

滑坡监控信息分析中的修正灰色系统 预测模型及应用

谢 锋¹, 朱陆明², 王立忠¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江恒业房地产开发公司, 浙江 杭州 310009)

摘要: 在灰色系统全数据 GM(1, 1)模型基础上, 经过新陈代谢过程、分阶残差修正和权重修正, 依次建立了多个不同修正方式的模型, 建模过程考虑了实测信息的非等间隔性。结合富阳来龙山滑坡监控信息, 对位于滑坡体主滑段, 历时 4 个典型滑移阶段的 B14 测孔滑带土位移作预测分析, 经过各模型精度检验比较表明, 所提出的二阶残差权重修正 GM(1, 1)模型大幅提高了预测精度和适应性。

关键词: 工程地质; 滑坡; 灰色系统预测模型; 修正 GM(1, 1)模型; 残差; 权重

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)22 - 4099 - 07

MODIFIED GREY SYSTEM FORECASTING MODEL AND ITS APPLICATION FOR ANALYZING INFORMATION OF LANDSLIDE MONITORY

XIE Feng¹, ZHU Lu-ming², WANG Li-zhong¹

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;*

2. Zhejiang Hengye Real Estate Co., Hangzhou 310009, China)

Abstract: Based on the all data GM(1, 1) model of grey system, different modified models are set up in their given order through out the course of metabolism, residual error modified of different rank, and weighted modified. In setting up the model, unequal intervals in the data of the actual measure are considered; and equal intervals of grey system forecasting model are extended to unequal ones. Together with the information of landslide monitored in Lailong Mountain in Fuyang City, the inclinometer B14, which lies in the active slide area and lasts four typical sliding phases, is studied in the course of where the displacement in sliding zone is forecasted and analyzed comparatively by the computational programs of various models. The result of model precision test shows that the residual error of two rank and weighted modified GM(1, 1) model can greatly improve the forecasting precision and adjustability.

Key words: engineering geology; landslide; grey system forecasting model; modified GM(1, 1) model; residual error; weight

1 引 言

近年来, 国内外许多学者提出了许多滑坡预测预报方法, 从传统的安全系数法到模糊理论综合评

判方法, 从斋滕法到人工智能的引入, 这些方法在实际工程中都得到大量的应用。但由于滑坡地质条件的复杂、自然条件的变化以及人类工程活动等外在因素的随机性和不可控制性, 使滑坡的孕育乃至爆发成为一种徐变→突变→徐变的累进性过程, 导

收稿日期: 2004 - 06 - 07; **修回日期:** 2004 - 08 - 16

作者简介: 谢 锋(1979 -), 男, 2005 年于浙江大学土木工程专业获工学硕士学位, 主要从事边坡工程方面的研究工作。E-mail: tiancify@163.net。

致相关预测预报方面的研究远没有达到较高的研究深度和预报精度。

基于这种现状，文[1~5]将滑坡系统视为灰色系统，引入了灰色系统理论进行研究。任何一个本征性灰色系统，其行为必然受到多因素的影响，为了得到实用性模型，达到预测的目的，灰色预测所选用的模型一般为GM(1, 1)模型^[6]，以期对滑坡系统变形信息进行模拟和预测。目前国内外学者考虑到GM(1, 1)模型的局限性，对其作过初步的改进^[7, 8]；而本文以滑坡长期监控信息为基础，通过深部位移的监控准确地掌握正在活动的滑动面的位置、滑坡体随深度的位移变化和所处滑移阶段，应用修正的灰色系统预测模型对能够反映岩土体位移变形特征的滑带土位移进行预测分析。通过全面修正，为滑坡监控信息分析提供了精度更高的预测模型。

2 灰色预测模型的修正

2.1 传统的全数据 GM(1, 1)模型

首先，对原始数据信息列 $x^{(0)}$ 做一次累加生成得到 $x^{(1)}$ ，即

$$\left. \begin{aligned} x^{(0)} &= \{x_{(1)}^{(0)}, x_{(2)}^{(0)}, \dots, x_{(n)}^{(0)}\} \\ x^{(1)} &= \{x_{(1)}^{(1)}, x_{(2)}^{(1)}, \dots, x_{(n)}^{(1)}\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $x_{(i)}^{(1)} = \sum_{k=1}^i x_{(k)}^{(0)} (i=1, 2, \dots, n)$ 。

白化微分方程式为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (2)$$

式中： a, u 为内生变量，且有 $\{a, u\}^T = \hat{a}$ ， \hat{a} 为待识别参数列，根据最小二乘原理，可得

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \quad (3)$$

其中，

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x_{(1)}^{(1)} + x_{(2)}^{(1)}) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x_{(2)}^{(1)} + x_{(3)}^{(1)}) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x_{(n-1)}^{(1)} + x_{(n)}^{(1)}) & 1 \end{bmatrix}, Y_N = \begin{bmatrix} x_{(2)}^{(0)} \\ x_{(3)}^{(0)} \\ \vdots \\ x_{(n)}^{(0)} \end{bmatrix}$$

