

气液两相流波动信号的时频谱分析研究*

孙斌[†] 王二朋 郑永军

(中国计量学院, 计量测试工程学院, 杭州 310018)

(2009年11月30日收到; 2010年5月28日收到修改稿)

为了研究气液两相流不同流型的动态特性, 通过小波变换、希尔伯特-黄变换及自适应最优核三种时频方法对气液两相流动态差压信号进行处理. 通过对时频谱的分析, 可以清晰看出当流型从泡状流向弹状流、塞状流的转化过程中, 信号的主要能量由 15—35 Hz 之间的频带向 0—8 Hz 频带转移, 在弹状流时出现了两个谱峰. 实验结果表明: 希尔伯特-黄变换及自适应最优核方法的时频分辨率比小波分析高. 基于自适应最优核方法的脊信息的提取, 克服了模糊平面加窗效应的影响, 对气液两相流动态信号表现出更高的时频分辨率, 并增强了时频平面信息的可读性. 通过时频分析方法可以清晰的观测不同流型的动态特性, 可以更好地描述不同流型下信号随时间的变化规律, 为深入研究气液两相流流动机理奠定基础.

关键词: 气液两相流, 流型识别, 希尔伯特-黄变换, 自适应最优核

PACS: 47.55.Ca

1. 引言

气液两相流广泛存在于自然界和许多工业过程中, 如电力、能源、石油、核工业等, 两相流动过程表现出强烈的非线性特性. 从传统的数学处理方法看, 统计分析是假设对象是平稳过程, 而两相流动很难满足该假设, 金宁德等人^[1,2]对两相流流体动力学进行了深入的研究, 对流动的非线性进行了解释. 劳力云等人^[3]综述了几种常用的信号处理方法, 认为常规的线性方法对两相流动信号处理作用是有限的, 基于非线性理论研究波动过程是今后研究的一个方向.

采用常规信号处理方法研究气液两相流波动信号已经取得了大量的成果^[4-7], 而采用时频分析等非线性信号处理技术研究气液两相流动态特性方面也获得了较多的关注. 目前主要利用小波变换^[8,9]、WVD 理论^[10]、HHT^[11]等时频分析方法对气液两相流波动信号进行处理, 并利用相应的特征提取方法实现流型识别的目的.

本课题组采用 HHT 理论对气液两相流动态信号进行处理^[12], 通过 EMD 方法对动态差压信号进行滤波、波动信号提取以及时变频谱分析, 研究不

同流型信号的时变特性. 根据时频分析结果提出了高低能量比的特征变量, 建立了流型识别图, 得到了流型理想的识别效果.

Ding 等人^[13]利用 HHT 方法对气液两相流波动信号进行了深入分析, 详细讨论了不同流型下不同频段的能量分布与流型变迁的关系, 得到了反映了水平管气液两相流的流动状态和流型的变迁的能量特征值. 孙斌等人^[14]也采用 HHT 方法对气液两相流动态信号进行了相应的研究, 主要集中于 EMD 分解后特征变量的提取, 然后采用神经网络等方法实现流型识别.

由于 WVD 方法具有交叉项的影响, 因此在气液两项流信号处理领域的实用性受到一定的限制, 分析结果较差. 而 AOK (adaptive optimal-kernel) 时频分析是在 WVD 方法上改进的一种时频分析方法, 由于采用了自适应最优核函数, 因此克服了信号交叉项的影响, 具有很高的时频分辨率, 在电力间谐波^[15]等领域取得了成功的应用. 特别是基于 AOK 理论时频脊的提取可以获得很高的时频分辨率.

本文结合前期的气液两相流时频分析结果, 利用 AOK 技术对气液两相流波动差压信号进行分析, 通过与已有的分析结果进行对比, 探讨 AOK 处理气

* 国家自然科学基金理论物理专项基金(批准号:10947154)和浙江省自然科学基金(批准号:Y1100842)资助的课题.

[†] E-mail: bsun555@cjlu.edu.cn

液两相流动态信号的可行性,为更加深入研究气液两相流流动规律提供新方法.

