

小管径气液两相流空隙率波传播的多尺度相关性

翟路生 金宁德

Multi-scale cross-correlation characteristics of void fraction wave propagation for gas-liquid two-phase flows in small diameter pipe

Zhai Lu-Sheng Jin Ning-De

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 010501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.010501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进教学优化算法的 Hermite 正交基神经网络混沌时间序列预测

Hermite orthogonal basis neural network based on improved teaching-learning-based optimization algorithm for chaotic time series prediction

物理学报.2015, 64(20): 200506 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.200506>

基于参数切换算法的混沌系统吸引子近似及其电路设计

Approximations of chaotic attractors and its circuit design based on the parameter switching algorithm

物理学报.2015, 64(20): 200508 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.200508>

语音信号序列的 Volterra 预测模型

Volterra prediction model for speech signal series

物理学报.2015, 64(20): 200507 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.200507>

基于时频差的正交容积卡尔曼滤波跟踪算法

A tracking algorithm based on orthogonal cubature Kalman filter with TDOA and FDOA

物理学报.2015, 64(15): 150502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.150502>

基于混沌理论和改进径向基函数神经网络的网络舆情预测方法

Internet public opinion chaotic prediction based on chaos theory and the improved radial basis function in neural networks

物理学报.2015, 64(11): 110503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110503>

小管径气液两相流空隙率波传播的多尺度相关性*

翟路生 金宁德†

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2015年8月18日收到; 2015年10月11日收到修改稿)

空隙率波是气液两相流系统的特殊物理现象, 理解空隙率波的传播特性对揭示两相流型转变与流速测量物理机理具有重要意义. 本文首先考察了典型非线性系统的多尺度互相关特性, 发现去趋势互相关分析方法可有效揭示系统的多尺度非线性动力学特征; 然后, 通过采集垂直上升小管径气液两相流电导传感器阵列上下游空隙率波动数据, 提出采用多尺度去趋势互相关分析方法探测空隙率波传播的多尺度互相关特性, 并提取了低尺度空隙率波互相关水平增长率; 另外, 通过计算空隙率波空间衰减因子, 考察了气液两相流空隙率波传播的结构不稳定行为. 结果表明, 空隙率波结构的多尺度互相关特性与其空间衰减特性具有较好的物理关联性: 对于气液两相流过渡流型, 低尺度空隙率波互相关水平增长率较高, 且与较为稳定的空隙率波传播特性相对应; 而当气液两相流空隙率波明显衰减或放大时, 空隙率波互相关水平增长率一般较低.

关键词: 气液两相流, 空隙率波, 多尺度互相关性, 空隙率波不稳定性

PACS: 05.45.Tp, 47.61.Jd, 89.75.Da

DOI: 10.7498/aps.65.010501

1 引言

气液两相流流动现象广泛地存在于石油、化工、制药等工业生产过程. 气液两相流流动结构复杂多变与空隙率波不稳定性密切相关^[1-3]. 空隙率波传播过程中生长及衰减特性对流型演化起控制作用, 精细刻画空隙率波传播的物理特性对理解两相流相关流速测量机理及提高流速测量精度具有重要学术价值.

早期空隙率波研究关注两相流波不稳定性与流型发展、演化之间的关系^[4-6]. 随后, Kytömaa和Brennen^[7]研究了气液两相流小幅度空隙率波的衰减及传播特性, 指出两相流相关流速表征了流体固有结构传播速度, 即空隙率波速. 据此, 文献^[8, 9]建立了相关流速与空隙率波速之间的物理模型, 实现了油水两相流总流量有效测量. 进入21世纪, 两相流空隙率波非线性特性分析取得了进

展, 在刻画两相流流型形成机理及调控方面取得了一定认识^[10,11]. 另外, 空隙率波传播特性的数学物理模型研究受到关注. Espinosa-Paredes等^[12]通过一维时变气液两相流平均体积模型考察了气泡膨胀条件下空隙率波传播特性. Jin等^[13]计算分析了油水两相流空隙率波不稳定性与流型转化的相关性. Ami等^[14]采用离散气泡模型指出了空隙率波动统计特性与气液两相流流型的对应关系. 迄今, 尚未见从多尺度角度描述两相流空隙率波传播特性的研究报道.

近年来, 复杂动力学系统多尺度非线性分析取得了较大进展, 例如生物脑电系统^[15]、交通流系统^[16]、多相流系统^[17]、电力系统^[18]及其他非线性指标提取^[19-23], 尤其是非稳态时间序列多尺度去趋势互相关分析^[24] (detrended cross-correlation analysis, DCCA) 在分析耦合时间序列多尺度幂律互相关特性方面优势显著. Horvatic等^[25]采用DCCA方法分析了气象资料数据中具有周期

* 国家自然科学基金(批准号: 41504104, 51527805, 11572220)、天津市自然科学基金(批准号: 14JCQNJC04200)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20130032120042)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ndjin@tju.edu.cn

变化趋势的多尺度互相关特征. Zebende^[26]采用 DCCA 方法定量表征气候及股票市场数据的互相关水平. Vassoler 和 Zebende^[27]发现不同地区空气温度与湿度之间存在三种多尺度互相关行为. Zebende 等^[28]建立了非稳态时间序列自相关标度指数与互相关标度指数之间的理论关系. Yuan 和 Fu^[29]指出了不同空间区域温度信息的多尺度互相关模式的重要性. 近年来, DCCA 方法在生物及股票市场分析方面也有新的进展^[30-32].

本文从多尺度互相关特征角度研究了气液两相流空隙率波传播特性中的放大及衰减等不稳定行为. 基于小管径垂直上升气液两相流流动环动态实验, 获得了电导传感器阵列上下游空隙率波动信号. 采用 DCCA 算法提取了气液两相流空隙率波多尺度互相关特征, 发现多尺度分析可有效揭示空隙率波结构的互相关水平, 揭示了空隙率波空间衰减特性与流动结构多尺度互相关性具有较好的物理关联性.

2 典型非线性系统多尺度 DCCA 特性

2.1 去趋势互相关算法

我们曾采用单一时间序列去趋势波动法 (detrended fluctuation analysis, DFA) 分析了气液两相流流型演化特性^[33]. 本文从两个系统特征量的互相关程度揭示两相流系统动力学行为. Podobnik 和 Stanley^[24]去趋势互相关算法如下.

1) 对于长度为 N 的时间序列 x 和 y , 通过预处理操作得到对应的时间序列:

$$R_k = \sum_{i=1}^k x_i, \quad R'_k = \sum_{i=1}^k y_i, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

2) 将时间序列 R_k 和 R'_k 分割为 $N - n$ 个互相重叠的片段, 每个片段数据长度为 $n + 1$. 对于每个从数据点 i 开始到 $i + n$ 结束的片段, 分别定义局部趋势信号 $\tilde{R}_{k,i}$ 及 $\tilde{R}'_{k,i}$ ($i \leq k \leq i + n$), 即每个片段线性拟合后对应的纵坐标.

