

深部岩体变形的混沌预测方法

蒋斌松, 韩立军, 贺永年

(中国矿业大学 建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 论述深部岩体变形行为及其围岩稳定性分析中应用混沌方法; 同时, 根据岩体工程的观测位移时间序列, 基于相空间重构, 给出了最大 Lyapunov 特征指数的计算步骤, 并给出了岩体位移时序的线性 and 非线性两种混沌预报模式。据此, 建立了岩体工程位移观测数据的混沌预测方法。对玲珑金矿 255 m 水平主运巷的塌陷情况进行了算例分析。首先, 对于主运旧巷断面的收敛位移观测序列, 采用插值方法对其进行了预处理, 以获得等间隔的位移序列; 然后, 对该位移序列, 利用上述混沌分析方法, 获得其最大 Lyapunov 特征指数为 0.05; 分别采用近邻等距法和最大 Lyapunov 指数预报模式, 对位移序列进行了预测。与观测位移相比较, 位移预测结果比较理想。

关键词: 岩石力学; 深部岩体; 位移观测序列; 混沌; 最大 Lyapunov 指数; 预测

中图分类号: TD 322⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)16-2934-07

CHAOTIC PREDICTION METHOD OF ROCK MASS DEFORMATION IN DEPTH

JIANG Bin-song, HAN Li-jun, HE Yong-nian

(School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The deformation behavior and the application of chaotic method for the stability analysis of the rock mass engineering in depth are summarized. For the measured displacement time series of rock mass engineering, the procedure for calculating the largest Lyapunov exponent is given on basis of phase space reconstruction. Linear and nonlinear chaotic prediction methods are represented for the rock mass displacement. Thus, the chaotic analytic method is set up for the prediction of the measured displacement time series of rock mass engineering. The analysis of the 255 m main transport roadway damaged in Linglong gold mine is considered as an example. At first, the damaged situations of the 255 m main transport roadways are simply presented. Then, for the measured convergent displacement time series of the 255 m main transport roadway, the interpolation method is adopted; and an equal interval displacement time series is obtained. The results show that the largest Lyapunov exponent is 0.05 based on phase space reconstruction. Finally, it is separately predicted by the method of equidistance in near neighbor and that of the largest Lyapunov exponent prediction, and the predicted displacement values are ideal compared with the measured displacement values.

Key words: rock mechanics; rock mass in depth; measured displacement time series; chaos; the largest Lyapunov exponent; prediction

收稿日期: 2005-05-13; **修回日期:** 2005-07-07

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490273)

作者简介: 蒋斌松(1961-), 男, 博士, 1982年毕业于山东矿业学院矿建系煤矿建井专业, 现任教授, 主要从事岩石力学的理论及应用方面的教学与研究工作。E-mail: jiangbs@cumt.edu.cn。

1 引言

随着浅部资源的逐渐减少和枯竭,我国矿物资源地下开采的深度越来越大。目前,我国华北、华东已有数十对煤矿矿井开采深度达到 800 m,甚至超过 1 000 m^[1]。矿井开采达到一定深度后,巷道围岩在高地应力作用下处于破裂和破裂后状态。对于软弱岩层,岩石破裂可能引起流变,即变形不敛;对于坚硬岩层,岩石破裂可能引起脆性破坏,即岩爆或矿震。最理想的是从力学机理上揭示岩石破裂后的变形行为。然而,岩石破裂后的变形行为是高度非线性的,目前对此还没有行之有效的解决方法。

对于许多重要的岩体工程,常常通过量测位移等变量,试图对其稳定性进行预测和评价。然而,岩体位移时间序列的形态往往呈现出复杂性和多样性,一般可分成 3 种类型:

(1) 位移时序是确定性的,即规律及趋势明显,这时可以采用回归等简单的数据处理方法获得岩体位移的变化规律。

(2) 位移时序是外在随机的(通常所说的随机),即人们对系统知之甚少,位移时序在提取趋势项后完全是不确定的。此时,对位移时序的处理方法是:以概率统计学为基础,采用随机过程理论、特别是时间序列分析方法建立其模型^[2]。

(3) 位移时序是内在随机的(混沌),此时应该采用混沌学方法对其进行研究。岩体系统出现混沌是由于对初始条件的敏感性,系统会产生貌似随机的现象,这是确定性的非线性成分产生的结果^[3]。

