

文章编号: 1001-1986(2008)04-0034-03

矿井涌水量混沌时间序列分析与预测

陈玉华¹, 杨永国¹, 彭高辉²

- (1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008;
2. 华北水利水电学院数学与信息科学学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 矿井地下水系统是个非线性系统, 由于地下水系统的复杂性, 很难完全确定影响矿井涌水量的因素, 因此传统的矿井涌水预测表现出较大的局限性。而混沌时间序列分析能够利用单变量处理方法, 分析矿井地下水系统中, 由于多因素耦合作用所产生的矿井涌水量时间序列。通过对某矿区 1985 年 9 月至 2005 年 2 月矿井涌水量时间序列资料的分析, 显示矿井涌水量时间序列具有混沌特征; 通过对比预测值和实测值, 表明预测精度高。因此, 混沌时间序列分析方法用于矿井涌水量预测是可行的。

关键词: 混沌; 涌水量; 时间序列预测

中图分类号: TD742 **文献标识码:** A

Chaotic time series analysis and prediction for mine water inflow

CHEN Yu-hua¹, YANG Yong-guo¹, PENG Gao-hui²

- (1. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;
2. College of Mathematics and Information Sciences, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: The traditional forecasting methods for mine water inflow have limitations to show the underground system entirely, especially for the nonlinear underground mine water system of many unclear factors. However, the chaotic time series analysis methods can analyze the multi-parameters system by the single parameter information. Therefore, authors have a try for applying the chaotic time series analysis method to analyze a mine water inflow time series. Finally, the analysis results of mine water inflow data from September, 1985 to February, 2005 of a mine indicate that the mine water time series has chaotic characters and the chaotic time series analysis method is effective to predict mine water inflow.

Key words: chaos; water inflow; time series prediction

进行矿井排水能力设计和有效预防矿井涌水, 需要依靠对矿井涌水量的预测。矿井地下水系统是随着开采深度和开采面积逐渐加大而演化的系统, 且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。另外, 迭代的水文地质参数对于上次迭代来说, 并没有发生质的变化, 只是在数量上可能有所

不同。所以矿区地下水系统的演化是可以用随机迭代过程来描述的^[1]。混沌系统任意分量的演化是由与之相互作用的其他分量所决定的。因此这些相关分量的信息, 就隐含在任意分量的发展过程中, 这样就可以从某一分量的一批时间序列数据中提取和恢复系统原来的规律。这种规律是高维空间的一种轨迹^[2]。本文利用混沌时间序列分析方法, 把由于多变量耦合关系导致的矿井地下水系统所产生的矿井涌水量时间序列, 用单变量方法进行了分析, 从而达到对矿井涌水演变规律更详细的认识。

收稿日期: 2007-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40472146);中国矿业大学科技基金项目(OF061003);华北水利水电学院青年科研基金项目(HSQJ2005015)

作者简介: 陈玉华(1978—), 男, 安徽淮北人, 博士, 主要从事 GIS 及数学地质教学和研究工作。

1 混沌时间序列预测方法

1.1 相空间重构

系统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^[3] 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

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

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

例如, 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

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

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

$$Y_2(3) = (x_2, x_3, x_4),$$

$$\vdots$$

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

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。

1.2 确定时间延迟

合适的时间延迟 τ 的确定对于能否从原始时间序列中得到足够的信息是很必要的。太小的时间延迟 τ 不能获得足够的信息, 太大的时间延迟 τ 使得问题难以解决。有两种方法可以用来预测时间序列的时间延迟 τ 。第一种方法是计算时间序列的自相关函数, 选择自相关函数值降低到初始值的 $1 - \frac{1}{e}$ 时, 所得时间 τ 就是重构相空间的时间延迟 τ ; 第二种方法是平均互信息方法。现在人们无法确定到底选择那种方法来确定时间延迟 τ , 在实际的使用中此两种方法都有选择。实际应用选择第一种方法, 通过计算可以得到如表 1 的值。

表 1 自相关系数

Table 1 The autocorrelation coefficient

τ	AC	τ	AC
0	1	6	0.369 36
1	0.903 86	7	0.271 39
2	0.809 56	8	0.189 9
3	0.703 46	9	0.093 466
4	0.589 72	10	0.014 028
5	0.463 5		

表 1 中, τ 是时间延迟, AC 是自相关系数。按照自相关系数降低到初始值 $1 - \frac{1}{e}$ 时, 所得时间 τ 就是重构相空间的时间延迟 τ , 所以 τ 选择 4。

1.3 确定嵌入维 m

Grassberger 和 Procaccia 提出的 G-P 算法^[4] 可以用来确定嵌入维 m , 但是该方法在一定条件下存在假临近现象, 为了克服这个缺点, 提出了 Cao 方法^[5], 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)确定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;

$$\alpha(i, m) = \frac{\|Y_i(m+1) - Y_{n(i, m)}(m+1)\|}{\|Y_i(m) - Y_{n(i, m)}(m)\|}, \quad (i=1,2,3,\dots, N-m\tau) \quad (2)$$

式中 $\|\bullet\|$ 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, $n(i, m) \in \{1, 2, 3, \dots, N-m\tau\}$ 。

根据式(3)计算相同维数下距离变化均值:

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

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

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

从图 1 可以看出, 当 $m=3$ 以后, E_1 变化波动较小, 所以由此可以判断 $m_0=4$, 最小嵌入维数为 4。

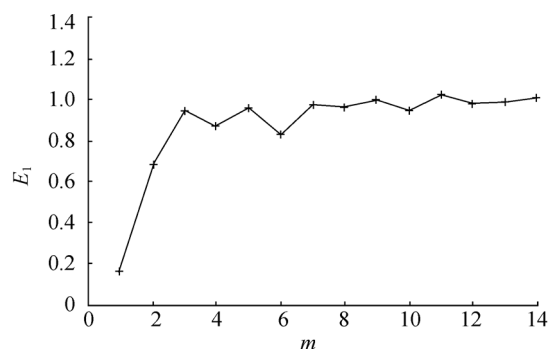


图 1 基于 Cao 方法计算的关联维数

Fig.1 Correlation dimension by Cao method

1.4 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。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的量。若 Lyapunov 指数小于 0, 则相邻点最终会收敛于一点; 若 Lyapunov 指数大于 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^[6]。

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 $\lambda_1 = \frac{1}{k\Delta t} [\ln D_j(i)]^{[1]}$ 。

1.5 预测

知道了 λ_1 后,便可以进行预测了。设 Y_M 为预报的中心点,相空间中 Y_M 的最近的邻点为 Y_k , 其距离为 $d_M(0)$, 最大 Lyapunov 指数 λ_1 , 即

$$d_M(0) = \min_j \|Y_M - Y_j\| = \|Y_M - Y_k\|,$$

$$\|Y_M - Y_{M+1}\| = \|Y_k - Y_{k+1}\| e^{\lambda_1},$$

其中点 Y_{M+1} 只有最后一个分量 $x(t_{n+1})$ 未知,故 $x(t_{n+1})$ 是可预报的^[6]。

2 实例及数据分析

本文选择某矿区 1985 年 9 月至 2005 年 2 月的矿井涌水量数据作为研究对象,数据具有明显非线性特征(图 2)。为实现对矿井涌水量的预测,利用上述混沌时间序列分析方法对数据进行了分析和处理。

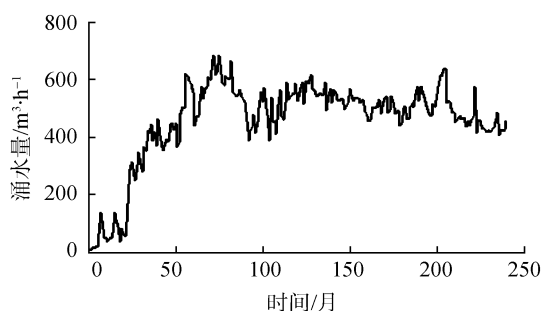


图 2 矿井涌水量变化曲线图

Fig.2 The curve of mine water inflow

计算过程如下: a. 利用自相关系数法经过计算,当 $\tau = 4$ 自相关系数降低到初始值 $1 - \frac{1}{e}$, 所以选择 $\tau = 4$; b. 利用 Cao 方法计算,当嵌入维 $m=3$ 以后 E_1 的值变化较小,所以取 $m=4$; c. Lyapunov 指数是衡量运动轨道分离程度的物理量,采用上述计

算 Lyapunov 指数方法计算出最大 Lyapunov 指数 $\lambda_1 = 0.053\ 355$; d. 利用最大 Lyapunov 指数可以计算出预测周期 $T = 1/0.053\ 355 \approx 18$, 所以时间预测长度为 18 个月,把 2003 年 9 月至 2005 年 2 月作为预测检验数据,预测得到数据见表 2。

表 2 矿井涌水量实测值和预测值 m^3/h
Table 2 Measured values and predicted values of mine water inflow

序号	实测值	预测值	误差%	序号	实测值	预测值	误差%
1	414	488.84	15.3	10	423.7	444.69	4.7
2	458	454.5	0.77	11	437	460.96	5.2
3	455	467.13	2.5	12	462.33	476.98	3.1
4	429	476.1	9.8	13	482.6	578.93	16.6
5	430	442.58	2.8	14	406.88	528.03	22.9
6	421.3	623.47	32.4	15	425.31	602.87	29.4
7	417.5	471.9	11.5	16	420.44	459.55	8.5
8	419	441.57	5.1	17	424.93	433.29	1.9
9	415	460.6	9.9	18	454.79	434.3	4.7

3 结论

本文利用混沌时间序列分析方法对矿井涌水量时间序列进行了分析,把由于多变量耦合关系导致的矿井地下水系统所产生的矿井涌水量时间序列,利用单变量方法进行了分析,计算分析得出 $\lambda_1 = 0.053\ 355 > 0$, 该结果显示矿井涌水量时间序列具有混沌特征与混沌吸引子,从而,对预测矿井涌水量有实际意义。选择某矿 2003 年 9 月至 2005 年 2 月的涌水量进行预测对比,结果显示,除 2004 年 2 月、10 月和 11 月有较大误差以外。其余都取得了较理想预测结果。

参考文献

- [1] 唐依民,肖江. 矿区地下水系统演化过程中混沌性态形成的条件及机理[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 45-50.
- [2] SHANG P G, LI X W, KAMAE S. Chaotic analysis of traffic time series[J]. Chaos, Solitons&Fractals, 2005, 25(1): 121-128.
- [3] PACKARD N H. Geometry from a time series[J]. Phy Rev Lett, 1980, 45(9): 712-716.
- [4] ROSENSTEIN M T, COLLINS J J, DELUCA C J. A practical method for the calculating largest Lyapunov exponents from small datasets[J]. Physica D, 1993, 65(1-2): 117-134.
- [5] Cao L. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series[J]. Physica D, 1997, 110(1-2): 43-50.
- [6] 吕金虎,陆君安. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.