

多元时间序列复杂网络流型动力学分析*

高忠科 金宁德[†] 杨丹 翟路生 杜萌

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2012年1月11日收到; 2012年2月22日收到修改稿)

针对气液两相流流动特性, 利用有限元分析方法设计变曲率对壁式电导传感器. 采用设计加工的传感器在多相流装置上进行气液两相流动态实验, 并测得多组对应于不同流型的电导波动信号. 基于测量数据, 采用多元时间序列复杂网络构建算法构建对应于不同流型的复杂网络. 在此基础上, 对网络的社团特性进行了分析, 研究发现, 不同的社团结构对应于不同的流型, 而社团内部网络特征可有效刻画不同流型内在动力学特性. 多元时间序列复杂网络分析可为两相流流型演化动力学特性研究及流型识别提供新理论、开拓新途径.

关键词: 气液两相流, 复杂网络, 社团结构, 流体动力学

PACS: 05.45.Tp, 47.55.Ca, 89.75.Fb, 47.61.Jd

1 引言

气液两相流广泛存在于石油、化工及核反应堆等工业领域. 在两相流动过程中, 由于相界面的形状和分布随着时间和空间的改变而变化, 且相间存在不可忽略的相对速度, 导致相界面呈现出不同的几何形状或流动结构, 称之为两相流流型. 流型不仅影响混合流体的流动特性和传热传质性能, 而且是两相流控制与预测系统的重要参数. 因此, 准确识别气液两相流流型并理解其内在流动特性对两相流工业系统优化设计及工况动态监测具有重要实际意义. 由于气液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间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(多态性), 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. 两相流系统是具有混沌、耗散、有序与无序等复杂特征的非线性动力学复杂系统^[1-3], 用传统的科学观念和方法研究复杂的多相流动问题仍存在较大局限性, 需要从全新理论产

生及信息处理技术不断完善的角度去认识多相流动现象, 为研究复杂混相流体流动结构及流动特性提供了一些新的理论工具.

复杂网络理论兴起于 20 世纪 90 年代, 它是对复杂系统的一种抽象和描述方式, 所谓网络就是由节点和连边组成, 这里节点和连边都是广义的, 其中节点表示系统的元素, 两节点的连边表示元素之间的相互作用. Watts 和 Strogatz 提出的小世界网络^[4]说明少量的随机连接会对网络拓扑结构产生重大影响, 而 Barabási 和 Albert 提出的无标度网络^[5]则揭示了增长和择优机理在复杂系统自组织演化过程中的普遍性. 在此开创性工作之后, 复杂网络理论已成功应用于许多复杂系统, 并在相应领域取得了很大进展. 近年来, 基于时间序列测量信号的复杂网络动力学研究受到了不同领域研究人员的广泛关注^[6-18], 不同的时间序列复杂网络构建与分析算法相继提出^[19-26]并已成功应用于不同的复杂动力学系统研究之中^[27-41]. 本课题组前期针对内径为 125 mm 的大管径两相流流动特性, 提出了不同类型的两相流复杂网络, 并将其应用于两相流流型内在非线性动力学特性研究之

* 国家自然科学基金(批准号: 61104148, 50974095, 41174109), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20110032120088)和国家科技重大专项(批准号: 2011ZX05020-006)资助的课题.

[†] E-mail: ndjin@tju.edu.cn

中 [3,38-41]. 研究表明, 作为一个全新而又有效的工具, 复杂网络不仅可以挖掘包含在时间序列中的重要信息, 同时也可用于研究理论模型难以精确描述的复杂非线性动力学系统.

与本课题组前期大管径两相流研究相比 [3,38], 本文采用多元时间序列复杂网络构建方法研究两相流流型社团特性, 并试图揭示不同流型内在流体动力学特性. 特别指出的是, 我们前期提出的流型社团网络是采用延迟重构法提取单一时间序列多个特征量, 其中阈值选取采用模块度稳定性准则, 尤其在大规模时间序列网络构建计算中其算法复杂度较大; 而本文多元时间序列网络构建中则采用了错误发现率 (false detective rate, FDR) 方法确定网络连接阈值, 即将网络中错误连边的概率控制在 $q = 0.05$ 以下确定阈值. 本文采用的分析算法具有较小算法复杂度, 且其在网络连接阈值选取上具有更高的精确性, 结果表明: 在气液两相流泡状流、段塞流、混状流流型社团特性识别及揭示流动特性方面显现出了更好的表征效果.

