

# 垂直上升管泡状流压力波动的多尺度分析

白博峰 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)

**摘要** 从理想的单气泡运动物理模型和离散正交小波与统计相结合的信号处理技术研究了泡状流压力波动的机理与多尺度时频规律, 得到以下结论: 泡状流的压力波动主要来源于气泡的运动和诱导湍流及液相湍流, 其中在低流速下前者产生的压力波动幅度大于后两者; 存在一个临界频率, 低于该频率压力信号均方根随频率的增加而增加, 高于该频率压力信号均方根随频率的增加而减小; 发生流型转变时压力信号的时频特征发生明显改变, 最大均方根出现在更低的频率区。

**关键词** 泡状流; 压力波动; 多尺度分析

**中图分类号:** TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)03-0427-04

## MULTI-SCALE ANALYSIS OF PRESSURE FLUCTUATION IN VERTICAL UPWARD BUBBLY FLOW

BAI Bo-Feng CHEN Xue-Jun

(State Key lab of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** The mechanism of pressure fluctuation in bubbly flow was investigated on basis of the physical model of ideal single moving bubble. And the multi-scale time-frequency characteristics of the fluctuation were analyzed with both the discrete wavelet and the statistics theory. The results were induced as followed. The pressure fluctuation in bubbly flow is resulted from the moving bubble, the derivational turbulence by bubble, and the liquid turbulence. The fluctuation amplitude resulted from moving bubble can be greater than that resulted from other two reasons under the condition of low liquid velocity. The distribution of RMS pressure has a distinguished difference across a critical frequency, where the RMS pressure increases with frequency in the frequency region lower than the critical frequency while decreases in the region greater than the critical one. The time-frequency characteristic of pressure signal has a distinct change at the flow pattern transition, which the maximum RMS pressure will transfer to a lower frequency.

**Key words** bubbly flow; pressure fluctuation; multi-scale analysis

### 1 前 言

气液两相流是一个复杂的非线性动力学系统, 深入的研究气液相界面非线性动力学特性和规律具有重要的基础科学意义。由于气、液相界面的变形和运动等原因, 使两相流动与传热过程表现出典型的随机性, 采用数理模型预测的方法十分困难, 目前尚未有明显的研究进展。统计方法在分析压力波动规律中得到了充分应用<sup>[1]</sup>, 但是这些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。基于非线性理论研究波动过程是今后发展的一个趋势, 也是多相流热物理学科的一个方向。在

非线性研究方法中, 确定性混沌理论已经得到了较多应用。压力或压差或含气率信号的关联维数<sup>[2]</sup>、熵<sup>[3]</sup>、Lyapunov 指数<sup>[4]</sup>等特征分析对揭示两相流非线性动力学规律方面有很大促进。

压力信号包含了两相流动的丰富信息。经典的 Fourier 分析技术在处理频域信息时损失了时域信息。小波分析方法能够同时刻画时-频域特征, 对信号特征的数理表述有明显优势。这种方法已经在气固两相流压力信号分析中得到了大量应用<sup>[5]</sup>。由于两相流的随机性特点, 采用小波分析, 相同工况不同样本的时频特征仍存在较大差异, 不利于波动过程客观规律的总结。将小波分析与统计分析有机

收稿日期: 2003-12-19; 修订日期: 2004-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50006010); 973 项目资助 (No.G1999022308); 博士点基金资助 (No.20030698036)

作者简介: 白博峰 (1971-), 男, 河北南皮人, 副教授, 博士, 主要从事多相流热物理及随机诊断理论的工作。

结合, 可以相对全面的分析压力信号在不同尺度的时频特征。

本文首先采用理想物理模型预测泡状流压力波动机理, 然后引入离散正交小波变换方法, 研究试验测量的压力信号在不同尺度上的时频特征与规律。

## 2 均匀泡状流压力波动的单气泡分析

两相流压力波动时由于气泡运动的动力学效应和流道系统的影响, 流道系统的影响(泵、节流件、弯头等)表现为白噪声或倍频噪声, 有多种滤波技术可以去掉这类噪声, 本文重点讨论动力学效应, 主要包括: (1) 气泡的运动对压力场的影响; (2) 气泡的诱导湍流以及液相湍流。

