

研究论文

下倾管段塞流液塞频率波动的非线性分析

王海琴¹, 何利民¹, 李志彪²

(¹ 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061; ² 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 利用非线性分析技术中的分形理论, 在长 24.73 m、内径 0.05 m 的小型气液两相流实验装置上对下倾管空气-水段塞流中的液塞频率波动特性进行了研究。结果表明, 液塞频率的波动是对初始条件敏感的混沌振荡, 遵循分形统计规律, 具有持久性。折算液速小时, 液塞频率波动的长程相关性随着混合速度的增大而减弱, 液塞频率波动对初始条件的敏感程度增强, 折算液速较大时则相反。管线倾角越大, 液塞频率对初始条件的敏感程度受混合速度的影响越小。折算液速和混合速度均较大时, 液塞频率的混沌程度受管线倾角的影响较小。

关键词: 段塞流; 液塞频率; 分形; 混沌; 波动

中图分类号: TE 312

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2006)09-2086-05

Fluctuation analysis of slug frequency for two-phase slug flow in a downwardly inclined pipe

WANG Haiqin¹, HE Limin¹, LI Zhibiao²

(¹ School of Storage & Transportation and Architecture Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China; ² Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: The fluctuation characteristics of slug frequency was investigated on the basis of fractal theory for air/water slug flow in a downwardly inclined pipe. The results showed that the fluctuations was some chaotic vibrations which was sensitive to initial conditions. The results also indicated that the fluctuation obeyed fractal statistics law, and kept permanent characteristics. By carrying out an analysis about the fluctuation of slug frequency at two superficial liquid velocities, it was found that long-range dependency of slug frequency fluctuation were weakened with the increase of mixture velocity and the fluctuation was more sensitive to initial conditions when superficial liquid velocity was low, and the sensitivity of slug frequency to initial conditions was less affected by superficial mixture velocity when angle of pipe inclination became larger, but the angle of pipe inclination had less influence on the chaos of slug frequency on condition that superficial liquid velocity and superficial mixture velocity were large.

Key words: slug flow; slug frequency; fractal; chaos; fluctuation

引 言

多相流动系统, 尤其是间歇性很强的段塞流动系统, 是一多变量相关的复杂的非线性系统, 目前在定量分析上靠理论解决实际问题中存在的问题还

有相当的困难。随着随机过程理论的不完善和现代信号处理技术的发展, 非线性分析的方法已逐步应用于多相流动系统的研究, 但应用于流型识别研究中的较多^[1-3], 而针对某一种特定流型, 尤其是对较为典型的段塞流型进行的研究却相对较少。

2005-06-28 收到初稿, 2005-11-20 收到修改稿。

联系人及第一作者: 王海琴 (1969—), 女, 博士研究生, 讲师。

Received date: 2005-06-28.

Corresponding author: WANG Haiqin, PhD candidate.
E-mail: wanghaiqin_0@163.com

Saether 等^[4]应用分形理论分析了水平管段塞流的液塞长度分布, 得到了 Hurst 指数与液塞长度之间的关系. Paglianti 等^[5]利用混沌分析方法分析了段塞流型下液塞特征参数 (液塞速度、液塞长度、液塞持液率等) 的特征. 白博峰等^[6]研究了 U 形管垂直上升段空气-水两相流压差波动过程的统计和分形特征, 着重分析了压差波动过程的均值、均方根、分维数随折算气速和液速的变化规律. Langford 等^[7]对上升管空气-水两相流的压力信号应用混沌分析方法进行分析后指出, 关联维数和 Kolmogorov 熵可以从更深层次揭示非线性系统的动态特性. 本文将非线性分析技术应用到下倾管段塞流液塞频率波动特性的分析之中, 以期得到更为完善的段塞流波动规律.

1 实验系统

实验是在中国石油大学 (华东) 室内小型气液两相流机理实验装置上完成的. 实验系统管段为内径 50 mm、长 27.33 m 的不锈钢管 (其中包括 4 段总长为 4 m 的透明有机玻璃管, 下倾管段的长度为 10.45 m, 最大倾角为 -5°), 实验介质为空气-水. 实验系统上布置了 11 台 Keller PA25e 压力变送器 (频响为 5 kHz), 数据采集系统利用 National Instrument 公司的 PCI-6071E 高速采集卡采集压力和流量计信号, 该采集卡有 64 个模拟通道 (共 100 个通道), 单通道采集频率 1.25×10^6 Hz. 在通道设置时, 相邻测点选为相邻通道, 而且实验过程中采样频率为 1000 Hz, 可以最大限度地消除各通道采集不同步所造成的误差. 考虑到尽量消除共模噪声的影响, 本实验采用差分接线方式, 并采用低通滤波器对实验数据进行滤波处理. 利用 Soltron-1H 采集板测量实验过程中空气、水及其混合物的温度. 实验系统及仪表的详细布置见文献 [8].