2 传感器优化设计与两相流动态实验数据获取

为了有效获取内径为 20 mm 的垂直细管气液两相流流动信息, 本文采用变曲率对壁式电导传感器, 其结构如图 1 所示, 其中, $R = 20\text{ mm}$ 为管道内径, w_E 为检测电极的中心宽度, w_G 为保护电极的中心宽度, D_{is} 为检测电极与保护电极之间的中心间距, T_h 为电极的厚度, θ 为极板张角. 在对壁式电极-激励电极与检测电极之间会形成一个检测静电场, w_E , w_G , D_{is} , T_h 和 θ 这五个待优化参数直接影响到该检测场内的响应灵敏度和灵敏度均匀性分布. 为了获得传感器的最优结构尺寸, 我们基于传感器相对灵敏度和检测场均匀性误差这两个指标利用有限元分析软件 ANSYS 对传感器结构参数进行优化设计, 图 2 为管道内部流体有限元剖分图. 传感器仿真优化的目标是, 在传感器相对灵敏度值尽量大的基础上, 使得均匀性误差达到最小值. 通

过优化设计我们给出变曲率对壁式电导传感器的结构参数, 如表 1 所示. 图 3 为按照优化参数加工的变曲率对壁式电导传感器实物结构图, 其材质为铜, 其中图示电极成对内嵌在测量管道内, 构成一组检测电极 (激励和接收) 和两组保护电极 (激励和接收), 每组电极处于管道径向的同一个截面上, 并且严格对称, 同时与管壁平齐, 无凹凸.

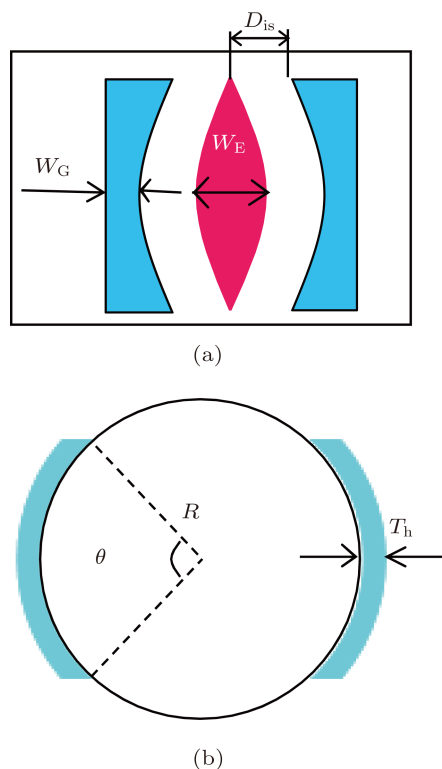


图 1 变曲率对壁式电导传感器结构图 (a) 主视图; (b) 左视图

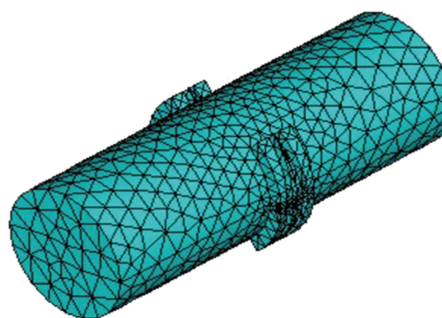


图 2 管道内流体有限元剖分图

表 1 传感器结构参数

极板张角	检测电极中心	保护电极中心	检测电极与保护电	极板厚度
/($^{\circ}$)	宽度 /m	宽度 /m	极中心间距 /m	/m
100	0.002	0.001	0.001	0.002

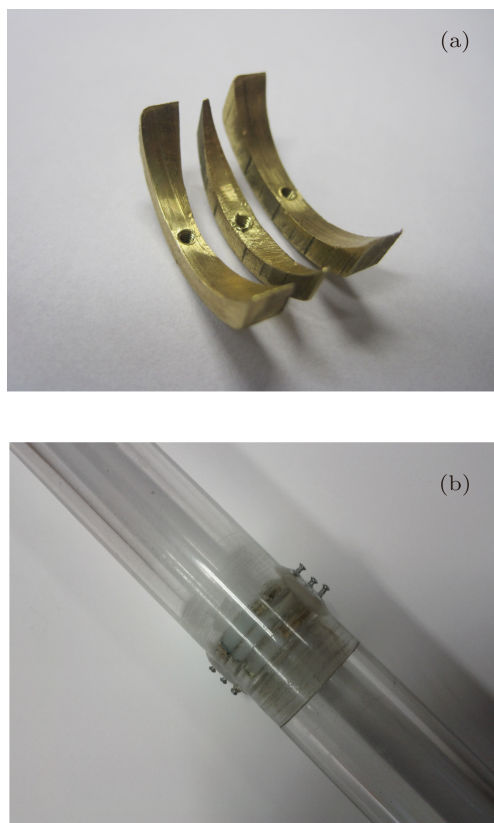


图3 变曲率对壁式电导传感器实物图 (a) 传感器检测电极与保护电极; (b) 传感器实物图

在设计加工变曲率对壁式电导传感器的基础上,我们在 20 mm 管径的树脂管道中进行了垂直气液两相流的动态实验. 动态实验测量系统主要包括信号调理模块、数据采集模块和数据存储模块. 信号调理模块采用自行开发的测量电路模块进行信号调理, 数据采集模块采用美国 NI 公司的 PXI 总线采集设备进行数据采集, 采样频率为 20 kHz. 数据存储模块采用 PC 机, 通过数据采集卡匹配的图形化编程软件 LabVIEW 实现, 可以对数据进行实时的波形显示和实时存储等功能. 传感器安装在测量管段的中间位置, 通过导线引入到测量系统中. 实验方案为: 首先固定一个水相流量, 然后逐渐增加气量, 利用变曲率对壁式电导传感器测量得到每一个工况下的电压波动信号. 改变水相流量, 重复上述过程, 得到一系列对应于泡状流、段塞流和混状流的时间序列测量信号.