模型的微分方程解为

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_{(k+1)}^{(1)} &= \left(x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a}\right)e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (k>1, \text{ 且为正整数}) \\ \hat{X}_{(1)}^{(1)} &= x_{(1)}^{(0)} \quad (k=1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

然后，对微分方程解做一次累减生成，得到还原值 $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$ ，此即为此模型解答值。当 $k \leq n$ 时， $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$ 可作为校验值；当 $k > n$ 时， $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$ 可作为预测值^[9]。

2.2 新陈代谢 GM(1, 1)模型

滑坡演化是一个时效的累进性破坏过程，在这个过程中，由于外在水文地质条件的变化、人类工程活动的影响使滑坡土体的构造、强度、形变等因素的变化不断进入系统，老数据信息的意义将随着时间的推移而降低。新陈代谢的过程是：每补充一个信息，就去掉一个最老的数据，以保持数据的维数，改善预测数据规划性的缺陷，从而提高预测的准确性^[10]。本文通过编写的MF子程序，在新陈代谢过程中，实现等维信息条件下可选择全数据中任意点作为初始点，然后逐点推移计算，进行预测。

2.3 分阶残差修正 GM(1, 1)模型

为了提高模型预测的精度，通常用残差来修正原模型。本文提出了2种不同阶的残差修正原模型，并进行了分析比较。

(1) 一阶修正模型：还原→修正→叠加→还原

① 对原白化微分方程的解做一次累减生成后，还原为 $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$ ，建立残差列为

$$E_{1(k)}^{(0)} = x_{(k)}^{(0)} - \hat{X}_{(k)}^{(0)} \quad (5)$$

② 对残差列 $E_{1(k)}^{(0)}$ 建立 GM(1, 1)模型，即

$$\hat{E}_{1(k+1)}^{(1)} = \left(E_{1(1)}^{(0)} - \frac{u_{e1}}{a_{e1}}\right)e^{-a_{e1}k} + \frac{u_{e1}}{a_{e1}} \quad (6)$$

式中： a_{e1}, u_{e1} 均为一阶残差修正待识别的参数。

③ 对原白化微分方程的解与残差列的 GM(1, 1)模型的解叠加得到修正后的解 $\hat{Y}_{1(k+1)}^{(1)}$ 为

$$\hat{Y}_{1(k+1)}^{(1)} = \hat{X}_{(k+1)}^{(1)} + \hat{E}_{1(k+1)}^{(1)} =$$

$$\left(x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a}\right)e^{-ak} + \left(E_{1(1)}^{(0)} - \frac{u_{e1}}{a_{e1}}\right)e^{-a_{e1}k} + \frac{u}{a} + \frac{u_{e1}}{a_{e1}} \quad (7)$$

④ 对 $\hat{Y}_{1(k)}^{(1)}$ 作一次累减生成，得到还原值 $\hat{Y}_{1(k)}^{(0)}$ 。

(2) 二阶修正模型：修正→还原→叠加→还原

① 对原始数据列作一次累加生成后，与原白化微分方程的解建立残差列为

$$E_{2(k)}^{(1)} = X_{(k)}^{(1)} - \hat{X}_{(k)}^{(1)} \quad (8)$$

② 对残差列 $E_{2(k)}^{(1)}$ 建立 GM(1, 1)模型，即

$$\hat{E}_{2(k+1)}^{(2)} = \left(E_{2(1)}^{(1)} - \frac{u_{e2}}{a_{e2}}\right)e^{-a_{e2}k} + \frac{u_{e2}}{a_{e2}} \quad (9)$$

式中: a_{e2} , u_{e2} 均为二阶残差修正待识别的参数。

③ $\hat{E}_{2(k)}^{(2)}$ 作一次累减生成, 还原为 $\hat{E}_{2(k)}^{(1)}$, 再与原始白化微分方程的解 $\hat{X}_{(k)}^{(1)}$ 叠加得到修正后的解 $\hat{Y}_{2(k)}^{(1)}$ 。

④ 对 $\hat{Y}_{2(k)}^{(1)}$ 作一次累减生成, 得到还原值 $\hat{Y}_{2(k)}^{(0)}$ 。

从建模计算过程来看, 一阶修正模型是原始数据与 GM(1, 1) 模型预测值的残差作一次修正, 而二阶修正模型是原始数据一次累加生成值与 GM(1, 1) 模型白化微分方程的解之间的残差作一次修正, 将原始数据视为零阶, 2 个修正模型都是同阶修正, 其实质分别是一阶和二阶修正。计算表明, 高阶修正的精度高于低阶修正。本文通过编制的 REMF1, REMF 2 子程序, 在新陈代谢 GM(1, 1) 模型的基础上, 分别加入 2 种修正形式进行计算比较。

