

基于混沌吸引子形态特性的两相流流型 分类方法研究*

肖楠 金宁德†

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2006 年 3 月 8 日收到, 2006 年 6 月 28 日收到修改稿)

利用高灵敏度差压传感器, 在垂直上升管中采集到了 80 组气液两相流差压波动信号. 利用放置参考截面的方法, 建立了描述混沌吸引子形态的一般方法. 在此基础上, 提出了不同维数下的吸引子形态特征量进行组合的气液两相流流型分类新方法. 研究表明, 该方法对包括复杂过渡流型在内的气液两相流流型有很好的分类效果, 预示着混沌吸引子形态描述是研究非线性时间序列的实用有效途径.

关键词: 气液两相流, 流型分类, 吸引子形态, 混合维

PACC: 0545 A752

1. 引 言

两相流广泛存在于化工、核反应堆及石油开采等流动与传热过程系统中. 由于两相流存在相间界面随机可变及相间相对速度特性, 导致两相流流动结构复杂多变. 流型不仅影响两相流流动特性和传热传质性能, 而且对两相流参数测量有很大影响, 所以, 准确辨识流型对两相流工业系统优化设计及非正常工况动态监测具有重要实际意义^[1].

在气液两相流流型研究早期, 大多采用传统的半理论半经验流型判别方法^[2-4]; 与此同时, 基于工程可测动态波动信号研究两相流流型特征也得到了发展, 如功率谱密度及概率密度分析方法等^[5-12]. 由于两相流流动过程具有强烈的非线性特性, 所以传统线性分析方法(如时域、幅域及时频域统计学方法)对揭示复杂非线性系统特性作用是有限的. 两相流一维可测动态波动信号中蕴含着十分丰富的物理过程动力学痕迹, 研究相界面生成、运动及变化的非线性理论是两相流流型研究的重要发展方向^[13]. 进入 20 世纪 90 年代, Saether 等人^[14]和 Franca 等人^[15]基于混沌吸引子相空间重建理论^[16]较早地开展了两相流流型识别研究, 随后, 以非线性

理论为背景的两相流流型研究成果日趋增多. 但是, 利用非线性特征量^[17, 18](如关联维数、Lyapunov 指数及 Kolmogorov 熵)识别两相流流型时, 其计算结果仍不可避免地受流体性质、传感器特性及管道摩阻特性等因素影响, 而且相空间嵌入参数算法也有较大影响^[19], 噪声影响也是一个难以解决的实际问题.

1999 年 Annunziato 等人^[20, 21]提出了混沌吸引子形态描述方法, 并尝试应用于流型识别和火焰检测. 研究表明, 该方法具有快速计算特点, 对两相流流型有较好的分类效果, 存在的问题是单一嵌入维数的吸引子形态特征量对复杂过渡流型分类效果不佳, 致使流型转换边界带模糊不清.

利用在相空间中放置参考截面, 本文建构了混沌吸引子形态描述的一般数学方法, 给出了在任意嵌入维数下混沌吸引子形态描述的数学表达, 在混沌吸引子形态描述理论研究基础上, 本文开展了垂直上升管中气液两相流动态实验, 利用高灵敏度差压传感器采集到了 80 组不同流型的两相流动态波动信号, 提出了基于混合维吸引子形态特征量组合的气液两相流流型分类新方法, 实验结果证实了该方法对复杂过渡流型有很好的分类效果, 发展了基于混沌吸引子形态描述的非线性动力学表征方法.

* 国家自然科学基金(批准号 50674070, 60374041)资助的课题.

† E-mail: ndjin@tju.edu.cn

2. 实验装置及两相流动态波动信号采集

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部分示意图.

实验介质为空气及自来水, 实验时先在管道中通入固定水相流量, 然后逐渐增加气相流量, 每完成一次气水两相流配比后, 通过观察方法得到气液两相流流型信息. 实验水流量范围为 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ — $100 \text{ m}^3/\text{h}$, 气流量范围为 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ — $100 \text{ m}^3/\text{h}$. 实验管径为 125 mm . 差压传感器是英国 GE Druck 公司生产的 PMP4110 产品, 量程范围为 0 — 7 kPa , 精度为 0.08% 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、测量数据处理等几部分组成. 其中信号调理模块自行设计研制, 数

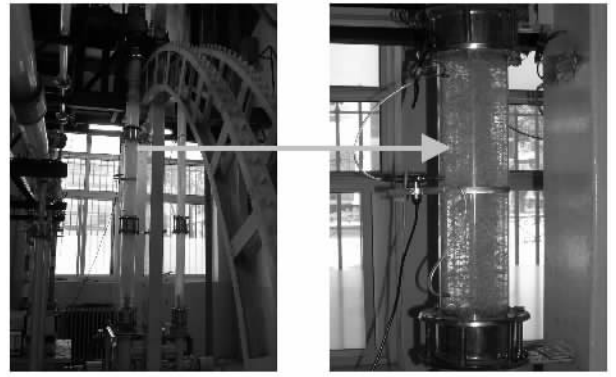


图 1 垂直上升管中气液两相流实验装置及差压传感器测试段示意图(天津大学)

