

多相反应器中压力波动信号的非线性分析

顾丽莉¹, 杨劲¹, 王力红², 石炎福³

(1. 昆明理工大学 生物与化学工程学院, 云南 昆明 650224;

2. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051; 3. 四川大学 化工学院, 四川 成都 610065)

摘要: 通过重构相空间、Poincare 截面、分维和 Kolmogorov 熵等混沌分析方法对气液固三相并流流动系统的压力波动信号进行了定性研究, 研究表明: 此类系统存在有非线性混沌现象; 并用确定性混沌分析方法对其压力波动信号作了进一步探讨. 此类系统普遍存在 2~3 个分维, 其中低频大尺度波动对应的分维反映全局动力学行为, 其余两个反映局部性质.

关键词: 多相反应器; 重构相空间; Poincare 截面; 确定性混沌分析

中图分类号: TQ021.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)02-0069-05

Nonlinear Analysis of Pressure Fluctuation in Multi-Phase Reactors

GU Li-li¹, YANG Jin¹, WANG Li-hong², SHI Yan-fu³

(1. Faculty of Biological and Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China;

2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

3. Faculty of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Nonlinear analysis of the dynamic behaviors of multi-phases flow system is conducted by reconstructed phase space, Poincare section, correlation dimension and Kolmogorov entropy. It shows that this is a non-linear chaos system. Two or three non-integer correlation dimensions and positive finite values of the Kolmogorov entropies are found in this system. One correlation dimension is corresponding to small-scale fluctuations, probably representing particle motion and local turbulence, and another corresponds to low frequency fluctuation, reflecting large-scale phenomena and the third one indicates medium scale fluctuation, which reflects the self-similarity of the chaos system.

Key words: multi-phases flow; reconstructed phase space; Poincare section; chaotic identification

0 引言

气-液-固三相流动过程的动力学特征较为复杂, 还存在许多挑战性的领域需进一步深入探讨. 确定性混沌分析方法只需考察一个具代表性的状态参数随时间的演化过程, 从中提取动力学信息, 可定性和量化系统的动力学特征, 显示了其独有的优势. 故而确定性混沌方法对更好地理解多相流体系的动力学行为是一有效而富有潜在力量的分析工具.

时间序列的测量已被广泛地应用于流体动力学研究中. 目前, 压力传感器的精度更高, 反映频率更快, 应用范围更广, 正在工业实际中日益普遍地被采用. 压力信号涉及到流体流动中所发生的各类不同的动力学现象, 如气泡的形成、长大、破裂, 相际间的湍动等.

通过系统压力波动信号的重构相空间和 Poincare 截面分析, 应用关联分维和 Kolmogorov 熵等混沌理论对气-液-固三相并流向上流动系统进行定性研究, 对此类系统是否存在混沌特征进行识别, 可望为多相流动系统的研究开辟新途径.

收稿日期: 2002-05-16; 基金项目: 昆明理工大学科研发展基金资助项目.

第一作者简介: 顾丽莉(1963~), 女, 博士; 主要研究方向: 化学工程.

1 理论分析

所谓重建相空间其基本思想是:系统中的任一分量的演化都是由与之相互作用着的其它分量所决定的. 1980年, Packard^[1]等提出了用时间序列重新构造吸引子的相空间图象的理论. 对有 n 个变量的动力系统, 可以由一阶微分方程组表示为

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

式中 x_1, x_2, \dots, x_n 分别为各动力因子, 通过消元法, 将上式变换成一个 n 阶非线性微分方程:

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

变换后, 系统的新轨道以向量形式表示为:

$$\vec{X}(t) = (x(t), x'(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) \quad (3)$$

动力系统在由 $x(t)$ 和其 $(n-1)$ 阶导数 $x'(t), \dots, x^{(n-1)}(t)$ 所构成的相空间中演变, 这一相空间称为真实相空间, 用离散化时间序列和它的 $(n-1)$ 时滞位移, 代替连续变量 $x(t)$ 和它的导数, 于是有

$$\vec{X}(t) = [x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(n-1)\tau)] \quad (4)$$

式中 τ 为时滞. 这样就把一个只已知单一状态变量 $x(t)$ 的动力系统, 在微分同胚条件下, 重建在一个未改变它的拓扑(或几何)特征的具有滞后坐标的新的相空间中.