2. 三种时频谱理论原理

小波时频域分析方法是时频谱理论中最常用的时频分析方法,在两相流流型识别中也有应用研究,HHT 是一种新型的时变频谱分析方法,与小波分析相比较具有自适应性、分辨率高等优点. AOK 时频理论是一种改进的 Wigner-Ville 分析分析方法在许多领域都有一定的应用研究,应用于两相流流型处理方面目前还未见相关报道. 本文基于上述三种新的时频方法,通过对比研究,探索不同方法之间的差异,为气液两相流流型的识别奠定基础.

小波分析时频域分析方法具有完善的理论基础,在许多领域都有成功的应用,相关参考资料较多,在这里对相关理论不作具体论述. 重点介绍 HHT 及 AOK 时频分析的基本理论.

2.1. HHT 原理

HHT 假设任一信号都是由许多固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 组成,任意时刻,一个信号都可以包含许多固有模态信号,如果固有模态之间相互重叠,便形成复合信号,其中固有模态信号应满足以下两个条件:

- 1) 在整个数据中极值的个数必须与过零点的个数相等或至多相差 1;
- 2) 在任何一点,由局部极大值确定的信号包络和局部极小值确定的包络的平均值为零.

首先原始信号 $s(t)$ 通过经验模态分解法^[16] (empirical mode decomposition, EMD) 被分解为有限个固有模态 $c_i(t)$, $s(t)$ 可表示为不同的时间尺度与残差 $r_n(t)$ 的结合,即

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \quad (1)$$

对(1)式中的每个 IMF 作 Hilbert 变换可得

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\phi_i(t)} \\ &= \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt}. \end{aligned} \quad (2)$$

这里省略了残差函数 r , Re 表示取实部. (2) 式称为 Hilbert-Huang 幅值谱,简称 Hilbert-Huang 谱,记作

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt}. \quad (3)$$

2.2. AOK 时频理论

AOK 时频理论是基于 Wigner-Ville 分布改进的时频分析理论. 经典的 Wigner-Ville 分布虽具有如时频分辨率高,时间-带宽积可达到 Heisenberg 不确定性原理给出的下界等许多优良特性,但它是双线性表变换,对于多分量信号存在较严重的交叉项干扰,影响了人们对它的解释. 为了抑制交叉项,使信号的自主项得到很好的分离,人们设计了多种时频分布. 它们可以统一表示成 Cohen 类双线性时频分布

$$P(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint A(\theta, \tau) \Phi(\theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau \omega} d\theta d\tau, \quad (4)$$

式中 $A(\theta, \tau)$ 为信号 $s(t)$ 的模糊函数,定义为

$$A(\theta, \tau) = \int s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta t} dt, \quad (5)$$

$\Phi(\theta, \tau)$ 为低通的核函数,通过设计不同的核函数就能得到不同的分布特性.

基于信号的径向高斯核时频分布对整个信号只设计了一个核函数,即定义为沿任意径向剖面都是 Gauss 型的二维函数,不适合于长时间非平稳信号的分析. 为此,提出自适应最优核时频分布方法.

定义短时模糊函数 $A(t, \theta, \tau)$, 它是被窗函数截断后的一小段信号的模糊函数.

$$\begin{aligned} A(t, \theta, \tau) &= \int s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \omega^*\left(u - t - \frac{\tau}{2}\right) \\ &\quad \times s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) \omega\left(u - t + \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta u} du, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\omega(u)$ 是对称的窗函数; t 是 $\omega(u)$ 的中心位置. 令 $|u| > T$ (T 是窗长) 时, $\omega(u) = 0$, 则在任一时刻 t , 只有在 $[t - T, t + T]$ 范围内的信号才可计算其模糊函数. 对于信号的任意细节部分, 短时模糊函数都可准确地刻画出来. 此时可得与之相对应的自适应最优核函数 $\Phi_{\text{opt}}(t, \theta, \tau)$. 则时间段 $[t - T, t + T]$ 内信号的自适应最优核时频分布为

$$\begin{aligned} P_{\text{AOK}}(t, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \iint A(t, \theta, \tau) \Phi_{\text{opt}}(t, \theta, \tau) \\ &\quad \times e^{-j\theta t - j\tau \omega} d\theta d\tau. \end{aligned} \quad (7)$$

2.3. AOK 时频分布脊的提取

基于 AOK 时频分布理论分析非平稳信号已经表现出很高的时频分辨率,但是当时频平面上存在相邻很近的分量时,由于自适应最优核函数的作用,时频谱会有扩散的分布,影响对时频分布结果

的分析. 为进一步提高 AOK 的时频聚集性, 并增强时频平面信息的可读性, 借鉴频谱重排理论中脊信息提取的思路, 对 AOK 时频分布结果进行脊的提取, 在一定阈值内搜索并突出 AOK 时频平面上任意时刻的频域局部极大值点. 其中阈值的选取要考虑有用信息的衰减程度和时频平面信息可读性的折中.

