

油气水三相流段塞流不稳定周期轨道探寻*

赵俊英 金宁德[†] 高忠科

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2012年8月16日收到; 2012年11月12日收到修改稿)

将临近点回归方法与自适应阈值法相结合, 对油气水三相流段塞流进行了不稳定周期轨道探寻分析, 发现乳状段塞流比水包油段塞流的低阶不稳定周期轨道周期更长. 水包油段塞流的低阶轨道由内部小循环到外部大循环的嵌套结构组成, 乳状段塞流的低阶轨道则由两个平滑的大循环嵌套而成. 结合时频域分析, 发现水包油段塞流的能量分布弥散、频谱范围较宽且频率成分复杂, 而乳状段塞流的能量分布较集中、高频成分较少, 证实水包油段塞流比乳状段塞流流动机理更为复杂, 且时频域分布与低阶不稳定周期轨道结构相对应.

关键词: 油气水三相流段塞流, 不稳定周期轨道, 自适应阈值, 时频分布

PACS: 47.55.Ca, 47.52.+j

DOI: 10.7498/aps.62.084701

1 引言

油气水三相流现象在油井生产及油气运输中广泛存在, 其流动结构远比气液或油水两相流复杂及多变, 属于典型非线性动力学系统. 对其研究一般以传感器优化设计为基础, 通过实验测量与信号分析研究流型、相态逆转、压降和相含率等流动特性^[1-4]. 通过功率谱密度、时频分布、软测量等手段对数据的分析有助于从能量及运动角度认识其流动结构和特点^[5-7]. 通过对典型混沌特征量的提取研究可以更好地理解流型非线性动力学特性^[8-11].

段塞流是多相流研究中经常出现的流型, 理解段塞流中气塞与含泡液塞间相互作用机制有助于流动参数测量及流动稳定性控制. 对于段塞流流动特性研究, 主要有稳态模型分析、实验测试、瞬态数值模拟等手段. Dukler 和 Hubbard^[12] 最早建立了水平管气液两相流段塞流的数学模型, 此后, 在段塞流平均空隙率、液塞长度和液塞频率物理模型研究方面取得了一定进展^[13-15]. 针对油井多相流测试的实际需要, 通过先进传感器获取段塞流波动信号以及对实验数据的有效分析则是理解段塞流

流动特性的另一重要手段. Taitel 和 Barnea^[16] 研究了倾斜管段塞流压降计算方法; van Hout 等^[17] 用光纤探针传感器对气液两相流段塞流演化机理和统计特性进行了实验研究; Yun 等^[18] 用高速摄像方法研究了微矩形管中的三相流段塞流液塞长度特性; 刘夷平等^[19] 利用压力脉动、压力信号振幅和液塞速度三种特征辨识拟段塞流和段塞流. 与模型分析和实验测试相比, 采用数值模拟可考察诸如有些模型实验不能满足的实际流动情况. Taha 和 Cui^[20] 用计算流体力学 (CFD) 方法考察了垂直管道中的段塞流特性; 高嵩等^[21] 发展了对严重段塞流的计算流体力学方法, 并有效地建立了立管入口参数的段塞流演化理论模型. 此外, 非线性分析方法的引入有助于理解段塞流流动机理及运动特性^[22,23]. 本文从混沌运动不稳定周期轨道特点研究油气水三相流段塞流流动机理, 为油气水三相流水包油段塞流和乳状段塞流流动特性认识提供一种新的途径.

混沌运动的基本特征之一是运动轨道的不稳定性. “不稳定周期轨道” (unstable periodic orbits, UPO) 是构成吸引子结构的“骨架”, 吸引子的诸多特征量 (如关联维数、拓扑熵等) 都可以通过 UPOs 计算得到^[24-28]. 从实验数据中提取

* 国家自然科学基金 (批准号: 41174109, 50974095, 61104148) 和国家科技重大专项 (批准号: 2011ZX05020-006) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: ndjin@tju.edu.cn

UPOs, 进而研究复杂系统的内部结构与机理, 在生物信息处理 [29–31]、心电信号处理 [32,33]、化学振荡反应 [34–36]、海洋湍流研究 [37,38] 以及通信信号传输 [39,40] 等领域已经得到了较广泛的应用. 对混沌不稳定周期轨道的运动特性研究在系统的稳定性控制研究中也引起了相关学者的极大关注 [41,42], 并取得了较好的研究成果.

混沌不稳定周期轨道不随吸引子的具体形态而改变, 对其提取与分析有助于理解和掌握非线性系统的内在混沌动力学特性. 其中, 根据不同的动力学系统特点, Pei 等 [43] 对从实验数据中提取 UPOs 方法归纳为: 临近点回归 (close returns, CR) [34,44]、拓扑递归 (topological recurrence, TR) [29,45] 和动力学变换 (dynamical transformation, DT) [46,47] 等三种主要方法. 其中 CR 方法适用于平稳的噪声小的长时间序列, 最多可探测到 30 阶的 UPO; TR 方法多用于生物信息系统数据, 适用于较短的非平稳序列; DT 方法适用于离散序列. TR 方法和 DT 方法一般只能探测到 3 阶或 4 阶的 UPO. 此外, 基于符号动力学的 UPOs 提取方法 [48] 多用于生物信息处理, 本课题组基于有向加权复杂网络的 UPOs 提取方法 [49] 证实了网络递归阈值系数是判定 UPOs 是否存在的有效指标.

本文在 CR 方法的基础上, 将自适应阈值方法 [26] 与之结合, 提取了油气水三相流段塞流的低阶 UPOs, 探寻了油气水三相流段塞流和乳状段塞流的低阶 UPOs, 同时结合时频域分析方法, 对两种不同三相流段塞流的低阶 UPOs 特征进行分析比较, 为油气水三相流段塞流内部流动机制提供了新的认识.

2 UPOs 提取

2.1 UPOs 特征值

对于 \mathbb{R}^d 空间的一个平滑可逆映射

$$\mathbf{x}_{n+1} = M(\mathbf{x}_n), \quad (1)$$

k 周期的轨道即为包含 k 个矢量点的序列 $\{\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_{k-1}\}$, 其中

$$\mathbf{P}_j = M^j(\mathbf{P}_0) \quad (j = 0, 1, \dots, k-1), \quad (2)$$

且满足

$$M^k(\mathbf{P}_0) = \mathbf{P}_0. \quad (3)$$

轨道的稳定性取决于 \mathbf{P}_0 点的雅可比矩阵 $DM^k(\mathbf{P}_0)$ 的特征值 $\{\lambda_j\}_{j=1}^d$. 当所有特征值满足 $|\lambda_j| < 1$ 时,

\mathbf{P}_0 点形成一个“汇”, 所有临近的轨线最终汇集到该点; 当所有特征值满足 $|\lambda_j| > 1$ 时, \mathbf{P}_0 点形成一个“源”, 所有临近轨线最终沿不稳定的方向远离“源”点; 当特征值满足一部分 $|\lambda_j| < 1$ 时, 而另一部分 $|\lambda_j| > 1$ 时, \mathbf{P}_0 点就是不稳定的, 其临近轨道首先沿趋向 \mathbf{P}_0 点的方向演化, 轨线在 k 周期轨上循环一段时间之后, 沿远离 \mathbf{P}_0 点的方向演化, 这时形成了稠密的 UPOs 鞍轨道.

2.2 CR 方法与自适应阈值相结合的 UPOs 提取

CR 方法对 UPOs 的提取思想是基于相空间中回归点的重复出现. 其提取步骤为: 首先对原始时间序列进行相空间重构 [50]. 对任一时间序列 $z(it)$, $i = 1, 2, \dots, M$ (其中 t 为采样间隔, M 为采样点总数), 恰当选取嵌入维数 m 和延迟时间 τ 后, 重构相空间中的向量点 \mathbf{X}_i 可表示为

$$\mathbf{X}_i = \{z(it), z(it + \tau), \dots, z(it + (m-1)\tau)\}, \quad (4)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, N$, $N = M - (m-1) \cdot \tau/t$ 为相空间中的总点数. 其次, 选取阈值 $\varepsilon > 0$, 考查 \mathbf{X}_i 的映射 $\mathbf{X}_{i+1}, \mathbf{X}_{i+2}, \dots$, 直到找到满足 $|\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_i| < \varepsilon$ 的最小的 k , 令 $p = k - i$, 则称 \mathbf{X}_i 是一个 (p, ε) 回归点, 如果存在多个这样的 (p, ε) 回归点, 则认为在周期 $P = p$ 处存在不稳定周期轨道.

