

两相流流型动力学特征多尺度递归定量分析^{*}

董 芳¹⁾²⁾ 金宁德^{1)†} 宗艳波¹⁾ 王振亚¹⁾

1) 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

2) 河北大学质量技术监督学院, 保定 071051)

(2007 年 12 月 3 日收到, 2008 年 3 月 1 日收到修改稿)

基于垂直上升管中测取的气液两相流电导波动信号, 采用递归定量分析方法, 从多尺度角度研究了气液两相流泡状流、段塞流及混状流三种典型流型的动力学运动特征. 研究表明, 低频泡状流及混状流在递归图表现为沿对角线方向比较发育的混沌递归线条纹理特征, 表明了低频运动的泡状流及混状流具有较好的确定性运动行为, 而随着泡状流及混状流运动频率增加, 混沌递归特征变差, 其运动特征逐渐向随机方向发展. 对于段塞流, 在混沌递归图上逐渐呈现间歇的矩形块纹理结构, 且段塞流中液塞与气塞的间歇运动特征出现在高频段, 而段塞流中的泡状流运动则出现在低频段上, 且随着泡状流运动频率增加, 泡状流逐渐失去确定性运动行为. 表明了基于电导波动信号的多尺度非线性分析方法是理解与表征气液两相流动力学特性的有效途径.

关键词: 两相流, 流动特性, 多尺度分析, 递归分析

PACC: 0545, 4752

1. 引 言

两相流是一个复杂非线性动力学系统, 由于两相流受到诸如流体湍动、相间界面相互作用及相间局部相对运动等许多复杂因素的影响, 其流动行为呈现出高度无规则性、随机性和结构不稳定性. 迄今为止, 两相流流型转换动力学机理至今尚未十分清楚. 早期研究表明, 采用基于混沌理论、分形理论的非线性分析方法能够在一定程度上表征两相流宏观动力学特性^[1-4], 但在揭示两相流微观动力学特性方面尚显不足. 认识非线性时空动态耗散结构的出路在于对这一系统进行多方面分解^[5], 即将运动分解为极值和动态, 能耗分解为可逆和耗散, 过程分解为有序和无序, 结构分解为不同尺度, 这种分解结果使研究者可以从复杂过程中找到有规律可循成分, 并有助于了解无规律不同侧面. 近年来, 复杂系统多尺度非线性分析方法引起了广泛关注. 龚志强等人^[6,7]应用经验模态分解的希尔伯特变换、小波变换结合非线性动力学方法取得了对古气候动力学结构特征的研究成果. 李强^[8]根据小波变换良好的时频局部化特征和分形维数的变化特征, 从多尺度分析

角度探讨了地震前兆混沌时间序列的异常识别问题. Wu 等人^[9]对管段差压信号利用小波分解重构方法提取了特定流型的特征向量, 并应用智能信息处理技术实现了对油气水三相流流型的自动识别. 冀海峰等人^[10]通过对两相流压力波动信号的多尺度分解, 提出了由能量特征值来判断流化床从固定床向鼓泡床转变的方法. Zhao 等人^[11]对气固两相流流化床不同测量位置的压力波动信号用多尺度分析方法, 对分解信号进行了分形维数分析, 并根据 Hurst 指数将原始压力波动信号分解为多尺度信号, 得出压力波动主要体现了乳化相和气泡相之间的中尺度作用结论. 可以看出, 多尺度与非线性分析方法结合对具复杂性、不确定性及很难用数学模型表示的复杂多相流动力学特性分析具有较好的优势.

尽管多尺度非线性分析方法在多相流动力学特性研究中已取得了一定进展, 由于非线性分析算法不唯一性, 在总结各尺度下表征的非线性动力学特性规律时存在较大困难. 所以, 在进行多尺度分析时, 需要对分解尺度信号非线性表征引入更加适定算法. 混沌时间序列分析中的递归图^[12]及递归定量分析^[13]在生物物理及医学等领域得到了应用, 特别是对于复杂动力学过程的模式识别问题, 递归分析

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50674070, 60374041)和国家高技术研究发展计划(批准号 2007AA06Z231)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ndjin@tju.edu.cn

方法显示出了快速直观有效优势. 将小波分析与递归定量分析有机结合, 可以相对直观地分析两相流信号在不同尺度的非线性特征. 在本课题组先前研究中^[14], 利用电导传感器测取的波动信号研究了两相流复杂性测度特性, 研究表明, 两相流电导波动信号源蕴含着丰富的流型信息, 为进一步从微观到宏观角度考察气液两相流动力学运动特征, 本文对采集的泡状流(bubble flow)、段塞流(slug flow)、泡状-段塞过渡流(bubble-slug transitional flow)、混状流(churn flow)及段塞-混状过渡流(slug-churn transitional flow)电导波动信号^[14]采用多尺度递归定量分析方法进行了分析处理, 取得了对气液两相流流型动力学特性新认识.

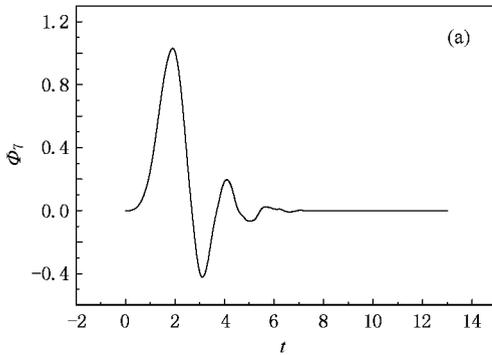
2. 气液两相流电导波动信号多尺度分解

2.1. 小波变换及多尺度分析

小波变换具有时频定位特性, 它是函数 $f(x)$ (或信号) 在小波函数系上的展开. 设小波母函数为 $\psi(t)$, 伸缩和平移因子为 a 和 b , 则函数 $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换定义为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx, \quad (1)$$

在实际应用中, 常采用其离散二进制小波变换形式,



对应的离散二进小波变换为

$$W_f(j, k) = 2^{-j} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{\psi(2^{-j}x - k)} dx, \quad (2)$$

对于上述变换, 本文采用的 Mallat 塔式算法如下:

假定信号样本 $f(x) \in V_{J_1}$, 其中 V_{J_1} 是具有分辨率 J_1 的 $L^2(\mathbb{R})$ 的闭子空间, 则信号样本 $f(x)$ 可分解成不同频率通道上的成分, 即

$$f(x) = A_{J_1}^d f(x) = A_{J_2}^d f(x) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} D_j f(x) \quad (3)$$

其中 $A_{J_2}^d f(x)$ 为 $f(x)$ 在尺度 J_2 下的平滑信号, 即为频率小于 2^{-J_2} 的成分; $D_j f(x)$ 为 $f(x)$ 在尺度 j 下的细节信号, 即为频率介于 2^{-j} 和 $2^{-(j-1)}$ 之间的成分 ($J_1 + 1 \leq j \leq J_2$).

