

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.008

动态多变量灰色模型在危岩变形预测中的应用

王高峰,孙秀娟,孙向东,高幼龙,王洪德,乐琪浪,史学磊

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051)

摘要: 基于对传统的单点灰色模型的扩展,考虑多个点之间相互影响和关联,采用自适应 MGM(1,n) 模型,以 Matlab 语言编程,实现对变形体上相互关联的多点变形预测模型的建模,并运用该模型对望霞危岩体变形进行预测。结果表明:自适应 MGM(1,n) 模型预测值与实测值吻合较好,比传统 GM(1,1) 模型预测的危岩变形趋势效果较好、精度较高,评价结果具有更高的准确性。
关键词: 多变量灰色预测;自适应模型;危岩体;动态预测
中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)06-0508-05

Application of dynamic multi-variable grey model to predication of deformation of unstable rock

WANG Gaofeng, SUN Xiujuan, SUN Xiangdong, GAO Youlong, WANG Hongde, LE Qilang, SHI Xuele
(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, China)

Abstract: A single-point GM (1,1) model was expanded into a multi-point model with consideration of the correlation and interaction between multiple points. The self-adaptive MGM (1,n) model, was used for modeling and prediction of multi-point deformation, coded in Matlab. The model was applied to the prediction of deformation of the Wangxia Rock, which is an unstable rock. The results show that the predicted values agreed with the measured values, and the model had better effects, higher precision, and more accurate results than the traditional GM (1,1) model in predicting the deformation of unstable rocks.
Key words: multi-variable grey prediction; self-adaptive model; unstable rock; dynamic predication

从 1985 年邓聚龙^[1]提出灰色系统理论以来,灰色预测预报模型被广泛运用于许多领域。为了提高预测精度,许多专家学者对灰色理论动态微分方程模型 GM(1,1) 进行了一些改进,并从不同的角度给出了很多有益的预测模型。陈明东等^[2]首次采用 GM(1,1) 模型,对新滩滑坡的位移监测变形数据进行了预测预报试验研究;随后宴同珍等^[3]对模型进行了扩展研究,提出利用 Verhulst 生长模型对滑坡定量预测;朱瑞庚等^[4]进一步提出根据位移速率运用 GM(1,1) 模型和 Verhulst 生长模型协同对滑坡进行预测预报;赵静波等^[5]在对边坡的发展变化情况进行预测、建立阶段时间序列灰色关联预测模型基础上,以控制因素变化的阶段性来划分时间数据序列。20 世纪以来,许多专家学者对物体的变形预测提出了很多有益的研究方法,如指数平滑^[6-7]法、时间序列^[8-9]法、卡尔曼滤波^[10]法、人工神经网络^[11]法等。但以上预测方法过于单一地考虑事物的影响因素,预测模型使用单个时间序列数据建模,假如存在多个相互影响的变量时,就无法反映他们之间的相互影响及协同发展情况。然而,危岩体是一个十分复杂的非线性动态系统,影响其稳定性的因素很多。危岩体包含多个监测点且各监测点是相互影响的,单点的预测方法对反映变形体的整体变化趋势和规律缺乏可行性,没有充分利用监测点的相互关联信息。

本文结合望霞危岩第 1 次变形破坏的实例,以不同监测区块、不同形式 3 个监测点的初期实测数据为基

础,分别采用传统的 GM(1,1) 模型并在 GM(1,1) 模型的基础上进行扩展,建立多变量灰色关联预测模型^[12-14],从而实现了多点变形预测模型的建模和预测预报,验证了 MGM(1,n) 预测模型在精度和反映危岩体的变形趋势上都具有可行性的结论,可以对危岩体变形发生值做出准确的预报,对减少事故发生、保证长江航运安全具有现实意义。