### 2.1 单气泡运动对压力场的影响

理想条件下, 假设球形气泡, 半径是  $a$ , 气泡是不可压缩的, 气泡不旋转, 气泡周围液相的运动是无旋和轴对称的。因此容易得到气泡周围的速度势函数的分布规律:

$$\phi = V_{\infty} \left( r + \frac{a^3}{2r^2} \right) \cos \theta \quad (1)$$

计算总速度的平方:

$$V^2 = V_r^2 + V_{\theta}^2 + V_{\psi}^2 =$$

$$V_{\infty}^2 \left[ 1 + \frac{a^3}{r^3} (1 - 3 \cos^2 \theta) + \frac{a^6}{4r^6} (1 + 3 \cos^2 \theta) \right] \quad (2)$$

以无穷远处的运动状态为基准 ( $P_0$ 、 $V_0 = 0$ ), 根据伯努力方程, 速度  $V$  所对应的压力为:

$$P = P_0 - \frac{1}{2} \rho_l V^2 = P_0 - \frac{1}{2} \rho_l V_{\infty}^2$$

$$\left[ 1 + \frac{a^3}{r^3} (1 - 3 \cos^2 \theta) + \frac{a^6}{4r^6} (1 + 3 \cos^2 \theta) \right] \quad (3)$$

忽略管壁对气泡运动的影响, 得到影响压力(压差)波动的几个因素: 气泡周围液体密度  $\rho_l$ 、气泡直径  $a$ 、气泡运动速度  $V_{\infty}$ 、气泡与测点的距离  $r$  及夹角  $\theta$ 。压力波动幅度随气泡直径和气泡运动速度的增加呈指数形式快速增加, 但波动幅度和气泡与测点之间距离的高次方呈反比。

设管道直径  $D = 0.05 \text{ m}$ , 气泡半径为  $0.002 \text{ m}$ , 气泡运动速度  $V_{\infty} = 1.5 \text{ ms}^{-1}$ , 液相密度  $998 \text{ kgm}^{-3}$ 。沿直管流动方向布置了 4 只压力传感器, 见图 1。以  $P_1$  所处截面为基准面 0, 其它压力传感器与  $P_1$  的距离分别为  $0.5D$ 、 $D$ 、 $5D$ 。气泡与管壁的垂直距离为  $0.2D$ , 计算结果见图 2、3。图中  $x$  轴表示气泡运动轨迹中相对 0 截面的无量纲垂直距离, 负值表示气泡位于 0 截面的上游。所有图中

的压力波动过程均去掉了均值。(1) 当测点位于气泡运动的下游, 压力随气泡的接近逐渐升高, 在气泡的中心到达测量截面之前达到最大, 在气泡的中心到达测量截面时压力达到最小; (2) 压差波动过程与压力成反相特征; (3) 压差波动周期和两个测量截面的距离有关, 随距离增加而增加, 而压差波动幅度与距离无关。

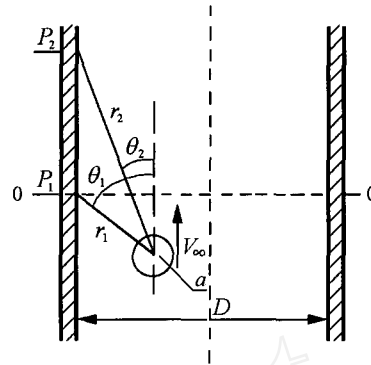
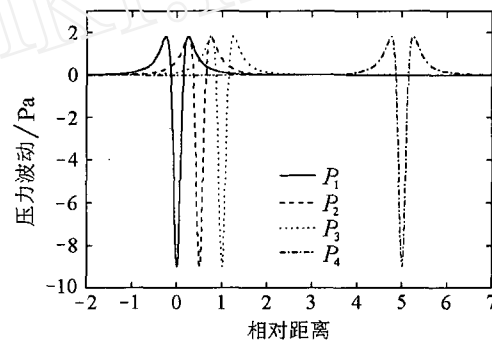
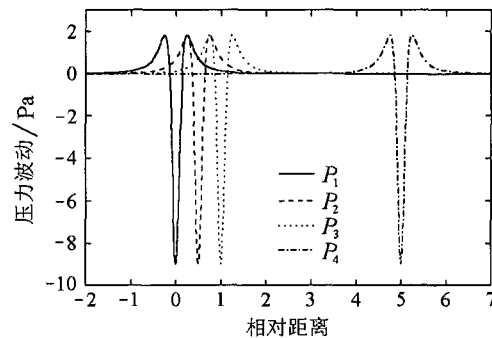


