

文章编号: 1000-7598 (2011) 06-1808-05

边坡位移预测的非线性组合模型及应用

戈海玉, 涂劲松

(皖西学院 建筑与土木工程学院, 安徽 六安 237012)

摘 要: 通过边坡现场监测位移序列来预测未来时间边坡的位移, 可以有效地评价和判断边坡的稳定性。多种非线性分析方法的组合可以有效提高预测精度, 将灰色理论与投影寻踪回归各自的优缺点的基础上, 提出了将二者相结合的一种新的预测模型——时序投影寻踪回归模型。新模型既发挥了灰色预测方法中“累加生成”的优点, 弱化了原始序列中随机扰动因素的影响, 增强了数据的规律性, 又充分利用了投影寻踪回归方法易于描述非线性关系的优良特性, 避免了灰色预测方法及模型存在的理论缺陷。同时, 对模型的可靠性进行了验证。将文中提出的时序投影寻踪回归方法应用到 2 个工程实例, 研究结果表明该模型预测值与实测值吻合较好, 具有较高的精度, 可为边坡位移的预测提供一条新的途径。

关 键 词: 边坡位移; 灰色理论; 投影寻踪回归方法; 时间序列; 非线性

中图分类号: TU472

文献标识码: A

Nonlinear coupled model for predicting slope displacement and its application

GE Hai-yu, TU Jin-song

(School of Architecture and Civil Engineering, West Anhui University, Lu'an, Anhui 237012, China)

Abstract: Based on the displacement sequence of slope, the stability of slope could be judged effectively by forecasting the displacement of slope in the future. After analyzing the advantages and disadvantages of grey forecasting methods and projection pursuit regression (PPR) method respectively; a new nonlinear forecasting model of grey projection pursuit regression (GPPR) is proposed. The new model not only developing the advantages of accumulation generation of the grey forecasting method, weakening the effect of stochastic-disturbing factors in original sequence and strengthening the regularity of data, but also using the quickly solving speed and the excellent characteristics of projection pursuit regression method for nonlinear relationship and avoiding the theoretical defects existing in the grey forecasting model. At the same time, the model is verified. At last, two engineering examples are given to testify the effectiveness of the grey projection pursuit regression forecasting method to predict displacements of two slopes. The results show that the new model has higher calculation precision, so as to provide a new way to predict displacements of slopes.

Key words: slope displacement; grey theory; projection pursuit regression; time sequence; nonlinearity

1 引 言

人们通过数值方法精确地计算边坡的稳定性变得很困难^[1-3], 原因是边坡岩土体表现出非均匀性、各向异性以及复杂的非线性等特征, 同时岩土体常常有很多节理、裂隙等地质结构面以及还有地下水、人类活动等多种外界因素的影响。边坡趋向滑移一定会表现出位移增大, 也就是说位移是边坡滑移表现出最直接的表现因素, 故可用观测得到的位移通过建立数学模型判断边坡位移的发展趋势进

行预测, 从而得出边坡稳定性的判断。目前用于预测边坡位移发展趋势的方法很多, 如邓聚龙于 1982 年提出的用以描述灰色系统内部事物连续变化过程的模型, 称为灰色模型, 简称 GM 模型^[4-5]、1943 年心理学家 W.S.McCulloch 和数理逻辑学家 W.Pitts 建立了神经网络和数学模型, 称为 MP 模型^[6]、根据系统观测得到的时间序列数据, 通过曲线拟合和参数估计来建立数学模型的理论和方法的时间序列模型、由 Vapnik 领导的 AT&TBell 实验室研究小组在 1963 年提出一种新的非常有

收稿日期: 2010-10-28

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金重点项目资助 (No. KJ2008A143)。

第一作者简介: 戈海玉, 男, 1966 年生, 硕士, 副教授, 安徽省力学学会理事, 从事岩土力学教学及研究工作。E-mail: gehaiyu@wxc.edu.cn

潜力的分类技术的支持向量机技术和由多种方法联合的组合模型^[7-15]等等。这些方法建立了相应的预测数学模型是关键。但是, 影响边坡工程的稳定性因素很多, 又由于根据边坡工程系统观测得到的时间序列数据具有复杂的非线性特性, 很难对系统建立精确的预测模型。