实验过程中, 随着工况的改变, 两相流流型也会随之变化. 本次实验一共采集到对应于泡状流、段塞流和混状流三种典型流型的多组实验数据, 其中水相流量变化范围为 0.11—1.07 m/s, 气相阀门开

度的变化范围为 2—20 psi, 水相密度为 1.0 g/cm^{-3} . 在正弦信号的激励下, 气相的变化引起检测电极上的电压信号波动. 图 4 分别表示了三种典型流型的电导波动信号, 图中 U_{sw} 表示水相速度, P_g 表示气体压强. 泡状流中, 随着水相流量与气体阀门开度的变化, 气泡由小气泡逐渐变成大气泡, 随机离散地分布在连续相水中, 气泡形式多为球形或扁球形, 其电导波动信号如图 4(a) 所示, 气泡大小的不同会引起电压信号波动幅值上的差异. 段塞流中, 气泡逐渐增大到接近管道内径, 并且出现液塞与气塞交替出现的现象, 有一定的拟周期特性, 这一特性也可以从电导波动信号上看出, 如图 4(b) 所示, 信号具有明显的拟周期特性. 随着管道中泡群浓度进一步增大, 使得段塞流中的气塞出现破裂, 在连续相水中出现一种极不稳定, 且上下震荡的流型, 即混状流, 如图 4(c) 所示, 信号幅值与段塞流相近, 且都高于泡状流.

3 多元时间序列复杂网络构建算法

基于多元时间序列构建的复杂网络是一个抽象网络, 其以不同工况下测得的时间序列为节点, 时间序列之间的相关性或连接强度决定网络节点间是否连接. 基于 Kramer 等人^[30]提出的网络推理方法, 我们给出两相流多元时间序列构建算法如下:

1) 对于任意两相流时间序列 $x_i[t]$ 和 $x_j[t]$, 数据长度均为 n , 在延迟为 τ 时定义其互相关为

$$C_{ij}[\tau] = \frac{1}{\hat{\sigma}_i \hat{\sigma}_j (n - 2\tau)} \sum_{t=1}^{n-\tau} (x_i[t] - \bar{x}_i) \times (x_j[t + \tau] - \bar{x}_j), \quad (1)$$

其中 \bar{x}_i 和 \bar{x}_j 分别表示时间序列 $x_i[t]$ 和 $x_j[t]$ 的均值, $\hat{\sigma}_i$ 和 $\hat{\sigma}_j$ 分别表示时间序列 $x_i[t]$ 和 $x_j[t]$ 的标准差, 延迟 τ 取决于所取样本数据的大小.

2) 为了使互相关分布更接近于正态分布, 我们对 (1) 式进行 Fisher 变换, 即

$$C_{ij}^F[\tau] = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + C_{ij}[\tau]}{1 - C_{ij}[\tau]}, \quad (2)$$

其中, 当延迟 τ 取一系列值时, 计算得到 (2) 式的最大值, 即 $s_{ij}^F = \max_{\tau} |C_{ij}^F[\tau]|$, 这将会作为接下来检测依据, 即决定任意两个节点之间是否存有连边检测依据.

