

## 垂直上升管汽液两相流型的压差波动特征识别 \*

白博峰 郭烈锦 赵 亮

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

**摘 要** 运用现代数字信号处理技术, 对垂直上升管水/水蒸气两相流不同流型时的压差波动信号特性进行了分析研究, 提出了基于压差波动特征的两相流流型的客观识别方法. 通过提取压差波动信号的功率谱分布特征, 表明利用功率谱随频率的分布特性的均方根可客观识别出泡状流、间歇流和环状流.

**关键词** 两相流 流型 功率谱密度函数 特征提取

**中图分类号** TQ 021.1

### 引 言

垂直上升管中的两相流流型可分成 4 个基本型式: 泡状流、弹状流、块状流、环状流. 弹状流和块状流也统称间歇流<sup>[1,2]</sup>. 已有的流型图不完全一致, 缺乏普适性. 其原因是流型的识别多以目测方法进行, 结果带有很强的主观随意性; 另一原因是观察点处的流动如果是在非充分发展区, 流型受汽液混合的方式和长度的影响很大<sup>[3]</sup>. 随着对两相流理论研究的不断深入, 研究流型客观识别的方法日显重要.

所谓流型客观识别方法, 即通过采用先进的测试与信号处理技术, 获取反映汽(气)液两相流各种流型本质特征的客观数理描述与流型转变过程中特征参数的变化规律, 根据这些数理描述及其特征参数的变化规律进行定量分析, 实现流型的客观识别与划分.

早期 Hubbard 和 Dukler<sup>[4]</sup>对壁面静压力波动特性进行功率谱分析, 定量识别水平管内离散流、弥散流和断续流. 这种方法不能消除从实验段出口反射回来的虚假信号, 因此不同实验处理结果的一致性很差.

Jones 和 Zuber<sup>[5]</sup>应用射线衰减技术测量了垂直管内空气/水两相流的含气率, 根据含气率信号的概率密度函数(PDF)的形状可以识别流型. 其后, Vince 和 Lahey<sup>[1]</sup>实验证明可以用含气率的方差来作为流型转变的标准. 由于功率谱分布受液相流速的影响较大, 作者认为不宜作为流型的识别准则. 且含气率的测量装置比较昂贵、复杂, 限制了应用.

近年来, 发展了一种采用压差波动信号的概率密度分布或频谱分布来客观识别流型的方法. 压差由不同位置的壁面静压力之差获得. Tutu<sup>[6,7]</sup>采用轴向间距为  $D/2$  的两个压力传感器, 对压差做量纲 1 化( $\Delta p^*$ ).  $\Delta p^*$  的概率密度分布与流型的关系同文献[5]的结果类似. Matsui<sup>[3,8]</sup>采用两组轴向间距分别为  $D/2$ 、 $10D$  的压力传感器, 用 Gram-Charlier 序列来近似压差波动的概率分布, 通过与实验确定的临界系数进行比较, 实现客观识别流型.

利用差压波动信号代替绝对压力波动信号, 消除了测量段外部的各种波动因素的影响,

1998-07-03 收到初稿, 1999-04-22 收到修改稿.

联系人及第一作者: 白博峰, 男, 28 岁, 博士.

\* 国家杰出青年科学基金资助项目(No. 59725616).

简单实用. 已有的研究多针对常压空气/水绝热两相流动, 在高温、高压水/水蒸气两相流系统下的研究十分缺乏, 本文开展了这方面的工作.

## 1 实验系统与方法

实验采用闭式循环系统, 见图 1(a), 整个回路用硅酸陶瓷纤维包覆, 以减少散热, 流体采用去离子水, 并由屏蔽泵驱动, 系统压力由与泵出口水箱相连的高压氮气源提供, 水蒸气通过预热段的电加热来产生.

试验段由不锈钢管制成, 全长为 2 m, 见图 1(b). 压差采用 1151DP 电容式微压差传感器, 其最高响应频率为 5 Hz, 经实验验证, 可以反映汽液两相流的压差波动过程. 引压管尽量短, 以减少被测信号的衰减和滞后. 压差波动信号的采样频率为 50 Hz, 采样点数为 4096. 压差波动信号通过 PCL818HG 高速数据采集板和计算机进行采集和记录. 压力用 CY-B 型标准信号压力传感器, 流量用孔板测量, 这些参数用 IMP 分散式数据采集板和计算机进行记录.