2 分形参数的物理意义描述

2.1 Hurst 指数

分形布朗运动 (fractal brownian motion, FBM) 是一非平稳的具有零均值的 Gauss 随机过程, 但其增量却是平稳、统计自相似、具有零均值的 Gauss 随机过程. 而 Hurst 指数^[9] H 恰好决定了一个 FBM 的不规则程度, 它描述了随机过程的长程相关性.

当 $H=1/2$ 时, 对任意时刻 t 过去与未来增量的相关性为零, 表示该波动过程的过去增量与未来增量之间统计独立; 当 $H > 1/2$ 时, H 越大, 反映了 FBM 的长程相关性越好, 信号曲线就越光滑, 相应的信息反映得也就越清楚; 反之, 则具有相反的情况. 当 $H < 1/2$ 时, 波动过程具有持久性 (正相关), 即过去的增加 (减少) 意味着未来的增加 (减少); 而当 $H < 1/2$ 时, 波动过程具有反持久性 (负相关), 即过去的增加 (减少) 意味着未来的减少 (增加) 趋势.

Hurst 指数的计算方法很多, 目前较为常用的有 R/S 分析法.

2.2 关联维数 D_c

关联维数^[9]给出了系统动态特性的定量刻划. 对于理想的动力系统, $D_c=1$ 时, 系统呈自持周期振荡; $D_c=2$ 时, 系统是具有两种不可约频率的准周期振荡; D_c 不是整数或大于 2 时, 系统是对初始条件敏感的混沌振荡.

目前, 较为常用的计算关联维数 D_c 的方法为 Grassberger 和 Procaccia 建立的 G-P 算法.

2.3 Kolmogorov 熵

K 熵^[9]是在相空间刻划混沌运动最重要的量度. 它可以区分规则运动、混沌运动和随机运动. 对规则运动, $K=0$; 在随机系统中, $K=$; 如系统表现为确定性混沌, K 是大于零的常数. 系统的 Kolmogorov 熵越大, 则系统的信息损失率就越大, 其混沌程度也就越高. 因此, 通过 Kolmogorov 熵的计算可以给出系统的分类.

在实际应用中通常计算 K_2 熵作为 K 的近似.

2.4 Lyapunov 指数

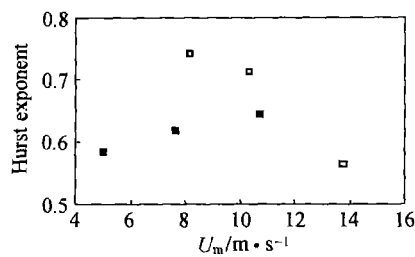
Lyapunov 指数^[10-11]是一种整体特征, 其值可正可负, 也可等于零. 正的 Lyapunov 指数表明运动轨道在每个局部都不稳定, 相临轨道指数迅速分离, 可以作为混沌行为的判据. Lyapunov 指数等于零对应稳定边界, 初始误差不放大也不缩小. Lyapunov 指数小于零表明相体积收缩, 轨道在局部是稳定的, 对初始条件不敏感, 对应于周期轨道运动. Lyapunov 指数由负变正, 表明运动向混沌的转变.

为了得到一个好的、最大的 Lyapunov 指数的估计值, 要求给出的实验测量的时间序列具有足够的长度. Lyapunov 指数的求取过程见文献 [12].

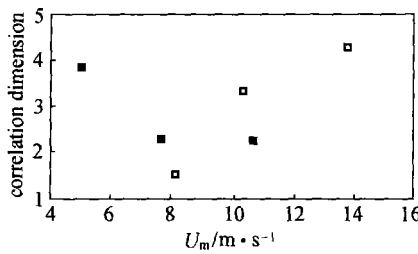
3 液塞频率波动规律分析

3.1 混合速度变化时液塞频率波动规律的非线性分析

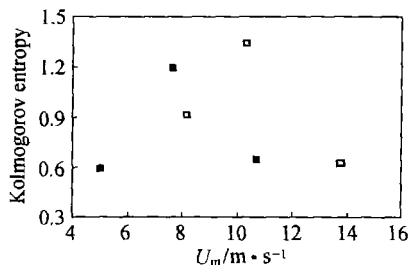
3.1.1 液塞频率波动的 Hurst 指数分析 由图 1 (a) 可以看出, 在实验条件下, 液塞频率序列的 Hurst 指数均大于 0.5, 表明混合流速变化时液塞频率波动具有持久性. 同时由图 1 (a) 还可以看出, 随着混合速度的增加, 折算液速小时 Hurst 指数递减, 折算液速大时 Hurst 指数递增. 说明折算液速小时, 随着混合速度的增大液塞频率波动