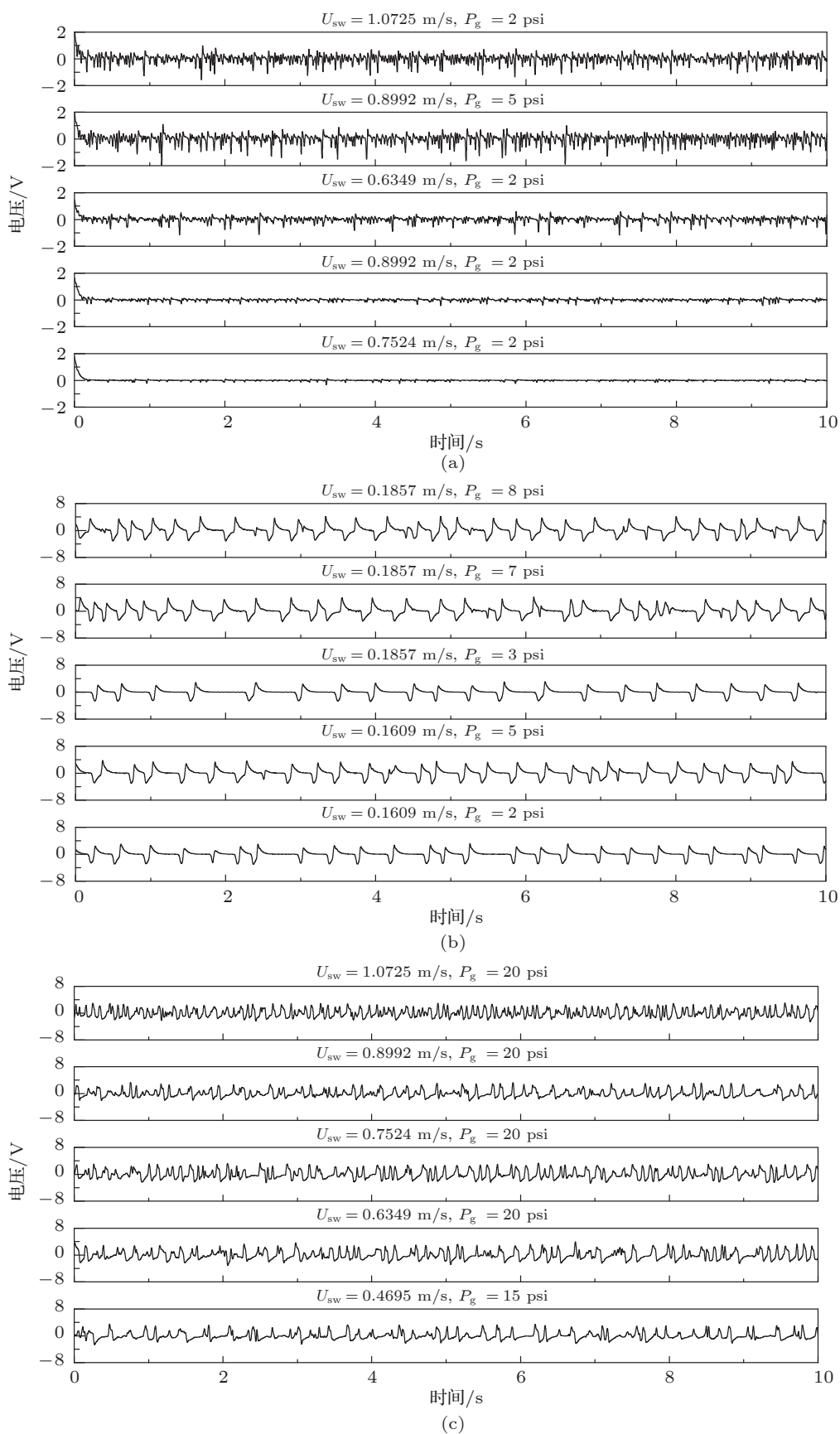


图4 垂直气液两相流电导波动信号 (a) 泡状流; (b) 段塞流; (c) 混状流

3) 对于 (2) 式的结果, 我们计算其偏差估计, 即

$$\widehat{\text{var}}(C_{ij}^F[l]) = \frac{1}{n-l} \sum_{\tau=-n}^n C_{ii}^F[\tau]C_{jj}^F[\tau], \quad (3)$$

其中 $C_{kk}[\tau]$ 为延迟 τ 下时间序列 k 的自相关, l 为对应于 s_{ij}^F 的某一特定 τ 值, 例如 s_{ij}^F 取得最大值时的 τ 值.

4) 基于以上结果, 我们定义 $z_{ij}^F = s_{ij}^F/\widehat{\text{var}}(C_{ij}^F)^{1/2}$, 将其与标准正态分布对比, 期望 z_{ij}^F 的分布为一个标准正态随机的分布, 然后计算对应于每一个 z_{ij}^F 的 p 值.

5) 在已有结果基础上获取 p 值的计算公式为

$$P[z] \approx \exp\{-2 \exp[-a_n(z - b_n)]\}, \quad (4)$$

其中 $P[z] = \Pr\{z_{ij}^F \leq z\}$, $a_n = \sqrt{2 \ln n}$, $b_n = a_n - (2a_n)^{-1}(\ln \ln n + \ln 4\pi)$. 这样我就可以直接得到对应于每一个 z_{ij}^F 的 p 值.

6) 阈值选取. 我们采用错误发现率 (false detection rate, FDR) 方法^[30,42] 控制阈值的选取, FDR 方法控制阈值的原理是将网络中错误连边的概率控制在某一 $q \in (0, 1)$ 值之下 (例如 $q < 0.05$, 即在连边为 100 的网络中错误连边数为 $0.05 \times 100 = 5$), 继而得到阈值. 具体来说, 对于一个网络, 节点为 N , 边为 m , 其中 $m = N(N - 1)/2$, 则通过上述计算会得到 m 个 p 值 ($p_{ij} = p_{ji}$), 将其按照一定顺序排列 (例如由小到大, $p_1 \leq p_2 \leq p_3 \leq \dots \leq p_m$), 给定一个 FDR 控制水平 q , 从头将每一个 p 值与 $q \cdot i/m$ 进行比较, 当满足 $p_c \leq q \cdot c/m$, 且 $p_{c+1} > q \cdot (c + 1)/m$ 时 (c 为满足条件的最大 i 值), p_c 就是要求的阈值.