2.4 残差 GM(1, 1) 模型的权重修正

新陈代谢模型, 是吐故纳新, 保持等维, 逐点进行推移计算; 残差模型, 是在已经计算得到的 GM(1, 1) 模型微分方程的解之后作修正, 两者都无法在同维信息 GM(1, 1) 模型内, 作中间修正。为了进一步提高预测精度, 本文提出在新陈代谢以及分阶残差修正的基础上, 在同维位移信息内预测时, 加入权重的修正, 即在计算待识别的参数列 \hat{a} 时, 引入权重对角矩阵 P , 即有

$$B\hat{a} = Y_N \tag{10}$$

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & p_{n-2} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & p_{n-1} \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中: $p_1, p_2, \dots, p_{n-2}, p_{n-1}$ 均为权重因子。

同时对 B 和 Y_N 作权重修正, 对式(10)两边同左乘权重对角矩阵 P , 即

$$PB\hat{a} = PY_N \tag{12}$$

由最小二乘原理, 可得到参数列的算式为

$$\hat{a} = (B^T PB)^{-1} B^T PY_N \tag{13}$$

从而计算可得

$$\hat{a} = \{a_p, u_p\}^T \tag{14}$$

式中: a_p, u_p 均为经过权重修正后待识别的参数。

经权重修正后得模型解为

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_{(k+1)}^{(1)} &= \left(x_{(1)}^{(0)} - \frac{u_p}{a_p} \right) e^{-a_p k} + \frac{u_p}{a_p} \quad (k > 1, \text{ 且为正整数}) \\ \hat{X}_{(1)}^{(1)} &= x_{(1)}^{(0)} \quad (k = 1) \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

本文利用编制的 REWMF 1, REWMF 2 子程序, 在新陈代谢 GM(1, 1) 模型分阶残差修正的基础上, 对模型内在参数计算加入权重因子。笔者认为, 预测模型中各样本信息值对预测值的影响权重是不同的, 与所预测值在时间上越邻近, 其样本权重相应越大; 权重的选择同时与期望预测的数目个数和模型的新陈代谢样本个数有关。因此, 本文在具体算例中采用的权重因子 $p_1, p_2, \dots, p_{n-2}, p_{n-1}$ 分别对应为: $1^v, 2^v, \dots, (n-2)^v, (n-1)^v$ 。其中: v 为模型新成代谢样本个数与期望预测的数据个数的比值, 以此实现计算过程的权重修正。

3 工程应用

3.1 工程概况

来龙山位于富阳镇东北侧, 其西麓是富阳二中和亚热带林业研究所林场, 南麓是亚热带林业研究所办公区。地形地貌为低山丘陵, 山脊走向约 NE40°, 坡向 NW50°, 山脊高程为 100~150 m。山坡上陡下缓, 多呈台阶状, 高程 40 m 左右为平台, 坡脚为虎山路和大桥路, 虎山路西侧紧邻北渠。场地植被发育, 高程约 80 m 以上为灌木, 以下主要为亚热带林业研究所植物种植区。

20 世纪 70 年代来龙山西麓山脚开挖北渠以后, 山体时有滑坡现象发生, 此后虎山路拓宽及二中操场的开挖使滑坡现象日益明显。因富阳二中体艺馆部位切坡建设, 在 2001 年梅雨季节时发现山体发生滑坡, 造成体艺馆东侧梁柱严重偏位, 最大偏位达 25 cm, 地面最大隆起量为 8 cm, 混凝土地面开裂严重; 体艺馆东坡上的竹林部位, 也发现多级滑坡裂缝, 裂缝最大可视深度约 3 m, 宽度约 0.5 m; 附近的二中篮球场东南地坪也局部隆起。

笔者所在的课题研究组于 2001 年 9~11 月对东至来龙山西麓山脊、南至亚热带林业研究所办公区、西至北渠、北至二中食堂的来龙山西麓分区进行了工程勘察, 一期共埋设 16 个测斜管, 12 个水位管, 建立了变形监测网, 监测平面布置见图 1^[11]。

