

文章编号:1001-4810(1999)03-0219-09

岩溶煤矿矿井煤层底板突水 预测的相空间重构*

王廷福, 庞西歧, 靳德武, 曾艳京, 王晓明
(煤炭科学研究总院西安分院, 西安 710054)

摘要:本文针对岩溶煤矿矿井煤层底板突水系统动力学行为的复杂性,采用近年发展起来的相空间重构方法,计算了该类复杂系统吸引子的关联维,据此对煤层底板突水行为进行了分析、预测,并用生产实践证明预测的正确性。

关键词:突水预测;非线性;相空间重构;关联维;混沌

中图分类号:X45

文献标识码:A

0 引言

动力系统大都具有非线性混沌特征。对于耗散系统而言,人们普遍相信其动力学行为在经过暂态过程后,稳定于维数不是很高的吸引子。较简单的吸引子是与定态相应的点和与周期态相应的圆环。但进一步分岔后,吸引子一般变得十分复杂,具有无穷嵌套结构(或者说属于分形结构),通常将这种复杂吸引子称为奇异吸引子。由于对初值的敏感性,吸引子的时间过程行为表现出随机性的一面。尽管如此,如果能够对所考虑的系统建立状态参量演化所遵循的动力学方程,那么,原则上可通过求解方程得到系统的演化行为。当然,对于非线性系统不仅方程的求解可能十分困难,而且由于混沌特性使得系统长期行为的确定也几乎是不可能的。这方面的一个典型例子是天气预报问题,一方面利用巨型计算机数值求解大气运动方程,确定大气的演化过程,另一方面像 Lorents 模型显示的那样,即使将复杂的大气系统方程简化为一组常微分方程,其长期行为也是不可预测的。对非线性动力学系统复杂性的揭示和认识,深刻地影响和改变着人们对非线性问题的思考方法和基本观念^[1]。

实际上,在自然界中存在的大量系统具有极大的复杂性,以至于无法有效地建立这些系统的状态演化方程,岩溶煤矿矿井煤层底板突水的动力学行为就是一例。由于岩石结构的多样化,地应力、矿压等的不确定性,煤层底板含水层地下水水压分布的复杂性,几乎不可能对这样的系统建立确定的、有意义的动力学方程,也就无从用普通的分析求解方程的方法了解其行为。

* 国家自然科学基金资助项目,编号 49672160

第一作者简介:王廷福,男,1939年生,研究员,长期从事煤矿防治水研究工作。

收稿日期:1999-06-20

在岩溶煤矿矿井煤层底板突水预测的实际问题中,往往是在煤层底板隔水层中埋设传感器,观测采动过程中煤层底板隔水层中的应力(或应变)分布情况。通过采动过程中对煤层底板隔水层中的应力(或应变)的观测,可以得到一个时间间隔 Δt 的时间序列:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

传统的做法是直接从这个序列去简单地分析它的时间演变,这有很大的局限性。因为时间序列是许多物理因子相互作用的综合反映,它蕴藏着参与运动的全部变量的痕迹,包含了混沌运动的信息^[5]。显然,吸引子的结构特性就包含在这时间序列中。而混沌特性至少在三维自治动力系统中才能出现,只有把时间序列扩展到三维或更高维的相空间中去,才能把时间序列中的混沌信息充分地显露出来,这就必须采用相空间重构方法。

相空间重构方法虽然是用一个变量(应力或应变),在不同时刻的值构成相空间,但动力系统的一个变量的变化,自然跟此变量与系统的其它变量的相互作用有关,即此变量的变化隐含着整个系统的动力学规律。因此,重构相空间的轨线也反映系统状态的演化规律。复杂性理论说明,要对系统的未来演化行为做出预测,就必须了解系统的吸引子拓扑结构,而相空间则是刻画系统吸引子拓扑结构最理想、最直观的空间。

1 相空间重构^[1,4]

对于动力系统,在固定地点观测得到的时间序列 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)$ 与系统的整体动力学行为之间,存在着密切的关系。实际上,只要这一时间序列足够大,足够细致,其动力学行为原则上可以利用这一时间序列构造出系统的相空间吸引子。

假定吸引子可嵌入 d 维空间,也就是说除去瞬态过程和涨落处,系统的状态对应于 d 维空间的一个矢量:

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_d)$$

与状态矢量 X 随时间 t 变化给出的轨道相应的几何轨迹就是系统的吸引子。对 d 维相空间做连续的一对一变换(同胚变换),吸引子的几何轨迹在变换下要发生变化,但是吸引子的拓扑性质不发生变化。维数属于拓扑性质,是变换不变量。所以,当我们取不同的状态参量描述系统时,虽然相应的吸引子几何性质可能存在很大的差异,但拓扑性质,特别是维数是相同的。

在一般情况下,如果已知某一物理量 x 随时间 t 的变化过程,那么适当选取延迟时间 τ 系统 t 时刻的状态可以由下面 d 个延迟状态参量

$$x(t), x(t + \tau), x(t + 2\tau), \dots, x(t + d\tau)$$

来等价描述。等价的含义是指状态空间之间相差一个一对一的变换, d 个延迟参量是用不同的变量对系统的完备描述,所以,我们原则上可以从时间序列中获得系统状态的演化信息,分析提取系统的动力学行为。在实际问题中,我们不可能测得连续时间序列,只能获得有限长的离散时间序列。另外,即使系统的动力学行为清晰,但由于时间序列中一般都存在噪声,具体分析起来很难获得精细的结果,通常只是讨论吸引子的拓扑行为,例如确定吸引子的关联维、分形维、李雅普诺夫指数等。

2 关联维^[1,3]

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http

考虑足够长的时间过程 T ,将时间等间距地离散化为 N 点,步长为 $\tau = T/N$,在相空间里

相应地有 N 个状态点 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)$, 记 $|x_i - x_j|$ 为相空间两状态点 X_i 和 X_j 之间的欧氏距离, 定义分布函数:

$$C_2(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j}^N \theta(r - |x_i - x_j|)$$

其中 θ 为阶跃函数, 如果 $x > 0$, $\theta(x) = 1$, 否则 $\theta = 0$ 。

分布函数 $C_2(r)$ 表示距离小于 r 点对出现的概率, 它刻画了相空间状态点的聚集程度, 通常称为关联函数。对于定态, 状态为一不动点, 即状态点凝聚为一点。这时, 对于任意的 $r > 0$, 均有 $C_2(r) = 1$ 。

当 r 足够小时, $C_2(r)$ 与 r 的关系为幂律关系:

$$C_2(r) \propto r^{D_2}$$

上式中, 指数 D_2 表征吸引子的维数, 称为关联维。若吸引子为不动点, 则 $D_2 = 0$ 。若吸引子为周期闭合圈, 即一维线型, 则 $D_2 = 1$ 。若吸引子为环面, 即二维面型, 则 $D_2 = 2$ 。对于混沌相应的奇异吸引子, 关联维 D_2 一般为分数。关联维 D_2 仅仅依赖于吸引子的拓扑性质, 所以可以通过利用时间序列重构相空间方法来获取。不过, 在实际问题中, 一方面观测数据往往不够多, 不够精细, 得出的结果偏差较大; 另一方面, 实际观测数据带有噪声, 这使得延迟时间 τ 和距离 r 的选取不能太小, 否则, 得到的是噪声背景结构。

计算关联维通常使用由 Grassber 和 Procaccia 提出的方法, 其步骤如下:

- (1) 适当选取延滞时间 τ 应用观测到的应力时间序列, 重新构造一个 m 维相空间。
- (2) 对于选定的维数 m , 分别算出与 r 值对应的 $C_2(r, m)$ 。

$$C_2(r, m) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{\substack{i, j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(r - |x_i - x_j|)$$