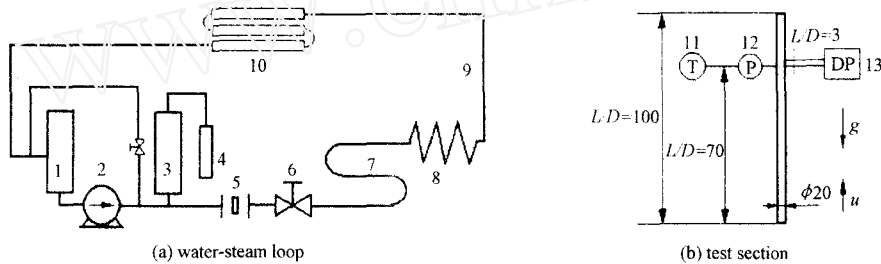


图 1 实验设备示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device (unit of dimension: mm)

- 1—water tank; 2—canned pump; 3—surge tank; 4—pressurized nitrogen vessel; 5—orifice;  
6—flow adjusting valve; 7—preheater; 8—preheater; 9—vertical tube (test section); 10—condensor;  
11—armored thermocouple; 12—pressure transducer; 13—Manometer

## 2 数据处理方法

对于汽液两相流系统, 管内某截面的压力波动包括两个来源, 一是远处流动系统的影响, 另一是汽液两相流经测量截面时所引起的压力波动. 使用两个邻近截面的压力差较大幅度地消除远处流动系统的影响, 所得到的压差波动过程可近似认为是汽液两相运动所造成的.

将压差波动信号按如下形式量纲 1 化处理

$$\Delta p^* = \Delta p / \Delta p_0 \quad (1)$$

由于记录得到的压差波动信号常混有各种噪声, 因此在对其进行分析之前, 必须对其进行预处理, 以提高信噪比. 本文采用了去均值、滤波的方法. 滤波时采用 Chebyshev 最佳逼近理论进行低通滤波, 得到最高频率为 5 Hz 的信号. 功率谱采用 Welch 平均周期图方法, 并采用汉宁窗函数, 此方法保证了所得到的功率谱是渐近无偏估计<sup>[9]</sup>.

### 3 功率谱密度(PSD)函数结果分析

对单相水流动,压差波动幅度很小. PSD 分析结果见图 2. 能量分布十分分散, 最大功率谱值也很小. 说明单相流动时的压差波动的频谱分布表现出随机无序性<sup>[10]</sup>.

当管内出现汽液两相流动时, 由于蒸汽的可压缩性、汽相的密度和粘性系数又远小于液相, 汽相内部的压力梯度分布远小于液相, 再者由于汽液两相之间存在速度差, 汽相的相对运动对周围液体产生扰动力的作用并向远处传播, 因此, 在汽液两相流过压差测量段时, 压差信号波动幅度大大增加. 对压差波动信号的分析表明, 当此信号满足平稳过程的条件时<sup>[9]</sup>, 实验中功率谱与频率有两种典型分布, 下面分别详细讨论.

#### 3.1 单峰分布

这种分布出现在很低的含气率和高含气率两个区域, 分别见图 3 和图 4. 图中含气率  $\alpha$  是用中国电站水动力计算法求得<sup>[11]</sup>,  $x_e$  是热平衡干度, 以加热段出口处计算的值为准.

