

隧道围岩位移的灰色优化模型预测

靳晓光¹, 李晓红¹, 高 芑², 亢会明³

(1. 重庆大学 西南资源开发与环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学 图书馆, 重庆 400044; 3. 四川石油勘察设计研究院, 成都 610017)

摘 要:传统灰色 GM(1,1)模型,多适用于等间距和低增长序列监测数据的模拟预测;对非等间距和高增长序列,一般经过等间距处理或经过复杂的变换建立非等间距模型进行预测,且往往产生较大的滞后误差。在时间序列 $[k, k+1]$ 区间上,用 n 个小区间的梯形面积代替 $[k, k+1]$ 区间上 GM(1,1)函数曲线对应的面积,以优化提高背景值 $z^{(1)}(k+1)$ 的精度。这种以优化灰色模型背景值为基础构建的灰色优化模型,普遍适用于隧道围岩位移等间距或非等间距以及低、高增长监测数据序列的位移预测,能很好地模拟预测隧道围岩位移的 I 型、II 型、III 型时序变化特征,且都能获得很高的模拟和预测精度。

关键词:隧道;围岩位移;监测序列;灰色优化模型;模拟预测

中图分类号:U 451⁺.2

文献标识码:A

在灰色模拟预测中,应用最广泛的是灰色 GM(1,1)模型^[1]。由于创建 GM(1,1)模型时,引入了等时距概念,因而使用 GM(1,1)模型的前提条件是建模序列必须满足等时距(或等间距)的要求^[2]。在岩土工程领域,往往存在非等间距的监测时序问题。曾有学者将非等间距序列先作等间距处理后再使用 GM(1,1)模型,处理结果往往表现出较大的近似性;或从 GM(1,1)模型建模原理出发,直接采用非等间距序列建立非等间距 GM(1,1)模型,虽然精度较高,但计算复杂^[3]。基于优化灰色模型背景值 $z^{(1)}(k+1)$ 构建的 GM(1,1)灰色优化模型,不仅表达形式简洁、计算简单、适应性强,而且克服了传统 GM(1,1)模型对高增长数据序列模拟精度不高及对非等间距序列适用性差的弱点,对提高传统 GM(1,1)模型的精度及其适应性,具有非常重要的理论价值和实践意义。

隧道围岩位移的预测预报是信息化监控设计与施工的重要环节,是了解支护形式、参数是否合理及能否保证隧道运营长期安全的关键所在。目前,对隧道围岩位移预测的方法很多,有线性—非线性回归预测、时间序列预测、灰色系统预测、神经网络模型预测等^[4],各种方法各有其特点,又有一定的局限性。研究结果

表明,灰色优化模型对隧道等地下工程围岩位移的模拟预测具有较普遍的适用性。

1 GM(1,1)模型建模机理

设原始数据列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$, $(x^{(0)}(k) \geq 0, k = 1, 2, \dots, n)$, $X^{(0)}$ 的一次累加(1-AGO)序列 $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$, $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列 $Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$, 其中

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

若 $\hat{a} = (a, b)^T$ 为参数列,且

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

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

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

其白化方程为 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (2)$

收稿日期:2001-10-25

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(中博基[2001]5号)和国家自然科学基金资助项目(50074035)

作者简介:靳晓光(1967-),男,山东宁津人,重庆大学博士后,副教授。主要从事地下工程、边坡工程及地质灾害防治等方面的教学与研究工作。

对应 GM(1,1) 灰色微分方程的时间响应序列为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-at} + \frac{b}{a};$$

$$k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

则其原始序列的模拟预测值为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) =$$

$$\left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)(e^{-a} - 1)e^{-at}; k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

由上述建模过程可以看出,拟合和预测精度取决于常数 a 和 b , 而 a 和 b 的求解依赖于背景值 $Z^{(1)}(k+1)$ 的构造形式。用均值生成 $Z^{(1)}(k+1)$ 代替背景值, 当时间间隔很小, 序列数据变化平缓时, 这样构造的 $Z^{(1)}(k+1)$ 是合适的, 模型偏差较小。但当序列数据变化急剧时, 以均值生成构造出来的 $Z^{(1)}(k+1)$ 往往会产生较大的滞后误差, 模型偏差较大^[2]; 当 $-a > 1$ 时, 不宜采用 GM(1,1) 模型^[5]。