3) 计算每个片段的协方差:

$$f_{\text{DCCA}}^2(n, i) \equiv \frac{1}{n+1} \sum_{k=i}^{i+n} (R_k - \tilde{R}_{k,i})(R'_k - \tilde{R}'_{k,i}). \quad (2)$$

4) 最后, 对 $N - n$ 个片段协方差求和, 计算去

趋势协方差函数:

$$F_{\text{DCCA}}^2(n) \equiv (N - n)^{-1} \sum_{i=1}^{N-n} f_{\text{DCCA}}^2(n, i). \quad (3)$$

如果两个序列具有互相关性, 则存在幂律关系 $F_{\text{DCCA}}^2(n) \sim n^{2\lambda}$, 其中 λ 为互相关指数, 可以度量长程幂律互相关性. Zebende^[26]提出了量化两个信号的 DCCA 互相关系数:

$$\rho_{\text{DCCA}} \equiv \frac{F_{\text{DCCA}}^2}{F_{\text{DFA}\{x_i\}} F_{\text{DFA}\{y_i\}}}, \quad (4)$$

式中, $F_{\text{DFA}\{x_i\}}$ 和 $F_{\text{DFA}\{y_i\}}$ 分别表示信号 x_i 和 y_i 基于 DFA 的方差函数. DFA 可参考文献^[34]. Zebende^[26]认为 ρ_{DCCA} 在 -1 到 1 之间变化, $\rho_{\text{DCCA}} = 0$ 表明两时间序列不存在互相关性, $0 < \rho_{\text{DCCA}} \leq 1$ 表明两时间序列存在正的互相关特性, 也就意味着一个序列的增大会导致另一个序列的同趋势变化; $-1 \leq \rho_{\text{DCCA}} < 0$ 表明两时间序列存在负的互相关特性.

2.2 ARFIMA 过程长程互相关性分析

为验证 DCCA 方法多尺度互相关特征提取的有效性, 利用稳态线性 ARFIMA (autoregressive fractionally integrated moving average) 过程生成幂律长程自相关时间序列 y_i 和 y'_i (平稳算子阶数 q 和 p 反映序列的短程相关性, 均为 0), 模型公式为^[35]

$$y_i = \sum_{j=1}^{\infty} a_j(d) y_{i-j} + \varepsilon_i, \quad (5)$$

式中, d 为差分阶数 (反映序列的长记忆性特征), ε_i 为白噪声序列, $a_j(d) = \Gamma(j-d)/[\Gamma(-d)\Gamma(1+j)]$ 为权重, Γ 为伽玛函数. 差分阶数 d 分别为 0.2 和 0.4 时, 生成的两个 ARFIMA 过程 y_i 和 y'_i 有相同的误差项, 故两个序列在具有长程自相关特性的同时也具有长程互相关特性, 对应的数据序列如图 1 所示.

两个序列的 DFA 曲线如图 2 所示, 均可利用幂律关系 $F_{\text{DFA}} \sim n^H$ 拟合, 其中 Hurst 指数分别为 $H = 0.71$ 和 $H' = 0.92$, 且 Hurst 指数与自由参数存在以下关系 $H \approx 0.5 + d$. 另外, 发现两个序列的 DCCA 结果去趋势协方差均方根与窗口长度 n 也存在近似幂律关系, 即 $F_{\text{DCCA}} \sim n^\lambda$, 这与 y_i 和 y'_i 具有幂律互相关特性这一事实相符合, λ 为互相关指数, 其大小约为 Hurst 指数的平均值, 可表示为 $\lambda \approx (H + H')/2$.

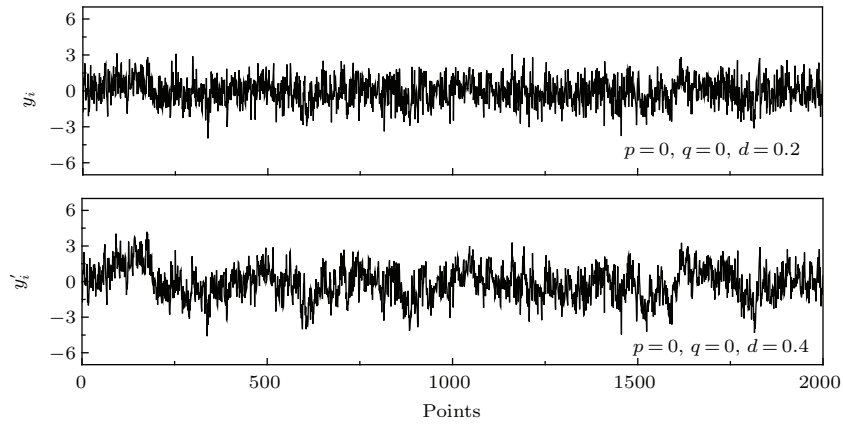


图1 具有长程互相关特性的 ARFIMA 过程

Fig. 1. The ARFIMA processes with long-range cross-correlation characteristics.

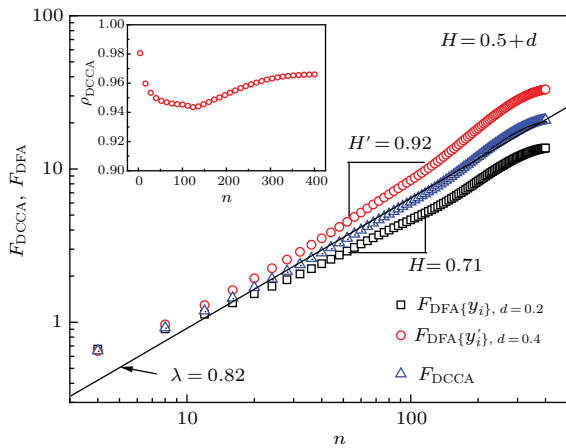


图2 (网刊彩色) 两个互相关 ARFIMA 过程的 DCCA 分析

Fig. 2. (color online) The DCCA results for the two ARFIMA processes with cross-correlation characteristics.

