

文章编号 1004-924X(2019)11-2484-14

不同颗粒浓度油液压力振动信号特征的 HHT 提取

陈 彬^{1*}, 刘 阁²

(1. 华北科技学院 机电工程学院, 河北 燕郊 065201;

2. 华北科技学院 环境工程学院, 河北 燕郊 065201)

摘要:颗粒浓度对油液的湍流脉动特性有一定的影响,利用 Hilbert-Huang 变换方法对含不同颗粒浓度的油液脉动流的压力信号进行分析,探讨颗粒浓度对压力信号的振动特征的影响规律。利用经验模态函数(EMD)、Hilbert 变换和包络解调等方法,获取压力信号的 Hilbert 谱和信号能量特征,分析了不同颗粒浓度的油液压力信号的能量分布和调幅调频特征以及调制信号的瞬时频率。结果表明以 IMF 能量作为特征向量将各阶 IMF 分量划分为 3 个信号特征频带,随着颗粒浓度的增加,高频率区的累积分布基本稳定在 0.7 范围内,而中频率区出现下降、低频率区呈现上升的状态;高频率区的边际谱平均幅值随着油液中颗粒浓度的增加呈现先增加后降低的发展趋势,中低频率成分的幅值呈增加的趋势;对压力信号在不同频带内的瞬时能量谱进行积分,得到压力信号的总能量随着颗粒浓度的增加出现下降趋势,中频率区的能量特征值呈逐渐衰减的变化趋势;含不同颗粒浓度的油液压力信号具有调制特征,Hilbert 包络解调信号的瞬时频率均呈先增加后下降的发展趋势。

关键词:脉动流;HHT;压力振动信号;特征提取;颗粒浓度

中图分类号:TH741;O357.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192711.2484

Extraction for HHT features of pressure vibration signals of oil pulsating flow with different particle concentration

CHEN Bin^{1*}, LIU Ge²

(1. School of Mechanical & Electrical, North China Institute of Science and Technology, Yanjiao 065201, China;

2. School of Environmental Engineering, North China Institute of Science and Technology, Yanjiao 065201, China)

* Corresponding author, E-mail: hustchb@163.com

Abstract: Particle concentration has any effect on turbulence characteristics of the oil, by using Hilbert-Huang method, the pressure signal of oil pulsating flow with different particle concentration was analyzed, and the law of particle concentration effect on vibration characteristics of pressure signal was discussed. Using empirical mode function, Hilbert transform and envelope demodulation method, the Hilbert spectrum and energy characteristics of oil pressure signal was obtained, analyzes the ener-

收稿日期:2019-04-30;**修订日期:**2019-06-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375516);重庆市基础研究与前沿探索项目资助(No. cstc2018jcyjAX0121);重庆市技术创新与应用示范项目资助(No. cstc2018jcsx-msybX0335);中央高校基本科研业务经费项目资助(No. 3042019001)

gy distribution of the pressure signal of oil containing different particle concentration, and the characteristics of frequency modulation and amplitude modulation, and the instantaneous frequency of the modulating signal were analyzed. The results showed that each intrinsic mode function (IMF) component is divided into three signal characteristic bands as the characteristic vector using IMF energy; with particles concentration increased, the time variation of the each order IMF component of pressure signal of oil pulsating flow of develops gradually from high band of modulation features to low band, cumulative distribution of high-frequency district of marginal spectrum of pressure signal stables basically range within 0.7. Moreover, as the middle-frequency district decreased, the low-frequency district tended to increase. The average amplitude of the high-frequency district of the marginal spectrum rendered first increased and then decreased as the particle concentration of oil increased, and the amplitude of the middle- and low-frequency components increased. The instantaneous energy spectrum of the pressure signal in different frequency bands was integrated to obtain the total energy of the pressure signal that decreased as particle concentration increased and the energy characteristics of the middle-frequency district declined. Oil pressure signals with different particle concentrations have modulation characteristics. The instantaneous frequency mean value of the Hilbert envelope demodulation signal first increased and then decreased.

Key words: pulsating flow; Hilbert-Huang transform; pressure vibration signals; extraction feature; particle concentration

1 引 言

油液中混有颗粒物会改变油液的湍流猝发行为、轨道交叉效应等湍流拟序结构,进而影响油液的脉动特性、雷诺应力等宏观湍流特性^[1-3]。Dritselis 等^[4]分析了流体中铜颗粒物的存在会减弱湍流的拟序结构强度,使这些结构的发展受到抑制作用。Bizhaem 等^[5]实验研究了在 1~10 Hz 频率下不同颗粒物粒径对流化床的时均压降、固相含量以及轴向速度的脉动等宏观流动特性的变化影响,认为颗粒的最大轴向速度随着频率的增加而降低。Rashidi 等^[6]在低载荷的水槽流动实验中认为大尺度的颗粒物能增强流体的湍动能,促进流体的压力、速度变化,反之小尺度颗粒物的作用则会减弱流体的湍动能。

脉动流的研究主要在流率的低脉动幅值和高频率方面取得了有价值的成果^[7-10]。Gerrard^[11]首先进行了湍流脉动流的实验研究,利用摄影成像技术测量了水流的局部瞬态速度,发现流动具有层流化的趋势。随着激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimeter, LDA)技术的发展,对脉动流的研究利用 LDA 来测量瞬态速度^[12-13]。开始主要集中于基于流体平均速率的雷诺数的脉动

流,后来拓展到平均雷诺数的更大值的情况。Binder 等^[14]一直对槽道内脉动流进行研究,利用 LDA 测量了速度和壁面剪应力,集中于壁面对数层。在文献中利用嵌套的热膜探针研究了高频下壁面剪应力的幅值^[15]考察了湍流应力和 Stokes 尺度幅值的周期性变化^[16],且报道了流体脉动对湍流猝发的影响^[17]。近期报道了槽道内脉动流的壁面剪应力和湍流应力的实验研究^[18]。

油液的脉动流本身是典型的非线性、非稳态流动问题,由于油液中混入颗粒污染物的粒径和数量是一个随机分布问题,给油液在时域、频域上流动动力参数的变化增加了更为复杂的不确定因素^[19-20]。希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)采用经验模态分解(Empirical mode Decomposition, EMD)方法对采集的信号分解为多个本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),根据信号自身的特点进行信号分析,不受信号线性和平稳性的约束,是一种适合非线性、非平稳信号的时频分析方法^[21-22]。董红生等^[23]提出一种基于 Hilbert 时频谱信号的时频特征提取和分析新方法,能反映人的生理病理变化。Sun 等^[24]利用 HHT 对两相流的流型进行了辨识,随后周云龙等提出了一种基于 HHT 和隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)结合