2.2. 电导波动信号多尺度分解

本文采用小波变换对实验采集的电导波动信号进行多尺度分解, 在模拟井的实验条件下, 气液两相流的流型大体分为泡状流、段塞流和混状流, 每两种流型之间还存在着过渡流型, 分别截取了工况条件下的气液两相流电导波动信号作为分析对象, 数据采样长度选择为 2000. 本文采用 7 阶 Daubechies 小波, 其尺度函数 (Φ_7) 和小波函数 (Ψ_7) 如图 1 所示.

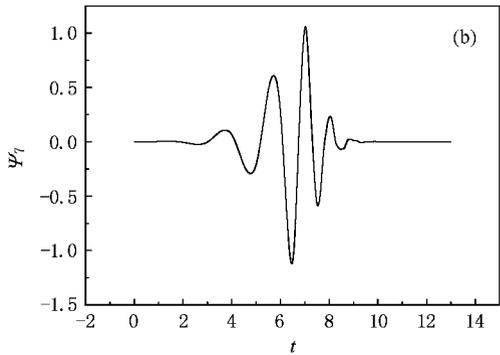


图 1 7 阶 Daubechies 小波尺度函数 (a) 和小波函数 (b)

由于实验中的采样频率为 400 Hz, 由香农采样定理可知在这样的采样频率下可以表征的最大频率为 200 Hz, 考虑气液两相流电导波动信号特征, 选择 6 层小波分解, 将信号分解为 7 个尺度, 经二进离散小波变换后, 则每个尺度下所表征的频率范围分别为 100—200 Hz, 50—100 Hz, 25—50 Hz, 12.5—25 Hz, 6.25—12.5 Hz, 3.125—6.25 Hz, 1.5625—3.125 Hz. 采用 Matlab 软件进行小波分析, 按照上面参数将原信号 s 分解为重构近似系数和细节系数的累加和为

$$s = a_6 + d_6 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1. \quad (4)$$

图 2 为对三种典型流型(泡状流、段塞流、混状流)电导波动信号及小波重建原始信号的相对误差, 可以看出, 采用 7 阶 Daubechies 小波进行信号多尺度分解具有较高的对原始信号重建精度, 且重建信号的相对误差非常小.

将各组信号的小波分解结果按照原信号 $s, a_6, d_6, d_5, d_4, d_3, d_2, d_1$ 的顺序绘于图 3 中, 并对这些

信号和它们的小波系数进行功率谱分析,图中用 U_{sw} 表示水相表观流速(m/s), U_{sg} 表示气相表观流速(m/s). 将 a_6 和 d_6-d_1 依次记为尺度 1 至尺度 7, 观察小波信号分解后的频谱,可以看出每种流型的主要频率成分都集中在尺度 1 的近似系数和尺度 2 的细节系数中,即主频段都在 6—25 Hz 以下,由此可知气液两相流电导波动信号是一个低频信号. 在图 3(a)所示的泡状流中,由流体流动所产生的有用频率成分均在 40 Hz 以下,图中尺度 6 和尺度 7 中表

现的只是信号中残留的 50 Hz 工频干扰及其 3 次谐波成分. 图 3(b)所示的段塞流中,各尺度下频率成分更加丰富,能量也随之增大,明显高于泡状流的能量,在尺度 6 和尺度 7 下也开始出现高频的有用频率成分. 图 3(c)所示的混状流中,各尺度下频率成分的能量进一步增大,尺度 1 的近似系数和尺度 2 的细节系数的频谱能量相近,整个信号的频带范围加宽,在尺度 6 和尺度 7 下的高频段细节系数也表现出更加明显的频率成分.

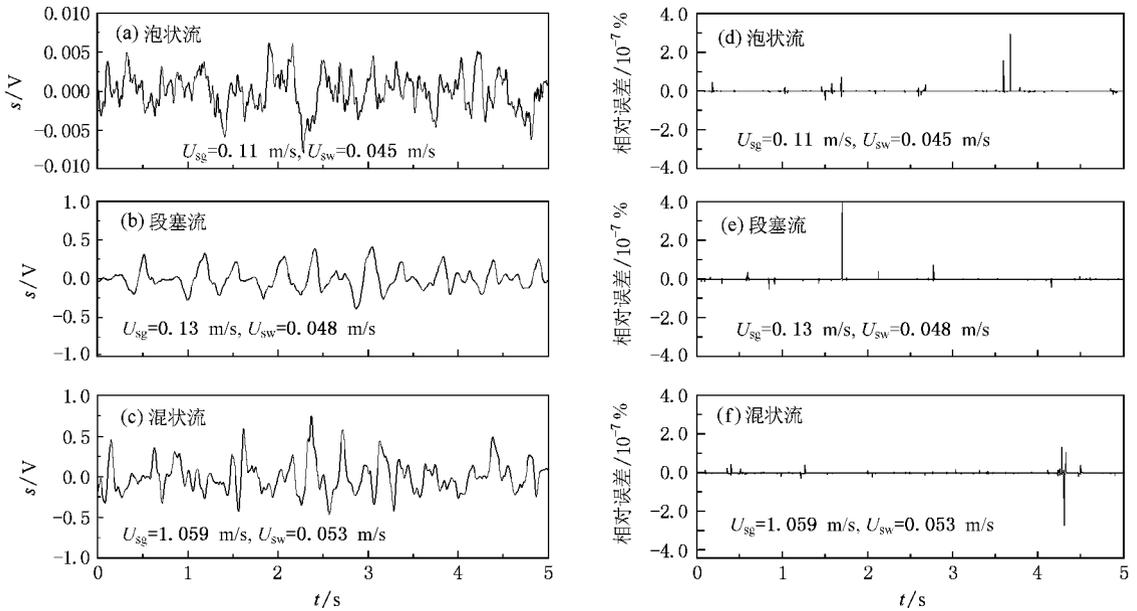


图 2 原始电导波动信号与重建信号相对误差分布 (a)–(c)原始电导波动信号 (d)–(f)重建信号与原始信号间相对误差

3. 电导波动信号多尺度递归分析

3.1. 递归图

Eckmann 等人^[12]提出的递归图方法是直接观察 n 维相空间中轨线 $X_i \in R^n (i = 1, \dots, N)$ 动力学行为随时间变化的规律. 它代表了相空间轨线递归到某一状态的情形,反映了确定性动力学系统的基本特性. 递归图做法是计算 $N \times N$ 矩阵,即

$$R_{ij} = \Theta(\epsilon - \|X_i - X_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (5)$$

