

# 竖直窄矩形通道气液两相流流型识别研究

李常伟, 曹夏昕, 孙立成, 阎昌琪

(哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**在实验研究的基础上,采用小波分析的方法对窄矩形通道内两相流的流型进行有效的识别,为在不可视或不能进行摄影测试技术特殊情况下提供了有效识别方法。通过可视化观察发现,窄矩形通道内两相流流型主要有泡状流、弹状流、搅混流和环状流。采用小波分析法给出了4种流型的功率密度图,并结合每种流型的特征及压差波动特性,对每种流型的频率分布范围及最大能量分布范围给出了界定。因此,利用频率分布特征值及最大能量分布值可对流型进行有效的识别和判定。

**关键词:**小波分析;流型;识别;窄通道

中图分类号:O359.1

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)09-1055-06

## Identification and Study of Flow Patterns in Narrow Vertical Rectangular Channel

LI Chang-wei, CAO Xia-xin, SUN Li-cheng, YAN Chang-qi

(College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** On the basis of the experimental study, two-phase flow pattern of the narrow rectangular channel by the way of wavelet analysis was identified effectively. An effective way to recognize flow pattern without visible case or high-speed photography was provided. By the visual observation, it is found that there are four flow patterns (bubble flow, slug flow, churn flow, and annular flow) in the narrow rectangular channel. The power density spectra of the four flow patterns were shown according wavelet analysis. The frequency distribution of each flow range and maximum energy distribution were also defined. Therefore, using the frequency distribution and the energy distribution maximum value can identify and determinate flow pattern effectively.

**Key words:** wavelet analysis; flow pattern; identification; narrow channel

在气液两相流动中,准确识别流动过程中的各种流型十分重要,不同的流型直接影响流体的流动特性、压降特性及传热特性,因此流型

识别是两相流研究中的一个重要方向<sup>[1]</sup>。目前,对于常规通道内两相流流型的识别已开展了很多实验及理论方向的研究工作,近年来,反

收稿日期:2011-03-10;修回日期:2011-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51076034);哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室基金资助项目(HEUSNFN0805)

作者简介:李常伟(1986—),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,核能科学与工程专业

应堆板状元件、大功率电子芯片及微电子晶体管等技术发展迅猛,但良好的冷却系统设计仍是制约其发展的瓶颈,这与其内部窄通道两相流流型有着密不可分的关系。因此,窄通道两相流流动机理越来越受到重视,对流体流型研究已成为两相流研究方面的一个热点<sup>[2]</sup>。然而,目前针对窄矩形通道内两相流流型的识别方法仍以可视化观察为主,这具有很大的局限性。小波分析法由于其具有独特的频域分析能力,可通过对两相流流型压差波动信号进行分析,提取不同流型所具有的特征量来有效识别流型,因此成为两相流流型识别有效方法之一。

孙斌等<sup>[3]</sup>以空气-水为介质,运用小波包变换系数等方法,对水平管内两相流流型进行了实验研究,根据实验结果绘制了流型图,并与传统的实验结果进行了比较。同时,周云龙等<sup>[4]</sup>运用高速图像采集等方法,对正方形小通道内向上流动可视化进行了相关研究。但对竖直窄矩形通道运用小波分析的方法对流型转变的研究仍很少。本文在可视化观察的基础上,主要采用小波分析方法对不同的流型进行识别,并给出不同流型所具有的特征量,旨在为窄矩形通道内两相流流型的识别提供准则。

