

研究论文

气液两相流差压测量波动信号的 符号序列统计分析

金宁德, 苗龄予, 李伟波

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 将符号时间序列分析方法应用到两相流测量波动信号分析, 并讨论了关键参数对符号统计量影响问题。在此基础上, 利用垂直上升管中采集到的 80 组气液两相流差压动态波动信号, 提取了时间不可逆性 T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量。当气相表观速度小于 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 随着气相表观速度增加, 泡状流随机可变的运动特征逐渐加剧, 其动力学特性变得相对复杂; 当气相表观速度大于 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 在流型从泡状流向段塞流转变过程中, 随着气相表观速度增大, 流型演化的动力学特性逐渐变得相对简单; 在流型从段塞流向混状流转变过程中, 随着气相表观速度增加, 混状流的动力学特性逐渐变得愈加复杂。研究结果表明, 时间不可逆性 T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量两个符号是表征气液两相流流型的敏感特征量, 考察这两个统计量随两相流流动参数变化规律有助于更好地理解两相流流型动力学特性。

关键词: 气液两相流; 流型表征; 符号时间序列分析; 时间不可逆性; χ_{fb}^2 统计量

中图分类号: TE 312

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 02-0327-08

Symbolic sequence statistical analysis of differential pressure measurement fluctuating signal of gas/liquid two-phase flow

JIN Ningde, MIAO Lingyu, LI Weibo

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The symbolic sequence statistical analysis method was applied to analyze two-phase flow measurement fluctuating signals and the key parameters affecting the symbolic statistical quantities were discussed. Based on the above study, eighty groups of differential pressure fluctuating signals of gas/liquid two-phase flow in vertical upward pipes were gathered and the statistical quantities of time irreversibility T_{fb} and chi-square statistics χ_{fb}^2 were extracted. When the gas superficial velocity was less than $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the randomly variable motion features of bubble flow became stronger and the dynamic characteristics became relatively more complex with increasing gas superficial velocity. When gas superficial velocity exceeded $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, with increasing gas superficial velocity the flow pattern changed from bubble flow to slug flow and the dynamic characteristics became relatively simple, while with further increasing gas superficial velocity the flow pattern changed from slug flow to churn flow and the dynamic characteristics became more complex. This study showed that time irreversibility T_{fb} and chi-square statistics χ_{fb}^2 were sensitive statistical quantities characterizing gas/liquid two-phase flow pattern and the dynamic characteristics of gas/liquid two-phase flow pattern could be better understood by observing the change of these two statistical quantities with changing two-phase flow parameters.

2006-01-20 收到初稿, 2006-05-08 收到修改稿。

联系人及第一作者: 金宁德 (1963—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60374041, 50674070)。

Received date: 2006-01-20.

Corresponding author: Prof. JIN Ningde. E-mail: njjin@tju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (60374041, 50674070).

Key words: gas/liquid two-phase flow; flow pattern characterization; symbolic time series analysis; time irreversibility; chi-square statistics

引 言

在石油、化工及核反应堆等工业领域存在着大量的气液两相流动,准确识别两相流流型对工业生产过程优化及工艺改造有着重要意义。由于两相流存在复杂相间界面效应及相对运动,所以准确识别两相流流型还相当困难,尤其是流型转变动力学机理至今尚未十分清楚。两相流是一个复杂的非线性动力学系统,自 20 世纪 90 年代以来,基于混沌及分形时间序列分析的流型识别研究成果日趋增多^[1-4],但这种非线性分析方法需要相空间嵌入参数的准确选取,当混沌时间序列长度改变及含有噪声影响时,不恰当的相空间嵌入参数选择对混沌吸引子重构质量及宏观统计特征参数计算结果有较大影响,甚至会给两相流动力学特性物理机制解释及流型在线识别理论与技术有效发展带来困难,计算耗时也是该方法不利的方面。近年来,两相流流型辨识的软测量方法有了一定发展^[5-9],但在选取反映流型变化的特征量及信息融合模型等问题上还有待于深入探讨。

时间序列的符号分析方法起源于 20 世纪 90 年代中期,它是基于符号动力学理论、混沌时间序列分析和信息理论发展起来的一种新的实验数据分析方法,最初它为强噪声工程对象提供了一种简单、快速且有效的数据处理方法^[10],后来符号化的时间序列分析方法被广泛应用于物理、工程及流体等应用领域。Tang 等^[11-12]将符号序列统计方法应用于混沌信号分析中,并且研究了时空系统中符号化方法的参数选择问题,证明了可以将此方法运用于不规则时间序列处理。Daw 等^[13]首先将此方法应用于多相流流动现象分析,Lehrman 等^[14]也将该方法应用于混沌及湍流波动信号分析,随后 Godelle 等^[15]在分析水和甘油混合物喷射状态时运用了符号化方法。最近,Daw 等^[16-17]提出了符号时间序列分析中时间不可逆性指标,并对实验数据如何实现符号化分析给出了系统而全面综述。

