第 27 卷 增刊 1 工 程 热 物 理 学 报 Vol.27, Suppl.1
2006 年 6 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Jun., 2006

微重力气液两相环状流界面波特性分析

赵建福[1] 陈文学[2]

(1. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080; 2. 中国水利水电科学研究院水力学研究所, 北京 100038)

摘 要 本文利用双重小波包分解算法, 对微重力气液两相环状流界面波特性进行了分析, 将实验测量到的环状液膜厚度信号分解成相干分量和非相干分量, 并对相干信号与非相干信号的特征进行了分析, 提出了一个新的描述微重力气液两相环状流界面波特性参数.

关键词 微重力; 气液两相流; 小波包; 界面波; 环状流
中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2006)Suppl.1-0237-03

CHARACTERISTICS OF INTERFACE WAVE OF TWO-PHASE GAS-LIQUID ANNULAR FLOW IN MICROGRAVITY

ZHAO Jian-Fu[1] CHEN Wen-Xue[2]

(1. *National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080, *China;*
2. *Institute of Hydraulics, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract Analysis on interface wave of annular flow in microgravity is present this paper using the dual decomposition algorithm based on wavelet packet method. The coherent and incoherent parts of the experimental signals are decomposed and analyzed. A new parameter is proposed to descript the interface wave of annular flow in microgravity.

Key words microgravity; two-phase gas-liquid flow; wavelet packet; interface wave; annular flow

1 前 言

气液两相流广泛存在于地面和空间应用技术的众多领域, 特别是随着空间技术的发展及相关应用系统功率的急剧增加, 微重力气液两相流越来越受到重视[1]。一般而言, 由于泡状流重力依赖性过强, 弹状流压力波动过大, 极大地限制了其在空间技术领域的应用, 因此, 微重力气液两相环状流具有特别重要的应用价值。此外, 重力的减弱, 将消除相间滑移现象及其引起的液膜周向差异与界面的不稳定性等, 在理论上也有重要意义。

气液两相环状流的显著特征是气液两相界面上界面波的存在。对界面波结构及其动力学特征的本质认识将是准确预测气液两相环状流动中摩擦压降与传热等特征的关键。

一般而言, 气液两相环状流界面波可划分为涌浪 (flooding waves) 、纹波 (ripple waves) 、扰动波 (disturbance waves) 或滚波 (roll waves) 三种类型, 涌浪发生在邻近向间歇流转换的边界附近, 纹波则对应于较低的液相流量情形, 因此, 对充分发展的气液两相环状流, 扰动波有着特别重要的意义, 这也是本文研究的对象。

在实际的气液两相环状流扰动波区, 气液两相界面构型十分复杂, 界面波具有复杂的多尺度特征, 界面波演化过程中的结构 (尤其是其中相对稳定有序的相干结构) 信息对正确描述此类过程有着重要意义。目前, 微重力气液两相环状流的研究较少, 多是在失重飞机上进行[2~5], 对实验数据的处理, 基本上是将测量的环状液膜厚度的时间序列视为随机过程, 利用统计方法计算界面波的波高、波间距、波速、液膜和 / 或基膜厚度等。最近, Zhu 等采用合理阈值确定扰动波峰, 并以扰动波峰为基点、以平均波间距单元波长度截取局部扰动波元, 通过移相平均的方法, 得到平均波形 (图 1)[6,7], 其中, δ_{film} 代表非波动部分基膜厚度, δ_{wave} 代表界面波起伏部分, 又称为界面粗糙度。不过, 在本质上, 平均波形是对波高、液膜厚度、波间距等统计量的一种形象描述, 所增加的信息只是在统计意义上的波面变

收稿日期: 2006-01-25; **修订日期**: 2006-06-05
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.10202025); 中国科学院知识创新工程 (No.KJCX2-SW-L05)
作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要从事微重力气液两相流动与传热方面的研究。

化情形，尽管对形象理解界面波结构特征有所帮助(如界面波峰到来前，液膜厚度的跌落现象；而界面波峰过去后，液膜回落过程稍缓等)，但平均过程抹去了界面波多尺度结构细节，难以正确描述界面波的真实特征。本文利用陈文学等[8]提出的双重小波包分解算法，对微重力气液两相环状流动中的界面波结构特征进行深入分析，并对其动力学行为特征进行探讨。

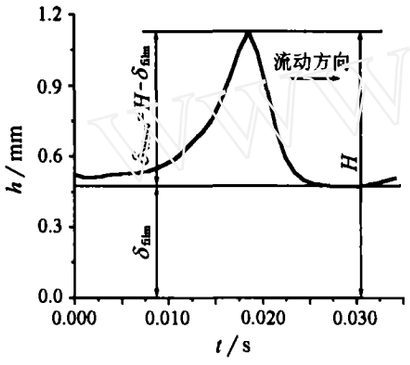

图 1 界面波平均波形[5]