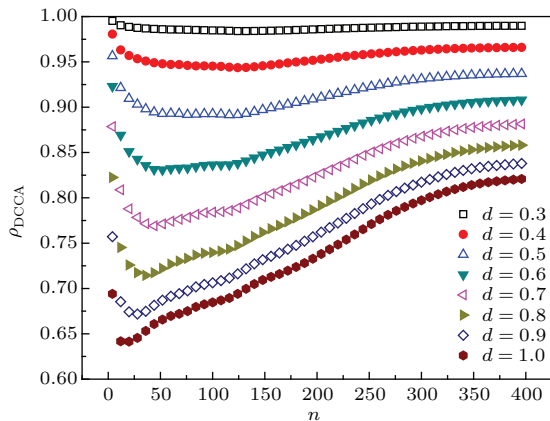


图3 (网刊彩色) 不同 ARFIMA 过程互相关水平与 ARFIMA 过程差分阶数的关系

Fig. 3. (color online) The relationship between the cross-correlation level and the differencing order of the ARFIMA process.

保持同样的误差项, 差分阶数 d 分别取不同值, 生成与 $y_i(d = 0.2)$ 均具有互相关性的 8 对

ARFIMA 过程, 分别考察 y_i 与各序列的 $F_{DCCA}^2 \sim n^{2\lambda}$ 关系, 发现每对 ARFIMA 过程均具有幂律自相关和互相关特性. 利用 (4) 式计算差分阶数 d 对序列互相关水平的影响, 结果如图 3 所示. 可见, 当差分阶数 d 接近 0.2 时, 序列间的互相关水平较高; 随着差分阶数 d 的增大, 互相关水平逐渐降低, 规律清晰且层次分明. 表明 DCCA 方法在考察具有耦合关系的序列相关性方面优势明显.

3 气液两相流上下游空隙率波动信号获取

垂直上升气液两相流动态实验在内径为 20 mm 的细管内进行. 测试管段内安装的传感器包括上下游环形电导探针阵列及微型双头电导探针阵列. 上下游环形电导探针阵列用于气液两相流空隙率波动信号测量; 微型双头电导探针阵列用于测量管内流体微观流动结构, 其测量原理参见文献 [36]. 上下游环形电导探针阵列结构及测量系统如图 4 所示, 上下游探针轴向距离为 6 cm, 探针由激励电极和测量电极构成, 激励电极 E_1 和 E_2 均与 20 kHz 正弦电压激励信号相连, 正弦电压信号作为载波信号被流体空隙率信息所调制, 两个测量电极 M_1 和 M_2 接参考地. 参考电阻及电极间电压信号经差分放大后, 依次进行相敏解调、低通滤波、放大、调零处理, 输出表征气液两相流上下游瞬时空隙率的测量电压信号 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 及参考电压信号 $V_{1,ref}$ 和 $V_{2,ref}$. 微型双头电导探针的测量电路可参考文献 [37].

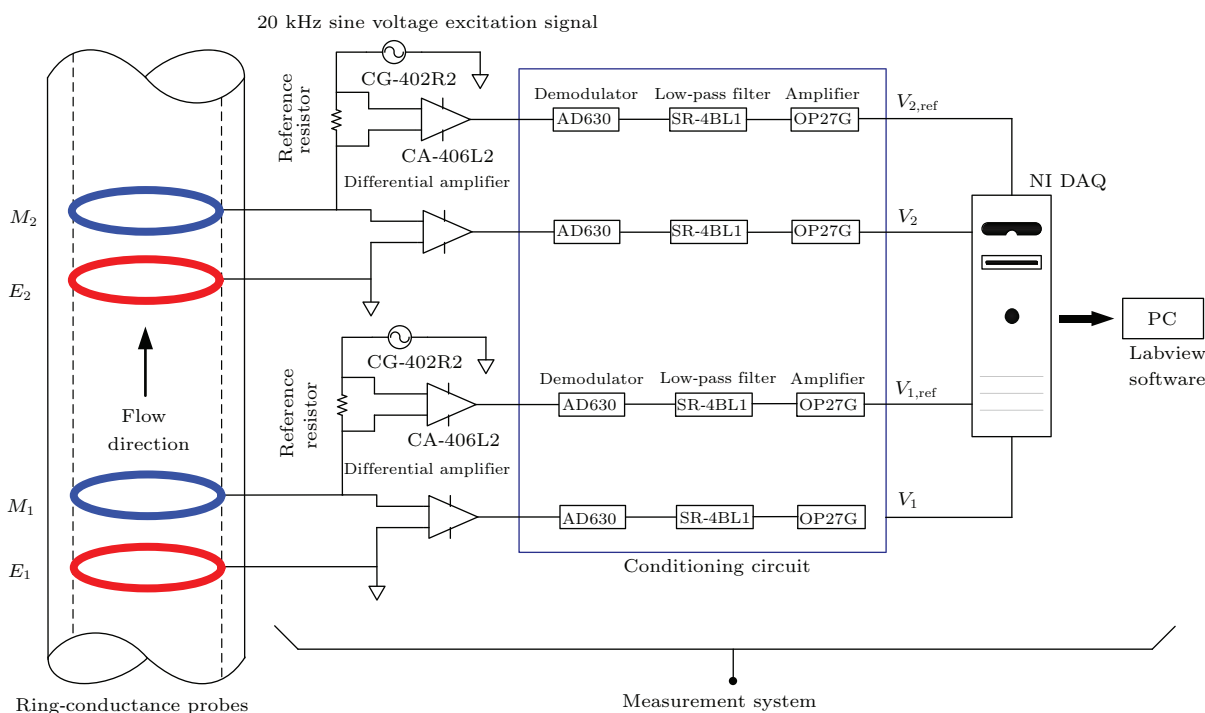


图4 (网刊彩色) 气液两相流上下游电导传感器阵列及其测量系统示意图

Fig. 4. (color online) The upstream and downstream conductance sensors and the measuring system for gas-liquid two-phase flows.

上下游环形电导探针阵列的响应信号利用NI公司数据采集卡PXI4472的Ch0—Ch4采集,采集过程中设置DC和AC两种耦合方式;微型双头电导探针响应信号利用数据采集卡PXI6221的Ch0—Ch5采集.各传感器的数据采集频率均为2 kHz,采样时间均为30 s.上位机设计采用Labview 7.1软件完成,可实现数据采集硬件配置、数据显示及存储等功能.

实验时,水泵泵入的自来水与空压机泵出的空气在混合器充分混合,再流入垂直管道入口,经一定长度垂直管段使其流型充分发展,混合液流过测试管段,之后自来水回流至储水罐内,空气逸散于大气中,如此循环往复.水相的流速由雷弗YZ35型蠕动泵控制,该型号蠕动泵参考流量为100—13000 mL/min.气相由空气压缩机产生并由浮子流量计控制其流量.实验方案为固定气相入口速度,逐步增大水相入口速度.当完成一组气液配比后,采集各传感器输出的测量电压信号,然后改变气相速度,仍旧依照上述步骤进行.实验中,管道内出现泡状流、段塞流、混状流及其过渡流型,各条件下流型结构可根据微型双电导探针信号判定.