式中 $\|X_i - X_j\|$ 为欧氏范数; $\Theta(x)$ 为 Heaviside 函数; ϵ 为阈值, 写为 $\epsilon = \alpha \cdot \text{std}(s_i)$, 其中 $\text{std}(s_i)$ 为原始时间序列标准差, α 为经验系数. 对一维时间序列电导波动信号 s 根据 Takens 嵌入定理^[15], 采用时间延迟法重建相空间向量, 即

$$X_i = [s_i, s_{i+\tau}, \dots, s_{i+(m-1)\tau}]^T, \quad (6)$$

由阈值 ϵ 可以定义以 X_i 为中心的球, 如果 X_j 落入该球内, 说明该状态是接近于 X_i 的, 即令 $R_{ij} = 1$, 并在 $N \times N$ 的坐标平面上相应位置 (i, j) 处描点(递归点), 这样就可以得到一幅时间序列经过相空间重建后的递归图.

3.2. 递归图结构

递归图的图形蕴含着相空间轨迹随时间的发展变化趋势和规律, 递归图表现出来的整体图形特征结构大体上可分为: 均匀的、周期的、漂移的和突变的结构^[12].

图 4 为我们计算的典型正弦信号序列、混沌系统 Lorenz 方程 x 分量和随机噪声序列的递归图, 从图 4(a)可以看出周期信号递归图为对角线方向线条纹理, 表现为周期性有规律的递归结构. 图 4(c)所示的随机信号递归图则表现为孤立的随机点状纹理, 说明系统状态孤立不能持续一定时间, 随机性很

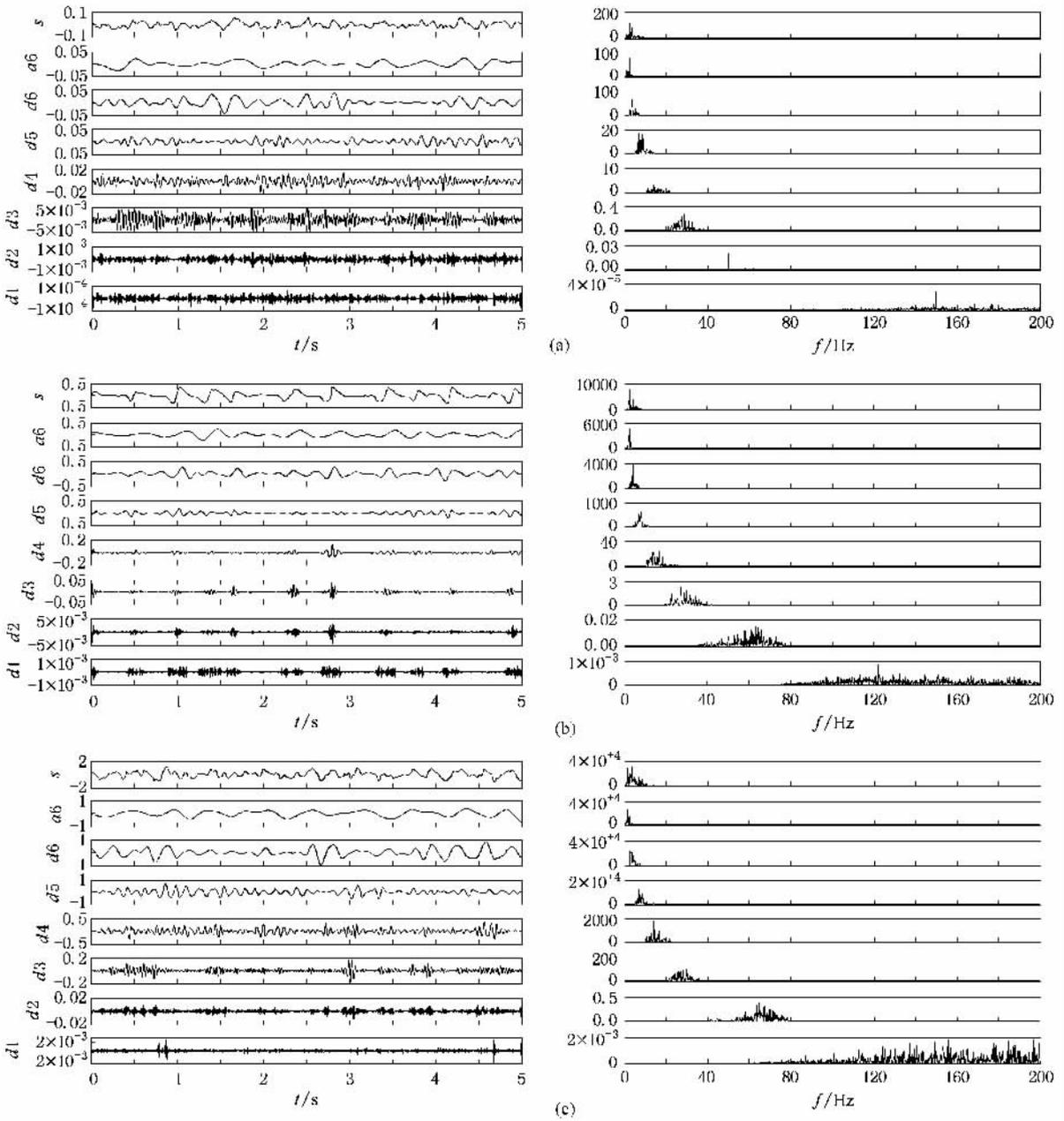


图3 三种典型流型电导波动信号的小波分解及其功率谱特征 (a) $U_{sw} = 0.043 \text{ m/s}$, $U_{sg} = 0.036 \text{ m/s}$, 泡状流 (b) $U_{sw} = 0.048 \text{ m/s}$, $U_{sg} = 0.13 \text{ m/s}$, 段塞流 (c) $U_{sw} = 0.052 \text{ m/s}$, $U_{sg} = 0.835 \text{ m/s}$, 混状流

强.而图 4(b)为混沌序列递归图,既有沿对角线方向发育的纹理,又有一些孤立点,恰恰说明混沌信号貌似随机却又有自身确定性的特点.可见,直观可视的递归图是研究非线性系统的较好工具,递归图的细节纹理结构特征可以用如下所述的递归定量分析方法进行描述.

