

油水两相流流型的混沌时间序列分析*

郭伯和¹ 金宁德¹ 胡亚范² 胡秧利¹

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072) (2. 燕山大学理学院, 秦皇岛 066004)

摘要 采用一种基于互信息第一极小值算法确定了相空间重建延迟时间, 用 Mackey-Glass 方程及 Lorenz 奇异吸引子数据作算例检验了该计算方法的可靠性. 通过计算的混沌吸引子关联维对油水两相流型进行了表征, 结果表明对含水率为 61%~91% 及总流量为 10~60(m³/d) 的水包油流型, 油水两相流电导波动信号的关联维与含水率及总流量有着良好的相关关系, 而对含水率为 51% 的油水两相流过渡流型, 关联维随总流量呈现不规则突变, 表明了混沌吸引子关联维数对油水两相流型变化具有敏感的“指示器”特性.

关键词 油水两相流, 流型, 混沌, 时间延迟, 关联维

引言

众所周知, 油水两相流动普遍存在于石油化工及石油开采等能源领域, 特别是在油井动态监测中, 大多井下多相流参数测量传感器响应特性及多参数组合测井仪测量信息处理精度都和油水两相流动特性密切相关. 另外, 为了实现控制和预测油水两相流动系统, 除了要知道油水两相流动条件、流体性质及流体组分外, 油水流型特征也是其必不可少的一个重要条件. 近年来, 许多研究者对油水两相流动状态的识别进行了深入探讨, 对定性或定量地识别流型的方法做了大量研究^[1~3], 但是, 由于两相流动的复杂性, 基于计算机多相流数值模拟的流型识别技术还有局限性, 应用范围广及测量精度高的两相流测试技术也还很有限, 因此, 对于具复杂性、不确定性且难以用数学模型精确描述的两相流型辨识引入现代信息处理技术十分必要.

进入 20 世纪 90 年代, 运用混沌动力学的特征参数对多相流进行分析成果日趋增多^[4~6]. 但对非线性时间序列相空间重建时, 众多研究者提出的混沌时间序列分析方法^[7~12]应用在油水两相流型表征的适用性及可靠性尚需进一步探讨. 本文作者曾利用混沌时间序列及 Kolmogorov 熵分析方法对油水两相流型进行了研究^[13~14], 但是, 最佳时间延迟的确定是靠大量经验计算得出的, 缺乏普遍的指导意义及通用性. 作为该领域研究的继续, 本文采用互信息第一极小值法^[15]确定最佳延迟时间, 关联维的提取采用常规算法^[16]. 由于试验装置及数据采集部分描述已在文献^[13]中有详尽描述, 故

在此略去. 本文研究结果表明, 基于互信息第一极小值法计算得到的关联维, 在表征油水两相流型时, 对油水过渡流型其关联维呈现不规则突变, 但是在表征水包油流型时, 其关联维与流动参数的层次演化特性效果较好, 表明了本文提出的混沌时间序列分析方法更具适用性及可靠性.

1 基于互信息第一极小值法的关联维计算

1.1 互信息第一极小值

由 Takens 定理知^[17], 在没有噪声且无限精确数据的情况下, 可以任意选择时间延迟 τ . 但实测时间序列是有限长的, 且一般都有噪声污染, 因此在重建相空间过程中 τ 的选取起着重要的作用, τ 的选取应使 x_i 与 $x_{i+\tau}$ 具某种程度的独立但又不完全无关, 以便它们能在重建的相空间中作为独立的坐标处理. Liebert 等^[15]已证明, 对于长度有限且含有一定噪声的混沌时间序列, 可以选取适当的尺度参数 δ 及 q , 把互信息第一次达到极小值的时间作为相空间重建最佳延迟时间.

设混沌时间序列为

$$x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n), \dots, x(t_K) \quad (1)$$

令嵌入维数为 m , 时间延迟为 τ , 则重建相空间后向量坐标为

$$X_i(t) = [x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)] \quad (2)$$

由 Fraser 等^[8]对互信息的描述得

$$I_m(\tau) = mH_0 - H_m(\tau) \quad (3)$$

其中 $H_0 = -H_1$, 对于延迟 τ 来说, H_0 是个定值, $H_m(\tau)$ 是相空间整体的平均熵, 即

2003-07-03 收到第一稿, 2004-09-05 收到修改稿.

