

文章编号:1673-9469(2009)03-0085-04

## 煤矿井筒变形混沌特征分析

张安兵<sup>1</sup>,张俊芳<sup>2</sup>,李喜盼<sup>1</sup>,赵玉玲<sup>2</sup>

(1.河北工程大学 资源学院,河北 邯郸 056038;2.邯郸市晨阳建筑有限责任公司,河北 邯郸 056021)

**摘要:**基于井筒变形实际监测沉降数据,提出了利用混沌理论相空间重构技术研究井筒变形特征的新思路。研究了井筒变形系统的相空间重构、关联维数的确定、Lyapunov 指数的计算、稳定性分析等问题。试验结果表明:井筒变形系统是一个混沌,井筒变形受到多因素影响。得出最大 Lyapunov 指数可以作为变形体内部不同部分动态变形状态的指标。这一有工程意义的结论,可以为井筒稳定性判定提供支持。

**关键词:**井筒;混沌;相空间重构

**中图分类号:**TD 325

**文献标识码:**A

## Chaotic characteristics analysis of mine's shaft deformation

ZHANG An-bing<sup>1</sup>, ZHANG Jun-fang<sup>2</sup>, LI Xi-pan<sup>1</sup>, ZHAO Yu-ling<sup>2</sup>

(1. College of Natural Resource, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

2. Chenyang Building Material Co. Ltd., Hebei Handan 056021, China)

**Abstract:** A new idea was put forward to the chaotic characteristics of deformation of mine shaft by means of phase space reconstruction of chaotic. Problems of space reconstruction of deformation value, correlation dimension determination, Lyapunov exponent calculation and stability were discussed. The result of the simulation experiment shows that the deformation system is a chaotic system, and affected by many factors; the biggest Lyapunov exponent may serve as the determinations standard of shaft deformation. The research can offer some help for the policy-making of the determination of stability in goaf.

**Key words:** shaft; chaotic; phase space reconstruction

由于地下开采的影响,煤矿井筒损害时有发生,给煤矿的安全生产造成严重影响。有关专家研究了井筒变形的影响属性、修复方法及井筒变形预测模型,但对其变形规律性,特别是利用混沌方法研究其变形特征的文献尚不多见。本文通过对主副井变形监测,研究其变形规律,对于及时掌握其稳定状况,并根据监测结果,预报以后的变形情况,具有重要的实际意义。基于实际井筒变形监测数据,本文主要采用混沌技术对井筒变形状况进行研究。

### 1 变形系统相空间重构

要对具有混沌特征的变形监测数据运用混沌

理论进行分析,首先要对监测数据进行相空间重构,即由低维时间序列重构出一个多维的确定性相空间。可重构出观测到的动力学系统的相空间,这对于那些不能直接测量到深层自变量而仅仅知道一组单变量的时间序列来说,提供了研究系统动力行为的可能。

对于一个  $m$  维动力系统有

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

将式(1)微商化,则  $m$  阶微分方程为

$$x^{(m)} = f(x, x', \dots, x^{(m-1)}) \quad (2)$$

此时,状态空间的坐标就由  $(x, x', \dots, x^{(m-1)})$  或  $(x, x', \dots, x^{(m)})$  来代替,这种代替并不损失该动力系统演化的信息。

收稿日期:2009-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(40774010);邯郸市科学技术研究与发展计划项目(0823109152-2) 特约专稿

作者简介:张安兵(1978-),男,山东郓城人,讲师,博士,从事变形监测、GPS数据处理研究。

用离散的时间序列  $x_i$  和其连续漂移  $x_{i+\tau}$ ,  $x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}$  来代替式(1)中的连续变数,显然这种漂移运算就类似于连续变数的微分。

设变形监测观测序列数据表示为序列  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $n$  为观测序列长度,则重构的相空间一点可表示为

$$\left. \begin{aligned} X_i (i = 1, 2, \dots, N) &= (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}) \\ N &= n - (m-1)\tau \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $x_i$  - 重构相空间的一个相点;  $m$  - 重构相空间的嵌入维数;  $\tau$  - 延迟时间;  $N$  - 相点数。