3.3. 递归定量分析

Zbilut 等人^[13]提出了表征递归图结构的递归定量

分析方法.以下给出与本文研究有关的两种特征量:

1) 确定性 (DET) 它是构成沿对角线方向线段的递归点占有所有递归点数的百分比,即

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^{N-1} l \cdot p(l)}{N}, \quad (7)$$

式中, $p(l)$ 为长度为 l 的线段数.只有对角线方向线段的长度大于预先给定的下限 l_{\min} 时才开始计数.

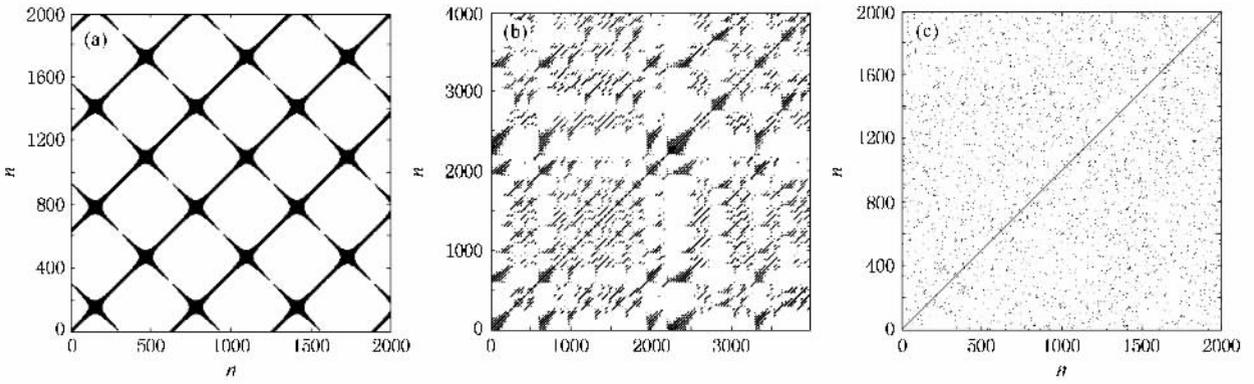


图4 三种不同时间序列的递归图 (a)正弦序列递归图 (b)Lorenz 混沌序列递归图 (c)随机噪声序列递归图

l_{min} 一般选择为不小于 2 的整数,过大的 l_{min} 会使 DET 的表达效果变差. DET 将递归图中孤立的递归点和有组织的形成连续对角线方向线段的递归点区

分开来.递归图中沿主对角线的线条纹理越发育,表明系统的确定性就越强.

2)平均对角线长度(L) 它是对角线方向线段

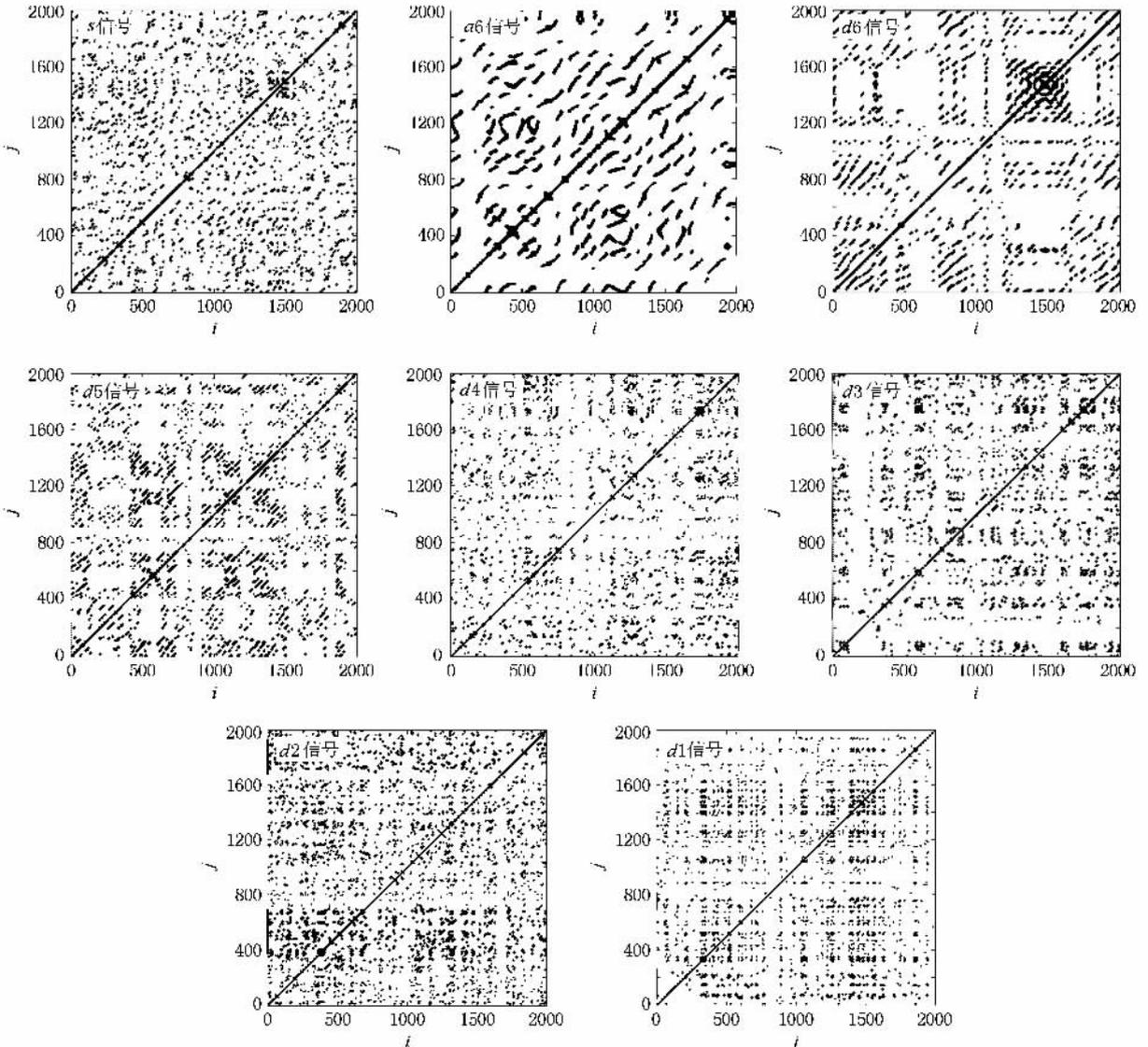


图5 泡状流的电导波动原始信号及小波分解信号的递归图($U_{sw} = 0.043 \text{ m/s}$, $U_{sg} = 0.036 \text{ m/s}$)

