

油水两相流水包油流型多尺度排列熵分析*

杜萌 金宁德[†] 高忠科 朱雷 王振亚

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2012年3月14日收到; 2012年6月11日收到修改稿)

采用多尺度排列熵算法研究了垂直油水两相流水包油流型的多尺度动力学特性. 首先, 在内径为 20 mm 的垂直管道内采集了油水两相流水包油流型电导传感器波动信号, 然后计算了不同流动工况下电导波动信号的多尺度排列熵值. 研究发现多尺度排列熵率与均值可定量刻画水包油流型动力学复杂性; 此外, 提出了通过增量时间序列累积量与多尺度排列熵率联合分布识别三种不同水包油流型的新途径.

关键词: 油水两相流, 多尺度排列熵, 流体动力学

PACS: 05.45.Tp, 89.70.Cf, 47.61.Jd

1 引言

随着陆上油田开发进入中晚期开采阶段, 油井内油水混合液多呈高含水流动状态, 其油水两相流以水为连续相(水包油)流动形态占优. 为了实现油水两相流流动稳定性控制与预测, 理解油水两相流流型及其动力学特性对油井动态监测及油藏优化管理具有重要意义. 油水两相流研究方法包括流型测量与分类^[1], 混合流速及相含率测定^[2], 计算流体动力学(CFD)仿真^[3], 流动模型建立^[4]等. 由于两相流流型与流体湍流波动性质具有密切关系^[5], 两相流流体波动信号分析方法受到了广泛关注, 如概率密度函数(PDF)和功率谱密度函数(PSD)方法^[6,7], 时频域分析方法^[8-14], 非线性分析方法^[15-20]. 在油水两相流流动特性研究方面, Govier等^[21]早期在内径为 26.4 mm 管道中观察到了泡状流、段塞流、过渡流及乳状流. Flores等^[22]在 50 mm 管径内定义了油泡流、细小油泡流、混状流及油包水流型, 由于实验管径较大, Flores等并没有观察到水包油的段塞流出现. 本课题组采用电导探针在 20 mm 管径内观察到了细小油泡流、段塞流、油泡流及油包水流型, 并从能量及时频熵角度取得了流型较好识别效果^[23], 但在不同水包油

流型转化动力学行为理解方面尚存不足.

熵在表征非线性系统复杂程度的方面已取得较好进展^[24-33], 从不同尺度考察熵值变化特性有助于从微观及宏观上理解系统动力学行为^[34-41], 尤其是 Bandt 和 Pompe^[42]提出了排列熵算法, 通过统计相空间内各个向量的排列规律实现对系统复杂程度较好表征. 该算法具有较好的鲁棒性, 且快速易于实现. 排列熵算法已被广泛应用于时间序列复杂度及动力学特性分析^[43-47], 但将多尺度与排列熵结合方面报道较少. 本文将多尺度分辨特性与排列熵算法鲁棒性相结合, 研究将多尺度排列熵率与平均熵组合表征水包油流型动力学特性. 此外, 本文还提出了通过增量序列累积量和多尺度排列熵率联合分布识别不同水包油流型的新途径.

2 多尺度排列熵算法

Costa等^[34]提出了时间序列多尺度粗粒化方法如下.

首先将长度为 n 的时间序列 $\{u(i): i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行粗粒化处理, 其粗粒化过

* 国家自然科学基金项目(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.

[†] E-mail: ndjin@tju.edu.cn

程如下:

$$y^s(j) = \frac{1}{s} \sum_{i=(j-1)s+1}^{js} u(i), \quad 1 \leq j \leq n/s, \quad (1)$$

其中 s 为尺度因子, $y^s(j)$ 为不同尺度下粗粒化时间序列. 值得指出的是当尺度为 1 时 ($s = 1$), 粗粒化时间序列即为原始时间序列.

在提取不同尺度时间序列的基础上, 根据排列熵算法^[42], 可计算不同尺度下粗粒化时间序列的熵值, 即多尺度排列熵 (MSPE). 对不同尺度的粗粒化序列进行相空间重构:

$$\mathbf{Y}^s(t) = [y^s(t), y^s(t + \tau), \dots, y^s(t + (m - 1)\tau)], \quad t \in [1, n/s - m + 1], \quad (2)$$

其中 m 为嵌入维数, τ 为延迟时间. 将向量 $\mathbf{Y}^s(t)$ 的 m 个分量进行升序排列, 即

$$\begin{aligned} & [y^s(t + (k_1 - 1)\tau) \\ & \leq y^s(t + (k_2 - 1)\tau) \\ & \leq \dots \\ & \leq y^s(t + (k_m - 1)\tau)]. \end{aligned} \quad (3)$$

