

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.037

隧道与地下工程围岩变形的灰色优化与预测

李茂达^{1,4}, 樊磊¹, 李磊², 陈光³, 霍润科¹

(1. 西安建筑科技大学 土木学院, 西安 710055; 2. 新疆市政建筑设计研究院, 乌鲁木齐 830063;
3. 天津二十冶建设有限公司, 天津 300000; 4. 中冶东方工程技术有限公司, 内蒙古 包头 014000)

摘要:主要介绍了灰色线性回归组合模型的灰色优化和预测,并将其应用到隧道与地下工程的监控量测中。结合工程实例,通过与 GM(2,1)模型、Verhust 模型和新陈代谢模型的模拟预测进行对比,得出了在模拟预测围岩的变形特征时灰色线性回归组合模型的新陈代谢模型更具有普遍的适用性和准确的模拟预测精度。

关键词:隧道与地下工程;围岩变形;灰色优化;模拟预测

中图分类号:U451.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S2-0143-03

Tunnels and Underground Engineering Optimization and Gray Rock Deformation Prediction

Li Maoda^{1,4}, Fan Lei¹, Li Lei², Chen Guang³, Huo Runke¹

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055; 2. Xinjiang Municipal Architectural Design Institute LTD. Urumchi 830000;
3. Tianjin Twenty Construction Co., LTD Tianjin 300000; 4. Beris Engineering and Research Corporation Baotou Inner Mongolia 014000)

Abstract: This article mainly introduced the combination of gray linear regression model of the gray optimization and prediction, and applies it to the monitoring measurement of tunnel and underground engineering. Combined with engineering example, compare the grey optimization of the GM (2, 1) model, Verhust model and the metabolism model with the gray linear regression model, the metabolism model of gray linear regression model has more general applicability and accurate simulation prediction precision when predict rock deformation.

Key words: tunnels and underground engineering; rock deformation; grey optimization; prediction

随着经济和科技的快速发展,隧道与地下空间的开发与利用得到了前所未有的发展。由于围岩稳定性不足而导致的工程事故也屡见不鲜。因此,隧道与地下空间围岩的稳定性评价问题成了工程界关注的热点和难点问题。工程施工过程中围岩的力学性态受到地质作用和施工的影响,寻求正确反映岩体性态的物理力学模型是很困难的。对此,很多学者采用灰色系统理论对围岩的稳定性进行了大量的研究。

隧道与地下工程开挖施工过程中,围岩体内部的应力应变的动态变化、发展趋势以及支护结构体系的受力状态是随着围岩周边的变形变化的,通过对围岩变形进行严密监控量测,即可以得到位移-时间响应数据序列,应用灰色理论进行数据处理和优化即可预测预报围岩的周边位移,从而使围岩的稳定性达到一定的白化程度。刘辉以十漫高速公路界牌关隧道为例,引入灰色系统理论;王文广用 GM(1,1)模型对隧道围岩的演化情况进行了预测;魏建明用传统步 GM(1,1)模型建立了非等步长序列 GM(1,1)预测模型,将灰色理论更广泛的应用于实际工程中;靳晓光提出以优化灰色模型背景值为基础的灰色优化模型;李晓红提出了以 DMG(2,1)模型和 Verhulst 模型为理论的隧道及地下工程围岩极限位移预测预报方法;结合工程实例,灰色系统理论在地下工程的施

工过程中有了普遍的应用^[1-8]。

目前,对隧道与地下工程围岩变形的模拟预测方法很多,但是模拟预测的模型和方法各有其特点和适用范围。应用最广泛的是灰色 GM(1,1)模型,具有需要数据少,能弱化序列随机性的特点,它对一般模型具有很强的融合力和渗透力,但是长期预测分析时存在较大的误差;线性回归模型具有简单、方便的特点,能够粗略的模拟预测围岩的动态变化和发展趋势,但是线性模型在模拟预测围岩的“S”型变形曲线时,精度粗糙,很难是适应围岩的“S”型增长变化。

灰色系统 GM(1,1)模型的时间响应式为指数函数,一般只适用于指数变化序列,难于描述线性变化趋势。因此,根据灰色系统理论和数学原理引入灰色线性组合模型来模拟预测围岩的变形。灰色线性回归组合模型改善了原线性回归模型中没有指数增长趋势和灰色 GM(1,1)模型中没有线性增长趋势的不足,采用具有线性增长趋势和指数增长趋势的线性回归组合模型预测预报围岩的“S”型变形曲线,能较好的适应围岩的“S”型增长变化,反映围岩的实际受力情况。