- (3) 根据关联函数 C_2 的幂律关系, 可知关联维为:

$$D_2(m) = \left| \frac{\ln C_2(r, m)}{\ln r} \right|$$

计算关联维的估计值 $D_2(m)$, 一般是作出对数图 $\ln C_2(r, m) - \ln r$, 而其直线部分的斜率就是 $D_2(m)$ 。

(4) 不断提高嵌入维数 m , 依次重复上述的 (2), (3) 步骤, 直至 m 达到某一值 m_c 时, 相应的关联维的估计值 $D_2(m)$ 不再随 m 的增长而发生有意义的变化 (即保持在给定误差范围内) 为止。这在 $\ln C_2(r, m) - \ln r$ 图里表现为一些曲线的直线部分的斜率不再随 m 的变化而变化。此时, $D_2(m_c) = D_2(m_c + 1) = D_2(m_c + 2) = \dots$, 记作 $D_2 = D_2(m_c)$ 。 D_2 就是我们所要求的吸引子关联维。 m_c 称为饱和嵌入维数。

m_c 的存在与否决定了时间序列性质: 如果 m_c 不存在, 那么关联维 $D_2(m)$ 将随 m 的增长而趋于无穷大, 这表示吸引子不存在, 从而可知, 被诊断的时间序列是一个随机系统。所以, 对于白噪声, $D_2(m)$ 是 m 的线性函数, 而对于混沌系统, $D_2(m)$ 可达到饱和。

3 相空间重构方法误差讨论

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
 设非线性模式阶数为 q 时间序列的点间隔为 R , 则平均误差 e :

$$e \propto R^{q+1} \quad (1)$$

若 d 维相空间里分布着 N 个相点, 则

$$R \propto N^{-\frac{1}{d}} \quad (2)$$

这里 $d = \text{INT}(D_2 + L)$, $L = 1, 2, \dots$, 而 INT 为取整函数, D_2 为分数维。

由 (1), (2) 式得 $e \propto N^{-\frac{q+1}{d}}$ 。

设时间序列的个数为 n , 重建相空间的延滞时间为 τ 则:

$$N = n - (d - 1) \tau \approx n$$

这里 τ 用时间间隔 τ 为单位。所以

$$e \propto n^{-\frac{q+1}{d}}$$

从上式可见, 在模式阶数一定的前提下, 有:

(1) 所用的相空间维数越小, 其预报误差越小。

(2) 所用的时间序列的个数越多, 其预报误差相对越小, 通常认为所需用的观测资料个数应不少于 260 个。

4 实例

我们应用相空间重构方法对淮北矿务局杨庄煤矿 II 6116 工作面煤层底板突水进行预测。

4.1 淮北矿务局杨庄煤矿 6116 工作面概况*

淮北矿区 6 号煤层属二叠系山西组, 为本区底层主采煤层, 其下伏的太原组和奥陶系石灰岩含水层岩溶发育、富水性强, 对 6 号煤层开采构成直接威胁的太原组石灰岩岩溶含水层之间没有稳定分布的隔水层, 相互之间水力联系密切, 富水性强。如 II 61 采区井下单个放水孔的放水量高 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

淮北矿务局杨庄煤矿 II 6116 工作面位于 II 61 采区最底部, 上接 II 6114 采空区, 主采煤层为 6 号煤(图 1), 该局杨庄煤矿, 煤厚 2.86 m , 煤层倾角 12° 左右。该工作面走向长度 790 m , 倾向宽度 130 m , 采用走向长壁式开采方法与机械化综采式回采技术。

II 6116 工作面 6 号煤层底板与太原组一层石灰岩岩溶含水层间距为 43.24 m , 由砂岩、页岩及泥岩构成 6 号煤层底板相对隔水层。6 号煤层底板隔水层承受太原组石灰岩岩溶含水层地下水的最大水压大于 3 MPa , 6 号煤层的开采有发生煤层底板突水的危险。通过对 6 号煤层底板隔水层的应力状态的监测, 可以反映煤层底板隔水层在采动过程中的破坏深度及其变化过程。这样能够对 6 号煤层在采动过程中的底板突水进行预测。为此该工作面在 6 号煤层底板隔水层中开展了应力监测工作。

本次监测孔孔深 17.7 m , 埋设的应力传感器为三分量传感器, 三个分量与开采方向的关系见图 2。分量之间夹角为 60° , 在埋设时应保持固定方位, I 为工作面推进方向, II 与工作面推进方向垂直, III 指向采空区。

4.2 应力时间序列的关联维计算

计算数据来自 II 6116 工作面采动过程中, 6 号煤层底板固定观测孔的三个应力分量的应力增量变化的观测值, 得到一组反映 6 号煤层采动过程中煤层底板隔水层典型代表点处应力