若存在值相等的情况则按 k 值大小进行排列, 由此相空间内每个向量 $\mathbf{Y}^s(t)$ 均可得到一组排列:

$$\pi_t = [k_1, k_2, \dots, k_m]. \quad (4)$$

对于嵌入 m 维的相空间共有 $m!$ 种排列可能. 统计第 l 种排列出现的次数 N_l , 其中 $1 \leq l \leq m!$. 则第 l 种排列出现的概率为

$$P^s(l) = \frac{N_l}{\frac{n}{s} - m + 1}, \quad (5)$$

其中 n/s 为尺度 s 下粗粒化序列长度. 由此可定义时间序列在尺度 s 下的排列熵为

$$H^s(p) = - \sum_{l=1}^{m!} p^s(l) \ln p^s(l). \quad (6)$$

当 $P^s(l) = 1/m!$ 时, $H^s(p)$ 达到最大值 $\ln(m!)$, 我们采用 $\ln(m!)$ 对排列熵进行归一化处理, 得到尺度 s 下归一化的排列熵

$$h^s(p) = H^s(p) / \ln(m!). \quad (7)$$

当时间序列的所有排列具有相同的概率时, 排列熵取得最大值 1. 此时时间序列表现为噪声特征. 时间序列越规则, 其排列熵值越低, 当时间序列为线性可预测系统时, 排列熵取得最小值. 在排列熵计算过程中序列长度 n 的选择应该足够长来保证

熵值计算的精度. 另外, 延迟时间 τ 于嵌入维数 m 是两个需要确定的参数. Bandt 和 Rompe^[42] 建议嵌入维数 $m = 3, 4, \dots, 7$, 时间延迟 $\tau = 1$.

3 水包油流型电导传感器波动信号获取

垂直油水两相流实验是在天津大学多相流流动环装置上进行的. 实验装置描述可参考文献 [23]. 实验测试管道长 4000 mm, 内径为 20 mm. 实验时, 根据插入管道不同深度的五路电导探针信号特征对流型进行定义^[23]. 采用纵向多极阵列传感器^[48] 采集流体电导波动信号. 实验介质选用自来水和 15# 工业白油. 白油密度为 845 kg/m³, 黏度为 11.984 mPa·s, 油水界面张力为 0.03 N/m. 试验的流程为先通入固定流量的水相, 然后再通入油, 当油水两相混合均匀后进行一个测点的数据采集. 依次增加油相流量并进行工况点的测量. 当完成一个水量实验后, 增加水相流量, 再依照上述步骤进行. 根据电导探针信号此次试验共定义了五种流型, 其中水为连续相的流型包括水包油段塞流、水包油细小泡状流、水包油泡状流, 油为连续相的油包水流型, 过渡流型是水连续相及油连续相交替出现的流动状态. 垂直油水两相流型如图 1 所示.

油水两相流电导波动信号反映了混合流体的导电波动特征, 其包含有丰富的流体流动及流型动力学信息. 水包油段塞流型通常发生在油水混合速度较低的情况, 此时流体湍流动能较小, 不足以击碎油块使油相全空间分散, 大量的油滴发生聚并产生较大的油块或形成油塞. 水包油段塞流的电导波动信号如图 2 所示, 由于较大的油块或油塞的扰动, 使得两相流电导信号波动幅值较大, 且信号存在间歇性出现的峰值.

随着油水混合速度增大, 混合流体湍流动能增大到足以将油塞击碎, 油相以分散油泡形式存在于水连续相之中, 此时的流型为水包油泡状流. 图 3 为不同油相表观速度下水包油泡状流信号, 相对于水包油段塞流信号, 水包油泡状流信号波动幅度较小, 且呈现出类噪声波动特性.

随着进一步增大两相流的混合流速, 湍流动能足够大能够将油泡击碎为细小的油滴, 此时流型为水包油细小泡状流. 如图 4 所示, 此时信号波动幅度相对于其他两种流型最小, 信号的波动仍然呈现随机分布特性.

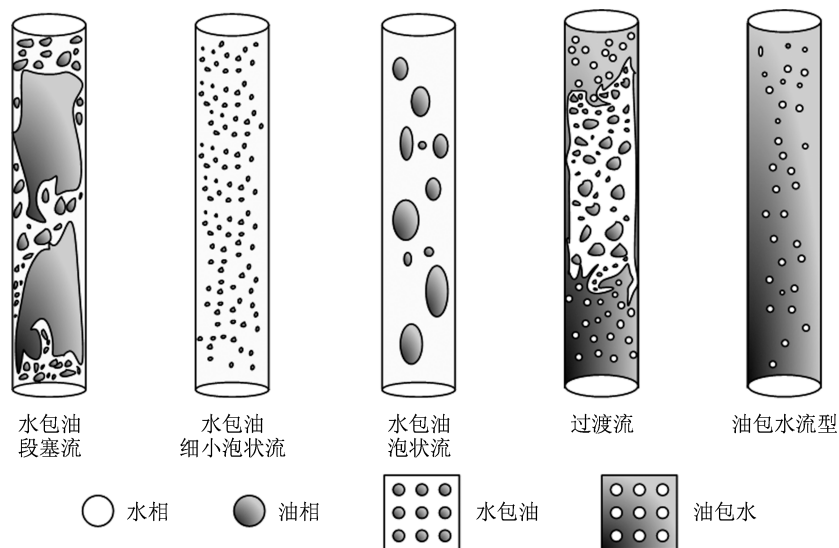


图1 垂直上升管中油水两相流型结构示意图 (内径 = 20 mm)