在先前油水两相流流型研究基础上^[18],本文重点讨论气液两相流差压测量波动信号的符号序列分析方法中关键参数对符号统计量影响问题,如分

割区间、符号字长选择、时间延迟、时间序列长度及序列噪声影响,在垂直上升气液两相流管流中采集 5 种典型流型(泡状流、泡状-段塞过渡流、段塞流、段塞-混状过渡流及混状流) 80 组动态差压波动信号的基础上,提取了时间不可逆性 T_n 及 χ_n^2 统计量两个符号化特征指标,分析了这两个特征指标随两相流流型及气相表观速度的变化规律,探讨了气液两相流流型动力学特性,为两相流测量信号提供了一种简单、快速及有效的符号化分析方法。

1 气液两相流差压波动信号采集

垂直上升管中气液两相流动态实验是在天津大学检测技术与自动化装置国家重点学科油气水三相流实验室进行的。图 1 为流动环实验装置及高灵敏度差压传感器测试段示意图。

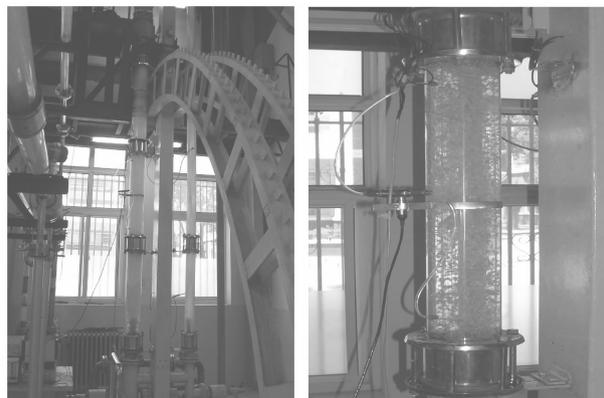
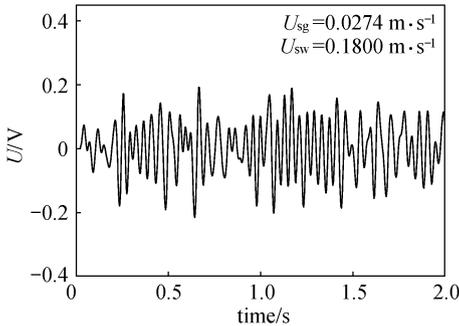


图 1 油气水三相流流动环及差压传感器测试段
Fig. 1 Oil/gas/water three-phase flow loop and measurement section of differential pressure sensor

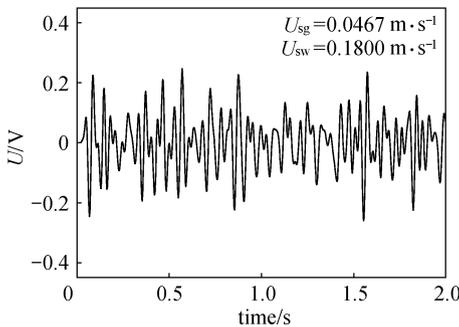
实验介质为空气及自来水,实验时先在管道中通入固定流量水相,然后逐渐增加气相流量,每完成一次气水两相流配比后,通过观察得到气液两相流流型信息。实验水流量范围为 $0.1 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,气流量范围为 $0.5 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。实验管径为 125 mm。差压传感器是英国 GE Druck 公司生产的 PMP4110,量程范围为 $0 \sim 7 \text{ kPa}$,精度为 $0.08\% \text{ FS}$ 。两相流差压动态波动信号测量系统是由差压传感器、信号调理模块、数据采集设备、测量数据处理单元等几部分组成。其中信号调理模块

自行设计研制。数据采集卡采用美国 NI 公司 4472 型号产品, 该采集卡共有 8 个通道, 且具有同步采集功能。测量数据处理部分是通过与数据采集卡配套的图形化编程语言 LabVIEW 7.1 实现的, 它具有可实时显示波形变化、实时存储数据并在线进行相关运算和数据分析等功能。两相流差压动态波动信号采样频率为 400 Hz, 每个测点记录 60 s。实验共采集 80 组不同流型的气液两相流差压动态波动信号。

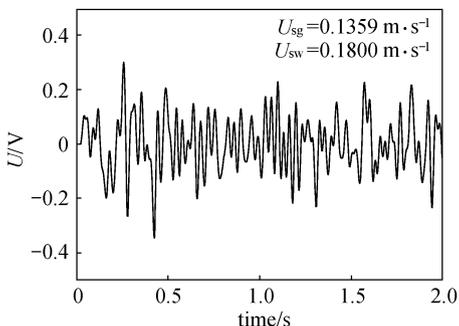
图 2 为 5 种典型流型的气液两相流差压动态波动信号, 图中 U_{sw} 为水相表观速度, U_{sg} 为气相表观速度。实验中观察到了 5 种典型的气液两相流流型, 分别为泡状流 (bubble flow)、泡状-段塞过渡流 (bubble-slug flow)、段塞流 (slug flow)、段塞-混状过渡流 (slug-churn flow) 及混状流 (churn flow)。