图 1 垂直管内单个气泡运动时的压力压差波动模型



(a)



(b)

图 2 压力和压差波动过程

### 2.2 气泡的诱导湍流以及液相湍流

文献 [6] 根据单相湍流强度的试验数据分析了液相湍流引起的压力波动幅度的大小, 该波动值要小于气泡的运动对压力场的影响。气泡的存在影响

了液相流场的湍流结构和湍流尺度, 液相湍流的变化反之也影响气泡的运动, 这个相互作用关系是非线性的。气泡诱导湍流的强度与液相流速和含气率的大小有关<sup>[7]</sup>, 对低含气率泡状流或低流速泡状流气泡诱导湍流更显著, 但高液速流动时气泡对湍流的抑制作用加强。Liu T J 和 Bankoff<sup>[8]</sup> 试验研究表明, 气泡诱导湍流强度在低液速近壁区为 0.15, 在高液速近壁区为 0.35。根据  $\Delta P' = 1/2\rho_l(u')^2$  可以计算出气泡诱导湍流所引起的压力波动幅度, 此值在低液速下同样小于气泡的运动对压力场的影响, 在高液速下大于气泡的运动对压力场的影响。

### 3 泡状流压力波动的试验结果

实验段为由透明有机玻璃管制成的垂直上升管, 内径为 0.05 m。压力信号由 0.2 级精度响应频率 1 kHz 的压阻式压力变送器测量, 采样频率为 500 Hz。折算液速为  $0.54 \text{ ms}^{-1}$ 、 $1.00 \text{ ms}^{-1}$ 、 $1.50 \text{ ms}^{-1}$ 。图 3 是液速  $1.50 \text{ ms}^{-1}$ 、含气率为 0.011 的压力信号(去掉了均值、光滑自回归滤波处理)及其 FFT 谱。泡状流具有类周期性的流动的特点, 局部最大能量对应的频率在 1 Hz、5 Hz 和 7 Hz 等, 并且能量依次递减, 因此泡状流压力波动的信息具有多尺度的特点。

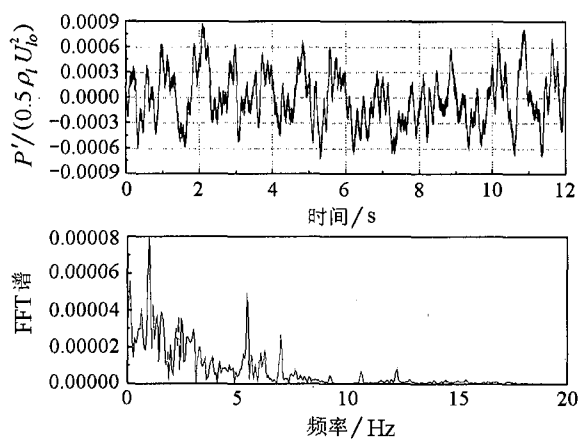


图 3 泡状流压力波动及其 FFT 谱

经过无量纲处理后, 压力波动的均方根随含气率的增加而增加, 但增幅不大, 液速的影响很显著, 液速增加, 无量纲均方根减小, 由机理分析可知这是湍流强度增加所致。泡状流压力均方根可由下面的无量纲经验关联式预测:

$$\frac{\sqrt{P'P'}}{1/2\rho_l U_l^2} = 10^{11.213} Re^{-2.206} a^{1.017} \quad (4)$$