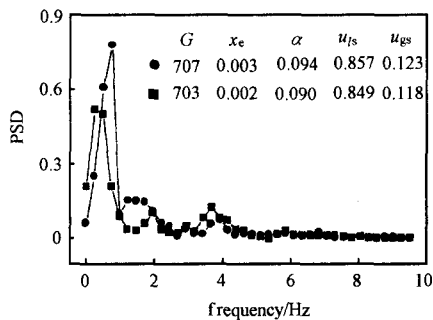


图 3 泡状流时压差波动的 PSD 分析

Fig.3 PSDs of differential pressure fluctuation in bubbly flow

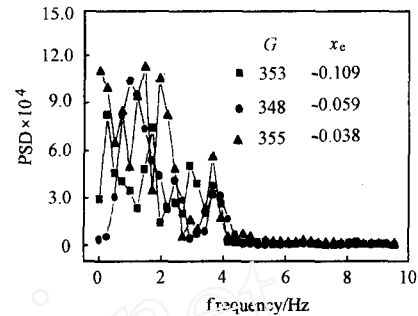


图 2 单相流动时压差波动的 PSD 分析

Fig.2 PSDs of differential pressure fluctuations in single liquid flow

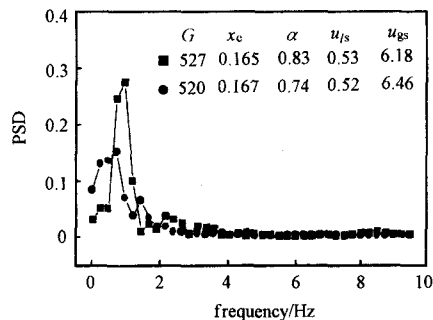


图 4 环状流时压差波动的 PSD 分析

Fig.4 PSDs of differential pressure fluctuation in annular flow

由图 3 和图 4 可见, 在 1 Hz 附近存在着能量很高的单峰, 在其他频域区能量的波动幅度接近于零. 说明管内汽相与液相的相互作用与运动的频谱特性相对比较单一, 流动过程没有发生显著变化. 联系泡状流与环状流的运动特征, 低含气率的单峰分布对应于泡状流, 而高含气率下的单峰分布则对应于环状流. 对于泡状流, 压差的波动主要是由气泡群流经测量段所引起的. 液相折算速度增加, 气泡运动速度也增加, 流经测量段的时间减少, 压差波动的能量增加, 峰值对应的频率略有增加, 但对带宽的影响并不明显. 当环状流动时, 汽液两相界面的波动及液膜内气泡的运动是导致压差波动的主要因素, 液速的影响与泡状流类似.

#### 3.2 多峰分布

多峰分布出现在中等含气率区, 在低频区 ( $< 2$  Hz), 出现两个能量较高的峰值, 而在高

频区的峰值个数不一，但能量较低，见图 5，相应时域内压差波动信号见图 6。

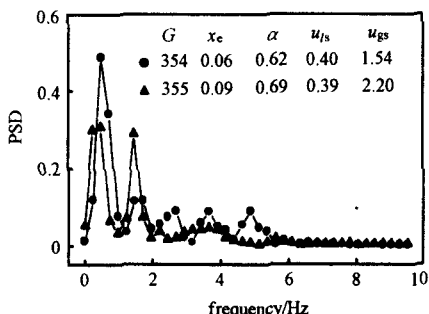


图 5 间歇流时压差波动的 PSD 分析  
Fig.5 PSDs of differential pressure fluctuation in intermittent flow

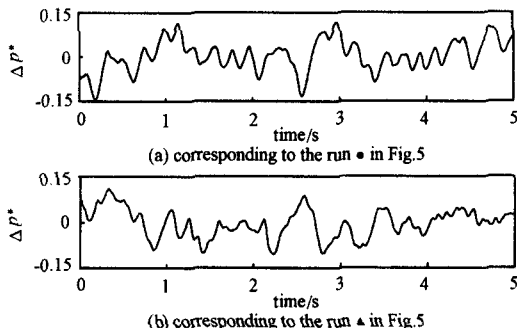


图 6 压差波动过程  
Fig.6 Differential pressure fluctuations

由图 6 知，汽液两相流动有一定的周期性，但很不规则，每个波动周期之间都存在一些更小的波动。因此两图证明了管内有一系列局部结构各异的两相流流过测量段，可断定是间歇流。折算汽速增加后，Taylor 气泡变得更细和更不规则，分裂成大小各异的多块，液弹及其内部汽泡的分布与形状也都发生了变化，形状与大小各异的汽块和汽泡非均匀地分布在液相内流动，因此，压差波动过程表现出频谱比较分散的特性。

