

重构时间窗在循环流化床波动信号分析中应用

马丽萍¹, 石炎福², 黄卫星², 余华瑞², 祝京旭³

(1. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 四川大学 化学工程学院, 四川 成都 610065; 3. 加拿大西安大略大学 化学及生物化学工程系, 加拿大 N6A5B9)

摘要: 延迟重构法一直以来被广泛应用于实验数据时间序列混沌吸引子的重构, 大多数研究者均采用固定滞时 τ , 增大嵌入维的方法计算关联维. 研究表明在计算关联维时固定时间窗 $w = (m - 1)$ 比固定滞时 τ 更能保证关联维计算的正确性, 但往往 w 难以确定. 本文根据 H. S. Kim 等提出的基于相空间中点分布的统计规律的关联积分法, 用少量的数据同时计算 τ 和 w , 首次用此方法确定的时间窗对循环流化床颗粒浓度波动信号进行混沌分析. 计算结果表明了固定 w 计算关联维的优越性, 并分析了循环流化床中颗粒的运动特性.

关键词: 时间窗; 关联积分; 循环流化床; 混沌分析

中图分类号: TQ051.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2003)05 - 0119 - 05

Embedding Window and its Application in the Analysis of Fluctuation Signal in Circulating Fluidized Bed

MA Li-ping¹, SHI Yan-fu², HUANG Wei-xin², YU Hua-rui², ZHU Jing-xu³

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Faculty of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Department of Chemical and Biochemical Engineering, The University of Western Ontario, Canada N6A5B9)

Abstract: The method of time delay is widely used for reconstructing chaotic attractors from experimental time series. Most of studies have used a fixed delay time τ to calculate correlation dimension when the embedding dimension is increased. Many researchers have suggested that choosing a fixed delay time window $w = (m - 1)$ can get correlation dimension much better than choosing a fixed τ . Unfortunately, w cannot be easily. Based on the correlation integral method of a data set spatial distribution statistic provided by H. S. Kim etc., the w and τ have been estimated at the same time with small sample sizes and the chaotic analysis of the solid hold-up fluctuation signal in CFB riser has been done. Results show that the superiority using a fixed w in calculating correlation dimension, and the characteristics of particle movement in circulating fluidized bed riser are also analyzed.

Key words: time delay embedding window; correlation dimension; circulating fluidized bed; chaotic analysis

0 引言

循环流化床(circulating fluidized bed,简称 CFB)具有重要的实际应用价值,有关 CFB 中颗粒、流体动力学行为也得到广泛研究.自 Stringer^[1]提出流化床波动信号是混沌以来,确定性混沌理论被用来研究流化床非线性动力学行为,通过分析时间序列的压力、颗粒浓度波动信号提取有关流化床中流体动力学信息^[2~4],用于表征流动结构、分析流型转变和流化床放大,为工程设计和生产监测提供理论依据.在对流化床进行混沌分析时,确定用于定量描述混沌吸引子的分形结构,表征动力系统自由度数的重要参数 - 关联

收稿日期:2002 - 12 - 26; 基金项目:国家自然科学基金(海外青年学者合作基金)资助项目(项目编号:No. 29928005).

第一作者简介:马丽萍(1966. ~),女,博士;主要研究方向:空气污染. E-mail: mihorse22@sohu.com

维,较为广泛应用的方法就是延迟重构法^[5~7].大多研究者在相空间重构计算中都选择一个固定的滞时 τ ,对不同的嵌入维 m 保持相同的滞时计算关联维.但研究者们已发现固定 τ 计算关联维并不能快速收敛,而且会给计算结果带来误差^[8,9].近年来研究者们发现用固定的时间窗 $w = (m - 1)\tau$ 比用固定的 τ 更能保证关联维计算的准确性.时间窗 w 指由单变量时间序列重构到多维相空间中每个嵌入点的总的的时间跨度,它把延迟重构法中的滞时 τ 和嵌入维 m 结合起来,在一定程度上决定了由时间序列嵌入到相空间矢量所通过的信息的数量,并可使计算减少冗余性,扩大无标度线性区^[10].