* 国家自然科学基金(60374041); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目.

$$H_m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \log p_\delta(X_i) \dots (M \leq N) \quad (4)$$

$p_\delta(X_i)$ 是以第 X_i 个空间向量为中心与其它空间向量做“点对”距离后,其距离小于给定 δ 的概率

$$p_\delta(X_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H(\delta - |X_i - X_j|) \quad (5)$$

文献[18]对广义关联积分的描述为

$$C_q^m \delta = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_\delta^{q-1}(X_i) \right]^{\frac{1}{q-1}} \quad (6)$$

类似地,由式(6)可以得到熵 $H_m(\tau)$,即

$$H_m(\tau) = - \lim_{q \rightarrow 1} \log C_q^m(\delta, \tau) \quad (7)$$

式中 $\log C_q^m(\delta, \tau)$ 意义为重建向量的平均信息度量.

从方程(3)可以看出,互信息 $I_m(\tau)$ 的极小值即为 $H_m(\tau)$ 的极大值,也就是关联积分 $C_q^m(\delta, \tau)$ 的极小值.所以,我们只要找出 $C_q^m(\delta, \tau)$ 的变化规律,不难得出 $I_m(\tau)$ 第一次达到极小值时的 τ 值.

1.2 计算混沌吸引子关联维

在求得最佳延迟时间的基础上,吸引子关联维计算采用 Grassberger 及 Procaccia 算法^[16],即

$$C(\delta) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N H(\delta - |X_i - X_j|) \quad (8)$$

定义的关联维 D 为

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log C(\delta)}{\log \delta} \quad (9)$$

1.3 算例

首先,我们利用生物学上著名的 Mackey - Glass 方^[19]对互信息第一极小值法计算的延迟时间进行检验.考虑到均匀分布的细胞浓度 P ,则在骨髓产生细胞开始到细胞进入血液存在一个时间延迟,细胞浓度随时间的变化可以用下面 Mackey - Glass 方程

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\beta_0 \theta^n P_\tau^*}{\theta^n + P_\tau^n} - \gamma P \quad (10)$$

式中 β_0, θ, n 和 γ 为常数, P_τ^* 表示在当前时刻的第 τ 个时间单位前时刻的 P 值大小.在做数值解时,取 $\gamma = 0.1, \beta_0 = 0.2, \theta = 1, n = 10, \tau^* = 30$ 产生方程解为细胞浓度 P 随时间的变化曲线(图 1).本文基于互信息第一极小值法编制了程序,对上述时间序列做出了 $I_m(\tau) - k$ 的曲线(图 2),可以看出互信息 $I_m(\tau)$ 是随 k 变化的($k = \tau/\Delta t$).在本次计算中,考虑采样点的个数及采样时间,在大量数值试验的基础上,我们取 $q = 1.01, \delta = 0.27, m = 4, 5$ 及 6 .从图 2 中可以看出,当互信息第一次达到极小值时 k 取值为 10.在不同的嵌入维 m 下,其第

一极小值都是在相同的 τ 下,有着很好的一致性,这也与文献[15]给出的计算结果吻合一致,说明了本文算法及程序的可靠性.

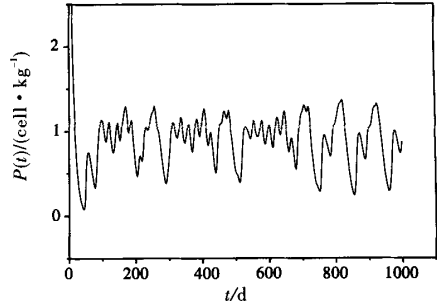


图 1 Mackey-Glass 方程解
Fig.1 Solution of Mackey-Glass equation

然后,我们对 Lorenz 吸引子在初值为 $[0, 10, 0]$ 和 $[1, 1, 1]$ 条件下求解方程,取 10 000 个解点,时间间隔 $\Delta t = 0.018$,即

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) \\ \dot{y} = x(b - z) - y \\ \dot{z} = xy - cz \end{cases} \quad (11)$$

式中 $a = 10, b = 28, c = 8/3$

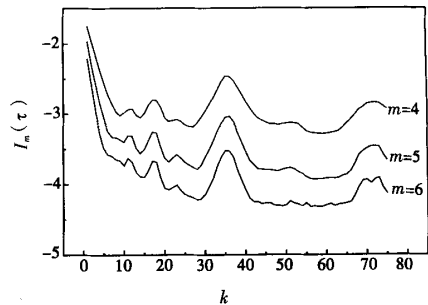


图 2 本文计算的互信息 $I_m(\tau)$ 随 k 值变化关系图
Fig.2 the mutual information $I_m(\tau)$ versus k values