在 UPOs 探测中, 递归阈值的选取非常关键. 如果阈值取的过小, 则会使得某些轨道探测不到; 阈值选取太大, 会使得某些非轨道上的数据被错误地当成是 UPOs. 考虑到阈值的选取对 CR 方法影响较大, 我们将自适应阈值方法 [26] 与之相结合, 将错误的回归点数降至最低, 又尽可能地保证轨道判断的精度. 自适应阈值取值可表示为

$$\varepsilon_i^2 = a_1 \frac{1}{\tau} \sum_{k=i-\tau/2}^{k=i+\tau/2} \|\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_{k-1}\|^2, \quad (5)$$

其中 τ 是重构相空间选取的延迟时间, a_1 是一个自由参数, 一般取 $a_1 \approx 0.5$, 据此原则, 阈值总是略小于相空间中相邻点对的距离. 当相空间流形演化速度较快时, 点对之间距离较大, ε 取值较大, 以尽可能地探测到 UPOs; 当流形演化较慢时, 点对之间距离较小, 轨道稠密分布, ε 取值较小, 以精确的判定相空间的点是否属于相应的 UPOs, 从而最大限度地减小 UPOs 探测中的误差.

应用 CR 方法对 Rössler 系统 x 分量计算 UPOs 回归谱. 其中 Rössler 系统方程如 (6) 式所示, 采用

四阶龙格-库塔法解方程, 迭代步长为 0.12, 取 x 分量的 5000 点作为考查序列, 相空间重构选取嵌入维数 $m = 3$, 延迟时间 $\tau = 20$, 递归阈值选取参照 (5) 式.

$$\begin{cases} dx/dt = -y - z, \\ dy/dt = x + 0.2y, \\ dz/dt = 0.2 + z(x - 5.7). \end{cases} \quad (6)$$

Rössler 系统 x 分量的 UPOs 回归谱如图 1 所示, 其中横坐标 p 表示相应的 UPOs 周期, 纵坐标 N 表示在该周期上存在的 UPO 轨道数量. 峰值分布高低不同表示各阶 UPOs 在混沌鞍轨道上徘徊演化的时间不同, 从而表明相应的轨道稳定性差异. 对于图 1 的 Rössler 系统回归谱, 取各峰值处对应的 p 值即可得到轨道周期 $p = 49, 98, 146, 196, \dots$, 从满

足相应回归周期的点集中选取合适的起始点, 使轨道演化 p 时间长度, 即得到周期为 p 的不稳定周期轨道. 提取得到的 Rössler 系统 1 阶和 3 阶 UPOs 如图 2 所示.

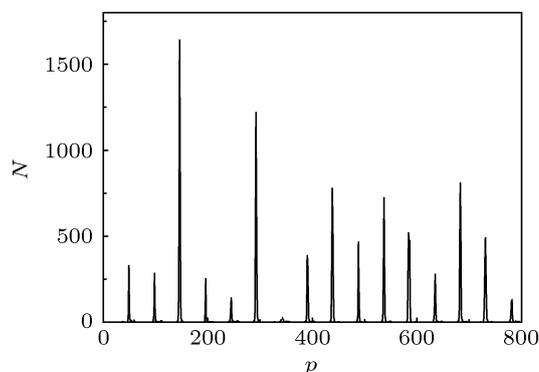


图 1 Rössler 系统 x 分量的 UPOs 回归谱

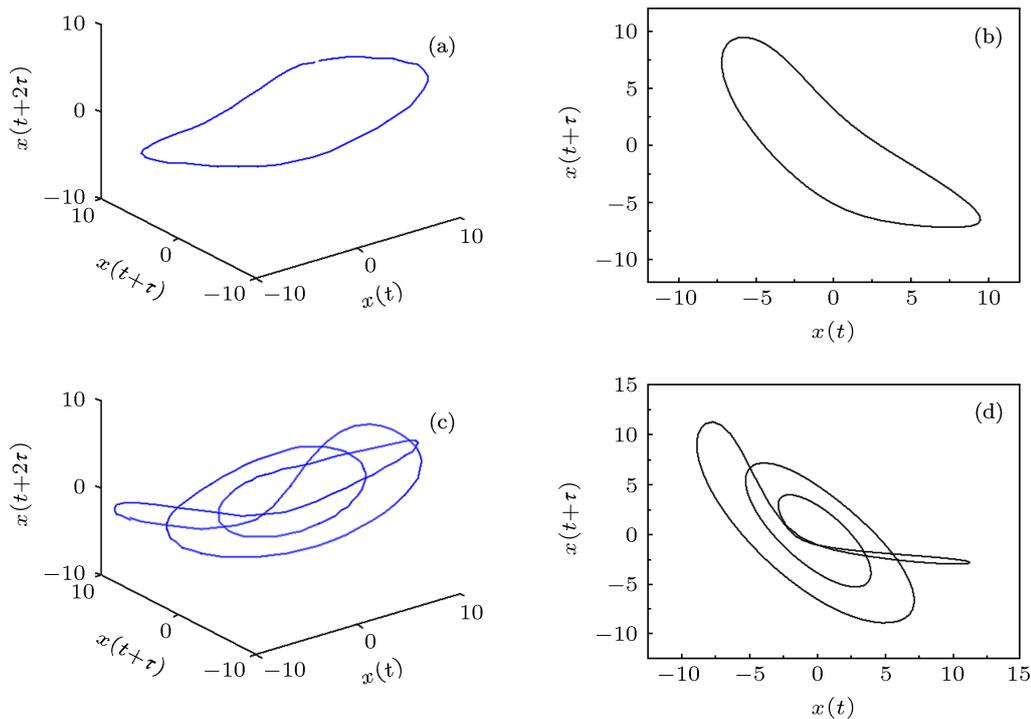


图 2 Rössler 系统的 UPOs (a), (b) UPO-1 及其二维投影; (c), (d) UPO-3 及其二维投影

2.3 UPOs 提取中嵌入参数及噪声的影响

2.3.1 嵌入参数影响

在 2.2 节的 Rössler 系统 UPOs 提取中, 选取了嵌入维数 $m = 3$, 延迟时间 $\tau = 20$. 图 3(a) 为改变嵌入维数为 $m = 5$ 时得到的回归谱, 图 3(b) 为改变延迟时间 $\tau = 30$ 时得到的回归谱. 与图 1 比较, 图 3(a), (b) 中峰值出现的位置依然是 $p = 49, 98, 146, 196, \dots$, 只是峰值的高低有变化, 说明相空间嵌入

参数的改变对 CR 方法的 UPOs 探测影响较小.

另一方面, 虽然相空间嵌入参数的改变使得吸引子形态随之变化, 但 UPOs 作为系统的拓扑特征量, 其周期大小不随吸引子的具体形态而改变, 即无论混沌系统在何种表现形式下, 其不稳定周期轨道始终存在. 由此可见, UPOs 作为混沌动力系统的内在不变量, 可以揭示动力系统的内在本质结构.