对流化床波动信号的混沌研究,大都采用自相关函数法^[11]或互信息法^[12,13]确定滞时,用固定滞时的方法计算关联维.或采用Schouten等提出的RRCHAOS^[14]软件计算,此方法类似Kugiumtziis^[15]确定平均轨道周期的方法,选择一个适当的采样频率,计算时间序列数据点穿过时间序列平均值的点数来确定相空间嵌入的长度,带有很大的经验性^[16,17].本文在H. S. Kim等提出的基于相空间中点分布的统计规律的关联积分法(简称C-C法)^[18]基础上,在较少的数据量情况下可同时获得滞时 τ 和时间窗 w ,首次用此方法确定的时间窗对循环流化床提升管内颗粒浓度波动信号进行混沌分析,并比较了分别固定 τ 和 w 对关联维计算的影响,为准确提取CFB中气固流体动力学信息提出了一种新的方法.

1 C-C算法

由Grassberger和Procaccia^[19]提出的关联积分计算混沌吸引子关联维的方法已被广泛运用,关联积分方程为:

$$C(m, N, r, \tau) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq M} (r - |x_i - x_j|)^+, r > 0 \quad (1)$$

式中 $M = N - (m - 1)\tau$ 为长度为 N 的数据序列嵌入 m 维相空间中的点数, r 为一特定距离, $(a)^+$ 为Heaviside函数, $(a)^+ = \begin{cases} 0, & a < 0 \\ 1, & a \geq 0 \end{cases}$

吸引子关联维定义为: $D_2(m, \tau) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log_2 C(m, N, r, \tau)}{\log_2(r)}$ (2)

根据Brock基于关联积分的BDS统计^[20],对一个单变量时间序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 将其分为 t 个不相联的时间序列, t 为时间延迟,再由这 t 个不相联的时间序列计算 $S(m, N, r, t)$.

对 $t = 1$, $S(m, N, r, 1) = C(m, N, r, 1) - C^m(1, N, r, 1)$ (3)

$t = 2$ 得到两个时间序列 $\{x_1, x_3, \dots, x_{N-1}\}$ 和 $\{x_2, x_4, \dots, x_N\}$,每段长度为 $N/2$

$$S(m, N, r, 2) = \frac{1}{2} \left\{ [C_1(m, N/2, r, 2) - C_1^m(1, N/2, r, 2)] + [C_2(m, N/2, r, 2) - C_2^m(1, N/2, r, 2)] \right\} \quad (4)$$

以此类推,对任意 t, N

$$S(m, r, t) = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^t [C_s(m, N/t, r, t) - C_s^m(1, N/t, r, t)] \quad (5)$$

如果相空间中点是iid分布并且 $N \rightarrow \infty$,那么 $S(m, N, r, t)$ 对所有的 r 将等于0.然而,真实的数据序列总是有限长度,且数据间可能是相关的,所以一般 $S(m, r, t) > 0$,因此局部最佳时间可确定为 $S(m, r, t)$ 首次过零点或 $S(m, r, t)$ 表现出对不同的 r 变化最小点,这意味着点的分布最接近均匀分布.对所有的 r 定义变量

$$S(m, t) = \max(S(m, r_j, t, N)) - \min(S(m, r_j, t, n)) \quad (6)$$

Brock等^[20]模拟了大量各种类型的分布研究后指出,对有限时间序列长度,当 $N > 500$ 一般 m, r 取值为

$2 \leq m \leq 5, \frac{1}{2} \leq r \leq 2$, σ 为数据序列的标准偏差.对不同的 m, r ,取式(5)的平均值为

$$\bar{S}(t) = \frac{1}{16} \sum_{m=2}^5 \sum_{r=1}^4 S(m, r_j, t) \quad (7)$$

式(6)的平均值为

$$\bar{S}(t) = \frac{1}{4} \sum_{m=2}^5 S(m, t) \tag{8}$$

那么点对间完全独立最佳延迟时间应该为 $\bar{S}(t)$ 和 $\bar{S}(t)$ 首次达最小值所对应的时间 t , 即为最佳滞时 $d = t_s$, s 为采样时间间隔. 假设 $\bar{S}(t)$ 和 $\bar{S}(t)$ 对数据点的空间分布都有相同的影响力, 考虑二者之和为

$$S_{cor}(t) = \bar{S}(t) + |\bar{S}(t)| \tag{9}$$

则时间窗 w 应为 S_{cor} 最小值所对应的最佳延迟时间 t , $w = t_s$.