目前,将混沌分析方法引用到矿山和岩土工程领域正逐渐增多。其应用主要有两种形式:

一是由岩体的位移观测数据,通过相空间重构方法进行混沌判断。如文[4~6]根据边坡位移观测数据,分别提取其 Lyapunov 指数为正数及关联维为非整数,说明其系统为混沌并相应获得可预报尺度。此外,文[7]根据煤矿底板岩层破坏过程中的 Lyapunov 指数,分析其混沌特征。文[8]根据岩石声发射序列的 Lyapunov 指数较大的特点,提出采用物理元胞自动机理论分析其混沌行为。

二是对岩体的位移观测数据进行混沌预测。有代表性的研究工作有:文[9,10]基于 Lyapunov 指数进行了位移序列的预测研究,但仅通过 Lyapunov 指数预报模式;文[11]试图利用 Lyapunov 指数作为岩土边坡失稳的判据;而文[12,13]采用混沌进行

了边坡稳定性预测研究。

本文针对岩体的观测位移时间序列,基于相空间重构给出最大 Lyapunov 指数的计算,以判断其混沌行为;在分别给出近邻等距预报模式和 Lyapunov 指数预报模式的基础上,进一步给出一步预报的具体算式;以一破坏巷道的观测位移为例,给出混沌判断和预测的具体分析过程及其处理方法。

2 最大 Lyapunov 指数的计算

2.1 重构相空间

1985 年,文[14]提出了如何从单变量时间序列中提取最大的 Lyapunov 指数的方法。此法以文[15]的延迟坐标重构相空间技术为基础。

假定有一时间间隔为 Δt (单位时间)的单变量时间序列: $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_i), \dots, x(t_n)$, 重构一个 m 维的相空间,就可得到一相型分布:

$$X = \begin{bmatrix} x(t_1) & x(t_2) & \cdots & x(t_i) & \cdots & x(t_n - k\tau) \\ x(t_1 + \tau) & x(t_2 + \tau) & \cdots & x(t_i + \tau) & \cdots & x(t_n - k\tau) \\ x(t_1 + 2\tau) & x(t_2 + 2\tau) & \cdots & x(t_i + 2\tau) & \cdots & x(t_n - k\tau) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(t_1 + k\tau) & x(t_2 + k\tau) & \cdots & x(t_i + k\tau) & \cdots & x(t_n - k\tau) \end{bmatrix} = \{X_m(t_1) \quad X_m(t_2) \quad \cdots \quad X_m(t_i) \quad \cdots \quad X_m(t_n - k\tau)\} \quad (1)$$

式中: $\tau = k\Delta t$ ($k = 1, 2, \dots$) 为延滞时间; $k = m - 1$ 。

式(1)中的每一列构成 m 维相空间中的一个相点,任一相点 $X_m(t_i)$ 有 m 个分量,即

$$X_m(t_i) = \{x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x[t_i + (m-1)\tau]\} \quad (2)$$

这样, $N = n - (m-1)\tau$ 个相点 $X(t_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 在 m 维相空间里构成一个相型,而相空间的连线描述了系统在 m 维相空间中的演化轨线(迹)。当然,为了保证上述各个坐标分量之间的线性独立,要求 τ 的取值足够大。

2.2 最大 Lyapunov 指数的计算

按 Takens 的观点,时间序列按相空间重构法构造一个嵌入空间后,能得到一个吸引子,相应的 Lyapunov 指数谱与原吸引子的指数谱相一致。利用时间序列计算最大的 Lyapunov 指数的步骤如下:

(1) 适当选取延迟时间 τ 以及嵌入维数 m , 根据式(1)形成一个相型分布。

(2) 以初始相点 $X(t_1)$ 为基点,在相点里找到在欧几里德意义下与基点 $X(t_1)$ 最近的一点 $X_b(t_1)$ 作为端点,构成一个初始向量,记为 V_1 , 并记该向量