* 淮北矿务局杨庄煤矿, 煤炭科学研究总院西安分院·淮北矿务局杨庄煤矿 II 6116 工作面底板突水监测报告(内部报告). 1998.5. p3-9, p14-18

增量变化情况的时间序列。每个应力分量观测点有 400 个监测数据。对三个应力分量时间分布函数 C_2 的计算结果见图 3、图 4、图 5, 关联维 D_2 的计算结果见图 5、图 6、图 7、图 8。

地层时代			层厚 (m)	累厚 (m)	柱状图 1:500	岩石名称	岩性描述
系	统	组					
二 叠 系	下 二 叠 统	山 西 组	34.4	34.4		砂质页岩	以砂质页岩为主，偶夹泥质或砂岩条带，含大量植物根茎、叶片化石，层理不发育，层面常被炭质充填，富含云母碎片
			2.86	37.26		煤层	6号煤层
			3.82	41.08		泥岩	黑色泥岩上部局部有砂页岩
			31.3	72.38		砂岩	上部:灰白色条带砂岩,层理发育,断面平整 中部:中~细粒砂岩,钙质胶结,致密坚硬 下部:薄层状黑砂岩,富含大量岩质
石 炭 系	上 石 炭 统	太 原 组	15.7	88.08		泥岩	上部:泥岩,贝壳状断口 下部:泥岩,含植物化石和 FeS ₂ 沉积
			3.1	91.18		灰岩	一层灰岩,上部灰白色,下部黑色,属隐晶结构
			4.5	95.68		细砂岩夹 砂质泥岩	上部为灰白色细砂岩,下部为黑色砂质泥岩
			5.2	100.88		灰岩	二层灰岩,中上部含燧石,块状构造,隐晶结构
						泥岩	上部有 300mm 厚煤线,下部为泥岩

图 1 6116 工作面井下钻孔柱状图

Fig. 1 Column of the underground boreholes at No. 6116 face
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http

现以应力一分量的计算为例:

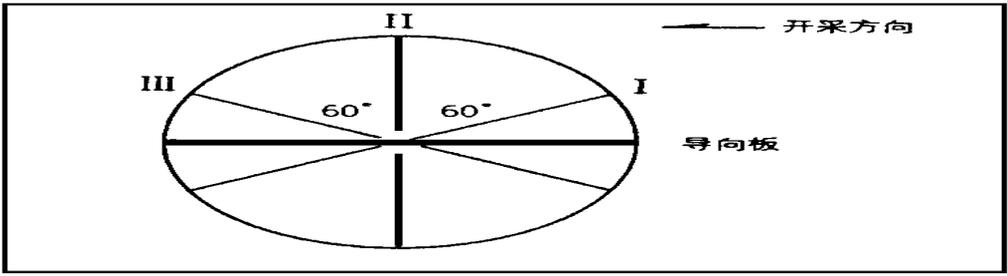


图2 应力传感器方位示意图

Fig. 2 The direction sketch map of stress sensors orientation

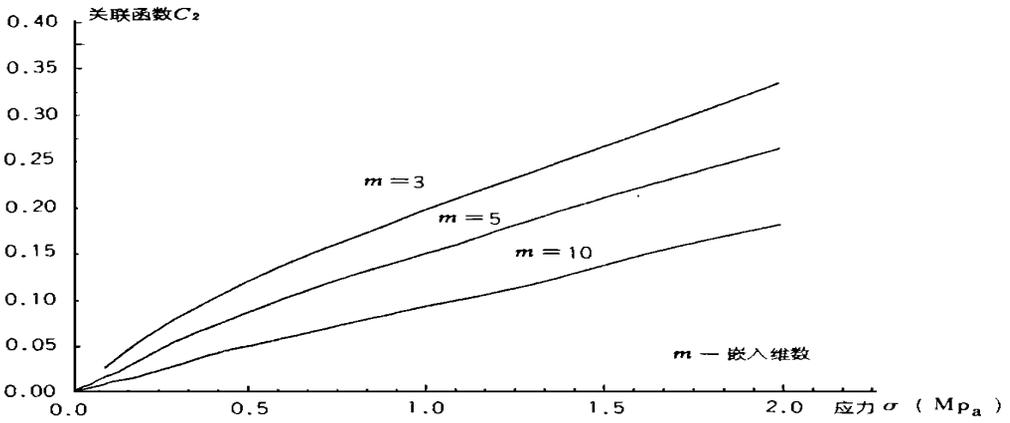


图3 一分量应力-关联函数图

Fig. 3 Relationship chart between the first stress component and correlation function