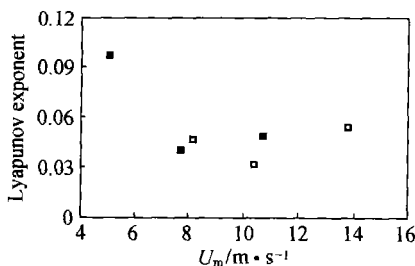
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1 Fluctuation laws of fractional parameters with superficial mixture velocities in -1° inclination pipeline

$U_{sl}/m \cdot s^{-1}$: 0.849; 0.566

的长程相关性减弱, 而折算液速较大时, 液塞频率波动的长程相关性随混合速度的增加而增大. 在实际应用中, 通过改变系统的折算速度, 便可以实现对液塞频率波动的长程相关性的优化.

3.1.2 液塞频率波动的关联维数分析 图 1 (b) 为混合速度变化时液塞频率序列的关联维数分布. 由图中可以看出, 随着混合速度的增加, 液塞频率的关联维数大于 2 或者不等于整数, 这说明, 液塞频率波动过程是对初始条件敏感的混沌振荡过程. 与混合速度增加时液塞频率的 Hurst 指数变化相反, 折算液速较大时, 随着混合速度的增加液塞频率的关联维数呈递减趋势, 而折算液速较小时, 液塞频率的关联维数随着混合速度的增加呈增大的趋势. 在大的折算液速条件下, 混合速度越大, 液塞频率波动对初始条件的敏感程度越弱. 相反, 当折算液速小时, 混合速度越大, 液塞频率波动过程对初始条件的敏感性越强.

3.1.3 液塞频率波动的 Kolmogorov 熵分析 如图 1 (c) 所示, 随着混合速度的增大, 液塞频率序列的 Kolmogorov 熵均为大于零的常数, 即液塞频率表现为确定性混沌. 然而, 实验中所得到的 Kolmogorov 熵都较小, 说明液塞频率波动信息的平均损失率较小, 混沌程度较低. 由图 1 (c) 中还可以看出, 不管折算液速的大小如何, 混合速度超过某一定值 ($U_m = 10 m \cdot s^{-1}$) 后, 随着混合速度的增加, 液塞频率的 Kolmogorov 熵基本保持为不变的量. 表明混合速度增大到一定的程度后, 液塞频率波动信息的损失率将不再随混合速度的增加而发生变化. 由此, 不仅可以将 $U_m = 10 m \cdot s^{-1}$ 作为液塞频率波动规律的分界点, 而且还可借助 Kolmogorov 熵在液塞频率波动特征与实际两相流动特征之间建立联系. 为今后更加深入研究流动特征参数的波动特征与实际两相流动特征之间的关系打下基础.

3.1.4 液塞频率波动的 Lyapunov 指数分析 图 1 (d) 为混合速度变化时液塞频率的 Lyapunov 指数. 由图中可以看出, 随着混合速度的增加, 液塞频率的 Lyapunov 指数均为正数, 说明液塞频率波动属于混沌过程. 随着混合速度的增加, 不管折算液速大小如何, 液塞频率的 Lyapunov 指数都是先减小后增加的, 只是折算液速大时变化幅度较大. 说明混合速度改变量相同时, 折算液速越大, 液塞频率波动信息损失率的改变越大. 同时, 在实验条