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, 它可实时显示波形变化、实时

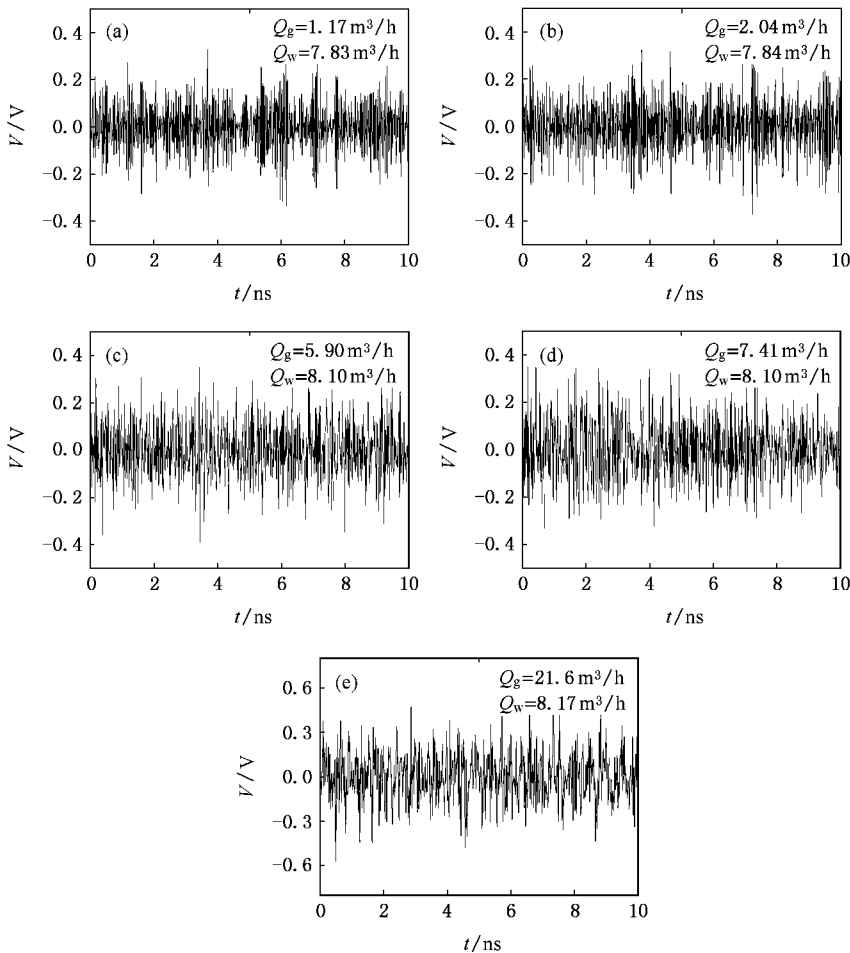


图 2 气液两相流 5 种典型流型的差压波动信号 (a) 泡状流 (b) 泡状流-段塞过渡流 (c) 段塞流 (d) 段塞流-混状过渡流 (e) 混状流

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 组不同流型的两相流差压动态波动信号. 图 2 为 5 种典型流型的两相流差压动态波动信号, 即泡状流 (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), 图中 Q_g 和 Q_w 分别表示气相流量及水相流量. 有关气液两相流流型详细描述参见文献 [1].

3. 混沌吸引子形态描述方法

3.1. 相空间嵌入参数

1981 年由 Takens^[16] 提出的嵌入定理是相空间重构理论的基础. 对于任意时间序列 $S(it), i=1, 2, \dots, n$ (t 为采样时间间隔, n 为采样点总数), 如果选取嵌入时间延迟为 τ , 嵌入维数为 N , 则相空间中的点可表示为

$$\begin{aligned} X(k) &= (x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k)) \\ &= (S(k\tau), S(k\tau + \tau), \dots, S(k\tau + (N-1)\tau)), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $k=1, 2, \dots, M$, $M=n-(N-1)\tau/t$ 为重构相空间后吸引子上点的总数.

