  —— 原始数据方差;  $S_2$  —— 残差方差.

$$S_2^2 = 1/n \cdot \sum_{k=1}^n (\epsilon(k) - \bar{\epsilon})^2$$

则:  $S_1^2 = 0.2381, S_1 = 0.4879, S_2^2 = 0.0165, S_2 = 0.108$ .

则本预测模型的后验差比  $C = S_2/S_1 = 0.108/0.4879 = 0.22 < 0.35$

小误差概率为  $P = P(|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}| < 0.6745S_1)$ .

$$\begin{aligned} 0.6745S_1 &= 0.3159 \\ |\epsilon(1) - \bar{\epsilon}| &= 0.0011, \quad |\epsilon(2) - \bar{\epsilon}| = 0.0811, \\ |\epsilon(3) - \bar{\epsilon}| &= 0.0589, \quad |\epsilon(4) - \bar{\epsilon}| = 0.0011, \\ |\epsilon(5) - \bar{\epsilon}| &= 0.0289, \quad |\epsilon(6) - \bar{\epsilon}| = 0.1689, \\ |\epsilon(7) - \bar{\epsilon}| &= 0.1111, \quad |\epsilon(8) - \bar{\epsilon}| = 0.1911, \\ |\epsilon(9) - \bar{\epsilon}| &= 0.1289. \end{aligned}$$

$$P = P(|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}| < 0.6745S_1) = 1 > 0.95$$

$C = 0.22 < 0.35, P = 1 > 0.95$ , 所建的  $GM(1, 1)$  预测模型精度等级达到一级模型要求, 可用于系统预测. 一般来说, 后验差比值  $C$  越小越好 (因为  $C$  小说明  $S_2$  小,  $S_1$  大, 即残差方差小, 原始数据方差大, 说明残差比较集中, 摆动幅度小, 原始数据比较分散, 摆动幅度大, 所以模拟效果好,  $S_2$  与  $S_1$  相比应尽可能小.), 小误差概率  $P$  越大越好.

### 2.3 新陈代谢 $GM(1, 1)$ 模型

$GM(1, 1)$  模型精度与数据取舍有关, 一般给定原始数列  $x^{(0)}$  后,  $x^{(0)}$  中的数据不一定要全部用来建模, 不过按照同一数列  $x^{(0)}$  中的不同取舍, 所得模型也不同. 在数据的采集过程中, 随着时间的推移, 老的数据将越来越不适应新的情况, 或者说老数据的信息意义将随时间的推移而降低, 因此, 每补充一个新的信息, 便去掉一个最老的数据, 以维持数据的个数, 这显然是合理的, 这种新数据补充老数据去掉的数据, 称为新陈代谢数列, 相应的模型称为新陈代谢模型. 设有原数列为  $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)\}$ , 当补充新数  $x^{(0)}(n+1)$  后, 去掉  $x^{(0)}(1)$  得

$$x^{(0)} = \{ \overset{\text{去掉}}{x^{(0)}(1)}, x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n), \overset{\text{新加入}}{x^{(0)}(n+1)} \}$$

这是新陈代谢数列.

引入新陈代谢数列, 对  $GM(1, 1)$  预测模型作相应的修正. 记时刻  $t_i$  与  $t_{i+1}$  的观测序列为  $x_i = (x_i^{(0)}(1), x_i^{(0)}(2), \dots, x_i^{(0)}(n))$

$$x_{i+1} = (x_{i+1}^{(0)}(1), x_{i+1}^{(0)}(2), \dots, x_{i+1}^{(0)}(n))$$

且有

$$\left. \begin{aligned} x_{i+1}^{(0)}(1) &= x_i^{(0)}(2) \\ x_{i+1}^{(0)}(2) &= x_i^{(0)}(3) \\ &\vdots \\ x_{i+1}^{(0)}(n-1) &= x_i^{(0)}(n) \\ x_{i+1}^{(0)}(n) &= x_i^{(0)}(n+1) \end{aligned} \right\}$$

并称  $x_{i+1}^{(0)}(n)$  为新息,  $x_i^{(0)}(1)$  为旧息, 则  $x_i$  列  $x_{i+1}$

为新陈代谢. 按  $GM(1, 1)$  模型可知,  $x_i$  与  $x_{i+1}$  所对应的时间响应函数分别为:

$$\hat{x}_i^{(1)}(k+1) = (x_i^{(0)}(1) - b_i/a_i)e^{-a_i k} + b_i/a_i$$

$$\hat{x}_{i+1}^{(1)}(k+1) = (x_{i+1}^{(0)}(1) - b_{i+1}/a_{i+1})e^{-a_i k} + b_{i+1}/a_{i+1}$$

$$\text{且有 } \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T Y_i,$$

$$\begin{bmatrix} a_{i+1} \\ b_{i+1} \end{bmatrix} = (B_{i+1}^T B_{i+1})^{-1} B_{i+1}^T Y_{i+1}$$

$$Y_i = \begin{bmatrix} x_i^{(0)}(2) \\ x_i^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_i^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad Y_{i+1} = \begin{bmatrix} x_i^{(0)}(3) \\ x_i^{(0)}(4) \\ \vdots \\ x_i^{(0)}(n) \\ x_{i+1}^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} -Z_i^{(1)}(2) & 1 \\ -Z_i^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z_i^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad B_{i+1} = \begin{bmatrix} -Z_{i+1}^{(1)}(2) & 1 \\ -Z_{i+1}^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z_{i+1}^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