鉴于边坡工程是灰色系统, 灰色系统理论以“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象, 主要通过“部分”已知信息的生成、开发, 提取有价值的信息, 实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控, 即将杂乱无章的原始数据序列, 通过一定的微分拟合函数建模弱化其波动性, 使时间序列数据变化为接近真实, 对于灰色量的处理不是寻求它的统计规律和概率分布, 而是建立用微分方程描述的模型, 故国内外的很多学者采用灰色系统理论对边坡位移进行预测, 已取得一定的成绩。传统的灰色模型常常用于单调递增或单调递减的指数型时间序列比较符合, 而实际的边坡序列要复杂的多, 往往与指数型时间序列差别很大, 使得预测结果出现较大误差。同时, 对模型参数的求解算法也存在一些理论缺陷, 故对此进行改进研究。

现行的计算模型大多只考虑时间序列的预测或非线性拟合, 将时间序列和非线性拟合融合在一起的模型较少, 事实上, 位移的预测既有时间的相关性, 更受工程施工条件, 降雨、施工环境等多种复杂条件的影响, 为此将时间序列和非线性拟合结合在一起建立位移的预测模型显得尤为必要。投影寻踪方法是由 Jerome H 等^[16]1981 年提出的, 把高维数据投影到低维空间, 经过分析计算, 最大程度上用一个指标表现数据聚集程度, 以找到反映数据结构特征的最优投影方向。适用于复杂、高维、非线性数据的一种统计分析方法。

本文通过 MATLAB 平台下编制应用程序, 在对原始数据进行分析的基础上, 提出既可以考虑趋势时间序列又可以拟合非线性的时序投影寻踪回归模型。本文成果对边坡稳定性分析及滑坡动态预测等方面具有重要的参考价值。

2 非线性组合模型原理

利用灰色理论可以很好地预测不确定问题的时间序列, 利用投影寻踪回归理论可以很好的预测非线性问题, 将二者非线性理论组合, 可以很好地解决不确定信息下的非线性预测问题。边坡位移的预测问题就是一个不确定性与非线性的复杂问题。

2.1 建立组合模型方法

利用监测可以得到边坡原始位移时间序列为

$$\{x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0\} \quad (1)$$

式中: n 为监测位移样本总数。根据灰色理论原理, 首先对原始序列按照公式:

$$x_i^1 = \sum_{k=1}^i x_k^0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

进行一次累加, 生成得到规律性更强的新序列:

$$\{x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1\} \quad (3)$$

进而用非线性拟合能力强的投影寻踪回归方法基于新序列运算建模, 目的是要寻找 $i+p$ 时刻的序列值 x_{i+p}^1 与前 p 个时刻的序列值 $x_i^1, x_{i+1}^1, \dots, x_{i+p-1}^1$ 的关系, 即确定映射关系:

$$x_{i+p}^1 = f(x_i^1, x_{i+1}^1, \dots, x_{i+p-1}^1) \quad (4)$$

式中: p 为延迟时间; f 为非线性映射函数。

2.2 建立投影寻踪回归原理方法

假设基于投影寻踪插值问题的的边坡工程多指标样本集为 $\{x(i, j) | i=1, \dots, m; j=1, \dots, n\}$, 其中 m 为监测次数; n 为影响边坡稳定的指标数。建立位移预测的投影寻踪回归模型的具体步骤如下^[16]:

① 预处理数据

根据已知监测到边坡的样本信息产生的假定经验等级值为 $y(i)$, 对应的边坡的样本属性值为 x_{ij} 。消除各指标值的量纲和统一各指标值的变化范围, 对原始监测数据进行预处理, 对正向指标采用式(5)将指标值变换到 $(0, 1)$ 区间:

$$x_{ij}^* = x_{ij} / \max(x_{ij}) \quad (5)$$

得出的等级评价模型也就建立 x_{ij} 与 $y(i)$ 之间的数学关系。投影寻踪方法就是把 p 维数据 $\{x(i, j) | i=1, \dots, m; j=1, \dots, n\}$ 综合成以 $a = (a(1), a(2), \dots, a(n))$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$, 即

$$z(i) = \sum_{j=1}^n a(j) x_{ij}^* \quad (6)$$

式中: a 为单位长度向量。

由 $z(i)$ 、 $y(i)$ 的散点图拟合出适当的数学模型。

② 边坡位移投影指标函数

在综合投影时, 要求投影值 $z(i)$ 应尽可能大地提取 $\{x(i, j)\}$ 中的变异信息, 即 $z(i)$ 的标准差 S_z 尽可能大, 同时要求 $z(i)$ 与 $y(i)$ 的相关系数的绝对 $|R_{zy}|$ 达到尽可能大, 这样得到的投影值就可望能尽可能多地携带边坡位移预测因子系统的变异信息, 并且能保证投影值对边坡位移 $y(i)$ 具有很好的解释性。

