

矿井涌水量混沌特征与预测

杨永国, 陈玉华

中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116

摘要: 由于受到水文地质、矿井开采等因素的影响, 矿井地下水系统的演化不仅具有确定性也具有随机性, 采用单一的确定性方法或随机性方法都难以揭示矿井地下水系统演化的两面性. 混沌理论将确定性分析方法和随机性分析方法两者实现了统一. 矿井涌水量时间序列是地下水系统中各要素相互作用的结果, 它包含着该动力系统的信息. 基于刘桥二矿水文地质背景分析, 采用混沌时间序列分析方法对该矿的矿井涌水量时间序列进行建模、分析, 得出了其 Lyapunov 指数为 0.1427, 表明刘桥二矿涌水量具有混沌特征. 利用建立的模型, 选择 2004 年 4 月至 2005 年 2 月间的矿井涌水量时间序列进行验证, 结果表明, 利用混沌时间序列分析方法预测矿井涌水量是可行的且具有较高的精度.

关键词: 刘桥二矿; 混沌时间序列; 矿井涌水量; 预测.

中图分类号: TD742

文章编号: 1000-2383(2009)02-0258-05

收稿日期: 2008-12-10

Chaotic Characteristics and Prediction for Water Inrush in Mine

YANG Yong-guo, CHEN Yu-hua

School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: It is difficult to discover the certainty and randomness of the law of the evolution of the underground water system by only using deterministic method or stochastic method, because the evolution of the system is not only deterministic but also stochastic, due to the effect of such factors as hydrologic geology and mine exploitation. Chaos theory combines both deterministic analysis method and stochastic analysis method. The time series of water inrush in mine are the results of the interaction between the factors of the underground water system in mine and contain the information of this dynamical system. Based on the background analysis of hydrologic geology of the second coal mine in Liuqiao, we obtained the Lyapunov index (0.1427) of the time series of water inrush by modeling and analyzing of the chaotic time series. The Lyapunov index shows that the water inrush of the second coal mine in Liuqiao is of chaotic characteristics. By using the established model, the time series of water inrush in mine from April 2004 to February 2005 was verified, and the results indicate that the chaotic time series analysis method is feasible and highly effective in predicting the water inrush in mine.

Key words: the second coal mine in Liuqiao; chaotic time series; water inrush in mine; prediction.

矿井涌水是影响矿井安全生产的重要因素, 而矿井涌水量的大小决定了其影响矿井安全生产的程度. 因此, 矿井涌水量的预测得到广泛重视. 矿井地下水系统是随着开采深度和开采面积逐渐加大, 并逐渐演化的系统, 系统演化的过程呈现出由最初的稳态到非稳态, 然后在系统本身自我调节之下达到另一个稳态. 系统演化过程如同一个迭代过程. 每次迭代的初始条件都有所不同, 主要表现在地下水水

量、水位值差异上. 由于地质构造、地层岩性和水文气象等条件综合作用, 每次初始条件都表现出相对独立性和随机性(唐依民和肖江, 2006). 所以长期以来, 一直是采用传统的确定性或随机性或两者相结合的办法来揭示涌水现象的内在确定性规律和外随机性规律(Reibiec, 1991). 传统的时间序列分析理论和方法, 从时域或从频域研究其涌水序列的特征, 建立时间序列的 ARMA 模型, 但是未能反映地

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40730422, 40472146); 地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(No. GPMR2007-11); 中国矿业大学科技基金(No. OF061003); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助.

