

基于多灰色预测模型 对比的高速公路路基沉降量预测

于 澍

(西安城市建设综合开发中心, 陕西 西安 710061)

摘 要:高速公路路基沉降量的预测不仅关系着高速公路的施工质量与服务水平,同时对高速公路的行车安全也有重要影响.根据路基沉降量的实测资料,通过多种灰色预测模型对路基沉降量进行了数据规律分析及精度对比,选取了最优的灰色预测模型对路基最终沉降量进行预测.为路基稳定性的评价与路基沉降的控制应对提供了参考.

关键词:公路;路基;沉降;灰色模型;预测

中图分类号:U416.1⁺11

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)02-0233-06

由于高速公路路基沉降与施工质量、服务水平与建成后的行车安全关系密切,因此高速公路施工对路基质量的要求很高,必须对路建成后的沉降量采取有力措施加以控制.因此,对高速公路的路基最终沉降量的预测是非常重要的.对高速公路的路基沉降量预测方法有很多,比较常用的有双曲线预测方法,它是通过对初期路基沉降量观测数据进行分析,得出任意时间时的路基沉降计算公式,然后通过求极限的方式得到路基最终的沉降量.除此之外,各种系统工程预测方法也是比较常见的路基沉降量预测方法^[1-3].利用双曲线方法进行预测时,双曲线与实际数据是近似拟合的关系,实际数据要满足或者近似满足双曲线的规律.但对于路基沉降量这类数据而言,一般情况下都是初始沉降量比较大,后期沉降量较小,然后到达一定程度后不再沉降的一个过程.相对于双曲线,这类数据实际上更加符合“S”形曲线的特征,因此利用双曲线预测方法对公路路基沉降量进行预测时,往往与现实情况有较大偏差.

灰色预测理论^[4-8]可以很好地处理此类情况.灰色预测理论在构建预测模型时,将所有数据信息都加以考虑,考虑更加全面完整,而且其预测模型的数据特征很符合“S”形,很适用于路基工程沉降量的预测.近些年已经有相关专家学者尝试用灰色预测理论来进行路基沉降类似工程的预测工作,取得了一定的成效^[9].但是由于灰色预测理论包含的预测模型多种多样,单以某一种预测模型进行预测,并不能保证所得到的结果是最优的,对于路基沉降这类工程而言,预测结果的些许误差就有可能造成大的安全隐患和严重后果,因此可根据路基沉降量早期观测数据,利用多种单变量灰色预测模型对路基沉降量进行预测,对各模型的预测结果进行误差分析与精度比较,找出误差最小、精度最高的模型,对路基最终沉降量进行预测.相对于以往只利用单一某种灰色预测模型进行预测,多模型进行优选后进行预测的方法更加科学合理,结果更为准确.为进行路基稳定性评价与工程控制提供了可靠的依据.

1 系统建模

由于高速公路路基沉降量是一个随着时间而变化的量,因此用单变量的灰色预测模型来对路基沉降量进行预测.根据前文所述的优选预测模型后进行沉降量预测的思想,初步选取与高速公路路基沉降量规律较为符合的GM(1,1)模型、差分verhulst模型以及微分verhulst模型进行路基沉降量预测精度比较.各模型如下:

收稿日期:2012-10-24 修改稿日期:2013-03-22

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划课题资助(2006BAB02A02);国家自然科学基金资助项目(50490274)

作者简介:于 澍(1965-),男,山东莱州人,副教授,主要研究方向为土及其构筑物安全及经济评价.

(1)GM(1,1)模型

若有非负序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$, $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ 为 $X^{(0)}$ 的 1-AGO 序列. 而 $Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列.

其中:

$$x^{(0)}(1) = x^{(1)}(1); k = 1 \quad (1)$$

$$x^{(0)}(k) = x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1); k = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1); k = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

若 $\hat{a} = [a, b]^T$ 为 GM(1,1)模型的参数列, 且有矩阵

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

则, GM(1,1)模型的最小二乘估计参数列为

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

则有:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (6)$$

为 GM(1,1)模型.

(2)微分 verhulst 模型^[15-16]

设原始数据序列为 $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$, 则有 $X^{(1)}$ 的 1-IAGO 序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ 如下所示:

$$x^{(0)}(1) = x^{(1)}(1); k = 1 \quad (7)$$

$$x^{(0)}(k) = x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1); k = 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

紧邻均值生成序列 $Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n))$ 如前所示.

若 $\hat{a} = (a, b)^T$ 为微分 verhulst 模型的参数列, 且有矩阵

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & (z^{(1)}(n))^2 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

则有:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b [z^{(1)}(k)]^2 \quad (9)$$

为微分 verhulst 模型.

(3)差分 verhulst 模型

设原始数据序列为 $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$, 则有 $X^{(1)}$ 的 1-IAGO 序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$, 紧邻均值生成序列 $Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n))$ 如前所示.