1 MGM(1,n) 预测模型

1.1 MGM(1,n) 灰色关联预测模型

王志强等^[15-16]认为,单点灰色关联预测模型无法反映多个变量之间的相互影响及协同发展,对事件的预测仅仅利用单一时间序列数据;多变量模拟模型在预测过程中只体现了变量间的相互影响关系,不用于预测。而运用动态多变量灰色关联预测模型可以耦合分析变形体上各监测点之间的相关因素,对变形期间变化量做出准确预报。

危岩体的灰色预测,就是对危岩体的垂直位移和水平位移进行预测预报,监测数据从地表位移观测、山体内浅层或深层位移监测等结果得到。本文采用对监测点的累计水平相对位移量进行建模分析。假如某一变形体有 n 个相互影响、关联的变形观测点,获得了 m 个周期的变形观测数据资料,其对应的变形观测原始序列为 $\{x_i^{(0)}(k)\} (k=1,2,\cdots,m; i=1,2,\cdots,n)$, 其一次累加生成序列为 $x_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x_i^{(0)}(j) (k=1,2,\cdots,m; i=1,2,\cdots,n)$ 。考虑 n 个点相互关联和相互影响,对生成序建立多元一阶常微分方程组在区间 $[0,t]$ 上积分,进行整理可得

$$X^{(1)}(t) = e^{-At}(X^{(1)}(0) + A^{-1}B) - A^{-1}B \tag{1}$$

将式(1)写成离散形式的模型。

灰色关联预测模型 MGM(1,n) 的时间响应序列为

$$\hat{X}^{(1)}(k) = e^{A(k-1)}(\hat{X}^{(1)}(1) + A^{-1}B) - A^{-1}B \tag{2}$$

通过累减还原为相应变量原始序列的模拟预测值,然后再进行模型的平均拟合精度评价:

$$\hat{X}^{(0)}(k) = \hat{X}^{(1)}(k) - \hat{X}^{(1)}(k-1) \quad (k=1,2,\cdots,m) \tag{3}$$

式中: A 、 B ——模型参数; $\hat{X}^{(0)}(k)$ ——累减还原后相应变量的原始序列模拟预测值。

1.2 灰色等维递补动态预测 MGM(1,n) 模型

用动态多变量灰色关联预测模型进行短序列预测较为成功,但预测时间序列的不断增长及后期的外界因素扰动都对系统产生一定的影响,难以取得令人满意的结果,这是由于 MGM(1,n) 模型预测的灰平面成一喇叭形展开,即预测时刻越远预测的灰区间越大,所以用已知时间序列建立动态多变量灰色关联预测模型进行预测时,不能一直预测下去,而只是预测一个值,并将这个预测值补充在已知序列数据之后。为了不增加时间序列长度,去掉最前的已知数据,以保持数列的等维性,再建立动态多变量灰色关联预测模型,这样动态预测依次递补、逐步循环,不断填补新的数据信息,直到达成预测目的,即灰色等维递补动态预测(自适应) $M(1,n)$ 模型。

2 应用实例

2.1 危岩体基本概况

巫山县望霞危岩体为一近东西向展布的岩体,处于长江左岸斜坡上。危岩体斜坡坡向约 205° ,以土石路为界,外侧为陡崖、内侧为陡壁,平均坡度大于 85° ,相对高差 $85 \sim 125 \text{ m}$,长度大于 125 m ,总体积约 132 万 m^3 ,岩层总体产状 $(335^\circ \sim 340^\circ) \angle (3^\circ \sim 8^\circ)$ 。斜坡体南侧及西侧局部均为近百米高的临空陡崖,东部和北部与山体相连,危岩体大部分被裂缝强烈切割。在斜坡顶部发育大量的长度不等裂缝,发育三组呈羽状展布主控宽大裂缝,与陡崖延伸方向近于平行。该斜坡体自上而下由二叠系吴家坪组灰黑色薄层泥灰岩、硅质灰岩组成;中部为煤层夹泥砂岩,该层受到变形破坏时强烈的挤压揉皱作用,层滑现象明显;下部分岩性为二叠系孤峰组黑色薄层硅质岩、泥岩及白云岩,构成硬软硬相间的岩性组合形式。下部较薄软弱岩层在上部硬岩自重荷载、卸荷作用、遇水软化产生控制性裂缝的作用下不断压缩并向临空方向塑性流动,导致上覆