以及与 Elman 神经网络相结合的气液两相流流型识别的新方法^[25]。徐平等^[26]分别应用小波分析和 HHT 对实测的腔内压力脉动信号进行对比分析,讨论了两种方法在压力信号提取和时频分析方面的适用性,相比于小波分析,HHT 更适于自振射流压力脉动信号的分析与处理。瞿伟廉等^[27]采用 HHT 方法对典型水流脉动压力时域过程进行了平稳性检验。Lu 等^[28]对高压气固两相流输送运用 HHT 进行了气流速度、颗粒粒径和输送压力的研究,表明随着气流速度的降低,颗粒以较低的速度和碰撞频率逐渐沉降到管路底部;颗粒粒径越小越容易输送形成悬浮流。赵凯等^[29]采用 Hilbert-Huang 变换方法对流化床内的压差脉动信号进行分析,研究了不同工况下生物质和石英砂双组分颗粒的流动特征。

本文根据油液脉动流的多尺度、拟周期的特征,对含颗粒污染物的油液压力振动信号进行 HHT 分析处理,利用 HHT 方法可获得由于脉动流压力振动信号的 Hilbert 时频谱,从压力信号的 EMD 分解中抽取 IMF 的能量作为特征向量;划分不同信号特征的频带,并在不同频带内的

Hilbert 时频谱对频率积分,则压力信号在不同频带的瞬时能量谱就可以得到,再对压力信号的瞬时能量谱进行时间积分,则可得到一定频带内压力信号的能量值,进而获取压力信号的 Hilbert 能量图。分析颗粒物的浓度对油液的压力振动信号特征的提取方法及其影响,探讨油液脉动流压力信号随着颗粒浓度变化的内在关系。

2 实验装置和方法

2.1 实验装置

油液脉动流的压力信号特征提取实验装置示意图如图 1 所示,主要由数据采集系统和图像采集系统(PIV)两部分组成,建立笛卡尔坐标系如图所示,坐标原点为实验管路的左下角顶点, x 向为油液的流向, y 向为展向, z 向为法向。图像采集系统(PIV)是对油液的运动参量进行实时采集和处理,由激光发生器、导光臂、微观照相机、同步控制器、三维移动架、运动控制器以及 Insight4G 应用软件构成。实验管路截面为 $0.04\text{ m} \times 0.04\text{ m}$,长为 0.5 m 的方形,为了便于 PIV 的数据采集,在管路的顶面和前面采用透明玻璃制成。

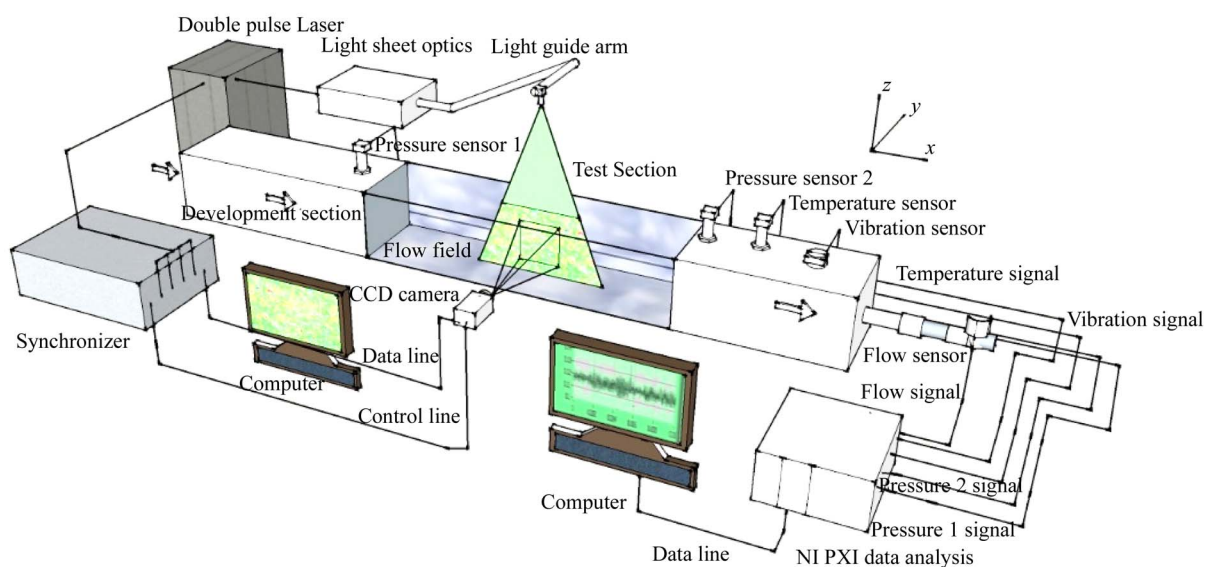


图 1 油液脉动流的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental equipment for pulsating flow of oil liquid

实验用油液为 25 # 变压器油(无色透明便于 PIV 测试),经过中性滤纸进行抽滤处理得到初始

油样;颗粒物选用的 Cu, Fe 和 SiO_2 粉末。分别称取 0.02 g Cu, Fe 和 SiO_2 粉与 1 L 25 # 变压器

油混合后经过 8 h(温度 30~60 °C)超声波振荡器振荡均匀,然后进行不同孔径的滤纸抽滤,得到中径为 5 μm , 15 μm , 25 μm , 50 μm 浓度为 14.4×10^{-6} 的油样。按一定的体积比例向此浓度油样中加入初始油样,经过 8 h(温度 30~60 °C)超声波振荡器振荡均匀,分别得到不同中径下浓度分别为 0.648×10^{-6} , 0.971×10^{-6} , 3.00×10^{-6} , 4.57×10^{-6} , 14.40×10^{-6} 和 28.50×10^{-6} 梯度等级的含颗粒物油样。将油液置于油箱中经过蠕动泵输入实验管路中,入口初始速度为 $V_0 = 0.0362 \text{ m/s}$,油液经过管路发展段后,流进入测试段,再经尾段进入油箱,形成一个循环。

数据采集系统主要包括油液压力变送器和管路振动变送器、NI PXI 数据采集卡以及 LABVIEW 数据分析处理软件等。其中压力变送器采用 YP-01S 型量程为 $-0.1 \sim 2.0 \text{ MPa}$,精度为 0.2%,输出为 $0 \sim 5 \text{ V}$ 的变送器,用于采集到实验管道的进出口油液的压力变化信号;系统采集的压力实时数据通过 NI PXI 采集板,传输给计算机中的 LABVIEW 软件,对油液的压力的动态参数信息进行滤波去噪和分析处理。

