

文章编号:0258-8013 (2002) 03-0022-05

空气-水两相流压差波动研究

白博峰, 郭烈锦, 陈学俊

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

FLUCTUATING DIFFERENTIAL PRESSURE FOR AIR-WATER TWO-PHASE FLOW

BAI Bo-feng, GUO Lie-jin, CHEN Xue-jun

(State Key Lab of Multi-phase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: The differential pressure fluctuation appearing from the two-phase flow contains much information about the mixture fluid flowing, which is one of important research work to realize the flowage measurement and automatic controlling. The statistical and fractal feature of fluctuating differential pressure for air-water two-phase flow in the upward section of U-type tube was investigated in the present paper. Specially, the mean, the root mean square, the fractal dimension and their variety vs gas superficial velocity are emphasized. The results show that the features have close relationship with flow pattern, but they have less practicality to be used to identify the transitions of flow patterns. Whereas, the root mean square can be used as a criteria under the condition of low liquid superficial velocity, while it is invalid under the condition of high liquid superficial velocity. In addition, the referenced research results cannot be applied to the present work, which the flow patterns can be identified with the possibility density function. The fractal dimension of the fluctuations are lower than 1.5 in all flow regimes besides the annular flow with great gas superficial velocity. At the same time, the liquid superficial velocity influences the chaotic strongly. The future investigation is needed to understand the chaotic feature.

KEY WORDS: two-phase flow; differential pressure; fluctuation; statistical analysis; fractal dimension

摘要: 两相流的压差波动过程包含了关于流动的大量信息, 是实现流动监测与控制的重要研究内容。该文研究了 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。结果表明这些特征参数都与流型

有密切的联系, 但据此识别流型缺乏实用性。均方根在低液速下随气速的变化体现了流型的转变, 高液速时则不明显。相关研究根据概率密度分布函数识别流型的方法不具有普适性。实验发现环状流区高气速时的压差波动分维数大于 1.5, 在其它流型内都小于 1.5。同时, 折算液速的大小强烈影响压差波动的混沌特性。

关键词: 两相流; 压差; 波动; 统计分析; 分维数

中图分类号: TK224.2 **文献标识码:** A

1 引言

气液两相流压差等参数的波动包含有关流动的丰富信息, 研究这些参数的波动特性对了解两相流内部流动结构的变化有重要意义, 同时也密切关系到两相流动系统的设计和运行等许多实际问题。

通常研究最多的波动参数有绝对压力、压差和含气率。绝对压力波动过程记录的是近区域和远区域的汽泡成核、生长、运动和合并、流过节流元件等所产生的噪声, 同汽泡的大小关系密切。压差波动在一定程度上过滤掉了测量段之外的压力波。含气率波动反映的是由于汽泡的通过而产生的局部含气率的变化, 与汽泡大小无关。

许多学者采用统计学原理研究压差波动特性, 针对不同流型得到了压差波动过程在时域、频域和幅域内的规律。对水平管空气-水两相流, Weisman 等人分析了各种流型下压差波动的幅值、频率及形状的变化规律^[1]。对垂直上升管内空气-水两相流, Tutu^[2]和 Matsui^[3]结合观察和摄像法, 根据无量纲压差概率密度函数分布曲线的形状对流型进行了划分。

由于对多数流型, 压差波动是非平稳和非线性

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(59995460-2)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (59995460-2).