为了抑制外界噪声, 我们首先将差压变送器测得的波动信号数据进行标准化, 即将其处理为均值为 0、标准差为 1 的时间序列. 然后, 分别选取互信息方法^[22]与伪邻近点法^[23]计算了时间延迟和嵌入维数, 得到各流动工况下的波动信号最佳时间延迟在 10—30 ms 之间, 最佳嵌入维数为 5—9 维之间. 最佳时间延迟和最佳嵌入维数均不是一个常数, 表明对不同流动工况应采用不同时间延迟和嵌入维数才能真实反映其动力学特征. 但是, 嵌入参数 (时间延迟及嵌入维数) 的计算结果和所选用算法及计算程序编制关系密切, 这些因素会对混沌特征量计算结果带来影响.

3.2. 参考截面系和吸引子矩

相空间中混沌吸引子形态和结构, 是判断系统运动状态的重要依据. 对于高维系统, 直接观察吸引子轨线判断运动性质是十分困难的. 在 N 维相空间中, 选择有利于考查系统运动特征的 $N-1$ 维超截面, 称为参考截面. 由于截面维数比原来系统维数

小, 考查系统运动规律就自然简单一些.

时间序列经标准化处理之后, 对应相空间中吸引子必在 origin 附近展布, 为了保证截面不与大多数轨线相切, 在选取参考截面系时, 总是要求选取的各截面均过 origin. 对任意 N 维相空间, 可以构造 N 个正交的 $N-1$ 维参考截面, 统称为 N 正交参考截面系, 确定方法如下:

首先, 取 N 个过 origin 的标准正交矢量, 用坐标表示为

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N})^T, \\ \alpha_2 &= (a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2N})^T, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha_N = (a_{N1}, a_{N2}, \dots, a_{NN})^T,$$

满足约束

$$\alpha_i \cdot \alpha_j = \begin{cases} \|\alpha_i\|_2^2 = 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad (3)$$

式中, \cdot , \cdot 和 $\|\cdot\|_2$ 分别表示欧氏空间 R^N 中的内积和 2-范数.

然后, 分别以 $\alpha_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为法线确定 N 个过 origin 的平面, 即得到 N 正交参考截面系

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1N}x_N &= 0, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2N}x_N &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$a_{N1}x_1 + a_{N2}x_2 + \dots + a_{NN}x_N = 0.$$

若记 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$, 则上式可简化为

$$(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)^T X = 0. \quad (5)$$

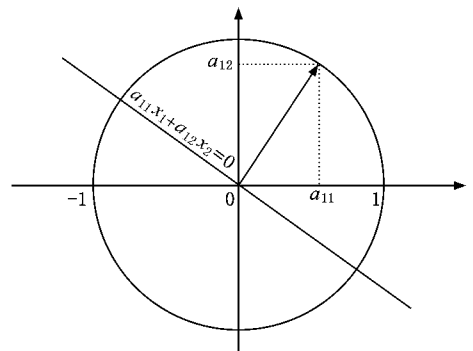


图 3 二维相空间中一个标准法线矢量和其对应的参考截面 (线)

图 3 为二维相空间中一个标准矢量 $\alpha_1 = (a_{11}, a_{12})^T$ 和以它为法线的参考截面 ($a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = 0$) 的示意图, 此时参考截面退化为一参考截线. 参考截面随着 α_1 在单位圆上变化可扫过整个相空间, 另一条参考截线 ($a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = 0$) 将和图示截线在

原点处垂直相交。

N 正交参考截面系,是计算混沌吸引子形态特征量的基础.为了定量地描述吸引子形态特征,需要引入距离的定义.(1)式中吸引子上的每一点到各个参考截面距离可表示为

$$d_i(k) = \alpha_i \cdot X(k) \\ = a_{i1}x_1(k) + a_{i2}x_2(k) + \dots + a_{iN}x_N(k), \quad (6)$$

式中 $k=1, 2, \dots, M$, $M = n - (N-1)\tau/t$ 为重构相空间中吸引子上点的总数.同样,吸引子上的每一点到原点的距离表示为

$$d_{NO}(k) = \sqrt{x_1(k)^2 + x_2(k)^2 + \dots + x_N(k)^2}, \quad (7)$$

式中下标 NO 表示对应嵌入维数取 N 时,相空间中各点到原点 O 的距离,下同.

在上述距离的基础上,对应于不同的时间延迟 τ ,定义关于 τ 的吸引子形态描述量,即吸引子矩,单一距离型吸引子矩和混合型吸引子矩分别为

$$M_{ij}(\tau) = \frac{\sum_{k=1}^M d_i(k) d_j(k)}{M}, \quad (8)$$

$$M_{(i_1, i_2)(j_1, j_2)}(\tau) = \frac{\sum_{k=1}^M d_{i_1}(k) d_{i_2}(k) d_{j_1}(k) d_{j_2}(k)}{M}, \quad (9)$$

式中 M 为重构相空间中吸引子上点的总数, $i, i_1, i_2 \in \{1, 2, \dots, N, NO\}$, 特别当 i, i_1, i_2 取值为 NO 时表示对应距离取为距原点的距离计算公式(7), j, j_1, j_2 均为自然数,称为距离指数.在(8)式中当 j 为偶数时,吸引子矩显然为正值,体现了吸引子对所考查的参考截面的分散程度,而当 j 为奇数时,吸引子矩可能为正值也可能为负值,体现了吸引子对所考查的参考截面的对称性.在(9)式中 j_1, j_2 值的不同组合将反映各种分散性和对称性的综合.