2.2 数据采集方法

利用 LABVIEW 软件编制数据采集的前面板如图 2 所示。

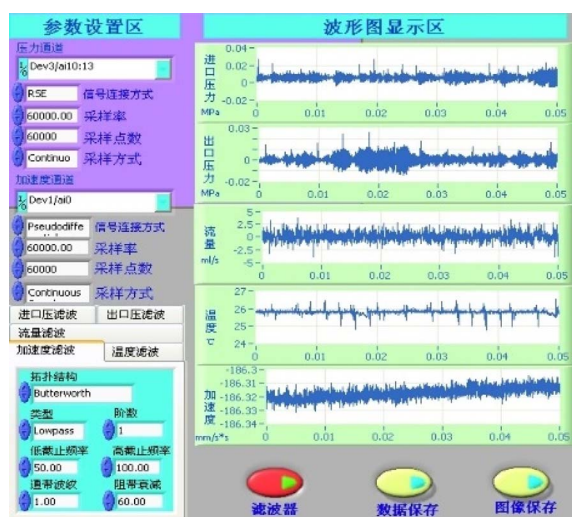


图 2 采集系统的前面板

Fig. 2 Front panel of collection system

前面板中主要包含参数设置区和波形图显示区,设置有滤波器、数据保存、图像保存等按钮控件。可以实现滤波器启动、实验数据和图像的存

储功能。波形图显示区是实时显示管道油液的进口压力、出口压力的采样值随时间的变化情况。参数设置区是 NI-DAQmx 任务压力信号采集参数的选择,油液脉动流压力信号的连接方式为 RSE,采样率为 1 000 Hz,采样点数为 6 000 点和采样方式为 Continuous Samples。

将油液进入实验管路运行 10 min,待系统中油液的各项指标变化较为平稳后,开始各参数的数据采样。

3 结果与分析

选取采集含不同颗粒浓度油液脉动流压力信号稳定后的 1000 个数据,以消除采集数据 EMD 分解过程中的“边界效应”。首先运用 EMD 将压力信号分解为不同的 IMF,对各个 IMF 进行 Hilbert 变换,获取压力信号各个 IMF 的瞬时频率,绘制 Hilbert 时频谱和边际谱。再通过压力信号的各个 IMF 得到各个 IMF 的能量,得到油液脉动流的压力信号的特征参量。

3.1 含不同颗粒浓度油液脉动流压力信号的 Hilbert 谱分析

含不同颗粒浓度油液脉动流的压力信号经过 EMD 分解后的各个 IMF 分量如图 3 所示,图 3(a)~图 3(f)分别是油液中颗粒浓度为 0.648×10^{-6} , 0.971×10^{-6} , 3.00×10^{-6} , 4.57×10^{-6} , 14.40×10^{-6} 和 28.50×10^{-6} 的油液脉动流压力信号的 IMF 分量图。可见 EMD 根据不同的压力振动信号从高频到低频分解为不同数量的 IMF 分量,这也是 HHT 变换的一个优势,对信号的分解是依据信号本身特征进行的具有自适应性。

图 3(a)为颗粒浓度为 0.648×10^{-6} 的油液脉动流压力信号经过 HHT 变换后各个 IMF 分量沿时间的分布图,可以看到 IMF1-3 分量具有较为明显的疏密相间分布的调频特征以及振动幅值峰谷相间的调幅特征。IMF4-9 分量在时间轴上的变化相对较为平稳,从表 1 可见随着 EMD 分解的 IMF 分量数量增加对应的 IMF 分量的瞬时频率均值逐渐减小。颗粒浓度较小,对油液脉动流的湍流拟序结构发展影响较小,因而低颗粒浓度情况下油液的脉动特性在低频段内基本保持平稳发展趋势,由包络信号和载波信号的主频相互

作用高频段内的信号发展,同时维持在高频段内的一个趋势。

随着颗粒浓度的增加,油液脉动流的压力信号的各个 IMF 分量随时间的变化逐渐由高频段向低频段内发展。如图 3(b)~图 3(f)为颗粒浓度为 $0.971 \times 10^{-6} \sim 28.50 \times 10^{-6}$ 的油液脉动流压力信号经过 HHT 变换后各个 IMF 分量沿时间的分布图,在 IMF5 分量上表现出调

制特征;表明油液中颗粒浓度的增加,颗粒与壁面的碰撞形成了复杂的跳跃运动轨迹,明显增强了颗粒的轨道交叉效应,破坏了近壁区的油液脉动流的湍流拟序结构;以及由于颗粒的加入还可通过增强近壁区低速油液的上抛行为和中心区高速油液的下扫行为,使油液的湍流拟序结构得到了较强的抑制^[30],因而使油液脉动流高频区的调频、调幅特征向低频段内发展。