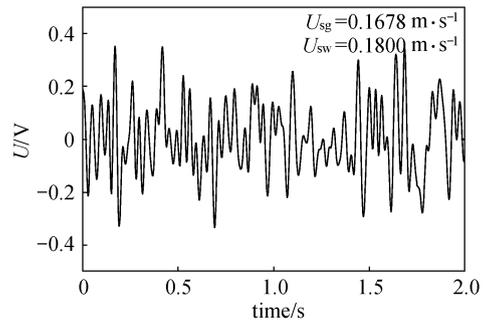
(a) bubble flow



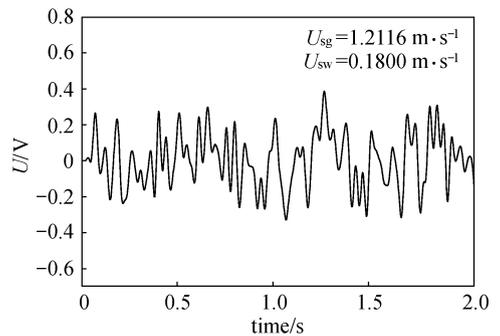
(b) bubble-slug flow



(c) slug flow



(d) slug-churn flow



(e) churn flow

图 2 5 种典型的气液两相流流型差压测量信号
Fig. 2 Differential pressure signals of five typical gas/liquid two-phase flow patterns

2 符号化时间序列分析方法

时间序列符号化分析分为两步: 首先将时间序列转化为符号序列, 然后再对符号序列进行统计学定量分析。

2.1 分割区间法

Daw 等^[16]首先提出分割区间法, 其基本思想是在几个可能值上对时间序列进行离散化, 把具有许多可能值的数据序列变换为只有几个互不相同值的符号序列, 这是一个粗粒化过程。首先将原始时间数据状态空间划分为一系列区间, 每一个区间分配不同的符号, 根据原始数据落入的区间不同, 将它们转化为不同的符号, 从而将一个连续模拟的时间序列转换为一个符号序列。图 3 表示了 $U_{sg} = 0.0115 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $U_{sw} = 0.1800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流动工况下截得的 10 个点的符号序列。

2.2 差值法

差值法是 Finney 等^[19]首次提出的, 规定上下两点差值如果为正, 用符号 1 表示原数据; 如果为负, 则用 0 表示原数据。图 4 表示了 $U_{sg} = 0.0115$

$m \cdot s^{-1}$ 及 $U_{sw} = 0.1800 m \cdot s^{-1}$ 的流动工况下截得的 10 个点的符号序列。当观察对象固定或者两点间的时间间隔较大时, 这种方法比较适用。按照差值法划分符号准则, “突发” 的强噪声仅仅会改变与之相邻点 (局部) 符号值, 而不会改变其他部分的符号划分特性, 在对转换后的符号进行统计分析中, 由于概率大的符号串对符号统计量起到主导作用, 所以, 基于差值法的符号划分方法可使数据对突发的大噪声不敏感^[17]。

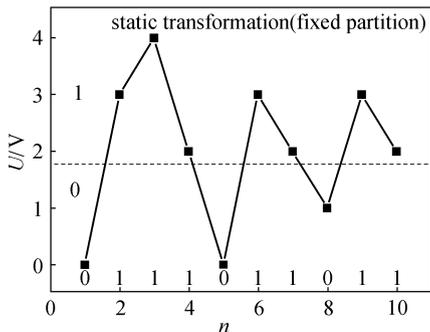


图 3 时间序列转化为符号序列的分割区间法
Fig. 3 Fixed partition transformation of time series into symbolic series

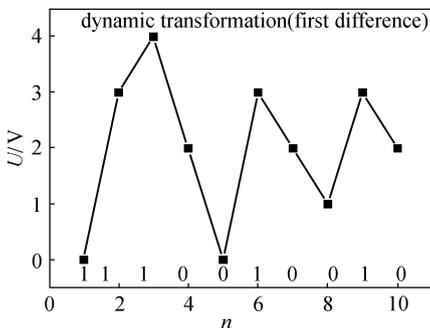


图 4 时间序列转化为符号序列的差值法
Fig. 4 First difference transformation of time series into symbolic series

原始时间序列数据转化为符号形式后, 就要提取符号序列的特征量。一种有用的办法就是选择一个标准长度 L , L 个连续的符号组成一个字, 每一个字被编码为十进制数, 形成了新的序列。上述过程与混沌时间序列中相空间重建的时间延迟嵌入类似, 即利用离散的符号替代连续的原始测量值, 然后以出现字的概率除以所有字的总数, 把它作为时间序列分析的一个指标, 图 5 和图 6 所示就是符号序列柱状图, 数据对应图 3 和图 4, 其中字长 L 选择为 2, 符号序列柱状图直观地描述了每一个字出现的相对频率。