典型流动条件下的上下游环形电导传感器阵列的交流电压信号如图5所示,其中 U_{sg} 和 U_{sw} 分别表示气相和水相的入口表观速度(单位: m/s).

从图5可以看出:由于泡状流以分散气泡的随机运动为主要特征,气泡的随机运动使得激励电极上的正弦电压信号的调制过程也表现出随机特性,同时,由于气泡尺寸明显小于传感器电极的尺寸,气泡对正弦电压信号的调制强度较低,因此,上下游传感器对泡状流的响应呈现出较低波动范围的随机跳动;然而,段塞流中气塞和液塞均具有较大几何尺度,且两者的交替出现呈现较好的周期性,因此,传感器响应表现出拟周期性,同时由于液塞中存在少量分散液滴,使测量信号在低尺度范围有一定程度的波动;段塞流-泡状流过渡流型是泡状流和段塞流的中间过渡形态,同时具有随机运动特征和逆周期特征;混状流的最突出特征为气塞和液塞的上下振荡特性,气塞被击碎为较小尺度的气块,这就导致上下游环形电导探针输出响应的相互跟随规律变差;段塞流-混状流过渡流型同时具有段塞流和混状流的运动特征,其运动的拟周期特征比段塞流差,也在一定程度上具有上下振荡特性.

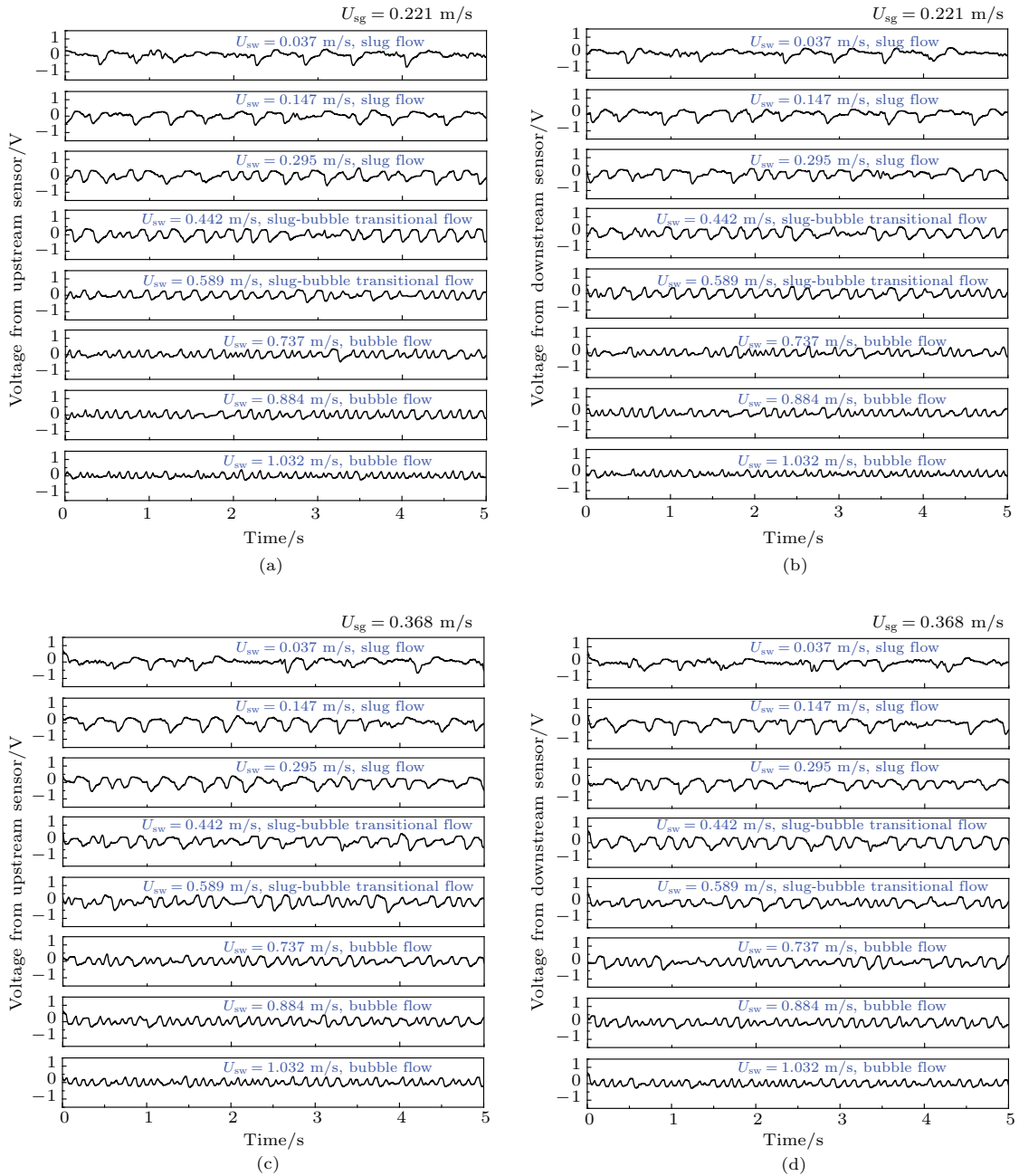


图5 典型气液两相流型上下游电导传感器空隙率波动信号 (a) $U_{sg} = 0.221$ m/s, 上游传感器信号; (b) $U_{sg} = 0.221$ m/s, 下游传感器信号; (c) $U_{sg} = 0.368$ m/s, 上游传感器信号; (d) $U_{sg} = 0.368$ m/s, 下游传感器信号

Fig. 5. The void fraction fluctuation signals from upstream and downstream conductance sensors under typical flow conditions of gas-liquid two-phase flows: (a) $U_{sg} = 0.221$ m/s, signals from upstream sensor; (b) $U_{sg} = 0.221$ m/s, signals from downstream sensor; (c) $U_{sg} = 0.368$ m/s, signals from upstream sensor; (d) $U_{sg} = 0.368$ m/s, signals from downstream sensor.

4 气液两相流空隙率波的多尺度互相关特性

为定量表征气液两相流空隙率波的多尺度结构互相关性水平, 计算了典型条件下的同时采集的上下游电导信号的DCCA互相关系数, 结果如

图6所示.