3. 实验装置及实验条件

多相流实验装置原理如图 1 所示, 其中主要由空气压缩机、水泵、齿轮油泵、油箱、沉降池以及油、气、水稳压罐组成, 压力稳压罐相当于一个容性滤

波器可以减弱或消除液相源和气相源的脉动干扰. 动力设备的电气控制柜在空压机的旁边, 完成对水泵、油泵、空压机的启停控制与保护, 对水泵采用星-三角变换起动控制.

实验用的实验管段, 可根据具体实验要求采用相应的连接管段与实验仪器. 为了避免水中混有油, 整个实验管道被分为两组, 每组连接有 15, 25, 40, 50 mm 四种实验管道. 第一组气、水由两相混合器混合后经过单独的一组管道通过发展段进入实验段, 第二组油、气、水经三相混合器混和后经过另外一组独立的管道进入实验段, 所有实验管道采用不锈钢管道. 图 2 为基于文丘里管的实验实物图.

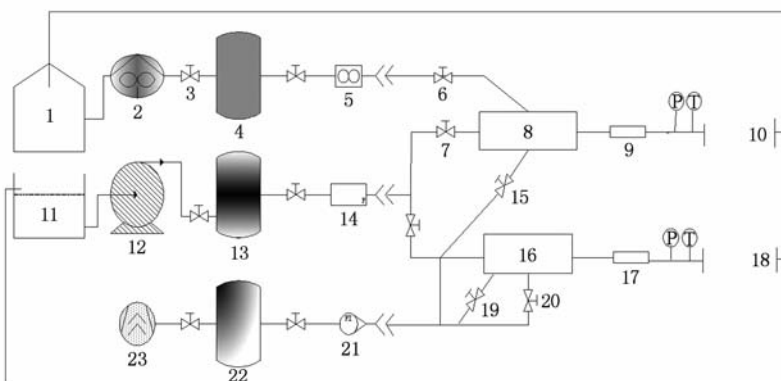


图 1 实验装置简图 (1) 油罐; (2) 油泵; (3, 6, 7, 15, 19, 20) 球阀; (4, 13, 22) 稳压罐; (5) 椭圆齿轮流量计; (8) 油水气三相混相器; (9) 观察段; (10) 实验段; (11) 水罐; (12) 水泵; (14) 电磁流量计; (16) 水气二相混相器; (17) 观察段; (18) 实验段; (21) 涡街流量计; (23) 气泵



图 2 两相流实验装置实物图

差压变送器选用的是 Keller 的 PD23 系列扩散硅压阻式差压传感器, 频率响应 1 kHz, 精度为 0.2%, 量程为 0—50 kPa.

实验数据通过 PC104 计算机进行采集, 采样频率为 200 Hz. 实验过程中通过分别改变气、水流量

产生泡状流、弹状流和塞状流三种流型, 标准流型经目测获得.

4. 实验信号处理及分析

获取实验数据后, 首先对采集到的原始动态差压信号进行预处理和归一化, 预处理主要有滤波、剔点、零均值处理和消除趋势项等, 然后对信号进行小波时频谱、HHT 时频谱和 AOK 时频谱分析与对比. 对不同流型的动态差压信号都进行同样的分析, 从而找出一种同时在时域和频域分辨率都较高的时频谱分析方法.

图 3 为泡状流信号时频分析结果. 其中图 3(a) 为预处理和归一化后的原始差压信号, (b) 是泡状流信号的功率谱图, 从图中可以看到泡状流信号中包含的频率及其能量大小, 但是从图中看不出频率

在整个采集过程中的变化情况,也就是时间轴上的变化情况.时频谱不仅可以看到信号的概貌,也可以看到细节,在分析处理时能方便地提取信号特征.基于此,我们对信号进行时频谱分析,图 3(c)为泡状流信号小波分析时频谱,(d)为 HHT 变换时频谱,(e)为 AOK 分析时频谱,(f)为 AOK 时频谱的脊

的提取图.