过程,建立在平稳随机过程基础上的统计分析方法反映非线性本质的作用有限。在非线形动力学系统中,随机性和复杂性是其主要特征。在复杂现象的背后,存在着某种规律性。分形直接从非线性复杂系统入手,从未经简化的对象本身去认识其内在规律性。因此这种数学理论对揭示两相流动系统的许多现象有很好的帮助。Saether 等人应用分形理论分析了水平管弹状流中的液弹长度分布,得到了 Hurst 指数与液弹长度之间的关系^[4]。Franca 等人得到了水平管内空气-水两相流不同流型下压差波动的分维数^[5]。Cai 和 Wambsganss 分析了水平矩形管内的空气-水两相流的壁面静压力波动特性,发现波动过程的功率谱具有频率范围宽、在高频区呈指数下降的特点,这证明了压力波动过程的混沌性^[6]。Langford 等人计算了垂直上升管内空气-水两相流压力波动的 Kolmogorov 熵和关联维数,表明 Kolmogorov 熵随折算气速和折算液速的不同而不同^[7]。

由于分形理论发展的历史较短,在多相流领域的应用还缺乏系统性,所获得的相关数据还很少,其中分维数(Hurst 指数)与流型的关系仍无定论。已有的研究工作有一定的差别,质量流速等系统参数对分形特征的影响研究得不多。

2 实验系统

实验系统和实验段结构及测量方案见文[8]。实验系统的流程为:空压机提供空气源,离心泵驱动水,空气或水的流量采用孔板或转子流量计实现计量,然后以三通方式在进入实验段前进行混合,最后气水混合物通过旋风分离器分离,空气被排入大气,水进入水箱循环使用。实验段为 U 形管,由透明的有机玻璃管制成,内径为 50 mm。流型根据肉眼观察来划分,实验观察到的流型有泡状流、弹状流、块状流和环状流。压差测量段位于 U 形管的垂直上升区,测量长度为 1000 mm。压差波动过程由 0.1 级精度、响应频率 5 Hz 的电容式压差变送器测量。对工业中常见的管道两相流,由于流速低,高频区的波动能量非常低,本文所用压差变送器的响应频率满足要求。实验参数范围:折算液速为 0.54 m/s、1.00 m/s、1.54 m/s;折算气速为 0~12.7 m/s。压差、折算气速、折算液速的不确定性分别为 $\pm 0.21\%$ 、 $\pm 8.8\%$ 和 $\pm 0.73\%$ 。

3 分析方法

分析压差波动过程的主要目的在于提取过程的各种特征,分析这些特征在不同流型区的大小和变化规律,为包括流型识别在内的流动检测提供特征选择量,同时时频域的某些特征可以为流动系统的设计或运行提供依据。

3.1 统计分析

采用概率密度的各阶矩分析波动过程的幅域特征,功率谱分析波动过程的频域特征。均值、均方根、傅立叶谱的计算方法如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i \quad (1)$$

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\left(\sum (x_i - \bar{x})^2 \right) / N} \quad (2)$$

$$s(f) = \frac{1}{2N} \left| \sum_{t=0}^N x(t) e^{-j\omega t} \right|^2 \quad (3)$$

3.2 分形及分维数的计算

分形最基本的性质是自相似性,即系统或整体中的每个元素或局部都在一定程度上反映与体现着整体系统的特征与信息。分维数是度量分形集合综合复杂度、不平整度、卷积度的尺度。分维数的一种计算方法为:设离散信号 $f(t) \in F$,将 R^n 划分为尽可能细的网格,将集合 F 离散化成数字点集。这样, N 相当于在离散空间上集合 F 的点计数。将网格放大为 k 网格,令 N_k 表示分辨率即点间距为 k 上集合 F 的点计数。

$$D(k) = \sum_{j=1}^{N_0/k} \max(x_{kj-(k-1)}, x_{kj-(k-1)+1}, \dots, x_{kj+1}) - \min(x_{kj-(k-1)}, x_{kj-(k-1)+1}, \dots, x_{kj+1}) \quad (4)$$

$$N_k = D(k) / k \quad (5)$$

式中 N_0 为离散信号的长度。根据网格计数维数的定义有

$$\ln N_k \sim -d_N(F) \ln k + \ln C \quad (6)$$

于是可由最小二乘法得到分维数的计算公式

$$d_N(F) = \frac{K \sum \ln k \ln N_k - \sum \ln k \ln N_k}{K \sum \ln^2 k - \left(\sum \ln k \right)^2} \quad (7)$$