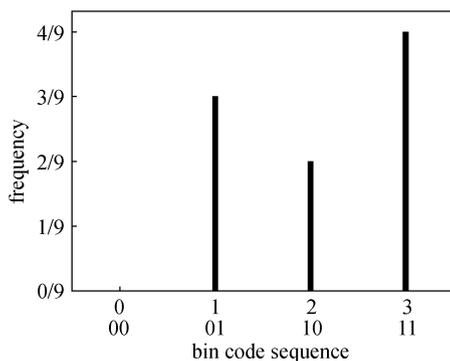


图 5 由分割区间法得到的符号序列柱状图
Fig. 5 Symbol sequence histogram corresponding to fixed partition

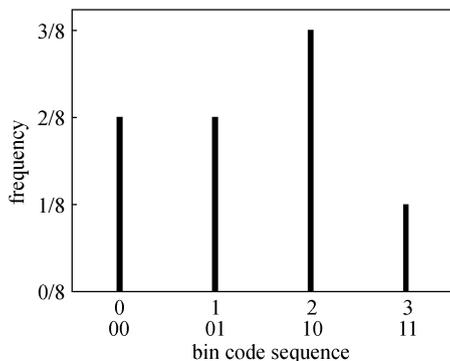


图 6 由差值法得到的符号序列柱状图
Fig. 6 Symbol sequence histogram corresponding to first difference

对于分割区间法, 如果分割区间 n 越多, 原始数据转化为符号时间序列就越细化, 但是也会带来一些负面的影响, 例如对噪声的抑制作用减弱, 因此需要选择合适的分割区间 n 。对于给定的时间序列, 选择适当的 n 与 L 值是非常重要的。

2.3 符号序列的统计量

符号时间序列分析的重点在于分析每一个字的相对频率, 通过对出现字的统计学分析, 来揭示系统的动力学特性。目前已经有多种方法被用于频率统计分析, 其中 3 种主要的统计学方法被证明是非常有用的, 它们分别是修正的 Shannon 熵、时间不可逆性指标 T_{ib} 及 χ_{ib}^2 统计量。

修正的 Shannon 熵定义如下^[13]

$$H_s = -\frac{1}{\lg N_{obs}} \sum_i p_i \lg p_i \quad (1)$$

式中 p_i 是第 i 个字出现的概率; N_{obs} 是在符号序列中出现的不同字的数量。对于完全随机的数据, 修正的 Shannon 熵等于 1。对于不完全随机的数据, 其范围为 0~1。它与 Shannon 熵含义是一致

的，熵值越大，表明系统的规律性越差，熵值接近于 0 时，系统的规律性很好。

对同一个符号序列，正向划分原始数据与反向划分可得到两个完全不同的符号序列，分别求这两个序列中字出现的概率，然后对两种情况下字的概率进行欧氏范数计算，就可计算出时间不可逆性 T_{fb} ，时间序列不可逆性 T_{fb} 定义为^[13]

$$T_{fb} = \sqrt{\sum_i (P_{f,i} - P_{b,i})^2} \quad (2)$$

式中 $P_{f,i}$ 和 $P_{b,i}$ 分别为前向序列符号串与后向序列符号串的概率。时间序列不可逆性就是对字进行计算，尤其适用于多维空间。若系统呈规律性变化，则 T_{fb} 趋向 0，而 T_{fb} 越大，则表明系统越复杂，不确定性增大。

也可以利用 χ_{fb}^2 统计量来计算前向符号序列与后向符号序列的差别，其效果与时间序列不可逆性指标 T_{fb} 相同，定义式如下^[13]

$$\chi_{fb}^2 = \sum_i \frac{(P_{f,i} - P_{b,i})^2}{P_{f,i} + P_{b,i}} \quad (3)$$

2.4 符号化参数选择

在数据采集过程中，若采样点过大，则会导致连续多个点的符号相同。因此需要控制采样点不能太多，通常来说把连续的时间序列转化为符号序列后，将包含大量连续的同符号。符号重复的频率过高将会导致原始数据的过采样，另外，采样时间如果大于采样定律规定的时间，将会发生混叠现象并且丢失信息量。它与延迟时间的选取类似，因此，混沌相空间重建中的延迟时间选取方法可以用于符号时间序列分析，在构造符号序列时减少符号冗余的方法就是增加符号间的时间间隔。本文采用互信息极小值求取合理的时间延迟，互信息方程定义如下

$$I(\tau) = \sum p_{i,j}(\tau) \log_2 \frac{p_{i,j}}{p_i p_j} \quad (4)$$

式中 τ 是时间延迟，可表示为 $\tau = m\Delta t$ ，其中 m 为延迟时间参数， Δt 为原始数据采样间隔； $p_{i,j}$ 为符号 i 与 j 的联合概率； p_i 与 p_j 分别为符号 i 与 j 出现的概率。