硬岩拉裂,岩体不断下沉和向外移动,拉张原有节理面或形成新的裂隙,表现形式为软弱基座以挤出变形为主,上部硬岩产生下宽上窄的拉张裂隙,又由于煤矿开挖等原因使得危岩体失去支撑面,导致望霞危岩体于2010年10月21日发生崩塌灾害。

2.2 模型预测

选取望霞危岩体不同监测区块(危岩体后缘 T10 号缝区、孤立岩柱底部区域及 T11 号缝区)、对应不同形式的 3 个监测点(GPS05 点位、全站仪监测 LW04 点位及裂缝位移计监测点 T11 号点位)的同期实测位移数据为基准进行建模并预测。

取多点变形数据 $n=3$,即选取 3 个监测点(分别用 x_1 、 x_2 、 x_3 表示),原始测量数据取自 2010 年 8 月 28 日至 10 月 3 日的观测资料,以 4 d 为一时间周期,共选取 $m=10$ 个时间周期测量处理的水平累计变形观测序列变形值,其中后 2 个时间周期测量数据用来验证预测结果的可靠性,前 8 个时间周期测量数据用于建模。首先分别采用 MGM(1,3)动态多变量灰色关联预测模型以及单点灰色 GM(1,1)预测模型,将实际观测数据与分别用 2 种方法得到的拟合数据及其预测值进行对比研究。然后以 Matlab 软件为计算平台,运行多点模型的计算程序,并输入所选取的 3 个监测点的原始观测序列,即可得到模型的参数及模拟结果,见表 1。其中模型参数 A 、 B 为

$$A = \begin{bmatrix} 0.5115 & -0.3108 & -0.0052 \\ 0.4003 & 0.3218 & -0.3901 \\ 0.2042 & 0.2425 & -0.0684 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 15.9391 \\ 8.7935 \\ 11.5322 \end{bmatrix}$$

经计算求得预测模型的拟合精度为 $\sigma^2=0.64$ 。多点因素预测模型的拟合、预报数据与实测数据的比较结果见表 1。为证明多点预测模型的可靠性及有效性,列出了单点模型的计算参数及预测结果,见表 2。单点模型参数 $\alpha_1=-0.2100$ 、 $\mu_1=21.1067$; $\alpha_2=-0.2685$ 、 $\mu_2=16.2711$; $\alpha_3=-0.3077$ 、 $\mu_3=15.6411$ 。计算得到的 GPS05 号 MGM(1,3)模型精度为 1.11%、GM(1,1)模型精度为 3.01%; LW04 号 MGM(1,3)模型精度为 0.78%、GM(1,1)模型精度为 7.69%; T11 号 MGM(1,3)模型精度为 0.66%、GM(1,1)模型精度为 4.36%。因此所建的多变量灰色关联预测模型计算出所选取模拟测量点位的平均相对误差都不超过10%,且比单点

表 1 MGM(1,3)模型模拟结果与实测结果比较

Table 1 Comparison of simulated results of MGM (1,3) model and measured results										mm
序号	拟合及预测序列			实测值序列			残差序列			
	$\hat{x}_1^{(0)}(k)$	$\hat{x}_2^{(0)}(k)$	$\hat{x}_3^{(0)}(k)$	$x_1^{(0)}(k)$	$x_2^{(0)}(k)$	$x_3^{(0)}(k)$	$v_{(1)}(k)$	$v_{(2)}(k)$	$v_{(3)}(k)$	
1	7.47	3.08	5.78	7.47	3.08	5.78	0.00	0.00	0.00	
2	22.14	13.74	16.55	21.83	13.89	16.82	-0.31	0.15	0.27	
3	29.81	21.79	24.69	30.16	21.89	24.77	0.35	0.10	0.08	
4	38.79	32.37	36.13	39.42	32.51	36.79	0.62	0.14	0.66	
5	48.94	45.39	51.48	48.45	44.97	51.74	-0.49	-0.42	0.26	
6	60.07	60.36	71.22	60.24	60.89	71.75	0.17	0.53	0.53	
7	72.18	76.40	95.60	72.94	75.29	95.91	0.77	-1.11	0.31	
8	85.67	92.28	124.65	86.91	91.84	125.05	1.24	-0.43	0.40	
9	101.75	106.70	158.25	102.53	107.97	159.04	0.78	1.27	0.79	
10	122.90	118.76	196.36	120.04	119.83	195.35	-2.87	1.07	-1.02	