则投影指标函数可构造为

$$Q(a)=S_z \cdot |R_{zy}| \quad (7)$$

式中: S_z 为 $z(i)$ 的标准差; R_{zy} 为 $z(i)$ 与 $y(i)$ 的相关系数。其关系式为

$$S_z = \left\{ \sum_{i=1}^m [z(i) - \bar{z}]^2 / (m-1) \right\}^{0.5} \quad (8)$$

$$R_{zy} = \frac{\left(\sum_{i=1}^m (z(i) - \bar{z})(y(i) - \bar{y}) \right)}{\left(\sum_{i=1}^m (z(i) - \bar{z})^2 \sum_{i=1}^m (y(i) - \bar{y})^2 \right)^{0.5}} \quad (9)$$

式中: $\bar{y}$ 为 $y(i)$ 均值; $\bar{z}$ 为 $z(i)$ 均值。

③ 最佳投影方向的估计

设给出经验等级 $y(i)$ 和样本数据 $\{x(i, j)\}$, 就能得出不同的投影方向反映不同数据结构特征的映射, 最佳的投影方向就是最大可能高维数据某类特征结构的投影方向, 通过求解式 (10) 数学模型来计算最佳投影方向。期望函数数学模型为

$$\max Q(a) = S_z |R_{zy}| \quad (10)$$

$$\text{约束条件为} \quad \sum_{j=1}^n a_j^2 = 1 \quad (11)$$

模型预测精度以平均相对误差 MRE 进行评价, 表达式为

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(y_i - \hat{y}_i) / y_i| \times 100\% \quad (12)$$

式中: y_i 为位移真实值, $\hat{y}_i$ 为位移预测值。

3 工程实例应用

实例 1. 某公路边坡有近 7 km 的硬岩中倾顺层边坡, 2005 年施工中发现其中一段边坡变形较大。为了保障公路安全, 对该滑坡进行监测, 其中主滑方向中部 3#监测点的变形时序数据^[7]见表 1, 模型预测比较结果如图 1 所示。

表 1 某滑坡位移监测资料(3#监测点)
Table 1 Monitoring displacements of a landslide
(monitoring point No.3)

时序	监测数据/cm	时序	监测数据/cm	时序	监测数据/cm	时序	监测数据/cm	时序	监测数据/cm
1	1.44	8	4.74	15	6.47	22	7.30	29	7.43
2	2.54	9	4.83	16	6.71	23	7.32	30	7.48
3	3.35	10	4.97	17	6.91	24	7.34	31	7.55
4	3.92	11	5.20	18	7.06	25	7.35	32	7.64
5	4.29	12	5.50	19	7.16	26	7.36	33	7.75
6	4.52	13	5.84	20	7.22	27	7.38		
7	4.66	14	6.17	21	7.27	28	7.40		

表 1 中, 有 33 个位移监测序列, 前 28 个数据用于建立时序投影寻踪回归模型, 后 5 个数据用于边坡预测比较。分别采用灰色 GM(1,1) 模型、单一投影寻踪回归模型 (PPR) 以及本文进行比较研究。由图 1 看出, 本文提出 (GPPR) 模型的精度要高于其他两种模型的精度, 其结果也与实际监测结果接近。

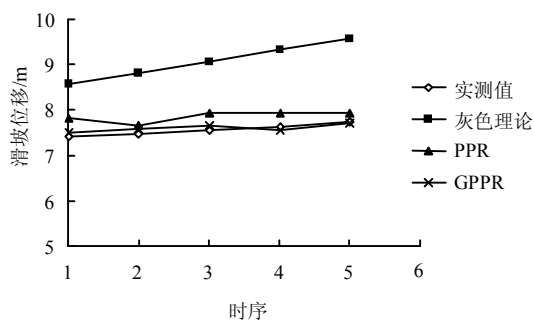


图 1 某滑坡位移预测值与监测值的比较(3#监测点)
Fig.1 Comparison between forecasted and observed displacements of a landslide

实例 2. 某滑坡是一个塬边黄土滑坡, 1971 年发现裂缝, 当年 3 月 11 日起对它进行变形观测至 5 月 5 日凌晨 3:15 时刻该边坡产生剧滑结束, 其 5#裂缝共观测得到 51 个位移变形值^[17], 具体数据见表 2, 得出几种模型预测比较结果如图 2 所示。