相空间重构的质量关键在于重构参数  $m$  和  $\tau$  的选取。延迟时间  $\tau$  的选取原则是在不丢失数据信息的情况下使数据的自相关程度尽可能小,一般用自相关函数法求取。关于嵌入维数,下文予以讨论。

## 2 混沌识别理论

在实际系统中,由于各类条件的限制,人们通常只能得到描述系统状态的一种变量的数据,在这种现实的条件下,如何进行切实有效的变形分析工作?一般认为,实测时序如果是随机序列,就应该采用统计学方法加以研究。如果序列是低自由度的确定性混沌,则系统必是存在非线性机制的耗散系统,因为在这种情况下,不论多么高阶次的线性模型都不可能对该非线性机制的耗散系统的行为作出恰当的解释;相反,一个成功的低阶非线性模型或许能很好地刻画该系统。因此,如何根据观测时间序列来判定一个系统是混沌还是随机的,对认识事物变化的本质规律及建立正确的模型来描述这种变化具有重要的意义。

要利用混沌理论对井筒变形进行研究,首先要判定所观测的变形体形变运动是否属于混沌运动,即要进行混沌特性的识别。目前混沌识别的方法主要包括定性、定量以及两者相结合三种途径。

定性方法主要通过揭示混沌信号在时域或频域中表现出的特殊空间结构或频率特性,从而和其他定常的、随机、周期或准周期信号区分开来,主要方法有相图法、功率谱法等;定量方法是通过计算混沌信号奇异吸引子的特性参数来辨别混沌行为的方法。奇异吸引子是轨道不稳定和耗散系统相空间收缩两种因素同时发生的现象。刻画奇异吸引子的主要参数是描述临近轨道发散率的

Lyapunov 指数或最大 Lyapunov 指数、描述吸引子维数的关联维数和反映信息产生频率的 Kolmogorov 熵等。混沌识别的多数方法都是从某一方面判别研究序列是否为混沌序列的必要条件,这样就需要采用不同的方法从不同的方面来鉴别研究对象的系统性质,本文主要采用饱和关联维数法和 Lyapunov 指数法。

### 2.1 嵌入维数的确定

关联维数是对相空间中吸引子复杂度的度量,同时也是一种用于混沌识别的方法。对于随机序列,随着嵌入维数的升高,关联维数沿对角线不断增大,而对于混沌序列,随着嵌入维数的升高,关联维数会出现饱和现象。关联积分的定义是

$$C(r, m) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i, j, i \neq j} H(r - \|X(t_i) - X(t_j)\|)$$

式中  $N$  - 总相点数;  $H(\cdot)$  - Heaviside 函数;  $H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ ;  $\|X(t_i) - X(t_j)\|$  -  $m$  维相空间中两个相点  $X(t_i)$  和  $X(t_j)$  之间的欧式距离;  $r$  - 给定的正小数,称为临界距离,凡距离小于  $r$  的向量称为关联向量。

关联积分  $C(r, m)$  在  $r$  一定范围内有

$$C(r, m) \propto r^{D(m)}$$

则  $D(m)$  称为关联维数,两边取对数,取极限得

$$D(m) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r, m)}{\log(r)}$$

随着  $m$  的增加,关联维数  $D(m)$  也增大,当  $m$  超过嵌入吸引子的相空间维数上界后,  $D$  将不随  $m$  的增大而改变,并趋向于一饱和值  $D_2$ ,它所对应的  $m$  为饱和维数,即确定的相空间的嵌入维数。

### 2.2 Lyapunov 指数

Lyapunov 指数是相邻轨道的平均发散性或平均收敛性的一种度量,它反映了系统状态对初值的敏感程度。

考察下面的一维映射  $x_{n+1} = f(\mu, x_n)$ 。

当初始条件  $x_0$  稍微出现偏差  $\delta x_0$ , 那么经过  $n$  次迭代后,就要产生指数分离,故  $n$  次迭代后的误差

$$\delta x_n = |f^n(x_0 + \delta x_0) - f^n(x_0)| = \frac{df^n(x_0)}{dx} \delta x_0 = e^{LE \cdot n} \delta x_0$$

其中  $LE = \frac{1}{n} \ln \frac{\delta x_n}{\delta x_0} = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{df^n(x_n)}{dx} \right|$ 。