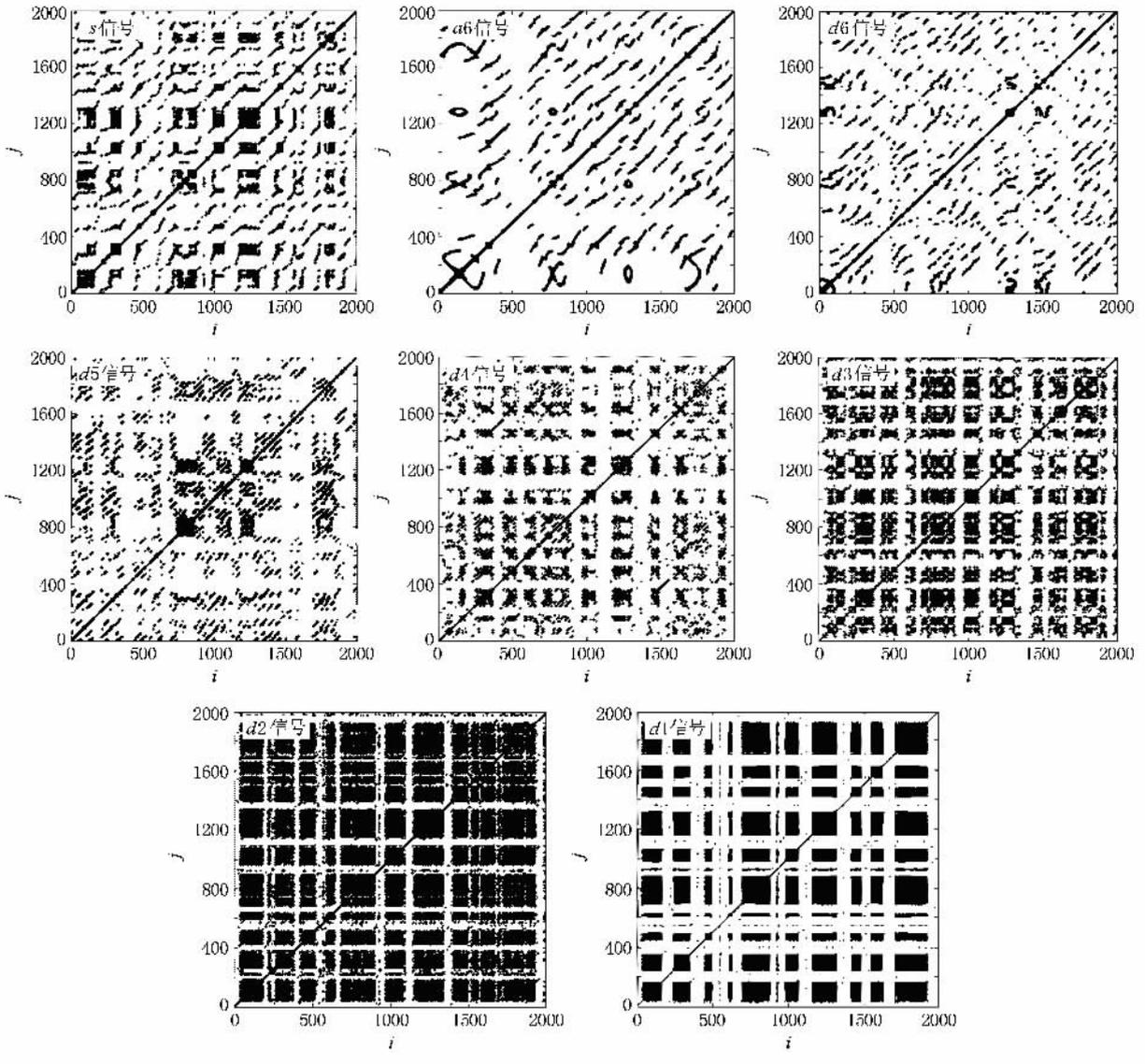


图 6 段塞流的电导波动原始信号及小波分解信号的递归图($U_{sw} = 0.048 \text{ m/s}$, $U_{sg} = 0.13 \text{ m/s}$)

长度的加权平均值,即

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^{N-1} l \cdot p(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^{N-1} p(l)}, \quad (8)$$

平均对角线长度 L 表示相空间轨迹中互相靠近的两段相轨迹的时间长度,或者表示为系统的平均周期,主对角线并不计算在内.如果平均对角线长度 L 越大,表明系统的确定性就越强.

文献 16 通过 Lorenz 方程所产生时间序列验证了上述递归特征量对系统混沌度有敏感指示变化,即递归定量分析对混沌系统分析的灵敏性及有效性.

3.4. 多尺度递归图分析

为进一步的分析各尺度下气液两相流的信号特征,将原信号和 7 个尺度下的分解信号分别进行递归图和递归定量分析.由于嵌入参数对递归分析结果影响不显著^[17],在这里我们直接选择嵌入维数,延迟时间和阈值分别为 $m = 4$, $\tau = 3\Delta t$, $\varepsilon = 0.25\text{std}(s_i)$ 以及递归图中对角线方向线段的计数下限为 $l_{\min} = 3$.三种典型流型的电导波动原始信号及小波分解后 7 个尺度信号的递归图如图 5—7 所示.