在这组分布中，存在如图 7 所示的特例。压差波动的能量规则分布，在不同的频率处分布着一高一低两个峰值，高峰与低频处的频率分别在 0.5 Hz 和 1.5 Hz 附近，相差 3 倍，这是类似于矩形波的典型分布。在高频区的峰值极小，只能在更小尺度下才能观察到。这种双峰分布说明，流经测量段的两相流存在两种有明显差异的流动结构及特征。相应的信号波动过程见图 8，具有明显的周期性。由于 Taylor 气泡的密度和粘性系数远小于液弹，其压力梯度也远小于液弹的压力梯度，因此可断定是弹状流。由于 Taylor 气泡的压力波动频率及能量比液弹中分布的小汽泡都要高，因此，高频处的峰与汽弹对应，低频处的峰与液弹对应，并且高频处的峰值高于低频处的峰值。图 8 中信号高的区域对应着液弹，而信号低的区域对应于 Taylor 气泡区。折算汽速和折算液速增加，峰值变大，并向高频方向移动。仔细分析图 8 的压差波动信号序列，在时间方向依次出现正的压差和负的压差。由前面分析知道，正压差

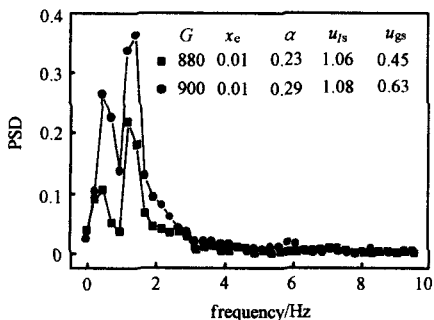


图 7 间歇流时压差波动的 PSD 分析  
Fig.7 PSDs of differential pressure fluctuation in intermittent flow

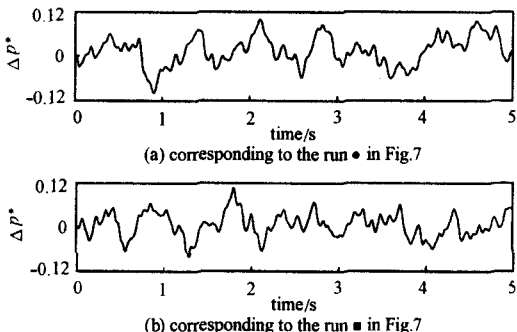


图 8 压差波动过程  
Fig.8 Differential pressure fluctuations

对应于液弹, 负压差对应于 Taylor 气泡, 这是由于 Taylor 气泡与管壁之间的液膜做下降运动所致<sup>[12]</sup>.

反过来看前面的图 5 和对应的信号序列图 6, 图 7 应是多峰分布的特例, 因为在实验或现场运行中, 不管操作多么认真仔细, 工况稳定的时间再长, 一个“理想”的稳态条件仍难以获得, 弹状流的结构并非一致, 既 Taylor 气泡以及液弹的长度、形状、速度是变化的, 因此, 在其频谱图上的峰值个数在更微的尺度上看是非单值的, 更多的是如图 5 和图 6 的工况. 本文将此对应的流型统称间歇流.

## 4 流型的客观识别

### 4.1 压差频谱分布的特征提取

根据压差波动信号的频谱分析, 采用下面方法识别垂直上升管中汽液两相流的流型: ① 泡状流: 单峰分布, 发生于低含气率区; ② 间歇流: 多峰分布, 低频还有两个高峰值, 高频区有多个峰; ③ 环状流: 单峰分布, 发生于高含气率区. 然而, 以上的主观判断准则是在典型工况下获得的, 对压差波动过程偏离平稳过程的工况, 上面的结论将出现一定的误判, 此外也不利于计算机处理和现场的自动流型识别, 因此需要作进一步的处理和改进, 以便提取压差波动信号的功率谱密度分布的特征.