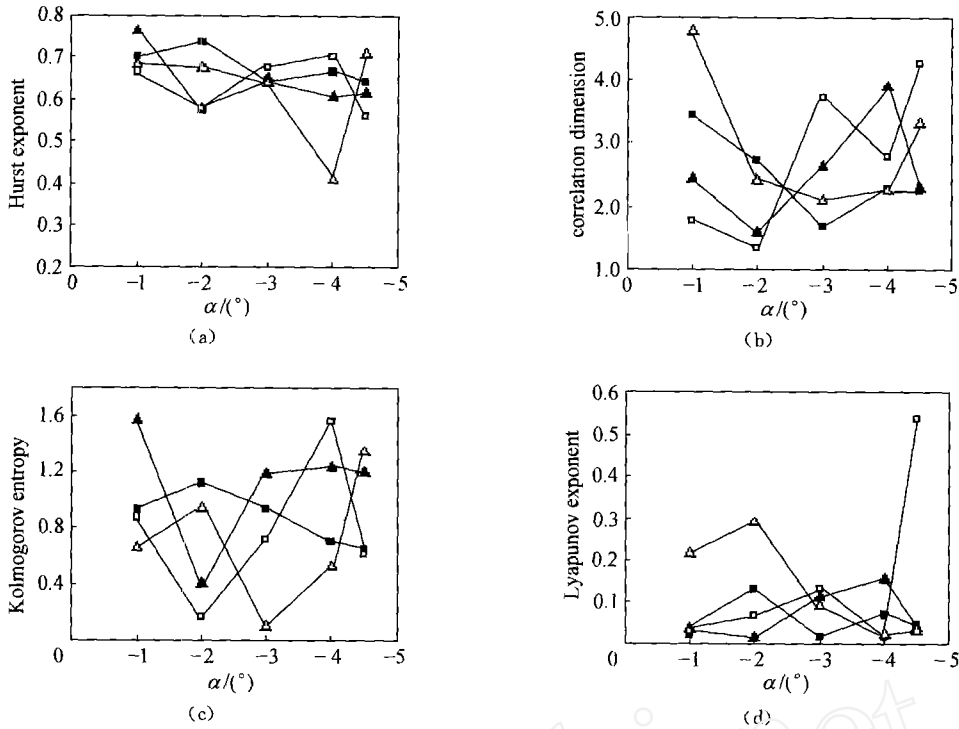


Fig. 2 Fluctuation laws of fractional parameters with angles of pipeline inclination

$U_m / m \cdot s^{-1}$	$U_{SL} / m \cdot s^{-1}$
10.69	0.849
7.768	0.849
13.584	0.566
10.453	0.566

件下得到的液塞频率 Lyapunov 指数都较小，说明液塞频率波动的信息损失率较小，混沌程度较小。

3.2 管线倾角变化时液塞频率波动规律的非线性分析

3.2.1 液塞频率波动的 Hurst 指数分析 图 2 (a) 为管线倾角变化时液塞频率序列的 Hurst 指数波动情况。由图中可以看出，随着管线倾角的增加，不管混合速度如何，液塞频率序列的 Hurst 指数将会以 0.66 为平衡点发生波动，折算液速越小，波动幅度越大，并且总体呈减小的趋势，但变化幅度不大。这是因为折算液速小时，液塞频率波动的相关性受管线倾角的影响程度较大，同时随着管线倾角的增加，液塞序列的长程相关性减弱。由图中还可以看出，液塞频率序列的 Hurst 指数均大于 0.5，表明随着混合速度的增加液塞频率波动具有持久性。

3.2.2 管线倾角变化时液塞频率波动的关联维数分析 由图 2 (b) 可以看出，随着管线倾角的增加，液塞频率序列的关联维数均为大于 2 或者不等

于整数的值，表明此时液塞频率波动过程是对初始条件敏感的混沌振荡过程。由图中还可以看出，当折算液速和混合速度均较小以及折算液速和混合速度都较大时，液塞频率的关联维数随着管线倾角的增加是先减小后增加。相同的混合速度下，折算液速越大变化的幅度越小。其他情况下，液塞频率的关联维数的波动没有明显的规律。同时，在管线倾角较小时，随着混合流速的不同，液塞频率的关联维数较分散，但在管线倾角较大的情况下，关联维数则相对比较集中，表明管线倾角越大，液塞频率对初始条件的敏感程度受混合速度的影响越小。

3.2.3 管线倾角变化时液塞频率波动的 Kolmogorov 熵分析 由图 2 (c) 可以看出，随着管线倾角的增加，液塞频率序列的 Kolmogorov 熵均为大于零的常数，即液塞频率波动过程表现为确定性混沌。实验中得到的液塞频率的 Kolmogorov 熵值都较小，说明段塞流中液塞频率波动的信息损失率较小，即其混沌程度较小。由图中还可以看出，在混合速度和折算液速都较大时，液塞频率的 Kolmog-

rov 熵随着管线倾角的增大变化幅度较小,而在其他情况下都有较大的波动幅度,并且基本上随着管线倾角的增大是先减小后增大.说明,液塞频率的混沌程度在折算液速和混合速度都较大时受管线倾角的影响较小,而在其他情况受管线倾角的影响较大.