## 1 实验装置

实验在常温、常压下进行,实验流程如图1所示。

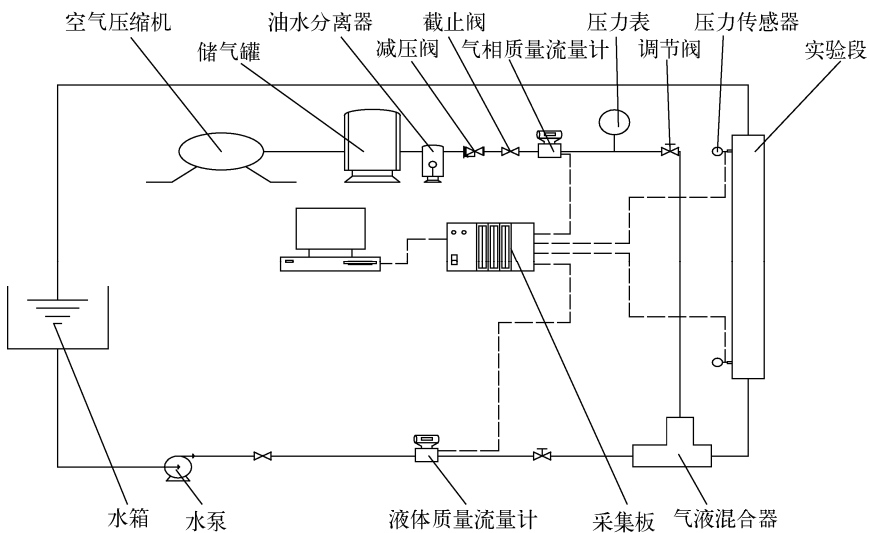


图1 实验装置流程图

Fig. 1 Simple diagram of experimental loop

示。实验装置由测量系统、气回路及水回路组成。将水从水箱中用水泵抽取后,通过质量流量计测量,测量后经气液混合器进入实验段;空气由压缩机压缩后储存在储气罐中,经过减压阀、气相质量流量计后,进入气液混合器内,与液相充分混合后进入实验段,形成多种不同的流动形态。

实验段为透明有机玻璃窄矩形通道(图2)。长度为2 000 mm,为消除进出口效应对流场的不良影响,距进口300 mm处设入口测压点,距出口200 mm处设出口测压点。取压间距为1 500 mm,窄通道的高宽比为0.038,流体自下而上通过实验段。

一般实验中采用的压力传感器的采样频率均较低,在50 Hz以下,属于低频信号<sup>[5]</sup>。而采用小波分析方法对流型特性进行识别时,根据奈奎斯特定律,若要将采样信号复原,采样频率需是原信号频率的2倍以上,因此要求所选用的压力传感器具有较高的采样频率。在本实验中,采用瑞士keller压力变送器对两相流动的压差波动信号进行采集,采集频率为400 Hz,从而保证了信号分析的可靠性。实验中的气体流量、液体流量及压力和压差波动信号通过NI数据采集系统进行实时记录和分析。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 两相流流型

通过可视化观察和高速摄影技术进行拍

照,发现在整个实验范围内会出现 4 种典型流型(图 3),即泡状流、弹状流、搅混流和环状流。

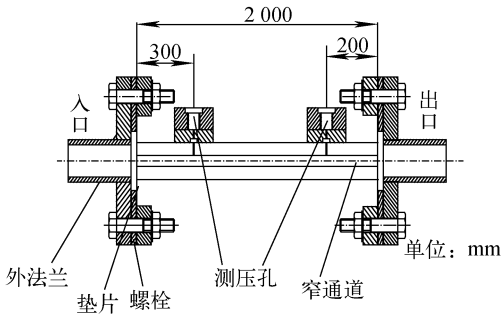


图 2 实验段

Fig. 2 Simple diagram of experimental section

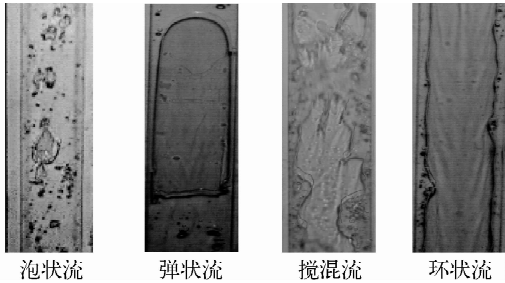


图 3 4 种典型流型

Fig. 3 Four typical flow patterns

### 1) 泡状流

当液相流速高、气相流速低时,出现的是泡状流流型。在窄矩形通道内流动时,小气泡呈扁圆状。在窄通道的两侧主流速度梯度大,中心速度梯度小,两侧阻力较中间部分大,因此气泡趋向于向主流中心区域流动,以至有些小气泡连在一起融合成大气泡共同运动。从图 3 可看出,通道中间气泡分布密集且有较大气泡出现,两边气泡分布稀疏且气泡较小。

### 2) 弹状流

在气相流速和液相流速均很低的情况下,出现的是弹状流流型。气弹头部呈扁平半椭圆状,气弹与含有小气泡的液段间歇生成,且与液段有清晰的交界面。有些气弹与气弹间液段含气量较大,易发生两相邻气弹间的最佳合并现象。在气弹与管壁间有对称的很薄的下降液膜。整个气弹的宽度接近窄矩形通道长边的长度,且从头部到尾部逐渐加宽,气弹的长度约为窄矩形通道长边长度的 2 倍到 5 倍。