采用均方根(RMS)提取压差波动信号的功率谱密度分布的特征, 结果见图 9. 相同工况下平均压差与热平衡干度的关系见图 10. 工况范围如下: 压力 3.0 MPa, 质量流速  $G = 210 \sim 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 热平衡干度  $x_e = -0.12 \sim 0.72$ . 需要说明的是图中工况不包括流动快速变化的波动过程. 图 9 表明, 当热平衡干度很小时 RMS 值接近于零, 对应于单相流动; 当  $x_e$  接近并小于零时, RMS 开始显著增加, 在  $0 < x_e < 0.2$  区 RMS 的分布十分分散并且达到最大, 在比较高的热平衡干度区 RMS 的分布相对集中并且随干度的增加略微降低. 流量越高, 出现均方根突升的热平衡干度也越低, 突升的幅度越小; 流量越低, 出现均方根突升的热平衡干度也越高, 突升的幅度越大. 图 10 反映了管内两相流的动力学特性. 当动力学特性即平均压差与干度的关系发生改变时(图中曲线的拐点), 意味着流型发生了变化. 图 10 中曲

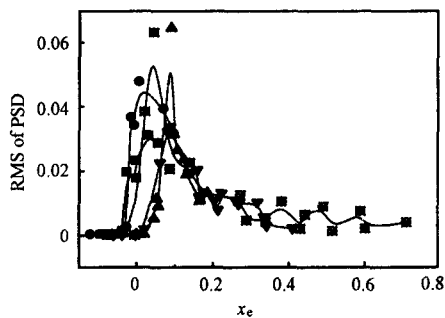


图 9 压差波动的 PSD 的 RMS 特征

Fig. 9 RMS of PSD of the differential pressure fluctuation

$G/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; ■ 880; ● 700; ▲ 535; ▼ 350; ⊗ 220

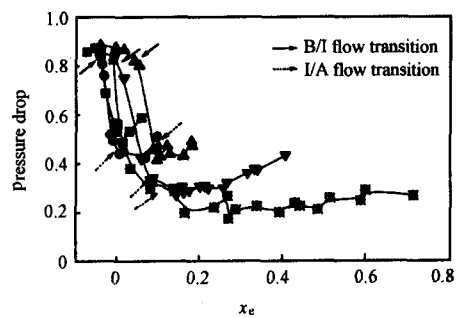


图 10 平均压差与热平衡干度的关系

Fig. 10 Average of the differential pressure vs quality

$G/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; ■ 880; ● 700; ▲ 535; ▼ 350; ⊗ 220

线的第1个拐点为泡状流-间歇流的转变,对应于图9中  $RMS = 0.002 \sim 0.005$ ,第2个拐点为间歇流-环状流的转变,对应于图9中  $RMS = 0.025 \sim 0.034$ .因此本文采用下列方法识别流型:当  $RMS > 0.03$  时对应的是间歇流.当  $RMS < 0.03$  时,若  $x_e > 0.1$ ,则是环状流;若  $x_e < 0.1$ ,是泡状流.此结论不限于压差波动是否满足平稳随机过程,包括了远离理想平稳状态的工况.

作者认为,对于汽液两相流流型的客观自动识别理论和方法,不应包括像流量、干度、含气率等难以测量的参数,否则必将限制其应用范围,难以在生产现场中广泛应用.因此,本文的方法,还有待进一步的完善.

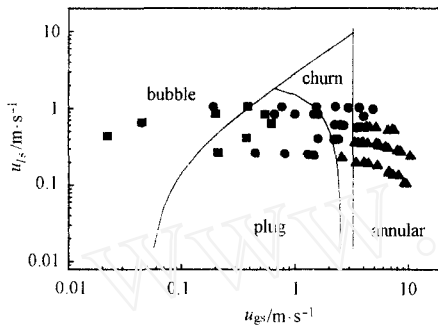


图11 实验结果与文献[2]的比较

Fig.11 Comparison of the experimental results and the flow regime map proposed by [2]

— reference[2]; ■ bubble flow;  
● intermittent flow; ▲ annular flow

#### 4.2 与有关流型图的比较

McQuillan 和 Whalley 研究了垂直上升管中两相流型的转变规律<sup>[2]</sup>,所推荐的流型转变关系式得到了广泛应用.本文用4.1节的流型识别方法处理了在  $p = 3.0 \text{ MPa}$  下的实验中获得的压差波动信号,将所得流型结果与其进行比较,总共处理了68个工况,结果见图11.本文将弹状流和乳沫状流统称为间歇流.共有10个工况发生误判,总体正确率为85.3%.最大误差发生在流型的转变区附近,但是考虑到流型转变是非突变过程,结果是令人满意的.说明这种客观识别流型的方法是可行的.