观察泡状流时频分析结果,由于此时气流量很小,水流量相对较大,密集的气泡在管道的顶部流过,而差压传感器安装在管道顶部,所以由于气泡的作用使得差压波动频率很快,泡状流信号能量主要集中在高频带(15—35 Hz).

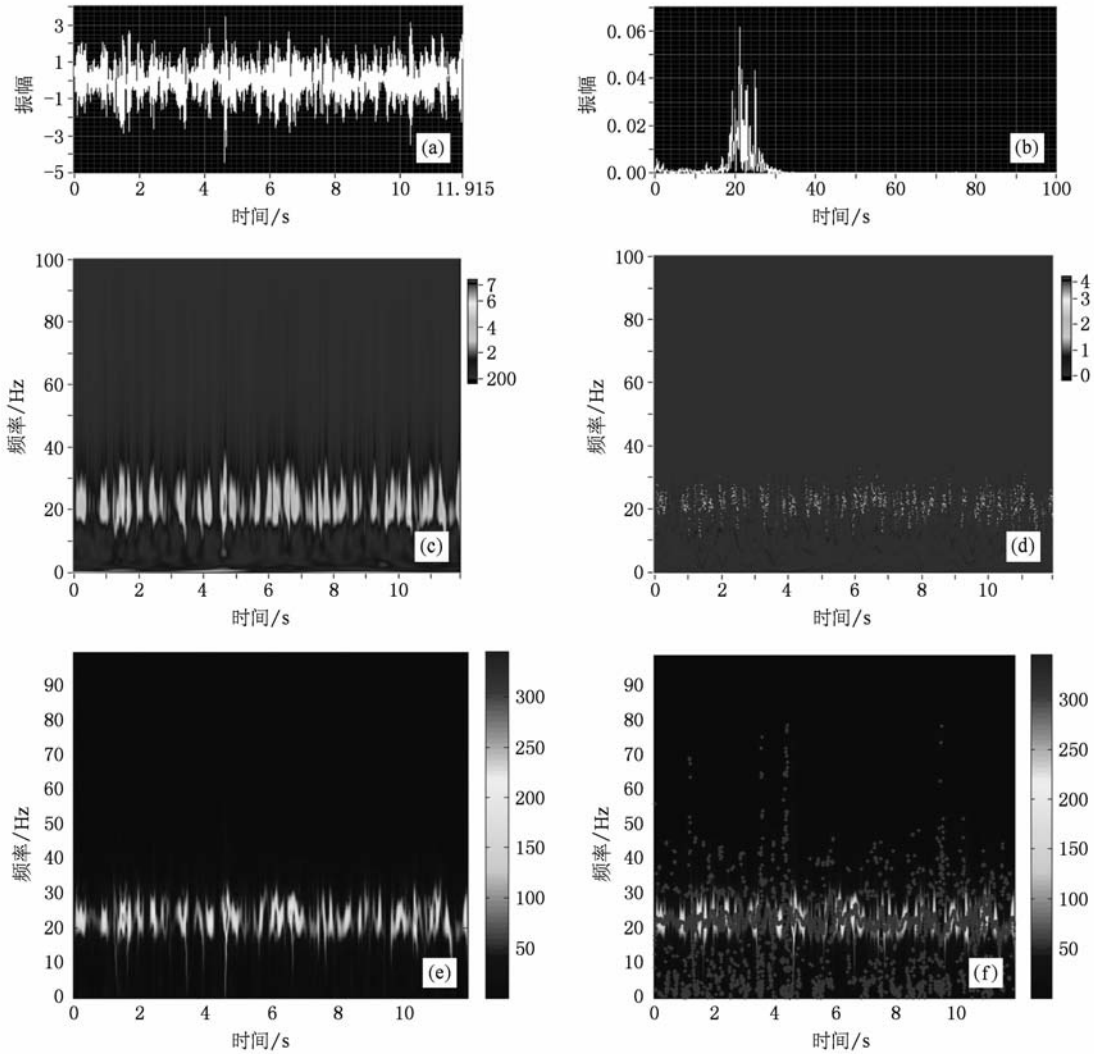


图 3 泡状流时频分析结果 (a)原始差压信号;(b)功率谱;(c)小波时频谱;(d)HHT 时频谱;(e)AOK 时频谱;(f)AOK 脊的提取图

在图 3(c)中,信号的能量主要集中在 15—35 Hz 之间的频带,而在(d)和(e)中能量集中在 18—28 Hz 之间的频带,能量比小波分析的更集中,说明在高频带 HHT 和 AOK 分析方法比小波分析的时频分辨率高.