1 灰色线性回归组合模型

灰色线性模型在模拟预测围岩变形过程中的一些基本

收稿日期:2013-09-30

基金项目:国家自然科学基金(41172237);国家十二五科技支撑计划(2012BAJ17B02)

作者简介:李茂达,男,硕士生,主要从事隧道的工程设计和优化与地下结构的稳定性研究,(E-mail)15029221274@qq.com。

假定:由于施工过程中围岩是一个各向异性受到地质构造和施工方法的影响的复杂受力体系,在灰色预测时将监控量测数据看成是围岩体综合的白化过程的位移时间响应数据序列;灰色线性组合模型适宜用于模拟预测不受工况干扰的“S”型围岩变形,对于在施工过程中围岩发生不稳定大变形而采用的支护结构措施或者其他施工措施而导致监控量测数据变化的工况是不合适的;本文的目的在于论述围岩变化的灰色模拟和预测,因此不考虑围岩一支护结构体系的作用机制,认为围岩的初期支护不提供支护反力。

设线性回归方程为: $Y = m + X + n$

设指数方程: $Y = 1 \times e^{(X)}$, 其中 m, n, l 为待定参数。

用线性回归方程为 $Y = m + X + n$ 和指数方程 $Y = 1 \times e^{(X)}$ 的和来构建灰色线性回归组合模型,则 $Y = 1 \times e^{(X)} + m \times X + n$ 。灰色线性组合模型通过数学处理能得到较合理的符合实际的曲线,并以相应的数学公式进行描述,推算出数据的极值,从而对隧道等地下工程围岩位移的模拟预测,这种方法具有较普遍的适用性,能够克服现场监控量测由于测试条件、环境和失误操作等因素造成监控量测数据的误差、随机波动或者离散的缺点,从提高围岩的模拟预测精度。

设围岩变形的监控量测数据为:当时间分别为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 时,围岩的位移变形分别为 $x(1), x(2), \dots, x(n)$, 则可记为 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ 。

对 $X^{(0)}$ 进行一次累加生成: $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$, 其中 $x^{(1)}(i) = \sum_{t=1}^i x^{(0)}(t) (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。

GM(1,1)模型的白化微分方程为: $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$, 其中 a, b 为待定常数。

求解微分方程得: $\hat{x}^{(1)}(t+1) = (x^{(0)}(1) - b/a)e^{(-at)} + b/a (t = 1, 2, \dots, n)$

其形式可记为: $\hat{x}^{(1)}(t+1) = C_1 e^{vt} + C_2$

因此灰色线性回归组合模型 $Y = 1 \times e^{(X)} + m \times X + n$, 结合 GM(1,1)模型,因此灰色线性组合模型生成序列可写成: $\hat{x}(t) = C_1 e^{vt} + C_2 t + C_3$, 其中 v 及 C_1, C_2, C_3 为待定参数。其求解过程如下:

设序列 $z(t) = \hat{x}^{(1)}(t+1) - \hat{x}^{(1)}(t) = C_2 e^{(vt)} [e^{(v)} - 1] + C_2$

$y_m(t) = z(t+m) - z(t) = C_1 e^{(vt)} [e^{(vm)} - 1][e^{(v)} - 1]$

$y_m(t+1) = C_1 e^{[v(t+1)]} [e^{(vm)} - 1][e^{(v)} - 1]$

$y_m(t+1)/y_m(t) = e^{(v)}$

$v = \ln[y_m(t+1)/y_m(t)]$

将式中的 $\hat{X}^{(1)}$ 换成 $X^{(1)}$, 由上式可得 v 的近似解 \hat{V} , 取不同的 m 可得不同的 \hat{V} , 取它们的平均值作为 v 的估计值 \hat{V} 。则:

$Z(t) = X^{(1)}(t+1) - X^{(1)}(t), t = 1, 2, \dots, n-1$

对于 $m = 1$ 有 $Y_1(t) = Z(t+1) - Z(t), t = 1, 2, \dots, n-2$;

$\hat{V}_1(t) = \ln[y_1(t+1)/y_1(t)], t = 1, 2, \dots, n-3$

对于 $m = 2$ 有 $Y_2(t) = Z(t+2) - Z(t), t = 1, 2, \dots, n-3$;