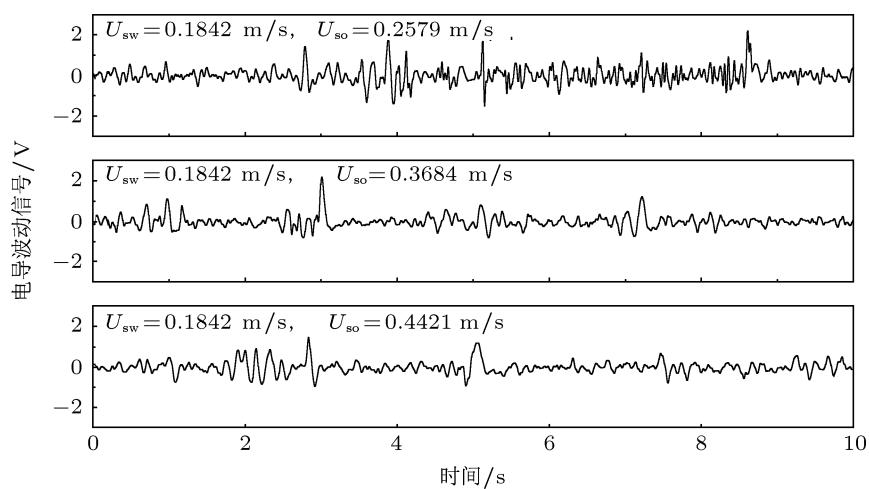


图2 水包油段塞流电导波动信号

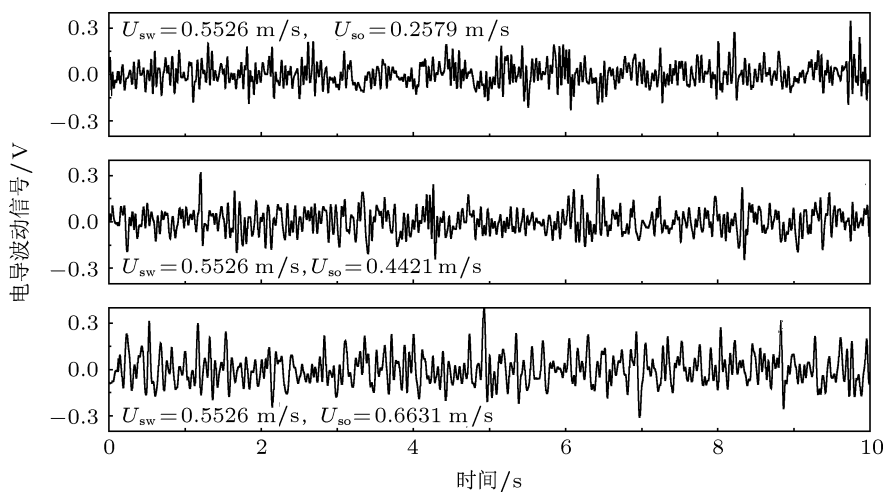


图3 水包油泡状流电导波动信号

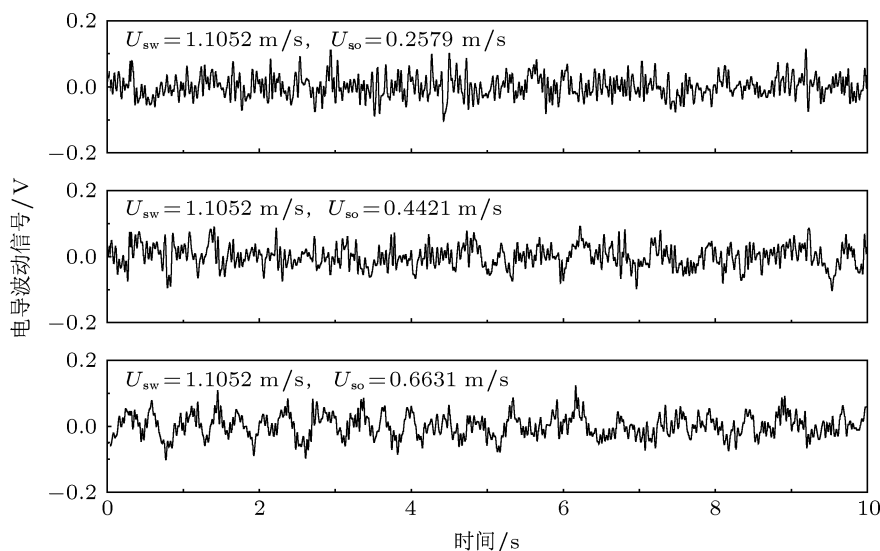


图4 水包油细小泡状流电导波动信号

4 水包油流型多尺度排列熵动力学特性

多尺度排列熵不仅能反映流体的复杂度,更能从不同尺度上理解水包油流型的动力学特性. 本文计算了尺度 1—100 范围内的排列熵值,其中嵌入维数 m 取值为 6,延迟时间 $\tau = 1$, $k\Delta t = \frac{1}{6000}$ s (延迟指数 k 取 1, Δt 为采样间隔,采样频率为 6 kHz).

