

倾斜油水两相流流型混沌吸引 子形态周界测度分析*

宗艳波 金宁德[†] 王振亚 王振华

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2009 年 1 月 14 日收到 2009 年 4 月 7 日收到修改稿)

在两维相空间中定义了吸引子形态周界特征量(吸引子面积、长轴、短轴),考察了吸引子周界特征量随时间延迟的变化规律.发现在吸引子展开过程的第一区域内,其吸引子周界特征量变化率具有不变性.通过对正弦信号、噪声信号和混沌信号进行仿真分析,发现采用吸引子周界特征量可以对这些不同信号进行有效分类.在采集倾斜油水两相流电导波动信号基础上,对水为连续相的倾斜油水两相流型进行了吸引子形态周界测度分析,发现吸引子面积增长率是描述吸引子形态的不变特征量,该特征量对水为连续相的拟段塞水包油(D O/W PS)和局部逆流水包油(D O/W CT)两种流型具有较好的分类效果.

关键词: 倾斜油水两相流, 流型识别, 吸引子形态, 周界测度

PACC: 0545, 4752

1. 引 言

倾斜油水两相流广泛存在于海上油田大斜度油井生产过程中,油井产出剖面流量测量建模需要知道流型特征,如持水率梯度分布,漂移模型中相分布系数以及相关测速等参数均受流型影响显著.此外,与油井生产动态特性密切相关的管内压力降预测也强烈依赖于流型资料.与垂直油水两相流相比,倾斜油水两相流由于受到重力影响,其流体湍动、相间界面相互作用及相间局部相对运动更为复杂,尤其是当倾斜角度偏离垂直方向较大时,就会产生间歇性生长或衰减内波^[1-4](kelvin-helmholtz wave),由内波结构引起的沿管径方向局部流速及局部相含率变化规律非常复杂,迄今,其流动结构转化动力学机理尚未十分清楚.

刘金海等^[5]采用多个混沌指标参数分析了输油管道压力时间序列的混沌特征,表明单相管流中存在着混沌现象.两相管流是比单相管流复杂得多的非线性动力学系统,而一维可测瞬态信号蕴含着两相流物理过程丰富的动力学痕迹,从中提取与流动特性密切相关的吸引子形态特征不变量对流动结构

转化机理的认识是有益补充与探索^[6-12],游荣义等^[13]利用小波多尺度变换考察了健康人和癫痫患者两种脑电信号的混沌吸引子图.丛蕊等^[14]采用基于数据融合的多变量相空间重构方法研究吸引子的局部特征.李月等^[15]根据混沌振子系统输出周期解的平均面积是一个稳定的几何特征量,提出了微弱周期信号的定量检测方法.

早期倾斜油水两相流型研究主要以实验观察方法为主,并采用统计模型表征倾斜油水两相流流动参数之间关系^[16].随流场局部测量技术发展,Vigneaux 等^[17]采用高频阻抗探针测量发现了大管径条件下倾斜油水两相流持水率梯度分布与流型密切相关,并描述了倾斜油水两相流两种主要流型特征:一是管道上部油相以间歇性的泡群流动,而在油泡群下部存在水相的局部逆流现象;二是管道顶部油泡群几乎连续同向快速流动,而在油泡群下部存在水相的局部逆流.这两种流型描述与后来 Flores 等^[18]定义的拟段塞水包油流型(D O/W PS)和局部逆流水包油流型(D O/W CT)相一致. Flores 等^[18]对管径为 5.08 cm 的倾斜油水两相流分为 7 种流型:4 种水为连续相流型,2 种油为连续相流型和 1 种过渡流型.其中,水为连续相流型为拟段塞水包油流型

* 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

(D O/W PS)、局部逆流水包油流型(D O/W CT)、同流水包油流型(D O/W CC)和细小分散相的水包油流型(VFD O/W)、油为连续相流型为油包水流型(D W/O)、细小分散相的油包水流型(VFD W/O)。此外, Lucas 和 Jir[19]发现在倾斜油水两相流中所测相关速度受流型影响显著。

在先前研究中,基于吸引子矩特征在区分过渡流型与两种水连续相的水包油流型(D O/W PS 与 D O/W CT)时取得了一定效果[20],但在区分 D O/W PS 与 D O/W CT 流型时仍存在局限性。为此,本文提出了混沌吸引子形态周界测度(吸引子面积、长轴、短轴)分析新方法,并实际处理了大管径低流速倾斜油水两相流电导传感器波动信号,研究结果表明吸引子面积增长率是描述倾斜油水两相流流型的不变特征量,该特征量对水为连续相的 D O/W PS 和 D O/W CT 两种流型具有较好分类效果,发展了非线性时间序列吸引子形态分析方法。