由于不同的初值,其 Lorenz 吸引子形态存在差异(见图 3).在 $q = 1.1, \delta = 3$ 时计算得到 $I_m(\tau)$ 随时间延迟 τ 变化的互信息,如图 4 为在不同的嵌入维及不同初值时,互信息 $I_m(\tau)$ 随 k 值变化关系图.图中 k 是延迟时间与采样间隔的比值($k = \tau/\Delta t$),两种状态数据均在 $k = 17$ 时达到最佳延迟,而此时计算的关联维分别是 1.32 和 1.85.

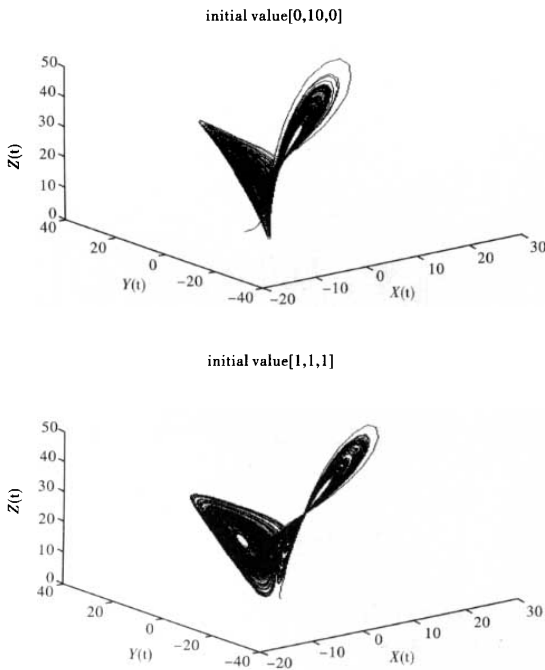


图3 不同初值下的 Lorenz 吸引子三维图
Fig. 3 3D pictures of Lorenz attractor at different initial values

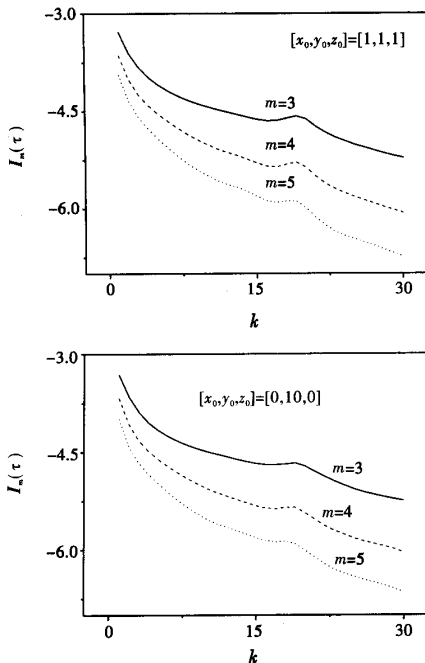


图4 Lorenz 吸引子在不同的嵌入维及不同的初值下,互信息随 k 值变化图
Fig. 4 The mutual information $I_m(\tau)$ versus k values for Lorenz attractor at different initial values with different embedding dimensions

2 油水两相流型表征

2.1 延迟时间确定

本文作者在文献[13]中在含水率51%~91%及油水总流量10~60(m³/d)范围内,通过对测量的油水两相流电导波动信号最大 Lyapunov 指数计算,证明了垂直上升管中油水两相流流动是一低维的混沌系统。

根据上面叙述的互信息第一极小值法确定延迟时间,我们对15种油水两相流流动工况下的电导波动信号分别进行了计算,分别选曲不同的参数 q 和 δ 值,在不同的嵌入维数 m 下,得到了对应的互信息随延迟时间的数据序列.将所得到的数据序列以互信息 $I_m(\tau)$ 为纵坐标, k 为横坐标作出曲线图(图5).从图中可以看出,互信息第一极小互信息值非常明显,且随着不同的嵌入维 m 的变化,第一极小值点位置有着很好的一致性。