从 2001 年 11 月起, 对测斜管深部水平位移、

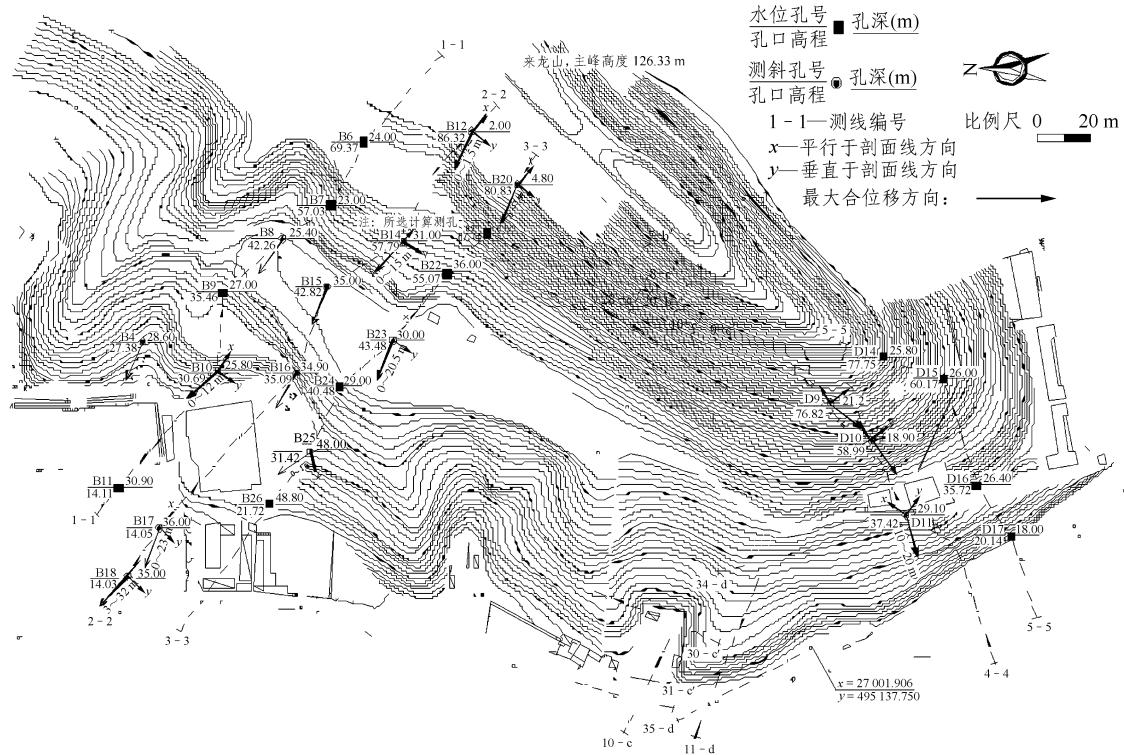


图 1 来龙山监测平面布置示意图

Fig.1 Plane arrangements of landslide monitoring in Lailong Mountain

水位管水位进行定期监测；从 2003 年 9 月滑坡治理工程开始，进行二期治理工程监测。

3.2 滑坡位移监控

通过 2001 年 11 月至 2004 年 2 月长达 2 a 多的定期监测，得到监测孔的深度 - 位移曲线图^[12]，考察位于滑坡体主滑段的毛竹林中具有代表性的 B14 测孔，由连续 2 a 深部水平位移 - 时间曲线(见图 2)，可以清晰看到深部水平的累积位移值在每个时点的发展过程：在 2002 年 4 月中旬以前，位移较小，相应的位移速率也较小；而从 4 月下旬开始，富阳地区降雨增多，位移开始明显增加，位移速率也明显加快；至 7 月上旬，富阳最大日降雨量达到 141.3 mm，位移有较大发展，位移速率最大可达 20.8 mm/d，发生在地表下 8 m 处，整个滑坡处于明显滑动状态。此后，富阳地区降雨强度减小，频率也下降，测斜孔处土体位移呈现缓慢发展，位移速率逐渐减小。至 2004 年 2 月上旬，该孔深部 8 m 处累积的水平位移近 300 mm，滑动面非常明显，位于地表下 8~15 m，滑带土基本位于粉质粘土层。

3.3 滑带土位移信息修正灰色系统预测模型的建立步骤

(1) 原始数据的生成

由于实际工程中，位移信息是如图 2 所示的非

等时空距的数据序列，而灰色预测 GM 模型都是以等时空距序列建模的，所以实际应用中必须将等时空距的灰色预测模型推广到非等时空距序列，将图 2 非等时的滑坡位移信息原始序列作离散型非等时空距 GM(1, 1)模型变换^[6]，通过插值变换，转化为等时空距序列。图 3 所示为转化后 B14 孔深 8, 10, 13, 15 m 处滑带土水平位移 - 降雨量 - 时间曲线，滑带土经历了 4 个典型滑移阶段^[13]：① 破坏前的稳定滑移阶段(pre-failure stage)；② 首次破坏加速滑移阶段(first failure stage)；③ 破坏后的稳定滑移阶段(post-failure stage)；④ 偶然激发滑移阶段(occasional reactivation stage)。

(2) 模型计算

选定转化后的等时空距序列和新陈代谢与目标预测位移信息的维数，分别进行全数据预测(ADF)、新陈代谢预测(MF)、分阶残差修正预测(REMF1, REMF2)以及分阶残差权重修正预测(REWFM1, REWFM2)。