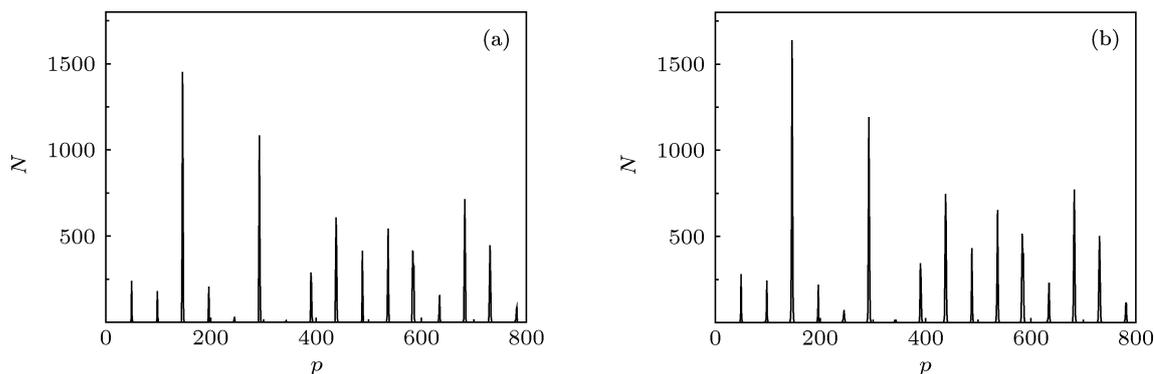


图3 嵌入参数对 UPOs 回归谱的影响 (a) $m = 5, \tau = 20$; (b) $m = 3, \tau = 30$

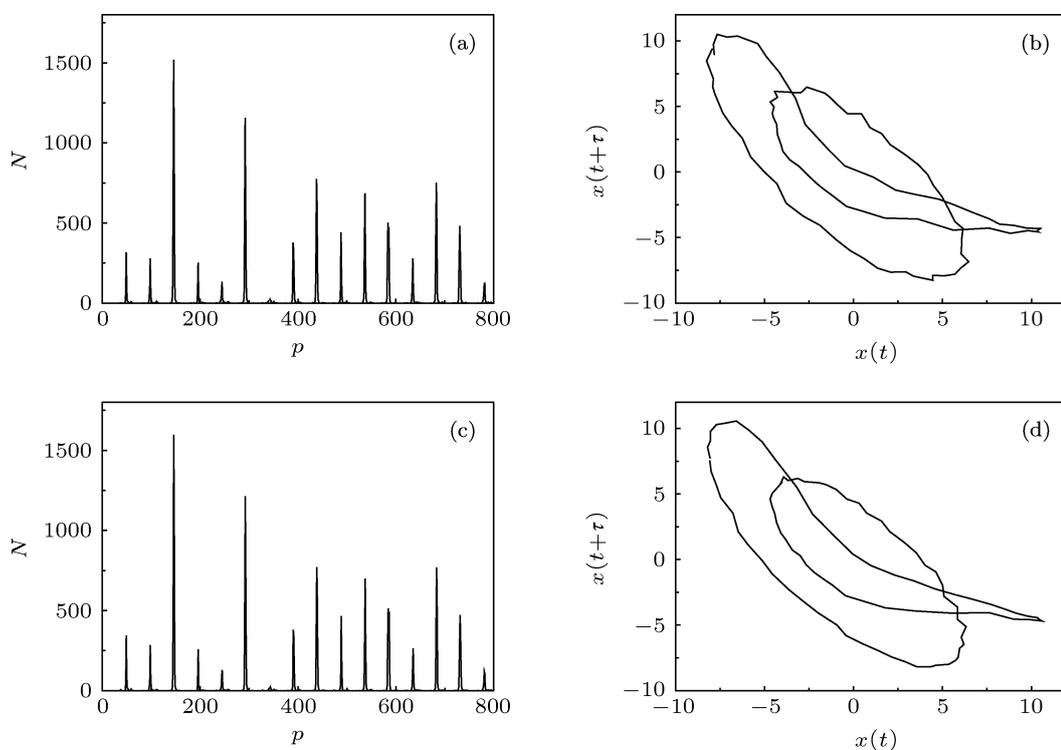


图4 Rössler 加噪数据回归谱及其 UPO-2 投影 (a), (b) SNR = 15 dB; (c), (d) SNR = 20 dB

2.3.2 抗噪鲁棒性分析

为考查 CR 方法的抗噪性, 以 Rössler 序列为例, 分别加入信噪比为 15 和 20 dB 的噪声, 考查其回归谱和 UPOs 提取情况. 图 4 为加入噪声的 Rössler 序列 x 分量回归谱及其二阶 UPO 投影.

由图 4 可见, 噪声的加入对于 UPOs 的探测有一定影响^[51]. 加噪之后的 UPOs 回归谱各峰值较未加噪的信号峰值有所降低, 且各峰值处谱线弥散区间加大, 对 UPO 周期的准确判断造成一定干扰. 另一方面, 峰值出现的位置并未明显变化, 说明探测出的轨道周期受噪声影响较小.

3 油气水三相流段塞流不稳定周期轨道

3.1 三相流电导传感器波动信号获取

在内径为 125 mm 管径中, 采用电导传感器采集了垂直上升管中低流速油气水三相流电导波动信号. 本次实验的流量范围分别为: 液相总流量 20—80 m³/d, 含油率 f_o 范围为 0.1—0.8, 气相流量为 8—180 m³/d, 实验共获取了水包油泡状流、水包油泡状 - 段塞过渡流、水包油段塞流、乳状泡

状-段塞过渡流、乳状段塞流和油包水段塞流六种流型. 图 5 给出了三种主要流型示意图. 水包油段塞流和乳状段塞流电导波动信号如图 6 所示. 图

中 U_{so} , U_{sg} , U_{sw} 分别表示为油相, 气相及水相表观流速.