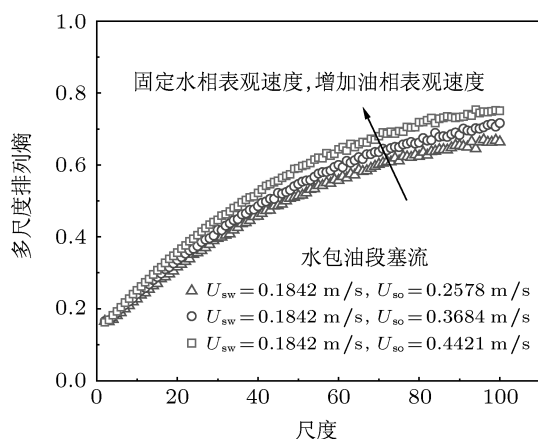


图5 不同流动工况下的水包油段塞流多尺度熵特性

图5为固定水相表观流速时不同油相表观流速下的水包油段塞流多尺度排列熵.可以看出:水包油段塞流低尺度排列熵对流动工况不敏感,表明由于油塞的出现,使得介于油塞之间的泡群趋于有规则运动,不同油相表观速度下排列熵变化较

小,流动复杂度较小且较为一致;水包油段塞流在高尺度排列熵表现为对流动工况较为敏感,排量熵值随着油相表观流速增加而增大,表明宏观上随着油相表观流速增大其间歇式油塞流体湍动特性愈加复杂.

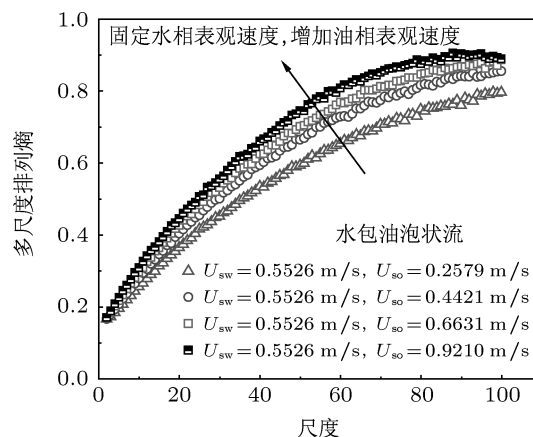


图6 不同流动工况下水包油泡状流多尺度熵特性

水包油泡状流多尺度排列熵如图6所示.可以看出:水包油泡状流低尺度熵变化率与高尺度熵值均表现出对流动工况的敏感特性,且低尺度熵变化率及高尺度熵值均高于水包油段塞流,表明水包油泡状流的泡群之间相互作用结果使得其动力学特性愈加复杂,流体湍流特性随油相表观速度增加而增强.总体上,高尺度下混合流体趋于均相流动,在各个油相表观流速下的排列熵增加速率趋于减弱.尤其在 $U_{so} = 0.9210$ m/s 时,混合流体含油率达到

较高值, 流体等效黏度较大, 导致宏观流体结构相对稳定, 流体运动趋于平稳, 呈现为高尺度 (尺度从 90 到 100) 下的排列熵增加速率明显趋缓.

图 7 为不同流动工况下水包油细小泡状流的多尺度排列熵特性. 可以看出: 随油相表观流速增加, 与水包油泡状流相比, 水包油细小泡状流低尺度下的排列熵增加速率明显趋缓, 表明油泡被击碎为细小的油滴后, 其流体微观动力学复杂度差异较小, 趋于均相流动特点. 此外, 排列熵在高尺度下表现为流体宏观流动特性, 总体上排列熵表现为平缓稳定趋势, 但是由于较高油相表观流速的混合流体黏度大, 对细小油泡运动有显著影响, 出现了排列熵随油相表观流速增加呈现降低的趋势, 即尺度变

化曲线出现交叉现象.