含气率采用 Zuber-Findlay 公式计算。

## 4 泡状流压力波动的多尺度分析

### 4.1 离散正交小波变换与统计分析

小波变换具有时频定位特性, 它是函数  $f(t)$ (或信号) 在小波函数系上的展开。对压力采样信号  $p'(i) : i = 1, 2, \dots, N$ , 采用离散正交小波基, 信号的小波系数为:

$$w_j(k) = \sum_{i=1}^N \psi_j[k - 2^j i] p'(i) \quad (5)$$

对不同尺度  $j(j = 1, 2, \dots, M)$ , 小波系数的长度为  $N/2^j$ 。不同尺度上的小波逆变换为:

$$p'_j(i) = \sum_{k=1}^N w_j[k] \psi_j[k - 2^j i] \quad (6)$$

对所有尺度的和即为原采样信号。

采用多分辨分析及重构算法和 Daubechie 小波基进行小波系数的求解, 得到所有尺度上的小波系数序列。这些序列包含了原始采样信号的从高到低的频率信息, 每个序列都是一定频率范围上原始信号的全部时间信息, 因而多分辨分解是一种具有时-频局部化特性的优势。传统统计分析只能得到信号在时域或频域内的特征, 无法揭示时频域内的规律。本研究对采用信号的离散正交小波变换系数进行统计分析, 即可以从时频域内对压力信号进行更加全面的分析。

### 4.2 压力信号的多尺度分解

对压力信号的小波分解发现, 泡状流压力波动过程在不同尺度上表现为不同的特征, 波动幅度随尺度增加而增加, 即在高频区波动幅度最小, 波动幅度随频率增加而减小。由前面的单气泡模型及诱导湍流的分析可知, 低频区压力的波动主要来源于气泡的运动, 高频区压力的波动主要来源于诱导湍流。气泡的运动主要表现在压力的低频波动区。

### 4.3 多尺度统计分析

为了对压力信号进行多尺度的定量分析, 将压力信号在不同尺度的小波系数及最大尺度的近似信号进行均方根计算, 结果见图 4~图 6。对泡状流, 压力波动均方根随尺度增加急剧增加, 在频率 15.625 Hz 能量达到最大, 随后随频率增加而快速降低。因此可以将 15.625 Hz 为临界频率将泡状流压力波动过程划分为低频区和高频区。在高频区, 均方根随含气率增加而单调下降, 明显不同于在低频区的影响。在低频区随着含气率增加, 均方根经历了随频率增加而略微下降然后急剧上升的过程。在最低频率 (0.976 Hz) 的均方根随含气率增加而增加, 说

明含气率对泡状流压力波动的影响在低频区非常显著, 含气率增加, 气泡的平均尺寸液增加, 因此表现出图中的实验结果, 这也与前面的简化分析结果相佐证。最低频的均方根压力增加, 其物理机制可能是不同大小的气泡诱导的压力波在时空传播过程中出现波动增强的宏观效果。多尺度分析结果还表明, 频域内 RMS 变化可较好的反映泡状流型的转变, 即在泡状流与球盖形气泡流 (低流速) 或弹状流 (高流速) 转变区, 压力波动的均方根在频域区的特性发生明显改变, 最大均方根出现的位置向低频率区移动。

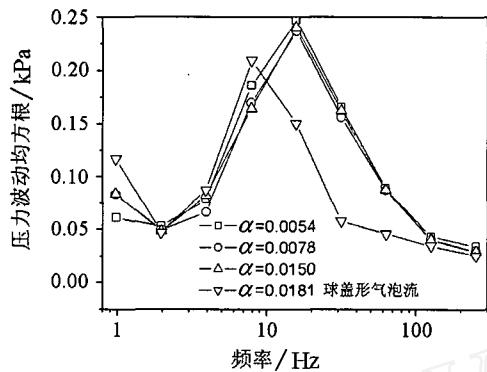


图 4 泡状流压力信号的多尺度均方根 ( $U_{lo} = 0.54 \text{ ms}^{-1}$ )