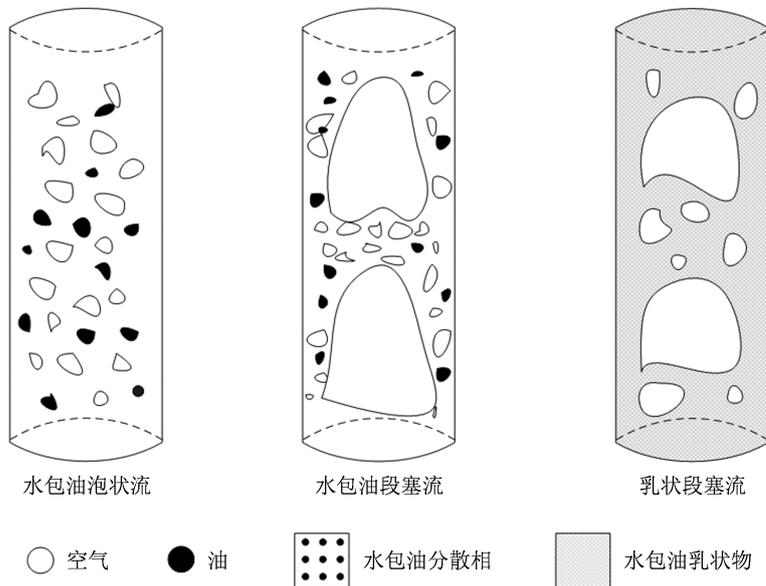


图 5 垂直上升油气水三相流三种典型流型示意图

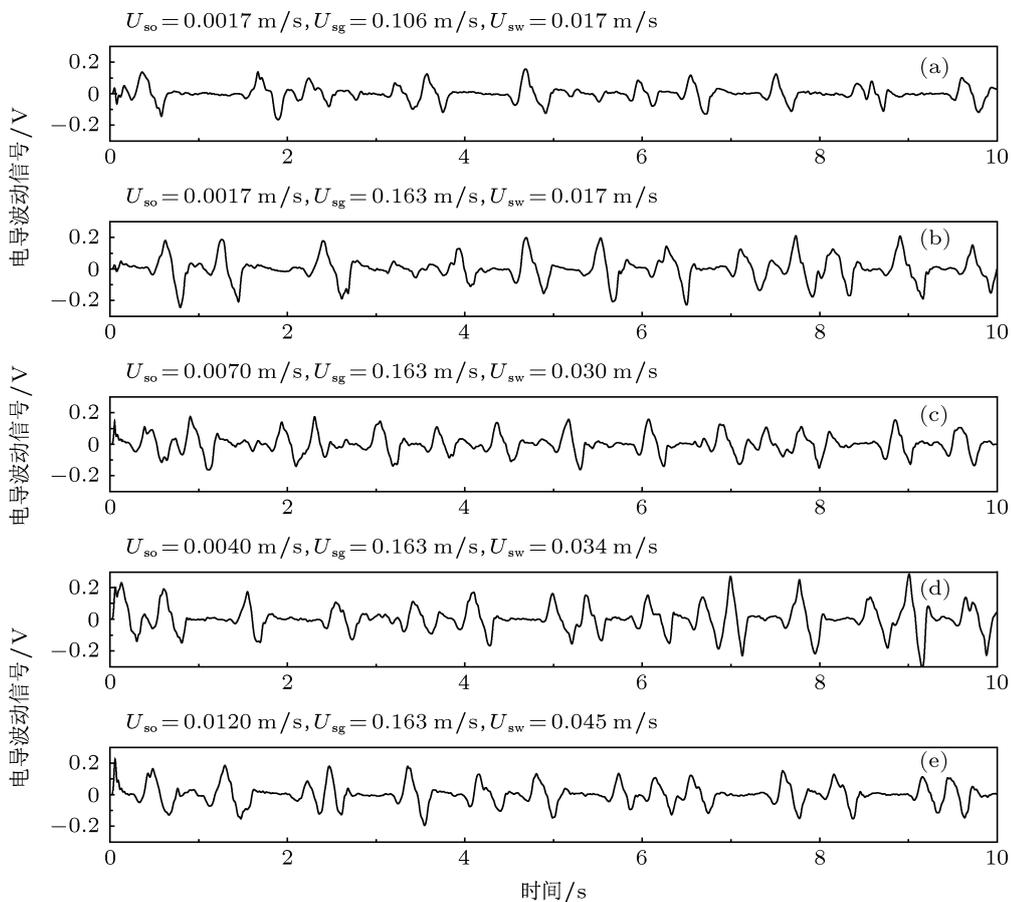


图 6 典型三相流段塞流电导波动信号 (a)–(e) 水包油段塞流; (f)–(j) 乳状段塞流

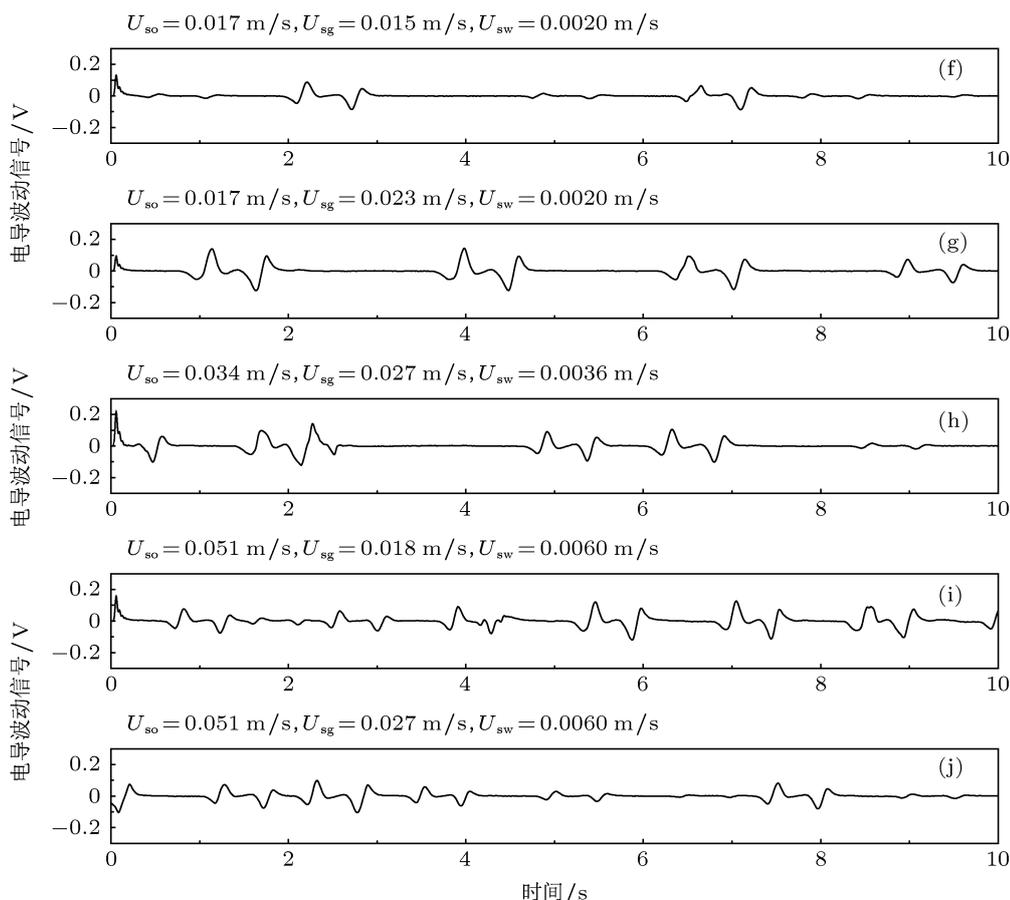


图6 典型三相流段塞流电导波动信号 (a)—(e) 水包油段塞流; (f)—(j) 乳状段塞流 (续)

3.2 水包油段塞流和乳状段塞流 UPOs 提取

首先,对三相流段塞流电导波动信号进行相空间重构.由2.3.1小节讨论可知,相空间嵌入参数的

选取对UPOs回归谱峰值的出现位置影响不大,这里选取了嵌入维数 $m=3$,延迟时间 $\tau=50$ ms(采样频率 τ_s 为400Hz, $\tau=20\tau_s$).得到水包油段塞流和乳状段塞流的重构相空间吸引子二维投影如图7所示.

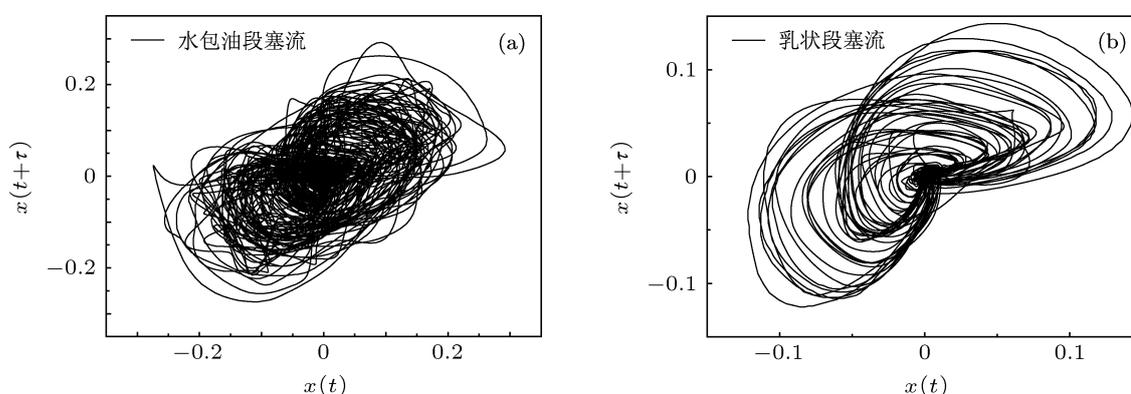


图7 油气水三相流段塞流吸引子二维投影 ($m=3, \tau_s=50$ ms) (a) 水包油段塞流吸引子二维投影 ($U_{so}=0.012$ m/s, $U_{sg}=0.163$ m/s, $U_{sw}=0.045$ m/s); (b) 乳状段塞流吸引子二维投影 ($U_{so}=0.051$ m/s, $U_{sg}=0.018$ m/s, $U_{sw}=0.006$ m/s)

应用CR方法,对油气水三相流水包油段塞流和乳状段塞流电导波动信号进行UPOs提取.每个流动工况取15000个采样点(37.5s),由于实验数

据不可避免地含有噪声及干扰信号,故实验测量信号的UPOs回归谱线与典型混沌信号对应的UPOs回归谱线有所不同,尤其是在高阶UPOs对应的峰

值分布上. 考虑到低阶 UPOs 中包含了混沌动力学系统的主要信息 [52], 我们给出了谱线中明显低阶 UPOs 对应的峰值, 其相应的水包油段塞流和乳状段塞流 UPOs 回归谱如图 8 所示.

由图 8 得到的水包油段塞流和乳状段塞流回归谱可见, 水包油段塞流的低阶 UPOs 在 $p < 400$ 时就有峰值谱线出现, 而乳状段塞流的低阶 UPOs 峰值谱大多出现在 $p > 500$ 时, 表明探测的乳状段塞流低阶 UPOs 对应的周期较长. 根据图 8 所示的 UPOs 回归谱, 可提取水包油段塞流和乳状段塞流的低阶 UPOs 如图 9 及图 10 所示.

对于水包油段塞流低阶 UPOs (图 9), 其主要发生在水为连续相、含油率较低、气相含率逐渐增大的过程中; 随着气量增大, 分散气泡聚并成大的气塞 (gas slug), 而连续相液塞 (liquid slug) 中含有分散气泡及油泡, 这种气塞与含泡 (气泡、油泡) 液塞之间的间歇性拟周期运动导致了水包油段塞流低阶 UPOs 轨道的大循环 (气塞运动) 及小循环 (液

塞运动) 嵌套结构出现, 这些低阶 UPOs 构成了水包油段塞流的“骨架”. 值得指出的是: 由于含泡液塞中存在两个分散相复杂相互作用, 其 UPOs 中的大循环及小循环嵌套结构特征随流动工况变化呈现复杂多变的轨道形态, 这与本课题组探寻气液两相流段塞流 UPOs 结果较为接近 [53].

对于油气水三相流乳状段塞流低阶 UPOs (图 10), 其主要发生在含油率较高且气相含率较大的流动工况. 随着油水乳化, 油气水三相主要以气塞及乳化状液塞 (无明显油水分散界面) 的间歇性拟周期运动为主, 使得其低阶 UPOs 呈现为两个大循环的嵌套结构, 且轨线平滑, 毛刺少; 特别是其 UPOs 中的两个大循环的嵌套结构特征基本不随流动工况变化, 表明气塞与乳化状液塞运动相对简单, 动力学复杂性降低, 这与本课题组基于近似熵或复杂性测度表征的三相流乳状段塞流动力学特性相一致 [11].