泡状流中气泡运动轨迹非常随机复杂,总体表现为气泡群在管中随液相一起上升状态,信号类似于随机信号,因此,图 5 中泡状流原始信号 s 的递归

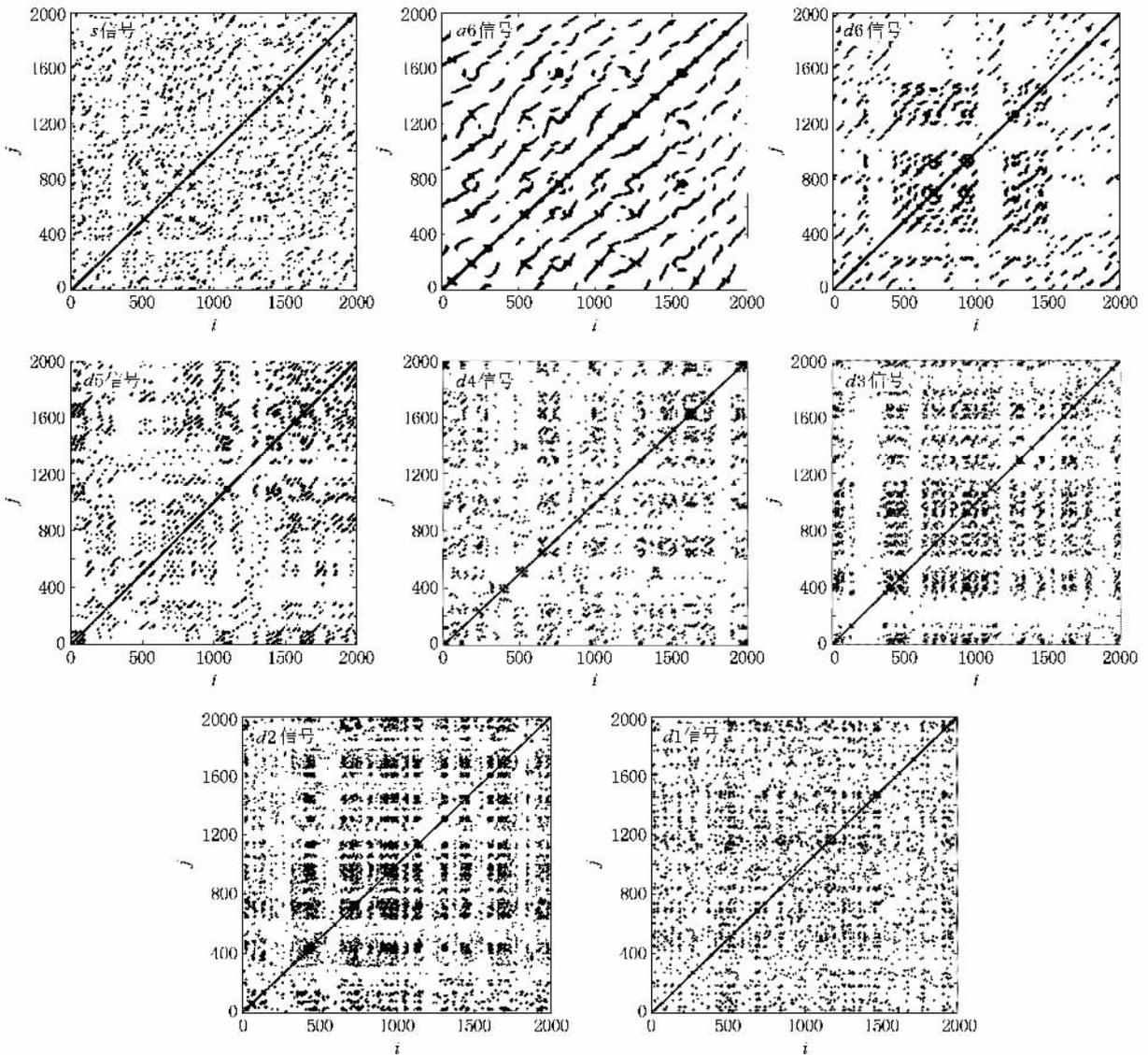


图7 混状流的电导波动原始信号及小波分解信号的递归图($U_{sw} = 0.052 \text{ m/s}$, $U_{sg} = 0.835 \text{ m/s}$)

图呈现为分散的孤立点状结构;而段塞流中气塞与液塞有规律的交替变化使得它的电导波动信号具有一定的周期性,因此,图6中它的原始信号 s 的递归图呈现出矩形块状结构,对于混状流,当气塞驱动液相作上升运动时,由于重力作用,使得气塞周围的液相向下脱落,并与下一时刻来流产生冲击与振荡,气塞被击碎后的混状流湍动现象非常剧烈,呈现气相与液相上下振荡的随机流动现象,与泡状流类似,图7中的混状流原始信号 s 的递归图主要呈现为分散的孤立点状结构。

如图5—7所示,小波分解各尺度信息代表了不同频段上的流型运动特征,即典型流型在各个尺度下递归图展现出了不同运动频率下的流型演化过

程。在 a_6 和 d_6 尺度下,即频率低于 6.25 Hz 时,泡状流和混状流递归图主要表现为沿对角线方向比较发育的线条纹理,具有较好的递归性,表明低频段泡状流和混状流具有一定确定性运动特征。在 d_5 尺度下的高频段,递归图纹理特征出现了变化,泡状流和混状流开始出现和原始信号类似的孤立点状结构,表明在此尺度下分散气泡运动的随机特性加剧,而段塞流则出现了矩形块纹理结构,随着频率的增加,这种现象越来越明显,表明段塞流液塞与气塞的间歇运动特征出现在高频段,而段塞流中的泡状流运动则出现在低频段上,且随着泡状流运动频率增加,泡状流逐渐失去确定性运动行为。

3.5. 多尺度递归定量分析

将求得的原始信号和每个尺度下的确定性 (DET)、平均对角线长度 (L) 两个递归特征量分别按照气相表观流速为横坐标描点绘于图 8 和图 9 中。从整体上看原始信号 s 的两个递归特征量变化趋势

是一致的,即随气相表观流速增加,由泡状流向段塞流的转变过程中,递归特性是逐渐增强的,这与前面递归图分析的流型向段塞流具有周期特征方向发展趋势相吻合,在段塞流失稳并逐渐向混状流转变过程中,其递归特性是逐渐减弱的,这与前面分析的流型是向随机运动特征方向发展趋势相吻合。