2. 吸引子形态周界测度分析(面积、长轴、短轴)

1981年由 Takens 提出的嵌入定理是相空间重构理论的基础[21]。对于传感器测量信号时间序列 $s(i t)$, $i=1, 2, \dots, n$ (t 为时间采样间隔, n 为采样点总数),选取嵌入时间延迟为 τ 、嵌入维数为 N ,则相空间中的点 $X(k)$ 可表示为

$$X(k) = \{s(k), s(k+\tau), \dots, s(k+(N-1)\tau)\} \quad (1)$$

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。

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。二维相空间中的点为 $X_i=(x_i, y_i)=[s(i t), s(i t+\tau)]$,研究吸引子形态只需关心两个坐标 $x_i=s(i t)$ 及 $y_i=s(i t+\tau)$ 。吸引子面积 $A(\tau)$ 定义为吸引子轨迹的最大轮廓所包含的面积。对于由矢量点 $X_i, i \in 1, \dots, N$ 构成的吸引子,其面积 $A(\tau)$ 的计算采用积分方法。具体为首先确定吸引子在 x 轴方向的极差

$$\Delta x = \max(x_i) - \min(x_i), i \in 1, \dots, N. \quad (2)$$

将 Δx 均分为间隔为 $l = \Delta x/K$ 的 K 个区间,寻找满足

$$\begin{aligned} \min(x_i) + l \cdot (j-1) \leq x_k < \min(x_i) + l \cdot j, \\ k \in 1, \dots, N, j \in 1, \dots, K \end{aligned} \quad (3)$$

的矢量点 X_i 组成的集合,在该集合内取相应 y 轴分量极差为

$$\Delta y_k = \max(y_k) - \min(y_k), \quad (4)$$

则吸引子的面积 $A(\tau)$ 可表示为

$$A(\tau) = \lim_{K \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^K \Delta y_k \cdot \frac{\Delta x}{K}, \quad (5)$$

式中 K 由所需要的计算精度确定,本文中 K 取 500。吸引子的长轴 $L_{axis}(\tau)$ 定义为主轴方向上两个相空间点之间最长距离为

$$L_{axis}(\tau) = \max(X_i - Y_i), \quad (6)$$

式中 X_i 与 Y_i 均为主轴上的点。吸引子短轴 $S_{axis}(\tau)$ 定义为副轴方向上两个相空间点之间最长距离

$$S_{axis}(\tau) = \max(X_i - Y_i), \quad (7)$$

式中 X_i 与 Y_i 均为副轴上的点。由吸引子面积的定义可知,当 K 取 1 时,吸引子面积等于长轴和短轴的乘积。

3. 不同类型信号吸引子周界测度仿真分析

选取序列长度 N 均为 10000 点不同类型的时间信号序列进行吸引子面积及长短轴计算与比较。

1) 正弦信号 $y_1 = \sin(x)$, 采样间隔为 $\pi/50$ 。

2) 正弦信号 $y = y_1 + p \times y_2$, 其中 y_1 为正弦序列, y_2 为白噪声序列, p 为随机成分的比例,分别取 $p=0.2, 0.5$ 。

3) Lorenz 混沌信号,由 Lorenz 方程[22]

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -10(x-y), \\ \frac{dy}{dt} &= -y + 28x - xz, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - \frac{8}{3}z, \end{aligned} \quad (8)$$

初始条件 $x=2, y=2, z=20$,采用四阶龙格-库塔方法迭代,取变量 x 为仿真序列。

4) 高斯白噪声信号序列。

将延迟时间 τ 从零逐渐增大,得到随延迟时间变化的动态吸引子。图 1 为 Lorenz 信号在嵌入时间延迟变化对应的动态吸引子图,随着时间延迟 τ 增加, Lorenz 吸引子从压缩状态逐渐完全展开。而正弦信号所形成的动态吸引子则从在主轴方向的压缩状态逐渐展开,当展开到一定程度时,随着 τ 增加,吸引子将逐渐压缩到副轴上,然后随着 τ 继续增加,吸引子将从副轴上的压缩状态逐渐展开,随着 τ 增