作者简介: 杨永国(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事数学地质、GIS 应用研究. E-mail: ygyang88@cumt.edu.cn

下水随时间变化对初始条件的敏感性、水文地质边界条件的动态性和计算模型的难以确定性等(杨永国等, 1996). 应用混沌理论将打破以往传统分析中单一的确定性分析或者随机性分析, 将两者统一起来的混沌分析法将使矿井涌水量的研究有所突破(汤琳等, 2007). 混沌理论在确定性系统和随机过程之间架起了一座桥梁, 混沌现象的发现开创了科学模型化的新时期. 一方面, 它意味着预测能力受到了根本性的限制, 在确定性系统中, 混沌的动力学特性能够放大微小的差异, 导致系统的长期不可预测; 另一方面, 混沌现象所固有的确定性表明大量的随机现象实际上比过去想象的更容易预测. 混沌时间序列通过对单因素量的空间重构达到恢复系统规律的目的(Zhang *et al.*, 2004), 达到对系统短期可预报性(Yang *et al.*, 2006)与长期不可预报性的辩证统一, 这有助于人们更深刻地认识其发展规律.

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区水文地质概况

刘桥二矿属于淮北煤田濉肖矿区, 位于淮北煤田中西部, 在地层区划分上属于华北地层区鲁西地层分区徐宿小区. 本区地层出露甚少, 多为第四系冲、洪积平原覆盖. 区内所发育地层由老到新, 层序为青白口系、震旦系、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系、上第三系和第四系. 从区域水文地质条件看, 该区大地构造环境处于华北板块东南缘、豫淮拗陷带的东部、徐宿弧形推覆构造的中南部, 东有固镇—长丰断层, 南有光武—固镇断层隔蚌埠隆起与淮南煤田相望, 西以夏邑—固始断层与太康隆起和周口拗陷为邻, 北以丰沛断裂为界与丰沛隆起相接. 四周大的断裂构造控制了该区地下水的补给、迳流、排泄条件, 使其基本形成一个封闭一半封闭的网格状水文地质单元.

1.2 原始数据及分析

由于该研究区是一个封闭一半封闭的网格状水文地质单元, 所以可以认为, 该研究区是一个不断演化的确定的系统. 另外, 由于煤矿涌水量是由多种因素综合作用的结果, 受水压、矿压、隔水层厚度、断层、矿井开采等多种因素的影响, 在具体涌水过程中这些因素之间的相互作用关系也是错综复杂的, 可以认为它也是由混沌的确定性系统产生的. 1987年11月到2005年2月矿井涌水量数据的变化趋势如图1, 从图

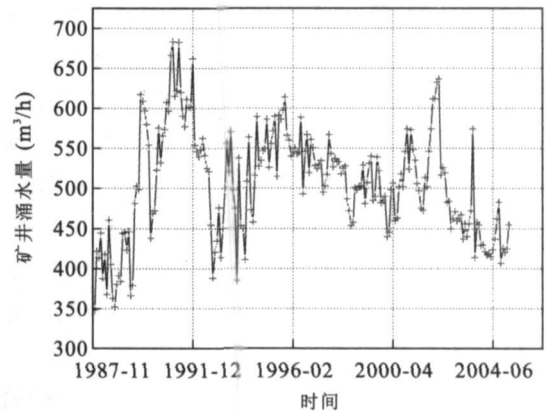


图1 矿井涌水量变化曲线

Fig.1 Curve of water inrush in mine

中可以看出涌水量变化具有明显非线性特征.

2 方法原理

2.1 重构时间序列相空间

系统的任一分量的演化是由与之相互作用的其他分量所确定的, 因此这些相关分量的信息就隐含在任一分量的发展过程中, 只需研究一个分量, 并将在某些固定的时间延迟点上的观测值作为新维来处理, 就可以重构出一个等价的相空间. 矿井涌水量时间序列 $x(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 是单变量时间序列, 按照 Packard *et al.* (1980) 提出的重建相空间的方法, 对于时间序列 $x(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 用一定的时间滞后 τ 和一定的嵌入维数 m , 可建立一个多维相空间 $Y_i(m)$ ($i=1, 2, \dots, n$).

$$Y_i(m) = (x_{t+\tau}, x_{t+2\tau}, \dots, x_{t+(m-1)\tau}),$$

$$i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

其中 τ 是时间延迟, m 是时间序列嵌入维数, 而 $n = N - (m-1)\tau$.