7) 当确定了阈值之后, 我们就可以按照以下准则得到邻接矩阵 A :

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & (p_{ij} \leq p_c), \\ 0, & (p_{ij} > p_c). \end{cases} \quad (5)$$

当 $p_{ij} \leq p_c$ 时, 节点 i 和节点 j 之间有连边存在, 反之则没有. 所有的节点和连边就构成了多元时间序列复杂网络, 其拓扑结构可以用邻接矩阵来描述.

4 气液两相流多元时间序列复杂网络分析

一般来说, 不同两相流流动工况的体积相含率与流型特征密切相关, 而气相与液相导电特性具有

很大差异的两相流混合液电导信号则是反映其相含率的重要信息源, 本文通过变曲率对壁式电导传感器实验测取的电导波动信号, 并借助复杂网络工具对气液两相流流型非线性动力学特征进行分析. 为了能够从细节上有效揭示两种不同流型的动力学特性差异, 我们采用多元时间序列复杂网络构建算法分别构建了泡状流 - 段塞流复杂网络, 段塞流 - 混状流复杂网络和泡状流 - 混状流复杂网络, 其中每一个多元时间复杂网络中均包含 50 个节点, 网络中不同编号的节点对应着不同气液流量配比工况下测得的时间序列, 其长度为 4000, 亦即代表着不同的气相与液相流量配比混合后形成的气液两相流流动条件. 在网络阈值选取时, 综合考虑 FDR 控制错误发现率及实际流体流速、波动情况等因素, 以 $q = 0.05$ 确定阈值从而构建两相流多元时间序列复杂网络. 在此基础上, 我们基于 Kamada-Kawai 嵌入算法^[43] 通过网络可视化软件 UCINET 和 NETDRAW^[44] 绘制其相应网络拓扑结构图, 并对网络的社团结构进行研究, 以期在实现流型识别的基础上, 进一步揭示流型内在动力学特性.

图 5 为泡状流 - 段塞流多元时间复杂网络拓扑结构图, 可以看出: 泡状流和段塞流多元时间序列复杂网络中存在着节点个数分别为 25 和 25 的两个社团, 记为社团 (a) 和社团 (b), 通过网络中各个节点对应工况下的气液流量配比情况和在相应工况下实验观察对比可知, 社团 (a) 中节点的主要对应于泡状流, 社团 (b) 中节点的主要对应于段塞流. 为进一步揭示不同社团结构的内部差异, 我们分别计算了泡状流社团 (社团 (a)) 和段塞流社团 (社团 (b)) 的平均度值和平均聚集系数 (图 6), 发现段塞流社团的平均度值和平均聚集系数均高于泡状流社团的平均度值和平均聚集系数. 复杂网络的这种内在社团结构本质差异是由流型内部非线性运动特性不同造成的. 泡状流中气体为分散相, 液体为连续相, 气相以不同泡径尺寸方式随机分散在向上流动的液体中, 其动力学行为具有一定的随机特性, 相应其多元时间序列信号间的整体动力学行为表现出随机特性. 随着泡状流中泡群浓度 (流量) 增大到一定程度时, 气泡聚合现象开始发生, 气泡直径逐渐增大到接近于管内径, 发展为气塞与液塞交替流过的段塞流流型, 段塞流动力学特性表现为气塞与液塞交替出现的拟周期运动. 因此, 在多元时间序列复杂网络中段塞流社团结构比泡状流社团

结构表现出更为紧密的聚集性 (即平均度值较高, 平均聚集系数较大), 这一特性与两种流型的物理特性相一致.