用 Grassberger 及 Procaccia 算法计算15种工况数据的关联维.如图6所示为其中两组数据的计算结果.随着嵌入维数 m 从2至28的不断增大,曲线的线性部分趋于平行,这说明嵌入维已经饱和,关联维也已经收敛.从饱和曲线线性部分回归出斜率,即为关联维数.从图6可以看到,当嵌入维 m 大于6之后,曲线的线性部分开始平行,所求关联维数恰好分布在2.43~4.21之间。

2.2 油水两相流型的表征结果分析

根据对15组流动工况数据计算得到的关联维值,绘制得到关联维 D 与总流量 Q_t 及含水率 K_w 的相关关系图(图7)。

对于含水率为61%~91%的流动工况其关联维分布在2.43~3.46之间,总流量 Q_t 和含水率 K_w 有良好的相关关系,由先前研究知这一部分属于水包油流型,即油泡以分散相形式存在于水的连续相之中^[13],并且当含水率一定时,关联维随着总流量增加而增加,表明当水为连续相时,随着总流量增加分散相的动力学状态的复杂程度在加剧。

对于含水率 K_w 为51%的流动工况,关联维数分布在2.9~4.21之间,且随总流量 Q_t 呈不规则突变,由先前研究知这一部分属于水包油流型,即水包油及油包水两种流型共存,属于不稳定的过渡流型^[13],其动力学状态的复杂程度也表现出不稳定的规律。