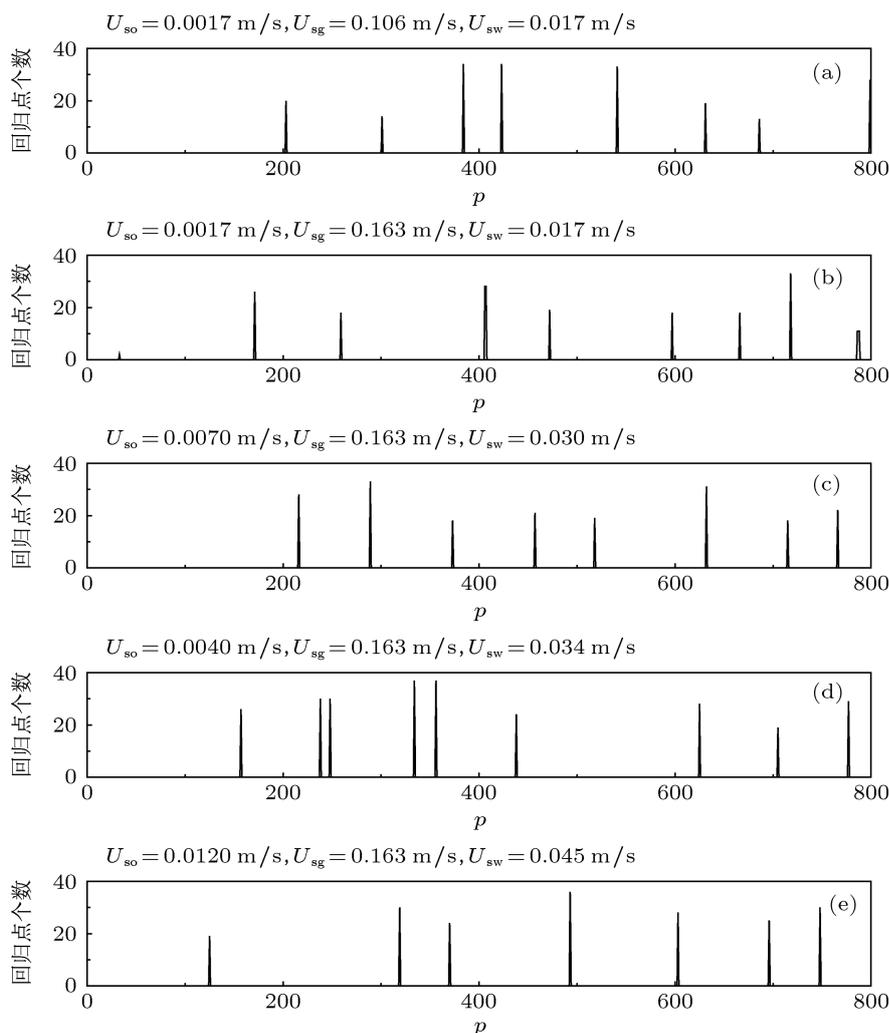


图 8 不同流动工况三相流段塞流 UPOs 回归谱 (a)—(e) 水包油段塞流 UPOs 回归谱; (f)—(g) 乳状段塞流 UPOs 回归谱

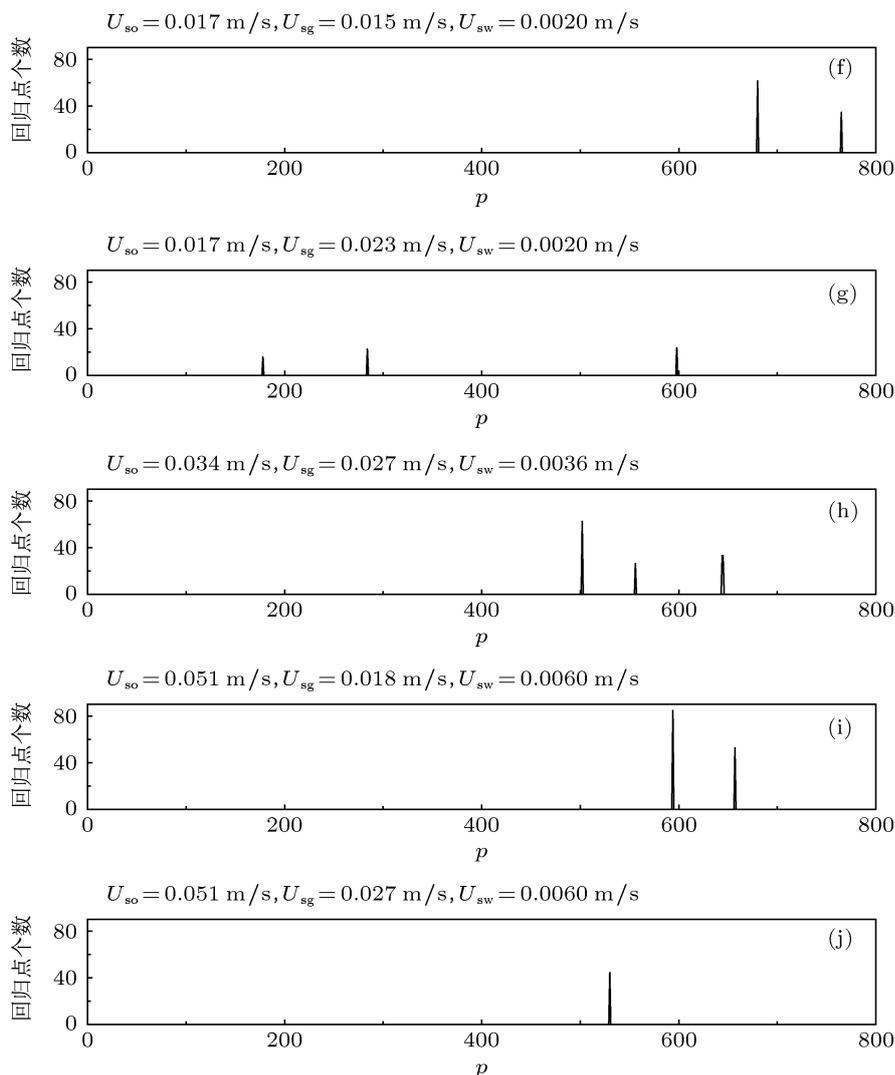


图8 不同流动工况三相流段塞流 UPOs 回归谱 (a)—(e) 水包油段塞流 UPOs 回归谱; (f)—(g) 乳状段塞流 UPOs 回归谱 (续)

4 水包油段塞流和乳状段塞流时频域分析

时频域分析方法已广泛应用于多相流信号处理 [54,55]. Jones 和 Baraniuk [56] 提出的自适应最优核 (AOK) 分布算法, 通过随信号自适应变化的高斯核, 有效地对时频平面内的交叉项进行了抑制, 同时又保持了较好的时频聚集性. AOK 算法已在两相流信号处理中取得了较好的效果 [6,57]. 本文将该方法应用于三相流水包油段塞流和乳状段塞流的信号分析中, 从时频分布角度分析这两种段塞流的流动特性.

自适应最优核时频分布可表示为

$$P(t, f) = \iint A(t, \tau, \nu) \Phi(\tau, \nu)$$

$$\times e^{-j2\pi(\tau\nu + \tau f)} d\tau d\nu, \quad (7)$$

式中 $\Phi(\tau, \nu)$ 为自适应最优核函数, ν 为频偏, τ 为时延, t 为时间, f 为频率, $A(t, \tau, \nu)$ 为短时模糊函数, 可以表示为

$$A(t, \tau, \nu) = \int s^* \left(u - \frac{\tau}{2} \right) \cdot \omega^* \left(u - t - \frac{\tau}{2} \right) \times s \left(u + \frac{\tau}{2} \right) \cdot \omega \left(u - t - \frac{\tau}{2} \right) \cdot e^{j\nu u} du, \quad (8)$$

其中 $\omega(u)$ 是对称的窗函数, t 是 $\omega(u)$ 的中心位置, 当 $|u| > T$ (T 是窗长) 时, $\omega(u) = 0$.

采用自适应最优核时频域分布算法可以将信号的细节充分刻画出来. 水包油段塞流和乳状段塞流电导波动信号时频域分布结果如图 11 和图 12 所示.