例如, 笔者可以重建三维相空间如下式: 假设 $Y_i(m)$ 是依托 $x(t_i)$ 时间序列的一个适当的参数序列, 则:

$$Y_0(3) = (x_0, x_1, x_2),$$

$$Y_1(3) = (x_1, x_2, x_3),$$

$$\vdots$$

$$Y_{n-1}(3) = (x_{n-1}, x_n, x_{n+1}).$$

一般情况下, 可以改变相空间维数 m 的值, 从而得到不同空间维数的序列.

2.2 确定时间延迟

选择合适的时间延迟 τ 对于能否从原始时间序

列中得到足够的信息是很必要的. 当 τ 选择的太大时, 重构矢量的各坐标值之间几乎变成随机的, 原系统各变量之间的内在关系受到了破坏, 并且混沌时间序列数据间的互信息以指数速率丢失, 当 τ 选择的太小时, 延迟矢量各坐标值之间有很强的相关性, 这时重构矢量被压缩在相空间的主对角线的周围, 将使得重构矢量包含的原动力系统的信息丢失. 因此, 应该选取合适的 τ 使重构矢量保持原动力系统各变量之间的关系.

时间延迟 τ 的选取方法主要有: 自相关函数法、复自相关法、重构展开法和互信息量法等. 自相关函数法计算简单、数据量的要求低, 可以保证相空间中各坐标分量的相关性较小, 符合重构相空间的要求, 因此被本文采用. 自相关函数法是利用自相关函数关于时间 τ 的函数图像, 选择自相关函数下降到初始值的 $1-1/e$ 时的时间 τ 作为重构相空间的时间延迟 (Rosenstein *et al.*, 1993). 通过计算可以得到矿井涌水量的自相关函数图 (图 2).

由图 2 可以看出, 当自相关函数下降到初始值的 $1-1/e$ 时, 所得的时间 τ 可以作为重构相空间的时间延迟. 因此, 计算相关函数初始值的 $1-1/e$ 倍, 得到值为 0.632 1, 而 $C(3) = 0.677 8$, $C(4) = 0.594 6$, $C(3)$ 的值与 0.632 1 比较接近, 所以, 取矿井涌水量的时间延迟为 3 个月.

2.3 确定嵌入维 m

非线性系统的相空间的维数可能很高, 并且可能是未知的. 而吸引子的维数 D 一般都低于相空间维数. 通过 Takens 定理重构相空间, 选择适当的时间延迟 τ 和嵌入维数 m , 可以在拓扑等价的意义下恢复原来系统的动力学特性. Grassberger and Pro-

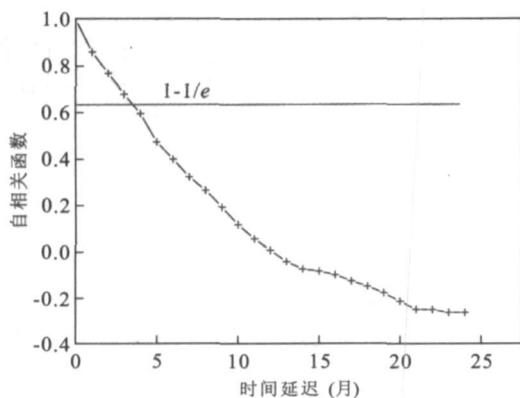


图 2 矿井涌水量的自相关函数

Fig. 2 Autocorrelation function of water inrush in mine

caccia (1983) 提出的计算关联维数作为吸引子的分维数的估计, 成为混沌时间序列的常用算法, 称为 G-P 关联维法, 或者 G-P 关联积分法. 这种算法不仅可以得出吸引子的关联维数, 而且可以得出重构相空间的嵌入维数. 但是该方法在一定条件下存在假临近现象. 为了克服这个缺陷, Cao (1997) 提出了 Cao 方法, 为了避免假临近, 在实际计算中使用 Cao 方法. Cao 方法首先根据式 (2) 计算相空间中的点在各嵌入维数条件下的最近邻点的距离变化值:

$$\alpha(i, m) = \frac{\|Y_i(m+1) - Y_{n(i,m)}(m+1)\|}{\|Y_i(m) - Y_{n(i,m)}(m)\|},$$

$$i = 1, 2, \dots, N - m\tau. \quad (2)$$

其中 $\|\cdot\|$ 为其 ∞ -范数, $Y_i(m+1)$ 为第 i 个相空间重构向量, 嵌入维为 $(m+1)$, $Y_{n(i,m)}(m)$ 为距离 $Y_i(m+1)$ 最近的向量. 其中 $n(i, m) \in \{1, 2, \dots, N - m\tau\}$.

根据式 (3) 计算相同维数下距离变化均值:

$$E(m) = \frac{1}{N - m\tau} \sum_{i=1}^{N - m\tau} \alpha(i, m), \quad (3)$$

$E(m)$ 为所有 $\alpha(i, m)$ 的均值. 最后根据式 (4) 观察 $E_1(m)$ 的变化情况.

$$E_1(m) = \frac{E(m+1)}{E(m)}, \quad (4)$$

当 $E_1(m)$ 在 m_0 处达到平稳, 或在此之后变化幅度较小时, 则认为此时的 m 达到了最小嵌入维数. 由图 3 可以看出, 当嵌入维 $m_0 = 7$ 以后 E_1 的值变化趋于平缓, 故可以确定最小嵌入维数为 $m = 8$.

2.4 计算 Lyapunov 指数

混沌运动的基本特点是运动对初值条件极为敏感, Lyapunov 指数是衡量运动轨道分离程度的物理量. 两个很靠近的初值所产生轨道, 随时间推移按指数方式分离, Lyapunov 指数就是定量描述这一现象

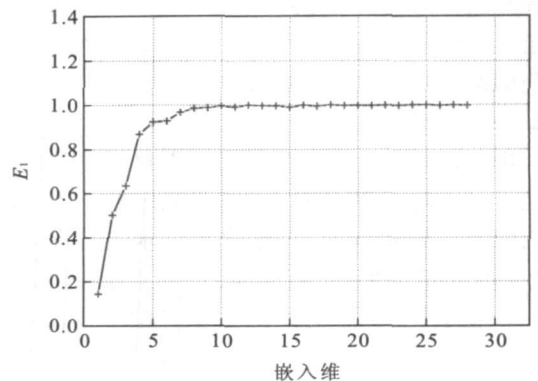


图 3 基于 Cao 方法计算的关联维数

Fig. 3 Correlation dimension based on Cao method

的量。若 Lyapunov 指数大于 0, 则相邻点最终要收敛于一点; 若 Lyapunov 指数小于 0, 则相邻点最终要发散, 如果轨道还有其他稳定因素, 则在此共同作用下形成混沌吸引子。因此, 在计算的时候 Lyapunov 指数大于 0 作为系统混沌行为的一个判断标准(Shang *et al.*, 2005)。重构相空间之后, 在相空间中选取初始相点 Y_i , 其邻近相点为 Y_j , 它们的初始距离为 $D_j(0) = |Y_i - Y_j|$, 相点演化 $k\Delta t$ 时间后, 邻近相点间的距离变为 $D_j(t) = |Y_{i+k\Delta t} - Y_{j+k\Delta t}|$, 有估计式 $D_j(i) \approx D_j(0)^{\lambda_1 + k\Delta t}$, 而 λ_1 为最大 Lyapunov 指数, 通过最小二乘法可求得, $\lambda_1 = \frac{1}{k\Delta t} [\ln D_j(i)]$ (Rosenstein *et al.*, 1993)。