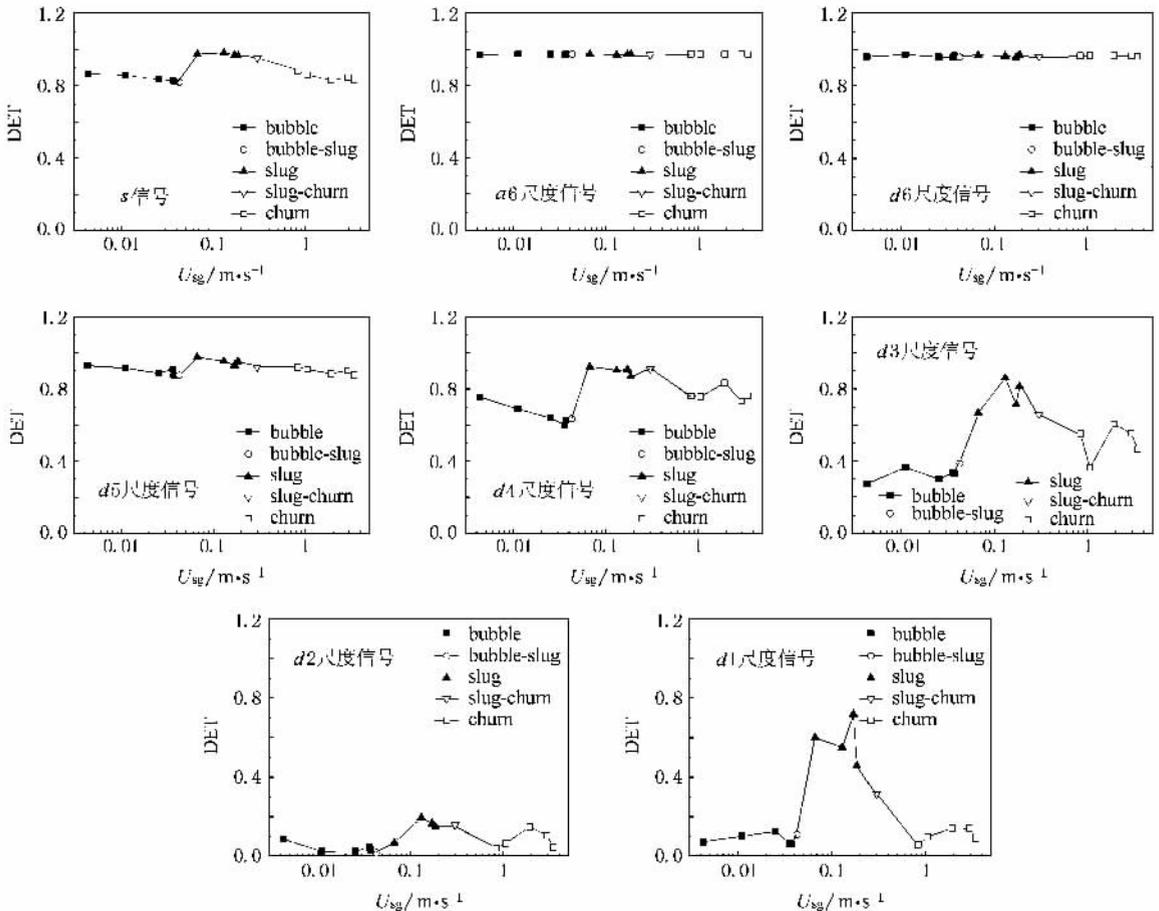


图 8 水相表观流速 $U_{sw} = 0.045 \text{ m/s}$ 时各尺度下确定性 (DET) 与气相表观速度关系

再来看一下各个尺度下两个递归特征值的变化,在 a_6 和 d_6 尺度下,即低频率范围为 $1.5625\text{—}3.125 \text{ Hz}$ 和 $3.125\text{—}6.25 \text{ Hz}$ 时,随着气体表观速度的增加两个递归特征值波动都很小且始终保持着一个较高的稳定值,表明了低频运动的泡状流、段塞流及混状流具有较好的确定性运动行为;随着信号频率增加 (d_5 至 d_1 信号尺度),泡状流与混状流的确定性 (DET) 与平均对角线长度 (L) 值依次变小,表明随着泡状流及混状流运动频率增加,其流动状态向

随机方向发展。随着信号频率增加 (d_5 至 d_1 信号尺度),段塞流的确定性 (DET) 与平均对角线长度 (L) 值总体上比泡状流及混状流要高,但其特征值随着信号频率变化显现出高低不定状态,这主要是由于受不同液相湍流作用影响,段塞流递归特性呈现出随尺度变化的不稳定特性。通过多尺度递归定量分析,可较好地对气液两相流流型动力学特征进行更加细致分析,是理解气液两相流流型运动特性的有效途径。