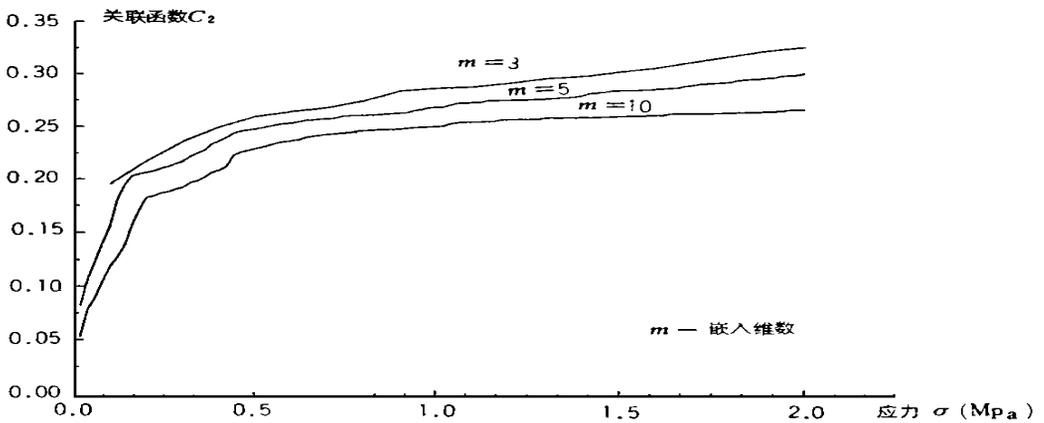


图4 二分量应力-关联函数图

Fig. 4 Relationship chart between the second stress component and correlation function

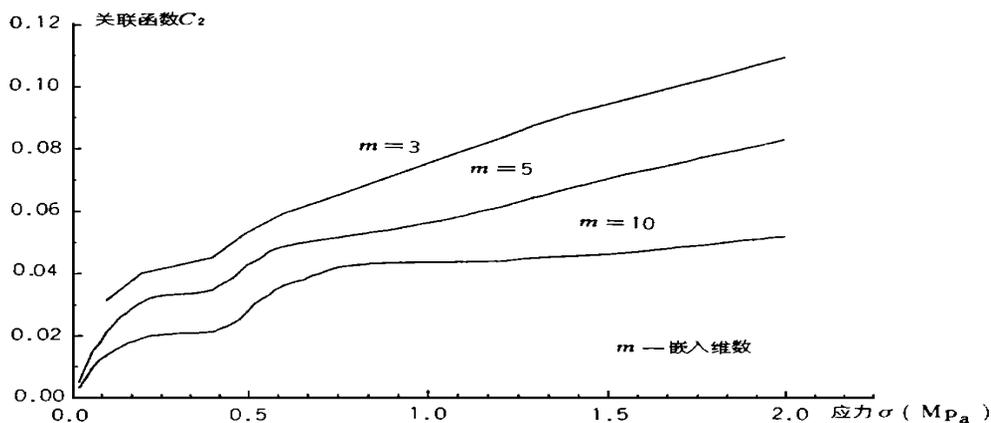


图 5 三分量应力-关联函数图

Fig. 5 Relationship chart between the third stress component and correlation function