3.2.4 管线倾角变化时液塞频率波动的 Lyapunov 指数分析 如图 2 (d) 所示,随着管线倾角的增加,实验中所得到的液塞频率的 Lyapunov 指数均为大于零的数,表明液塞频率波动是混沌过程.但其 Lyapunov 指数都较小,说明液塞频率波动过程中信息损失率较小.由图中还可以看出,折算液速较大时,随着管线倾角的增加,液塞频率序列的 Lyapunov 指数基本上以 0.06 为平衡点上下波动,波动幅度也较小;但在折算液速较小时,随管线倾角的增加,液塞频率的 Lyapunov 指数波动幅度较大,混合速度大时 Lyapunov 指数是增加的,而混合速度小时是减小的.这表明折算液速较大时,管线倾角对液塞频率波动混沌程度的影响较小,而折算液速较小时,管线倾角对液塞频率波动混沌程度的影响较大,变化趋势与混合速度 U_m 有关.

4 结 论

(1) 液塞频率的波动是对初始条件敏感的混沌振荡,遵循分形统计规律,具有持久性.

(2) 折算液速小时,随着混合速度的增大液塞频率波动的长程相关性减弱,对初始条件的敏感程度增强,折算液速较大时则相反.混合速度增大到一定的程度后,液塞频率波动的长程相关性和初始条件的敏感程度将不再随混合速度的增加而发生变化.

(3) 液塞频率波动的混沌特征与实际两相流动特征之间存在必然的联系.在实际应用中,可以通过改变系统的折算液速优化液塞频率波动的长程相关性,并可将 $U_m = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为描述液塞频率波动规律的分界点.

(4) 管线倾角越大,液塞频率对初始条件的敏感程度受混合速度的影响越小.在折算液速和混合速度都较大时,液塞频率的混沌程度受管线倾角的影响较小,其他情况下受管线倾角的影响较大.

符 号 说 明

U_m ——混合速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

U_{sl} ——液相折算速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

——下倾管段倾角, ($^\circ$)

References

- [1] Franca F, Acikgoz M, *et al.* The use of fractal techniques for flow regime identification. *Int. J. Multiphase Flow*, 1991, 17 (4): 545-552
- [2] Jin Ningde (金宁德), Ning Yingnan (宁英男), Wang Weiwei (王微微), Liu Xingbin (刘兴斌), Tian Shuxiang (田树祥). Characterization of oil/water two-phase flow patterns in vertical upward flow pipes. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2001, 52 (10): 907-915
- [3] Jin Ningde (金宁德), Nie Xiangbin (聂向斌), Ren Yingyu (任英玉), Zhang Mingxue (张明学). Characterization of oil/water two-phase flow patterns in vertical upward pipes based on Kolmogorov entropy time series analysis. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, 54 (7): 936-941
- [4] Saether G, Bendiksen K. The fractal statistics of liquid slug lengths. *Int. J. Multiphase Flow*, 1990, 16 (6): 1117-1126
- [5] Paglianti A, Giona M, Soldati A. Characterization of subregimes in two-phase slug flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 1996, 22 (4): 781-796
- [6] Bai Bofeng (白博峰), Guo Liejin (郭烈锦), Chen Xuejun (陈学俊). Fluctuating differential pressure for air-water two phase flow. *Journal of Proceedings of the CSEE (China)* (中国电机工程学报), 2002, 22 (3): 22-26
- [7] Lanford H M, Beasley D E, Ochterbeck J M. Observations on chaos in upward gas-liquid flow// Nelson R A, Chopin Jr T, Thynell S T. Proceedings of the ASME Heat Transfer Division. USA: ASME, 1998: 247-254
- [8] Li Zhibiao (李志彪). Investigation on hydrodynamic characteristics of air/water slug flow in vertical and downwardly inclined pipes [D]. Dongying: China University of Petroleum, 2004
- [9] Li Houqiang (李后强), Wang Fuquan (汪富泉). The Fractal Theory and Its Application in Molecule Science (分形理论及其在分子科学中的应用). Beijing: Science Press, 1997: 80-83, 164-171, 190-195, 200-201
- [10] Wu Xiangxing (吴祥兴), Chen Zhong (陈忠). Introduction of Chaos Science (混沌学导论). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1996: 60-62
- [11] Zhou Shouren (周守仁). Philosophy Analysis of Complexity Study and Chaos Control (复杂性研究与混沌控制及其哲学阐释). Chengdu: Sichuan Education Press, 2001: 56-57
- [12] Chen Fengsu (陈奉苏). Chaos Science and Its Application (混沌学及其应用). Beijing: China Electric Power Press, 1998: 63-65