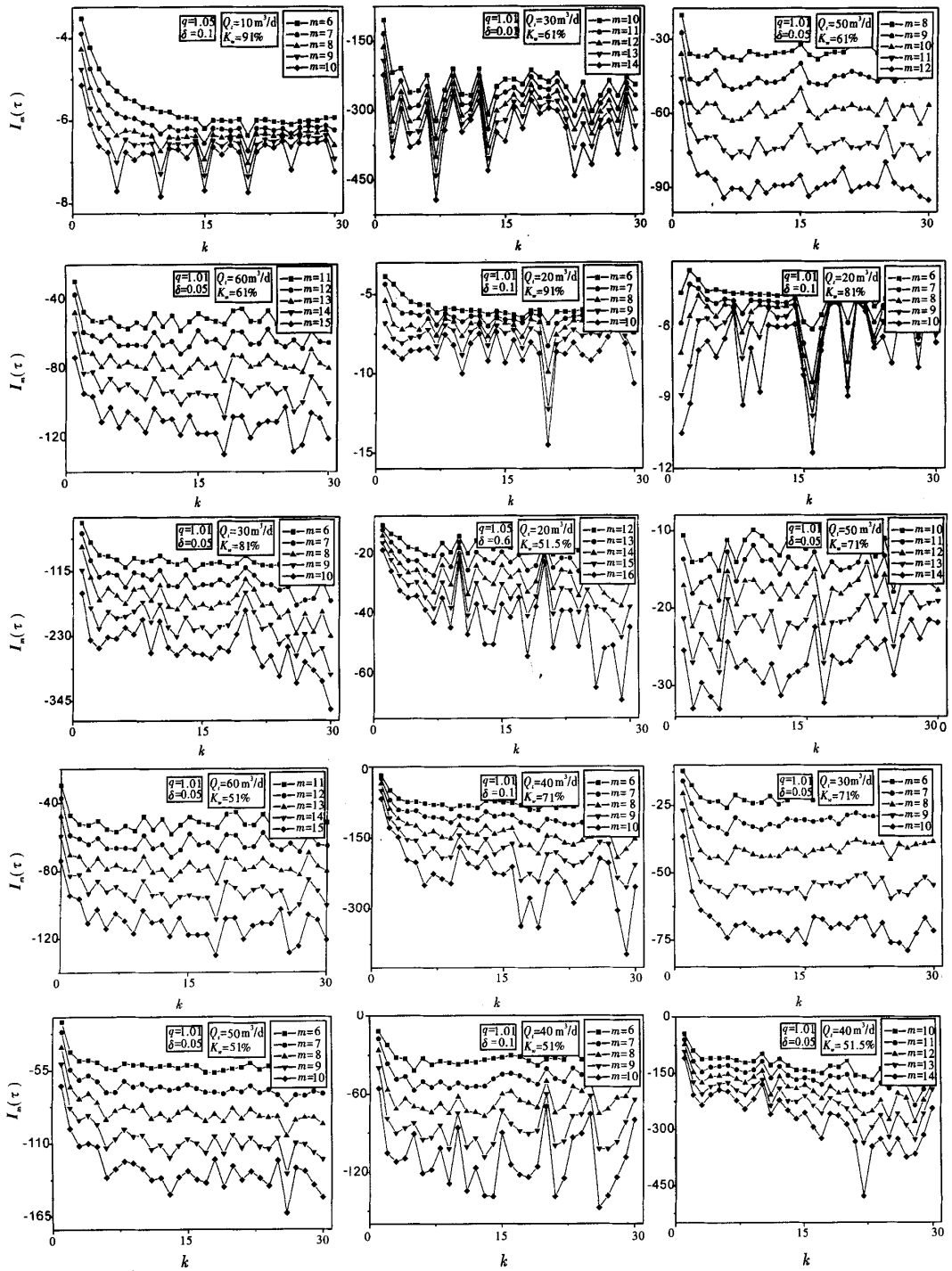


图5 在不同流动工况下,互信息 $I_m(\tau)$ 随 k 值变化关系

Fig. 5 The mutual information $I_m(\tau)$ versus k values at the different flow conditions

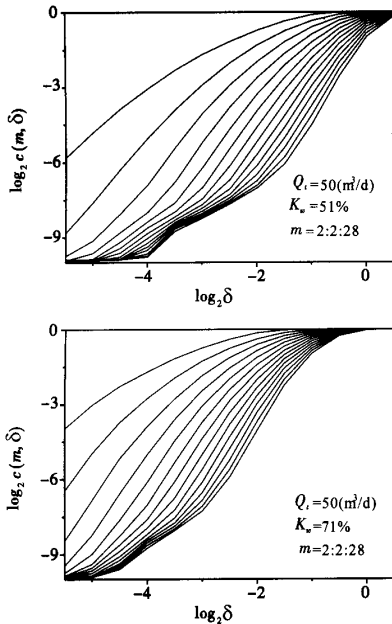


图6 不同试验工况下的 $\log_2 C(m, \delta)$ 与 $\log_2(\delta)$ 关系曲线
Fig. 6 $\log_2 C(m, \delta)$ versus $\log_2(\delta)$ for different test flow condition

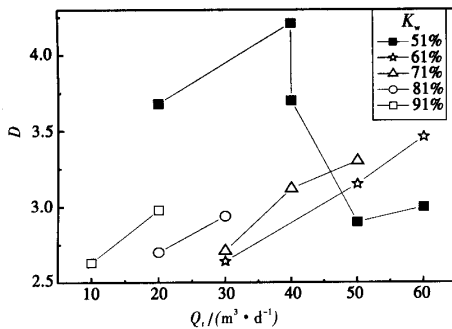


图7 关联维 D 随 K_w 及 Q_1 变化关系图
Fig. 7 Correlation dimensions versus K_w and Q_1

3 结论

在含水率 51% ~ 91% 及油水总流量 10 ~ 60(m³/d) 范围内, 对测量的油水两相流电导波动信号进行了混沌时间序列分析, 得到如下结论:

1) 基于互信息第一极小值法确定延迟时间的相空间重构方法, 经过与 Mackey-Glass 方程及 Lorenz 方程算例检验, 证明该算法及程序是可靠的, 为进一步提取油水两相流电导波动信号关联维值奠定了基础。