当分辨率即点间距已知时, $\ln(N_k)$ 作为 $\ln k$ 函数,不仅常(非严格数学意义上)单调下降,而且是凸函数,因此确定无标度区间的问题不突出,不需要判断无标度区间,有利于计算的自动进行。

气液两相流压差波动具有概率意义下的自相似性,这种自相似性是指相同流型下不同时刻波动过

程的统计自相似,此外,压差波动过程还具有长程相关的特性。本文认为压差波动自相似性和长程相关性的根本原因在于气液两相流动中的密度波、界面波的变化及传播的因果性和液体湍流运动、气泡统计特性的自相似性所致,但目前还没有相关的理论证明。

4 实验结果与分析

4.1 波动过程及统计分析

一组典型压差波动过程以及对应的概率密度分布函数(PDF)和功率谱密度(PSD)分析结果见图1。有以下规律:

(1) 泡状流的波动能量最小,但其波动的频率范围较宽,波动过程满足高斯正态分布。泡状流区影响压差波动的根本原因在于气泡的存在及其运动对流场的扰动和诱导的湍流,以及由于壁面诱导而产生的流场湍动,这些因素导致的波动幅度很低,同时

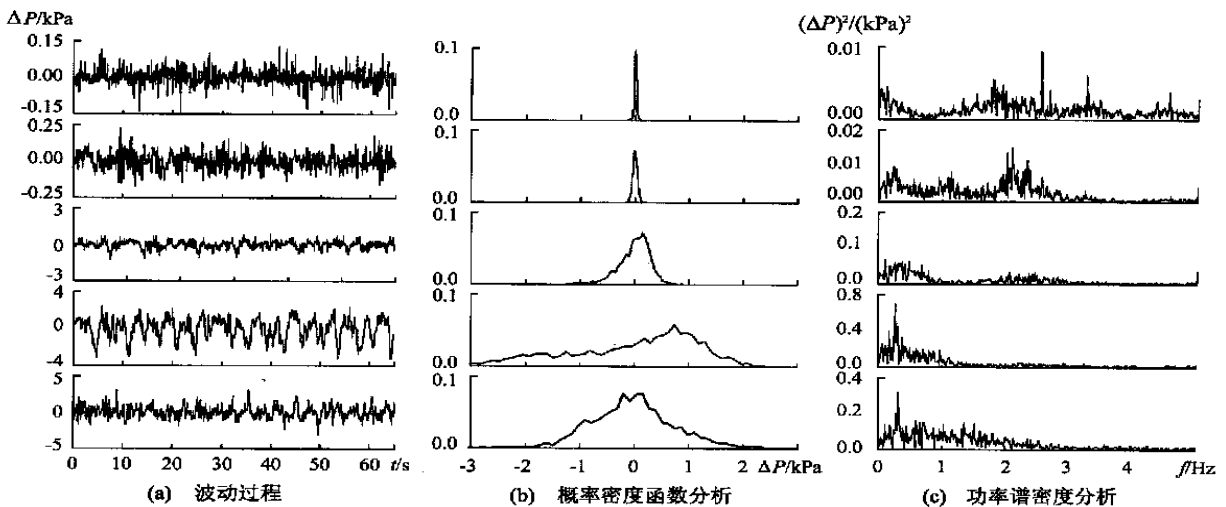
由于气泡的尺寸和运动速度在相当大的范围内分布,因此压差波动的频率范围较宽。

(2) 对有球盖形气泡的弹状流,由于球盖形气泡的尺寸较小,因此波动特性与泡状流类似。

(3) 对有弹状大气泡的弹状流,波动幅度明显增加,并且波动的周期性十分明显,波动的频率范围变小,在0~1.5 Hz之间,增加折算气速,波动幅度也增加,但概率分布分散。