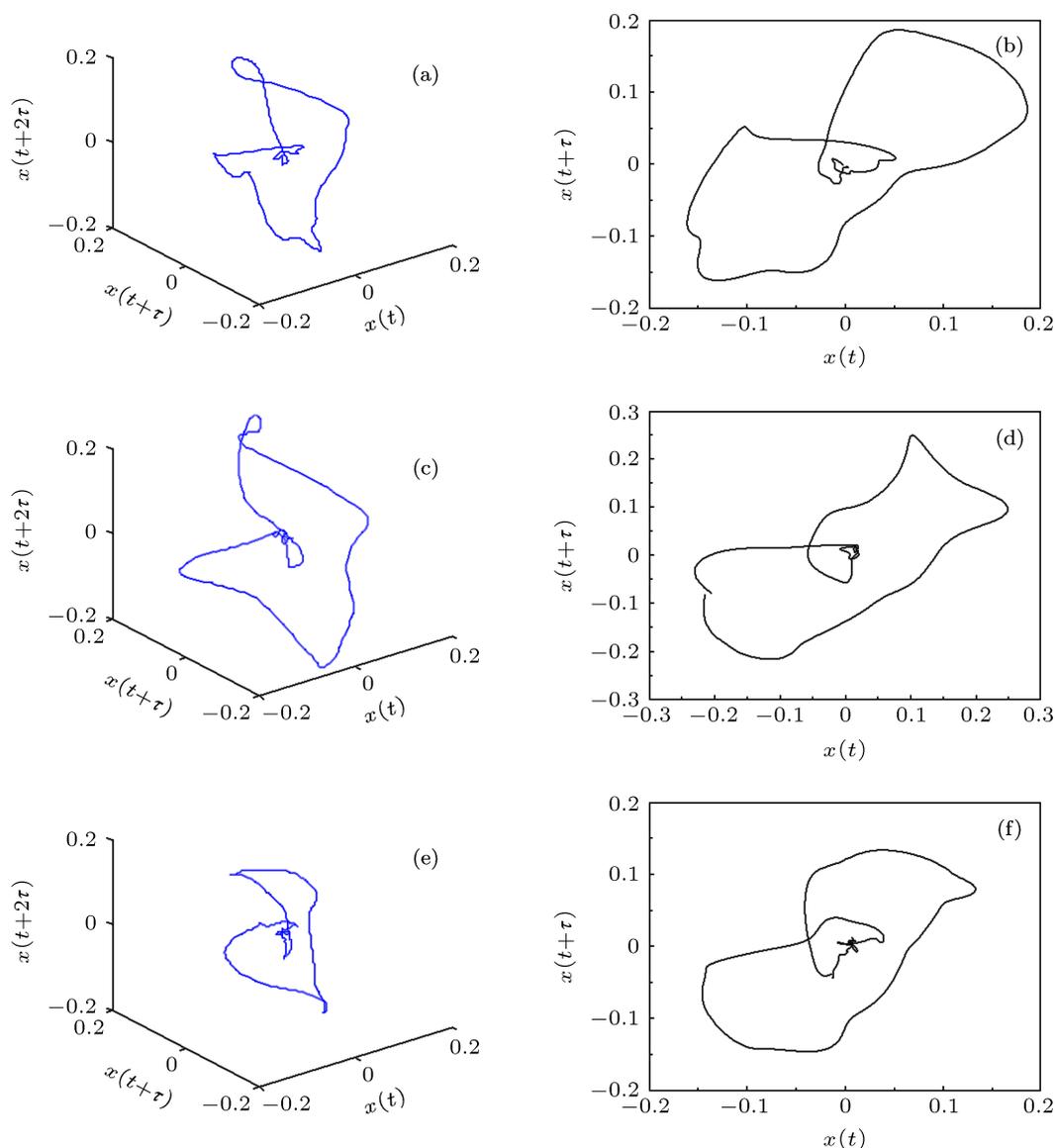


图9 水包油段塞流低阶 UPOs 及其二维投影 (a), (b) $U_{so} = 0.007$ m/s, $U_{sg} = 0.163$ m/s, $U_{sw} = 0.030$ m/s; (c), (d) $U_{so} = 0.004$ m/s, $U_{sg} = 0.163$ m/s, $U_{sw} = 0.034$ m/s; (e), (f) $U_{so} = 0.012$ m/s, $U_{sg} = 0.163$ m/s, $U_{sw} = 0.045$ m/s

由图 11 和图 12 对比可知, 水包油段塞流和乳状段塞流的频率分布主要集中在 0—10 Hz 范围内. 系统的能量主要由气塞与液塞交替运动形成. 对于水包油段塞流, 其能量分布较为弥散, 这主要是由分散油泡和气泡导致的高频运动成分所致; 而乳状段塞流的油水分散相已经充分乳化, 分散相油泡的作用已不再显现, 在时频域上体现出较窄的能量分布带.

从频域分布上看, 在 0—10 Hz 范围内, 水包油段塞流的频率成分丰富, 且仅有一个高的谱峰出现, 这主要是气塞与液塞 (含气泡、油泡) 复杂相互作用所致; 对于乳状段塞流, 出现了三个较为明显的间歇谱峰, 这是由于气相流量的增加使得油水充分

乳化, 液塞中分散油泡不再显现, 而气塞和乳化液塞的运动速度差异, 导致了两个较低的频率峰出现, 另外, 液塞中分散气泡导致频率最高的谱峰出现. 在 10—30 Hz 范围内, 水包油段塞流仍然有较低的谱线存在, 而乳状段塞流在此频域内则几乎没有频谱存在, 说明乳状段塞流频率组成成分较水包油段塞流频率成分简单, 尤其是 10—30 Hz 的高频成分几乎没有体现.

上述时频分布与图 9 及图 10 得到的水包油段塞流及乳状段塞流低阶 UPOs 特征较为一致, 即水包油段塞流表现为大小循环嵌套的低阶 UPOs 结构, 且轨道形态随流动工况呈现复杂变化, 而乳状

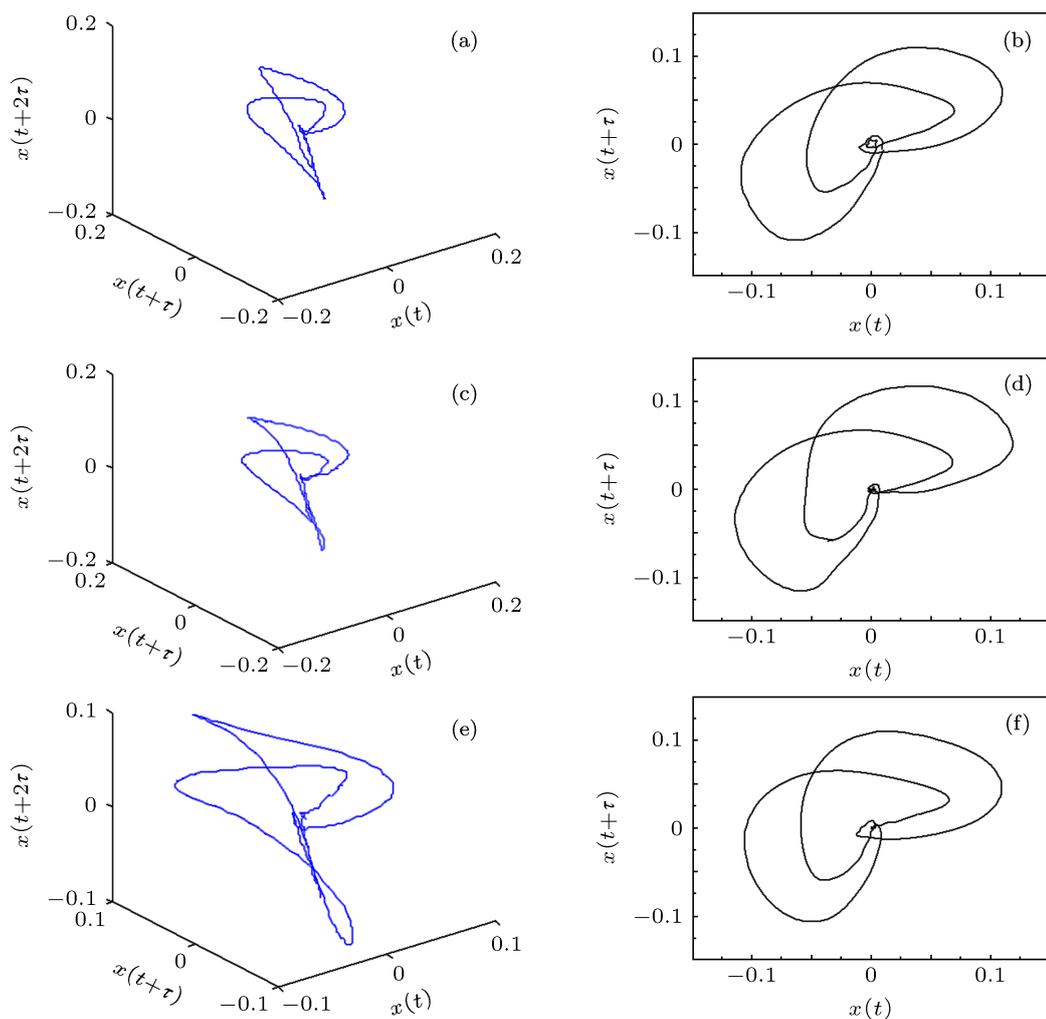


图 10 乳状段塞流低阶 UPOs 及其二维投影 (a), (b) $U_{so} = 0.034$ m/s, $U_{sg} = 0.027$ m/s, $U_{sw} = 0.0036$ m/s; (c), (d) $U_{so} = 0.051$ m/s, $U_{sg} = 0.018$ m/s, $U_{sw} = 0.006$ m/s; (e), (f) $U_{so} = 0.051$ m/s, $U_{sg} = 0.027$ m/s, $U_{sw} = 0.006$ m/s