2.5 预测

由于加权一阶局域预测法比全域法、局域法有较好的预测效果, 因此采用加权一阶局域预测法。算法具体步骤如下(吕金虎等, 2002):

①重构相空间。根据相空间重构理论以及公式(1), 自相关函数法计算的延迟时间为 3, 根据 Cao 方法计算的嵌入维数为 8, 所以得到相空间为:

$$Y_i(8) = (x_{t+\tau}, x_{t+2\tau}, x_{t+(8-1)\tau}), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

②寻找临近点。在相空间中计算各点到中心点 Y_k 之间的空间距离, 找出 Y_k 的参考向量集为 Y_{ki} , $i=1, 2, \dots, q$, 并且点 Y_{ki} 到 Y_k 的距离为 d_i 。设 d_m 是 d_i 的最小值, 定义点 Y_{ki} 的权值为:

$$P_i = \frac{\exp[-a(d_i - d_m)]}{\sum_{i=1}^q \exp[-a(d_i - d_m)]}, \quad (6)$$

a 为参数, 不妨取 $a=1$ 。

③进行计算预测。一阶加权局域线性拟合为:

$$\begin{bmatrix} Y_{k1+1} \\ Y_{k2+1} \\ \vdots \\ Y_{kq+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & Y_{k1} \\ e & Y_{k2} \\ \vdots & \vdots \\ e & Y_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \text{ 其中 } e = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_m \quad (7)$$

$m > 1$ 的情况类似于 $m=1$ 时的情况, 下面就 $m=1$ 的情况进行讨论, 即:

$$\begin{bmatrix} x_{k1+1} \\ x_{k2+1} \\ \vdots \\ x_{kq+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & x_{k1} \\ e & x_{k2} \\ \vdots & \vdots \\ e & x_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad (8)$$

应用加权最小二乘法有:

$$\sum_{i=1}^q P_i (x_{ki+1} - a - bx_{ki})^2 = \min \quad (9)$$

将上式看成是关于未知数 a, b 的二元函数, 两边求偏导得到

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^q P_i (x_{ki+1} - a - bx_{ki}) = 0 \\ \sum_{i=1}^q P_i (x_{ki+1} - a - bx_{ki}) x_{ki} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

化简得到关于未知数 a, b 的方程组为:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^q P_i x_{ki} + b \sum_{i=1}^q P_i x_{ki}^2 = \sum_{i=1}^q P_i x_{ki} x_{ki+1} \\ a + b \sum_{i=1}^q P_i x_{ki} = \sum_{i=1}^q P_i x_{ki+1} \end{cases} \quad (11)$$

解方程组(11)得 a, b , 代入式(8)可得预测公式。

3 矿井涌水量预测及结果分析

根据给出的方法, 利用 1987 年 11 月到 2005 年 2 月矿井涌水量数据, 计算得到: 时间延迟 $\tau=3$, 嵌入维 $m=8$, 最大 Lyapunov 指数 $\lambda_1=0.1427$, 预测周期 $T=1/0.1427 \approx 7$, 所以时间序列的预测长度为 7 个月。为了检验预测结果, 把 2004 年 4 月到 2005 年 2 月的矿井涌水量作为预测检验数据, 结果如表 1。

表 1 矿井涌水量实测值和预测值比较

Table 1 Comparison of observed data with forecasted results

序号	实测值(m ³ /h)	预测值(m ³ /h)	相对误差%
2004-04-01	419	440.6115	5.1
2004-05-01	415	442.1551	6.5
2004-06-01	423.7	440.7170	4.0
2004-07-01	437	431.9896	1.1
2004-08-01	462.33	450.8394	2.5
2004-09-01	482.6	434.2227	10.0
2004-10-01	406.88	426.4007	4.8
2004-11-01	425.31	437.4966	2.9
2004-12-01	420.44	440.6136	4.8
2005-01-01	424.93	442.1614	4.1
2005-02-01	454.79	440.7166	3.1