2 双重小波包分解算法

2.1 小波包分解

小波变换用小波函数系逼近原始信号，而小波函数系是由小波函数平移、伸缩构成的：

$$\psi_{s,\tau}=\frac{1}{\sqrt{s}}\psi(\frac{t-\tau}{s})\quad s,\tau\in R,\ s\neq 0 \tag{1}$$

$\psi(t)$ 称为基本小波，s,τ 分别为尺度和平移因子。对信号 $f(t)$，其小波变换为：

$$W_f(s,\tau)=\frac{1}{\sqrt{s}}\int_{-\infty}^{+\infty}\psi^*(\frac{t-\tau}{s})f(t)dt \tag{2}$$

式中，上标 * 表示取共轭。实际工程中常用二进小波，即 $s=2^j$。将二进小波和多尺度分析结合起来即可得到信号的小波包分解。设 $\phi(t)$ 是尺度函数，$\psi(t)$ 是小波函数，$h(n)$ 和 $g(n)$ 为正交镜象滤波器(分别称为低通滤波器和高通滤波器)，则信号 $f(t)$ 的小波包分解为

$$\begin{aligned}f_{2m}(t)&=\sqrt{2}\sum_n h(n)f_m(2t-n)\\ f_{2m+1}(t)&=\sqrt{2}\sum_n g(n)f_m(2t-n)\end{aligned} \tag{3}$$

小波包分解是将信号在全频带范围内进行正交分解，分解 j 层，可得到 2^j 个等带宽的频带，每一频段的数据长度为原数据长度的 $1/2^j$ 倍，采样间隔为原信号的 $1/2^j$ 倍。如果原信号的分析频率为 f，则第 j 层第 i 个频段的频率范围是 $\left[2^{-j}(i-1)f,2^{-j}if\right]$。

2.2 相干结构的提取

小波包分解可以将不同频段的信号分开，但是我们不能仅仅根据频率的大小来提取信号中包含的相干结构。不过，根据相干结构的定义，此类结构具有高度的有序性，对应着较低的熵值。因此，可以根据小波包系数熵值的大小提取湍流中的相干结构。这里，系列 $\{s_i,\ i=1\sim N\}$ 的熵定义为：

$$E(s)=-\sum_{k=1}^{N}s_i^2\ln s_i^2 \tag{4}$$

陈文学等[8]根据相干分量和非相干分量间的相关系数作为迭代计算的判据，提出了如下双重分解算法：

(1) 对原始信号 f 进行小波包分解，并求其最佳小波包树；

(2) 计算小波包端节点小波系数及各系数的熵；

(3) 求小波系数熵的平均值；

(4) 对小波系数 $c(i)$ 进行如下处理，

$$c(i)=\begin{cases}c(i) & |E(c(i))|<\alpha|E_{\text{mean}}|\\ 0 & |E(c(i))|>\alpha|E_{\text{mean}}|\end{cases} \tag{5}$$

然后进行逆小波包变换提取相干分量 f_c。原始信号减去相干分量即得非相干分量 f_r。上式中，E_{mean} 为平均熵值，α 为常数。α 值的选取主要影响迭代计算工作量，对结果没有影响。

(5) 计算相干分量和非相干分量间的相关参量 β

$$\beta=\frac{\frac{1}{N}\sum f_{ci}f_{ri}}{\frac{1}{N}\sum f_i^2} \tag{6}$$

式中，N 为采样点的个数。

(6) 理想情况下，β 值应为零。不过，由于相干分量提取较少及提取的信号中包含较多非相干分量时，β 均较大。因此，需将分解后的剩余部分作为输入，返回 (1) 进行迭代计算，直到 β 达到极小。这样，可以得到实际信号中的相干分量与非相干分量。

3 实验装置

本文分析的实验数据来自 Saskatchewan 大学微重力研究小组在欧空局 A300 失重飞机上完成的微重力气液两相流实验，有关实验装置及测控设施的详细说明见 MacGillivray 和 Gabrie[7]，这里，仅就与本文相关的若干问题予以简要说明。

实验采用水和空气作为工作介质，实验段内径 9.525 mm。液膜厚度采用平行双线电导探针测量，探针由两根平行放置、间隔 2 mm、直径 40 μm 的不锈钢丝组成，一半表面涂有绝缘涂料，以避免双侧

膜厚的平均效应。整个实验装置上共安装有 3 组电导探针：一组探针装在单相液体流道上，其输出信号作为参考，以抵消温度等参数变化对测量结果的影响；另两组探针安装在气液混合器下游 1.44 m 处，用来测量环状液膜的厚度，其间间隔为 0.019 m，以便通过相关分析测量界面波速度。实验中数据的采样频率为 1024 Hz，采样时间 4 秒。