的长度为 $L_1(t_1)$ 。

(3) 令初始向量 V_1 在一个适当的时间里沿轨线向前演化, 得到一个新的向量, 称为演化向量, 记为 V'_2 , 其相应的基点和端点分别为 $X(t_1 + T_1)$ 和 $X_b(t_1 + T_1)$ (T_1 表示演化时间)。计算演化向量 V'_2 的长度, 记为 $L'_2(t_1 + T_1)$ 。如果用 λ_1 表示此时段内相长度的指数增长率, 有

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_1} \ln \frac{L'_2}{L_1} \quad (3)$$

(4) 以 $X(t_1 + T_1)$ 为新基点, 选取一个新的向量来代替演化向量 V'_2 , 并记为 V_2 , V_2 的选取原则是: 具有小的长度以及和演化向量 V'_2 保持小的角度。

(5) 以 V_2 为新的初始向量, 重复步骤(2), (3), 即得

$$\lambda_2 = \frac{1}{T_2} \ln \frac{L'_3}{L_2} \quad (4)$$

上述过程一直进行到相点的终点。取指数增长率的平均值作为最大的 Lyapunov 指数的估计值, 即

$$LE_1 = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} \frac{1}{T_k} \ln \frac{L'_{k+1}}{L_k} \quad (5)$$

式中: N_k 为演化的总步数。

(6) 增加嵌入维数 m , 并重复上面的计算步骤, 直到 Lyapunov 指数的估计值保持平稳为至。此时得到的计算结果即为所求的最大的 Lyapunov 指数。

2.3 混沌系统的可预报性

混沌的一个重要特征是“系统对初值的极其敏感性”。这表示混沌时间序列不能进行长期预报, 而只能进行短期预报。显然, 知道系统的可预报时间尺度具有重要意义。

混沌系统的最大可预报时间尺度 T_f , 由最大的 Lyapunov 特征指数的倒数来定义:

$$T_f = 1/LE_1 \quad (6)$$

3 相空间预报方法

由于岩体系统在一定条件下是一个混沌系统, 故实测的位移时间序列可认为是确定性岩体系统在不同时刻的特解的集合。从复杂性理论可知, 时间序列不仅包含着系统所有变量以往的信息(在允许误差的精度内), 而且还蕴含着某些简单的确定关系。因此, 在可预报时间尺度内, 可以对混沌岩体系统进行预测预报。

将位移时序 $\{x(t_i)\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 分为 $x(t_l) \sim$

$x(t_l)$ 和 $x(t_{l+1}) \sim x(t_n)$ 两段。后段很短, 仅供检验、调试预报模式参考时用(在正式预报时不再分段)。将前段序列反向排序, 设延滞时间与相空间维数分别为 τ 和 d , 可类似式(1)构成相型, 其相点为

$$X(t_i) = \{x(t_i), x(t_i - \tau), \dots, x(t_i - (d-1)\tau)\} \\ (i = l, l-1, \dots, 1 + (d-1)\tau) \quad (7)$$

每个相点有 d 个分量, 表示系统在某一瞬时的状态。将这 $[l - (d-1)\tau]$ 个相点按时间序列依次相连, 其连线则构成了一条在 d 维相空间里的轨道, 表征了系统的状态随时间的演化。

由于提前预报的时间 T 一般与重构相空间里所用的延滞时间 τ 及时序间隔 Δt 系同量级, 其相对于时间序列的长度是很小的, 故有基本假设——在预报区域内结构不变。作为预报, 引入最近邻态概念。

设在 d 维相空间里态 $X(t_i)$ 到态 $X(t_j)$ 的距离用 $\|X(t_i) - X(t_j)\|$ 表示, 这里“ $\|$ ”为 d 维欧氏模。

设参考态为 $X(t_l)$, 当其最近邻态为 $X(t_b)$ 时, $X(t_b)$ 与 $X(t_l)$ 的关系可表示为

$$X(t_b) = \min_j (\|X(t_l) - X(t_j)\|) \quad (8)$$

由于在相空间里的每一个相点表示系统的一个状态, 所以预报问题就转化为确定下一时刻相点的位置。设参考态 $X(t_l)$ 经预报时间 T 后, 演化为 $X(t_l + T)$ 。当提前预报时间 $T - \tau$ 时, $X(t_l + T)$ 的 d 个分量中只有第一分量 $x(t_l + T)$ 是未知的, 而其余 $(d-1)$ 个分量都是已知的, 即 $x(t_l + T)$ 为预报对象。基于上述概念, 可有下面 2 种相空间预报模式:

(1) 近邻等距预报模式

考虑到 $X(t_l)$ 的最近邻态 $X(t_b)$ 经提前预报时间 T 后, 演化为 $X(t_b + T)$, 由最近邻态式可知, 态 $X(t_b)$ 与 $X(t_l)$ 相差甚小, 经过演化后, 由于演化时间 T 很短, 所以态 $X(t_b + T)$ 与 $X(t_l + T)$ 仍然相差很小, 可近似认为二态重合, 故假定: 邻态 $X(t_l)$ 与 $X(t_b)$ 及 $X(t_l + T)$ 与 $X(t_b + T)$ 之间的模相等, 即

$$\|X(t_l) - X(t_b)\| = \|X(t_l + T) - X(t_b + T)\| \quad (9)$$

利用平方欧氏模, 式(9)可表示为

$$[x_p(t_l + T) - x(t_b + T)]^2 = [x(t_l) - x(t_b)]^2 + \\ \sum_{j=0}^{d-1} [x(t_l - j\tau) - x(t_b - j\tau)]^2 - \\ \sum_{j=1}^{d-1} [x(t_l + T - j\tau) - x(t_b + T - j\tau)]^2 \quad (10)$$

式中: $x_p(t_l + T)$ 为 $x(t_l + T)$ 的预报值。

显然, 式(10)为 $x_p(t_i + T)$ 的二次方程。为作出预报, 必须对方程的两个根进行取舍。其做法是: 在计算前先将序列 $x(t_i)$ 进行极差标准化, 即

$$x'(t_i) = 100 \frac{x(t_i) - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

式中: $x'(t_i)$ 为标准化后的值, x_{\min} 和 x_{\max} 分别为 $x(t_i)$ 的最小值和最大值。将 $x(t_i)$ 标准化后, $x'(t_i)$ 满足如下范围:

$$0 \leq x'(t_i) \leq 100 \quad (12)$$

由式(10)解出的预报值如果有一个在式(12)的范围之外(例如为负值), 则将其舍去。

(2) Lyapunov 指数预报模式

在由时间序列提取最大 Lyapunov 指数的算式(5)中, 取相空间演化的步长相同方法, 只要假设在演化过程中 L'_{k+1}/L_k 近似为一常值, 式(5)成为

$$LE_1 = \frac{1}{T_k} \ln \frac{L'_{k+1}}{L_k} \quad (13)$$

利用式(13)可对时间序列进行预报。设参考态 $X(t_m)$ 及其最近邻态 $X(t_b)$ 经演化时间 T 后, 分别演化为 $X(t_m + T)$ 和 $X(t_b + T)$, 则有

$$\|X(t_l + T) - X(t_b + T)\| = \|X(t_l) - X(t_b)\| e^{LE_1 T} \quad (14)$$

式(14)为相空间 Lyapunov 指数预报模式, 是一个非线性预报模式。当 $LE_1 = 0$ 时, 式(14)就退化为式(9)。因此, 近邻等距预报模式(9)是不考虑相轨迹发散或靠近的预报模式, 是一个线性预报模式。

4 玲珑矿主运巷破坏概况

玲珑金矿(原招远金矿)是我国最大的黄金矿山之一。矿区内岩体以玲珑混合花岗岩为主。矿井于20世纪70年代和90年代分别开掘255 m水平主运旧巷和新巷, 两主运巷相距10 m。

两主运巷垂直穿过10[#]脉群, 该脉群于20世纪80年代初被开采, 其采空区位于主运巷的下方, 并且先前留的保护矿柱已被民采采空。旧巷从1990年开始变形, 至1995年, 新、旧巷均发生急剧的下沉和变形破坏, 塌陷区长度约43 m, 旧巷最大下沉达0.6 m、新巷达0.5 m, 并伴随大面积片帮、冒顶和巷道围岩严重松动。为了维持正常生产, 矿方采取了一系列的支护加固措施, 如灌浆、钢支架、木架和铁轨钢板铺底等, 但没有达到效果, 到1996