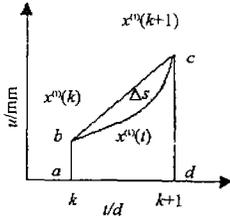


图1 $z^{(1)}(k+1)$ 构造示意图

2 灰色优化模型

从公式(1)可以看出, $z^{(1)}(k+1)$ 是 $x^{(1)}(k)$ 与 $x^{(1)}(k+1)$ 的平均值, 可以看作是 $[k, k+1]$ 区间上梯形 $abcd$ 的面积(图1)。因 GM(1,1) 模型拟合曲线是指数量曲线, 在 $[k, k+1]$ 区间上指数曲线 $x^{(0)}(t)$ 对应的曲线面积总是小于梯形 $abcd$ 的面积。序列数据变化越大, 模型误差 ΔS 越大。因此, 可以把 $[k, k+1]$ 区间划分成 n 个小区间, 消减数据序列的变化速度, 用 n 个小区间的梯形面积代替实际的曲线面积, 提高背景值 $z^{(1)}(k+1)$ 的精度。从理论上分析, 应该存在一个最优的 n 值(可以不是整数)使得这 n 个小区间的面积和等于或非接近于实际指数曲线在 $[k, k+1]$ 区间上对应的面积, 以与此对应的 n 个小区间的面积之和作为 $z^{(1)}(k+1)$, 使 GM(1,1) 模型偏差最小, 模拟和预测精度最高。以优化 $z^{(1)}(k+1)$ 为基础构建的灰色优化模型, 即能适用于低增长序列, 又能适用于高增长序列,

提高了 GM(1,1) 模型的精度和适应性。从灰色优化模型的建模机理可以看出, 背景值 $z^{(1)}(k+1)$ 与 n 值直接相关, n 值的变化与数据序列有关。所以 GM(1,1) 灰色优化模型 $z^{(1)}(k+1)$ 值不受数据序列间距大小的影响或影响较弱, 可用于非等间距隧道围岩位移的模拟预测。

一般地, n 等分区间 $[k, k+1]$ 时, n 个小区间面积之和为

$$S_n = \frac{1}{2n} [(n+1)x^{(1)}(k) + (n-1)x^{(1)}(k+1)] \quad (5)$$

$$\text{令 } z_n^{(1)}(k+1) = S_n = \frac{1}{2n} [(n+1)x^{(1)}(k) + (n-1)x^{(1)}(k+1)], n = 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

$$\text{则 } \lim_{n \rightarrow \infty} z_n^{(1)}(k+1) = \frac{1}{2} (x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)) \quad (7)$$

可以看出, n 值的确定是建立灰色优化模型的关键。文献[2]构造了一个确定等分数 n 的经验公式, 即

$$n = \left(\sum_{i=2}^N R_i \right)^{\frac{1}{N-1}} + (N-1) \quad (8)$$

式中, N 为序列长度(原始建模数据个数)

$$R_i = \frac{x^{(1)}(i)}{x^{(1)}(i-1)}, i = 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

显然, n 值与建模序列长度 N 和 1-AGO 序列 $x^{(1)}(k)$ 有关。

3 隧道围岩位移时序曲线类型

工程实践和理论分析表明, 隧道工程围岩变形位移时序曲线可归纳为图2所示的3种类型。

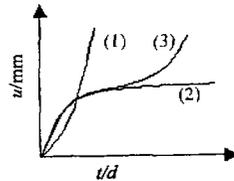
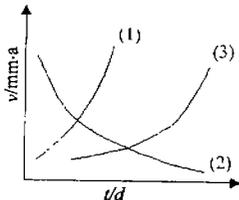


图2 位移(u) - 时间(t)曲线

3.1 I 型位移时序曲线

I 型位移时序曲线多反映未作任何处理、裸露隧道工程的围岩局部塌落特征。其特征是: 曲线为凹型(图2曲线(1)); 速度曲线为单调递增(图3曲线(1)); 加速度 a 恒大于零。I 型位移时序曲线表示变形随时间不断发展, 岩体局部或较大范围发生失稳时的反映。它发生的时间短, 出现比较突然, 如果不能及时发现并采取有效措施, 有可能导致人员伤亡或财产损失。

图3 速度(v)与时间(t)的曲线

3.2 II型位移时序曲线

II型位移时序曲线多反映已作支护处理或围岩稳定性较好的不支护隧道工程的围岩位移特征。其特点是:曲线为凸型(图2曲线(2));速度曲线为单调递减(图3曲线(2));加速度 a 恒小于零。II型位移时序曲线是隧道工程中围岩逐渐趋于稳定的反映。

3.3 III型位移时序曲线

III型位移时序曲线发生在岩质软弱、膨胀,或因应力较大而引起长期蠕变的围岩中。其特点是:曲线由开始的凸型转变为凹型(图2曲线(3));速度由开始的递减转变为递增,速度曲线有极值点(图3曲线(3));加速度 a 由开始的小于零转变为大于零,加速度存在等于零的分界点。III型位移时序曲线实为失稳蠕变曲线,其发展过程可大体分为3个阶段:第1阶段为位移迅速增长阶段;第2阶段为稳定蠕变阶段;第3阶段为加速蠕变失稳阶段,第3阶段的起点为曲线的拐点。III型位移时序曲线是隧道工程中围岩蠕变失稳的反映。