表 2 某滑坡位移监测资料 (5#裂缝)
Table 2 Monitoring displacement of a landslide
(crack No.5)

时序	监测数据/cm	时序	监测数据/cm	时序	监测数据/cm	时序	监测数据/cm	时序	监测数据/cm
15	1.0	26	7.3	37	10.4	48	17.2	59	28.2
16	1.5	27	7.8	38	10.5	49	17.6	60	30.0
17	1.7	28	8.2	39	10.8	50	18.2	61	31.0
18	2.5	29	8.4	40	11.1	51	19.0	62	32.0
19	3.2	30	8.7	41	12.0	52	19.2	63	33.0
20	4.0	31	9.0	42	13.0	53	20.0	64	42.0
21	4.4	32	9.2	43	13.5	54	23.0	65	47.0
22	5.1	33	9.4	44	14.0	55	24.0	66	61.0
23	5.9	34	10.0	45	15.0	56	25.2		
24	6.3	35	10.1	46	16.1	57	26.0		
25	7.0	36	10.3	47	16.4	58	27.0		

用表 2 数据对本文建立的模型进行验证。分别采用灰色 GM(1,1)模型、单一投影寻踪回归模型 (PPR) 以及本文的灰色投影寻踪回归模型 (GPPR) 对该边坡观测位移数据分析研究, 该实例有 66 个监测序列数据, 对前 45 个数据用于灰色投影寻踪回归模型, 因后 5 个数据变化较大用作预测比较。

图2为几种模型的预测值与监测值的对比。由图可见,灰色GM(1,1)的预测精度最差,相对误差最大达到29.1%;单一投影寻踪回归方法的预测精度有较大提高;本文的灰色投影寻踪回归模型(GPPR)预测精度最好,相对误差最大仅为4.97%。

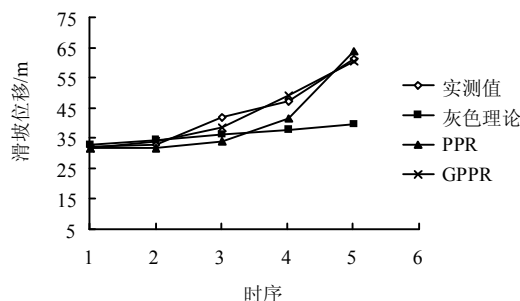


图2 某滑坡位移预测值与监测值的比较
Fig.2 Comparison between forecasted and observed displacements of a landslide

4 结 语

针对边坡工程位移变化的复杂性,本文提出了灰色投影寻踪回归模型对边坡位移进行短期预测,该模型充分考虑时序性及高度非线性。为体现灰色投影寻踪回归模型(GPPR)方法优越性,将本文模型的预测值与其余几种预测模型进行了比较。选取了2个典型边坡工程对位移进行预测分析研究。分析表明,灰色投影寻踪回归模型(GPPR)预测精度要高于单一投影寻踪回归预测模型以及GM(1,1)预测模型,是本文方法既能发挥了灰色预测方法中“累加生成”的优点、弱化原始数据中的随机性和增强了原始数据规律性,又能充分运用投影寻踪回归预测模型强大的非线性映射能力,避免了灰色预测方法及模型存在的理论缺陷。为边坡位移的预测分析研究提供了一种简便实用技术。

本文预测采用多步预测,一次可以预测很多步,适合模型输出已知情况。当模型输出已知或未知时还可以采用单步预测,即先预测测出未来一步的位移值,然后将该值加入序列重新学习之后再预测出下一步的位移值。依次类推。通常多步预测比一步预测的精度要好一些但每预测一步都要进行参数的重新优化,计算时间相对较多。

参 考 文 献

[1] 文海家,张永兴,柳源. 滑坡预报国内外研究动态及发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 1—

4, 16.

WEN Hai-jia, ZHANG Yong-xing, LIU Yuan. A home and abroad investigative-tendency of landslide forecast[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(1): 1—4+16.

[2] 郑东健,顾冲时,吴中如. 边坡变形的多因素时变预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3181—3184.

ZHENG Dong-jian, GU Chong-shi, WU Zhong-ru. Time series evolution forecasting model of slope deformation based on multiple factors[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3181—3184.

[3] 董陇军,王飞跃. 基于未确知测度的边坡地震稳定性综合评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(4): 74—78.

DONG Long-jun, WANG Fei-yue. Comprehensive evaluation on seismic stability of slopes based on unascertained measurement[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007, 18(4): 74—78.