年底, 巷道的变形破坏已到了无法控制的地步。

北京科技大学承担了主运巷塌陷段加固技术的研究。在主运旧巷加固处理后, 为掌握旧巷围岩的地压活动规律和稳定性状况、以及新巷围岩的变形破坏动态对其的影响, 在旧巷内实时监控。包括断面收敛量测等监测内容, 巷道监测布置如图1所示。共布置5个监测断面(编号依次为1[#]~5[#]), 其中每个监测断面设5个收敛测点, 量测5条测线: AB, AC, AD, BC和DE。

5 玲珑矿位移观测数据及预处理

玲珑矿主运巷道断面收敛监测自2000年3月开始。1[#]断面5条测线的收敛观测数据(位移单位为mm, 下同)的变化如图2所示。由图2可知: 各测线的累计位移呈增大趋势, 但每次变化的程度不一致, 特别是测线AB, 数据是或正或负、或大或小, 呈现波动现象, 具有随机性。

由于实际观测条件的限制, 观测序列有一个缺陷: 观测时间不是等间隔, 而且有些观测间隔较大。这就需要对实际观测时间序列进行处理, 以获得反映实际情况的等间隔时间序列。其处理办法为:

基于实际观测序列的间隔大多是5 d, 故取时间序列的间隔为5 d, 或者根据相邻观测的间隔情况取4或6 d; 若观测时间间隔大于7 d时, 补充间隔为4~6 d的数据作为时间序列。其数据补充采用确定性方法和随机方法两种, 即采用插值方法, 及随机生成方法或Logistic映射生成方法。

对于测线AB, 采用插值方法时, 等间隔位移时序如图2所示。该近似等间隔位移时间序列用 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示, 这里, $n = 35$ 。

实际位移观测数据都是有单位的, 为了消除单位量纲的影响, 采用标准差标准化方法消除其量纲的影响。设 x_i 是第 i 个位移观测数据, 则经过标准差标准化的数据为 x_i^* , 且有

$$x_i^* = (x_i - \bar{x}) / \sigma_s \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

式中: \bar{x} 和 σ_s 分别为观测时间序列的样本平均值和均方差。

经标准差标准化的数据序列 x_i^* 的平均值为0, 均方差为1, 无单位。在式(15)中, 如果分母 σ_s 用平均值 \bar{x} 代替, 则为标准差中心化处理。