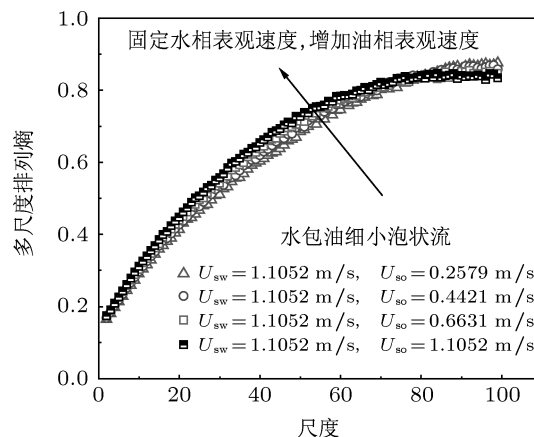


图 7 不同流动工况下水包油细小泡状流多尺度熵特性

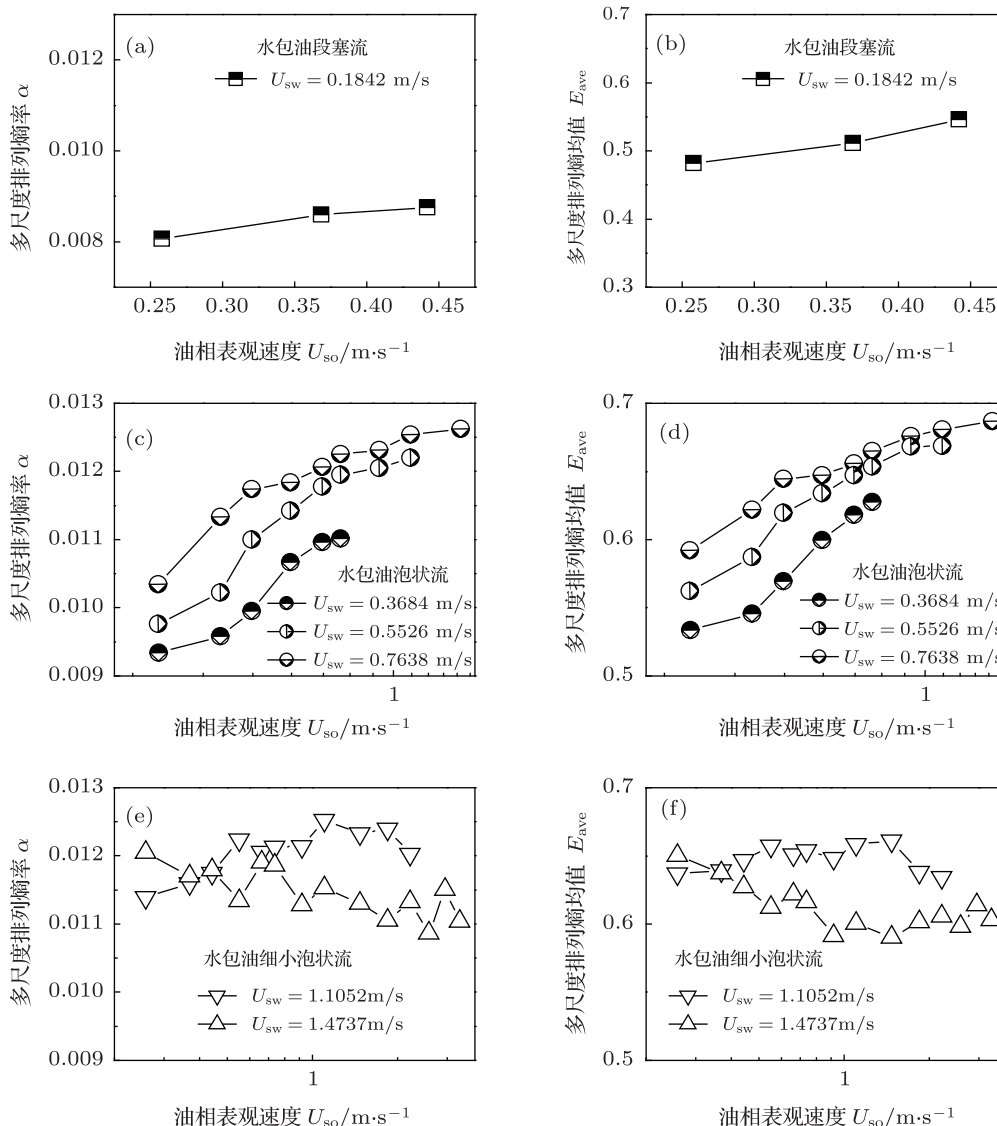


图 8 不同流动工况下水包油型多尺度排列熵率及多尺度排列熵均值 (a) 水包油段塞流多尺度排列熵率; (b) 水包油段塞流多尺度排列熵均值; (c) 水包油泡状流多尺度排列熵率; (d) 水包油泡状流多尺度排列熵均值; (e) 水包油细小泡状流多尺度排列熵率; (f) 水包油细小泡状流多尺度排列熵均值

为了定量描述不同尺度下水包油两相流水包油流型动力学特征,我们采用多尺度排列熵率 (rate of MSPE) 与多尺度排列熵均值 (mean value of MSPE) 来进一步考察流体动力学复杂程度. 多尺度熵率为一定尺度区间内熵值的线性拟合斜率,其表征了多尺度熵随尺度变化的增长速率. 水包油流型的多尺度排列熵在尺度 1 到 40 之间近似为线性分布. 我们对尺度 1 到 40 范围内的多尺度排列熵值进行了线性拟合,并得到了多尺度排列熵率 α . 此外,我们计算的多尺度排列熵均值可表示为

$$E_{\text{ave}} = \frac{1}{N_2 - N_1} \sum_{N_1}^{N_2} h^s(p), \quad (8)$$

其中, $h^s(p)$ 为尺度 s 下归一化的排列熵值, $[N_1, N_2]$ 为统计排列熵的尺度范围, 本文统计了尺度 1 到尺度 100 内的排列熵的均值.