2 循环流化床(CFB)颗粒浓度波动滞时和时间窗判定

CFB 颗粒浓度波动数据来自加拿大西安大略大学, CFB 提升管为 $0.076 \times 10 \text{ m}$, 从高 $h = 6.34 \text{ m}$ 处沿径向采集颗粒浓度波动信号, 采样频率 970 Hz . 固体颗粒为 FCC, 平均粒径 $67 \mu\text{m}$, 密度 1500 kg/m^3 . 选取 $G_s = 300 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $U_g = 8 \text{ m/s}$ 一组数据为例, 根据以上提出的 C-C 算法对 CFB 颗粒浓度波动进行分析, 判定最优滞时 d 和时间窗 w . 由试验测得原始信号如图 1, 信号经除噪后计算结果见图 2.

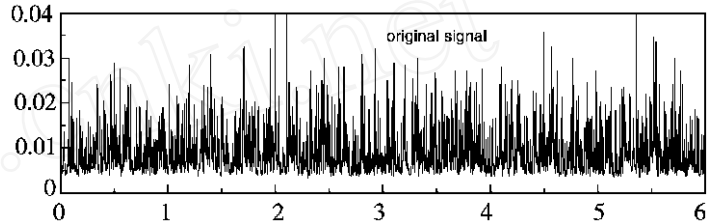


图 1 CFB 颗粒浓度波动信号, $h = 6.34 \text{ m}$, $G_s = 300 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $U_g = 8 \text{ m/s}$

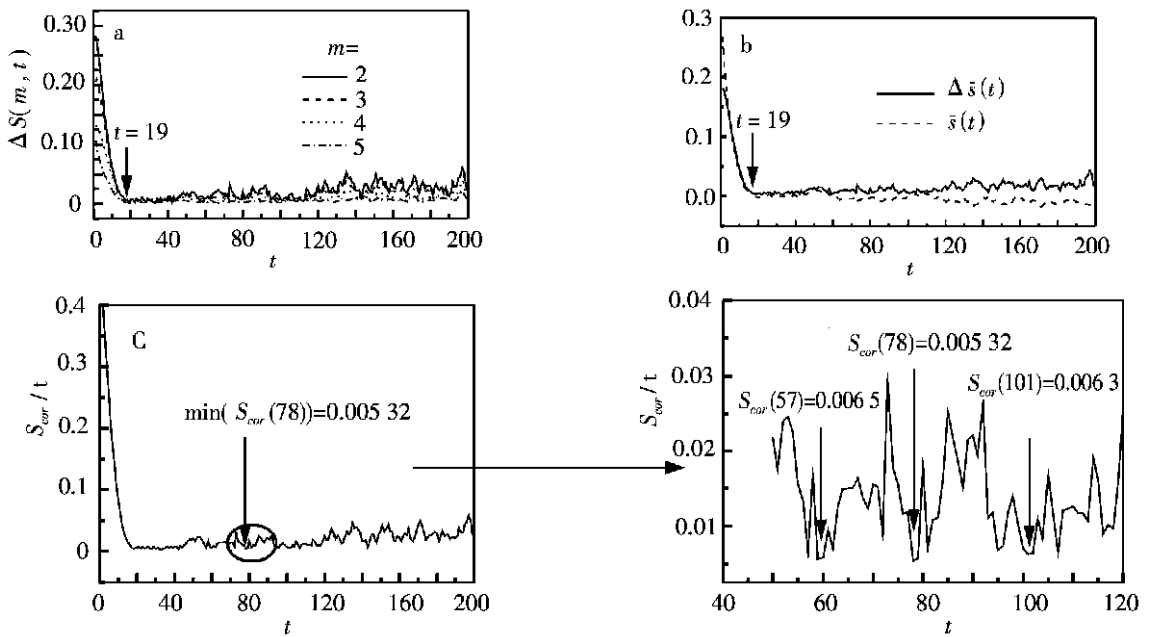


图 2 $S(m, t)$; (a) $\bar{S}(t)$ 、 $\bar{S}(t)$ (b); 和 $S_{cor}(t)$ (c) 随 t 值的变化计算示意, 箭头所指为最佳滞时 $d = 19 \text{ s}$, $S_{cor}(t)$ 最小值可得时间窗 $w = 78 \text{ s}$

由以上计算可得 $d = 19 \text{ s}$, $w = 78 \text{ s}$, $s = 0.001$. 分别固定 d 和 w 计算关联维, 结果如图 3a, b, 图 3a 中固定滞时 $d = 19 \text{ s}$, 嵌入维 m 由 2 到 20 步长为 2 逐渐递增; 图 3b 中固定 $w = 78 \text{ s}$, 延时由 3 到 23 步长为 2 递增, 嵌入维 $m = w/2 + 1$.