为书写简便, 经标准差标准化后的数据序列仍用符号 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示。

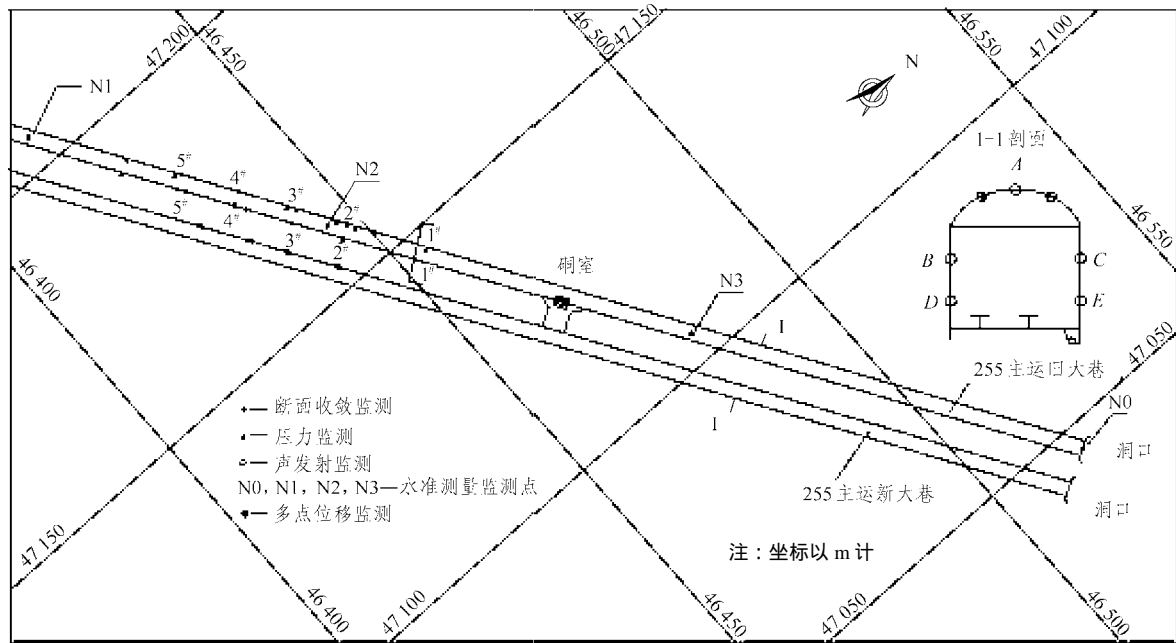


图 1 巷道监测布置图

Fig.1 Measured arrangement in the roadway

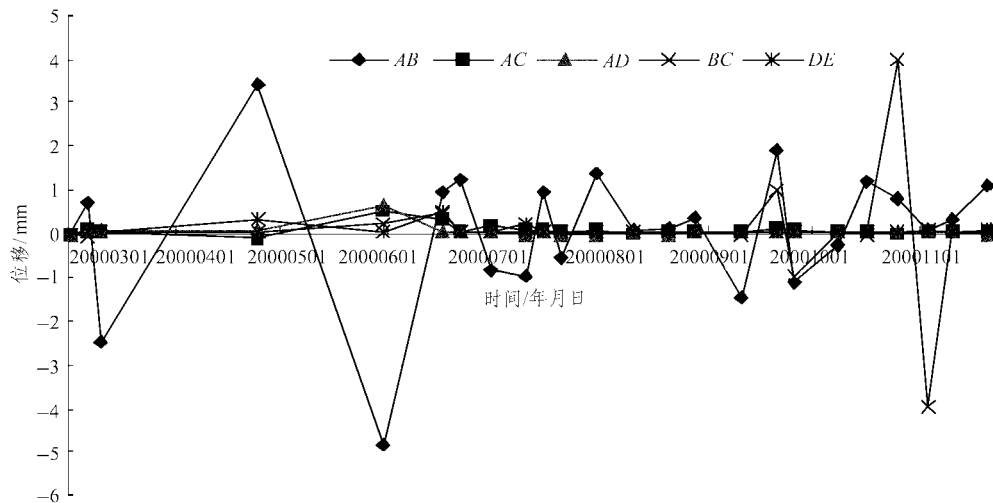


图 2 观测位移序列

Fig.2 Measured displacement time series

6 玲珑矿位移时序的 Lyapunov 指数

取延滞时间间隔 τ 为位移观测间隔 Δt ，并取 Δt 为单位 1；设嵌入空间维数为 m 。由位移时序 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，在 m 维相空间中可获得 $N = n - m + 1$ 个相点，排除 N 个相点中相同的相点后，经过计算，最大的 Lyapunov 特征指数 LE_1 随嵌入维数 m 的变化如表 2 和图 3 所示。

计算显示：当相空间嵌入维数 m 取 7~8 时，

最大 Lyapunov 特征指数 LE_1 趋于稳定，且 $LE_1 = 0.05$ 。

7 玲珑矿位移时序的混沌预测

排列位移观测序列为 $\{x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1\}$ 。取延滞时间间隔 $\tau = \Delta t = 1$ ，嵌入维数为 m 。进行相空间重构，有 $N = n - m + 1$ 个相点，即

$$X = \{x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-m+1}\} \quad (16)$$

采用一步预报，即预报时间 $T = 1$ 。位移观测序

表 1 测线 AB 的等间隔位移时间序列

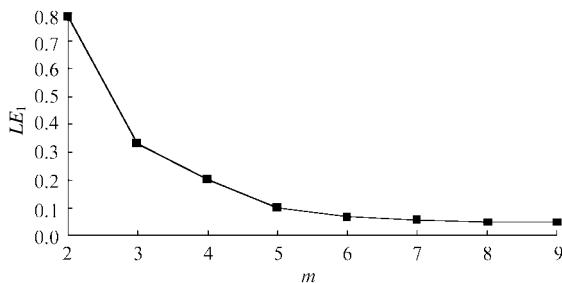
Table 1 Equal interval displacement time series of measured line AB