如图 8 所示, 我们分别计算了不同流动工况下水包油流型多尺度排列熵率及多尺度排列熵均值, 对其流体动力学特性分析如下.

与其他两种流型相比 (水包油泡状流、水包油细小泡状流), 水包油段塞流具有较低的多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值, 表明其流动复杂程度明显低于其他两种水包油流型, 主要原因为水包油段塞流中油塞的拟周期间歇性运动导致了其动力学复杂性相对较小.

水包油泡状流的多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值随油相表观流速增加均具有明显的增加趋势, 表明当油相表观流速增加时, 水连续相中的油泡数量增多, 相间相互作用增强, 导致其流体动力学复杂性随之增大; 另一方面, 随着水相表观流速增大, 流体湍动特性增强, 表现出在不同水相表观流速下多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值具有明显的阶跃变化, 流体动力学特性趋向更加复杂.

水包油细小泡状流的多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值均处于较高值, 较高水相表观流速导致其流体湍动特性较强, 表现为随油相表观流速增加多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值呈现出一定程度的波动特性, 其流体动力学复杂程度较高. 图 8(e), (f) 中两条曲线为两种不同水相表观流速下, 逐渐增加油相表观流速的多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值变化情况. 对曲线交叉点的左端流动工况, 其含油率较低 (油泡较少), 分散相在管内并非均匀分布, 即混合流体未充分发展为均相流动, 同时水包油细小泡状流受水相流体湍动特性影响较为显著, 高水相流速 ($U_{\text{sw}} = 1.4737 \text{ m/s}$) 的细小

油滴运动更为随机复杂, 其流动工况排列熵较高. 对曲线交叉点的右端流动工况, 随着油相流速增加 (油泡增多), 油泡群之间动量充分交换, 流体宏观趋于均相流动, 高含油率 ($U_{\text{sw}} = 1.1052 \text{ m/s}$) 的流动工况排列熵率与均值较高, 此时水相流体的湍动特性对流体稳定性影响并非显著.

尽管多尺度熵率在信号分类方面得到了较好的应用 [35,36], 但是, 采用单一参数对信号进行分类尚显不足. 本文采用多尺度熵率与增量时间序列累积量组合方式对油水两相流水包油流型进行识别. 原始时间序列 $u(i)$ 的增量时间序列 $z(i) = \Delta u(i) = u(i+1) - u(i)$ 反映了信号随时间的波动特性, 能够有效地表征非线性系统的动力学特征 [49,50]. 油水两相流电导波动信号的增量时间序列则反映了混合流体随时间波动的剧烈程度. 定义增量时间序列累积量为

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} |z(i)| \\ = \sum_{i=1}^{n-1} |u(i+1) - u(i)|, \quad (9)$$

其中 R 为增量时间序列累积量, $z(i)$ 为增量时间序列.

图 9 为多尺度排列熵率 α 与增量时间序列累积量 R 的联合分布特性, 鉴于多尺度排列熵率前文已做分析, 以下仅对不同流型的增量时间序列累积量特性进行分析.

水包油段塞流的增量时间序列累积量值较高, 表明水连续相中的油塞湍动特性较强, 流体运动波动性亦较大. 水包油泡状流的增量时间序列累积量分布范围较宽, 表明水包油泡状流运动特性复杂多变, 其流体波动剧烈程度相对于水包油段塞流有所降低, 故导致其时间序列累积量降低. 水包油细小泡状流的增量时间序列累积量相对于其他两种水包油流型最低, 且分布较为集中, 表明水包油细小泡状流具有更小的流体运动的波动性.

如图 9 所示, 通过多尺度熵率可以较好地将水包油段塞流与其他两种流型 (水包油泡状流及水包油细小泡状流) 进行有效区分, 而通过增量时间序列累积量可有效区分水包油泡状流及水包油细小泡状流两种流型. 通过多尺度排列熵率与增量时间序列累积量联合分布, 可有效地辨识三种水包油流型, 同时从流体波动特征及动力学特征角度理解流型转化特性提供了一种新途径.