表 2 GM(1,1)模型的模拟结果与实测结果比较

Table 2 Comparison of simulated results of GM (1,1) model and measured results										mm
序号	拟合及预测序列			实测值序列			残差序列			
	$\hat{x}_1^{(0)}(k)$	$\hat{x}_2^{(0)}(k)$	$\hat{x}_3^{(0)}(k)$	$x_1^{(0)}(k)$	$x_2^{(0)}(k)$	$x_3^{(0)}(k)$	$v_{(1)}(k)$	$v_{(2)}(k)$	$v_{(3)}(k)$	
1	7.47	3.08	5.78	7.47	3.08	5.78	0.00	0.00	0.00	
2	25.23	19.61	20.40	21.83	13.89	16.82	-3.40	-5.72	-3.58	
3	31.13	25.65	27.74	30.16	21.89	24.77	-0.97	-3.76	-2.97	
4	38.40	33.55	37.74	39.42	32.51	36.79	1.02	-1.04	-0.95	
5	47.38	43.88	51.34	48.45	44.97	51.74	1.08	1.09	0.40	
6	58.45	57.40	69.83	60.24	60.89	71.75	1.79	3.49	1.92	
7	72.10	75.07	94.98	72.94	75.29	95.91	0.84	0.22	0.93	
8	88.95	98.19	129.20	86.91	91.84	125.05	-2.04	-6.35	-4.15	

灰色关联预测模型能更全面地考虑相互关联变量的结果,预测值具有较好的准确性。

3 预测结果综合分析

利用灰色等维递补动态预测(自适应) $M(1,n)$ 模型,将预测出的数据值填补到最后,去掉最早的一个数据值,如此反复,直到预测出第 12 个周期的测量点位水平累积变形量,结果见 3。

表 3 自适应 MGM(1,3) 模型预测值与 MGM(1,3) 模型预测值结果比较
Table 3 Comparison of predicted results of self-adaptive MGM (1,3) model and MGM (1,3) model

序号	实测值/ mm	GPS05 号 MGM(1,3) 模型			GPS05 号自适应 MGM(1,3) 模型		
		预测值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	预测值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
9	102.53	101.75	0.78	0.76	101.75	0.78	0.76
10	120.04	122.90	2.87	2.39	117.49	2.55	2.12
11	147.73	153.45	5.72	3.87	145.73	2.00	1.35
12	193.17	200.14	6.97	3.61	189.32	3.85	1.99

为了对比研究,验证了危岩体 GPS05 号 MGM(1,3) 模型的预测平均相对误差为 2.66%,而 LW04 号运用 MGM(1,3) 模型得到的平均相对误差 1.45%,运用自适应 MGM(1,3) 模型平均相对误差 1.04%;T11 号运用 MGM(1,3) 模型得到的平均相对误差 0.67%,运用自适应 MGM(1,3) 模型平均相对误差为 0.50%。由表 3 看出,灰色等维递补动态预测模型预测精度比多变量灰色关联预测模型的预测精度高,这是因为多变量灰色关联预测模型预测所得的序列区间逐渐增大而误差反而随着增大,甚至很难得到较为满意的结果,为了适应较长时间序列的预测期,采用灰色等维递补动态预测模型时取得了明显效果。