不难分析得出:对应(2)式的 N 个矢量,有 N^2 个待定量.(3)式标准正交条件产生约束个数为 $N + \frac{N(N-1)}{2}$,于是每组标准正交矢量的待定量个数为 $\frac{N(N-1)}{2}$.一组标准正交矢量唯一对应着(4)式的一组 N 正交参考截面系.

3.3. N 正交参考截面系的优化选取算法

标准正交矢量可以通过优化方法确定.利用互信息方法获得的最佳时间延迟在任意维数条件下进

行相空间重构得到的吸引子,称之为静态吸引子(与下文时间延迟变化过程中的动态吸引子相区别).为了考察一个时间序列的静态吸引子在 N 维相空间中的对称性,以距离指数为偶数的吸引子矩最大化为优化目标,可以设计如下的优化算法:

第 1 步:为确定第一个优化截面,进行如下的约束最优化:

$$\alpha_1 = \max_{(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N})^T} \text{Moment} \quad (10) \\ \text{s.t. } \|\alpha_1\|_2^2 = 1,$$

其中 Moment 为(8)式或(9)式中距离指数取偶数时吸引矩计算式, s.t. 后为优化约束.通过优化计算可以确定第一个优化截面 $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1N}x_N = 0$.

第 i 步 ($i=1-N-1$):确定第 i 个参考截面时,应增加与前 $i-1$ 步获得的 $i-1$ 个参考截面正交的约束:

$$\alpha_i = \max_{(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iN})^T} \text{Moment} \\ \text{s.t. } \begin{cases} \|\alpha_i\|_2^2 = 1, \\ \alpha_1 \cdot \alpha_i = 0, \\ \alpha_2 \cdot \alpha_i = 0, \\ \dots \\ \alpha_{i-1} \cdot \alpha_i = 0, \end{cases} \quad (11)$$

计算得到第 i 个优化截面 $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{iN}x_N = 0$.

最后,第 N 个截面由标准正交条件(3)式直接计算获得.

采用优化计算方法对相空间中具有一定对称性的吸引子,可以确定出使吸引子矩最大化的截面位置.基于二维和三维情形下吸引子的几何可见性,直接观察吸引子几何形态得到其对称性截面的大致位置是可行的,而优化计算的结果恰恰给出了对这种几何直观选取方法正确性的验证.大于三维的相空间吸引子是不能几何观察的,因而只能通过计算获得欲优化的截面位置.然而,一方面优化算法的计算复杂度随着嵌入维数增大而膨胀,另一方面二维和三维的计算结果在实际应用中一般已经包含所需要的大部分信息.

3.4. 吸引子形态特征量提取

静态吸引子尽管可以在任意维数相空间中重构,但仍依赖于传统时间延迟 τ 的取值.将时间延

迟 τ 从零开始逐渐增大,对应得到的吸引子称为动态吸引子,再结合已有的吸引子矩和参考截面的表达式,则可以得到动态吸引子的吸引子矩关于 τ 的变化曲线,进而通过新的特征量定义减弱时间延迟选取的影响。

吸引子矩 $M_{i,j}(\tau)-\tau$ 或 $M_{(i_1, i_2)(j_1, j_2)}(\tau)-\tau$ 曲线先增大(或减小),如果一段时间延迟之后出现极大峰(或极小峰),则将各峰值对应的时间延迟 τ 定义为转变延迟 τ_f ;如果不出现极值,曲线一直增大(或减小),则当曲线出现斜率突变时,所对应的时间延迟 τ 同样定义为转变延迟 τ_f 。转变延迟 τ_f 之前的曲线部分称第一区域,之后的曲线称为第二区域。

第一区域对应着吸引子从 τ 值很小时的压缩状态到 τ 值选取合适时的拓扑结构展开状态的过程。第一区域一般近似为线性,从而可以用第一区域的近似斜率作为特征量,即吸引子形态特征量,记为 $SM_{i,j}$ 和 $SM_{(i_1, i_2)(j_1, j_2)}$, 应满足

$$M_{i,j}(\tau) \approx SM_{i,j} \cdot \tau + IM_{i,j}, \quad (0 \leq \tau \leq \tau_f), \quad (12)$$

$$M_{(i_1, i_2)(j_1, j_2)}(\tau) \approx SM_{(i_1, i_2)(j_1, j_2)} \cdot \tau + IM_{(i_1, i_2)(j_1, j_2)}, \quad (0 \leq \tau \leq \tau_f), \quad (13)$$