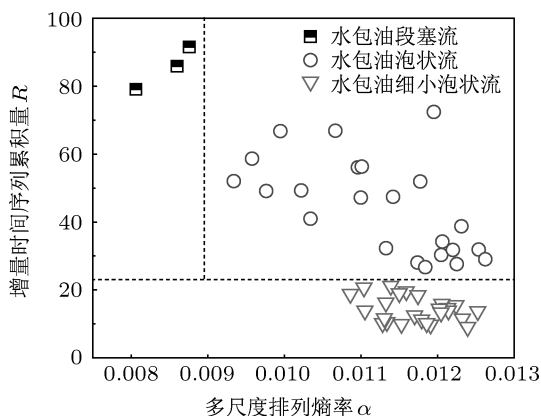


图9 增量时间序列累积量与多尺度熵率的联合分布特性

5 结论

多尺度排列熵能够在不同尺度下有效地表征垂直油水两相流水包油流型的动力学特性,并进一步揭示了不同水包油流型之间的动力学差异.此外,多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值可定量地刻画油水两相流的动力学复杂性.分析表明:由于油

塞运动具有一定的间歇性,水包油段塞流多尺度排列熵率与均值相对于其他两种流型(水包油泡状流、水包油细小泡状流)较小;水包油泡状流的复杂度与油泡之间的相互作用及水相湍动特性相关,其多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值随油相表观速度增加均具有明显的增加趋势,且随着水相表观速度的增加呈现阶跃变化特性;水包油细小泡状流的流体动力学复杂程度较高,其多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值均处于较高值,且随油相表观速度增加多尺度排列熵率与多尺度排列熵均值呈现出一定程度的波动特性.

提出了增量时间序列累积量来表征油水两相流水包油流型的运动波动特性,发现水包油段塞流的波动性最强,水包油泡状流的波动性较水包油段塞流有所降低,水包油细小泡状流具有最小的波动性.综合增量时间序列累积量与多尺度排列熵率可有效地对三种水包油流型进行辨识,为从流体波动性及复杂性测度角度理解流型转化提供了一种新途径.

- [1] Jana A K, Das G, Das P K 2006 *Chem. Eng. Sci.* **61** 1500
- [2] Lucas G P, Panagiotopoulos N 2009 *Flow Meas. Instrum.* **20** 127
- [3] Gao H, Gu H Y, Guo L J 2003 *Int. J. Heat Mass Transf.* **46** 749
- [4] Brauner N, Ullmann A 2002 *Int. J. Multiphase Flow* **28** 1177
- [5] Rouhani S Z, Sohal M S 1983 *Prog. Nucl. Energ.* **11** 219
- [6] Jones O C, Zuber N 1975 *Int. J. Multiphase Flow* **2** 273
- [7] Vincea M A, Lahey Jr R T 1982 *Int. J. Multiphase Flow* **8** 93
- [8] Chakrabarti D P, Das G, Das P K 2006 *AIChE J.* **52** 3668
- [9] Nguyen V T, Euh D J, Song C H 2010 *Int. J. Multiphase Flow* **36** 755
- [10] Ding H, Huang Z, Song Z, Yan Y 2007 *Flow Meas. Instrum.* **18** 37
- [11] He Z, Zhang D, Cheng B, Zhang W 1997 *AIChE J.* **43** 345
- [12] Sun B, Wang E P, Zheng Y J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014701 (in Chinese) [孙斌, 王二鹏, 郑永军 2011 物理学报 **60** 014701]
- [13] Sun B, Wang E P, Ding Y, Bai H Z, Huang Y M 2011 *Chin. J. Chem. Eng.* **19** 243
- [14] Li H W, Zhou Y L, Liu X, Sun B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 030508 (in Chinese) [李洪伟, 周云龙, 刘旭, 孙斌 2012 物理学报 **61** 030508]
- [15] Sæther G, Bendiksen K, Müller J, Frøland E 1990 *Int. J. Multiphase Flow* **16** 1117
- [16] Franca F, Acikgoz M, Lahey R T, Clausse A 1991 *Int. J. Multiphase Flow* **17** 545
- [17] Oddie G M 1991 *Flow Meas. Instrum.* **2** 225
- [18] Yuan Z L, Shen X L, Xu Y Q 1994 *Science in China A* **24** 986 (in Chinese) [袁竹林, 沈湘林, 徐益谦 1994 中国科学 (A 辑) **24** 986]
- [19] 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]
- [20] Lee J Y, Kim N S, Ishii M 2008 *Nucl. Eng. Des.* **238** 945
- [21] Govier G W, Sullivan G A, Wood R K 1961 *Can. J. Chem. Eng.* **4** 67
- [22] Flores J G, Chen X T, Sarica C, Brill J P 1999 *SPE Prod. Facil.* **14** 102
- [23] Du M, Jin N D, Gao Z K, Wang Z Y, Zhai L S 2012 *Int. J. Multiphase Flow* **41** 91
- [24] Cao B, Lü X Q, Zeng M, Wang Z M, Huang S S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1696 (in Chinese) [曹彪, 吕小青, 曾敏, 王振民, 黄石生 2006 物理学报 **55** 1696]
- [25] Li Q, Wang T Y, Leng Y G, He G Y, He H L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6803 (in Chinese) [李强, 王太勇, 冷永刚, 何改云, 何慧龙 2007 物理学报 **56** 6803]
- [26] Zhuang J J, Ning X B, Zou M, Sun B, Yang X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2805 (in Chinese) [庄建军, 宁新宝, 邹鸣, 孙斌, 杨希 2008 物理学报 **57** 2805]
- [27] Wang Q G, Zhang Z P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1976 (in Chinese) [王启光, 张增平 2008 物理学报 **57** 1976]
- [28] He W P, Wu Q, Zhang W, Wang Q G, Zhang Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2862 (in Chinese) [何文平, 吴琼, 张文, 王启光, 张勇 2009 物理学报 **58** 2862]
- [29] Zhang C T, Ma Q L, Peng H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7623 (in Chinese) [张春涛, 马千里, 彭宏 2010 物理学报 **59** 7623]
- [30] Zhang C T, Ma Q L, Peng H, Jiang Y Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020508 (in Chinese) [张春涛, 马千里, 彭宏, 姜友谊 2011 物理学报 **60** 020508]
- [31] Zhang W C, Yang L J, Lü X Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020601 (in Chinese) [张伟超, 杨立军, 吕小青 2011 物理学报 **60** 020601]