从图6(a)可以看出, 互相关系数 ρ_{DCCA} 随尺度 n 的增加呈现增大趋势并逐渐趋于平稳, 因为时间尺度 n 与空隙率波结构尺度对应, 说明不同气液两相流流动状态下, 上下游空隙率波动信号的互相关水平明显依赖于流体微观和宏观结构. 对于段塞流而言, 低尺度下空隙率波的互相关水平较低, 且

随着水相流量的增加, ρ_{DCCA} 呈现逐渐升高的演化特性. 这是因为段塞流以大尺度气塞和液塞的交替运动为主要特征, 空隙率波的大尺度结构特征明显, 导致空隙率波的小尺度成分互相关水平偏低; 然而, 随着水相流量的增加, 气塞结构尺度逐渐降低, 空隙率波的低尺度结构互相关水平呈增大趋势. 另外, 随尺度 n 的增加, ρ_{DCCA} 逐渐稳定时转折点对应的尺度 n 也受水相流量的影响, 一般情况下, 较大的水相流量对应较低的转折点尺度. 在高尺度下, ρ_{DCCA} 与 n 的关系趋于高值稳定状态, 这与段塞流空隙率波的大尺度流体结构的稳定运动状态相对应. 对于泡状流而言, 低尺度下空隙率波结构的互相关水平较高, 说明泡状流中小尺度流体结构的运动特征占优, 同时, 随水相流量的增加

ρ_{DCCA} 取得峰值的尺度位置向左偏移, 这与越高水相流量下泡状流中气泡尺寸越小这一事实对应.

图 6(b)—(d) 给出了其他三个气相流量下, 空隙率波 ρ_{DCCA} 随水相流量以及尺度 n 增加时的变化规律. 可见, 此时段塞流和泡状流的空隙率波互相关性水平演化规律与图 6(a) 较为一致. 对于段塞流-泡状流过渡流型, 因为流体的运动结构处于流型过渡状态, 空隙率波的 ρ_{DCCA} 与 n 关系呈现介于两种流型之间的某种状态. 对于混状流而言, 随着水相流量的增加, 低尺度下互相关水平表现出逐渐增加的演化特性, 这说明此时气相由段塞状逐渐被击碎为气块的过程中, 流体流动微观尺度结构特征逐渐明显; 高尺度下, 空隙率波 ρ_{DCCA} 趋于平稳, 且受水相流量影响较小.

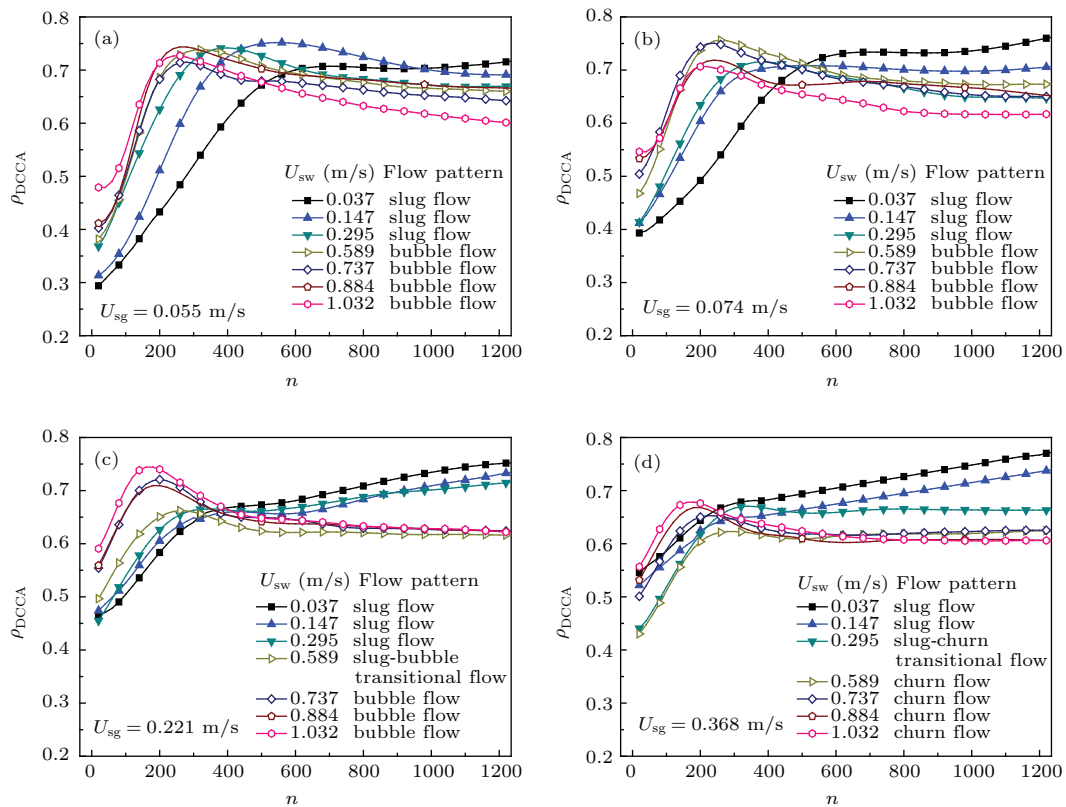


图 6 (网刊彩色) 气液两相流空隙率波多尺度互相关特性

Fig. 6. (color online) The multi-scale cross-correlation characteristics of the void fraction wave in gas-liquid two-phase flows.

值得指出的是, 当气相流量较大时, 段塞流空隙率波的互相关水平随尺度增加呈现明显不同的变化规律, 见图 6(c) 及图 6(d). 为解释这种现象, 图 7 给出典型段塞流流动条件下微型电导探针信号的波动情况. 发现当水相流量固定时, 随着气相

流量的增加, 段塞流型中的气塞长度会增加, 同时由于流体湍动增强, 液塞中分散气泡数目也增多, 从而导致在较大气相流量下, 段塞流空隙率波的低尺度及高尺度互相关水平都明显增大, 高度尺度互相关水平值一般高于 0.7.