序号号	位移值	序号号	位移值	序号号	位移值
1	- 4.82	13	1.40	25	- 0.73*
2	- 2.90*	14	0.69	26	- 0.25
3	- 0.99*	15	0.10	27	0.48
4	0.93	16	0.13*	28	1.20
5	1.25	17	0.15	29	1.02*
6	0.83	18	0.25	30	0.80
7	- 0.85	19	0.35	31	0.45
8	- 0.93*	20	- 0.62*	32	0.10
9	- 1.00	21	- 1.45	33	0.30
10	0.95	22	0.23	34	0.70*
11	- 0.55	23	1.90	35	1.10
12	0.43*	24	- 1.15		

注：带*的数据为补充数据。

表 2 LE_1 随嵌入维数 m 的变化Table 2 LE_1 varied as embedding dimension m

m	LE_1	m	LE_1
2	0.786	6	0.063
3	0.332	7	0.054
4	0.198	8	0.047
5	0.098	9	0.046

图 3 LE_1 随嵌入维数 m 的变化Fig.3 Variation curve of LE_1 and embedding dimension m

列 $x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1$ 的一步预报值用 x_{n+1}^p 表示。

由近邻等距法(式(10)), 可得

$$x_{n+1}^p = x_{b+1} \pm (x_{n-m+1} - x_{b-m+1}) \quad (17)$$

式中：下标 b 为 x_n 的最近邻态相点。

若采用 Lyapunov 指数预报模式，由式(14)，一步预报值 x_{n+1}^p 可表示为

$$x_{n+1}^p = x_{b+1} \pm \left[(e^{2LE_1} - 1) \sum_{j=0}^{m-2} (x_{n-j} - x_{b-j})^2 + e^{2LE_1} (x_{n-m+1} - x_{b-m+1})^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

根据表 1 所示的位移观测数据，由 $LE_1 = 0.05$ ，取嵌入维数 $m = 5$ 。对观测数 $n = 31 \sim 35$ ，分别采用近邻等距法(式(17))和 Lyapunov 指数预报模式(式(18))进行一步预测，其预测结果见表 3 和图 4。

表 3 位移预测结果表

Table 3 Predicted displacement values

n	观测值	等距法	LE_1 法
31	0.45	0.43	0.54
32	0.10	0.10	- 0.13
33	0.30	0.45	0.59
34	0.70	0.63	0.67
35	1.10	0.73	0.79

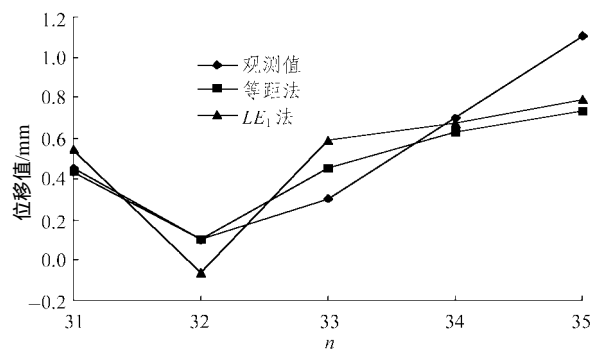


图 4 位移预测结果图

Fig.4 Predicted displacement values

从表 3 和图 4 可以看出，混沌预测方法能够得到较准确的观测结果。试算表明：增加观测值样本，可以提高预测的精度；此外，嵌入维数 d 对预测结果有较大影响。

8 结 论

本文针对岩体工程的观测位移时间序列，建立了混沌分析和预测的一套完整方法；以玲珑金矿主运旧巷塌陷区实测位移序列为算例，给出了混沌分析方法的整个过程。这套方法是在原方法的基础上作了改进或者在应用中作了具体说明，即

(1) 基于相空间重构方法，给出最大 Lyapunov 特征指数的计算步骤。

(2) 基于相空间重构方法和通过引用最近邻态概念，给出了岩体观测位移的近邻等距预报模式和最大 Lyapunov 指数预报模式。

(3) 对非等间隔位移观测序列，提出了采用随机和插值方法进行位移等间隔补充处理，以获得等间隔的位移时序。

(4) 玲珑矿主运巷观测位移的最大 Lyapunov 特征指数 LE_1 为 0.05, 表明位移时序为混沌, 计算显示嵌入维数 m 的增加 LE_1 趋于稳定值。