LE 即 Lyapunov 特征指数,它表征了相邻点之间距离的平均指数幅散率。

对于一个  $m$  维流的动力系统,在  $m$  维切空间中的每个基底都有一个 Lyapunov 指数,若把它们按大小排列起来  $LE_1 \geq LE_2 \geq \dots \geq LE_m$ 。 $m$  个数即为 Lyapunov 特征指数谱,而  $LE_1$  为最大 Lyapunov 指数,若  $LE_1 > 0$  表明系统具有混沌性态,否则不具有混沌性态。

在耗散系统中, Lyapunov 指数成为判定系统运动性态的较完备指标,而采空区地表系统是典型的耗散系统。因此,选择 Lyapunov 指数对上覆地表系统运动演化特征进行研究。

### 3 兖州某矿主井垂直变形混沌特性分析

兖州某煤矿曾于 1995 年出现井筒损害事故,严重影响了煤矿的安全生产。为了能够及时掌握井筒变形状况,预报以后的变形情况,确保矿井安全生产,对主副井及临近主要高层建筑物进行了沉降和变形监测,现以该数据为例进行井筒变形的混沌特性分析。

对于主井监测数据,基于上述对变形系统动力学重构的分析,首先进行相空间重构,然后给定一个合适的  $r$ ,再根据 G-P 关联维的求解算法,求出一系列的  $C_m(r)$ ,接着以  $\ln(r)$  为横坐标,  $\ln C_m(r)$  为纵坐标,绘制关系图,最后判断求取饱和维数  $D_2$ 。图 1、图 2 为根据鲍店矿主井垂直变形时间序列数据中 2、3 点做出的  $\ln C_m(r) \sim \ln(r)$  关系曲线图,当  $m = 1, 2, \dots, n$  时,关联函数  $\ln C(r, m)$  随  $\ln r$  的变化曲线,我们以图 1 为例。

由图 1 可以看出,曲线  $\ln C(r, m) \sim \ln r$  有一段直线性很好。当  $m$  较小时,曲线的直线部分斜率较小,彼此之间的间隔较大,但随着  $m$  的增大,这些直线的斜率逐渐增大,其间隔变小,且逐渐靠拢。当  $m \geq 8$  时,即嵌入维数  $m$  的饱和值  $m_c = 8$ ,直线间相互趋于平行,可算出其曲线的直线部分的斜率趋于稳定值  $d = 3.583$ 。 $d$  为非整数,说明存在吸引子。所求得  $D_2$  就是吸引子的关联维数,称嵌入维数  $m$  的饱和值为饱和嵌入维数。饱和嵌入维数是否存在,是随机系统和混沌系统的最重要的区别。混沌理论有关研究成果指出,如果时间序列有分数维数吸引子存在,其所对应的最小嵌入维数  $m$ ,就是描述该时间序列吸引子所需要的最低相空间维数,  $m$  的存在决定了时间序

列的性质,如果  $m$  不存在,那么关联维的估计值  $D_2$  将随  $m$  的增大无穷大,这表示吸引子不存在,从而可以诊断该时间序列是一个随机系统。对于混沌系统,  $D_2$  可以达到饱和。各监测点监测时间序列计算结果见表 1。根据表 1 的计算结果,可以看出各监测点位的演化都具有非整数维。其求取的饱和嵌入维数  $m$  充分大于实测的  $D_2$ ,这亦可说明影响井筒变形的因素可能有 8 个左右,关联维数 2.652 表示影响系统的最小变量数,二者说明井筒变形影响因素在 3~6 个之间。从最大饱和和嵌入维数的计算结果看,与实际情况基本相符。通过计算的混沌参数结果可以看出,该系统属于混沌系统。