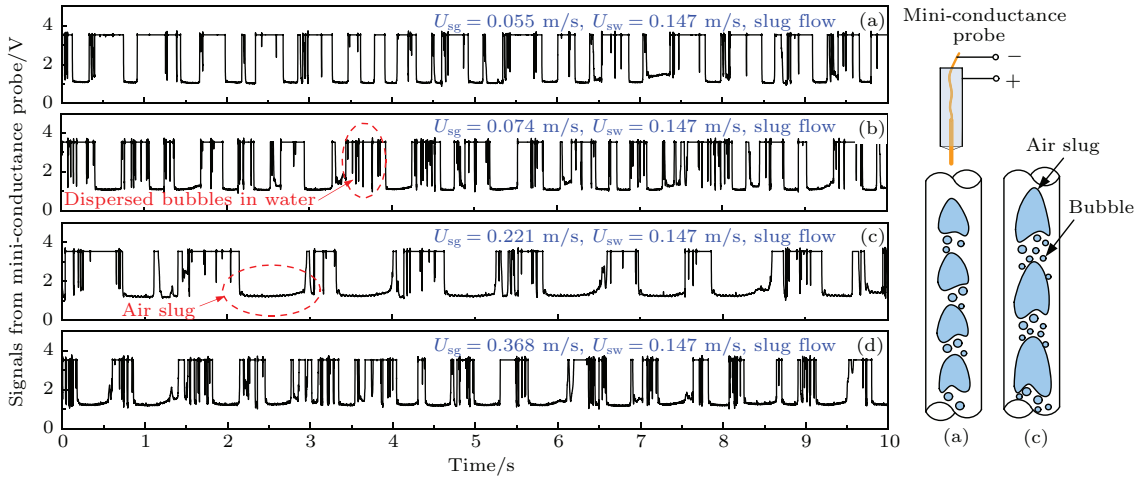


图7 (网刊彩色) 气液两相流段塞流型电导探针测量信号, 其中, 信号中的低电平表示微型电导探针与不导电气相接触, 高电平表示微型电导探针与导电水相接触; 较大持续时间的低电平代表探针位置有气塞(或大气泡)出现, 较小持续时间的低电平脉冲代表探针位置出现小尺度的气泡

Fig. 7. (color online) The signals from the mini-conductance probe in gas-liquid two-phase flows. The low and high voltage levels in the signals represent the appearance of the nonconductive gas phase and the conductive water phase, respectively. The long duration of the low voltage level represents the touching of the probe with the gas slug or large gas bubble, whilst the short duration of the low voltage represents the touching of the probe with the small gas bubbles.

5 气液两相流空隙率波的结构不稳定性

5.1 稳态空隙率波的空间衰减因子

气液两相流环形电导探针阵列的测量直流电压信号为 $V(t)$, 对其进行归一化处理可得表征空隙率瞬时变化的空隙率信号 $\alpha(t)$, 归一化公式可表示为

$$\alpha(t) = \frac{V(t) - V_w}{V_g - V_w}, \quad (6)$$

其中 V_w 和 V_g 分别表示全水和全气条件下的环形电导探针测量电压信号平均值。

测试管段上游位置的空隙信号 $\alpha_1(t)$ 被分解为平均值 $\bar{\alpha}_1$ 和波动成分 $\hat{\alpha}_1(t)$, 可以表示为

$$\alpha_1(t) = \bar{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_1(t). \quad (7)$$

计算空隙率信号中波动部分的自相关函数, 然后利用快速傅里叶变换技术得到自相关谱密度函数 $G_{11}(f)$. 对上下游环形电导探针的空隙率信号波动部分进行互相关运算, 然后对互相关函数进行傅里叶变换, 可得互功率谱密度函数 $G_{12}(f)$.

定义传递函数为

$$T_{12}(f) = G_{12}(f)/G_{11}(f), \quad (8)$$

该传递函数的幅值 $|T_{12}(f)|$ 与空隙率波传播衰减特性具有紧密关系, 空隙率波在传播过程中在空间上的衰减程度由其大小来衡量. 另外, 上游传感器测得空隙率信号的波动成分可表示为

$$\hat{\alpha}_1 \sim \exp[i(k - 2\pi f)], \quad (9)$$

式中, f 为频率; k 为复波数, 由实部 k_R 和虚部 k_i 组成, 虚部 k_i 可表示为

$$k_i(f) = \frac{-\ln |T_{12}(f)|}{L}, \quad (10)$$

其中 L 表示上下游环形电导探针的轴向间距. 空隙率波的空间衰减因子 (spatial attenuation factor, SAF) 定义为频域内的 $k_i(f)$ 的最小值^[6]. SAF 的大小表明空隙率波被放大或衰减的程度, 根据 (10) 式可知如果 SAF 取正值, 表明空隙率波衰减; 如果 SAF 取负值, 表明空隙率波放大; 如果 SAF 等于零, 表明空隙率波处于稳定的传播状态。

5.2 稳态空隙率波的结构不稳定性

图8给出了垂直上升气液两相流不同流动条件下, 稳态空隙率波的 SAF 随空隙率的变化关系. 当气相流量较小 (U_{sg} 小于 0.368 m/s) 时, 如图8(a)和图8(b)所示, 垂直管内气液两相流流型包括段塞流、泡状流以及段塞流-泡状流过渡流型. 此时, 随着水相流量增加 (空隙率减小), 不同气相流量下

的SAF呈现相似的变化趋势. 当空隙率比较大时, 两相流的流型为段塞流, SAF为负并且有一定程度的波动, 表明传播过程中空隙率波放大; 随着水相流量的增大, 即空隙率减小时, 段塞流中的大气塞受到液相的冲击而被破坏, 气体开始以气泡的形式分散在液相中, 流型开始由段塞流向泡状流转化, SAF在某一个空隙率附近急剧变大, 当SAF接近零时, 气泡群逐渐形成; 随着水相流量增大且超过临界值, 气泡群很快变为分散在液体中的离散的气泡, 此时SAF变为正值, 此时空隙率波由放大状态变为衰减状态. 这一趋势与 Song 等 [6] 的研究结果类似.

当气相流量较大 (U_{sg} 大于 0.368 m/s) 时, 如图 8(c) 所示, 气液两相流流型为段塞流、混状流以及段塞流-混状流过渡流型, 此时, SAF 随空隙率的变化趋势与气相小时略有不同, 这主要是由流型结构差异性导致的. 当流型为段塞流时, SAF 随水量的增大而逐渐递减, 表明段塞流的放大特性逐渐增强; 随着水相流量继续增大, 在某一个空隙率附近, SAF 开始增加, 此时流型正由段塞流向混状流转化, 空隙率波放大程度开始减弱; 当混状流形成之后, SAF 随水量继续增加而波动, 这是由于混状流振荡的特征所导致的, 此时空隙率波仍表现为放大状态, 但放大程度已明显减弱.