若 $\hat{a} = (a, b)^T$ 为差分 verhulst 模型的参数列, 且有矩阵

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 0.5[(x^{(1)}(1))^2 + (x^{(1)}(2))^2] \\ -z^{(1)}(3) & 0.5[(x^{(1)}(2))^2 + (x^{(1)}(3))^2] \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 0.5[(x^{(1)}(n-1))^2 + (x^{(1)}(n))^2] \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

则有:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = \frac{b}{2} [(x^{(1)}(k-1))^2 + (x^{(1)}(k))^2] \quad (10)$$

为差分 verhulst 模型.

对于高速公路路基沉降量的实际值序列 $X^{(0)}$ 与预测值序列 $\hat{x}^{(0)}$, 对其进行误差检验. 残差公式为:

$$\epsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad (11)$$

相对误差为:

$$\Delta k = \frac{|\epsilon(k)|}{x^{(0)}(k)} \quad (12)$$

平均相对误差为:

$$\Delta = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \Delta k \quad (13)$$

得到残差平方和:

$$s = \epsilon^T \epsilon \quad (14)$$

进行后验差检验, 计算原始数列的均值 $\bar{x}^{(0)}$ 和方差 S_1^2 :

$$\bar{x}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) \quad (15)$$

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}]^2 \quad (16)$$

计算残差均值 $\bar{\epsilon}^{(0)}$ 和方差 S_2^2 :

$$\bar{\epsilon}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon^{(0)}(k) \quad (17)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\epsilon^{(0)}(k) - \bar{\epsilon}^{(0)}]^2 \quad (18)$$

均方差比值亦称后验比值 c , 它和小误差概率 p 可按照以下公式进行计算:

$$c = \frac{S_2}{S_1} \quad (19)$$

$$p = p\{|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}| < 0.6745 S_1\} \quad (20)$$

c 值越小, p 值越大表明精度越高, 反之亦然. 因此可以通过 c 和 p 值对预测模型精度进行综合评定.

只有当相对误差、平均相对误差、残差平方和以及后验差检验均合格时, 灰色预测模型才被认为是可靠的, 可以用来进行预测.

根据灰色预测模型的对高速公路各路段最终路基沉降量的最终预测结果, 分情况采取相关措施进行路基沉降量的处理与控制, 力争保证路基的稳定性, 提高高速公路的适用寿命和适用效果及安全性.

利用多预测模型进行的高速公路路基沉降量预测模型运作流程如图1所示:

2 实例分析

2.1 工程概况

中南地区某新建高速高路是贯穿湘西南的主要干道, 是国家“五纵七横”国道主干线中的重要一段, 全长将近 160 km, 设计行车速度为 90 km/h. 自工程开工以来, 发现

表1 灰色预测模型精度检验等级表

Tab. 1 Precision inspection level of grey forecasting model

精度等级	指标临界值	
	后验比值 c	小误差概率 p
一级	<0.35	>0.95
二级	<0.5	>0.80
三级	<0.65	>0.70
四级	≥ 0.80	≥ 0.60

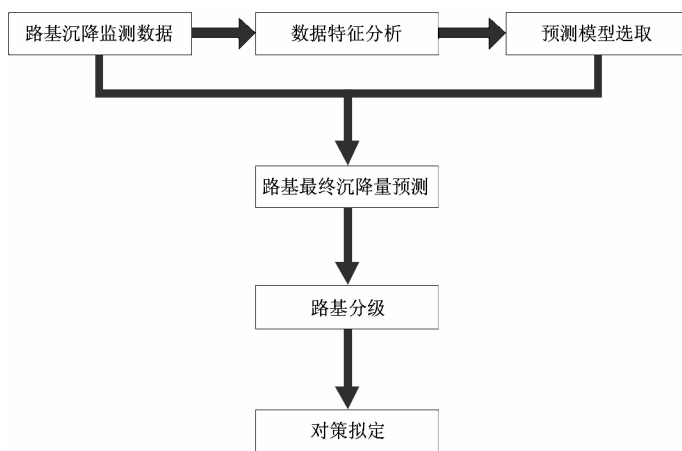


图1 模型流程图

Fig. 1 Model flow chart

个别路段由于土质松软,各项物理力学指标较差,路基沉降特别明显.为保证公路建设质量,在路基沉降特别明显的地段设置了观测点,对路基沉降量进行观测,全路段共设置监测点29个,从路基建成后每半月监测一次,共监测4个月,得到的初步数据如表2:

2.2 灰色预测模型建立

以1#监测点为例建立各灰色预测模型.