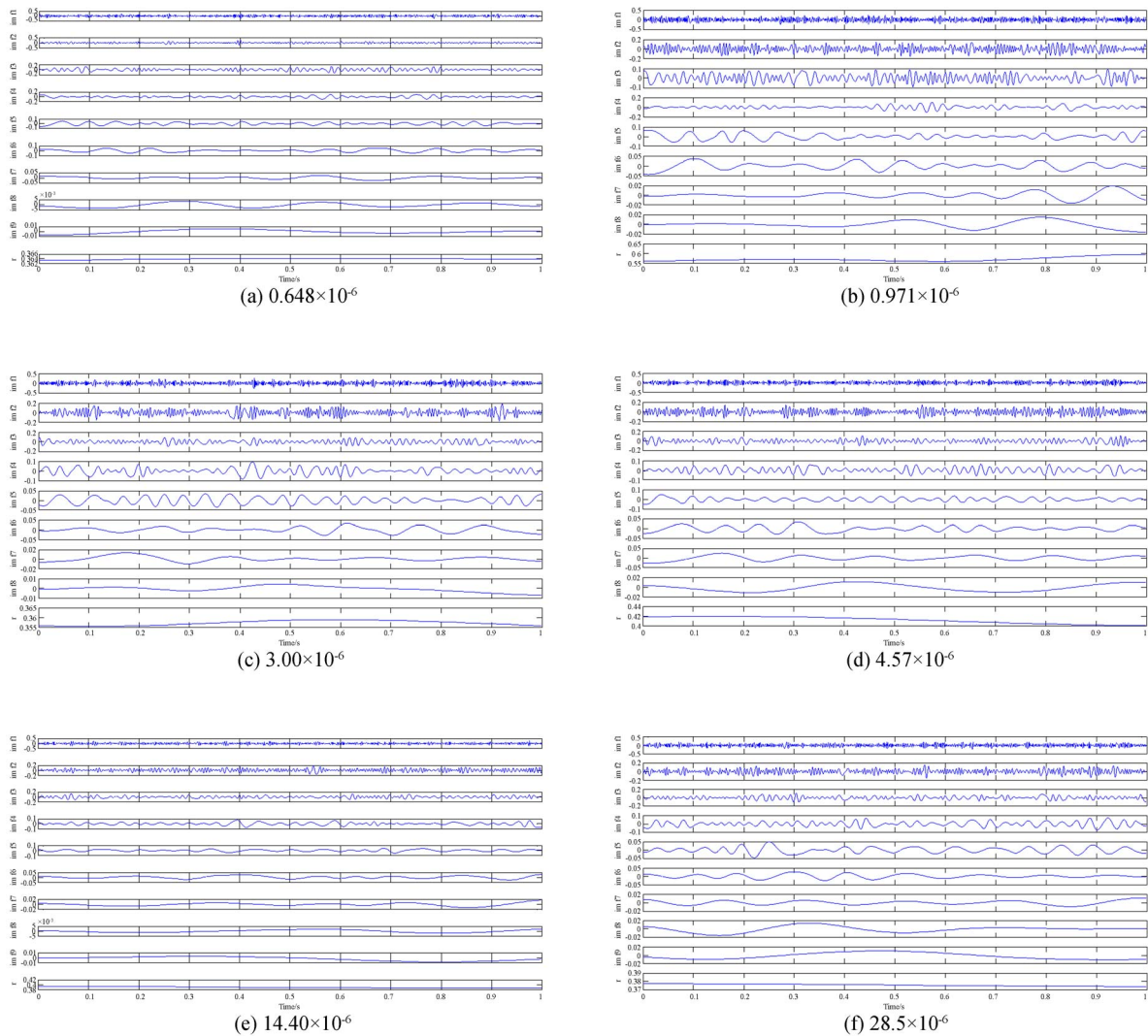


图 3 压力信号的 IMF 分量图

Fig. 3 IMF component diagram of pressure signal

表 1 为含不同颗粒浓度的油液脉动流的压力信号经过 EMD 分解后各个 IMF 分量的瞬时频率的均值。可以看到随着压力信号经过 EMD 分解的 IMF 分量数量的增加,其对应瞬时频率的均值逐渐减小;且在不同的油中颗粒浓度的

各个 IMF 分量对应的瞬时频率均值变化不大。而 IMF1-3 分量对应的瞬时频率均值都在 50 Hz 以上,由图 3 可知它们的振动幅值较大,可以看作是压力信号的主频率区,高于 50 Hz 的压力信号振动频率的幅值小于 0.001,是高频区;

则次频率区 10~50 Hz 对应的 IMF4-6 分量的瞬时频率均值, 0~10 Hz 对应的 IMF7-8 分量的瞬时频率均值, 可将油液脉动流的压力信号的各个 IMF 分量划分为 3 个频段, 如表 2 所示。

图 4 为压力信号的边际谱图, 能够反映出油液脉动流的压力信号较为真实的振动频率成分, 从图 4 中可以看到压力信号在频率轴上的振动幅值分布是非平稳的, 反映了油液脉动流的非线性和非平稳的

压力信号振动特征; 其中在 50 Hz 以上的频率范围内振动幅值相对较小, 但其频率成分较多, 表明了压力信号相对高的频率范围内具有调频的特征。在 50 Hz 以下可以明显看到有较少峰值出现, 表明在较低的瞬时频率下压力信号的振动幅值在某一频率下相对较为稳定。与图 3 的各个压力信号的 IMF 分量的随着分量数量的增加其振动频率较低, 但其较为平稳的特征是一致的。

表 1 不同颗粒浓度的压力信号 IMF 的瞬时频率均值

Tab. 1 Mean value of instantaneous frequency of pressure signal IMF with different particle concentrations

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9
0.648×10^{-6}	263.823 4	164.124 8	78.924 4	40.999 4	21.924 0	9.994 9	4.934 3	3.006 6	1.915 4
0.971×10^{-6}	273.986 0	155.215 1	76.958 3	41.925 9	20.015 6	10.935 5	5.880 4	2.918 7	
3.00×10^{-6}	262.004 2	162.834 1	77.993 2	42.752 1	21.899 6	7.927 8	4.976 9	1.929 1	
4.57×10^{-6}	270.520 2	178.840 3	95.950 8	49.941 2	24.939 5	12.918 7	5.915 0	1.938 6	
14.40×10^{-6}	256.890 4	163.986 0	74.898 0	35.907 3	15.880 9	6.917 6	3.920 8	1.911 2	0.967 3
28.50×10^{-6}	267.886 7	165.137 4	79.909 3	34.993 8	14.991 2	8.894 7	4.964 5	2.853 6	0.937 7

表 2 压力信号的 IMF 区域及其边际谱的累积分布

Tab. 2 Cumulative distribution of IMF region and its marginal spectrum of pressure signals

频率范围/Hz	对应的 IMF	不同颗粒浓度/ 10^{-6}					
		0.648	0.971	3.00	4.57	14.40	28.50
低频率区 0~10	IMF7-8	0.104 2	0.084 9	0.075 0	0.105 0	0.106 1	0.120 3
中频率区 10~50	IMF4-6	0.277 1	0.216 7	0.212 8	0.175 6	0.199 0	0.217 0
高频率区 >50	IMF1-3	0.618 7	0.698 4	0.712 2	0.719 4	0.694 9	0.662 7

由表 2 可见, 当油液脉动流中颗粒浓度为 0.648×10^{-6} 时, 其压力信号的高频率区的边际谱累积分布保持在 0.618 7, 同时中频率区的累积分布在 0.277 1, 由于油液中颗粒浓度较低, 颗粒的轨道交叉效应较弱, 油液湍流的拟序结构发展受到颗粒的影响也较小, 因而压力信号的高频率成分较少。随着颗粒浓度的增加, 在颗粒浓度为 $0.971 \times 10^{-6} \sim 14.40 \times 10^{-6}$ 之间时, 可以看到在压力信号边际谱的高频率区的累积分布基本稳定在 0.7 值范围内, 在中频率区出现下降的趋势, 进而在低频率区呈现上升的态势。可见油液中颗粒浓度的增加使油液湍流的拟序结构得到一定程度的抑制, 使中频率区的分布向低频率区转移。当油液中颗粒浓度为 28.50×10^{-6} 时压