其中:  $Z_i^{(1)}(k) = (x_i^{(1)}(k) + x_i^{(1)}(k-1))/2$ ,

$$Z_{i+1}^{(1)}(k) = (x_{i+1}^{(1)}(k) + x_{i+1}^{(1)}(k-1))/2$$

由时间相应函数式可求出预测值  $\hat{x}_{i+1}^{(0)}(n+1)$ , 并判断预测值是否出现异常, 如果没有异常现象, 则对系统行为不予干涉, 生产按原程序进行, 若出现异常, 则在系统行为没有发生之前进干涉, 调整相应的参数, 使生产仍能处于控制状态. 另一方面随着系统行为的沿续, 产生新的信息即  $x_{i+1}^{(0)}(n)$ , 就有一个新模型与之对应, 可另求出新的预测值  $\hat{x}_{i+1}^{(0)}(n+1)$ .

上述建模预测过程就是新陈代谢  $GM(1, 1)$  预测模型的建模思想, 由建模过程可看出: 由  $k$  时刻前的序列可求出  $k+1$  时刻的参数值, 因而模型具有预测性; 每增加一个新数据(新息), 就有一个新的模型与之对应, 因此控制模型具有较强的适应性; 由于  $(a_i, b_i)$  与  $(a_{i+1}, b_{i+1})$  不完全相同, 因此控制是随时间变化的自适应系统; 由于模型是随着所观测的原始序列的不同而变化, 随时去掉老的信息, 采纳新的信息, 因此能反映系统行为的变化, 保证了预测与控制的有效性和实时性.

### 3 结束语

笔者利用灰色系统理论, 针对沥青路面质量的管理和控制提出了一种新的方法和思路. 从预测模型的精度检验来看, 残差评定指标  $C$  小于 0.35,  $P$  为 1, 说明预测模型精度较高, 可以应用于实际工程

项目. 从实际工程项目的应用情况来看, 效果也是比较明显的, 从而表明将灰色系统理论运用于沥青路面的动态质量控制不但是可行的也是有效的.

参考文献:

[ 1] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[ M] . 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.

[ 2] 刘思锋, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用[ M] . 郑州: 河南大学出版社, 1991.  
[ 3] 公路沥青路面施工技术规范[ S] . 北京: 人民交通出版社, 1994.  
[ 4] 周 直. 工程项目管理[ M] . 北京: 人民交通出版社, 2000.

Control of asphalt pavement quality based on grey system theory

WU Xiao-guang,<sup>1</sup> LU Wen-quan,<sup>2</sup> ZEN Min-chun,<sup>2</sup> XU Zu-en<sup>1</sup>

(1. School of Highway Engineering, Chang’ an University, Xi’ an 710064, China; 2. Baiyin General Highway Administration of Gansu Province, Baiyin 730090, China)

**Abstract:** First, the quality characteristics of asphalt pavement and the limitation of mathematical statistics method of quality control are analyzed in the paper. A control method of asphalt pavement quality based on grey system theory is put forward, and the GM(1, 1) model built. Through introduction of the conception of metabolism predicting model, the GM(1, 1) model is updated properly.  
**Key words:** asphalt pavement; grey system theory; quality control; predicting model; metabolism

责任编辑: 袁本奎

(上接 54 页)

[ 3] E. Ray Brown, John E. Haddock, and Campbell Crawford. Investigation of stone matrix asphalt mortars[ R] . Transportation research record1530, 95-102.

[ 4] Richard Fortier and Ted s Vinson° Low Temperature Cracking and Aging Performance of Modified Asphalt Concrete Specimens[ R] . TRB1630, 1998, 77-86.

A study on modified asphalt mortar with diatomite

LIU Li,<sup>1</sup> LI Jian,<sup>1</sup> HAO Pei-wen,<sup>1</sup> MEI Qing-bin<sup>2</sup>

(1. School of Highway Engineering, Chang’ an University, Xi’ an 710064, China; 2. Yunnan Research Institute of Highway Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** The performance and rheological properties of modified asphalt mortar with diatomite are studied by way of conventional tests and the Strategic Highway Research Program (SARP)tests such as the Dynamic Shear Rheometer (DSR) test and the Bending Beam Rheometer (BBR) test. The contrast is made between conventional tests and SHRP tests. It is shown that the diatomite improves the high temperature properties and anti-aging properties of asphalt mortar greatly, and conventional tests can’ t evaluate the performance of modified asphalt mortar with diatomite effectively.  
**Key words:** asphalt mortar; rheological properties; diatomite

责任编辑: 袁本奎