(4) 对块状流动,波动频率分布范围随气速的增加而增加,同时波动能量减小,概率密度分布逐渐集中。弹状流和块状流产生波动的根本原因在于气弹和液弹不同的流动结构和流动特性。

(5) 对环状流,波动能量随气速增加而增加,频率分布范围也增加,概率密度分布逐渐分散。环状流区产生波动的主要原因是扰动波的影响,扰动波的特性决定了压差波动具有频率范围宽和波动能量大的特点。



1—泡状流;2—有球盖形气泡的弹状流;3—有泰勒气泡的弹状流;4—块状流;5—环状流

图1 $v_{LS} = 0.54\text{m/s}$ 不同流型的典型压差波动过程及其统计分析

Fig. 1 Typical differential pressure fluctuations and their statistical analysis in each flow pattern under condition of liquid superficial velocity $v_{LS} = 0.54\text{m/s}$

因此,对空气-水两相流动,流型不同,尽管发生压差波动的原因不同,但是波动过程的功率谱密度、概率密度分布函数的随流型的差异性不显著,并且随液速的增加,这种差异性更小。

Tutu^[2]和 Matsui^[3]的实验结果表明,对垂直上升管空气水两相流动,能够根据压差波动概率密度分布函数的峰值个数及位置识别泡状流、弹状流、块状流和环状流。这与本实验结果有明显不同。导致这种结果的主要原因是波动过程的随机性,另外测

量段上游的弯曲段也有重要影响。弯曲分离效应导致了弯管内气泡从液体中分离与合并,在一定气量下会有大气块出现,并近似周期性地释放进入上升管内,影响了压差波动过出的概率密度分布函数的规律。尽管本实验段和文[2,4]的不同,但是流型种类和特征一致。因此可以说根据压差波动过程的概率密度分布函数划分流型不具有普遍适用性。

压差波动的均方根分析结果见图2,图中 R 为压差波动均方根。对泡状流,均方根(RMS)变化规

律随折算气速和折算液速的增加基本保持不变;对弹状流,RMS 随气速增加而快速增加,并且折算液速越低,RMS 增加的速度越快,增加的幅度也越大;对折算液速 0.54 m/s、1.00 m/s,RMS 增加到最大值时进入块状流,而对折算液速 1.54 m/s 这种变化过程不明显,RMS 从弹状流到块状流连续增加;在块状流区,折算液速 0.54 m/s 的 RMS 随气速增加而减小,而其它两液速的 RMS 随折算气速增加而增加,并且折算液速越小,RMS 越大;在环状流内,RMS 随折算液速增加而减小,随折算气速增加而快速增加。

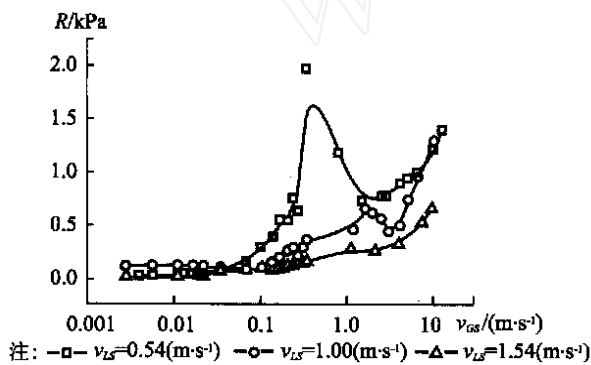


图 2 压差波动的均方根分析
Fig. 2 Root mean square of differential pressure fluctuation

因此根据实验结果,低液速下可根据压差波动的均方根确定流型的界限,但对高液速不适用。液速增加后,液相湍流效应(包括壁面诱导湍流和气泡诱导湍流)大大增强,气泡运动和界面波动对压差波动的贡献相对减弱,导致压差波动的分散程度(均方根)与流型的关联减弱。