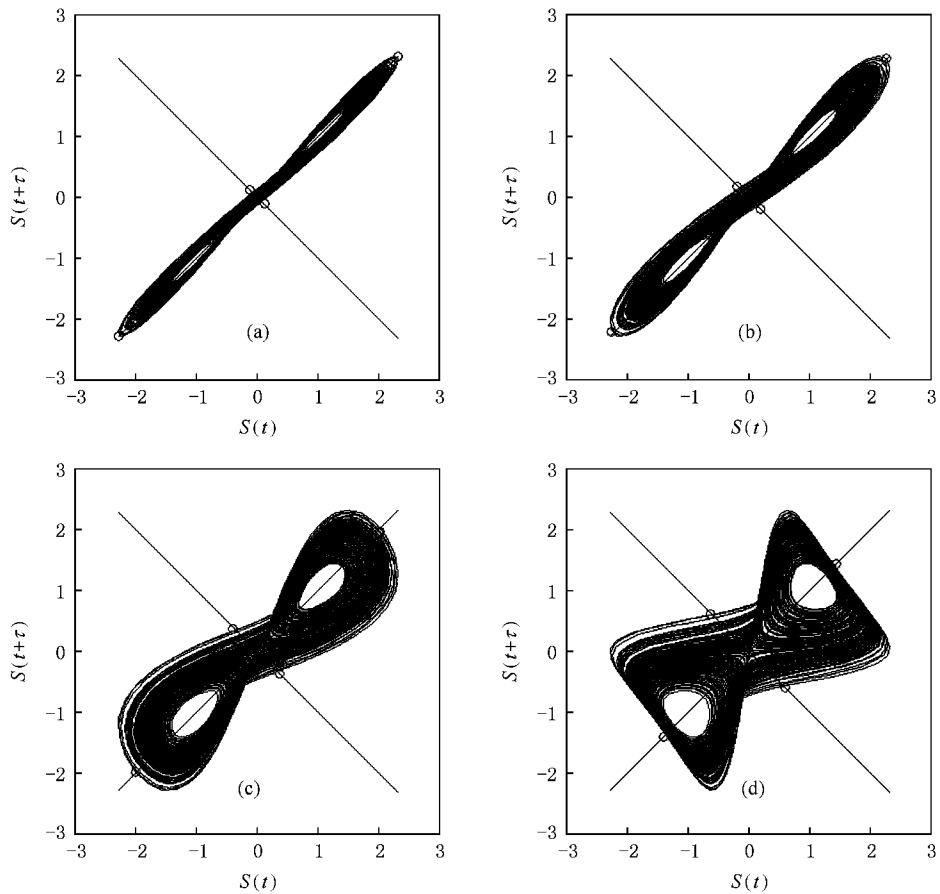


图 1 Lorenz 吸引子形状在两维相空间上随时间延迟的变化 (a) $\tau = 1$; (b) $\tau = 2$; (c) $\tau = 5$; (d) $\tau = 10$

加, 吸引子将周期性地重复展开、压缩、展开过程.

对于白噪声信号, 如图 2 所示, 仅当 $\tau = 0$ 时, 吸引子压缩在主轴上, 而即使很小的时间延迟, 如 $\tau = 1$, 所对应的吸引子也将完全展开. 因此, 对于高斯白噪声信号序列, 不需要计算其吸引子长轴和短轴.

针对上述仿真信号, 计算吸引子面积、长轴和短轴随时间延迟的变化曲线如图 3. 类似于吸引子矩

增长率的提取方法, 可以定义吸引子面积、长轴和短轴曲线的第一区域. 以图 3(c) 吸引子面积随时间延迟的变化曲线为例, 所谓第一区域就是在面积曲线上存在明显峰值, 此峰值对应的时间延迟为转变延迟 τ_f . 在 τ_f 之前的区域称为第一区域. τ_f 之后的区域称为第二区域. 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