在处理实际数据时，选取第一极小值对应 τ 为最佳的时间延迟。图 7 为 $U_{sg} = 0.0116 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $U_{sw} = 0.1789 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流动工况下得到的互信息随延迟参数 m 变化曲线。当 $m=5$ 时， $I(m)$ 取得极小值。分割区间的大小 n 及标准长度 L 决定了出现的符号序列长度，符号序列长度由式 (5) 计算

$$N_{seq} = n^L \quad (5)$$

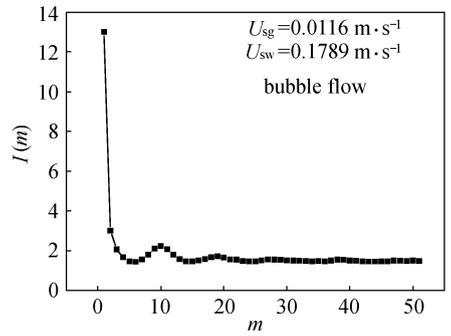


图 7 由互信息第一极小值法计算最佳时间延迟
Fig. 7 Calculating the best time delay using mutual information first minimum

上述 3 个统计量值随着分割区间 n 与字标准长度 L 的变化而变化。对于特定时间序列，应当选择适当的 n 与 L 才能更好地揭示系统的动力学特性。迄今为止，研究人员仍然没有从理论上找到一种有效方法，但是 Finney 等^[20] 根据实际经验发现，当修正的 Shannon 熵为最小值时，对应的 n 与 L 就是最佳的参数。Daw 等^[16] 用时间不可逆性指标 T_{fb} 来选择最佳参数，当此指标值为最大时，对应的 n 、 L 值就是最佳的参数值。这两种方法都可以用来作为 n 与 L 参数选择的标准。图 8 显示了在 $U_{sg} = 0.1304 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $U_{sw} = 0.0450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流动工况下，对差压波动信号处理结果。当 $n=5$ 及 $L=5$ 时， H_s 取得最小值，这就是所要选择的最佳参数。在本文研究中对其他 80 组气液两相流流动工况数据也采取了类似计算 H_s 最小值的方法，得到了每种流动工况的最佳 n 与 L 值。

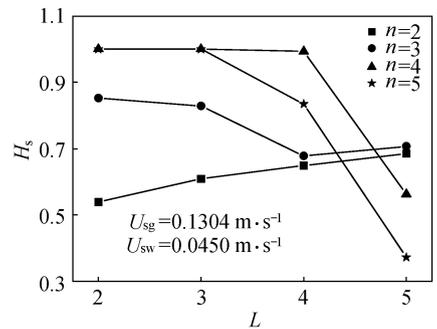


图 8 由修正 Shannon 熵选择最佳参数
Fig. 8 Choosing the best parameters using modified Shannon entropy

2.5 序列长度对符号统计量 T_{fb} 及 χ_{fb}^2 影响

为了考察时间序列长度对统计量计算结果的影响，在 $U_{sg} = 0.1336 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $U_{sw} = 0.1834 \text{ m} \cdot$

s^{-1} 流动工况下取时间序列长度从 $N=2500$ 变化到 $N=20000$ ，递增步长为 500，分别计算它们的时间序列不可逆性指标 T_{fb} 和 χ_{fb}^2 统计量，其结果如图 9 及图 10 所示。

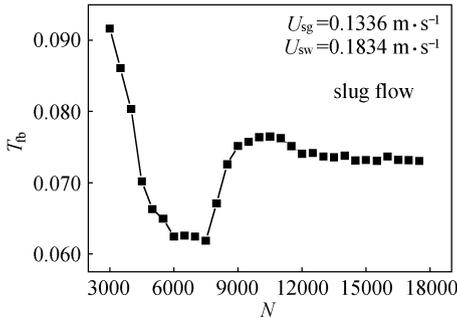


图 9 时间不可逆性 T_{fb} 与时序长度关系
Fig. 9 Time irreversibility T_{fb} versus time sequense length

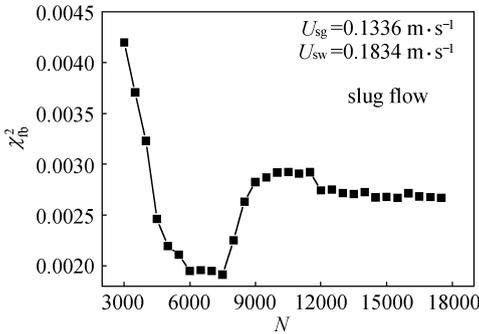


图 10 χ_{fb}^2 统计量与时序长度关系
Fig. 10 Chi-square statistics χ_{fb}^2 versus time sequense length