从表 1 可以看出相对误差基本控制在 5% 以内, 只有 2004 年 9 月出现相对误差达到 10%, 这说明预测精度较高。

4 结论

以刘桥二矿矿井涌水量时间序列为例, 综合研

究了混沌时间序列的混沌特征量计算和相空间重构,并进行了加权一阶局域预测,得出以下几点主要结论:

(1)矿区涌水系统是具有混沌性质的地下水系统.在计算得到的时间延迟和嵌入维数的基础上,通过 Lyapunov 指数计算方法,求得 Lyapunov 指数 $\lambda_1=0.1427$,由于 Lyapunov 指数大于 0,所以认为刘桥二矿涌水量时间序列具有混沌特性,可以判定,刘桥二矿矿井涌水量时间序列是具有混沌演化特征的矿区地下水系统所形成的混沌涌水量序列.

(2)选择混沌时间序列分析方法预测涌水量是可行的且具有较高的预测精度.基于研究区水文地质背景的分析,得出了矿井地下水系统是不断演化的混沌系统,因此采用混沌理论研究矿井地下水系统是可行的.从实际结果和预测结果的对比可以看出,预测结果和实际结果的相对误差基本控制在 5%以内,说明预测精度较高.

References

- Cao, L. Y., 1997. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. *Physica D*, 110(1-2): 43-50.
- Grassberger, P., Procaccia, I., 1983. Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D*, 9(1-2): 189-208.
- Lü, J. H., Lu, J. A., Chen, S. H., 2002. Chaotic time series analysis and application. Wuhan University Press, Wuhan, 237 (in Chinese).
- Packard, N. H., Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., et al., 1980. Geometry from a time series. *Phys. Rev. Lett.*, 45(9): 712-716.
- Reibiec, M. S., 1991. Hydrofracturing of rock as a method of water, mud and gas inrush hazards in underground coal mining. 4th IMt A, 1(Yugoslavia).
- Rosenstein, M. T., Collins, J. J., DeLuca, C. J., 1993. A prac-

tical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D*, 65(3): 117-134.

- Shang, P. G., Li, X. W., Santi, K., 2005. Chaotic analysis of traffic time series. *Chaos, Solitons & Fractals*, 25(1): 121-128.
- Tang, L., Yang, Y. G., Xu, Z. J., 2007. Study of non-linear time series analysis and its use on mine water inrush prediction. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (5): 28-31 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. M., Xiao, J., 2006. Condition and mechanism about chaos formation in the evolution process of groundwater system of minning area. *Journal of China Coal Society*, 31(1): 45-49 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. G., Yu, Z. W., Guo, Z. T., et al., 1996. A study on application of time domain combined model to the prediction of climatic trend based on geological records. *Chinese Journal of Geophysics*, 39(1): 37-46 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. G., Yuan, J. F., Chen, S. Z., 2006. R/S analysis and its application in the forecast of mine inflows. *J. China Univ. of Mining & Tech*, 16(4): 425-428.
- Zhang, J., Lam, K. C., Yan, W. J., et al., 2004. Time series prediction using Lyapunov exponents in embedding phase space. *Computers and Electrical Engineering*, 30(1): 1-15.

附中文参考文献

- 吕金虎, 陆君安, 陈士华, 2002. 混沌时间序列分析及其应用. 武汉: 武汉大学出版社.
- 汤琳, 杨永国, 徐忠杰, 2007. 非线性时间序列分析及其在矿井涌水预测中的应用研究. *工程勘察*, (5): 28-31.
- 唐依民, 肖江, 2006. 矿区地下水系统演化过程中混沌性态形成的条件及机理. *煤炭学报*, 31(1): 45-49.
- 杨永国, 余志伟, 郭正堂, 等, 1996. 基于地质记录用时域组合模型预测气候变化趋势的初步研究. *地球物理学报*, 39(1): 37-46.