1981年, Takens 提出了嵌入定理, 表明只要相空间的嵌入维数 m 足够大, (通常为 $2D_2 + 1$, 其中 D_2 是关联分维), 就可以刻划 D_2 维混沌吸引子, 实现了从实验数据直接重构相空间.

设一维时间序列为

$$x(t_0), x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n), \dots, x(t_N) \quad (5)$$

将其延拓成 m 维相空间的一组状态向量:

$$\begin{cases} X(t_0) = [x(t_0), x(t_0+\tau), x(t_0+2\tau), \dots, x(t_0+(m-1)\tau)] \\ X(t_1) = [x(t_1), x(t_1+\tau), x(t_1+2\tau), \dots, x(t_1+(m-1)\tau)] \\ \vdots \\ X(t_n) = [x(t_n), x(t_n+\tau), x(t_n+2\tau), \dots, x(t_n+(m-1)\tau)] \\ \vdots \\ X(t_{N-(m-1)\tau}) = [x(t_{N-(m-1)\tau}), x(t_{N-(m-2)\tau}), \dots, x(t_N)] \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\tau = k\Delta t$ ($k = 1, 2, \dots$) 为延滞时间, Δt 为采样间隔, m 是向量的元素数, 又被称为状态空间的嵌入维, 从而得到一个 m 维重构相空间.

Poincare 截面是用一个与相轨道相交的平面 S 去横切该相空间, 从而使连续系统离散化, 同时保留其定性特征, 在降低空间一维的情况下, 考察系统轨道与平面 S 交点的分布情况.

分维是混沌分析的重要参数之一, 它给出了描述系统状态所需的最小变量数. 一般选择 G-P 法^[2,3] 计算关联分维, 计算方法另文详细报道.

从信息论的角度定义 Kolmogorov 熵^[4], 见下式:

$$K = \frac{I(t_1, t_2) - I(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

其中 $(t_2 - t_1) \rightarrow \infty$, I 为信息量. K 熵又称为信息熵(information entropy), 是信息在一个足够长的时间内的平均变化率, 单位为比特/秒(bit/s). 当信息量不随时间发生变化($K = 0$)时, 是完全可预测系统. 对随机系统, 信息量将随着时间发生无穷大变化($k \rightarrow \infty$), 表明其状态是完全不可预测的. 而对于混沌系统, K 熵是一有限的正数, 故其状态只有在某有限尺度上是完全可预测的. K 越小, 意味着这种预测程度就越大.

2 实验部分

空气、水及颗粒(树脂、砂等)作为气-液-固三相实验物料. 操作环境为常温常压. 空气稳压后经转子流量计进入气体分布区及

气液固三相预混合段. 液、固组分在搅拌槽内混合均匀后, 经泵在一组流量计控制下进入预混合段, 与气体一道经混合分布板进入上升管. 上升管顶部设有气体分离器, 气体放空, 液、固体返回搅拌槽循环使用. 取压点设置流型充分发展区, 物料性质与操作条件见表1.

信号采集系统主要由高精度差压传感器、放大器、A/D转换器、PC机及其配套软件组成. 采样频率为250 Hz, 采样点数40 000 ~ 60 000.

3 结果与讨论

3.1 重构相空间

应用重构相空间技术, 对多相流体系的压力波动信号进行状态空间重建, 得重构相图如图1.