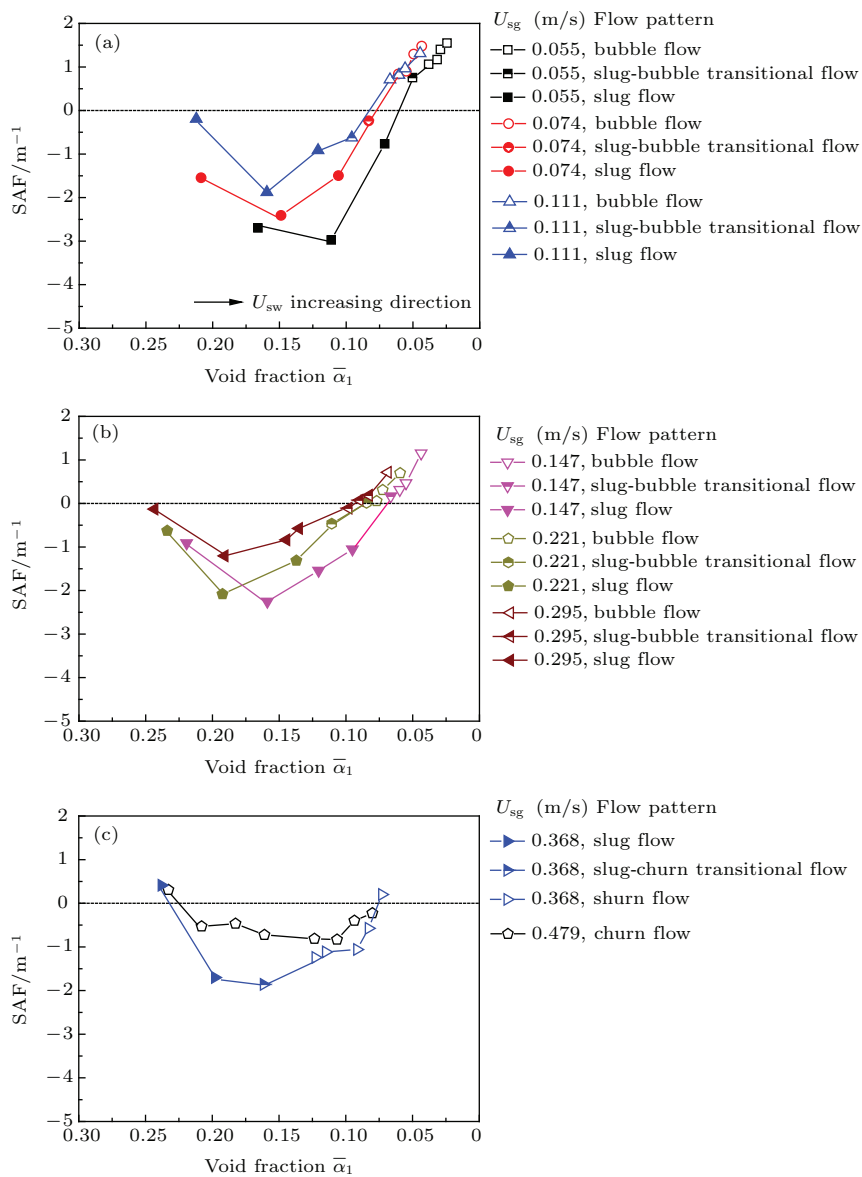


图 8 (网刊彩色) 稳态空隙率波的 SAF 与空隙率的关系

Fig. 8. (color online) The relationship between the void fraction and the SAF of the void fraction wave.

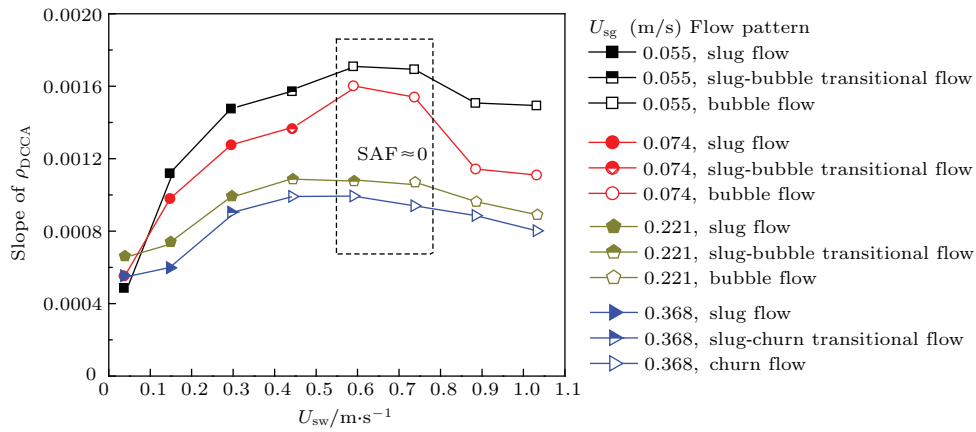


图9 (网刊彩色) 气液两相流空隙率波低尺度互相关水平增长速率

Fig. 9. (color online) The increasing rate of the cross-correlation level of void fraction wave in gas-liquid two-phase flows.

为考察气液两相流空隙率波的结构互相关性
与波传播不稳定性之间的物理关联性, 计算了低尺
度范围内空隙率波的结构互相关水平增长率, 如
图9所示. 可见, 空隙率波的结构互相关水平增长
速度随水相流量的增大呈“先增后减”的变化规律,
与SAF的变化规律具有较好的对应性: 当空隙率
波SAF接近0时, 气液两相流型一般表现为过渡
流型, 此时空隙率波在传播过程中既不放大也不缩
小, 相应地, 空隙率波的结构互相关水平增长速
度最高, 反映此时空隙率波较为稳定的传播特性;
当空隙率波SAF为正值, 且随水相流量增加逐渐
增大时, 泡状流空隙率波的衰减程度逐渐增强,
此时空隙率波的结构互相关水平增长速度逐渐降
低; 相反地, 当空隙率波的SAF为负, 且随水相
流量增加逐渐增加时, 段塞流空隙率波的放大程
度逐渐减弱, 此时空隙率波的结构互相关水平增
长速度呈现逐渐增加的趋势.

6 结 论

本文利用DCCA方法考察了耦合ARFIMA过
程的多尺度互相关特性, 发现DCCA方法可从不同
时间尺度揭示非线性系统的互相关特性, 且可
有效指示系统不同耦合程度下的多尺度互相关
水平.

利用电导传感器上下游空隙率波动信号计
算了空隙率波的SAF, 考察了气液两相流稳态
空隙率波的传播特性, 泡状流及段塞流的空隙
率波分别表现出衰减和放大特性, 并且波的衰
减和放大规律明显依赖于流型的发展模式. 通
过DCCA方法提取低尺度空隙率波的结构互相
关水平增长率, 发现空

隙率波的结构互相关水平增长速度与波传播的
不稳定性具有较好的一致性. 当空隙率波表现
为稳定传播状态时, 空隙率波的结构互相关水
平增长速度较高. 相反地, 当空隙率波在传播
过程中呈现较强的衰减或放大特性时, 空隙率
波的结构互相关水平增长速度往往较低.