#### 5 结 论

本文详细分析了高温、高压条件下垂直上升管内汽液两相流不同流型的压差波动规律.对功率谱密度分布特性进行特征提取,发现功率谱密度分布的RMS随热平衡干度的关系可以客观地识别流型.对3.0 MPa压力下的压差波动的实验数据进行处理,表明功率谱密度分布的  $RMS > 0.03$  时是间歇流,对于  $RMS < 0.03$  的流动,根据平均热平衡干度或含气率的高低识别是泡状流和环状流.与有关文献进行了比较,结果令人满意.如何进一步提高流型识别的准确率,以及如何减少对其他难测参数的依赖,需要深入的研究.

#### 符 号 说 明

$D$ ——管径, m  
 $L$ ——实验段长度, m  
 $G$ ——质量流速,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$   
 $\Delta p$ ——压差测量值, Pa  
 $\Delta p^*$ ——量纲1压差

$\Delta p_0$ ——测量段全为水时的静态重位压差, Pa  
 $u_{gs}$ ——汽相折算速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 $u_{ls}$ ——液相折算速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 $x_e$ ——热平衡干度  
 $\alpha$ ——平均截面含气率

#### References

- 1 Vince M A, Lahey Jr. Int. J. Multiphase Flow, 1982, 8(2):93-124

- 2 McQuillan K M, Whalley P B. *Int. J. Multiphase Flow*, 1985, 11(2):161—175
- 3 Matsui G. *Nuclear Engineering and Design*, 1986, 95:221—231
- 4 Hubbard M G, Dukler A E. *Proceeding of the 1966 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*. Stanford University Press, 1966. 100—121
- 5 Jones O C, Zuber N. *Int. J. Multiphase Flow*, 1975, 2:273—306
- 6 Tutu N K. *Int. J. Multiphase Flow*, 1982, 8:443—447
- 7 Tutu N K. *Int. J. Multiphase Flow*, 1984, 10:211—216
- 8 Matsui G. *Int. J. Multiphase Flow*, 1984, 10:711—720
- 9 Zong Kongde(宗孔德), Hu Guangshu(胡广书). *Digital Signal Processing(数字信号处理)*. Beijing: Tsinghua University Publisher, 1988. 166—172, 183—209
- 10 Willmarth W W. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1975, 7:13—38
- 11 Lin Zonghu(林宗虎). *Gas Liquid Two - Phase Flow and Boiling Heat Transfer(气液两相流和沸腾传热)*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publisher, 1987. 73—74
- 12 Akagawa K, Hamaguchi H, Sakaguchi T, *et al.* *Bulletin of the JSME*, 1971, 14(71):447—454

## IDENTIFICATION OF FLOW REGIMES IN VERTICAL UPWARD STEAM - WATER TWO PHASE FLOW USING DIFFERENTIAL PRESSURE FLUCTUATIONS

Bai Bofeng, Guo Liejin and Zhao Liang

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

**Abstract** The characteristics of differential pressure fluctuations in vertical upward steam - water two - phase flow under the condition of high temperature and high pressure are studied by using the signal process technique. The fluctuations are analyzed by using the methods of time domain and frequency domain, which is a power spectrum density (PSD) function. The features of the curves of the power spectrum versus frequency are categorized as two kinds. The feature of the power spectrum density function is extracted by means of the Root Mean Square (RMS), from which an objective flow regime indicator is developed. The experimental result agrees well with the flow regime map proposed by McQuillan & Whalley under the pressure of 3.0 MPa. Future studies are required to improve the accuracy of identification.

**Keywords** two phase flow, flow regime, power spectrum density function, feature extraction