由图 9 及图 10 可见，当数据长度较小时，对于计算的时间序列不可逆性指标 T_{fb} 和 χ_{fb}^2 统计量是有影响的；当 $N > 12000$ 时，时间序列不可逆性指标 T_{fb} 和 χ_{fb}^2 统计量波动不大。

2.6 噪声强度对符号统计量 T_{fb} 及 χ_{fb}^2 影响

首先对 Lorenz 混沌方程进行求解

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = a(Y - X) \\ \frac{dY}{dt} = X(b - z) - Y \\ \frac{dZ}{dt} = XY - cZ \end{cases} \quad (6)$$

其中各参数的值分别为： $a=16$ ， $b=45.92$ ， $c=4$ ，计算时间步长 $\Delta t=0.01$ s，初值为 $(X_0, Y_0, Z_0)=(10, 1, 0)$ 。序列长度选为 100000。对于求解出的 X 序列加上高斯噪声，即

$$x_i = X_i + \eta \epsilon_i \quad (7)$$

式中 X_i 为无噪声时由 Lorenz 方程求解的 X 时间序列； σ 是该序列标准偏差； ϵ_i 是高斯随机变量（满足均值为 0、方差为 1 的独立平均分布）； η 为噪声强度。将此时生成的带有噪声的时间序列用互信息法计算出延迟时间，然后计算出如图 11 及图 12 所示的时间不可逆性 T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量随噪声强度变化规律。

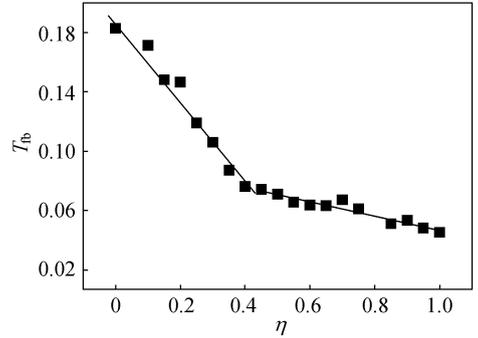


图 11 时间不可逆性 T_{fb} 与噪声强度 η 关系
Fig. 11 Time irreversibility T_{fb} versus noise level η

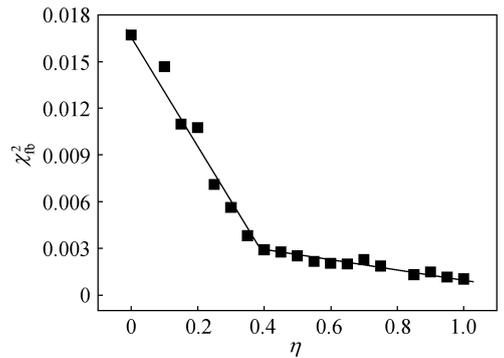


图 12 χ_{fb}^2 统计量与噪声强度 η 关系
Fig. 12 Chi-square statistics χ_{fb}^2 versus noise level η

由图 11 及图 12 可以看出，在一定的噪声强度范围内 ($\eta \leq 0.4$ 或 $\eta \geq 0.4$)，两种统计量随噪声强度减小是近似呈线性规律变化的，也就是说在相应的噪声变化范围内，噪声的存在虽然改变两种统计量值变化，但其影响规律是线性的，对最终用这两种统计量表征流型变化曲线形状特性不会有太大改变，从这个意义上说，符号时间序列分析方法具有一定的抗噪能力。

3 符号序列统计量表征流型结果分析

图 13 及图 14 分别为对 80 组流动工况计算得到的时间不可逆性 T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量随气相表观速度变化的结果。可以看出，气相表观速度较低时（小于 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），泡状流 T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量整体

上要比段塞流高，表明泡状流动力学特性要比段塞流相对复杂，这与文献 [21] 报道的在低液量时 ($U_{sw}=0.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 泡状流具有较高非线性动力学表征值结论是相一致的。图 15 为气相表观速度较低时泡状流功率谱特征，可以看出，随着气相表观速度增大，泡状流功率谱逐渐呈现出多频宽带特征，表明随着泡群浓度的增加，泡群的随机可变运动特征加剧，导致压力波动变得复杂， T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量逐渐增大，整体上使泡状流的动力学特性变得愈加复杂。