在图 3(d)中,能量主要是以确定的点集的形式出现,而不是像图 3(c)中能量块的形式,这是因为 HHT 方法能够将原信号中的不同频率和振幅的信

息很好地分解出来,从而到瞬时频率和瞬时振幅随时间变化的比较准确、清晰的图像,而小波方法用分辨率已经限定的小波窗对信号进行分析,小波窗内的能量只占总能量的一部分,所以窗内的能量必然会扩散到其他频段,同时其他频段的能量也会渗透到小波窗内,从而产生频域混叠现象,故其分析结果不如 HHT 清晰和准确.

从图 3(e)中可看出,采用 AOK 方法直接分析

的结果虽然比小波分析的结果效果好,但各频率分量的频谱分布已被扩展,影响时频分布的可读性.从图 3(f)中,可以清楚地看到在 18—28 Hz 之间脊所占的频带更窄.因此,脊信息的提取进一步提高了时频分辨率,也增强了时频平面信息的可读性.

图 4 为弹状流信号时频分析结果.其中每幅图的含义与上面泡状流相同.

从弹状流信号的四幅时频谱中可以看出,弹状

流信号的能量在频带 0—35 Hz 之间都有分布,但是主要集中在两个频带,高频带(15—35 Hz)和低频带(0—8 Hz).这是由于气体流量的增大,管道中气泡达到一定的程度,形成了一个气弹,导致信号的能量主要集中在每个气弹通过传感器时产生的波动.但是在每两个气弹之间还存在着很多细小的气泡,所以能量在高频带还有一定的分布.因此在弹状流信号的时频谱中出现了两个谱峰.