### 3) 搅混流

在弹状流的基础上,增大气相流量到某一值时,由于强烈的冲击作用,弹状流的气弹发生破裂,气相与不规则的液相交替上下运动,形成搅混状流动<sup>[6]</sup>。由于搅混流在整个的流型区域内具有较大的存在范围,且流型的特征相同,因此把搅混流归入典型流型范围内。

### 4) 环状流

继续增大气相流量,聚集在通道中的不规则液块被高速的气流冲开,汇集到壁上形成连续的液膜,且在气流的携带下向上运动。而气相则连成一体,形成连续的气芯。在液膜和气芯之间存在一波动交界面,形成环状流动。

## 2.2 小波分析

在不可视或不能进行摄影测试技术的特殊情况下,就需要运用间接的方法来识别流型特征<sup>[7]</sup>。小波分析具有多分辨分析的特点,在时域和频域都具有表征信号局部信息的能力,压差波动曲线和功率密度图都可根据信号的具体形态动态调整<sup>[8]</sup>。同时,小波分析具有去噪功能,即抑制信号的无用成分,增强信号的有用成分<sup>[9]</sup>。在压差波动曲线中,横坐标为时间轴,纵坐标为波动压差信号。在功率密度图中,横坐标为波动频率,纵坐标为对应频率的波动能量,即对应频率波动振幅所占比率,其中,峰值的出现说明在该频率的能量(振幅)占有比率最大。因此可通过小波分析,绘制各流型压差波动图和频率谱,观察波动时域和频率的变化关系来识别流型(图 4)。

从图 4 可看出,随着气流量的增大,压差的波动信号也在增大。泡状流状态下小气泡的能量很小,压差波动最小。对于弹状流,流

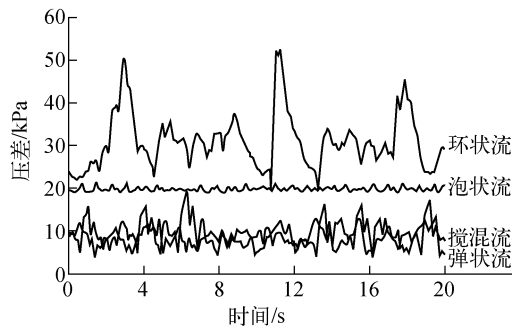


图 4 4 种流型压差波动曲线

Fig. 4 Pressure wave curves of four flow patterns

动中气弹与液段交替出现,因此,压差波动信号存在一定的波动规律性。而对于搅混流,气弹形状不规则,受到较高气相流速的影响,气液流动极不稳定,且气液交界面分布无规律,因此流道内压差信号波动较大,且无规律性可循。在环状流中,气液两相的流量很大,导致通道产生周期性脉动,压差波动信号周期性明显,且波动幅度大。

由于不同流型的压差波动不同,所采集样本的功率密度函数特征也不同,因此,基于这4种典型流型的压差波动特征,采用小波分析的方法得到每种流型的功率谱密度分布如下。

### 1) 泡状流

在泡状流状态下,其振幅随频率的波动出现多个峰值。最大能量值分布于 $0.1\sim 0.2$ 之间,其相应频率分布于 $1.2\sim 1.4$  Hz之间。在 $2.1\sim 2.6$  Hz出现第2个峰值,能量值在 $0.06\sim 0.1$ 之间。在泡状流中,气泡很小,小气泡携带的能量很小,对液相的流场的流动干扰很弱,因此能量值很低。由于小气泡在主流携带下具有趋中效应,因此会有气泡聚合现象发生,导致流动中因聚合而产生流动的不稳定,所以出现多个峰值。小气泡的密度和粘性系数较小<sup>[7]</sup>,具有自由能的存在,虽然能量很低,但波动频率范围较宽,主要分布于 $0\sim 28$  Hz之间,如图5所示。

### 2) 弹状流

在弹状流流态下,其功率密度图中波动的峰值个数与泡状流相比有所减少。波动最大能量值增加,主要分布于 $0.7\sim 0.9$ 之间,最大能量频率分布于 $0.5\sim 0.7$  Hz之间,在 $1.3\sim 1.5$  Hz出现第2个峰值,能量在 $0.3\sim 0.4$ 之