参考文献

- [1] Liu L, Zhou F D, Li H X 1998 *Adv. Mech.* **28** 227 (in Chinese) [刘磊, 周芳德, 李会雄 1998 力学进展 **28** 227]
- [2] Huang F, Zhang X M, Guo L J 2005 *Prog. Nat. Sci.* **15** 459 (in Chinese) [黄飞, 张西民, 郭烈锦 2005 自然科学进展 **15** 459]
- [3] Bai B F, Huang F, Guo L J, Wang X Y 2005 *Nucl. Power Eng.* **26** 323 (in Chinese) [白博峰, 黄飞, 郭烈锦, 王先元 2005 核动力工程 **26** 323]
- [4] Boure J A, Mercadier Y 1982 *Appl. Sci. Res.* **38** 297
- [5] Matuszkiewicz A, Flamand J C, Boure J A 1987 *Int. J. Multiphase Flow* **13** 199
- [6] Song C H, No H C, Chung M K 1995 *Int. J. Multiphase Flow* **21** 381
- [7] Kytömaa H K, Brennen C E 1991 *Int. J. Multiphase Flow* **17** 13
- [8] Lucas G P, Walton I C 1997 *Flow Meas. Instrum.* **8** 133
- [9] Lucas G P, Jin N D 2001 *Meas. Sci. Technol.* **12** 1529
- [10] Sun B J, Yan D C 2000 *Acta Sci. Nat. Univ. Pekinensis* **36** 381 (in Chinese) [孙宝江, 颜大椿 2000 北京大学学报 (自然科学版) **36** 381]
- [11] Sun B J, Wang R H, Zhao X X, Gao Y H 2004 *J. Hydrodyn.* **19** 246 (in Chinese) [孙宝江, 王瑞和, 赵欣欣, 高永海 2004 水动力学研究与进展 **19** 246]
- [12] Espinosa-Paredes G, Cazarez-Candia O, Garcia-Gutierrez A 2002 *Ann. Nucl. Energy* **29** 1261
- [13] Jin N D, Nie X B, Wang J, Ren Y Y 2003 *Flow Meas. Instrum.* **14** 177

- [14] Ami T, Umekawa H, Ozawa M, Shoji M 2009 *Int. J. Heat Mass Transfer* **52** 5682
- [15] Yao W P, Liu T B, Dai J F, Wang J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 078704 (in Chinese) [姚文坡, 刘铁兵, 戴加飞, 王俊 2014 物理学报 **63** 078704]
- [16] Xiang Z T, Chen Y F, Li Y J, Xiong L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 038903 (in Chinese) [向郑涛, 陈宇峰, 李昱瑾, 熊励 2014 物理学报 **63** 038903]
- [17] Dou F X, Jin N D, Fan C L, Gao Z K, Sun B 2014 *Chin. Phys. B* **23** 120502
- [18] Gou J, Liu J Y, Wei Z B, Taylor G, Liu Y B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 208402 (in Chinese) [苟竞, 刘俊勇, 魏震波, Taylor G, 刘友波 2014 物理学报 **63** 208402]
- [19] Hao Q Y, Jin N D, Han Y F, Gao Z K, Zhai L S 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 120501
- [20] Zhang M N, Li Z H, Chen X Y, Liu C X, Teng S Y, Cheng C F 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 044210
- [21] Jiang N, Zhang J 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1968
- [22] Han J, Jiang N 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1731
- [23] Zheng X B, Jiang N 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064702
- [24] Podobnik B, Stanley H E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 084102
- [25] Horvatic D, Stanley H E, Podobnik B 2011 *Europhys. Lett.* **94** 18007
- [26] Zebende G F 2011 *Physica A* **390** 614
- [27] Vassoler R T, Zebende G F 2012 *Physica A* **391** 2438
- [28] Zebende G F, da Silva M F, Filho A M 2013 *Physica A* **392** 1756
- [29] Yuan N M, Fu Z 2014 *Physica A* **400** 71
- [30] Cao G X, Han Y, Chen Y M, Yang C X 2014 *Mod. Phys. Lett. B* **28** 1450090
- [31] de Silva M F, Pereira E J D A L, Filho A M D S, de Castro A P N, Miranda J G V, Zebende G F 2015 *Physica A* **424** 124
- [32] Hajipour Sardouie S, Shamsollahi M B, Albera L, Merlet I 2015 *IRBM* **36** 20
- [33] Zhai L S, Jin N D, Gao Z K, Chen P, Chi H 2011 *MAPAN-J. Metrol. Soc. I.* **26** 255
- [34] Peng C K, Havlin S, Stanley H E, Goldberger A L 1995 *Chaos* **5** 82
- [35] Hosking J 1981 *Biometrika* **68** 165
- [36] Zhai L S, Jin N D, Zong Y B, Wang Z Y, Gu M 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 025304
- [37] Lucas G P, Mishra R 2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 749

Multi-scale cross-correlation characteristics of void fraction wave propagation for gas-liquid two-phase flows in small diameter pipe^{*}

Zhai Lu-Sheng Jin Ning-De[†]

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

(Received 18 August 2015; revised manuscript received 11 October 2015)

Abstract

The void fraction wave is a special physical phenomenon in a gas-liquid two-phase flow system. Understanding the propagation of the void fraction wave is of great significance for uncovering the physical mechanisms in both flow pattern transition and the fluid velocity measurement. In this study, detrended cross-correlation analysis (DCCA) is used to investigate the multi-scale cross-correlation characteristics of the coupled ARFIMA processes. It is found that the DCCA can effectively reveal the multi-scale cross-correlation dynamical behaviors of complex system. Then, we carry out the experimental test in a vertical gas-liquid two-phase flow pipe with small inner diameter. The DCCA is used to detect the cross-correlation characteristics of the void fraction wave on multiple time scales, and the growth rate of the cross-correlation level for the void fraction wave is observed on low time scales. Additionally, the spatial attenuation factor (SAF) of the void fraction wave is calculated to investigate the instability of the wave propagation. The SAF is close to zero under the transitional flow patterns, which means that the void fraction wave is in a stable propagating state. For bubble flows, the void fraction wave presents the attenuation characteristics, whilst the void fraction wave shows the amplification characteristics under the slug and churn flow patterns. Interestingly, the instability behaviors of the void fraction wave are always associated with its multi-scale cross-correlation characteristics. Specifically, the increasing rate of the wave cross-correlation level on low scales is much higher for transitional flow patterns, which is corresponding to the stable propagating characteristic of the void fraction wave. However, when the void fraction wave exhibits attenuation or amplification characteristics under other flow patterns, the increasing rate of the wave cross-correlation level on low scales is much lower.

Keywords: gas-liquid two-phase flow, void fraction wave, multi-scale cross-correlation level, instability of void fraction wave

PACS: 05.45.Tp, 47.61.Jd, 89.75.Da

DOI: 10.7498/aps.65.010501

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41504104, 51527805, 11572220), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 14JCQNJC04200), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20130032120042).

[†] Corresponding author. E-mail: ndjin@tju.edu.cn