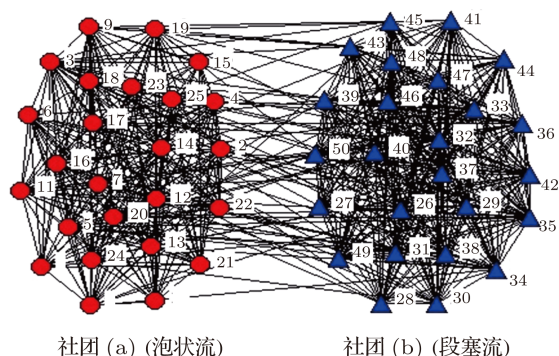


图 5 泡状流及段塞流复杂网络拓扑结构图

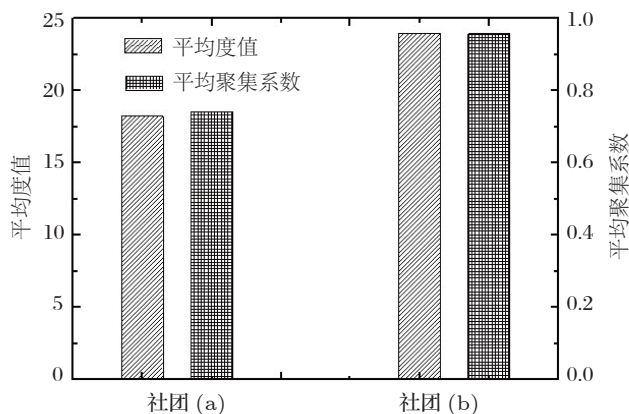


图 6 泡状流及段塞流网络社团平均度值与平均聚集系数分布图

图 7 为段塞流 - 混状流多元时间复杂网络拓扑结构图, 可以看出: 段塞流和混状流多元时间序列复杂网络中也存在着节点个数分别为 25, 25 的两个社团, 记为社团 (b) 和社团 (c), 通过网络中各个节点对应流动工况下的实验观察对比可知, 社团 (b) 中节点的主要对应于段塞流, 社团 (c) 中节点的主要对应于混状流. 通过计算发现段塞流社团的平均度值和平均聚集系数均高于混状流社团的平均度值和平均聚集系数 (图 8). 实际上, 随着段塞流中气相流量增大到一定程度时, 由于流体湍流能量的增大, 足以使段塞流中的大气塞产生破裂, 破裂后的气块在连续相液体中形成一种极不稳定上下振荡的混状流流型, 混状流动力学行为比段塞流更为随机, 相应地在多元时间序列复杂网络中混状流社团结构比段塞流社团结构的聚集性要低 (即平均度值较低, 平均聚集系数较小).

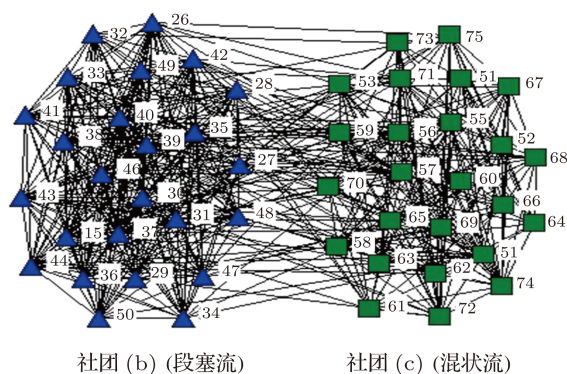


图 7 段塞流及混状流复杂网络拓扑结构图

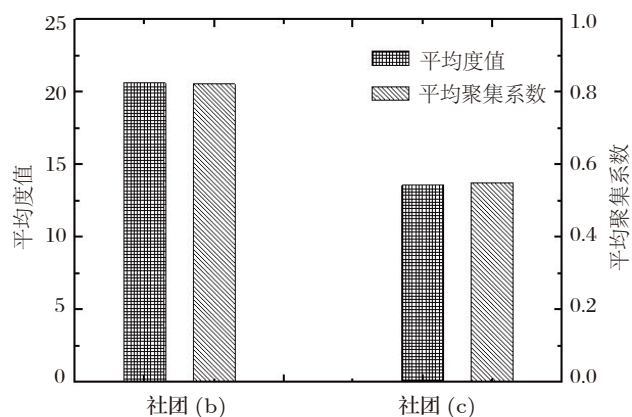


图 8 段塞流及混状流网络社团平均度值与平均聚集系数分布图

图 9 为泡状流 - 混状流多元时间复杂网络拓扑结构图. 由图 9 可以看出, 该网络中同样存在着节点个数分别为 25, 25 的两个社团, 记为社团 (a) 和社团 (c), 通过网络中各个节点对应工况下的气液流量配比情况和在相应工况下实验观察对比可知, 社团 (a) 中节点的主要对应于泡状流, 社团 (c) 中节点的主要对应于混状流. 通过计算发现泡状流社团结构的平均度值和聚集系数虽稍高于混状流社团结构, 但其差异并不大, 说明泡状流随机性稍大于混状流, 其整体具有类似的动力学特性.

此外, 在本课题组先前在大管径 (125 mm 内径) 气液两相流相动力学刻画研究中发现^[45]: 泡状流中泡群运动随机可变, 其动力学行为最为复杂; 随着气相表观速度的增加, 在流型从泡状流逐渐向段塞流转变过程中, 泡群向聚并的趋势发展, 此时泡群随机运动程度减弱, 发展到段塞流后, 气塞与液塞有规律的交替运动使段塞流动力学行为变得相对简单, 即具有拟周期特性; 随着气相表观速度

的进一步增加, 流型从段塞流转变为混状流, 在具有不稳定上下振荡特点的混状流中气泡随机运动程度得到增强, 使得混状流动力学复杂性高于段塞流但又低于泡状流. 结合图 6、图 8 及图 10 观察, 发现多元时间序列复杂网络流型社团统计特性 (平均度值和平均聚集系数) 和气液两相流流型动力学行为复杂性之间有良好的对应关系, 即对于泡状流, 单个气泡的运动轨迹非常复杂, 运动方向随机可变, 尤其是靠近管壁的气泡更加明显, 这就导致了泡状流复杂性很高, 对应着多元时间序列复杂网络泡状流社团 (社团 (a)) 中比较小的平均度值和聚集系数; 段塞流中气塞和液塞有规律的交替变化使得它的动力学特性逐渐变得相对简单, 导致段塞流社团 (社团 (b)) 平均度值和聚集系数变大; 混状流特征是由于流体湍流能量的增大, 液体被气体冲碎形成液块, 受重力作用在整体上升的同时上下翻滚, 导致混状流动力学复杂性高于段塞流但又低于泡状流, 对应流型混状流社团 (社团 (c)) 平均度值和聚集系数均介于泡状流和段塞流之间.