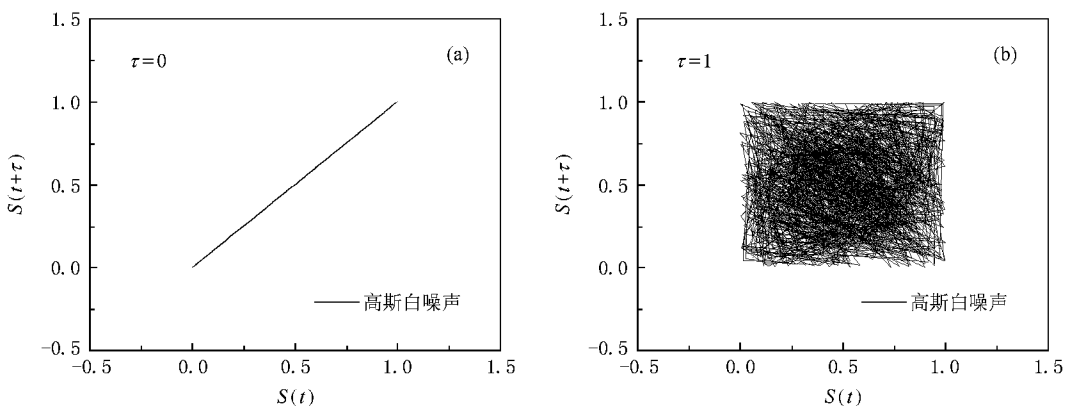


图 2 $\tau = 0$ 和 $\tau = 1$ 时高斯白噪声信号的吸引子图

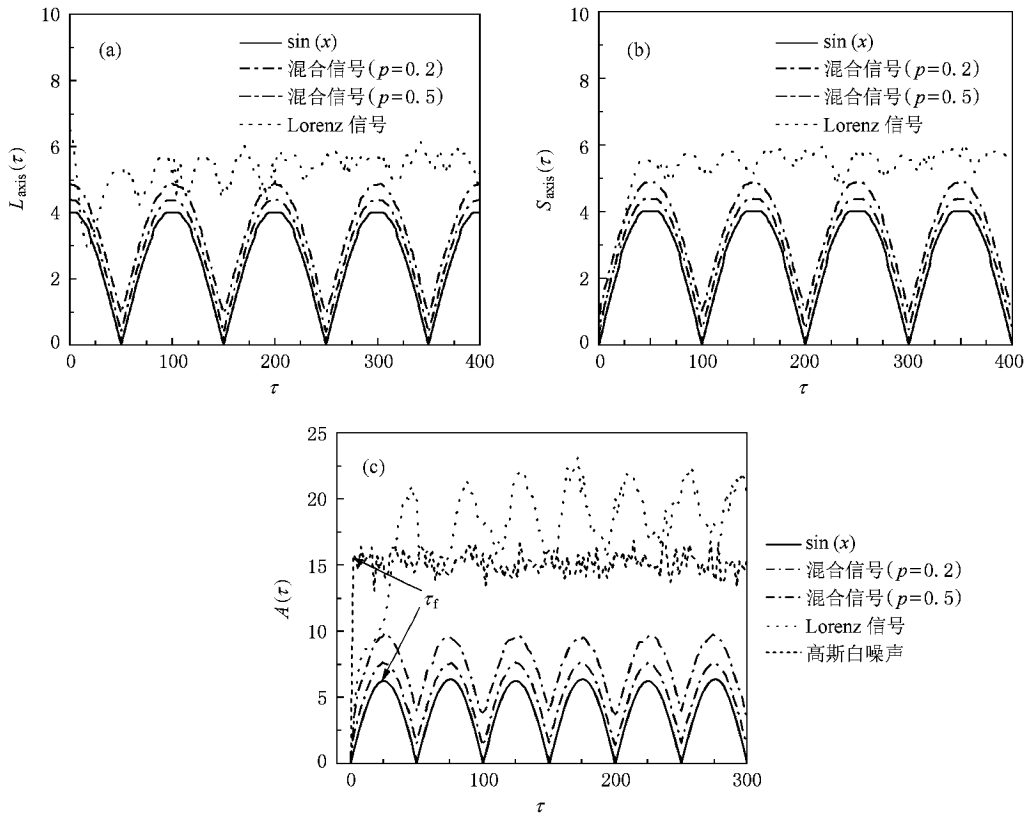


图3 不同信号动态吸引子长轴、短轴及面积随时间延迟变化关系 (a)长轴随时间延迟变化;(b)短轴随时间延迟变化;(c)面积随时间延迟变化

状态的过程.在图3(c)中,这几种信号均具有明显的第一区域.为便于定量表征不同信号的吸引子面积增长率,可以将第一区域近似为线性区域,从而以该区域的斜率作为面积的增长率.尽管正弦信号及其混合信号的第一区域仍然是非线性的,以第一区域的近似斜率作为吸引子形态特征量的增长率,记为SA,应满足

$$A(\tau) \approx SA \cdot \tau + A(0) \quad (0 \leq \tau \leq \tau_f), \quad (9)$$

式中 $A(0)$ 代表对应曲线的截距.在 $0 \leq \tau \leq \tau_f$ 区间内,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几何形态特征量.由此可见,吸引子几何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 τ_f 之后的第二区域,对应着吸引子结构完全展开后的状态.

从图3(c)可以看出,规则的正弦信号及其混合信号的面积增长率较低,高斯白噪声信号的面积增长率最高,而Lorenz信号的面积增长率居于两者之间.这与前面所述的高斯白噪声在时间延迟 $\tau = 1$ 时其吸引子已经进入完全展开的状态是一致的,而

且其面积稳定在15左右波动,表明时间延迟对其吸引子面积的影响不大.表1为不同仿真信号的计算结果.