根据1#监测点4个月内监测到的数据得到1#监测点的原始序列为 $X^{(0)} = (6.2, 11.4, 14.1, 16.1, 17.8, 19.2, 20.2, 20.8)$.据此得到1#监测点的各模型如下:

(1) GM(1,1)模型

根据原始序列,得到1#监测点路基沉降量的GM(1,1)模型为

$$x^{(0)}(k) - 0.0874z^{(1)}(k) = 11.8594;$$

其时间响应序列为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 141.89e^{0.0874k} - 135.69;$$

根据时间响应序列,得到理论预测值为

$$X_1^* = (6.2, 13.0, 14.1, 15.4, 16.9, 18.4, 20.1, 21.9);$$

(2) 微分 VERHULST 模型

根据原始序列,得到1#监测点路基沉降量的微分 VERHULST 模型为

$$x^{(0)}(k) - 0.7053z^{(1)}(k) = -0.0341[z^{(1)}(k)]^2;$$

其时间响应序列为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{4.3729}{0.2114 + 0.4939e^{-0.7053k}};$$

根据时间响应序列,得到理论预测值为

$$X_2^* = (6.2, 9.6, 13.2, 16.1, 18.2, 19.4, 20.0, 20.4)$$

(3) 差分 VERHULST 模型

根据原始序列,得到1#监测点路基沉降量的差分 VERHULST 模型为

$$x^{(0)}(k) - 0.7220z^{(1)}(k) = -0.01745[(x^{(1)}(k-1))^2 + (x^{(1)}(k))^2];$$

其时间响应序列为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{4.4764}{0.2164 + 0.5056e^{-0.7220k}};$$

根据时间响应序列,得到理论预测值为

$$X_3^* = (6.2, 9.7, 13.3, 16.3, 18.3, 19.5, 20.1, 20.4)$$

2.3 精度比较

根据1#监测点的路基沉降量观测值以及各灰色模型的理论预测值,可以得到各模型的精度如表2所示:

各灰色单变量预测模型的误差比较如表3所示:

由上表可知,在各灰色预测模型中,微分 VERHULST 模型的预测精度是最高的,因此,高速公路路基沉降量应用微分 VERHULST 模型来预测其最终沉降值.

2.4 数据预测

根据全路段29个监测点所统计得到的监测数据,利用微分 VERHULST 模型对各监测点的最终路基沉降量进行预测,得到的结果如表4所示:

表2 路基沉降量监测表 单位:cm

Tab.2 Roadbed settlement monitoring unit/cm

监测次数	监测点				
	1# 监测点	2# 监测点	.....	28# 监测点	29# 监测点
第1次	6.2	5.4	.....	4.5	5.2
第2次	11.4	10.1	.....	7.6	8.8
第3次	14.1	14.8	.....	11.9	11.7
第4次	16.1	17.6	.....	15.1	13.8
第5次	17.8	19.7	.....	17.6	15.1
第6次	19.2	21.6	.....	18.8	16.4
第7次	20.2	23.7	.....	19.6	16.9
第8次	20.8	24.3	.....	20.3	17.6

由表 3 可知,路基最终沉降量小于 20/cm 的监测点数量有 12 个;最终沉降量大于 20/cm 小于 25/cm 的点有 11 个;最终沉降量大于 25/cm 的点有 6 个. 根据相似工程处理经验,对于路基最终沉降量小于 20/cm 的路段,采用比较简易的路基加固处理方式即可;对于路基最终沉降量大于 20/cm 小于 25/cm 的路段,采用比较可靠而复杂的路基加固处理方式;对于路基最终沉降量大于 25/cm 的路段,必须在仔细分析路基沉降原因后,制定专业的具有针对性的路基加固处理方式.

3 结 论

采用了多种灰色预测理论对高速公路路基沉降量预测精度进行了比较分析,选取了预测精度最高的灰色预测理论对高速公路路基最终沉降量进行了预测,并根据路基最终沉降量对各路段进行了分级,分别采取相应措施进行加固处理. 相对于以往只采用一种预测模型进行直接预测的方法,多种预测模型精度比较后再预测的方式找出最符合数据特征的预测模型,预测方式更加科学,预测结果也更加可靠.

在利用多预测理论进行数据预测时,应首先分析预测数据的特征选取合适的预测模型,其次,预测模型的预测精度范围也是和预测结果的准确性直接相关.