[4] 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): 244—246.

JIANG Gang, LIN Lu-sheng, LIU Zhu-de, et al. Prediction grey model for slope displacement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(3): 244—246.

[5] 孙世国,朱广轶,王思敬. 露天边坡与山坡复合体变形灰色预测[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(6): 696—698.

SUN Shi-guo, ZHU Guang-yi, WANG Si-jing. Grey prediction of combined body deformation for open pit slope and hillside[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2002, 21(6): 696—698.

[6] 吕金虎,陈益峰,张锁春. 基于自适应神经网络的边坡位移预测[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(12): 124—129.

LÜ Jin-hu, CHEN Yi-feng, ZHANG Suo-chun. Slope displacement forecast based on adaptive neural network[J]. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2001, 21(12): 124—129.

[7] 沈强,陈从新,汪稔. 边坡位移预测的RBF神经网络方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 26(增刊): 2282—2287.

SHEN Qiang, CHEN Cong-xin, WANG Ren. Method to

- forecast displacement slope based on RBF neural network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 26 (Sup.1): 2282—2287.
- [8] 周创兵, 陈益峰. 基于相空间重构的边坡位移预测[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 205—208.
- ZHOU Chuang-bing, CHEN Yi-feng. Application of phase space reconstruction in slope displacement forecasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 205—208.
- [9] 刘开云, 乔春生, 滕文彦. 边坡位移非线性时间序列采用支持向量机算法的智能建模与预测研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 57—61.
- LIU Kai-yun, QIAO Chun-sheng, TENG Wen-yan. Research on nonlinear time sequence intelligent model construction and prediction of slope displacement by using support vector machine algorithm[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 57—61.
- [10] 董辉, 傅鹤林, 冷伍明. 滑坡位移时序预测的核函数构造[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1087—1092.
- DONG Hui, FU He-lin, LENG Wu-ming. Kernel design for displacement time series of landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 1087—1092.
- [11] 王建锋. 两类经典滑坡发生时间预报模型的理论分析[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 40—50.
- WANG Jian-feng. Theoretical analysis of two classical landslide predication models: Saito's model and Voight's model[J]. **Journal of Geomechanics**, 2004, 10(1): 40—50.
- [12] 郝小员, 郝小红, 熊红梅, 等. 滑坡时间预报的非平稳时间序列方法研究[J]. 工程地质学报. 1999, 7(3): 279—283.
- HAO Xiao-yuan, HAO Xiao-hong, XIONG Hong-mei, et al. Research on landslide time forecast by the unstable time series method[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, 7(3): 279—283.
- [13] 付义祥, 刘志强. 边坡位移的混沌时间序列分析方法及应用研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(3): 473—477.
- FU Yi-xiang, LIU Zhi-qiang. Analytic method and application about chaotic slope deformation destruction time series[J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, 2003, 27(3): 473—477.
- [14] 高玮, 冯夏庭. 灰色-进化神经网络的滑坡变形预测研究[J]. 岩土力学, 2004, 25 (4): 514—517.
- GAO Wei, FENG Xia-ting. Study on displacement predication of landslide based on grey system and evolutionary neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 514—517.
- [15] 吴益平, 滕伟福, 李亚伟. 灰色-神经网络模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 632—636.
- WU Yi-ping, TENG Wei-fu, LI Ya-wei. Application of grey-neural network model to landslide deformation prediction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 632—636.
- [16] JEROME H, WERNER S. Projection pursuit regression[J]. **Journal of the American Statistical Association**, 1981, 78: 817—827.
- [17] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 29(3): 619—623, 628.
- [15] 李云丽. 盾构隧道施工过程管片结构受力特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [16] 叶飞, 朱合华, 丁文其. 基于螺栓接头受力性能的盾尾注浆压力控制研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 312—316.
- YE Fei, ZHU He-hua, DING Wen-qi. Pressure control analysis based on mechanical properties of bolts during grouting at the shield tail[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2009, 37(3): 312—316.

上接第 1807 页

- TANG Meng-xiong, CHEN Ru-gui, CHEN Wei. Stress monitoring and internal force analysis of Guangzhou metro shield tunnel segment during construction[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(3): 118—124.
- [14] 宋克志, 袁大军, 王梦恕. 盾构法隧道施工阶段管片的力学分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 619—623, 628.
- SONG Ke-zhi, YUAN Da-jun, WANG Meng-shu. Segmental mechanical analysis of shield tunnel during construction stage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008,