4 结果分析

图 2 给出了微重力条件下实验测量到的环状液膜厚度数据的典型时间序列 (气、液两相表观流速分别为 21 m/s 和 0.26 m/s，平均液膜厚度 0.74 mm，其平均波形示于图 1)，其中，图 2(a) 为 4 秒内全部实验数据，图 2(b) 实线为其局部放大图像 (0.25 秒) 及下游液膜探针测量的结果 (虚线)。可以看到，在环状液膜表面存在剧烈波动，界面波表面相当粗糙，并存在有次级的峰、谷；相邻波峰之间的距离 (即波间距) 并不是均匀的，呈现出显著的多尺度特征。对比上下游探针测量结果，还可以明显看出界面波传播过程中有着相对稳定的相干结构。

图 3 则给出了利用双重小波包分解算法计算得出的界面波相干分量 δ_c(图 3(a)) 和非相干分量 δ_r(图 3(b)) 的变化特征。迭代步数对相干分量及非相干分量间相关性的影响见图 4，一般而言，迭代的收敛是非常快的。

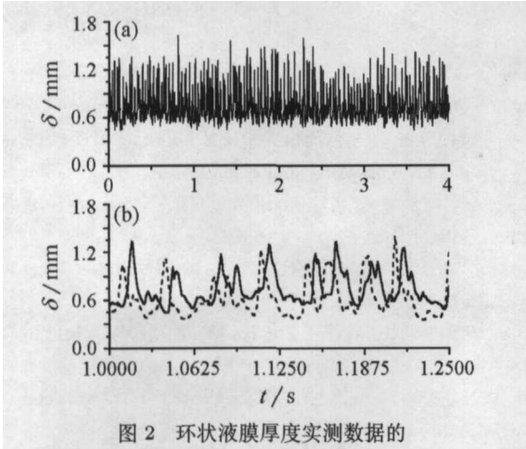

图 2　环状液膜厚度实测数据的典型时间序列与局部放大

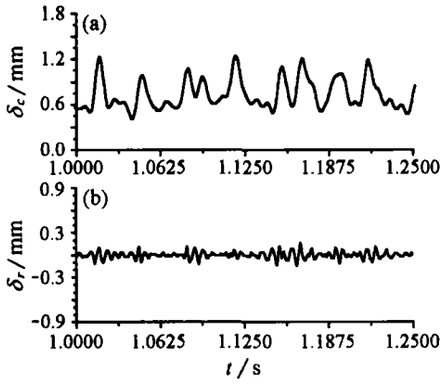

图 3　环状液膜界面波相干分量 (a) 与非相干分量 (b)

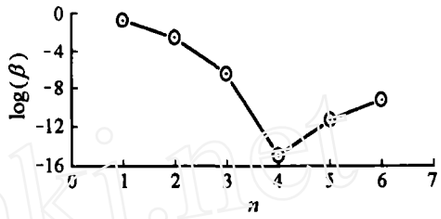

图 4　迭代步数对相干分量及非相干分量间相关性的影响

5 结　论

本文利用双重小波包分解算法，对微重力气液两相环状流界面波特性进行了分析，将实验测量到的环状液膜厚度信号分解成相干分量和非相干分量，并对相干信号与非相干信号的特征进行了分析，提出了一个新的描述微重力气液两相环状流界面波特性参数。

致谢：作者感谢加拿大 Saskatchewan 大学 K. S. Gabriel 教授 (现任加拿大 University of Ontario Institute of Technology 副教务长) 提供的微重力实验数据。作者还感谢该研究小组 Z.-L. Wang、H.-W. Han、Z.-F. Zhu、R. M. MacGillivray 等人的帮助。

参　考　文　献

[1] 赵建福. 微重力条件下气 / 液两相流流型的研究进展. 力学进展, 1999, 29(3): 369–382

[2] Whalley PB. Boiling Condensation and Gas-Liquid Flow. Oxford: Clarendon Press, 1990

[3] Bousman WS. Studies of Two-Phase Gas-Liquid Flow in Microgravity: [Ph. D. Thesis]. Univ. of Houston, 1995

[4] de Jong P, Gabriel KS. A Preliminary Study of Two-Phase Annular Flow at Microgravity: Experimental Data of Film Thickness. Int. J. Multiphase Flow, 2003, 29(8): 1203–1220

[5] Wang ZL, Gabriel KS, Manz DL. The Influences of Wave Height on the Interfacial Friction in Annular Gas-Liquid Flow under Normal and Microgravity Conditions. Int. J. Multiphase Flow, 2004, 30(10): 1193–1211

[6] Wang ZL, Gabriel KS, Zhu ZF. The Effects of Gravity on the Features of the Interfacial Waves in Annular Two-Phase Flow. Microgravity Sci. Tech., 2004, 15(3): 19–27

[7] MacGillivray RM, Gabriel KS. Annular Flow Film Characteristics in Variable Gravity. Ann. New York Acad. Sci., 2002, 974: 306–315

[8] 陈文学, 赵建福, 李长河. 钝体尾流的双重小波包分解. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(4): 297–303