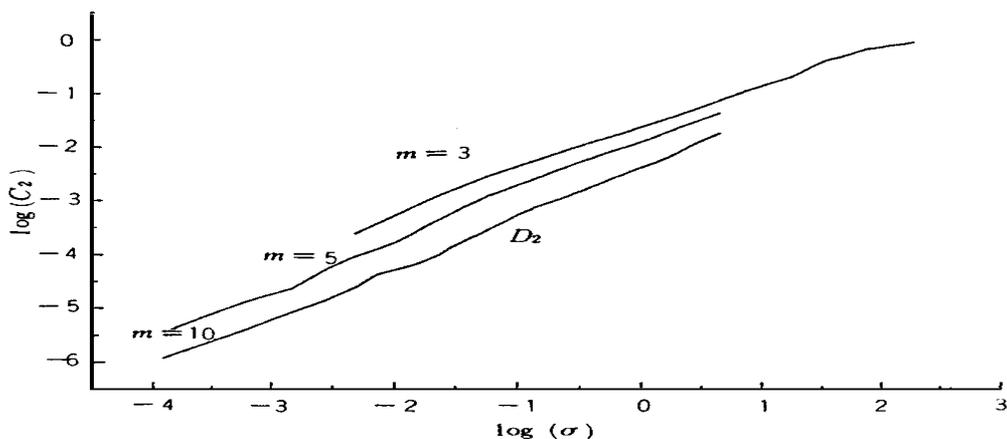


图 6 一分量关联维图

Fig. 6 Correlation dimension diagram of the first component

D_2 : 关联维; C_2 : 关联函数; σ : 一分量应力; m : 嵌入维数

①选取采集数据的时间间隔 Δt 为延滞时间, $\tau = 1h$, 利用观测到的时间序列重新构造一个三维相空间。

②对不同的 σ 值, 算出相应的 $C_2(\sigma)$ 值(图 3-5)。

③以上述数据为基础, 作出 $\ln C_2(\sigma) - \ln \sigma$ 曲线图, 而其直线部分的斜率就是 D_2 (3) :

④按前述及的步骤要求, 不断提高嵌入维数 m , 直到关联维的估计值 $D_2(m)$ 不再随 m 的增长而发生有意义的变化(即保持在给定的误差范围内)为止。

此时记作 $D_2 = D_2(5)$, 这就是我们所要求的应力一分量时间序列吸引子关联维。相应的关联维分别是 0.5, 0.75 和 1.1。

取嵌入维数为 $m = 5$ 和 $m = 10$ 时, 从对数图(图 6) 得出斜率近似相同的平行线。这说明嵌入维数具有饱和性, 所讨论的应力一分量时间序列不是随机过程相应的无规序列, 而是存在吸