力信号的边际谱表现出明显的发展趋势, 在低频率区的累积分布明显增大, 同时高频率区的累积分布呈下降趋势。

图 4(a) 为颗粒浓度为 0.648×10^{-6} 的油液脉动流压力信号经过 HHT 变换后的边际谱图, 可见图中 50 Hz 以上的频率成分的幅值在 8.39×10^{-4} 范围内变化, 约为最大幅值 8.381×10^{-3} 的 0.100 1 倍, 且有振动频率越低其幅值越大的发展趋势。在 10~50 Hz 频段内出现了 3 个峰值分别为 12.5 Hz, 23.75 Hz 和 41.25 Hz, 它们的峰值依次为 7.476×10^{-3} , 4.322×10^{-3} , 4×10^{-3} 。

图 4(b) 中当颗粒浓度为 0.971×10^{-6} 时, 油液脉动流的压力信号的边际谱中在中频率区出现 11.25 Hz 的最大振动幅值对应的峰值, 50 Hz 以

上的高频率区的平均幅值为 0.861, 约为最大幅值的 0.123 5 倍; 其次在低频率区出现 7.5 Hz 的峰值。图 4(c) 中当颗粒浓度为 3.00×10^{-6} 时, 油液脉动流的压力信号的边际谱中在中频率区出现

最大振动幅值对应的 25 Hz 峰值, 在低频率区出现 10 Hz 的峰值; 50 Hz 以上的高频率区的平均幅值为 0.753, 约为最大幅值的 0.158 3 倍。图 4 (d) 中当颗粒浓度为 4.57×10^{-6} 时, 油液脉动流的

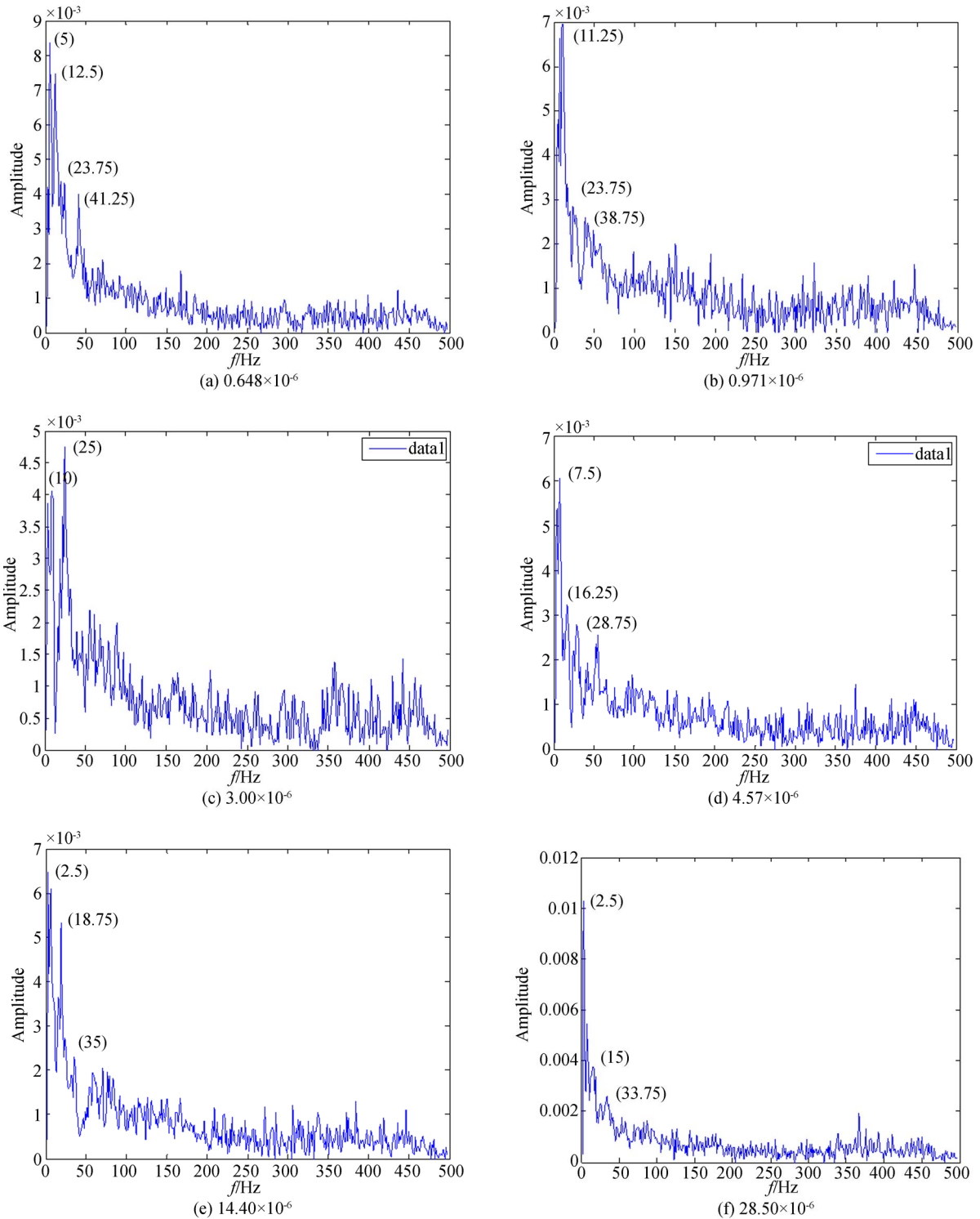


图 4 压力信号的边际谱图

Fig. 4 Marginal spectrum of pressure signal

压力信号的边际谱中在低频率区出现 7.5 Hz 的峰值,对应整个边际谱的最大振动幅值,在中频率区出现 16.25 Hz 和 28.75 Hz 的两个峰值,50 Hz 以上的高频率区的平均幅值为 0.763,约为最大幅值的 0.125 9 倍。图 4(e)中当颗粒浓度为 14.40×10^{-6} 时,油液脉动流的压力信号的边际谱中在低频率区出现 2.5 Hz 的峰值对应边际谱图中最大振动幅值,在中频率区出现 18.75 Hz 和 35 Hz 的两个峰值,50 Hz 以上的高频率区的平均幅值为 0.779,约为最大幅值的 0.120 6 倍。图 4(f)中当颗粒浓度为 28.50×10^{-6} 时,油液脉动流的压力信号的边际谱中在中频率区出现 15 Hz 和 33.75 Hz 的峰值,其次在低频率区出现最大振动幅值对应于 2.5 Hz 的峰值,50 Hz 以上的高频率区的平均幅值为 0.754,约为最大幅值的 0.073 3 倍。

可见,随着油液中颗粒浓度的增加,高频率区的边际谱平均幅值呈现先增加后降低的发展趋势,与表 2 的边际谱累积分布的规律一致,油液中颗粒浓度的增加,增强了颗粒的轨道交叉效应,使油液湍流的脉动程度降低。同时可知压力信号的中低频率成分的幅值随着颗粒浓度的增加而呈增加趋势。