(3) 模型精度检验

残差检验是以模型计算序列 $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$ 与原始序列 $X_{(k)}^{(0)}$ 的相对误差绝对值的平均值(本文记为 T)作为模型精度检验指标^[6]。笔者认为，将全体原始的序列作为检验对象，很大程度上是对模型的校验，从

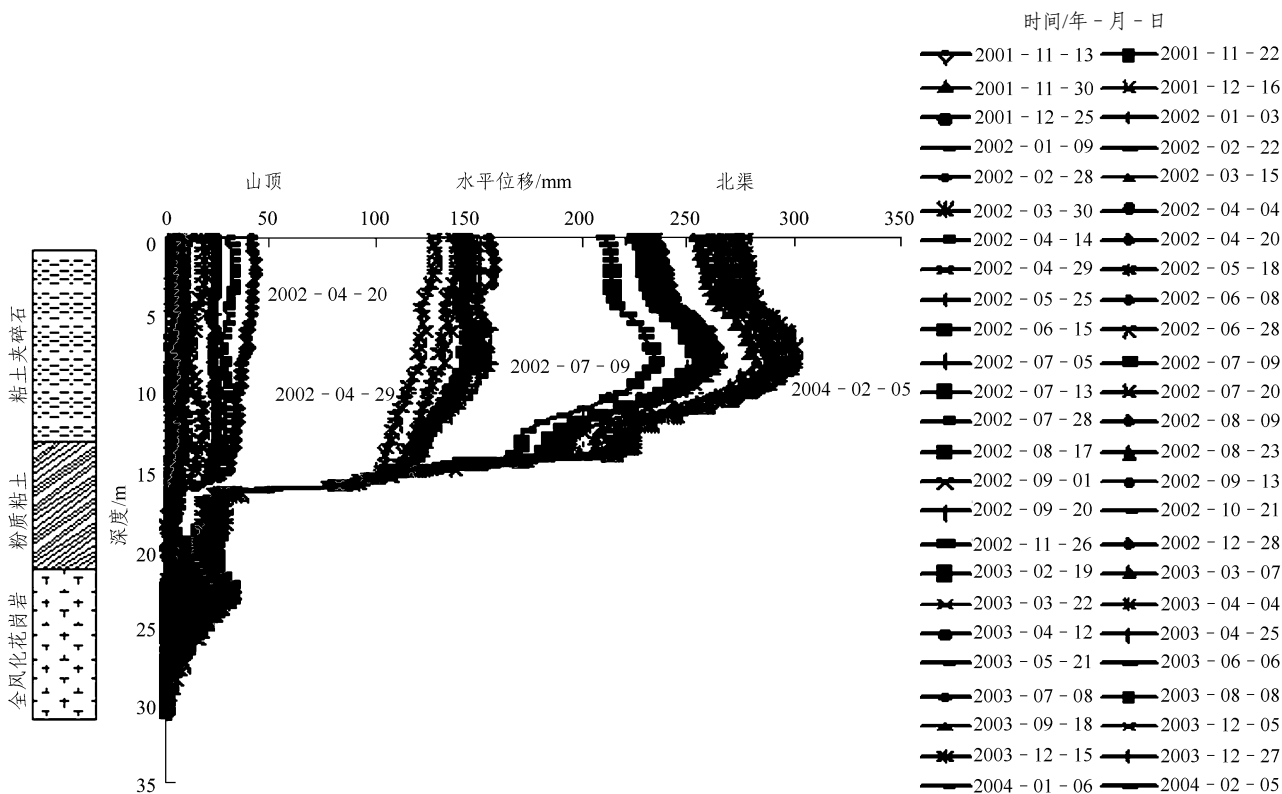


图 2 B14 孔深部水平位移 - 时间曲线

Fig.2 Horizontal displacement-time curves of inclinometer B14

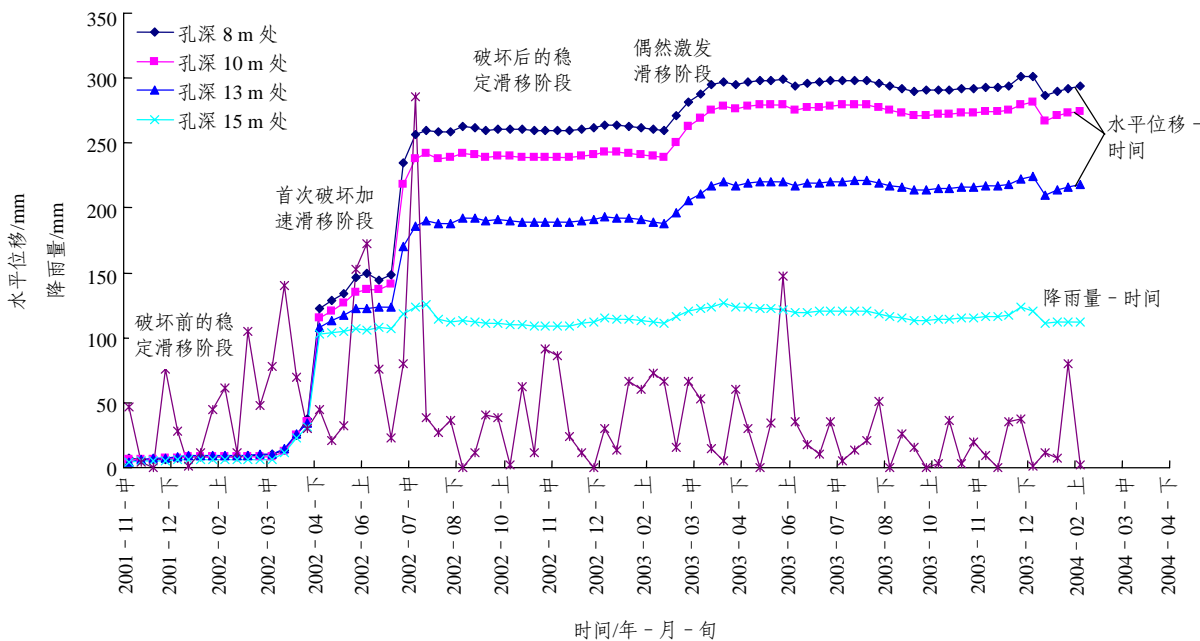


图 3 B14 孔滑带土深部水平位移 - 降雨量 - 时间曲线图

Fig.3 Horizontal displacement in sliding zone-rainfall-time curves of inclinometer B14

预测的角度检验，本文全部采用模型计算预测序列 $\hat{X}_{(k)(k>n)}^{(0)}$ 与所取原始序列后的实测值 $X_{(k)(k>n)}^{(0)}$ 作为残差检验的对象，进行模型精度评价比较。

3.4 算例分析

通过内插变换，非等时的滑坡位移信息原始序列向以旬为时间间隔的等时空距序列转化，将图 2

中的 B14 孔滑带土位移深部 8 m 处的测试数据转化为如图 3 所示的 2001 年 11 月中旬至 2003 年 12 月上旬，以旬为单位的共 75 个数据，选取其作为修正灰色系统预测模型的原始数据，目标预测未来 2003 年 12 月中旬至 2004 年 2 月上旬共 2 个月的位移信息。计算结果如表 1~3 所示。

表 1 模型参数计算结果

Table 1 Internal parameters from various models

预测时间/年-月-旬	全数据 GM 模型(ADF)	新陈代谢 GM 模型(MF)	一阶残差修正 GM 模型(REMF1)	二阶残差修正 GM 模型(REMF2)	一阶残差权重修正 GM 模型(REWMF1)	二阶残差权重修正 GM 模型(REWMF2)
2003 - 12 - 中	$a = -0.017$ $u = 114.611$	$a = -0.013$ $u = 157.416$	$a = -0.013$ $u = 157.416$ $a_{e1} = 0.000 5$ $u_{e1} = 0.427 0$	$a = -0.013$ $u = 157.416$ $a_{e2} = 0.003 4$ $u_{e2} = -2.240 0$	$a_p = -0.003$ $u_p = 253.169$ $a_{ep1} = 0.063 7$ $u_{ep1} = 57.219 7$	$a_p = 0.002$ $u_p = 320.993$ $a_{ep2} = 0.002 2$ $u_{ep2} = -2 381.816 9$
2003 - 12 - 下	$a = -0.017$ $u = 114.611$	$a = -0.013$ $u = 166.421$	$a = -0.013$ $u = 166.421$ $a_{e1} = 0.000 4$ $u_{e1} = 0.298 1$	$a = -0.013$ $u = 166.421$ $a_{e2} = 0.005 3$ $u_{e2} = -3.431 3$	$a_p = -0.003$ $u_p = 256.811$ $a_{ep1} = 0.060 5$ $u_{ep1} = 48.406 5$	$a_p = 0.001$ $u_p = 311.536$ $a_{ep2} = 0.001 5$ $u_{ep2} = -1 957.840 3$