间。这主要是因为,在弹状流状态下,一定长度的气弹与液段交替通过时,当弹状气泡之间的液段长度较短含气量大时,易发生2个连续上升气弹的合并聚合现象,由于这种合并聚合现象发生的频率较气弹生成的频率低,但对流场稳定性产生的干扰较大,因此从频率图上可看出第1个峰值出现在 $0.6$  Hz附近的低频率区域,其波动最大能量较泡状流明显增大。当气弹与液段间歇生成时,生成频率高,此时会对流场造成新的扰动,但气弹对流场的扰动与聚合现象相比较弱,这也是出现第2个峰值的原因,因此第2个峰值出现的频率较大,弹状流流型中在气弹尾部跟随小气泡,以至其频率的分布范围仍很宽,频率分布在 $0\sim 18$  Hz之间,如图5所示。

### 3) 搅混流

随着气流量的增大,波动出现多个峰值,频率分布于 $0\sim 13$  Hz之间。波动最大能量增加,主要分布于 $0.7\sim 1.0$ 之间,最大能量频率分布于 $0.7\sim 1.1$  Hz之间,在 $0.1$  Hz附近出现第2个峰值,能量在 $0.5\sim 0.7$ 之间。气相流量增加,气弹与气弹之间的距离减小、合并,周围液相流体有撕裂作用,气相形状不规则,分布无规律,对流场产生的扰动很大,压差波动的能量增加。流动极不稳定,没有一定的规律可循,因此含有多个频率成分,有多个峰值,在 $0.1$  Hz和 $0.9$  Hz处频率占有大的比率。没有高频小能量的因素存在,频率分布范围变窄,如图6所示。

### 4) 环状流

当气流量再继续增大,波动峰值减小到1个,频率宽度分布于 $0\sim 10$  Hz之间。波动最大

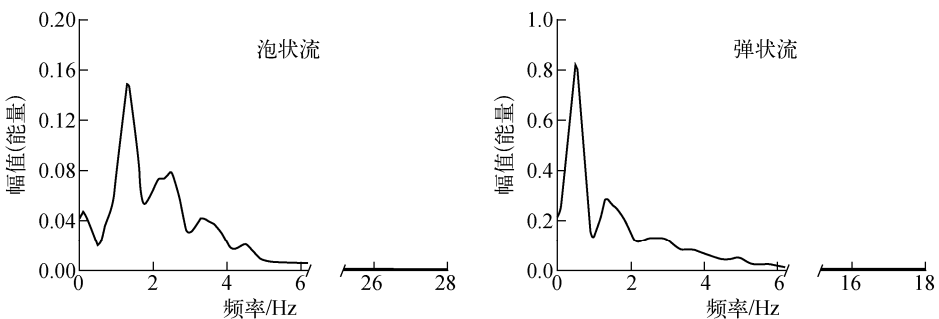


图5 泡状流和弹状流功率谱密度

Fig. 5 Stationary power spectrum densities of bubbly flow and slug flow

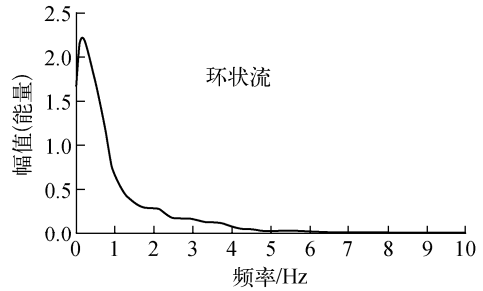
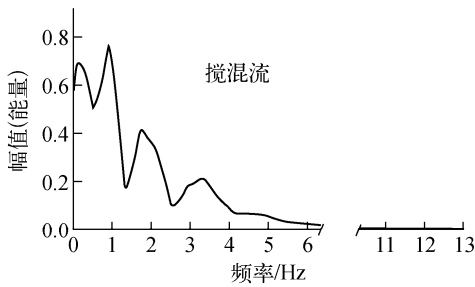


图6 搅混流和环状流功率谱密度

Fig. 6 Stationary power spectrum densities of churn flow and annular flow

能量增加, 主要分布于 1.9~3.2 之间, 最大能量频率分布于 0.3~0.5 Hz 之间。气相夹带液滴在通道的中心流过时阻力较大, 甚至会出现气相间歇携带的小液块, 此间歇携带小液块通过时会对流场造成强大的干扰, 因此波动的能量急剧增大。窄矩形通道壁面处形成稳定的液膜, 只有 1 个主要频率的波, 因此只有 1 个峰值出现, 如图 6 所示。

通过分析观察所有实验数据的功率密度图发现, 从能量分布范围和频率分布范围两个方面可很容易分辨出各流型。各流型的能量分布范围和频率分布范围列于表 1。

表 1 能量分布范围和频率分布范围

Table 1 Ranges of energy and frequency

流型	最大能量分布范围	频率分布范围/Hz	频率峰值个数
泡状流	0.1~0.2	0~28	≥3
弹状流	0.7~0.9	0~18	2
搅混流	0.7~1.1	0~13	≥3
环状流	1.9~3.2	0~10	1