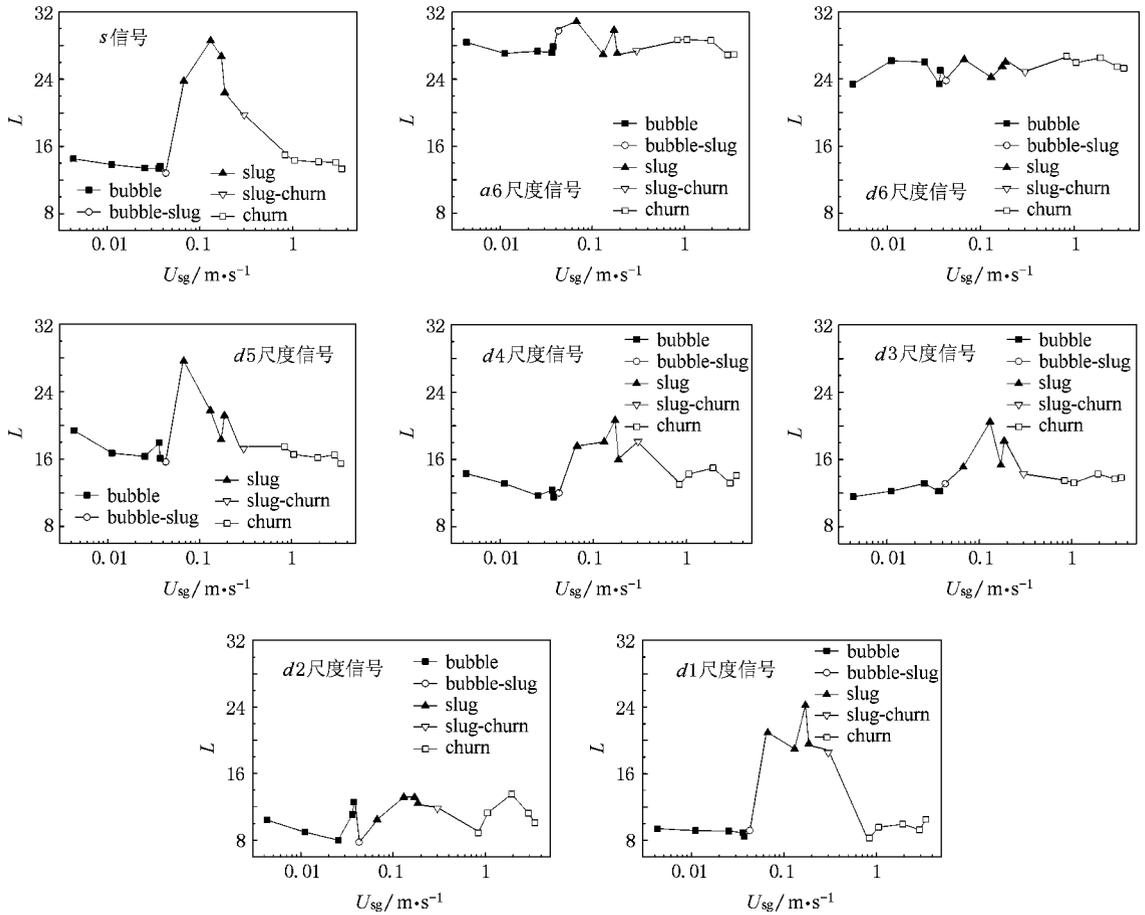


图9 水相表观流速 $U_{sw} = 0.045 \text{ m/s}$ 时各尺度下平均对角线长度(L)与气相表观速度关系

4. 结 论

在利用小波分析方法对原始电导波动信号进行有效分解的基础上,利用混沌递归分析方法对多尺度信号进行混沌递归分析,进一步从多尺度角度理

解与表征了气液两相流流型复杂动力学运动特征。

由于两相流是一个复杂的非线性动力学系统,采用多尺度分析方法对研究两相流相界面生成、运动、变化以及紊流结构具有重要科学价值,而多尺度与其他非线性分析结合也将是两相流动力学特性研究的有益探索。

- [1] Daw C S, Lawkins W F, Downing D J, Clapp Jr N E 1990 *Phys. Rev. A* **41** 1179
- [2] Fan L T, Neogi D, Yashima M 1990 *AIChE J.* **36** 1529
- [3] Fan L T, Kang Y, Neogi D, Yashima M 1993 *AIChE J.* **39** 513
- [4] Bai D, Issangya A S, Grace J R 1999 *Int. Eng. Chem. Res.* **38** 803
- [5] Li J H, Ge W, Guo Y L 1995 *Progress in Chemistry* **7** 231 (in Chinese) [李静海、葛蔚、郭友良 1995 化学进展 **7** 231]
- [6] Gong Z Q, Zou M W, Gao X Q, Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3947 (in Chinese) [龚志强、邹明珠、高新全、董文杰 2005 物理学报 **54** 3947]
- [7] Gong Z Q, Feng G L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3619 (in Chinese) [龚志强、封国林 2007 物理学报 **56** 3619]
- [8] Li Q 2007 *Chinese J. Disaster Prevention and Mitigation Engineering* **27** 211 (in Chinese) [李强 2007 防灾减灾工程学报 **27** 211]
- [9] Wu H J, Zhou F D, Wu Y Y 2001 *Int. J. Multiphase Flow.* **27** 459
- [10] Ji H F, Huang Z Y, Wu X G, Li H Q 2000 *J. Chem. Eng. of Chinese Univ.* **14** 553 (in Chinese) [冀海峰、黄志尧、吴贤国、李海青 2000 高校化学工程学报 **14** 553]
- [11] Zhao G B, Yang Y R 2003 *AIChE J.* **49** 869

- [12] Echmann J P , Kamphorst S O , Ruelle D 1987 *Europhysics Lett.* **5** 973
- [13] Zbilut J P , Webber C L Jr 1992 *Phys. Lett. A* **171** 199
- [14] Jin N D , Dong F , Zhao S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 720 (in Chinese)[金宁德、董 芳、赵 舒 2007 物理学报 **56** 720]
- [15] Takens F 1981 *Lecture Notes in Mathematics* (Berlin : Springer-Verlag New York) p366
- [16] Jin N D , Chen W P 2006 *J. Chem. Ind. Eng.* **57** 275 (in Chinese)[金宁德、陈万鹏 2006 化工学报 **57** 275]
- [17] Jin N D , Zheng G B , Chen W P 2007 *J. Chem. Ind. Eng.* **58** 1172 (in Chinese)[金宁德、郑桂波、陈万鹏 2007 化工学报 **58** 1172]

Multi-scale recurrence quantification analysis of the dynamic characteristics of two phase flow pattern *

Dong Fang^{1,2)} Jin Ning-De^{1)†} Zong Yan-Bo¹⁾ Wang Zhen-Ya¹⁾

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

²⁾ College of Quality and Technical Supervision of Hebei University , Baoding 071051 , China)

(Received 3 December 2007 ; revised manuscript received 1 March 2008)

Abstract

Based on the conductance fluctuating signals of the gas/liquid two phase flow measured in a vertical upward pipe , the multi-scale recurrence quantification analysis method is used to study the dynamic characteristics of gas/liquid two phase typical flow patterns. The results show that the low frequency bubble and churn flow patterns take on more developed line texture structure along the diagonal direction of the chaotic recurrence plot , which indicates that the low frequency bubble and churn flow have deterministic motion behavior. However , with increasing motion frequency of bubble and churn flow , the chaotic recurrence characteristics become worse and the motion tends to random gradually. For the slug flow , the intermittent rectangular massive texture appears on chaotic recurrence plot , which indicates that the intermittent motion characteristics of the liquid plug and gas plug appear in the high frequency band , whereas bubble flow motion in slug flow pattern appears in the low frequency band , and with increasing motion frequency of bubble flow , the bubble flow loses the deterministic behavior gradually. It is shown that multi-scale and nonlinear analysis based on conductance fluctuating signals is an efficient approach to understanding and characterizing the dynamic characteristics of gas/liquid two phase flow patterns.

Keywords : two phase flow , flow characteristics , multi-scale analysis , recurrence analysis

PACC : 0545 , 4572

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 50674070 ,60374041) and the National High Technology Research and Development Program of China(Grant No.2007AA06Z231).

† Corresponding Author. E-mail : njjin@tju.edu.cn