2004 - 01 - 上	$a = -0.017$ $u = 114.611$	$a = -0.011$ $u = 176.032$	$a = -0.011$ $u = 176.032$ $a_{e1} = 0.000 3$ $u_{e1} = 0.198 8$	$a = -0.011$ $u = 176.032$ $a_{e2} = 0.006 7$ $u_{e2} = -4.662 3$	$a_p = -0.003$ $u_p = 260.105$ $a_{ep1} = 0.057 6$ $u_{ep1} = 40.412 9$	$a_p = 0.001$ $u_p = 302.785$ $a_{ep2} = 0.000 8$ $u_{ep2} = -1 566.713 5$
2004 - 01 - 中	$a = -0.017$ $u = 114.611$	$a = -0.010$ $u = 186.167$	$a = -0.010$ $u = 186.167$ $a_{e1} = 0.000 2$ $u_{e1} = 0.129 5$	$a = -0.010$ $u = 186.167$ $a_{e2} = 0.008 6$ $u_{e2} = -6.437 9$	$a_p = -0.002$ $u_p = 263.08 1$ $a_{ep1} = 0.055 9$ $u_{ep1} = 34.068 2$	$a_p = 0.000 2$ $u_p = 295.289$ $a_{ep2} = 0.000 2$ $u_{ep2} = -1 227.477 5$
2004 - 01 - 下	$a = -0.017$ $u = 114.611$	$a = -0.009$ $u = 196.427$	$a = -0.009$ $u = 196.427$ $a_{e1} = 0.000 1$ $u_{e1} = 0.076 9$	$a = -0.009$ $u = 196.427$ $a_{e2} = 0.009 8$ $u_{e2} = -7.932 4$	$a_p = -0.002$ $u_p = 265.783$ $a_{ep1} = 0.055 3$ $u_{ep1} = 28.533 5$	$a_p = -0.000 2$ $u_p = 289.208$ $a_{ep2} = -0.000 3$ $u_{ep2} = -933.054 0$
2004 - 02 - 上	$a = -0.017$ $u = 114.611$	$a = -0.008$ $u = 206.862$	$a = -0.008$ $u = 206.862$ $a_{e1} = 0.000 1$ $u_{e1} = 0.036 7$	$a = -0.008$ $u = 206.862$ $a_{e2} = 0.010 3$ $u_{e2} = -8.845 8$	$a_p = -0.002$ $u_p = 268.220$ $a_{ep1} = 0.055 6$ $u_{ep1} = 22.933 1$	$a_p = -0.000 6$ $u_p = 284.486$ $a_{ep2} = -0.000 7$ $u_{ep2} = -672.437 6$