上两式中, $IM_{i,j}$, $IM_{(i_1, i_2)(j_1, j_2)}$ 代表各对应曲线的截

表 1 80 组两相流流动工况数据二维相空间截面的优化结果(Moment = $M_{(1,2)}(\tau)$)

标准正交矢量	$\alpha_1 = (a_{11}, a_{12})^T$		$\alpha_2 = (a_{21}, a_{22})^T$	
	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}
优化结果变化范围	(0.5897—0.7283)	(-0.8076—-0.6853)	(0.5897—0.6853)	(0.5897—0.7283)
优化结果均值	0.7044	-0.7094	0.7094	0.7044
优化结果方差	0.0176	0.0158	0.0158	0.0176

因此,一三象限平分线和二四象限平分线可以用于考察气液两相流的二维吸引子,选取的标准正交矢量以及各距离的表达式总结于表 2。

同样,分析三维相空间中吸引子的对称性,为与二维各表达式相区别,用字母 A, B, C 分别标记三个参考截面,结果亦见表 2。

利用表 2 中的距离表达式,定义单一距离型吸引子矩如(8)式所示。一般地,距离指数 j 取 1, 2, 3 和 4 进行计算即可。

定义二维混合型吸引子矩

$$M_{(1,2)(3,4)}(\tau) = \frac{\sum_{k=1}^M d_1(k)^3 d_2(k)}{M}. \quad (14)$$

距。在 $0 \leq \tau \leq \tau_f$ 区间内,对吸引子矩和时间延迟 τ 用最小二乘法做线性回归,可得出第一区域的近似斜率即为吸引子形态特征量。由此可见,吸引子形态特征量与传统的最佳时间延迟大小无必然的关系,从而减小了由时间延迟参数选取所带来的误差。

转变延迟之后的第二区域,对应着吸引子结构逆转后的无规律状态,反映在 $M_{i,j}(\tau)-\tau$ 或 $M_{(i_1, i_2)(j_1, j_2)}(\tau)-\tau$ 曲线上,或者出现上下波动,或者出现斜率突变。

4. 气液两相流吸引子形态描述

图 4 为一组气液两相流流动工况随时间延迟 τ 值增大,二维吸引子形态的演化过程。

由图 4 看出,二维吸引子在 τ 值很小时被压缩在一三象限平分线附近,随着 τ 值增大吸引子逐渐展开, τ 达到一定值($\tau = 17.5$ ms)后吸引子形态发生逆转突变,不再具有前期展开过程的拓扑形态。特别地,二维吸引子在形态突变之前,对一三象限平分线的分散程度随 τ 值增大而增大,对二四象限平分线分散程度随 τ 值增大而减小;而当(10)式中 Moment 取为 $M_{(1,2)}(\tau)$ (即 $j = 2$) 时,分别对 80 组工况进行截面优化计算的结果(见表 1)也验证了这种几何直观选取的正确性。

这一混合型吸引子矩主要反映吸引子对一三象限平分线的对称程度,当对称程度一致时,离二四象限平分线距离越大其值越大。其他维数和距离定义下,可以类似地定义各种混合型吸引子矩。

图 5 中的三条曲线分别对应图 2 中的三种非过渡流动工况(泡状流、段塞流和混状流)二维单一距离型吸引子矩 $M_{1,2}(\tau)$ 对 τ 的变化曲线。

对差压传感器得到的 80 组流动工况数据进行标准化后,计算得到的所有 $M_{1,2}(\tau)-\tau$ 曲线均可取到峰值型转变延迟 τ_f , 其值在 17.5—30 ms 之间,与前面互信息方法^[22]得到的最佳时间延迟(10—30 ms)之间并没有明显的对应关系。若个别工况的某