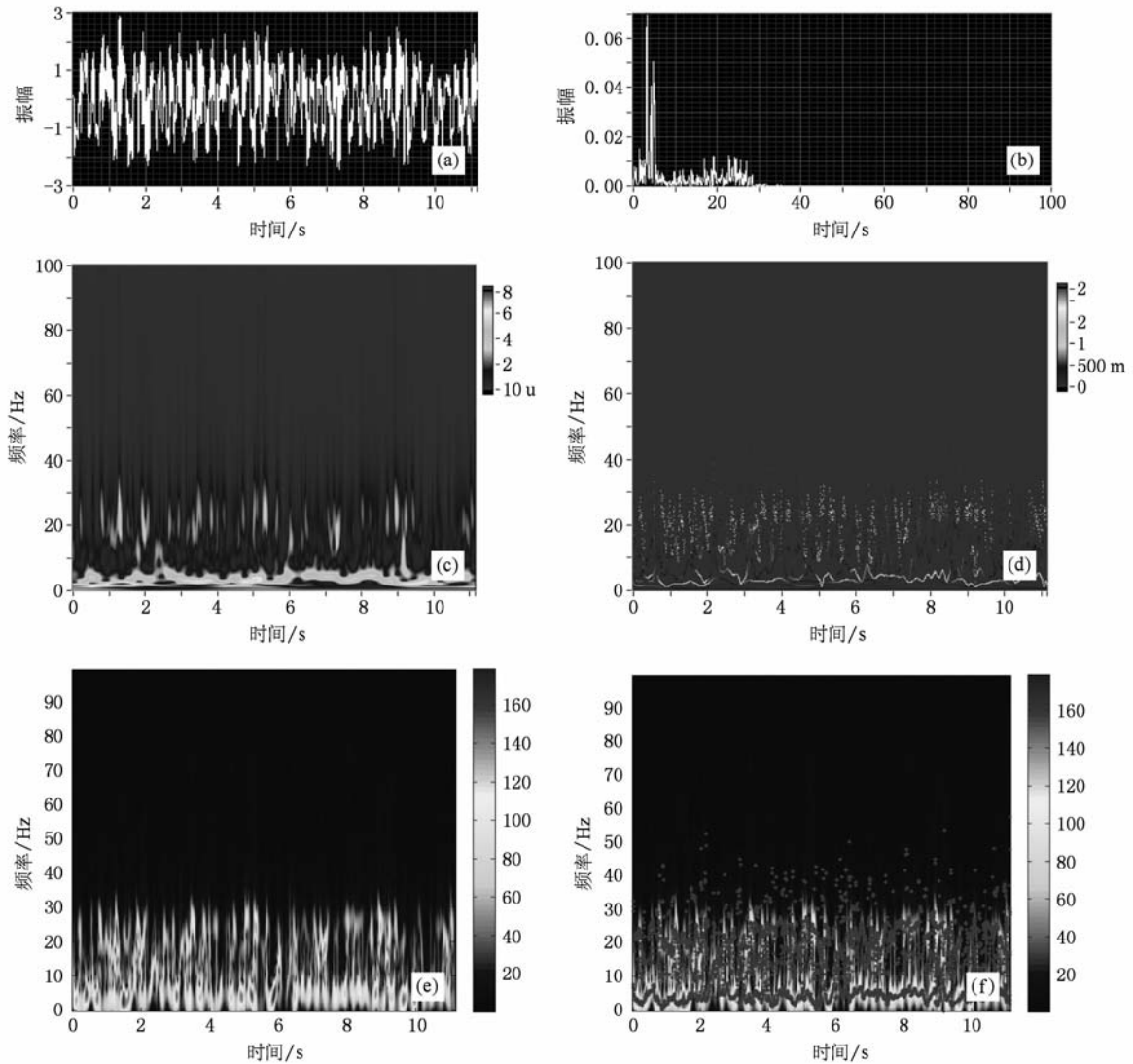


图 4 弹状流时频分析结果 (a)原始差压信号;(b)功率谱;(c)小波时频谱;(d)HHT 时频谱;(e)AOK 时频谱;(f)AOK 脊的提取图

图 4(e)中弹状流信号的能量比(c)中的能量在低频带时所占的时频带宽窄,说明在低频带 AOK 时频分析方法的时频分辨率高于小波时频分析方法.

图 4(f)中弹状流信号的能量分布同(d)中的能量分布很类似,说明 HHT 时频分析方法的时频分辨

率高于 AOK 时频分析方法,与 AOK 脊的提取后的时频分辨率相同.