表 2 滑带土位移信息预测结果

Table 2 Forecasting results of displacement of soil in sliding zone by various models

预测时间/年-月-旬	位移实测值/mm	位移预测值/mm					
		全数据 GM(1, 1) 模型(ADF)	新陈代谢 GM (1, 1)模型(MF)	一阶残差修正 GM (1, 1)模型(REMF1)	二阶残差修正 GM (1, 1)模型(REMF2)	一阶残差权重修正 GM (1, 1)模型(REWMF1)	二阶残差权重修正 GM (1, 1)模型(REWMF2)
2003 - 10 - 中	291.3	357.9	313.1	301.8	299.2	297.6	292.1
2003 - 10 - 下	291.7	363.9	315.5	303.1	300.3	298.1	292.3
2003 - 11 - 上	292.2	370.0	317.9	304.5	301.4	298.7	292.5
2003 - 11 - 中	292.6	376.2	320.4	305.8	302.5	299.2	292.7
2003 - 11 - 下	293.0	382.5	322.9	307.1	303.5	299.7	292.8
2003 - 12 - 上	293.5	388.9	325.4	308.5	304.6	300.3	293.0
2003 - 12 - 中	301.0	395.4	327.9	309.8	305.7	300.8	293.2
2003 - 12 - 下	300.9	402.1	330.4	311.2	306.8	301.4	293.3
2004 - 01 - 上	286.2	408.8	333.0	312.5	307.9	301.9	293.5
2004 - 01 - 中	290.2	415.6	335.6	313.9	308.9	302.5	293.7
2004 - 01 - 下	292.2	422.6	338.2	315.3	310.1	303.1	293.9
2004 - 02 - 上	294.2	429.7	340.8	316.6	311.2	303.6	294.0

表 3 模型精度检验指标计算结果

Table 3 Results of various models precision tests

%

全数据 GM(1, 1) 模型(ADF)	新陈代谢 GM (1, 1)模型(MF)	一阶残差修正 GM (1, 1)模型(REMF1)	二阶残差修正 GM (1, 1)模型(REMF2)	一阶残差权重修正 GM (1, 1)模型(REWMF1)	二阶残差权重修正 GM (1, 1)模型(REWMF2)
40.29	13.72	6.54	4.91	2.81	1.59

以划线的 2003 年 12 月中旬至 2004 年 2 月上旬的实测值与各模型预测值作为检验对象, 从计算结果可以清楚地得出: 全数据 GM(1, 1)模型由于经历