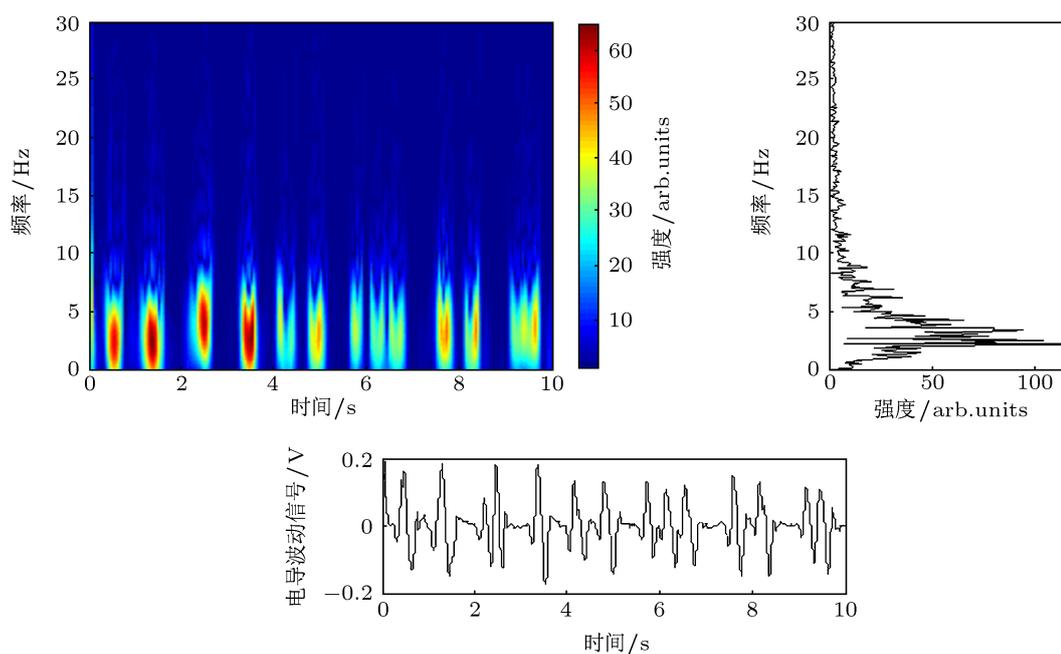


图 11 水包油段塞流的时频域分布 ($U_{so} = 0.012$ m/s, $U_{sg} = 0.163$ m/s, $U_{sw} = 0.045$ m/s)

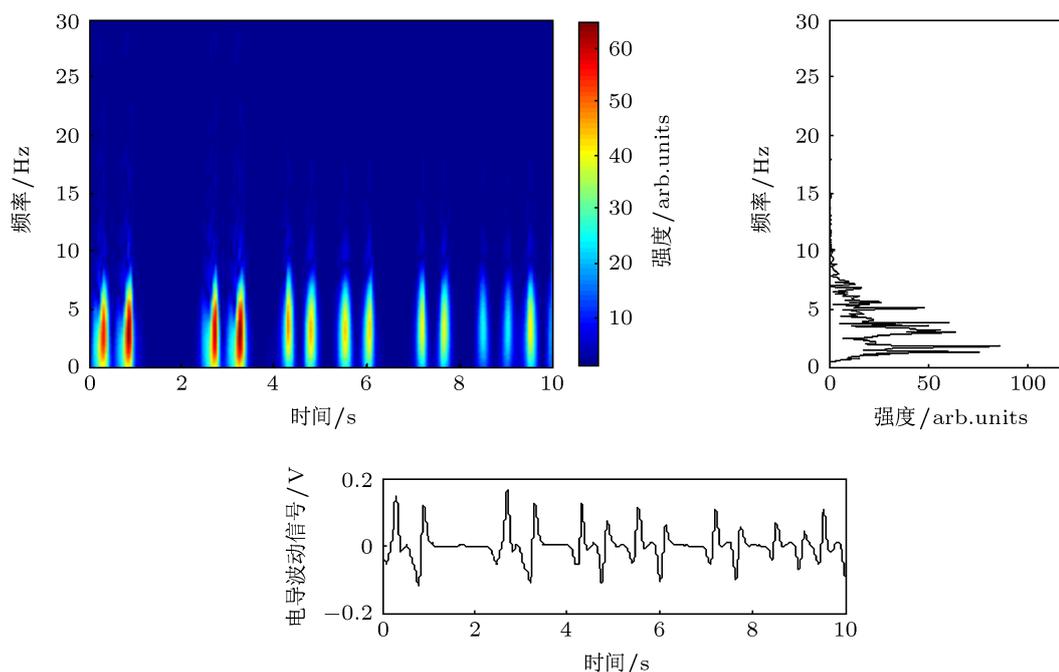


图 12 乳状段塞流的时频域分布 ($U_{s0} = 0.034$ m/s, $U_{sg} = 0.027$ m/s, $U_{sw} = 0.0036$ m/s)

段塞流表现为两个大循环嵌套的结构,且轨线平滑,结构较稳定.对于水包油段塞流,其中的外部大循环结构与时频域分布图中的低频最高谱峰对应,而低阶 UPOs 的内部小循环形态则复杂多变,与时频域的高频分量对应.对于乳状段塞流,其具有拟周期运动特性的气塞和乳化液塞(对应两个频率较低的谱峰)导致了乳状段塞流低阶 UPOs 中的两个外部循环嵌套结构,而分散气泡运动(对应频率最高的谱峰)具有随机性,在低阶 UPOs 中体现不出其运动特性.此外,水包油段塞流的频率成分丰富,高频成分较多,故在低阶 UPOs 上体现为随工况变化较大的特征;而乳状段塞流高频成分很少,故在其低阶 UPOs 上体现为轨线平滑、结构较稳定的特征.

5 总结

本文将不稳定周期轨道的 CR 提取方法与自适应阈值方法相结合,考察了相空间嵌入参数和噪声对 UPOs 提取的影响.应用该方法,对油气水三相流的水包油段塞流和乳状段塞流进行了低阶 UPOs 的探寻.结果表明,乳状段塞流比水包油段塞流的低

阶 UPOs 轨道周期更长.从提取出的低阶 UPOs 形态分析可知,水包油段塞流的低阶 UPOs 主要由内部小循环到外部大循环的嵌套结构组成,这是由其运动中的大气塞和含泡液塞共同作用的结果;而乳状段塞流的低阶 UPOs 则主要由两个大的循环嵌套而成,这是由于在高含油率和高气量的情况下气塞和乳化液塞拟周期运动的结果.

从时频域角度,对水包油段塞流和乳状段塞流运动特性进行了分析,表明水包油段塞流的频域分布更广且能量分布较弥散,这是分散相在水包油段塞流信号中的体现;而在乳状段塞流则无明显高频成分且能量分布也更加集中,这与其 UPOs 的平滑、稳定的结构相对应.因此,时频域分析结果与两种段塞流的低阶 UPOs 形态分析结论相一致,表明了不稳定周期轨道探寻分析在三相流段塞流动力学运动特性揭示上的有效性.

不稳定周期轨道作为混沌吸引子的拓扑不变量,构成了吸引子的“骨架”,混沌动力学系统的主要信息体现在其低阶 UPOs 上,故从不稳定周期轨道角度研究非线性动力学系统为揭示多相流复杂运动特性提供了一个新视角,有助于我们进一步认识多相流段塞流流动机理.