$\hat{V}_2(t) = \ln[y_2(t+1)/y_2(t)], t = 1, 2, \dots, n-4$

对于 $m = n-3$ 有 $Y_{n-3}(t) = Z(t+n-3) - Z(t), t = 1, 2$;

$\hat{V}_{n-3}(t) = \ln[y_{n-3}(t+1)/y_{n-3}(t)], t = 1$

计算 \hat{V} 的个数 $(n-3) + (n-4) + \dots + 2 + 1 = (n-2)(n-3)/2$

取这些 \hat{V} 的平局值为 v 的估计值 \hat{V} , 即: $\hat{V} = [\sum_{m=1}^{n-3} \sum_{t=1}^{n-2-m} \hat{V}_m(t)] / [(n-2)(n-3)/2]$

令 $L(t) = \exp(\hat{V}t), \hat{x}(t) = C_1 L(t) + C_2 t + C_3$;

令

$$X^{(1)} = \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) \\ x^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} L(1) & 1 & 1 \\ L(2) & 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L(n) & n & 1 \end{bmatrix}$$

则有 $X^{(1)} = AC$, 利用最小二乘法求解: $C = (A^T A)^{-1} A^T X^{(1)}$ 即可求得 C_1, C_2, C_3 的估计值。

即围岩变形的模拟预测序列为: $\hat{x}^{(1)}(t) = C_1 e^{vt} + C_2 t + C_3$, 当 $C_1 = 0$, 模拟预测的位移时间序列为线性回归模型; 当 $C_2 = 0$, 模拟预测的位移时间序列为 GM(1,1)模型。

将模拟预测模型 $\hat{x}^{(1)}(t)$ 累减, 则原模型的模拟预测值为: $\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k)$

新模型使得预测模型更适合围岩位移的“S”型增长曲线。因此,灰色线性组合模型是处理监控量测数据的一种较好的方法。随着系统的发展,在不断地补充新信息同时,及时的去掉老信息,建模序列更能反映系统目前的特征。从预测的角度看,新陈代谢模型是最理想的模型。尤其是系统随着量变的积累,发生质的飞跃或者突变,与过去的系统相比较,已是面目全非。去掉已根本不可能反映系统目前特征的老数据,显然是合理的。置入最新信息 $x^{(0)}(k+i)$, 去掉最老信息 $x^{(0)}(i)$, 建立新陈代谢模型: $X^{(0)} = (x^{(0)}(i+1), \dots, x^{(0)}(k), x^{(0)}(k+i))$, 其中 $i = (1, 2, \dots, n)$, 新陈代谢模型对提高灰色线性回归组合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。

2 工程实例

本文采用参考文献[2]中的工程实例进行模拟预测。该工程是重庆市西山坪隧道的一个典型量测断面,取原始数据为实测累计位移 $X^{(1)}$, 一次累减数据为 $X^{(0)}$ 。采用 DGM(2,1)模型和 Verhulst 模型,对围岩的变形位移进行预测,该模型的模拟值和预测值见表 1。本文根据隧道围岩变形位移曲线一般呈“S”型特征的基本特点,采用灰色线性组合模型和新陈代谢模型分别对围岩变形位移进行模拟预测(见表 1)。其中,DGM(2,1)模型预测数据 erhulst 模型预测数据参考文献[2]。

实测累计位移,即一次累加生成序列: $X^{(1)} = (2, 4.75, 6.63, 7.75, 8.14, 8.38, 8.53, 8.61, 8.62)$

代入计算得 v 的估计值 $\hat{V} = -0.4957$, 利用最小二乘法计算 C_1, C_2, C_3 分别为 $-12.7690, -0.1267, 9.8649$ 。则围岩的模拟预测数据序列为: $\hat{x}^{(1)}(t) = -12.7690 e^{(-0.4957t)} - 0.1267t + 9.8649$

相对误差为: $\epsilon(k) = x^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k); \Delta_k = |\epsilon(k)| / x^{(1)}(k)$;

$\Delta = \sum_{k=2}^9 \Delta_k / (n-1)$

DGM(2,1)模型的相对误差为: $\Delta = \frac{\sum_{k=2}^9 \Delta_k}{n-1} = \frac{28.3}{8} =$