了加速滑移阶段的位移突变, 其参数|a|值相对最大且保持不变, 预测误差最大, 相对误差的绝对值的平均值达到 40.29%, 故预测精度最低; 而新陈代谢

GM(1, 1)模型 $|a|$ 值次之,且随着新陈代谢进行 $|a|$ 值逐渐变小,相对误差的绝对值的平均值达到了13.72%,提高了预测精度;而在新陈代谢基础上的二阶残差修正模型精度高于一阶残差修正,经过权重修正后的二阶残差修正模型 $|a|$ 值相对最小,同样经历4个典型滑移阶段,权重修正大大改进了灰色预测过程受位移信息列突变影响的缺陷,相对误差绝对值的平均值为1.59%,故其模型预测精度最高。

4 结论与建议

通过建模的理论分析、模型的工程应用计算与实测对比,可以得到如下结论:

(1) 在全数据GM(1, 1)模型的基础上,依次经过新陈代谢过程、分阶残差修正、权重修正之后,二阶残差权重修正GM(1, 1)模型大大提高了预测的精度。

(2) 传统的灰色系统GM(1, 1)模型所需样本数据少,对于实际滑坡监测工程中已积累较多样本数据的系统,预测过程因为系统外在影响因素突变,比如滑坡地区降雨量影响使得位移信息系统发生突变,进而模型内在参数突变,导致模型预测精度降低。而二阶残差权重修正GM(1, 1)模型,可以很大程度改进这个缺陷,强化系统新近数据的规律性,弱化系统外在影响因素的随机突变作用。

(3) 最优的权重因子与新陈代谢的样本数据个数以及期望预测的数据个数密切相关,本文经过计算分析比较,建议以 $1^v, 2^v, \dots, (n-2)^v, (n-1)^v$ 作为具体的权重因子。对于权重修正中的权重因子的选择,有待进一步研究。

(4) 滑坡系统可视为受多因素影响的复杂灰色系统,运用二阶残差权重修正GM(1, 1)模型预测滑带土位移,结合滑坡监控信息、地质勘察资料分析,取得了较好的效果。

参考文献(References):

[1] 黄 铭, 葛修润, 王 浩. 灰色模型在岩体线法变形测量中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 235 - 238.(Huang Ming, Ge Xiurun, Wang Hao. Applications of grey model to linear deformation measurement of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 235 - 238.(in Chinese))

[2] 蒋 刚, 林鲁生, 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.(Jiang Gang, Lin Lusheng, Liu Zude, et al. Prediction grey model for slope displacement[J]. Rock and Soil

Mechanics, 2000, 21(3): 243 - 246.(in Chinese))

[3] 殷坤龙, 晏同珍. 滑坡预测及相关模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 1 - 8.(Yin Kunlong, Yan Tongzhen. Landslide prediction and relevant models[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(1): 1 - 8.(in Chinese))

[4] 赵志明. 南昆铁路某滑坡变形的灰色预测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(4): 22 - 24.(Zhao Zhiming. Grey prediction on deformation of the slide slope in Nanning—Kunming Railway[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2003, 35(4): 22 - 24.(in Chinese))

[5] 魏作安, 尹光志, 万 玲, 等. 山体滑坡滑移灾害的灰色系统预测分析[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(10): 152 - 155.(Wei Zuoan, Yin Guangzhi, Wan Ling, et al. Forecast and analysis of grey system in the landslide disaster[J]. Journal of Chongqing University, 2002, 25(10): 152 - 155.(in Chinese))

[6] 傅 立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.(Fu Li. Grey System Theory and Its Application[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1992.(in Chinese))

[7] 唐天国, 万 星, 刘浩吾. 高边坡安全监测的改进GM模型预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 307 - 312.(Tang Tianguo, Wan Xing, Liu Haowu. Improved GM model for safety monitoring of high rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 307 - 312.(in Chinese))

[8] Hsu L C, Chen C Y. Applications of improved grey prediction model for power demand forecasting[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(14): 2 241 - 2 249.

[9] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.(Deng Julong. Grey Forecasting and Decision[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.(in Chinese))

[10] 易德生, 郭 萍. 灰色理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.(Yi Desheng, Guo Ping. Grey Theory and Method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.(in Chinese))

[11] 王立忠, 陈仁朋, 吴伟良, 等. 富阳市来龙山勘察报告[R]. 杭州: 浙江大学建筑设计研究院, 2001.(Wang Lizhong, Chen Renpeng, Wu Weiliang, et al. Reconnaissance report on Lailong Mountain in Fuyang City[R]. Hangzhou: Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University, 2001.(in Chinese))

[12] 王立忠, 谢 锋, 沈伟志, 等. 富阳市来龙山山体滑坡监测报告[R]. 杭州: 浙江大学建筑设计研究院, 2001.(Wang Lizhong, Xie Feng, Shen Weizhi, et al. Landslide monitoring report on Lailong Mountain in Fuyang City[R]. Hangzhou: Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University, 2001.(in Chinese))

[13] Leroueil A. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms[J]. Geotechnique, 2001, 51(3): 197 - 243.