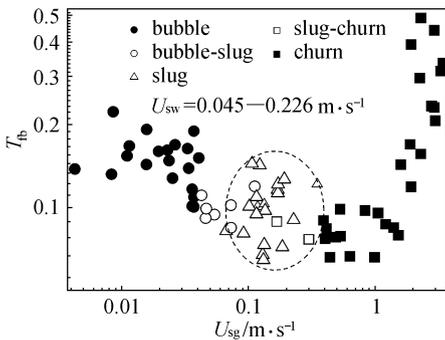


图 13 时间不可逆性 T_{fb} 与气相表观速度关系

Fig. 13 Time irreversibility T_{fb} versus gas superficial velocity

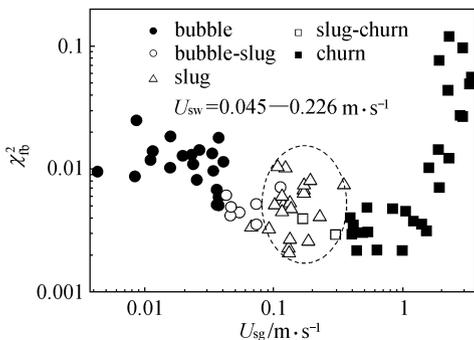


图 14 χ_{fb}^2 统计量与气相表观速度关系

Fig. 14 Chi-square statistics χ_{fb}^2 versus gas superficial velocity

随着流型从泡状流向段塞流过渡， T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量逐渐减小，这与文献 [21] 报道的在低液量时 ($U_{sw}=0.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 泡状流向段塞流转变过程中非线性动力学表征值逐渐降低结论是相一致的。随着气相表观速度增大，泡群向聚并的趋势发展，此时泡群随机运动程度在减弱，发展到段塞流后，段塞流的气塞与液塞周期性的交替变化反而使段塞流的动力学特性变得相对简单， T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量处于较低值，但由于受不同液相表观速度的影响， T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量有较大的波动，整体上段塞流的 T_{fb} 及

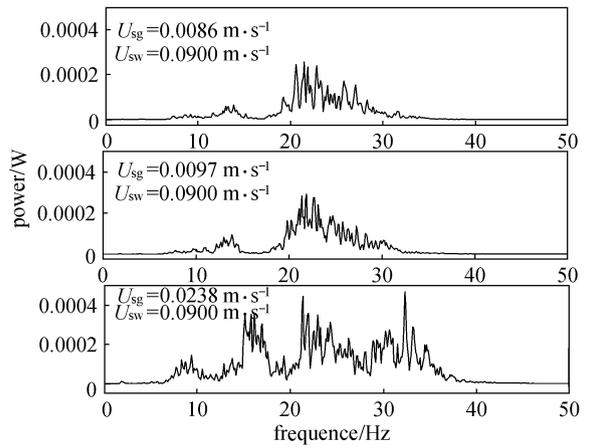


图 15 泡状流的 PSD 特征

Fig. 15 PSD feature of bubble flow

χ_{fb}^2 统计量随气相表观速度变化规律较差，这与图 16 所示的段塞流功率谱特征相吻合，从图 16 可以看出，随着气相表观速度增大，段塞流功率谱特征规律性变差，均表现出间歇性的频率运动特征。

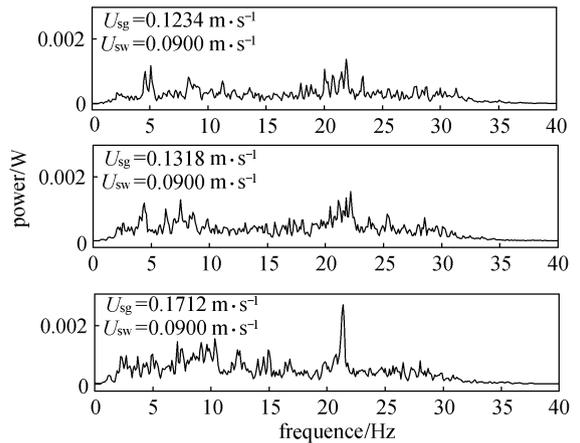


图 16 段塞流的 PSD 特征

Fig. 16 PSD feature of slug flow

随着气相表观速度增加，当流型从段塞流向混状流转变时， T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量随气相表观速度增大急剧上升，这与图 17 所示的相应功率谱 (PSD) 特征相吻合，从图 17 可以看出，随着气相表观速度增大，混状流功率谱特征逐渐呈现多频特征，表明大气泡变“碎”以后的混状流失去了段塞流的周期性运动特征，随着气相表观速度增大其混状流动力学特性愈加复杂。

4 结 论

(1) 时间序列符号统计分析中，由于概率大的符号串对符号统计量起到主导作用，所以，在采用

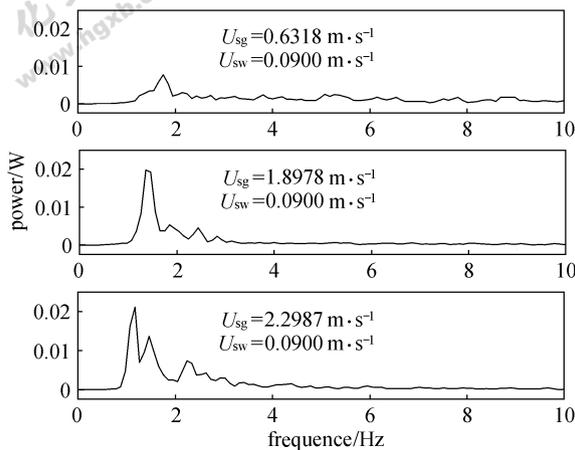


图 17 混状流的 PSD 特征

Fig. 17 PSD feature of churn flow

该方法进行两相流流型表征时可以在一定程度上抑制噪声干扰的影响，并且该方法具有计算简单、快捷等特点，有利于两相流流型实时监测控制。

(2) 研究表明时间不可逆性 T_{fb} 及 χ_{fb}^2 统计量是一种能够反映气液两相流流动特性变化的敏感特征量，考察符号统计量随两相流参数变化规律，有助于更好地理解气液两相流流型动力学特性。