3.2 压力信号的能量分析

为了定量分析含不同颗粒浓度的油液脉动流压力信号的振动特征,根据图 4 边际谱图的分析结果,将压力信号分解的 IMF 分量对应的各个频段的能量占信号总能量的百分比作为各个频段的能量特征值,则可得压力信号的各个 IMF 分量的各个区域频段能量特征值。将各个 IMF 分量的能量以及其按照瞬时频率均值的大小划分为 3 个区域的能量分布情况如表 3 所示。

表 3 各个 IMF 分量的能量及其区域能量分布

Tab. 3 Each IMF energy and regional energy distribution

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	总能量	IMF 1%~3%	IMF 4%~6%	IMF 7%~8%
0.648×10^{-6}	7.223 9	2.838 0	1.883 1	1.140 4	0.582 2	0.658 5	0.144 8	0.004 5	14.475 5	82.452 7	16.436 2	1.111 2
0.971×10^{-6}	10.906 9	3.374 7	1.448 5	0.845 8	0.790 1	0.306 1	0.041 1	0.050 9	17.764 0	88.550 2	10.932 1	0.517 7
3.00×10^{-6}	8.030 0	2.916 8	1.155 0	0.898 2	0.293 3	0.191 3	0.023 9	0.008 2	13.516 8	89.531 7	10.231 1	0.237 2
4.57×10^{-6}	6.635 6	2.638 5	1.225 0	0.652 5	0.347 8	0.188 1	0.148 7	0.056 1	11.892 2	88.285 3	9.993 2	1.721 5
14.40×10^{-6}	7.520 5	2.958 8	1.713 3	0.713 8	0.415 6	0.177 3	0.034 2	0.001 6	13.535 2	89.954 1	9.640 9	0.405 0
28.50×10^{-6}	7.483 2	2.375 7	1.253 1	0.767 6	0.294 9	0.126 0	0.024 1	0.049 2	12.373 6	89.356 7	9.556 9	1.086 4
标准差	1.378 7	0.305 9	0.268 7	0.158 1	0.179 5	0.180 0	0.055 0	0.023 8	1.910 4	2.554 7	2.414 8	0.511 1

可见,含不同颗粒浓度的油液脉动流压力信号的能量主要集中在高频率区,从图 3 也可看出 IMF1-3 的分量幅值相对较大,也是表征压力信号调制较为明显的区域。从不同颗粒浓度油液的压力信号的各个 IMF 分量的标准差可见,分解的 IMF 分量阶数越大,标准差越小,表明 IMF 的阶数越大,不同颗粒浓度油液脉动流的压力信号之间的差别越小;同理从 3 个区域的标准差可见中高频率区的标准差的相对值要大于低频率区,同样说明了压力信号分解的低阶数 IMF 分量具有较高的颗粒浓度分辨能力。当油液中颗粒浓度为 0.648×10^{-6} 时,分解得到的各个 IMF 分量的总能量为 14.475 5,高频率区 IMF1-3 的能量特征值为

82.452 7%,中频率区的能量特征值为 16.436 2%;随着颗粒浓度从 $0.971 \times 10^{-6} \sim 28.50 \times 10^{-6}$ 的增加,各个压力信号的总能量出现下降趋势,高频率区的能量特征值基本上变化不大,中频率区的能量特征值呈逐渐衰减的变化趋势,低频率区的变化较为复杂,基本上有上升的趋势。随着分解的 IMF 数量的增加,能量特征值逐渐下降。进一步表明油液脉动流的压力信号是一种非线性和非平稳的复杂信号,具有波间、波内调制的特点。

将含不同颗粒浓度的油液脉动流的压力信号经过 EMD 分解后的各阶 IMF 分量进行欧氏距离的换算,如表 4 所示。

由表 4 可见,含 0.971×10^{-6} 颗粒浓度的油

液脉动流压力信号的各阶 IMF 分量与其他颗粒浓度的压力信号的分解 IMF 分量的欧氏距离最大,说明油中颗粒浓度的较小的变化就会引起压力信号的各阶 IMF 分量的变化,这一点在表 3 中该颗粒浓度含量的压力信号的总能量最大是一致

的。其次随着油液中颗粒浓度的增加,压力信号的各阶 IMF 分量的欧氏距离越来越小,表明颗粒浓度的增加到一定值后,对油液湍流的拟序结构的抑制作用减小,即对压力信号的振动的衰减作用减弱。

表 4 各阶 IMF 分量的欧氏距离

Tab. 4 Euclidean distance of each order IMF

	0.648×10^{-6}	0.971×10^{-6}	3.00×10^{-6}	4.57×10^{-6}	14.40×10^{-6}	28.50×10^{-6}
0.648×10^{-6}	—	3.782 7	1.249 5	1.155 9	0.764 8	1.095 3
0.971×10^{-6}		—	2.972 7	4.369 7	3.447 8	3.611 4
3.00×10^{-6}			—	1.451 9	0.788 9	0.790 3
4.57×10^{-6}				—	1.071 8	0.907 6
14.40×10^{-6}					—	0.758 8
28.50×10^{-6}						—

3.3 压力信号的包络谱分析

根据含不同颗粒浓度的油液脉动流压力信号的 Hilbert 谱分析可知压力信号具有调制特征,因而利用 HHT 变换的性质,对各个压力信号进行包络解调分析,以分析压力信号振动的主要频率。由表 3 可见含不同颗粒浓度的压力信号经过 EMD 分解后的各阶 IMF 分量的能量特征值不同,第 1-4 阶 IMF 分量的能量特征值占总能量较大,因而以第 4 阶 IMF 分量进行压力信号的包络解调分析。

图 5~图 10 分别为含不同颗粒浓度的压力信号 IMF4 分量的包络解调情况。其中图 5~图 10 中的(a)~(f)分别对应 IMF4 分量随时间的变化曲线及其频谱、IMF4 分量的包络信号及其频谱、IMF4 分量的调制信号及其频谱。

从图 5 可见含 0.648×10^{-6} 颗粒浓度的油液脉动流压力信号的 IMF4 分量的调频、调幅调制特征在图 4(c),图 4(e)中非常明显地表现出来,由图 5(b)IMF4 分量的频谱可见其频率带宽在 0~82 Hz 范围内,最大幅值对应的频率为 34.18 Hz,其次在主频的两侧分布有 24.41, 28.32, 39.06, 44.92 和 48.83 Hz,可见主频 34.18 Hz 与其两侧峰值是 4.883 Hz 以及 5.86 Hz 的倍频,就是说 IMF4 分量的信号是在主频为 34.18 Hz 的信号被中心频率为 4.883 Hz 的