由图 3a, b 计算关联维 D_2 , 结果如图 3c.

由图可见, 当固定 d 时, $m = 13$ D_2 才收敛, 随嵌入维 m 的增大, 无标度区逐渐缩短, 且过短和无标度区会引起计算结果偏差; 而固定 w 计算关联维, 无标度区直线段长, 且各斜率很接近, $m = 6$ 即收敛到相

关联维. 故可用固定时间窗 w , 选取较小的滞时 t 、较大的嵌入维 m 仅需少量计算即可收敛得到关联维. 用固定时间窗的方法对 CFB 提升管相同气速、高固体循环量 ($300 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) 和低固体循环量 ($100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) 条件下不同径向位置计算关联维如图 4.

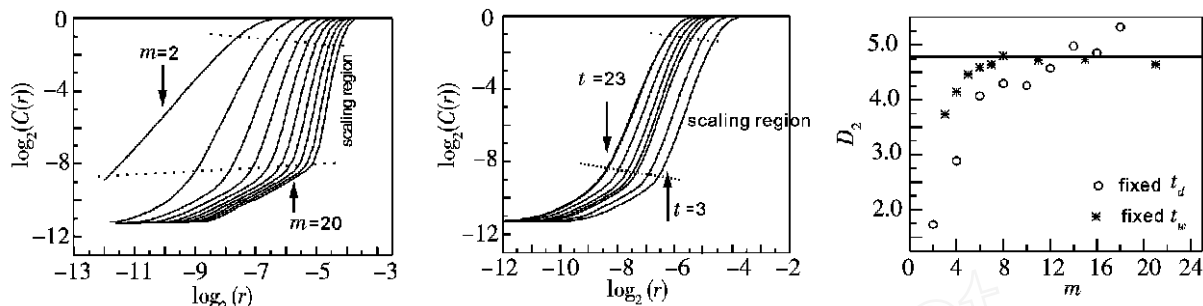


图3 颗粒浓度波动信号关联积分及关联维计算示意

由图可见, 关联维由床层中心沿径向呈逐渐增加, 到一最高点后又下降的趋势. 低固体循环量关联维最高点靠近床壁, 且变化梯度大, 高固体循环量关联维最高点相对于低固体循环量时要靠近床层中心, 且关联维沿径向变化趋势相对低固体循环量要平缓. 关联维描述了奇异吸引子的分形结构, 在一定程度上反应了动力系统的自由度, 固体循环量增加, 颗粒之间相互碰撞、聚集几率大, 表现出高固体循环量关联维比低固体循环量时要高. 从关联维的径向分布也可看出, 关联维在径向上有一最高点, 表明在床层中有环核流动特征, 由于交界区环核两区交换强烈, 伴随颗粒团的形成和解体, 表现出此处颗粒运动混乱, 自由度高, 关联维大.

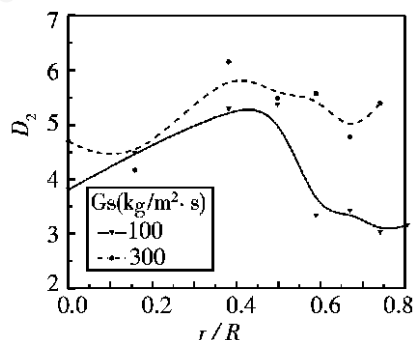


图4 颗粒浓度波动信号关联维径向分布

3 结论

1) 通过对重构相空间分布的关联积分的统计分析导出了用较少量数据量计算时间窗 w , 首次用于 CFB 颗粒浓度波动信号分析, 结果表明固定 w 比固定 t_d 无标度区间直线段长, 能很快收敛. 即可用固定 w , 选择较大的嵌入维 m , 较小滞时 t , 用少量计算很快可得到混沌吸引子的关联维, 比用固定滞时 t_d 计算关联维优越.

2) 对循环流化床快速发展段不同固体循环量下关联维沿径向变化计算结果表明, 关联维沿径向的变化在一定程度上反应了床层中颗粒运动环核结构的特性. 为 CFB 中气固流动行为的判别提供依据.