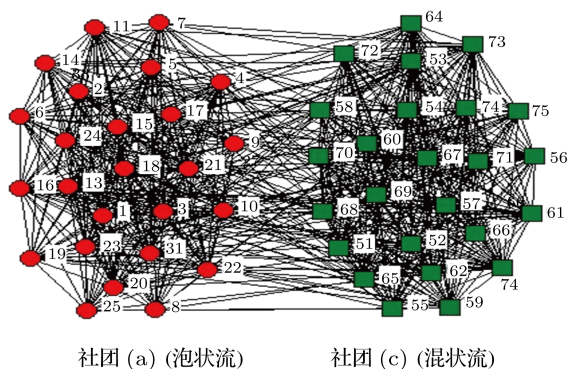


图 9 泡状流及混状流复杂网络拓扑结构图

因此, 通过上述分析可知, 通过研究气液两相流多元时间序列复杂网络社团特性, 找出了不同流型对应的社团结构, 从而实现了气液两相流流型的有效辨识. 两相流多元时间序列复杂网络中, 不

同社团内部聚集程度的差异反映了与流型内在流动状态密切相关的动力学特性, 网络社团的平均度值和平均聚集系数是表征气液两相流流型的敏感特征量, 对这两个参数的分析有助于我们更好地理解气液两相流流型动力学特性.

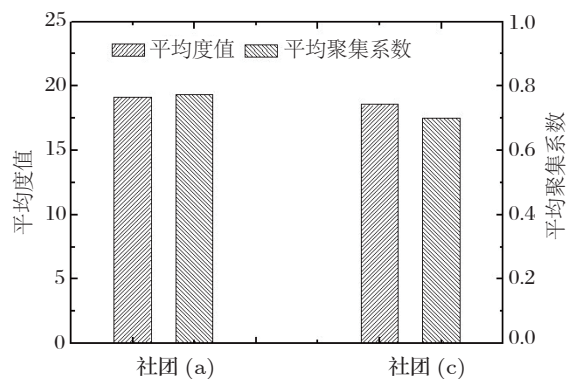


图 10 泡状流及混状流网络社团平均度值与平均聚集系数分布图

5 结论

针对内径为 20 mm 的小管径垂直气液两相流, 本文利用 ANSYS 有限元分析软件优化设计变曲率对壁式电导传感器, 并通过垂直气液两相流动态实验测得了对应于泡状流、段塞流和混状流三种典型流型的多组时间序列测量信号. 在此基础上, 给出了两相流多元时间序列构建算法, 并以不同气液流量配比工况下测得的时间序列为节点, 采用错误发现率 (false detective rate, FDR) 方法确定网络连接阈值, 进而构建两相流多元时间序列复杂网络. 通过分析该网络的社团特性, 发现不同的社团结构对应于不同的流型, 从而有效实现了气液两相流流型辨识, 进一步研究发现社团结构内部网络特征, 即社团的平均度值和平均聚集系数, 可有效刻画不同流型内在动力学特性, 有助于气液两相流流型动力学演化趋势分析, 为更好地理解气液两相流相间相互作用机理及流动特性提供了参考.

[1] Lawkins W F, Daw C S, Downing D J, Jr Clapp N E 1993 *Phys. Rev. E* **47** 2520
 [2] Daw C S, Finney C E A, Vasudevan M, vanGoor N A, Nguyen K, Bruns D D, Kostelich E J, Grebogi C, Ott E, Yorke J A 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 2308

[3] Gao Z K, Jin N D 2009 *Phys. Rev. E* **79** 066303
 [4] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
 [5] Strogatz S H 2001 *Nature* **410** 268
 [6] Albert R, Barabási A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
 [7] Wang W X, Wang B H, Hu B, Yan G, Ou Q 2005 *Phys. Rev. Lett.*