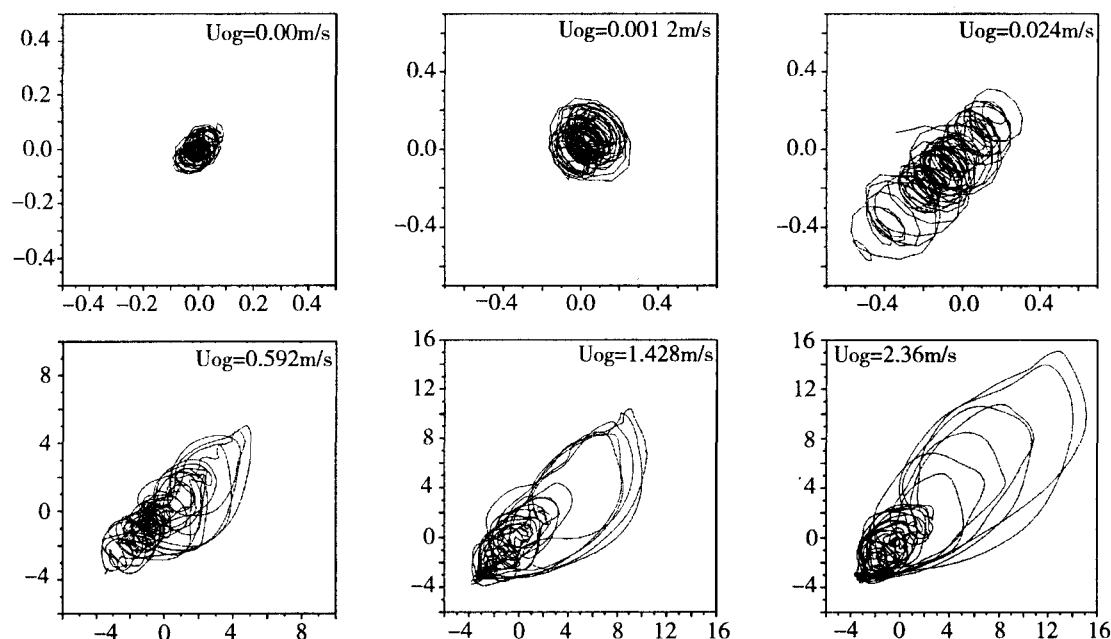


图1 重建吸引子相图随表观气速的变化

重构相空间内的吸引子随表观气速的增加在膨胀, 类似于 Van den Bleek and Schouten 对气-固流化床的描述. 随着气速的增加, 压力波动幅度增大, 吸引子拉长, 当气速很高时, 吸引子的重心下移. 总体上看, 动力系统的运动轨道始终在一定范围内伸缩变化, 而局部又是相当无序的, 具有奇怪吸引子的特点.

3.2 Poincare 截面

Poincare 截面^[5]是相空间内运动轨道的一个缩影, 较直观地反映出运动轨道穿过某个截面频度, 实验序列的几个典型 Poincare 映象如图2所示(计算数据 $N = 10\ 000$). 从中可以看出, 轨线并没有充满整个相空间, 而表现出频繁地访问某个区域, 符合混沌的特征. 与图1对应, 重建相图相似的, Poincare 截面也相似.

3.3 关联分维分析

分维对气相的引入较为敏感, 并且普遍出现了两个分维值, 一个分维值表示高频小波动的存在, 伴随表观气速的增大, 出现了另一个低频分维, 它反映系统中的大尺度低频波动, 是体系整体性质的体现. 图3

中 $C(r)$ 为关联积分, r 为点距, 嵌入维取 18~30. 气相的影响使得在不同的流速段, 分维的取值不一样, 即描述系统的最小变量数在变化, 这为混沌系统流型的区分提供了可能.