符号说明:

$C(m, N, r, t)$ — 关联积分, D_2 — 关联维, m — 嵌入维, N — 时间序列长度, r — 关联积分特定距离, S — BDS 关联积分统计值, x_i — 时间序列变量, σ^2 — 时间序列方差, t_d — 滞时, w — 时间窗.

参考文献:

- [1] Stringer J. Chaotic characteristics of a complex gas - solid flow[C]. in Proceeding of the 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 1989, (1): 265 ~ 272.
- [2] Robert C. Zjerveld, Filip Johnsson, Antonio Marzocchella, Jaap C. Schouten, Cor M. van den Bleek. Fluidization Regimes and Transitions from Fixed Bed to Dilute Transport Flow[J]. Powder Technology, 1998, (95): 185 ~ 204.
- [3] Ali Ihsan Karamavru, Clark Nigel N, Halow J. Application of Mutual Information Theory to Fluid Bed Temperature and Differential Pressure Signal Analysis[J]. Powder Technol, 1995, (84): 247 ~ 257.
- [4] Schouten J C, M.L.M. Van den Stappen, Van Den Bleek C M. Scale - up of Chaotic Fluidized Bed Hydrodynamics[J]. Chem. Eng. Sci., 1996, 51: 1991 ~ 2000.
- [5] Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, and Shaw S. Geometry from a Time Series[J]. Phys. Rev. Lett., 1980, 45(9): 712 ~

- 716.
- [6] F. Takens. in *Dynamical Systems and Turbulence*, edited by D. A. Rand and L. S. Young, *Lecture Notes in Mathematics* [M]. vol 898 (Springer, Berlin, 1981), 1981:366 ~ 381.
- [7] Casdagli M, Eubank S, Farmer J D, and Gbson J. *State Space Reconstruction in the Presence of Noise* [J]. *Physics. D*, 1991, 51:52 ~ 98.
- [8] Wu Z B. *Correlation Dimension for Noisy Time Series* [J]. *Physica D*, 1996, 85:485 ~ 493.
- [9] Ying Cheng Lai, David Lerner. *Effective Scaling Regime for Computing the Correlation Dimension from Chaotic Time Series* [J]. *Physica D*, 1998, 115:1 ~ 18.
- [10] Rosenstein M T, Collins J J, and Deluca C J. *Reconstruction Expansion as a Geometry - based Framework for Choosing Proper Delay Times* [J]. *Phys. D*, 1994, 73:82 ~ 98.
- [11] Fraser A M, Swinney H L. *Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information* [J]. *Phys. Rev. A*, 1986, 33 (2):1134 ~ 1140.
- [12] Martinerie J M, Albano A M, Mees A I and Rapp F E. *Determining Embedding Dimension for Phase - space Reconstruction Using a Geometrical Construction* [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, 45 (10):7058 ~ 7064.
- [13] Zhao Guibin, Chen Jizhong, Yang Yongrong. *Chaotic Nature of Pressure Fluctuation in Fluidized Bed* [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2002, 53 (6):654 ~ 659.
- [14] Schouten J C, Takens F, Van Den Bleek C M. *Estimation of the Dimension of a Noisy Attractor* [J]. *Phys. Rev. E*, 1994, 50 (3):1851 ~ 1861.
- [15] Kugiumtzis D. *State Space Reconstruction Parameters in the Analysis of Chaotic Time Series - the Role of the Time Window Length* [J]. *Physica D*, 1996, 95:13 ~ 28
- [16] Hongshen Ji, Hiroaki Ohara, Koji Kuramoto, Atsushi Tsutsumi, Kunio Yoshida. *Nonlinear Dynamics of Gas - solid Circulating Fluidized - bed System* [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2000, 55:403 ~ 410.
- [17] Cheng Yi, Wei Fei, Wang Zhenyu, Jin Yong. *Chaotic Analysis of Transient Behavior in High - velocity Fluidized Beds* [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2000, 51 (2):169 ~ 175.
- [18] H. S. Kim, R. Eykholt J. D. Salas. *Nonlinear Dynamics Delay Times and Embedding Windows* [J]. *Physica D*, 1999, 127:48 ~ 60.
- [19] P. Grassberger, I. Procaccia. *Characterization of Strange Attractors* [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, 50 (5):346 ~ 349.
- [20] W. A. Brock, D. A. Hsieh, B. Lebaron, *Nonlinear Dynamics, Chaos, and Instability: Statistical Theory and Economic Evidence* [M]. MIT Press, Cambridge, MA, 1991.