3.5375%

表 1 线性和非线性 GM 模型模拟预测结果

量测时间/ d	实测位移/ mm	模型模拟值				相对误差/%			
		DGM (2,1)	Verhulst 模型	灰色线性 组合模型	新陈代 谢模型	DGM (2,1)	Verhulst 模型	灰色线性 组合模型	新陈代 谢模型
1	2.0	2.0	2.0	1.960 0					
3	4.75	3.974	4.184	4.873 5	4.739 9	16.3	11.9	2.60	0.21
5	6.63	6.447	6.406	6.598 7	6.683 2	2.3	3.4	0.47	0.80
7	7.75	7.685	7.704	7.600 0	7.666 0	0.8	0.6	1.94	1.08
9	8.14	8.268	8.234	8.160 5	8.161 8	-1.6	-1.2	0.25	0.27
11	8.38	8.549	8.418	8.452 4	8.410 7	-2.0	-0.5	0.86	0.37
13	8.53	8.696	8.478	8.580 6	8.534 3	-1.8	0.6	0.59	0.05
15	8.61	8.751	8.497	8.609 2	8.594 4*	-1.6	1.3	0.01	0.18
17	8.62	8.783	8.503	8.577 2	8.622 3*	-1.9	1.3	0.50	0.03

注:带*号为模型预测值;DGM(2,1)模型和 Verhulst 模型的模拟预测数据采用文献[2]。

Verhulst 模型的相对误差为: $\Delta = \frac{\sum_{k=2}^9 \Delta_k}{n-1} = \frac{20.8}{8} = 2.6\%$

灰色线性回归组合模型的相对误差为: $\Delta = \frac{\sum_{k=2}^9 \Delta_k}{n-1} = \frac{7.22}{8} = 0.9025\%$

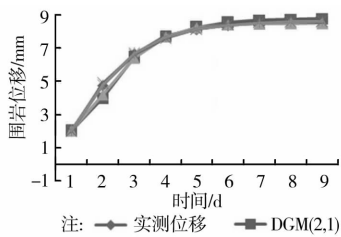


图 1 围岩位移时间曲线图

新陈代谢模型的相对误差为: $\Delta = \frac{\sum_{k=2}^9 \Delta_k}{n-1} = \frac{2.99}{8} = 0.37375\%$ 。根据灰色理论预测精度知^[9],选择相对误差最小的进行检验: $1 - 0.37375\% \approx 99.63\% > 95\%$,可见,新陈代谢模型是较好的预测模型,满足精度要求。

3 结论

灰色线性回归组合模型在围岩变形模拟预测上,从图 1 和表 1 中可以看出后期预测值有减小的趋势,对于 GM(1,1)模型的长期稳定性预测问题得到有效改善,使长期预测结果

更加保守和安全。

测隧道与地下工程围岩变形模拟预测结果在灰色线性回归组合模型模拟预测的基础上,采用新陈代谢模型优化、模拟、预测围岩的变形时间特征,新陈代谢模型具有较普遍的适用性和准确的模拟预测精度。该模型可以在围岩信息化动态施工稳定性控制系统中参考采用。

参考文献:

- [1] 丁万涛,李术才,王书刚. 龙潭隧道围岩收敛变形灰色系统预测模型[J]. 岩土力学,2006(Sup1).
- [2] 李晓红. 隧道及地下工程围岩稳定性及可靠性反分析的极限位移判别[J]. 岩土力学,2005(6).
- [3] 王文广,代高飞,皮文丽. 隧道施工监控与灰色系统预测[J]. 矿山压力与顶板管理,2005(2).
- [4] 牟瑞芳. 论隧道工程围岩稳定性及其可控制性[J]. 铁道学报,1996(8).
- [5] 靳晓光,李晓红. 隧道围岩位移的灰色优化模型预测[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2002(1).
- [6] 魏建明,张作仁,杨慧. 高速公路隧道洞口段仰坡沉降变形监测分析与预测[J]. 交通标准化,2010(4).
- [7] 霍润科,李宁,马英军. 工程岩体值选取的模糊-关联分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004(5).
- [8] 刘辉,谢俊峰,陈建平. 应用灰色系统理论预测界牌关隧道拱顶沉降[J]. 路基工程,2008(2).
- [9] 刘思峰,党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 科学出版社,2008.

(编辑 王秀玲)