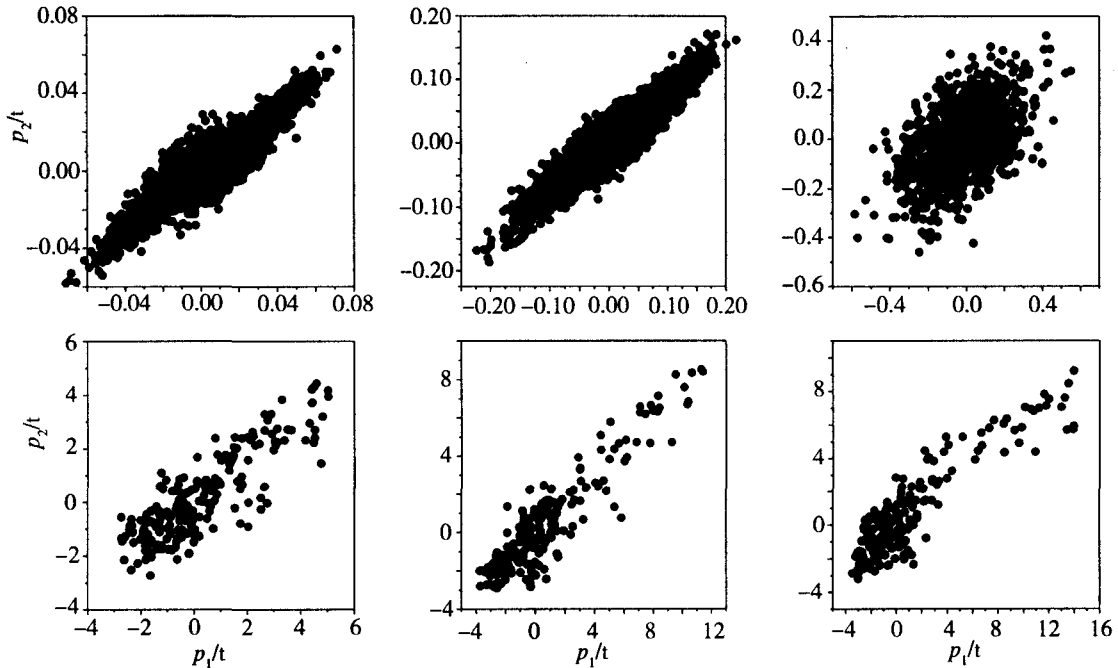


图2 与图1对应的 Poincaré 映象(所用截面为 $p_3(t) = 0.0$)

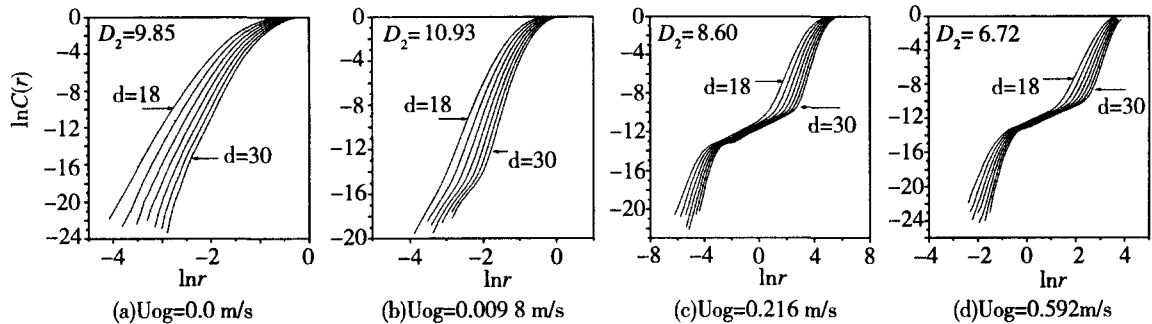


图3 气液固三相体系的典型关联积分曲线

系统的这种两个分维的现象已有报道. Franca^[6]对水平管内气—液两相流动, 观察到了带有两个斜率的关联积分曲线. 事实上, Ben - Mizrahi et al.^[7]用信号迭加的方法, 曾揭示了这种信号的重叠性; D. Bai et al.^[8]在对气—固流化床的混沌分析中, 也得到了两个分维. 由此可见, 由于气相的引入, 系统的易变性增强了, 产生了信号迭加效应, 而关联分维把这种叠加性展露了出来. 值得一提的是, 在关联积分曲线中, 有一低斜率直线段, 对应于较低维, 计算其值, 均在 1~2 之间, 此低维是系统的一个局部特征量, 表示了压力波动中间尺度的自相似性.

3.4 Kolmogorov 熵分析

气—液—固体系的 K 熵与分维对应, 也存在二组 K 熵, 而且随表观风速的变化趋势与分维基本一致. 体系的 K 熵均为有限正值, 一般都在 50 bits/s 以内, 绝大多数情况小于 20 bits/s. 由此可见, 多相流体系内可能存在不同程度的混沌现象.