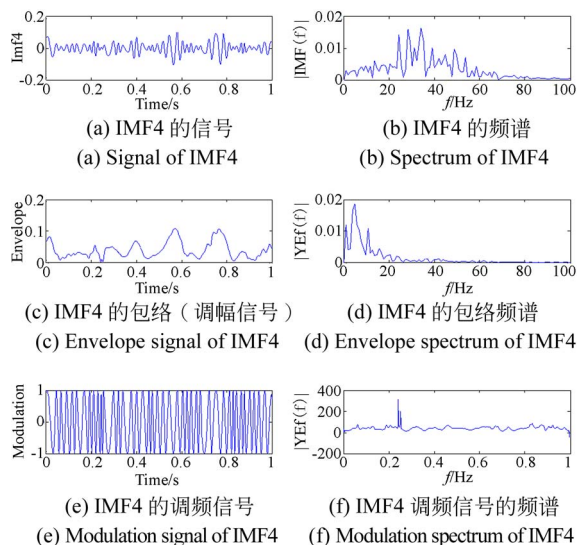


图 5 含 0.648×10^{-6} 压力信号 IMF4 的包络解调
Fig. 5 Envelope demodulation with 0.648×10^{-6} pressure signal IMF4

信号所调制的结果。经过包络解调后,由图 5(d)可见,经过 Hilbert 解调后的包络信号的中心频率为 4.883 Hz;由图 5(e)调制信号疏密相间的特点表明它是一个调频信号,由其瞬时频率图 5(f)可见,其瞬时频率的均值为 40.999 4 Hz,调制信号在 0.241 s 时刻瞬时频率的幅值较大,表明在此时刻出现较大的调制频率对信号

进行调制的特征。

由图 6(c),图 6(e)可见含 0.971×10^{-6} 颗粒浓度的油液脉动流压力信号的 IMF4 分量同样具有调频、调幅调制特征,由图 6(b)IMF4 分量的频谱可见其频率带宽在 $0 \sim 95$ Hz 范围内,最大幅值对应的频率为 47.85 Hz,其次在主频的两侧分布有相差 2.93 Hz 以及 7.81 Hz 的倍频 35.16 Hz, 38.09 Hz, 41.99 Hz, 43.95 Hz 和 60.55 Hz,可见 IMF4 分量的信号是在主频为 47.85 Hz 的信号被中心频率为 2.93 Hz 的信号所调制的结果。经过包络解调后,由图 6(d)可见,经过 Hilbert 解调后的包络信号的中心频率为 2.93 Hz;由图 6(e)调制信号疏密相间的特点表明它是一个调频信号,由其瞬时频率图 6(f)可见,其瞬时频率的均值为 41.925 9 Hz,调制信号在 0.193 s, 0.421 s, 0.519 s, 0.67 s 和 0.764 s 等时刻瞬时频率的幅值出现峰值,表明在这些时刻出现较大的调制频率对信号进行调制的特征。

由图 7(c),图 7(e)可见含 3.00×10^{-6} 颗粒浓度的油液脉动流压力信号的 IMF4 分量具有调频、调幅调制特征,由图 7(b)IMF4 分量的频谱可见其频率带宽在 $0 \sim 95$ Hz 范围内,最大幅值对应的频率为 32.23 Hz,其次在主频的两侧分布有相差 1.953 Hz 以及 4.883 Hz 的倍频 23.44 Hz, 26.37 Hz, 29.3 Hz, 37.11 Hz 和 39.06 Hz,可见

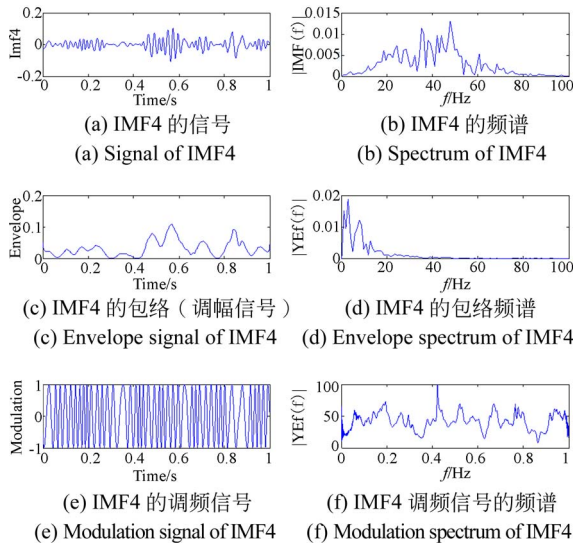


图 6 含 0.971×10^{-6} 压力信号 IMF4 的包络解调
Fig. 6 Envelope demodulation with 0.971×10^{-6} pressure signal IMF4

IMF4 分量的信号是被中心频率为 1.953 Hz 和 4.883 Hz 的信号所调制的结果。经过包络解调后,由图 7(d)可见,经过 Hilbert 解调后的包络信号的中心频率为 1.953 Hz, 4.883 Hz;图 7(e),图 7(f)可见调制信号疏密相间的特点,其瞬时频率的均值为 42.752 1 Hz,调制信号在 0.148 s 和 0.688 s 等时刻瞬时频率的幅值出现峰值,表明在这些时刻出现较大的调制频率对信号进行调制的特征。

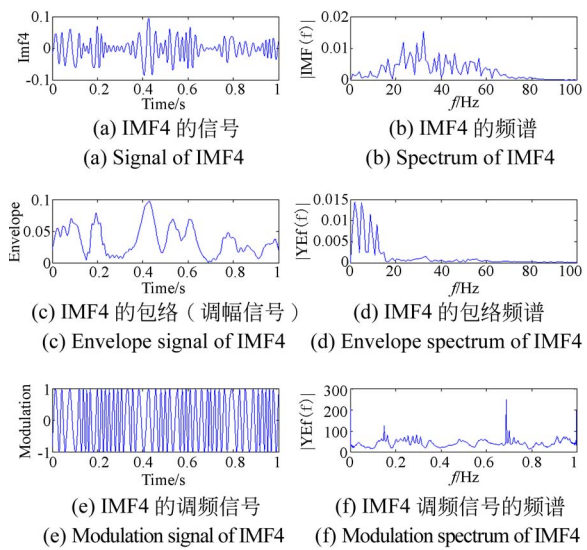
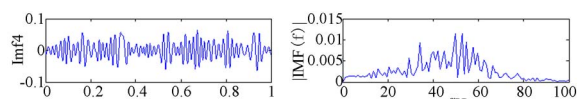


图 7 含 3.00×10^{-6} 压力信号 IMF4 的包络解调
Fig. 7 Envelope demodulation with 3.00×10^{-6} pressure signal IMF4