### 2.3 流型图

经过对 4 种典型流型的功率密度图能量分布范围和频率分布范围(表 1)研究发现, 窄矩形通道内各流型的最大能量的分布和最宽频率的分布在功率密度图上有着明显的区分界限, 同时, 每种流型的功率密度图上峰值的个数也不相同。因此, 可对整个流动范围内不同实验工况下的压差波动信号进行频谱分析, 根据表 1 列出的不同流型对应的特征值确定流型存在范围, 绘出流型转变边界, 如图 7 所示, 其中横轴  $J_G$  为气相折算流速, 纵轴  $J_L$

为液相折算流速。从图 7 可看出, 该流型转变边界可对实验中出现的不同流型进行很好的识别和判定。

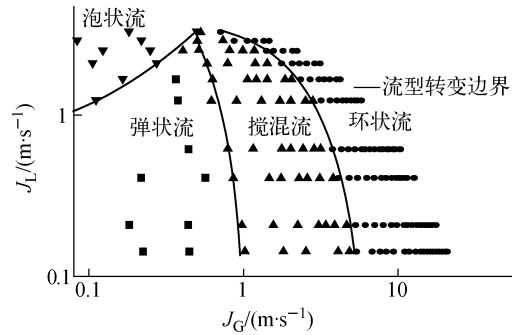


图7 不同流型区域分布

Fig. 7 Regional distribution of different flow patterns

### 3 结论

通过对大量实验研究发现, 在窄矩形通道内有泡状流、弹状流、搅混流和环状流 4 种典型流型。泡状流流型下, 液相流中夹带扁圆状小气泡一同从下向上流动, 实验段中心处由于趋中效应会发生气泡合并现象。弹状流流型下, 气弹与液段交替生成, 气弹头部呈扁状半圆形, 有些液段中含气量较大, 可能会有气弹间的最佳合并。搅混流气液两相运动及其不规则, 冲击大, 震动强烈。环状流中, 高速的气流冲开聚集在通道中的不规则液块, 形成连续的气芯, 其内部还会携带小液滴一同运动。由于不同流型的运动特性不同, 实验过程中测得各种流型的压差波动信号各不相同, 即时域分布图不同。运用小波分析的方法将每种流型的时域分布的压差波动信号图转化成频域分布的功率密度图。通过对每种流型功率谱密度图的分析, 给

出了每种流型的频率分布范围以及最大能量分布范围。同样测得的压差波动信号数据采用小波频谱分析方法处理后,将所得结果的识别特性与典型流型的功率密度图进行比较,确定流型,最后绘制出确定流型的流型图,划分各种流型的存在范围。

#### 参考文献:

- [1] 李海青. 两相流参数检测及其应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991: 2-6.
- [2] LARACHI F. Pressure drop and flow regime in cocurrent gas-liquid up flow through packed beds [J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 88 (11): 245-246.
- [3] 孙斌, 周云龙. 基于支持向量机制和小波包能量特征的气液两相流流型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 93-98.  
SUN Bin, ZHOU Yunlong. Identification method of gas-liquid two-phase flow regime based on support vector machine and wavelet packet energy feature[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 93-98(in Chinese).
- [4] 周云龙, 窦华荣. 正方形小通道内气液两相流垂直向上流动特性[J]. 化工学报, 2008, 59(6): 1 378-1 381.
- ZHOU Yunlong, DOU Huarong. Flow characteristics of gas-liquid two-phase flow in small vertical square channel[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(6): 1 378-1 381(in Chinese).
- [5] 陈琪, 黄志尧. 小波变换辨识流型的一种新方法研究[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(2): 117-120.  
CHEN Gong, HUANG Zhiyao. Flow regimes identification in horizontal pipe using wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(2): 117-120(in Chinese).
- [6] 贾辉, 曹夏昕, 阎昌琪. 摇摆状态下气液两相流流型转变的实验研究[J]. 核科学与工程, 2006, 26(3): 209-213.  
JIA Hui, CAO Xiixin, YAN Changqi. Experimental study on two-phase flow pattern transition in rolling tubes[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2006, 26(3): 209-213(in Chinese).
- [7] 周云龙, 孙斌, 陈飞. 气液两相流型智能识别理论及方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] 高成. Matlab小波分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 121-125.
- [9] 张德丰. Matlab小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 64.