(3) 符号划分可在一般的传感元件测量信号中直接完成，这种在低分辨率传感器的应用可以有效减少仪器成本及降低测量仪器对抗干扰能力的要求。

References

- [1] Biage M, Delhaye J M. The flooding transition: an experimental appraisal of the chaotic aspect of liquid film flow before the flooding point. *AIChE Symposium Series*, 1989, **85** (269): 274-279
- [2] Fan L T, Neogi D, Yashima M. Stochastic analysis of a three-phase fluidized bed: fractal approach. *AIChE J*, 1990, **36** (10): 1529-1534
- [3] Daw C S, Lawkins W F, Downing D J, Calpp N E. Chaotic characteristics of a complex gas-solids flow. *Phys. Rev. A*, 1990, **41** (2): 1179-1185
- [4] Franca F, Acikgoz M, Lahey R T Jr. The use of fractal techniques for flow regime identification. *International Journal of Multiphase Flow*, 1991, **17**: 545-552
- [5] Cai Shiqian, Haluk T, Qiu Hianhung. Neural network based objective flow regime identification in air-water two phase flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1994, **72**: 440-445
- [6] Embrechts M J. The application of neural networks to two-phase flow regime identification//Proceedings of the American Power Conference. Chicago, USA; 1996: 860-864
- [7] Zhao Xin (赵鑫), Jin Ningde (金宁德), Li Weibo (李伟波). Soft measurement method of phase volume fraction for the oil/water two-phase flow. *Journal of Chemical*

- Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (10): 1875-1879
- [8] Wu Haojiang (吴浩江), Hu Zhihua (胡志华), Zhou Fangde (周芳德). Application of improved BP neural network on intelligent identification of flow regime of oil-gas-water multiphase flow. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 2000, **34** (1): 22-25
- [9] Bai Bofeng (白博峰), Guo Liejin (郭烈锦), Chen Xuejun (陈学俊). Gas-liquid two-phase flow pattern identification based on counter propagation network. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2000, **51** (12): 848-851
- [10] Crutchfield J P, Packard N H. Symbolic dynamics of noisy chaos. *Physica D*, 1983, **7**: 201-223
- [11] Tang X Z, Tracy E R, Boozer A D, Brown R. Symbol sequence statistics in noisy chaotic signal reconstruction. *Physical Review E*, 1995, **51** (5): 3871-3889
- [12] Tang X Z, Tracy E R, Brown R. Symbol statistics and spatio-temporal systems. *Physica D*, 1997, **102**: 253-261
- [13] Daw C S, Finney C E A, Tracy E R. Symbolic statistics: a new tool for understanding multiphase flow phenomena//ASME International Congress & Exposition. Anaheim, California, USA; 1998: 15-20
- [14] Lehrman M, Rechester A B, White R B. Symbolic analysis of chaotic signals and turbulent fluctuations. *Physical Review Letters*, 1997, **78** (1): 54-57
- [15] Godelle J, Letellier C. Symbolic sequence statistical analysis for free liquid jets. *Physical Review E*, 2000, **62** (6): 7973-7981
- [16] Daw C S, Finney C E A, Kennel M B. Symbolic approach for measuring temporal "irreversibility". *Physical Review E*, 2000, **62** (2): 1912-1921
- [17] Daw C S, Finney C E A, Tracy E R. A review of symbolic analysis of experimental data. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74** (2): 915-930
- [18] Jin Ningde (金宁德), Li Weibo (李伟波), Zhao Xin (赵鑫), Zhou Yan (周艳). Characterization of oil/water two-phase flow patterns in vertical upward pipes based on symbolic time series analysis. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (1): 116-120
- [19] Finney C E A, Nguyen K, Daw C S, Halow J S. Symbol-sequence statistics for monitoring fluidization//Proceedings of the 32nd Japanese Symposium on Combustion. Sendai, Japan, 1994: 400-406
- [20] Finney C E A, Green J B, Daw C S. Symbolic time series analysis of engine combustion measurements//SAE International Congress and Exposition. Detroit, USA, 1998
- [21] Bai Bofeng (白博峰), Guo Liejin (郭烈锦), Chen Xuejun (陈学俊). Nonlinear analysis on pressure fluctuation phenomena of air-water two phase flow. *Journal of Engineering Thermophysics (China)* (工程热物理学报), 2001, **22** (3): 359-362