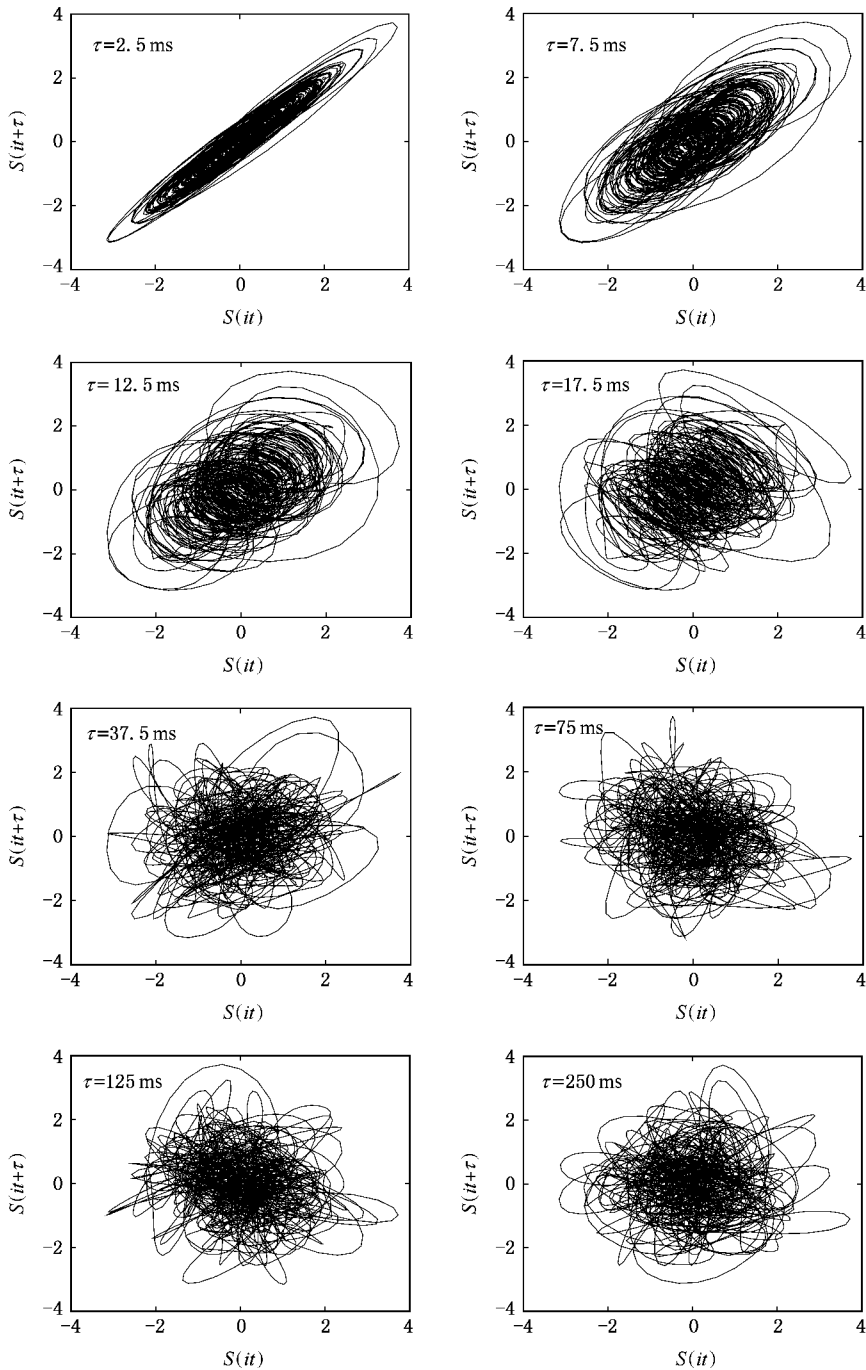


图4 一组流动工况二维吸引子随时间延迟 τ 增大的形态演化 ($Q_g = 21.6 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_w = 8.17 \text{ m}^3/\text{h}$)

些吸引子矩对 τ 的变化曲线出现一直增大或减小的情况时,通过观察曲线选取第一区域,同样可以计算近似斜率作为吸引子形态特征量.有了吸引子形态特征量,就可以直接用于流型分类.

5. 气液两相流流型分类结果

图6表示利用二维吸引子形态特征量 $SM_{1,2}$ 和

$SM_{(1,2)(3,1)}$ 对5种典型流型(80组流动工况)的分类结果.图7表示结合使用二维特征量 $SM_{1,2}$ 和三维特征量 $SM_{B,3}$ (混合维)对5种典型流型(80组流动工况)的分类结果.

从图6中可以看出,仅利用二维特征量 $SM_{1,2}$ 对3种非过渡流型(泡状流、弹状流和混状流)分类效果较好,但是,7个泡状-段塞过渡流型点与泡状流型点混叠出现,2个段塞-混状过渡流型点中有1个

表 2 各维相空间中正交矢量的选取和距离表达式

相空间 维数 N	待定量 个数	选取正交矢量 $\alpha_i (i=1, 2, \dots, N)$	距离表达式 $d_i(k) (k=1, 2, \dots, M)$
2 维 ^[20]	1	$\alpha_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^T$ $\alpha_2 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^T$	$d_1(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} [x(k) - y(k)]$ $d_2(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} [x(k) + y(k)]$ $d_{20}(k) = \sqrt{x(k)^2 + y(k)^2}$
3 维(本文)	3	$\alpha_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, \rho \right)^T$ $\alpha_2 = \left(\frac{4}{\sqrt{33}}, -\frac{4}{\sqrt{33}}, -\frac{1}{\sqrt{33}} \right)^T$ $\alpha_3 = \left(\frac{1}{\sqrt{66}}, -\frac{1}{\sqrt{66}}, \frac{8}{\sqrt{66}} \right)^T$	$d_A(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} [x(k) + y(k)]$ $d_B(k) = \frac{1}{\sqrt{33}} [4x(k) - 4y(k) - z(k)]$ $d_C(k) = \frac{1}{\sqrt{66}} [x(k) - y(k) + 8z(k)]$ $d_{30}(k) = \sqrt{x(k)^2 + y(k)^2 + z(k)^2}$