图 5 为塞状流信号时频分析结果.此时气体以段塞的形式通过管道,使得差压波动非常剧烈,从塞状流信号的四幅时频图中可以看出,塞状流信号

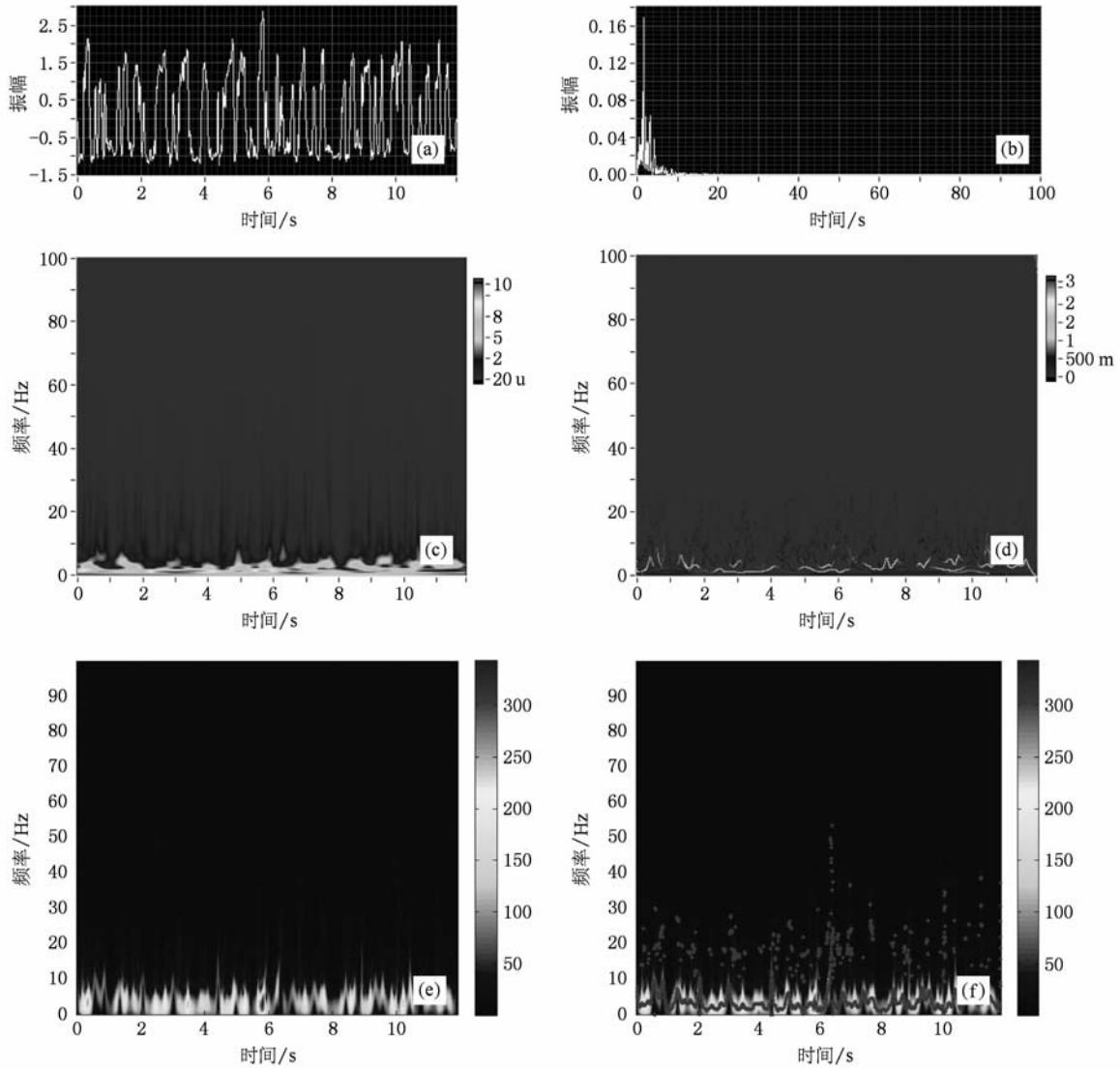


图5 塞装流时频分析结果 (a)原始差压信号;(b)功率谱;(c)小波时频谱;(d)HHT时频谱;(e)AOK时频谱;(f)AOK脊的提取图

的能量主要集中在低频带(0—8 Hz). 同上面分析结果一样,HHT时频分析方法和AOK脊提取后的时频分析方法的时频分辨率最高. 其次是AOK时频分析方法,最后是小波时频分析方法.

由以上分析可知,在保持水流量不变的前提下,随着气量增加,气液两相流流型从泡状流到弹状流,再到塞状流过渡,相应的波动差压信号的能量分布也有了明显的变化,从流型信号的小波时频谱、HHT时频谱和AOK时频谱中可以清晰地发现,波动差压信号的能量从高频带(15—35 Hz)向低频带(0—8 Hz)转移,在弹状流时出现了两个谱峰. 基于此,可以根据信号能量在时频谱上的分布情况来识别流型.

5. 结 论

通过三种不同的时频分析方法对气液两相流波动差压信号进行处理,可以看出:

1. 在处理两相流波动差压信号时,HHT时频分析方法和AOK时频分析方法的时频分辨率比小波分析方法的时频分辨率高. HHT方法能够将原信号中的不同频率和振幅的信息很好地分解出来,从而得到瞬时频率和瞬时振幅随时间变化的比较准确、清晰的图像. AOK方法可以得到仅有自项分量的时频分布,避免了交叉相的影响. 小波分析方法由于小波窗的存在产生不同频带混叠现象,致使其分辨

率降低.

2. 基于 AOK 理论的分析结果进行脊信息的提取不仅表现出强抗噪声性能而且克服了模糊平面加窗效应的影响. 因此, 基于该方法的流型波动差压信号分析结果表现出更高的时频分辨率, 并增强了时频平面信息的可读性.

3. 从气液两相流波动差压信号的时频谱中, 可

以清晰地观测出流型信号在不同时间和不同频率的能量密度或强度. 泡状流的能量主要集中在高频段, 弹状流在高频段和低频带都有分布, 塞状流的能量主要分布在低频段. 基于此, 可以根据不同流型能量的分布情况提取相关的特征变量, 从而进行流型识别. 这为流型的智能识别和在线识别奠定了基础.