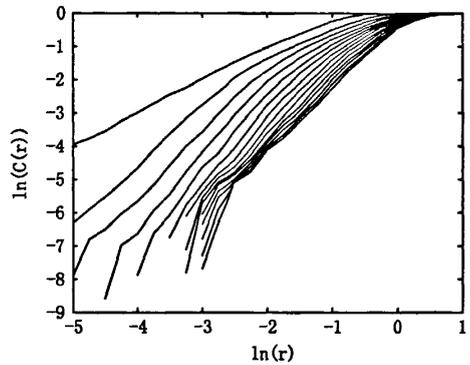


图1 2号点  $\ln C(r) - \ln(r)$  关系曲线

Fig.1 The relational curves of  $\ln C(r) - \ln(r)$  of the second point

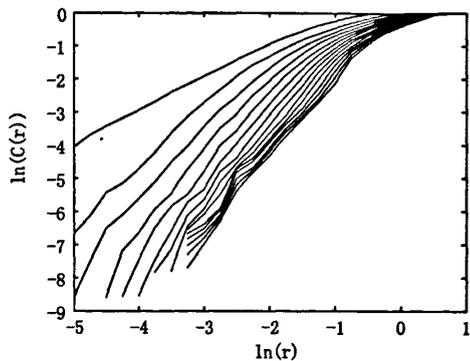


图2 3号点  $\ln C(r) - \ln(r)$  关系曲线

Fig.2 The relational curves of  $\ln C(r) - \ln(r)$  of the third point

采用常用的小数据量方法,计算了兖州某煤矿主井各监测时间序列的最大 Lyapunov 指数,结

表 1 饱和嵌入维数 D 及嵌入维数的计算结果

Tab.1 The results of embed dimension D and m

维数	点号											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$D_2$	2.65	2.87	3.72	3.503	2.341	3.392	2.33	2.561	2.387	2.628	2.60	2.59
$m$	6	7	9	8	7	8	5	6	5	6	6	6

表 2 变形系统时间序列的最大 Lyapunov 指数

Tab.2 The largest Lyapunov exponents of shaft deformation systems

点	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
L	0.004 3	0.002 6	0.002 1	0.002 8	0.007 3	0.001	0.014 9	0.023 3	0.011 1	0.025 0	0.005 3	0.013 9

果见表 2。各监测点最大 Lyapunov 指数均大于零, 同样说明井筒变形具有混沌特征。

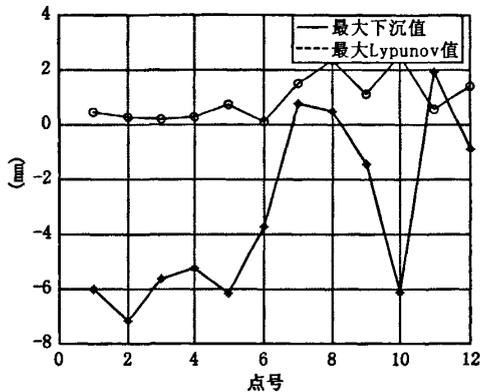


图3 沉降变形与最大Lyapunov指数数值关系

Fig.3 The relationship between deformation and the largest index value of the system

通过分析主井各监测点的最大 Lyapunov 指数值, 可以发现在同一个变形监测区域内各个监测点的最大 Lyapunov 指数值之间有一定的变化。为分析其原因, 对各点监测时间序列及各点变形累计值进行分析。图 3 为各个监测点累积变形量与对应的最大 Lyapunov 指数(注: 由于最大 Lyapunov 指数值较小, 为更清晰的表达现实各点之间的差值, 在此将最大 Lyapunov 指数放大了 100 倍)关系, 由图 3 可以看出: ①变形量接近的相邻监测序列, 其最大 Lyapunov 指数值基本保持一致; ②监测点 16# 虽然累积沉降量较大, 但各点的最大 Lyapunov 指数均较小, 说明其相对其他点位具有较强的规律性或趋势, 且各点的动力学过程基本类似, 经对实际监测数据作图分析, 正好验证了这一点; ③各点的监测沉降序列值之间具有明显的区别, 说明各点的变形规律并不一致, 因此, 其最大 Lyapunov

指数值也就不可能相同; ④监测点 810# 最大 Lyapunov 指数较大, 由此可见其动力学过程更复杂, 而该部分监测点正好位于靠近注浆修复区域, 其变形量明显受到注浆影响, 工程实际与最大 Lyapunov 指数值的反映得到互相验证。

变形监测时间序列是井筒变形系统诸多变量共同作用的结果, 因此, 对变形体监测序列进行特性分析, 特别是混沌特性分析, 通过重构其动力学过程, 可以深刻揭示变形体的变形机理。