表1 不同类型信号吸引子周界特征值计算结果

信号类型	面积增长率	长轴增长率	短轴增长率
正弦信号 $\sin(x)$	0.30462	-0.0936	0.11048
混合信号($p=0.2$)	0.35705	-0.09206	0.11398
混合信号($p=0.5$)	0.472	-0.08609	0.1097
Lorenz 信号	1.16944	-0.24547	0.14127
高斯白噪声信号	7.92209	-	-

计算结果表明不同类型的仿真信号在吸引子面积的增长率上的区别非常明显.实际上,由于吸引子长轴和短轴是由相空间上的4个矢量点计算得到的,而由于实际测量信号受噪声的影响,其吸引子长轴和短轴随时间延迟的变化不像吸引子矩和吸引子面积那样光滑,这不利于吸引子特征提取.这种情况下,应该以吸引子面积及其增长率为考察重点.

4. 倾斜油水两相流电导信号采集

倾斜油水两相流动态实验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.测试段是由长 6 m,内径为 12.5 cm 的透明有机玻璃管组成.可在 0—90°范围内自由倾斜.实验中油和水流量在进入实验段之前分别由涡轮流量计和电磁流量计精确测量,并由控制系统记录.测试段电导波动信号采用本课题组先前的纵向多极阵列电导传感器^[23,24].

实验介质为自来水和 15# 工业白油.白油密度为 845 kg/m³,黏度为 11.984 mPa·s.为便于流型观察,将水相染成红色,倾斜角度为从垂直方向倾斜 15°和 45°.在每个角度下,首先固定水相流量,然后增加油相流量,当油水两相流量均稳定后,观察并记录该流动工况的流型,当数据采集完毕后,增加油相流量,开始下一个流动工况点的测量.每个角度下的水相表观速度 U_{sw} 范围为 0.0052—0.3306 m/s,油相表观速度 U_{so} 范围为 0.0057—0.3306 m/s.电导信号采样频率为 400 Hz,采样时间为 30 s.实验中观察到 D O/W PS, D O/W CT, 过液 (TF) 和 D W/O 四种流型.图 4 为固定水相表观速度 $U_{sw} = 0.0374$ m/s 时,

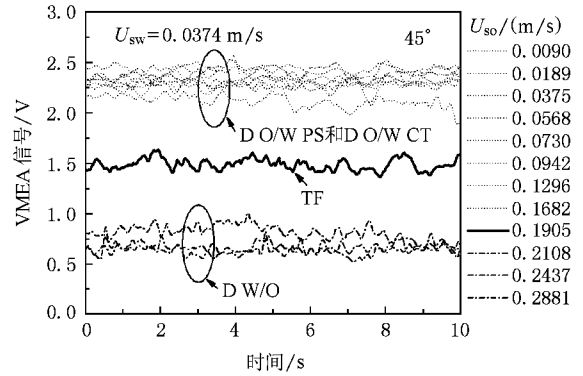


图 4 固定水相表观速度 ($U_{sw} = 0.0374$ m/s) 油相表观流速增加时的电导波动信号

油相表观速度 U_{so} 增加时直流电导信号波形图.其中 D O/W PS 和 D O/W CT 属于水包油流型,在电导信号的瞬态值上难以直接区分,须从非线性分析角度予以分类.关于对上述几种流型的详细描述参见文献 [18,20].