(5) 获得了近邻等距法和最大 Lyapunov 指数预报模式一步预报值的计算公式, 并分别进行了 5 次位移预测, 结果显示混沌预测结果较理想。

(6) 上述混沌分析方法可以直接应用到其他矿山及边坡等岩体工程中。

(7) 岩体变形呈现混沌随机的机理、混沌预测方法的评价, 以及嵌入维数 m 、相空间维数 d 与岩体流变模型的阶数之间是否存在确定的关系等有待于进一步揭示和探讨。

致谢 论文选题得到了北京科技大学蔡美峰教授的帮助, 并且引用了其项目的位移观测数据。

参考文献(References):

- [1] 靖洪文. 深部巷道大松动圈围岩位移分析及应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.(Jing Hongwen. Analysis and Application of Broken Zone Displacement around Deep Rock Roadway[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001.(in Chinese))
- [2] 陈子荫. 时间序列分析——一种预报岩体力学行为的可能途径[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(4): 87–95.(Chen Ziyin. Time series analysis—a practicable method of predicting mechanical behavior of rockmass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(4): 87–95.(in Chinese))
- [3] 黄润生. 混沌及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.(Huang Runsheng. Chaos and Its Application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2000.(in Chinese))
- [4] 田野, 徐平. 用岩体蠕变数据计算 Lyapunov 指数[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(2): 49–51.(Tian Ye, Xu Ping. Calculating Lyapunov exponents with creep data of rockmass[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1994, 11(2): 49–51.(in Chinese))
- [5] 秦四清, 张倬元. 边坡灾害可预报时间尺度问题探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(1): 17–23.(Qin Siqing, Zhang Zhuoyuan. Discussion on landslides disaster predictive time scope problems[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 5(1): 17–23.(in Chinese))
- [6] 汪树玉, 刘国华, 杜王盖, 等. 大坝观测数据序列中的混沌现象[J]. 水利学报, 1999, (7): 22–26.(Wang Shuyu, Liu Guohua, Du Wanggai, et al. Chaotic phenomenon in observation data of dam monitoring[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, (7): 22–26.(in Chinese))
- [7] 王连国, 宋扬, 缪协兴. 底板岩层变形破坏过程中混沌性态的 Lyapunov 指数的描述研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 356–359.(Wang Lianguo, Song Yang, Miao Xiexing. Lyapunov exponent of chaos feature in the processing of deformation failure for coal floor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 356–359.(in Chinese))
- [8] 谭云亮, 周辉, 王泳嘉, 等. 模拟岩石声发射及混沌性的 PCA 模型[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(4): 802–807.(Tan Yunliang, Zhou Hui, Wang Yongjia, et al. PCA model for simulating AE and chaos in rock failure process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(4): 802–807.(in Chinese))
- [9] 陈益峰, 吕金虎, 周创兵. 基于 Lyapunov 指数改进算法的边坡位移预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 671–675.(Chen Yifeng, Lu Jinhu, Zhou Chuangbing. Predication of slope displacement by using Lyapunov exponent improved technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 671–675.(in Chinese))
- [10] 陈继光. 基于 Lyapunov 指数的观测数据短期预测[J]. 水利学报, 2001, (9): 64–67.(Chen Jiguang. Short term observation data forecasting based on Lyapunov exponent[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (9): 64–67.(in Chinese))
- [11] 吴中如, 潘卫平. 应用 Lyapunov 指数研究岩土边坡的稳定判据[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 217–223.(Wu Zhongru, Pan Weiping. Research on stability criterion of rock and soil slopes with Lyapunov[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 217–223.(in Chinese))
- [12] 刘华明, 齐欢, 蔡志强. 滑坡预测的非线性混沌模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 434–437.(Liu Huaming, Qi Huan, Cai Zhiqiang. Nonlinear chaotic model of landslide forecasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 434–437.(in Chinese))
- [13] 黄志全, 崔江利, 刘汉东. 边坡稳定性预测的混沌神经网络方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3 808–3 812.(Huang Zhiquan, Cui Jiangli, Liu Handong. Chaotic neural network method for slope stability prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3 808–3 812.(in Chinese))
- [14] Takens F. Detecting strange attractor in turbulence[J]. Lecture Notes in Math., 1981, 898: 336–354.
- [15] Wolf A. Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. Physical, 1988, (16): 285–289.