通过以上对比分析,再次运用自适应 MGM(1,3) 模型预测更长的时间序列,以预测危岩体变形破坏的时间。危岩体由于在 2010 年 8 月 16 日受到强降雨的影响,产生明显的变形,后缘浅表层强卸荷带及裂隙集中张开明显,但总体变形较小,在第 1~4 个周期时处于初始蠕变期;当雨水下渗到裂隙中,在静水压力作用下,使原有及本来不明显裂缝出现向下延伸、张裂,有的甚至延伸至危岩体底部,危岩体整体上变形明显,在第 5~11 个周期处于匀速蠕变期;随着地表水下渗浸泡使软基座强度逐渐降低、塑流变形明显加剧,进而也加大了危岩体的下滑力。在斜坡变形破坏过程中,T10 缝下挫明显,最大可达约 2.5 m,裂缝与陡壁基本贯穿,T11 缝的附近塌陷坑继续加大、加深,孤立岩柱变形不明显,在此周期内,开始 T11 号缝区变形最大,其次在危岩的后缘 T10 号缝区。随着时间的推移,由于危岩体后缘顶部出露的地层为第四系全新统透水性较差的粉质黏土层,具有一定的阻水作用,当雨水或地下水渗入至该裂隙中,在 T10 裂缝之间产生静水压力,随着降水不断地渗入至煤系地层中,在软硬接触面形成扬压力,导致斜坡基座的软化,使 T10 裂缝缝区坡体极不稳定。危岩体 12~18 周期为加速蠕变期,在第 18 个周期之后开始剧变破坏,发生崩塌灾害。灾害发生时间比运用自适应 MGM(1,3) 模型预测的时间(2010 年 11 月 7 日)滞后了 18 d,根据预测的情况,政府部门加强了对长江航运的管制,并有时间疏散当时居民,同时施工单位根据监测结果及预测时间调整了施工工序,避免了人员伤亡及严重的经济损失。

4 结 语

根据选取恰当的危岩体不同区域典型监测点的水平累积变形量,研究了动态多变量灰色关联预测模型及其在危岩预测分析中的应用。危岩变形是一个复杂的非线性系统,不仅具有内在的规律性,也具有一定的随机性,同时也受多种内外因素影响。而多变量灰色关联预测模型既能适用于小样本量的情况,又能很好地考虑到多个相关影响因素,比传统 GM(1,1) 模型进行危岩变形预测效果较好、精度较高;为了适当延长预测期,预测危岩破坏时间,采用了灰色等维递补动态预测模型,即自适应 MGM(1,n) 模型。研究表明,该方法预测精度更高、速度较快,预测结果可为现场施工及长江航运提供有价值的信息,在工程实践中具有良好的应用价值。危岩灾害的预测也是危岩体灾害防治的一种有效手段,在目前的技术和经济条件下,很多危岩灾害只有通过仪器的监测并及时准确的预测预报来减轻灾害的损失,根据实际情况验证,利用自适应 MGM(1,n) 模型来预测预报危岩灾害的发生发展,具有十分有效的实用价值。

参考文献:

[1] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中工学院出版社,1985.