- 94 188702
- [8] Pan Z F, Li X, Wang X F 2006 *Phys. Rev. E* **73** 056109
- [9] Huang L, Park K, Lai Y C, Yang L, Yang K Q 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 164101
- [10] Huang L, Park K, Lai Y C 2006 *Phys. Rev. E* **73** 035103(R)
- [11] Li X G, Gao Z Y, Li K P, Zhao X M 2007 *Phys. Rev. E* **76** 016110
- [12] Pei W D, Chen Z Q, Yuan Z Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 0373
- [13] Zhou J, Lu J A, Lu J H 2008 *Automatica* **44** 996
- [14] Yang R, Wang W X, Lai Y C, Chen G R 2009 *Phys. Rev. E* **79** 026112
- [15] Lu X B, Wang X F, Fang J Q 2010 *Physica D* **239** 341
- [16] Zhou T, Kuscsik Z, Liu J G, Medo M, Wakeling J R, Zhang Y C 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **107** 4511
- [17] Wang W X, Yang R, Lai Y C, Kovanis V, Grebogi C 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 154101
- [18] Liu F, Wang H O, Guan Z H 2012 *Nonlinear Analysis: Real World Applications* **13** 1466
- [19] Zhang J, Small M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 238701
- [20] Zhou C S, Zemanov L, Zamora G, Hilgetag C C, Kurths J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 238103
- [21] Zhang J, Sun J F, Luo S D, Zhang K, Nakamura T, Small M 2008 *Physica D* **237** 2856
- [22] Yang Y, Yang H J 2008 *Physica A* **387** 1381
- [23] Lacasa L, Luque B, Ballesteros F, Luque J, Nuno J C 2008 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105** 4972
- [24] Xu X, Zhang J, Small M 2008 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105** 19601
- [25] Gao Z K, Jin N D 2009 *Chaos* **19** 033137
- [26] Gao Z K, Jin N D 2012 *Nonlinear Analysis: Real World Applications* **13** 947
- [27] Fang X L, Jiang Z L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7330 (in Chinese) [方小玲, 姜宗来 2007 物理学报 **56** 7330]
- [28] Dong Z, Li X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1600 (in Chinese) [董昭, 李翔 2010 物理学报 **59** 1600]
- [29] Zhou L, Gong Z Q, Zhi R, Feng G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7351 [周磊, 龚志强, 支蓉, 封国林 2009 物理学报 **58** 7351]
- [30] Kramer M A, Eden U T, Cash S S, Kolaczyk E D 2009 *Phys. Rev. E* **79** 061916
- [31] Zhang J, Zhang K, Feng J F, Small M 2010 *PLoS Comput. Biol.* **6** e1001033
- [32] Liu C, Zhou W, Yuan W 2010 *Physica A* **389** 2675
- [33] Shao Z G 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 073703
- [34] Donner R V, Heitzig J, Donges J F, Zou Y, Marwan N, Kurths J 2011 *Eur. Phys. J. B* **84** 653
- [35] Xie W J, Zhou W X 2011 *Physica A* **390** 3592
- [36] Gong Z Q, Zhi R, Hou W, Wang X J, Feng G L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 029202 (in Chinese) [龚志强, 支蓉, 侯威, 王晓娟, 封国林 2012 物理学报 **61** 029202]
- [37] Xiang R X, Zhang J, Xu X K, Small M 2012 *Chaos* **22** 013107
- [38] Gao Z K, Jin N D 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5249
- [39] Gao Z K, Jin N D, Wang W X, Lai Y C 2010 *Phys. Rev. E* **82** 016210
- [40] Gao Z K, Jin N D 2011 *Chem. Eng. Sci.* **66** 2660
- [41] Gao Z K, Jin N D 2012 *Physica A* **391** 3005
- [42] Benjamini Y, Yekutieli D 2001 *Ann. Statist.* **29** 1165
- [43] Kamada T, Kawai S 1989 *Inform. Process. Lett.* **31** 7
- [44] Borgatti S P, Everett M G, Freeman L C 2002 *Ucinet for Windows: Software for social network analysis*, Harvard Analytic Technologies
- [45] Gao Z K, Jin N D, Wang W X, Lai Y C 2010 *Phys. Lett. A* **374** 4014

Complex networks from multivariate time series for characterizing nonlinear dynamics of two-phase flow patterns*

Gao Zhong-Ke Jin Ning-De[†] Yang Dan Zhai Lu-Sheng Du Meng

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

(Received 11 January 2012; revised manuscript received 22 February 2012)

Abstract

We use finite element analysis method to optimize and design a new curve half-ring conductance sensor for gas-liquid two-phase flow system. Then we carry out gas-liquid two-phase flow experiment in multiphase flow loop facility, and use the designed sensor to measure multivariate time series corresponding to different flow patterns. According to the measured signals, we construct complex networks from multivariate time series for different flow patterns by a network inference method. Through investigating the community structures of the constructed networks, we find that different communities correspond to different flow patterns and the network statistics in community can be used to effectively characterize the dynamic behavior of different flow patterns. In this regard, our method can be a powerful tool for identifying flow patterns and uncovering the nonlinear dynamics governing the evolution of different flow patterns.

Keywords: gas-liquid two-phase flow, complex network, community structure, fluid dynamics

PACS: 05.45.Tp, 47.55.Ca, 89.75.Fb, 47.61.Jd

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61104148, 50974095, 41174109), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20110032120088), and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011ZX05020-006).

[†] E-mail: ndjin@tju.edu.cn