5. 倾斜油水两相流流型吸引子面积形态特征分析

图 5 和图 6 分别为 D O/W PS 及 D O/W CT 两种

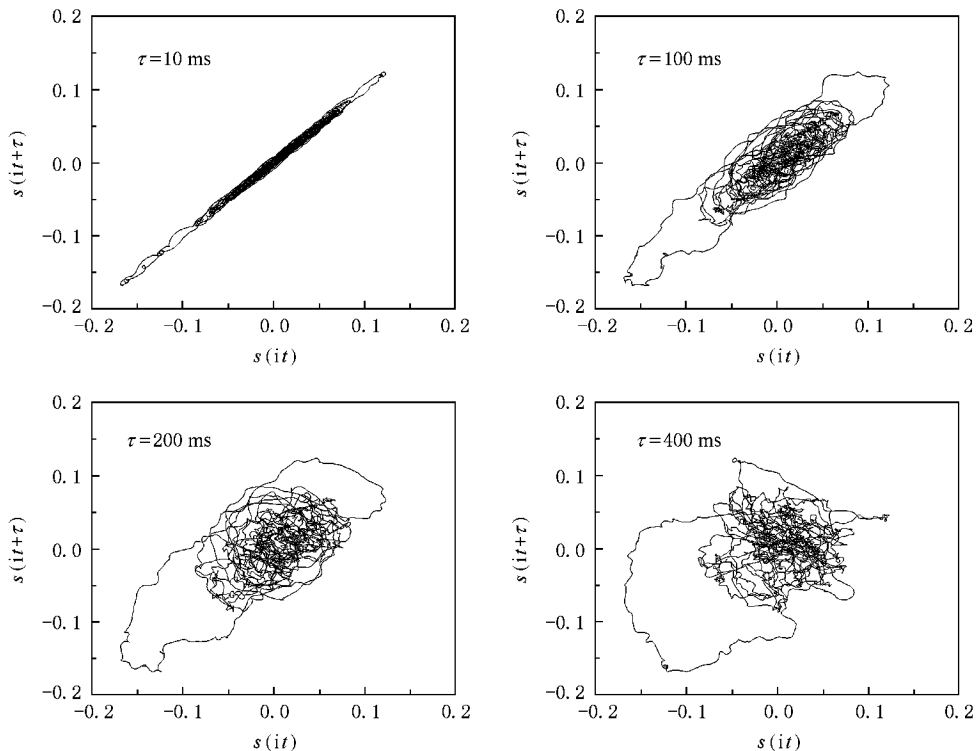


图 5 吸引子面积形状随延迟时间变化图(倾斜 45°, $U_{sw} = 0.0374$ m/s, $U_{so} = 0.0730$ m/s, D O/W PS 流型)

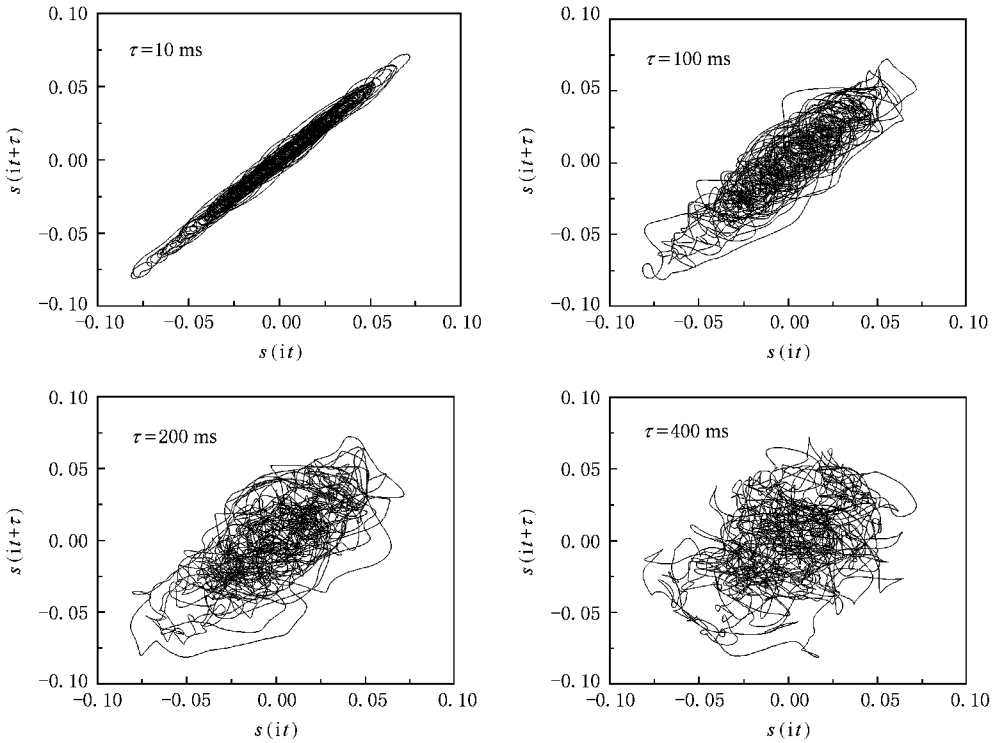


图 6 吸引子面积形状随延迟时间变化图(倾斜 45° , $U_{sw} = 0.0374 \text{ m/s}$, $U_{so} = 0.1682 \text{ m/s}$, D O/W CT 流型)

不同流型两维吸引子随延迟时间变化图.如前所述, 由于实测信号长轴和短轴这两个指标的鲁棒性较差, 后面的计算和分析主要以吸引子面积形态为主.