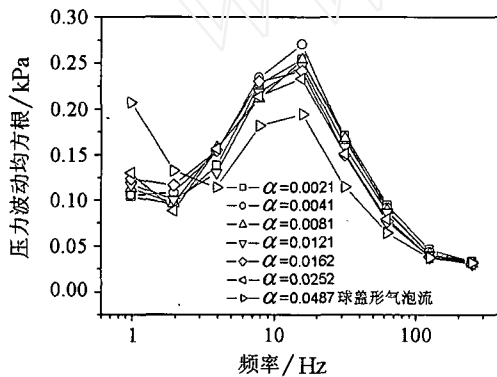


图 5 泡状流压力信号的多尺度均方根 ( $U_{lo} = 1.0 \text{ ms}^{-1}$ )

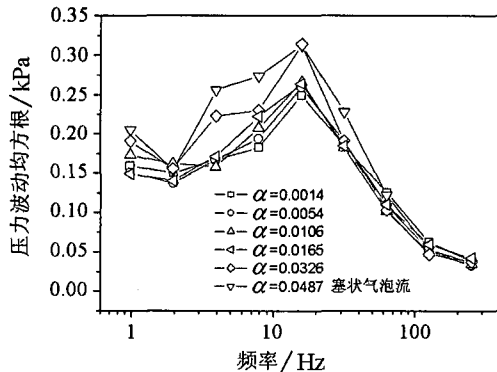


图 6 泡状流压力信号的多尺度均方根 ( $U_{lo} = 1.5 \text{ ms}^{-1}$ )

## 5 结 论

为了揭示气液泡状流压力波动的机理与规律, 本文首先从理想的单气泡运动物理模型出发, 分析了压力波动的产生机理与影响因素, 然后根据试验测量的压力信号, 采用离散正交小波与统计相结合的信号处理技术研究了压力的多尺度时频规律, 得到以下结论:

(1) 泡状流的压力波动主要来源于气泡的运动和诱导湍流及液相湍流, 其中气泡的运动产生的压力波动幅度在低流速下大于后两者, 气泡运动导致的压力波动主要表现在信号的低频区, 影响压力波动的因素主要有气泡周围液体密度、气泡直径、气泡运动速度、气泡与测量点的距离等。

(2) 压差波动过程与压力成反相特征; 压差波动周期和两个测量截面的距离有关, 随距离增加而增加, 而压差波动幅度与测量距离无关。

(3) 存在一个临界频率, 低于该频率压力信号均方根随频率的增加而增加, 高于该频率压力信号均方根随频率的增加而减小; 发生流型转变时压力信号的时频特征发生明显改变, 最大均方根出现在更低的频率区。

## 参 考 文 献

- [1] Wambsganss M W, Jandrzeczyk J A, France D M. Determination and Characteristics of the Transition to Two-Phase Slug Flow in Small Horizontal Channels. ASME J. of Fluid Engineering, 1994, 116: 140-146
- [2] Cai Y, Wambsganss M W, Jandrzeczyk J A. Application of Chaos Theory in Identification of Two-Phase Flow Patterns and Transitions in a Small, Horizontal, Rectangular Channel. ASME J. Fluid Engineering, 1996, 118: 383-390
- [3] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 空气水两相流压力波动现象非线性分析. 工程热物 理 学 报, 2001, 22(3): 369-372
- [4] 杨靖, 郭烈锦. 气液两相流压差信号的非线性分析. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 134-139
- [5] Hui Li. Application of Wavelet Multi-Resolution Analysis to Pressure Fluctuations of Gas-Solid Two-Phase Flow in a Horizontal Pipe. Powder Technology, 2002, 125: 61-73
- [6] Samways A L, Bradbury L J S, Bruun H H. Pressure Measurements and Convection Velocity Evaluations in Two-Phase Flow. Int. J. Multiphase Flow, 1997, 23(6): 1007-1029
- [7] Michiyoshi I, Serizawa A. Turbulence in Two-Phase Flow. Nuclear Engineering Design, 1986, 95: 253-267
- [8] Liu T J, Bankoff S G. Structure of Air-Water Bubbly Flow in a Vertical Pipe-1. Liquid Mean Velocity and Turbulence Measurements. Int. J. Heat Mass Transfer, 1993, 36(4): 1049-1060