- [32] He W P, He T, Cheng H Y, Zhang W, Wu Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 049202 (in Chinese) [何文平, 何涛, 成海英, 张文, 吴琼 2011 物理学报 **60** 049202]
- [33] Shen W, Wang J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 118702 (in Chinese) [沈韡, 王俊 2011 物理学报 **60** 118702]
- [34] Costa M, Goldberger A L, Peng C K 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 068102
- [35] Costa M, Goldberger A L, Peng C K 2005 *Phys. Rev. E* **71** 021906
- [36] Zheng G B, Jin N D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4485 (in Chinese) [郑桂波, 金宁德 2009 物理学报 **58** 4485]
- [37] Costa M, Peng C K, Goldberger A L 2003 *Physica A* **330** 53
- [38] He L, Du L, Zhuang Y Q, Li W H, Chen J P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6545 (in Chinese) [何亮, 杜磊, 庄奕琪, 李伟华, 陈建平 2008 物理学报 **57** 6545]
- [39] Li Z W, Zhang Y K 2008 *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **22** 507
- [40] Huang X L, Cui S Z, Ning X B, Bian C H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8160 (in Chinese) [黄晓林, 崔胜忠, 宁新宝, 卞春华 2009 物理学报 **58** 8160]
- [41] Yan B G, Zhao T T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078701 (in Chinese) [严碧歌, 赵婷婷 2011 物理学报 **60** 078701]
- [42] Bandt C, Pompe B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 174102
- [43] Sun K H, Tan G Q, Sheng L Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3359 (in Chinese) [孙克辉, 谈国强, 盛利元 2008 物理学报 **57** 3359]
- [44] Cao Y, Tung W, Gao J B 2004 *Phys. Rev. E* **70** 046217
- [45] Hou W, Feng G L, Dong W J, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2663 (in Chinese) [侯威, 封国林, 董文杰, 李建平 2006 物理学报 **55** 2663]
- [46] Zunino L, Zanin M, Tabak B M, Pérez D G, Rosso O A 2009 *Physica A* **388** 2854
- [47] Li D, Li X, Liang Z, Vossa L J, Sleight J W 2010 *J. Neural Eng.* **7** 046010
- [48] Jin N D, Xin Z, Wang J, Wang Z Y, Jia X H, Chen W P 2008 *Meas. Sci. Technol.* **19** 045403
- [49] Ashkenazy Y, Ivanov P C, Havlin S, Peng C K, Goldberger A L, Stanley H E 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1900
- [50] Ashkenazy Y, Havlin S, Ivanov P C, Peng C K, Schulte-Frohlinde V, Stanley H E 2003 *Physica A* **323** 19

Multiscale permutation entropy analysis of oil-in-water type two-phase flow pattern*

Du Meng Jin Ning-De[†] Gao Zhong-Ke Zhu Lei Wang Zhen-Ya

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

(Received 14 March 2012; revised manuscript received 11 June 2012)

Abstract

We investigate the dynamic characteristics of vertical upward water-dominant oil-water two-phase flow by multiscale permutation entropy algorithm. We first measure the two-phase flow conductance fluctuation signals in a 20 mm inner-diameter pipe. Then we calculate the multiscale permutation entropies for different water-dominant flow patterns. The results indicate that multiscale permutation entropy rate and average of multiscale permutation entropy can be used as quantitative parameters for measuring complexity of water dominant oil-water two-phase flow. In addition, we propose a new approach to identify different water-dominant flow patterns by using the joint distribution of multiscale permutation entropy rate and cumulant of increment series.

Keywords: oil-water two-phase flow, multiscale permutation entropy, fluid dynamics

PACS: 05.45.Tp, 89.70.Cf, 47.61.Jd

* 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).

[†] E-mail: ndjin@tju.edu.cn