表 3 预测模型误差计算表

Tab. 3 Error computation table of predication model

观测值	GM(1,1)模型预测值	微分VERHULST模型预测值	差分VERHULST模型预测值
6.2	6.2	6.2	6.2
11.4	13.0	9.6	9.7
14.1	14.1	13.2	13.3
16.1	15.4	16.1	16.3
17.8	16.9	18.2	18.3
19.2	18.4	19.4	19.5
20.2	20.1	20.0	20.1
20.8	21.9	20.4	20.4
残差平方和	5.72	4.45	4.08
相对精度/%	97.24	99.11	98.85
小误差概率 p /%	100	100	100
后验比值 c	0.181 0	0.142 5	0.143 3

表 4 最终路基沉降量 单位:cm

Tab. 4 The final settlement amount unit/cm

监测点	最终沉降量	监测点	最终沉降量	监测点	最终沉降量
1 [#] 监测点	20.69	11 [#] 监测点	19.46	21 [#] 监测点	19.24
2 [#] 监测点	24.58	12 [#] 监测点	23.92	22 [#] 监测点	28.19
3 [#] 监测点	17.29	13 [#] 监测点	18.13	23 [#] 监测点	18.21
4 [#] 监测点	18.26	14 [#] 监测点	27.85	24 [#] 监测点	23.76
5 [#] 监测点	19.43	15 [#] 监测点	25.71	25 [#] 监测点	27.88
6 [#] 监测点	21.19	16 [#] 监测点	29.27	26 [#] 监测点	21.04
7 [#] 监测点	14.70	17 [#] 监测点	24.30	27 [#] 监测点	19.32
8 [#] 监测点	17.44	18 [#] 监测点	19.07	28 [#] 监测点	20.43
9 [#] 监测点	23.82	19 [#] 监测点	22.32	29 [#] 监测点	17.58
10 [#] 监测点	30.13	20 [#] 监测点	20.28		

参考文献 References

[1] 王双龙. 浅埋暗挖地铁车站地表沉降及既有线变形分析[J]. 铁道建筑技术, 2009(12): 74-78.
WANG Shuang-long. On the ground surface settlement and existing line deformation caused by the hallow burying and undercutting construction of subway station[J]. Railway Construction Technology, 2009(12):74-78.

[2] 易小明, 张顶立. 浅埋大跨隧道下穿建筑物时的变形控制标准[J]. 都市轨道交通, 2008, 21(6): 46-50.
YI Xiao-ming, ZHANG Ding-li. Study on deformation control criteria for a shallow large span tunnel underpassing building blocks[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2008, 21(6): 46-50.

[3] 吕培林, 周顺华. 软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2):12-16.
LV Pei-lin, ZHOU Shun-hua. Analysis on upper rail settlement in soft ground resulting from shield tunneling across main railway line[J]. China Railway Science, 2007, 28(2): 12-16.

[4] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 80-144.
LIU Si-feng, GUO Tian-bang, DANG Yao-guo, et al. The grey system theory and its application[M]. Beijing: Science press, 1999: 80-144.

[5] 郑海力, 陈建宏, 胡达涛. 矿山企业经济的多层次嵌套型灰色关联分析[J]. 湖南科技大学学报, 2009(4): 85-90.
ZHENG Hai-li, CHEN Jian-hong, HU Da-tao. Multi-layer nested grey incidence analysis to economic of mining en-

- terprise[J]. Journal of Hunan university of science & technology, 2009(4):85-90.
- [6] 王正新. GM(1,1)模型的特性与优化研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007:39-43.
WANG Zheng-xin. Study on the characteristics and optimization of GM (1, 1) model[D]. NanJing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007:39-43.
- [7] 邱淑芳, 周其华, 王泽文. 改进的 GM (1, 1) 模型及其在地下水环境预测中的应用[J]. 东华理工学院学报, 2006, 29(2): 176-180.
QIU Shu-fang, ZHOU Qi-hua, WANG Ze-wen. Improvement of GM (1, 1) model and its application on groundwater environments prediction[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2006, 29(2): 176-180.
- [8] 李秀珍, 孔纪名, 王成华. 灰色 GM(1,1)残差修正模型在滑坡预测中的对比应用[J]. 山地学报, 2007, 25(6):741-746.
LI Xiu-zhen, KONG Ji-ming, WANG Cheng-hua. Comparison and application of Grey GM (1, 1) modified residual error Models in landslide predicting[J]. Journal of mountain science, 2007, 25(6):741-746.
- [9] 刘玉成. 改进的灰色 Verhulst GM (1, 1) 建筑物沉降模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4):61-63.
LIU Yu-cheng. Improved gray like Verhulst GM (1, 1) building subsidence model[J]. Journal of geological disasters and prevention in China Quote, 2006, 17 (4): 61-63.

Highway roadbed settlement prediction based on comparison of gray prediction model

YU Shu

(Integrated development center of Xi'an urban construction, Xi'an 710061, China)

Abstract: The prediction of highway roadbed settlement amount is not only related to the highway construction quality and level of service, but also has an important impact on highway traffic safety at the same time. According to the measured data of roadbed settlement, a variety of gray prediction models were applied to the analysis of the data law and accuracy comparison, the optimal gray prediction model was selected to predict the roadbed final settlement amount. A reference for the evaluation of the roadbed stability and controlling to roadbed settlement is provided.

Key words: highway; roadbed; settlement; gray model; prediction