- [1] Dong F, Jin N D, Zong Y B, Wang Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6146 (in Chinese) [董芳、金宁德、宗艳波、王振亚 2008 物理学报 **57** 6146]
- [2] Zheng G B, Jin N D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4485 (in Chinese) [郑桂波、金宁德 2009 物理学报 **58** 4485]
- [3] Lao L Y, Zhang H J, Zhang M 1996 *Application of signal processing technology to achieve two-phase flow parameter detection-Progress in Multiphase Flow Measurement Technology* (Beijing: Petroleum Industry Press) pp 103—109 (in Chinese) [劳力云、张宏建、张鸣 1996 应用信号处理技术实现两相流参数检测—多相流检测技术进展(北京:石油工业出版社) 第 103—109 页]
- [4] Jones O C, Zuber N 1975 *Int. J. Multiphase Flow* **2** 273
- [5] Vince M A, Lahey R T 1982 *Int. J. Multiphase Flow* **8** 93
- [6] Tutu N K 1982 *Int. J. Multiphase Flow* **8** 443
- [7] Matsui G 1986 *Nucl. Eng. Des.* **95** 221
- [8] Chen G, Huang Z Y, Wang B L 1999 *Chin. J. Sci. Instrum.* **20** 117 (in Chinese) [陈琪、黄志尧、王保良 1999 仪器仪表学报 **20** 117]
- [9] Tan C, Dong F, Wu M M 2007 *Flow Measurement and Instrumentation* **18** 5
- [10] Jin N D, He X F, Luo D 2006 *Transducer and Microsystem Technology* **25** 29 (in Chinese) [金宁德、何晓飞、罗彤 2006 传感器与微系统 **25** 29]
- [11] Peng Z K, Tse P W, Chu F L 2005 *Mechanical Systems and Signal Processing* **19** 974
- [12] Sun B, Zhang H J 2007 *Chin. J. Sens. Actuators* **20** 862 (in Chinese) [孙斌、张宏建 2007 传感技术学报 **20** 862]
- [13] Ding H, Huang Z Y, Song Z H, Yan Y 2007 *Flow Measurement and Instrumentation* **18** 1
- [14] Sun B, Huang S Q, Zhou Y L, Guan Y B 2008 *Chin. J. Sci. Instrum.* **29** 5 (in Chinese) [孙斌、黄胜全、周云龙、关跃波 2008 仪器仪表学报 **29** 5]
- [15] Zhang Y H, Jin G B, Li T Y 2006 *Proc. CSEE* **26** 84 (in Chinese) [张宇辉、金国彬、李天云 2006 中国电机工程学报 **26** 84]
- [16] Gong Z Q, Zou M W, Gao X Q, Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3947 (in Chinese) [龚志强、邹明玮、高新全、董文杰 2005 物理学报 **54** 3947]

Time-frequency spectral analysis of gas-liquid two-phase flow's fluctuations^{*}

Sun Bin[†] Wang Er-Peng Zheng Yong-Jun

(College of Metrological Technology and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(Received 30 November 2009; revised manuscript received 8 May 2010)

Abstract

In order to study different flow patterns' dynamic characteristics of gas-liquid two-phase flow, three time-frequency analysis methods are introduced to process the dynamic differential pressure signal of gas-liquid two-phase flow, such as the wavelet transform, Hilbert-Huang transform and adaptive optimal-kernel method. The results show that the main part of energy is transferred from frequency band 15—35 Hz to 0—8 Hz when the flow pattern changes from bubbly flow to slug flow and plug flow, and two spectrum peaks are observed at slug flow. The experimental results show that the time-frequency resolution of Hilbert-Huang transform and adaptive optimal-kernel is higher than that of wavelet transform. The extractions of ridge information based on adaptive optimal-kernel overcome the influence of fuzzy plane windowing effect, and enhance the readability of time-frequency plane information. The time-frequency analysis clearly shows the dynamic characteristics of different flow patterns, and describes the variation rules with time. It is helpful to further study the mechanism of gas-liquid two-phase flow.

Keywords: gas-liquid two-phase flow, flow pattern identification, Hilbert-Huang transform, adaptive optimal-kernel
PACS: 47.55. Ca

^{*} Project supported by the Special Funds for Theoretical Physics of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10947154) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Grant No. Y1100842).

[†] E-mail: bsun555@cjlu.edu.cn