2) 混沌吸引子关联维与控制流型的两相流参数(总流量与含水率)变化密切相关, 能够较好地揭

示流型变化的层次演化关系, 表明了混沌吸引子关联维数对油水两相流型变化具有敏感的“指示器”特性。

参 考 文 献

- Govier GW, Sullivan GA, Wood RK. The Upward Vertical Flow of Oil - Water Mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1961, 4: 67~75
- Vigneaux PG, Chenais P, Hulin JP. Liquid - Liquid Flows in an Inclined Pipes. *AIChEJ*, 1988, 34(5): 781~789
- Flores JG, Chen XT, Cem Sarica, Brill JP. Characterization of Oil - Water Flow Patterns in Vertical and Deviated Wells, Proc. of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition in San Antonio, Texas, October 5 ~ 8, 1997: 601~610
- Van den Bleek CM, Jaap C Schouten. Deterministic Chaos: a new tool in fluidized bed design and operation. *Chem Eng J*, 1993, 53: 75~78
- Letzel HM, Schouten JC, Krishna R, Van den Bleek CM. Characterization of Regimes and Regime Transitions in Bubble Columns by Chaos Analysis of Pressure Signals. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(24): 4447~4459
- Bai Bofeng, Guo Liejin, Chen Xuejun. Nonlinear Analysis on Pressure Fluctuation Phenomena of Air-Water Two-Phase Flow. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(3): 359~362
- Rosenstein MT, Collina J, De Luca CJ. Reconstruction Expansion as Geometry - Based Framework for Choosing Proper Delay Times. *Physica D*, 1994, 73: 82~98
- Fraser AM, Swinney HL. Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information. *Phys Rev A*, 1986, 33(2): 1134~1140
- Framer JD, Sidorowich JJ. Predicting Chaotic Time Series. *Phys Rev Lett*, 1987, 59(8): 845~848
- Gao Liangyue. Practical Method for Determining the Minimum Embedding Dimension of a Scalar Time Series. *Physica D*, 1997, 110: 43~50
- Sugihara G, May RM. Nonlinear Forecasting as Way of Distinguishing Chaos from Measurement Error in Time Series. *Nature*, 1990, 344: 734~741
- 杨志安, 陈世刚, 王光瑞. 利用二阶雅可比行列式确定二维重构系统的延迟时间. 计算物理, 1996, 13(1): 65~72 (Yang Zhian, Chen Shigang, Wang Guangrui. Characterization of Time Series Reconstruction with Two variables of Dynamic system. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1996, 13(1): 65~72 (in Chinese))
- 金宁德, 宁英男, 王微微, 刘兴斌, 田树祥. 垂直上升管中油水两相流型表征. 化工学报, 2001, 52(10): 907~

- 914(Jin Ningde, Ning Yingnan, Wang Weiwei, Liu Xingbin, Tian Shuxiang. Characterization of oil/water two-phase flow patterns in vertical upward piper. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2001, 52(10):907~914(in Chinese))
- 14 金宁德, 聂向斌, 任英玉, 张明学. 基于 Kolmogorov 熵时间序列分析的垂直上升管中油水两相流型表征. *化工学报*, 2003, 54(7):936~941(Jin Ningde, Nie Xiangbin, Ren Yingyu, Zhang Mingxue. Characterization of oil/water two-phase flow patterns in vertical upward piper based on Kolmogorov entropy time series analysis. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2003, 54(7):936~941(in Chinese))
- 15 Liebert W, Schuster HG. Proper Choice of the Time Delay for the Analysis of Chaotic Time Series. *Phys Lett A*, 1989, 142(2,3):107~111
- 16 Grassberger P, Procaccia I. Characterization of Strange Attractors. *Phys Rev Lett*, 1983, 50(5):346~349
- 17 Takens F. Dynamical System and Turbulence. In: Rand D, Young LS(eds). *Lecture Notes in Mathematics*. Berlin: Springer, 1981. 366~381
- 18 Grassberger P, Procaccia I. Estimation of Kolmogorov Entropy from a Chaotic Signal. *Phys Rev A*, 1983, 28(4):2591~2593
- 19 Mackey MC, Glass L. Oscillation and Chaos in Physiological Control Systems. *Science*, 1977, 197:287~289

CHAOTIC TIME SERIES ANALYSIS OF OIL/WATER TWO PHASE FLOW PATTERNS*

Guo Baihe¹ Jin Ningde¹ Hu Yafan² Hu Yangli¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2. College of Science, Yanshan University, Qin Huangdao 066004, China)

Abstract A computation method was proposed for determining the time delay in phase space reconstruction based on the first minimum of mutual information, and the method has been proved reliable by applying it to the example of the Mackey-Glass Equation and Lorenz's strange attractor data. The flow patterns of oil/water two phase flow have been characterized by the calculated correlation dimensions of chaotic attractor. The results showed that the correlation dimensions calculated from fluctuating conductance signals of oil/water two phase flow have good correlation with the water cut (K_w) ranging from 61% to 91% and with the total flow rate ranging from 10(m³/d) to 60(m³/d) for oil-in-water flow patterns. For water cut (K_w) of 51%, the correlation dimensions showed irregular sudden changes to transitional flow pattern, which meant that the correlation dimensions of chaotic attractor was a sensitive "indicator" of oil water two phase flow pattern variations.

Key words oil/water two phase flow, flow pattern, chaos, time delay, correlation dimension

Received 03 July 2004, revised 05 September 2004

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(60374041) and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry of China.