- [1] Tek M R 1961 *J. Pet. Tech.* **13** 1029
- [2] Shean A R 1976 *M. S. Thesis* (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology)
- [3] Thorn R, Johansen G A, Hammer E A 1997 *Meas. Sci. Technol.* **8** 691
- [4] Woods G S, Spedding P L, Watterson J K, Raghunathan R S 1998 *Chem. Eng. Res.* **76** 571
- [5] Farrar B, Bruun H H 1996 *Int. J. Multiphase Flow* **22** 733
- [6] Sun B, Wang E P, Zheng Y J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014701 (in Chinese) [孙斌, 王二朋, 郑永军 2011 物理学报 **60** 014701]
- [7] Wu H J, Zhou F D, Wu Y Y 2001 *Int. J. Multiphase Flow* **27** 459
- [8] Daw C S, Finney C E A, Vasudevan M, van Goor N A, Nguyen K, Bruns D D, Kostelich E J, Grebogi C, Ott E, Yorke J A 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 2308
- [9] Zhou Y L, Li H W, He Q Y 2008 *Chin. Soc. Elec. Eng.* **28** 49 (in Chinese) [周云龙, 李洪伟, 何强勇 2008 中国电机工程学报 **28** 49]
- [10] Fan L T, Neogi D, Yashima M, Nassar R 1990 *Aiche J.* **36** 1529
- [11] Wang Z Y, Jin N D, Gao Z K, Zong Y B, Wang T 2010 *Chem. Eng. Sci.* **65** 5226
- [12] Dukler A E, Hubbard M G 1975 *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **14** 337
- [13] Taitel Y, Dukler A E 1977 *Int. J. Multiphase Flow* **3** 585
- [14] Guet S, Decarre S, Henriot V, Liné A 2006 *Chem. Eng. Sci.* **61** 7336
- [15] Wang X, Guo L J, Zhang X M 2006 *Chin. J. Chem. Eng.* **14** 626
- [16] Taitel Y, Barnea D 1990 *Chem. Eng. Sci.* **45** 1199
- [17] van Hout R, Barnea D, Shemer L 2001 *Int. J. Multiphase Flow* **27** 1579
- [18] Yun J X, Lei Q, Zhang S H, Shen S C, Yao K J 2010 *Chem. Eng. Sci.* **65** 5256
- [19] Liu Y P, Zhang H, Wang J 2008 *J. Shanghai Jiaotong Univ.* **42** 1247 (in Chinese) [刘夷平, 张华, 王经 2008 上海交通大学学报 **42** 1247]
- [20] Taha T, Cui Z F 2006 *Chem. Eng. Sci.* **61** 665
- [21] Gao S, Li W, You Y X, Hu T Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 104701 (in Chinese) [高嵩, 李巍, 尤云祥, 胡天群 2012 物理学报 **61** 104701]
- [22] Sæther G, Bendiksen K, Müller J, Frøland E 1990 *Int. J. Multiphase Flow* **16** 1117
- [23] He L M, Zhao Q J, Chen Z Y 2003 *Proceeding of the CSEE* **23** 189 (in Chinese) [何利民, 赵庆军, 陆振瑜 2003 中国电机工程学报 **23** 189]
- [24] Auerbach D, Cvitanovic P, Eckmann J P, Gunaratne G, Procaccia I 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2387
- [25] Cvitanović P 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2729
- [26] Badii R, Brun E, Finardi M, Flepp L, Holzner R, Parisi J, Reyl C, Simonet J 1994 *Rev. Mod. Phys.* **66** 1389
- [27] Jin J X, Qiu S S, Xie L Y, Feng M K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2743 (in Chinese) [晋建秀, 丘水生, 谢丽英, 冯明库 2008 物理学报 **57** 2743]
- [28] Grebogi C, Ott E, Yorke J A 1988 *Phys. Rev. A* **37** 1711
- [29] Pei X, Moss F 1996 *Nature* **379** 618
- [30] So P, Francis J T, Netoff T I, Gluckman B J, Schiff S J 1998 *Biophys. J.* **74** 2776
- [31] Xie Y, Xu J X, Kang Y M, Hu S J, Duan Y B 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1112 (in Chinese) [谢勇, 徐健学, 康艳梅, 胡三觉, 段玉斌 2003 物理学报 **52** 1112]
- [32] Narayanan K, Govindan R B, Gopinathan M S 1998 *Phys. Rev. E* **57** 4594
- [33] Zhang J, Luo X D, Nakamura T, Sun J F, Small M 2007 *Phys. Rev. E* **75** 016218
- [34] Lathrop D P, Kostelich E J 1989 *Phys. Rev. A* **40** 4028
- [35] Mindlin G B, Solari H G, Natiello M A, Gilmore R, Hou X J 1991 *J. Nonlinear Sci.* **1** 147
- [36] Bi Q S 2010 *Sci. China Tech. Sci.* **53** 748
- [37] Kazantsev E 1998 *Nonlin. Processes Geophys.* **5** 193
- [38] Kazantsev E 2001 *Nonlin. Processes Geophys.* **8** 281
- [39] Heagy J F, Carroll T L, Pecora L M 1995 *Phys. Rev. E* **52** 1253
- [40] Long M, Qiu S S 2007 *Chin. Phys.* **16** 2254
- [41] Socolar J E S, Sukow D W, Gauthier D J 1994 *Phys. Rev. E* **50** 3245
- [42] Wu S H, Hao J H, Xu H B 2010 *Chin. Phys. B* **19** 020509
- [43] Pei X, Dolan K, Moss F 1998 *Chaos* **8** 853
- [44] Mindlin G, Gilmore R 1992 *Physica D* **58** 229
- [45] Pierson D, Moss F 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 2124
- [46] So P, Ott E, Schiff S, Kaplan D T, Sauer T, Grebogi C 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4705
- [47] So P, Ott E, Sauer T, Gluckman B J, Grebogi C, Schiff S 1997 *Phys. Rev. E* **55** 5398
- [48] Buhl M, Kennel M B 2007 *Chaos* **17** 033102
- [49] Gao Z K, Jin N D 2012 *Nonlin. Anal.: Real World Appl.* **13** 947
- [50] Takens F 1981 *Dynamical Systems and Turbulence* (Berlin: Springer Verlag) 366
- [51] Dhamala M, Lai Y C, Kostelich E J 2000 *Phys. Rev. E* **61** 6485
- [52] Hunt B R, Ott E 1996 *Phys. Rev. E* **54** 328
- [53] Gao Z K, Jin N D 2012 *Physica A* **391** 3005
- [54] Hervieu E, Seleglimb P 1998 *Nucl. Eng. Design* **184** 421
- [55] Jana A K, Das G, Das P K 2006 *Chem. Eng. Sci.* **61** 1500
- [56] Jones D L, Baraniuk R G 1995 *IEEE Trans. Sign. Proc.* **43** 2361
- [57] Du M, Jin N D, Gao Z K, Wang Z Y, Zhai L S 2012 *Int. J. Multiphase Flow* **41** 91

Detecting unstable periodic orbits from oil-gas-water three-phase slug flows*

Zhao Jun-Ying Jin Ning-De[†] Gao Zhong-Ke

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

(Received 16 August 2012; revised manuscript received 12 November 2012)

Abstract

We use the close return method combined with adaptive threshold selection to detect the unstable periodic orbits from the signals measured from experimental oil-gas-water three-phase slug flows, and find that the period of the emulsion type slug flow is longer than that of oil in water type slug flow. Especially, the orbit of oil in water type slug flow is basically composed of one big loop and one small loop, and the emulsion type slug flow orbit is composed of two big smooth loops. In addition, we employ the method of adaptive optimal kernel time-frequency representation to investigate the flow behaviors of two typical oil-gas-water three-phase slug flows and indicate that the energy of the oil in water slug flow exhibits a dispersed distribution and its frequency spectrum consists of various components distributes in a wide range. In contrast, the energy of emulsion type slug flow is distributed in a rather concentrated region and the high frequency component in its frequency spectrum is much less than that of the oil in water slug flow. These results are well consistent with the detected structure of unstable periodic orbit, further suggesting that the fluid mechanism underlying oil in water type slug flow is more complicated than that of the emulsion type slug flow.

Keywords: oil-gas-water three-phase slug flow, unstable periodic orbits, adaptive threshold, time-frequency distribution

PACS: 47.55.Ca, 47.52.+j

DOI: 10.7498/aps.62.084701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41174109, 50974095, 61104148) and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011ZX05020-006).

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