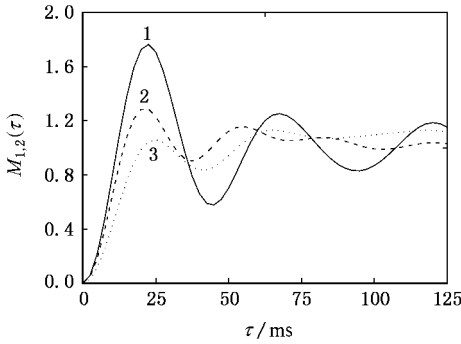


图 5 三种非过渡流型二维吸引子矩 $M_{1,2}(\tau)$ - τ 曲线 1. 泡状流工况： $Q_g = 1.17 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_w = 7.83 \text{ m}^3/\text{h}$ ；2. 段塞流工况： $Q_g = 5.90 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_w = 8.10 \text{ m}^3/\text{h}$ ；3. 混状流工况： $Q_g = 21.6 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_w = 8.17 \text{ m}^3/\text{h}$

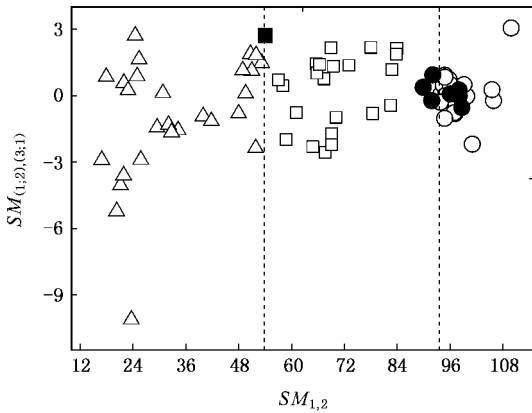


图 6 流型点在 $SM_{(1,2),(3,1)}$ - $SM_{1,2}$ 平面分布(○泡状流, ●泡状-段塞流, □段塞流, ■段塞-混状流, △混状流)

量对过渡流型分类效果不佳,流型转换边界带模糊不清.

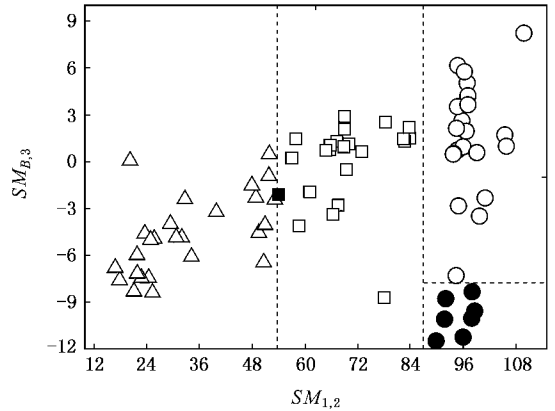


图 7 流型点在 $SM_{B,3}$ - $SM_{1,2}$ 平面分布(○泡状流, ●泡状-段塞流, □段塞流, ■段塞-混状流, △混状流)

从图 7 中可以看出,在利用二维特征量 $SM_{1,2}$ 将非过渡流型(bubble, slug 及 churn)很好区分的基础上,再利用三维特征量 $SM_{B,3}$ 可将图 6 中混叠在泡状流区域内的泡状-段塞过渡流型点能很好地分离出来.表明了采用混合维吸引子形态特征量组合对过渡流型有很好的分类效果.

综合考查所有的吸引子形态特征量计算结果,在对三种非过渡流型的分类问题上,二维特征量 $SM_{1,2}, SM_{1,4}, SM_{2,2}, SM_{2,4}, SM_{20,1}, SM_{20,3}, SM_{20,4}$ 及三维特征量 $SM_{A,2}, SM_{A,4}, SM_{B,2}, SM_{B,4}$ 等均有不同程度的分类能力,其中以二维特征量 $SM_{1,2}, SM_{1,4}, SM_{2,2}$ 和三维特征量 $SM_{A,2}, SM_{B,2}, SM_{B,4}$ 的分类效果

落在段塞流区域.因此,仅采用二维吸引子形态特征

最好.