图 7 为固定水相表观速度 U_{sw} 为 0.0374 m/s 增加油相表观速度时, 吸引子面积 $A(\tau)$ 随时间延迟 τ 的变化曲线, 表明 D O/W CT 流型在第一区域的斜率 SA 和第二区域的面积均值 \bar{A} 均低于 D O/W PS 流型. 以面积增长率 SA 和吸引子拓扑结构完全展开后的最终面积 \bar{A} 为坐标, D O/W PS 和 D O/W CT 流型在 SA- \bar{A} 平面上的分布如图 8 所示. D O/W PS 流型的吸引子面积及其增长率均高于 D O/W CT 流

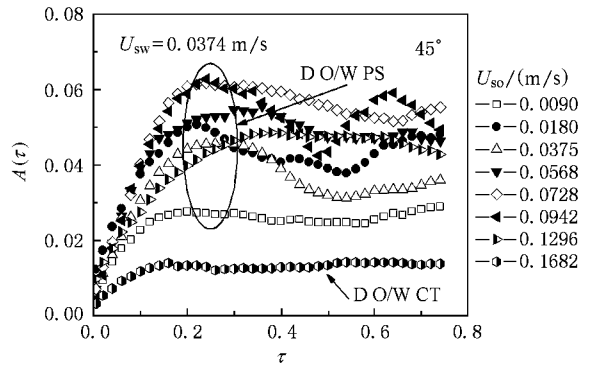


图 7 吸引子面积 $A(\tau)$ 随时间延迟 τ 变化曲线

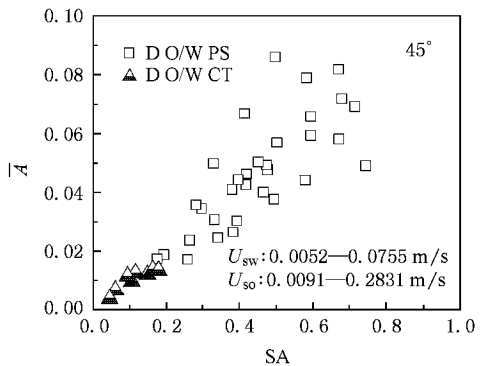
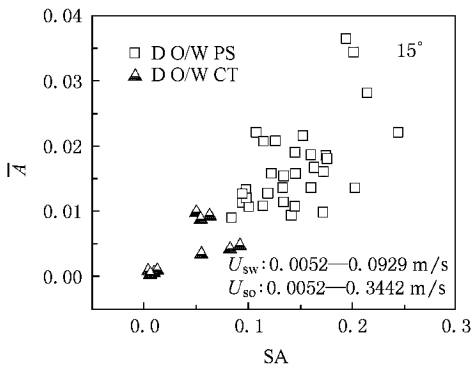
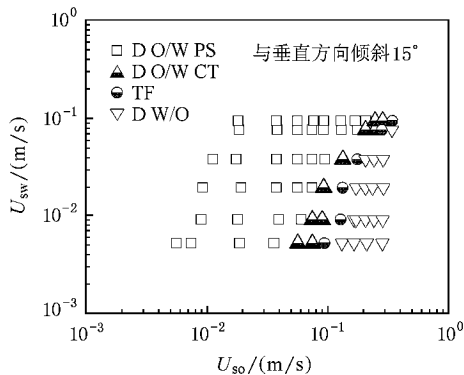


图 8 D O/W PS 和 D O/W CT 流型点在 SA- \bar{A} 平面上分布图

型,在以吸引子特征量为坐标的平面上,这两种流型均具有较好分类效果.



倾斜油水两相流流型图如图 9 所示.其中 D O/W PS和DO/WCT流型点由上述方法识别,TF流型

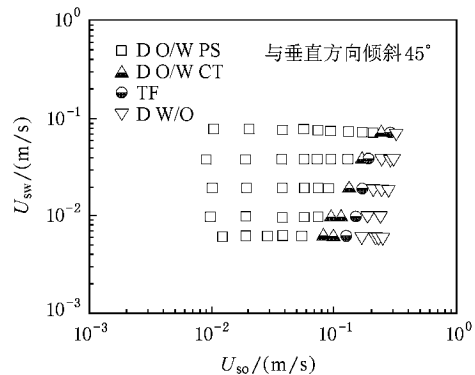


图 9 内径 12.5 cm 倾斜上升管内倾斜油水两相流流型图

和 D W/O 流型则由电导传感器信号直接识别得到.倾斜油水两相流流型图可为基于流型的油水两相流分相流量测量提供参考.

6. 结 论

基于面积、长轴、短轴的吸引子周界形态描述方法可对常规信号有效识别.吸引子面积形态描述方法对水为连续相的 D O/W PS 和 D O/W CT 流型均

具有较好的分类效果.基于长轴和短轴的吸引子形态描述方法取决于吸引子主轴和副轴上的 4 个端点,因此其鲁棒性较差.在实际应用中以吸引子矩和面积的增长率为特征量的吸引子形态描述方法稳定可靠,且计算快速,是解决吸引子具有闭合特点的较好的模式分类方法.本文所定义的吸引子面积及其增长率描述了吸引子形态随时间延迟增长的演化过程的特点,不受嵌入时间延迟的影响,是对吸引子矩形态描述方法的有益补充.