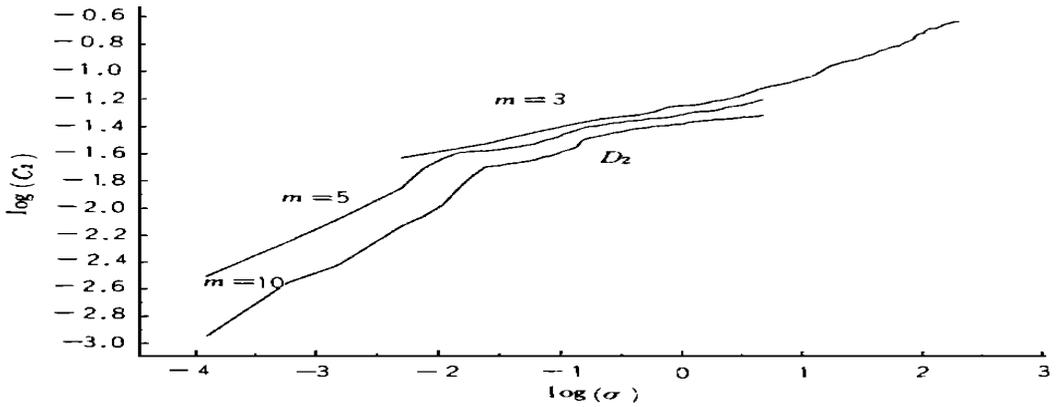


图 7 二分量关联维图

Fig. 7 Correlation dimension diagram of the second component

D_2 : 关联维; C_2 : 关联函数; σ : 二分量应力; m : 嵌入维数

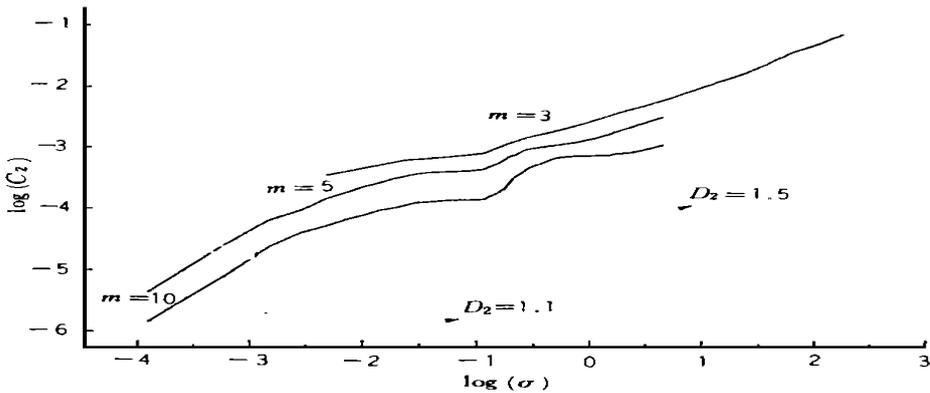


图 8 三分量关联维图

Fig. 8 Correlation dimension diagram of the third component

D_3 : 关联维; C_3 : 关联函数; σ : 三分量应力; m : 嵌入维数

引子的非线性序列。

同一观测孔的三个应力分量时间序列得出不同的关联维,初看有些奇怪,但实质上是合理的。在现在的情况下,一定的应力分量大体与一定方向的主应力相对应。不同方向主应力关联维数的不同,反映了煤层底板隔水层的空间各向异性的特征。关联维数小,表示应力活动不活跃,相对平静。特别是关联维数小于 1,表示应力活动不是连绵不断持续进行,而是具有阵发性,也就是间歇性。对于这里所讨论的过程来说,阵发性与开采驱动相联系。仅当在观测孔附近开采时,部分方向的应力活动才被有效地激发,一旦回采工作面远离观测孔,应力活动便趋于平静。

本实例计算所得的应力时间序列关联维的最大值 $D_3 = 1.1$,这一点很重要。由于关联维和吸引子的 Hausdorff 分维差别不大,可以说,所讨论的 6 号煤层底板隔水层中的应力动力系统的行为与极限环相近。考虑到系统被采掘过程驱动,而受迫系统的关联维不小于 1,因此,能够

得出这样的结论:

观测到的应力系统动力学行为基本上是煤层底板隔水层对采动的直接响应过程。系统没有经过进一步的分岔激发出新的自由度,从而过渡到更加复杂的高维吸引子上。换句话说,在开采过程中,煤层底板隔水层处于相对稳定状态。这种情况下,不可能出现大的应力调整,因此,也不可能出现 6 号煤层底板突水之类的破坏性事件。

本次预测应用的时间序列数据大于 260 个,相空间的维数为 3 维,预测误差小,预测结果可信。杨庄煤矿 II 6116 工作面 6 号煤层安全回采结束,也证明了这一结论的正确性。

参考文献:

- [1] 龙运佳,梁以德.近代工程动力学——随机、混沌[M].科学出版社,1998.6,P.86~93,P.98~103.
- [2] 欧阳首承.Lorenz 模型及其经典“chaos”的某些根本性问题.系统科学理论与应用文集[C].四川大学出版社,1996,P.125~131.
- [3] 王放,汪富泉,李后强.中国人口时间序列的混沌特征初探,中国人口科学(1)[C].1994,P.55~59.
- [4] 王延福,靳德武,曾艳京,王晓明.岩溶煤矿矿井煤层底板突水系统的非线性特征初步分析[J].中国岩溶,1998.12,P.334~336.
- [5] Martin casdagli,Stephen Eubank,J·Doyne Farmer and John Gibson.State Space reconstruction in the presence of noise Physica D51 North-Holland.1991,P60~95.

THE STATE SPACE RECONSTRUCTION OF WATER INRUSH THROUGH COAL BOTTOM LAYER

WANG Yan-fu, PANG Xi-qi, JIN De-wu, ZENG Yan-jing, WANG Xiao-ming
(Xi'an Branch of Central Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: In accordance with the complexity of the dynamic behavior of the water inrush system through coal bottom layer in karst coal mines, the state space reconstruction method developed in recent years has been adopted to calculate the attractor correlation dimension of this kind of complicated system. Based on the method above, the water inrush behavior through coal bottom layer were analyzed and predicted, and the precise of the forecast was testified in practice.

Key words: Water inrush forecast; Nonliner; State space reconstruction; Correlation dimension; Chaos