要正确地包括过渡流型在内的全部 5 种流型进行分类,没有任何一种特征量能够单独完成,混合使用两种甚至两种以上的特征量会大大改善流型的分类效果.

6. 结 论

混沌吸引子形态特征量能较好地气液两相流流型进行分类,特别是采用混合维特征量组合的方法,对过渡流型有很好的分类效果.

混沌吸引子形态描述方法是在时间延迟变化

时,从吸引子形态演化中寻找几何学的量化规律,该方法大大减小了因时间延迟选取不合理所带来的计算误差,在不依赖于传统方法对时间延迟和嵌入维数选取的同时,较好地体现了非线性处理思想.这一方法的另一突出优点是计算量非常小,有利于两相流流型的在线快速分类,并易于工程可测随机波动信号的非线性分析使用.

如何从物理角度解释转变延迟和最佳延迟之间的内在关系是一个有价值的命题,而吸引子形态描述方法向其他多相流流型识别技术的应用,以及向其他模式识别领域拓展,也将是有益的探索.

-
- [1] Hewitt G F 1980 *Measurement of two-phase flow parameters* (London : Academic Press)
- [2] Taitel Y , Barnea D , Dukler A E1980 *AICHEJ* **26** 345
- [3] Mishima K , Ishii M 1984 *Int . J . Heat Mass Transfer* **27** 723
- [4] McQuillan K W , Walley P B 1985 *Int . J . Multiphase Flow* **11** 161
- [5] Hubbard M G , Dukler A E 1966 *Proceedings of 1966 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute* (Stanford : Stanford University Press) p100
- [6] Jones O C , Zuber N 1975 *Int . J . Multiphase Flow* **2** 273
- [7] Vince M A , Lahey R T 1982 *Int . J . Multiphase Flow* **8** 93
- [8] Tutu N K 1982 *Int . J . Multiphase Flow* **8** 443
- [9] Tutu N K 1984 *Int . J . Multiphase Flow* **10** 211
- [10] Matsui G 1984 *Int . J . Multiphase Flow* **10** 711
- [11] Matsui G 1986 *Nucl . Eng . Des .* **95** 221
- [12] Lin P Y , Hanratty T J 1987 *Int . J . Multiphase Flow* **13** 13
- [13] Chen X J 1996 *Journal of Xi ' an Jiaotong University* **30** 9 (in Chinese)[陈学俊 1996 西安交通大学学报 **30** 9]
- [14] Saether G , Bendiksen K , Muller J *et al* 1990 *Int . J . Multiphase Flow* **16** 1116
- [15] Franca F , Acikgoz M , Lahey R T 1991 *Int . J . Multiphase Flow* **17** 545
- [16] Takens F 1981 *Dynamical system and turbulence , Lecture Notes in Mathematics* (Berlin : Springer-Verlag) p366
- [17] Grassberger P and Procaccia I 1983 *Phys . Rev . Lett .* **50** 346
- [18] Abarbanel H D I 1995 *Analysis of observed data* (New York : Springer-Verlag) p69
- [19] Xie Y , Xu J X , Yang H J *et al* 2002 *Acta Phys . Sin* **51** 205 (in Chinese)[谢 勇、徐健学、杨红军等 2002 物理学报 **51** 205]
- [20] Annunziato M , Abarbanel H D I 1999 *Proceedings of Int . Conf . on Soft Computing* , Genova , Italy
- [21] Annunziato M , Bertini I , Piacentini M *et al* 1999 *Proceedings of Int . Conf . 36th HTMF* (California : California State University Press) p13
- [22] Fraser A M , Swinney H L 1986 *Phys . Rev . A* **33** 1134
- [23] Kennel M B , Brown R , Abarbanel H D I 1992 *Phys . Rev . A* **45** 3403

Research on flow pattern classification method of two phase flow based on chaotic attractor morphological characteristic^{*}

Xiao Nan Jin Ning-De[†]

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

(Received 8 March 2006; revised manuscript received 28 June 2006)

Abstract

Using the high sensitivity differential sensor, we collected 80 groups of fluctuating signals in vertical upward gas/liquid two phase flow. We established the general description method of chaotic attractor morphological characteristic using referenced sections, and then put forward a new flow pattern classification method of gas/liquid two phase flow by combining the chaotic attractor morphological feature parameters of different dimensions. The study shows that the proposed method can get a good clustering of gas/liquid two phase flow patterns, including the complex transitional flow pattern, and it implies that the method of chaotic attractor morphological characterization is an effective approach to study nonlinear time series in practice.

Keywords : gas/liquid two phase flow, classification of flow patterns, attractor morphology, hybrid dimension

PACC : 0545 4752

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50674070, 60374041).

[†] E-mail : ndjin@tju.edu.cn