无量纲时均压差与折算气速的变化结果见图 3。最明显的规律是时均压差随折算液速的增加而增加,而随折算气速的变化与所处的具体流型有关。详细的讲:泡状流区时均压差随折算气速的改变而近似维持不变;时均压差从泡状流进入弹状流时单调减小,在整个弹状流区内随折算气速增加而减小;时均压差从弹状流进入块状流区时有一个小的突升,其后随折算气速增加而减小;时均压差从块状流进入环状流区后由于管壁上出现光滑液膜,时均压差随折算气速增加而降低,在高气速时环状流气液界面出现扰动波,界面波动的幅度明显增加,因此时均压差随折算气速增加而增加。

由此可见,时均压差的变化基本反映了流型的转变过程,但由于流型转变对应的压差变化不大并

且考虑到测量误差的影响因素,用来划分流型仍缺乏实用性。

Owen^[9]做了类似的研究工作,采用内径为 0.0318 m 长度为 20 m 的垂直上升管,压降随气速的变化规律与本文基本类似,差异出现在块状流与环状流的转变区,Owen 的实验结果没有出现小的突升。通过实验观察发现,上游弯管内大气块的形成与释放在弹状流进入块状流时达到最大,即气块的体积和释放进入上升管的频率最大,因此在上升管内从弹状流进入块状流区时出现时均压差的突升。因此这种差异是本实验段的特殊性所造成的。

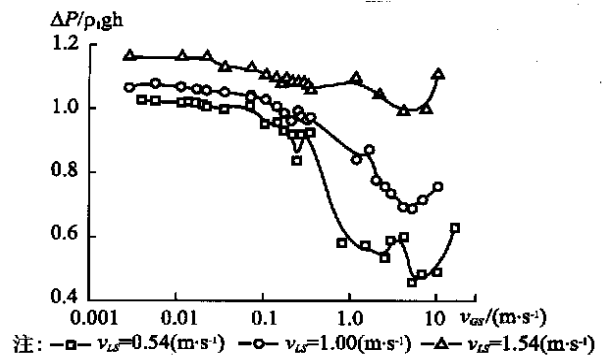


图 3 时均压差随气速的变化规律
Fig. 3 Means of differential pressure fluctuation

4.2 分形分析

压差波动的分维数实验结果见图 4。从该图中可以得到如下结论:压差波动的混沌特性和流型密切相关,压差波动的分维数受折算液速和气流的影响很大。以折算液速 0.54 m/s 的结果为例:在泡状流区分维数随折算气速增加而减小;分维数在进入弹状流区时发生突升,随折算气速增加先快速增加到最大值后再减小;分维数在流动进入块状流时出现突升,随折算气速增加而增加;在环状流区没有出现突变,仍随折算气速线性增加,分维数在高气速下

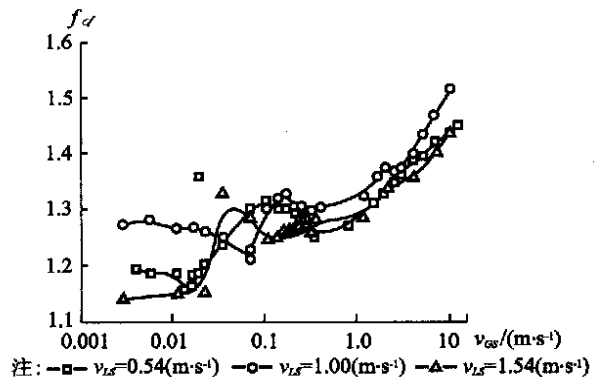


图 4 压差波动分维数的实验结果
Fig. 4 Fractal dimension results

超过 1.5。

下面分析折算液速对分维数的影响规律。折算液速 1.00 m/s 和 0.54 m/s 的分维数的变化规律相同,主要差异是分维数变化的拐点所对应的折算气速不同,这与折算气速对流型转变的影响规律相对应;另外折算液速的大小也影响了分维数的数值,在泡状流区的影响最显著,折算液速大的泡状流的分维数也大。折算液速 1.54 m/s 分维数随折算气速的变化规律与其它两个液速明显不同,主要区别是:泡状流区的分维数随气速的增加而不再保持单调变化,在泡状流-弹状流转变区时达到最大,后随气速增加连续减小,在进入块状流达到最小,但在块状流和环状流区仍保持连续增加的规律。