## 4 结论

1) 井筒变形动力学演化中存在着非整数维以及正的最大 Lyapunov 指数值, 是混沌系统, 应采用非线性的数据处理方法进行研究。

2) 通过分析最大 Lyapunov 指数值和井筒监测数据并结合工程实际, 得出最大 Lyapunov 指数可以作为变形体内部不同部分动态变形状态的指标这一有工程意义的结论, 且最大 Lyapunov 指数值越大, 其过程越复杂。

3) 通过对井筒变形的混沌特性分析, 可以为井筒稳定性判定和变形预报提供一定的理论支持。

## 参考文献:

- [1] 邵良彬, 张宇. 煤矿立井井筒非采动破坏预测[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 184-184.
- [2] 孙佳龙, 郭淑艳, 郭金运. 帷幕注浆引起煤矿井筒地表沉降的时序预测模型[J]. 大地测量学与地球动力学, 2009, 29(1): 119-122.
- [3] 蒋金泉, 李洪. 基于混沌时序预测方法的冲击地压预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 881-895.

(下转第 96 页)

由变形监测结果可知,经过初次锚喷支护之后,应力集中引起的巷道成型问题得到了一定的改善,在锚索的二次耦合支护下,及时地抑制了顶板的下沉,进一步保证了岩体的完整性及其工程质量。作为二次支护的可缩性金属拱形支架起到为围岩表面提供刚性抗力,保持较高的支护强度,限制巷道围岩位移。同时在底角锚杆的作用下,巷道底鼓一定程度上得到了控制,整个支护结构形成了一个受力均匀的整体,巷道变形趋于稳定。

## 5 结论

1)单一的锚杆支护由于支护强度弱,并且无法实现匀称支护,由于巷道表面岩体破碎,多发生空帮,无法达到设计预应力,起不到锚杆支护的效果,是单一锚杆支护不适应深井巷道的主要原因。

2)通过锚索二次耦合支护调动深层围岩的强度及底角锚杆来限制岩层移动,可以有效地控制围岩的变形。可缩性金属拱形支架可以起到为围

岩表面提供强大的刚性抗力,保持较高的支护强度,限制巷道围岩位移,减少不协调变形。锚杆锚索拱形支架与表层围岩通过刚度、强度和结构的耦合形成了一个整体的支护结构。

3)深井软岩返修巷道采用锚杆锚索拱形支架联合支护是行之有效的,可在一定时期内有效控制巷道过大变形。

## 参考文献:

- [1] 樊克恭,翟德元. 巷道围岩弱结构破坏失稳分析与非对称控制机理[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2004.
- [2] 姜耀东. 巷道底鼓机理的及其控制方法的研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2005.
- [3] 孙晓明. 煤矿软岩巷道耦合支护理论研究及其设计系统开发[D]. 北京:中国矿业大学, 2007.
- [4] 王石民(译). 软岩掘进与支护[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1993.
- [5] 孙晓明,何满潮. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005(2): 33-35.

(责任编辑 刘存英)

(上接第 88 页)

- [4] RS-BT神经网络融合建模及应用[J]. 河北工程大学学报, 2007, 24(1): 89-91.
- [5] 郭广礼. 老采空区上方建筑地基变形机理及其控制[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 2001.
- [6] 吕金虎,陆君安,陈士华. 混沌时间序列分析及其运用[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002.
- [7] 于广明. 矿山开采沉陷非线性理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1998.
- [8] 马军海,陈予恕. 动力系统实测数据的非线性混沌模型重构[J]. 应用数学和力学, 1999, 20(11): 481-

488.

- [9] 张安兵,高井祥,张兆江,等. 老采空区地表沉陷混沌特征及时变规律研究[J]. 中国矿业大学学报(自然科学版), 2009, (38): 170-174.
- [10] 张安兵,高井祥,刘新侠,等. 边坡变形时序非线性判定及混沌预测研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, (18)4: 55-60.
- [11] DARVE F, LAOUAFA F. Instabilities in granular materials and application to landslides [J]. Mechanics of Cohesive - Frictional Materials, 2000, 5(8): 627-652.

(责任编辑 马立)