由于现场量测的偶然误差造成数据的离散性,必须进行数学处理才能获得合理的典型曲线,并以相应的数学公式进行描述,回归分析是处理量测数据的一种较好方法^[6]。研究过程中发现,应用灰色优化模型模拟预测隧道围岩的变形特征,具有较普遍的适用性和很高的模拟预测精度。

4 实例分析

4.1 I型位移时序曲线的模拟预测

这里以文献[7]20号工程III-12量测断面围岩收敛——时间序列进行分析。该断面位于断层破碎带,属V类围岩(相当于公路隧道的II类围岩)。收敛位移实测值及灰色优化模型计算预测值如图4所示,模拟预测效果较好。模型参数 $n = 10.340$, $a = -0.135$, $b = 184.031$;其GM(1,1)灰色优化模型的模拟预测方程为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 1460.126(e^{-0.135} - 1)e^{0.335(4-k)}; \quad (10)$$

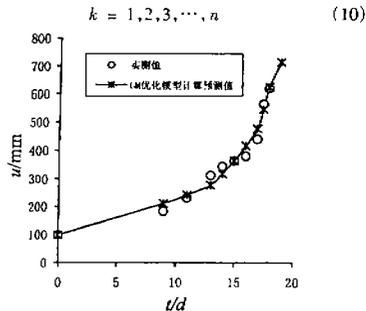


图4 I型位移时序曲线灰色优化模型模拟预测结果

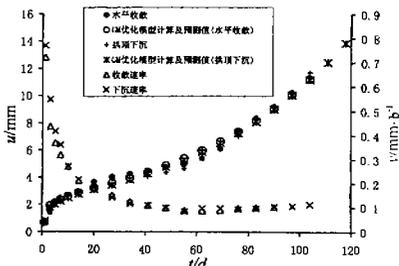


图5 II型位移时序曲线灰色优化模型模拟预测结果

4.2 II型位移时序曲线的模拟预测

II型位移时序曲线的灰色优化模型位移预测以华蓥山隧道ZK35+025断面水平收敛和拱顶下沉位移监测资料为例进行分析。ZK35+025断面处于龙王洞背斜核部,埋深较大,且地应力较高。在量测前期阶段,围岩变形较正常,变形量也相对较小,只有4.0 mm左右。但在量测到50天后,变形量仍在增大,水平收敛及拱顶下沉时序曲线呈现较明显的上弯趋势;在量测到90天后,变形仍未稳定,其变形速率也呈增大趋势。表明初期支护不能很好地约束围岩变形,变形仍在增大。在隧道新奥法施工监控量测课题研究中,应用灰色优化模型进行了模拟预测,模拟预测结果如图5所示。模型参数为:水平收敛, $n = 17.2138$, $a = -0.1044$, $b = 1.7318$;拱顶下沉, $n = 19.1946$, $a = -0.1073$, $b = 1.6284$;对应的灰色优化模型的模拟预测方程分别为:

$$\begin{aligned} \text{水平收敛: } \hat{x}^{(1)}(k+1) &= 17.309(e^{-0.1044} - 1) \\ e^{0.1044(k-1)}; \quad k &= 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{拱顶下沉: } \hat{x}^{(0)}(k+1) = 15.9515(e^{0.107} - 1)e^{0.107(k-1)}; k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (12)$$

可以看出,灰色优化模型模拟精度较高。根据该断面位移时序曲线变化趋势,及时向施工单位提供了信息,进行了补强措施。

4.3 III型位移时序曲线的模拟预测

表1 GM新陈代谢优化模型与神经网络模型模拟预测对比结果

天数/d	实测值/mm	GM新陈代谢优化模型		神经网络模型	
		计算值/mm	相对误差/%	计算值 ^[4] /mm	相对误差/%
1	6.58				
2	11.13				
3	12.74				
4	13.58				
5	14.22	14.438 8	1.54	13.95	- 1.90
6	15.58	15.433 0	- 0.94	16.38	5.13
7	17.12	16.978 3	- 0.83	17.28	0.93
8	18.12	18.277 7	0.48	17.93	- 1.43
9	18.95	18.974 2	0.13	18.51	- 2.32
10	19.20	19.320 8	0.63	19.19	- 0.05
11	19.98	19.673 7	- 1.53	19.75	- 1.15
12	19.87	20.033 0	0.82	20.14	1.36
13	20.28	20.300 0	0.10	20.39	0.54
14	20.43	20.408 9	- 0.10	20.53	0.49
15	20.52	20.587 7	0.33	20.72	0.97
16	21.17	21.021 0	- 0.70	20.95	- 1.04
17		21.306 7 [*]		20.90 [*]	
18		21.596 3 [*]		20.99 [*]	