从压差波动分维数的数值看,除了高气速环状流外,所有流型的分维数都小于 1.5,对应的 Hurst 指数大于 0.5,说明多数流型内压差波动过程是一个持久性的过程。高液速环状流的分维数大于 1.5,由于高气速环状流区界面波的类型只有扰动,界面波动的频率和幅度随气速的增加而增加,导致压差波动的反持久特性,但是具体物理机理需研究界面波动的非线性特性才能得到准确的解释,目前这方面的研究工作还极其匮乏。

Franca 计算了水平管内空气-水两相流在波状流、弹状流、块状流和环状流时的压差波动过程的分维数^[5],结果都小于 1.5,可惜作者对每种流型仅仅计算了一个工况的分维数,并没有做广泛的研究,此外也没有涉及泡状流。就目前作者掌握的文献,其它对压差波动非线性的研究^[4,6,7]都没有给出分维数的实验结果。

5 结论

(1) 空气-水两相流压差波动过程的均值、均方根与流型有密切的联系,但据此识别流型缺乏实用性。均方根在低液速下随气速的变化体现了流型的转变,高液速时则不明显。相关研究根据概率密度分布函数识别流型的方法不具有普遍适应性。

(2) 压差波动的分维数除了在高气速的环状流,在其它流型内都小于 1.5。

(3) 折算液速的大小强烈影响压差波动的混沌特性,需要大量的实验数据的积累和深入研究不同流型下内部流动过程以揭示分形参数变化的内在机理。

参考文献:

- [1] Weisman J, Duncan D, Gibson J, *et al.* Effects of flow properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1979, 5(6): 437-462.
- [2] Tutu N K. Pressure fluctuations and flow pattern recognition in vertical two phase gas-liquid flows [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1982, 8(4): 443-447.
- [3] Matsui G. Identification of flow regimes in vertical gas-liquid two-phase flow using differential pressure fluctuations [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1984, 10(6): 711-720.
- [4] Saether G, Bendiksen K, Muller J, Froland E. The fractal statistics of liquid slug lengths [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1990, 16(6): 1117-1126.
- [5] Franca F, Acikgoz M, Lahey R T, *et al.* The use of fractal techniques for flow regime identification [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1991, 17(4): 545-552.
- [6] Cai Y, Wambsganss M W, Jendrzeczyk J A. Application of chaos theory in identification of two-phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel [J]. *ASME J. Fluid Engineering*, 1996, 118(2): 383-390.
- [7] Langford H M, Beasley D E, Ochterbeck J M. Chaos analysis of pressure signals in upward air-water flows [C]. *Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF '98, Lyon, France, 1998.*
- [8] Bai Bofeng, Wu Tiejun, Guo Liejin, *et al.* Two-phase flow pattern and pressure fluctuation of two-phase upward flow in a π -type tube [C]. *Multiphase Flow and Heat Transfer Proc. of the Fourth International Symposium, Xi'an China, 1999.*
- [9] Jayanti S, Hewitt G F. Prediction of the slug-to-churn flow transition in vertical two-phase flow [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1992, 18(6): 847-860.

收稿日期: 2001-06-06。

作者简介:

白博峰(1971-),男,讲师,博士,从事多相流动与传热领域的科研工作;

郭烈锦(1963-),男,博士,教授,从事多相流热物理和新能源开发等领域的科研和教学工作;

陈学俊(1919-),男,院士,从事多相流热物理的教学和研究工作。

(责任编辑 韩 蕾)