- [1] Mobbs S D , Lucas G P 1993 *Appl. Sci. Res.* **51** 263
- [2] Lucas G P 1995 *The Chem. Eng. J.* **56** 167
- [3] Tabeling P , Pouliquen O , Theron B , Catala G 1991 *Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow Production* , Cannes , France .
- [4] Wang L F , Ye W H , Li Y J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3038 (in Chinese) [王立锋、叶文华 2008 *物理学报* **57** 3038]
- [5] Liu J H , Zhang H G , Feng J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6868 (in Chinese) [刘金海、张化光、冯 健 2008 *物理学报* **57** 6868]
- [6] Annunziato M , Abarbanel H D I 1999 *Proceedings of Int. Conf. on Soft Computing* , Genova , Italy
- [7] Xiao N , Jin N D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5149 (in Chinese) [肖 楠、金宁德 2007 *物理学报* **56** 5149]
- [8] Abarbanel H D I , Brown R , Sidorowich J J *et al* 1993 *Rev. Mod. Phys.* **65** 1331
- [9] Xu Z , Ge J G , Xu Q P *et al* 2000 *J. Biomed. Eng.* **17** 433 (in Chinese) [徐 征、葛霁光、徐秋萍等 2000 *生物医学工程学杂志* **17** 433]
- [10] Llauro F X , Llop M F 2006 *Int. J. Multiphase Flow* **32** 1397
- [11] Lee J Y , Kim N S , Ishii M 2008 *Nucl. Eng. Des.* **238** 945
- [12] Zheng G B , Jin N D , Jia X H *et al* 2008 *Int. J. Multiphase Flow* **34** 1031
- [13] You R Y , Chen Z , Xu S C , Wu B X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2882 (in Chinese) [游荣义、陈 忠、徐慎初、吴伯儒 2004 *物理学报* **53** 2882]
- [14] Cong R , Liu S L , Ma R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7487 (in Chinese) [丛 蕊、刘树林、马 锐 2008 *物理学报* **57** 7487]
- [15] Li Y , Xu K , Yang B J , Yuan Y , Wu N 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3353 (in Chinese) [李 月、徐 凯、杨宝骏、袁 野、吴 宁 2008 *物理学报* **57** 3353]
- [16] Mukherjee H , Brill J P , Beggs H D 1981 *Transactions of the ASME* **103** 56
- [17] Vigneaux P , Chenais P , Hulin J P 1988 *AIChE J.* **34** 781
- [18] Flores J G , Chen X T , Sarica C *et al* 1999 *SPE Production & Facilities* **14** 102
- [19] Lucas G P , Jin N D 2001 *Meas. Sci. Technol.* **12** 1529
- [20] Zong Y B , Jin N D , 2008 *Eur. Phys. J. Special Topics* **164** 165
- [21] Takens F 1981 *Dynamical system and turbulence , Lecture Notes in Mathematics* (Berlin : Springer-Verlag) 366

- [22] Lorenz E N 1963 *J. Atmos. Sci.* **20** 130 Chinese)[金宁德、董 芳、赵 舒 2007 物理学报 **56** 720]
[23] Jin N D , Dong F , Zhao S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 720 (in [24] Jin N D , Zhao X , Wang J *et al* 2008 *Meas. Sci. Technol.* **19** 045403

The perimeter measure analysis of chaotic attractor morphology of inclined oil-water two phase flow patterns^{*}

Zong Yan-Bo Jin Ning-De[†] Wang Zhen-Ya Wang Zhen-Hua

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

(Received 14 January 2009 ; revised manuscript received 7 April 2009)

Abstract

In two-dimensional phase space , the attractor morphology parameters of perimeter measures , such as area , lengths of long axis and short axis , are defined , and the variations of these parameters with the delay time are investigated . It was found that the growth rates of the above parameters do not change notably in the first zone during the attractor unfolding process , which is suitable for attractor morphology characterization . The classification effectiveness of this method is verified by applying it to simulating signals , such as sine signal , white noise , mixed signals and Lorenz signals . By the experiment of inclined oil-water two phase flow , the conductance signals were acquired from the vertical multi-electrode array sensor , and the water dominated inclined oil-water flow patterns are analyzed by using the attractor morphology parameters and we found that the growth rate of area is an invariant quantity of attractor morphology , which can give a good classification of dispersion of oil in water-pseudoslugs flow and dispersion of oil in water-countercurrent flow .

Keywords : inclined oil-water two phase flow , flow patterns classification , attractor morphology , perimeter measure

PACC : 0545 , 4752

^{*} 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 : ndjin@tju.edu.cn