- [2] 陈明东,王兰生.新滩滑坡的灰色预报分析法[C]//新滩滑坡讨论会文集.宜昌:中国地质学会工程地质专业委员会,1985.
- [3] 宴同珍,伍法权,殷坤龙.滑坡系统静态规律及斜坡不稳定空时定量预测[J].地球科学,1989,14(2):117-133.(YAN Tongzhen,WU Faquan,YIN Kunlong. Static and dynamic regularity of landslides and space-time prognosis of slope instability [J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences,1989,14(2):117-133.(in Chinese))
- [4] 朱瑞赓,彭胜平.地下洞室围岩变形监测及灰色预测预报[C]//国际滑坡与岩土工程学术会议论文集Ⅱ.武汉:国际土力学与岩土工程学会滑坡委员会,1991:287-292.
- [5] 王高峰,王洪德,薛星桥,等.巫山县望霞危岩体破坏及再次变形失稳预测分析[J].自然灾害学报,2012,21(6):164-172.(WANG Gaofeng,WANG Hongde,XUE Xingqiao,et al. Failure analysis of Wangxia dangerous rock mass in Wushan County and prediction its next deform and instability[J]. Journal of Natural Disasters,2012,21(6):164-172.(in Chinese))
- [6] 赵静波,李莉,高谦.边坡变形预测的灰色理论研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):5799-5802.(ZHAO Jingbo,LI Li,GAO Qian. Research and application of the grey theory to slope deformation prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(2):5799-5802.(in Chinese))
- [7] 尹光志,张卫中,张东明,等.基于指数平滑法与回归分析相结合的滑坡预测[J].岩土力学,2007,28(8):1725-1728.(YIN Guangzhi,ZHANG Weizhong,ZHANG Dongming,et al. Forecasting of lands-lide displacment ased on exponential smoothing and nonlinear regression analysis[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(8):1725-1728.(in Chinese))
- [8] 李远耀,殷坤龙,程温鸣.R/S分析在滑坡变形趋势预测中的应用[J].岩土工程学报,2010,32(8):1291-1296.(LI Yuanyao,YIN Kunlong,CHENG Wenming. Application of R/S method in forecast of landslide deformation trend[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(8):1291-1296.(in Chinese))
- [9] 贺可强,孙林娜,王思敬.滑坡位移分形参数Hurst指数及其在堆积层滑坡预报中的应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1107-1115.(HE Keqiang,SUN Linna,WANG Sijing. Displacement fractal parameter Hurst index and its application to prediction of debris landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(6):1107-1115.(in Chinese))
- [10] 谢先保.卡尔曼滤波在监测变形分析中的应用[J].长江大学学报:自然科学版,2010,7(1):300-302.(XIE Xianbao. Application of Kalman filtering in analysis of deformation monitoring[J]. Journal of Yangze University:Natural Science Edition,2010,7(1):300-302.(in Chinese))
- [11] 潘国荣,谷川.BP算法改进及其在变形数据处理中的应用[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(4):118-121.(PAN Guorong,GU Chuan. Back propagation algorithm improvement and its application to deformation monitoring data processing [J]. Journal of Tongji University:Natural Science,2008,36(4):118-121.(in Chinese))
- [12] 冯志,李兆平,李伟.多变量灰色系统预测模型在深基坑围护结构变形预测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):4319-4324.(FENG Zhi,LI Zhaoping,LI Yi. Application of a multi-point grey model to deformation predictin of supporting structure for deep pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(2):4319-4324.(in Chinese))
- [13] 夏元友.滑坡灰色系统预测模型及其应用[J].自然灾害学报,1995,4(1):74-78.(XIA Yuanyou. Grey system prediction model of landslide and its application[J]. Journal of Natural Disasters,1995,4(1):74-78.(in Chinese))
- [14] 周小俊,田金国,谷川.灰色关联预测及其在变形预测中的应用[J].铁道勘察,2009(1),28-30.(ZHOU Xiaojun,TIAN Jinguo,GU Chuan. Forecasting of grey correlative approach as well as its application in deformation forecasting [J]. Railway Investigation and Surveying,2009(1):28-30.(in Chinese))
- [15] 王志强,朝伦巴根,柴建华.用多变量灰色预测模型模拟预测参考作物蒸散量的研究[J].中国沙漠,2007,27(4):584-587.(WANG Zhiqiang,Chaolunbagen,CHAI Jianhua. Simulation and prediction of reference crop EV apotranspiration with grey multi-variable model [J]. Journal of Desert Research,2007,27(4):584-587.(in Chinese))
- [16] 刘国华,何勇兵,汪树玉.土石坝沉降预测中的多变量灰色预测模型[J].水利学报,2003,34(12):84-90.(LIU Guohua,HE Yongbing,WANG Shuyu. Application of grey multi-variable forecasting model for the settlement of earth dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(12):84-90.(in Chinese))