注: * 为预测值

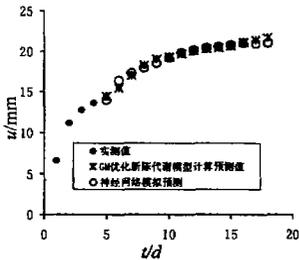


图6 灰色新陈代谢优化模型与神经网络模型模拟预测结果

可以看出,灰色优化模型非常适合于地下工程围岩III型位移时序曲线的模拟预测,其新陈代谢优化模型的模拟精度比BP神经网络模型模拟精度还高,且形式简洁,计算简单。

III型位移时序曲线的灰色优化模型模拟预测也以华蓥山隧道—典型量测断面水平收敛量测值为例进行分析。为了分析其模拟、预测精度,采用了灰色新陈代谢优化模型,并与时间延迟 $L = 4$ 、预测时步 $k = 1$ 的神经网络模型进行了对比分析。二者的模拟预测值及相对误差如表1所列,对应的对比图如图6所示。

5 结论

灰色GM(1,1)优化模型不仅具有传统GM(1,1)模型具有的形式简洁、计算简单等优点,而且适用于等间距和非等间距低、高增长变化数据序列的模拟预测,比传统GM(1,1)模型具有更高的模拟预测精度和更强的适用性。灰色优化模型普遍适用于隧道围岩I型、II型及III型位移时序曲线的模拟预测,对地下工程围岩变形破坏的预测预报具有重要的理论价值和实践意义。

参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1988.
- [2] 谭冠军. GM(1,1)模型背景值构造方法和应用[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(5):125-127.
- [3] 蒋刚,林曾生,刘祖德等. 边坡变形的灰色预测模型[J]. 岩土力学,2000,21(3):243-246.

- [4] 亢会明. 隧道围岩稳定性分析智能决策支持系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [5] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [7] 李世辉. 隧道支护设计新论—典型类比分析法应用和理论[M]. 北京: 科学技术出版社, 1999.

Application of Grey Majorized Model in Tunnel Surrounding Rock Displacement Forecasting

JIN Xiao-guang¹, LI Xiao-hong¹, GAO Peng², KANG Hui-ming³

(1. Key Laboratory for the Exploitation of South West Resources & Environmental Disaster Control Engineering ChongQing 400044, China; 2. Library of ChongQing University, ChongQing 400044, China; 3. Petroleum Exploration Design Academy of Si Chuan, Cheng Du 610017, China)

Abstract: Original grey GM(1,1) model usually be used simulation and prediction of equidistant monitoring data sequent. But to non - equidistant and high growth data sequent, the grey GM(1,1) model have to be built through equidistant treatment of non - equidistant data or non - equidistant grey model have to be built through complex transformation, and usually larger lagging error. In time sequent $[k, k+1]$ interval, in order to majorize and increase accuracy of background value $z^{(1)}(k+1)$, the area of $[k, k+1]$ interval and GM(1,1) function curve envelope has been replaced by n small interval trapezoidal area. The GM(1,1) grey majorized model is built based on majorized grey model background value generally be used simulation and prediction of equidistant or non - equidistant and low or high growth data sequent of surrounding rock displacement in tunnel. Data sequent characters of I, II and III shape of surrounding rock displacement can be simulated and predicted better by the grey majorized model, and the model has higher simulation and prediction accuracy.

Key words: tunnel; surrounding rock displacement; monitoring data sequent; grey majorized model; simulation and prediction

(责任编辑: 钟学恒)

· 下期论文摘要预告 ·

活性污泥法动力学模型研究进展和展望

卢培利, 张代钧, 刘颖, 王飞

(重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘要: 从模型的机理、功能和表述形式等方面对活性污泥法动力学模型的研究进展进行了全面的综述, 详细介绍了发展进程中具有重要意义了几种模型: Eckenfelder 模型、Mckinney 模型、Lawrence-McCarty 模型、Andrews 模型、WRe 模型及国际水协的 3 套模型, 分析比较了各自的优点和不足。结合环境微生物学研究成果和废水处理技术的发展方向, 分析讨论了活性污泥法动力学模型研究需要解决的一些重要问题, 提出今后的研究可能主要集中于废水组分的进一步细化、污水处理厂运行快速自动模拟预测及控制系统和污水处理厂设计自动化系统的开发与完善等方面。