(下转第 76 页)

着网络攻击手段向分布式方向发展(如 DDOS 攻击),且采用了各种数据处理技术,其破坏性和隐蔽性也越来越强,相应地,入侵检测也应朝着分布式结构发展,以及综合采用多种检测方法.基于代理的分布式入侵检测就是适应这种发展,并已成为当前入侵检测研究发展热点之一.本文据此设计了一个实现的框架,对其的具体实现也在进行当中.当然,这个设计也有其不足之处.例如,这种分布式的各个代理在协同检测上十分有限,要通过中心服务器的中转,解决的方法是,可以考虑扩展通信,使得各个代理能够相互通信,以达到减少中心服务器的负担、减少网络流量、以及加快的连动响应的能力.

参考文献:

- [1] S.M. Bellovin. Security Problems in the TCP/IP Protocol Suite[J]. Computer Communication Review, 1989, 19(2): 32 ~ 48.
- [2] [美] Rebecca Gurley Bace 著, 陈明奇, 吴秋新, 等译. 入侵检测[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001. 210.
- [3] Phil Porras, Dan Schnackenberg, Stuart Staniford - Chen. The Common Intrusion Detection Framework Architecture [EB/OL]. <http://www.gidos.org>.
- [4] 胡化平, 陈海涛, 黄振林, 唐勇. 入侵检测系统研究现状及发展趋势[J]. 计算机工程与科学, 2001, 23(2): 17.
- [5] 何明耘, 戴冠中. 分布式入侵检测体系结构研究[J]. 计算机工程与应用, 2001. 15.
- [6] 张铭来, 金成鹏, 赵文耘. 分布式入侵检测系统的数据采集技术[J]. 计算机工程, 28(2): 10.
- [7] Mark Crosbie, Gene Spafford. Defending a Computer System using Autonomous Agent[R]. COAST Technical Report, 1994. 3. 95 ~ 022.
- [8] 唐勇, 胡华平, 陈海涛, 余娜娜, 张怡, 岳虹. 基于代理的网络入侵检测系统的研制[J]. 计算机工程与科学, 2002, 14(1): .
- [9] 柴平, 龚向阳, 程时端. 分布式入侵检测技术的研究[J]. 北京邮电大学学报, 2002, 2(25): 15.

(上接第 72 页)

4 结论

(1) 对多相并流体系的实验时间序列进行了相空间重构, 并考察了不同表观流速下的 Poincare 截面, 研究结果表明, 重构吸引子呈现不断伸展和收缩的变化, 表现出整体稳定, 局部无规的混沌特征.

(2) 多相流体系的压力波动信号具有重叠性, 关联维将这种重叠性展露出来, 在双对数坐标上关联积分随点距的变化曲线, 明显存在三个饱和段, 对应于高频分维、低频分维和低频分维.

(3) K 熵随操作条件的变化, 存在与分维同样的变化趋势, K 熵均为正值, 满足混沌特征的条件, K 熵越大, 系统的混沌度越大, 可预测性越小.

参考文献:

- [1] Packard N H, et al. Geometry from a Time Series[J]. Phys Rev Lett, 1980, 45(9): 712 ~ 716.
- [2] Grassberger P. Generalized Dimensions of Strange Attractors[J]. Phys Letts, 1983, 97A(6): 227 ~ 230.
- [3] Grassberger P, Procaccia I. Characterization of Strange Attractors[J]. Phys Rev Lett, 1983, 50(5): 346 ~ 349.
- [4] Ven don Bleek C M, Schouten J C. Deterministic Chaos: a New Tool in Fluidized Bed Design and Operation[J]. Chem Eng J, 1993, 53: 75 ~ 87.
- [5] Daw C S, Halow J S. Evaluation and Control of Fluidization Quality Through Chaotic Time Series Analysis of Pressure - drop Measurements[J]. AIChE Symp Ser, 1993, 89(296): 103 ~ 121.
- [6] Franca F. The Rise of Fractal Techniques for Flow Regime Identification[J]. Int J Multiphase Flow, 1991, 17(4): 545 ~ 552.
- [7] Ben Mizrahi A, Procaccia I, Grassberger P. Characterization of Experimental (noisy) Strange Attractors[J]. Phys Rev A, 1984, 29: 975 ~ 977.
- [8] Bai D. Fractal Characteristics of Gas - solid Flow in a Circulating Fluidized Bed[J]. Powder Technology, 1997, 90: 205 ~ 212.