由图 8(c),图 8(e)可见含 4.57×10^{-6} 颗粒浓度的油液脉动流压力信号的 IMF4 分量具有调频、调幅调制特征,由图 8(b)IMF4 分量的频谱可见其频率带宽在 $0 \sim 95$ Hz 范围内,最大幅值对应的频率为 49.8 Hz,其次在主频的两侧分布有相差 4.883 Hz 的倍频 34.18 Hz, 40.04 Hz, 44.92 Hz, 52.73 Hz 和 54.69 Hz 等,可见 IMF4 分量的信号是被中心频率为 4.883 Hz 的信号所调制的结果。经过包络解调后,由图 8(d)可见,经过 Hilbert 解调后的包络信号的中心频率为 4.883 Hz;图 8(e), (f)可见调制信号疏密相间的特点,其瞬时频率的均值为 49.941 2 Hz,调制信号在 0.378s 时刻瞬时频率的幅值出现峰值,表明在此时刻出现较大的调制频率对信号进行调制的特征。



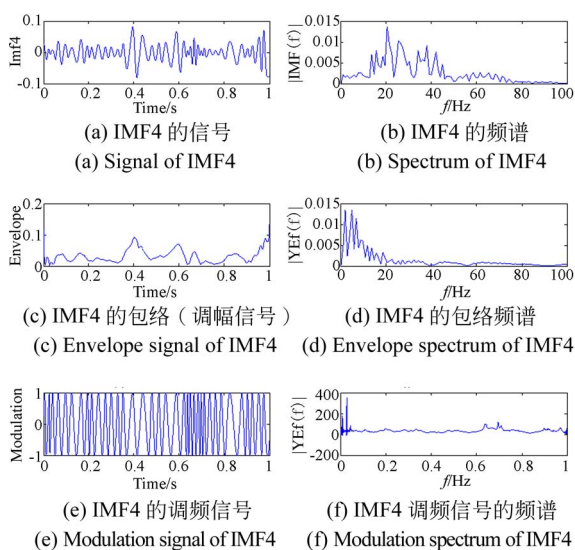


图 9 含 14.40×10^{-6} 压力信号 IMF4 的包络解调
Fig. 9 Envelope demodulation with 14.40×10^{-6} pressure signal IMF4

由图 9(c), 图 9(e) 可见含 14.40×10^{-6} 颗粒浓度的油液脉动流压力信号的 IMF4 分量具有调频、调幅调制特征, 由图 9(b) IMF4 分量的频谱可见其频率带宽在 $0 \sim 100$ Hz 范围内, 最大幅值对应的频率为 20.51 Hz, 其次在主频的两侧分布有相差 1.953 Hz 和 4.883 Hz 的倍频 13.67 Hz, 15.63 Hz, 25.39 Hz, 34.18 Hz 和 38.09 Hz 等, 可见 IMF4 分量的信号是被中心频率为 1.953 Hz 和 4.883 Hz 的信号所调制的结果。经过包络解调后, 由图 9(d) 可见, 经过 Hilbert 解调后的包络信号的中心频率为 1.953 Hz 和 4.883 Hz; 图 9(e), 图 9(f) 可见调制信号疏密相间的特点, 其瞬时频率的均值为 35.907 3 Hz, 调制信号在 0.027 s 和 0.695 s 时刻瞬时频率的幅值出现峰值, 表明在这些时刻出现较大的调制频率对信号进行调制的特征。

由图 10(c), 图 10(e) 可见含 28.50×10^{-6} 颗粒浓度的油液脉动流压力信号的 IMF4 分量具有调频、调幅调制特征, 由图 10(b) IMF4 分量的频谱可见其频率带宽在 $0 \sim 80$ Hz 范围内, 最大幅值对应的频率为 32.23 Hz, 其次在主频的两侧分布有相差 1.953 Hz, 4.883 Hz 以及 8.789 Hz 的倍频 22.46, 26.37, 29.3, 39.06 和 41.99 Hz,

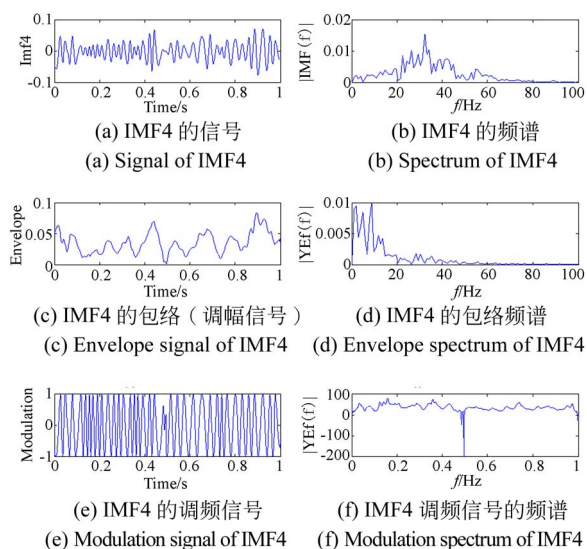


图 10 含 28.50×10^{-6} 压力信号 IMF4 的包络解调
Fig. 10 Envelope demodulation with 28.50×10^{-6} pressure signal IMF4

可见 IMF4 分量的信号是被中心频率为 1.953, 4.883 以及 8.789 Hz 的信号所调制的结果。经过包络解调后, 由图 10(d) 可见, 经过 Hilbert 解调后的包络信号的中心频率为 1.953, 4.883 以及 8.789 Hz; 图 10(e), 图 10(f) 可见调制信号疏密相间的特点, 其瞬时频率的均值为 34.993 8 Hz, 调制信号在 0.495 s 时刻瞬时频率的幅值出现峰值, 表明在此时刻出现较大的调制频率对信号进行调制的特征。

由图 5~图 10 可见压力信号经过 Hilbert 变换的包络解调后的载波信号明显表现出调频特征; 随着油液中颗粒浓度的增加, 压力信号经过 EMD 分解后的第 4 阶 IMF 分量的 Hilbert 包络解调后, 解调信号的瞬时频率均值呈先增加后下降的发展趋势。这是由于油液中颗粒的存在会增强近壁区的湍流猝发行为, 从而使油液脉动流的高频率区的成分增加; 当油液中颗粒浓度增加到一定含量时, 颗粒对油液的壁面附近的湍流拟序结构进行破坏, 进而抑制了湍流拟序结构的发展, 因而造成颗粒浓度增加解调信号的瞬时频率均值反而下降的现象。

4 结 论

压力信号分解的前几阶 IMF 分量具有明显的调幅和调频两种特征,且具有对时间轴是对称分布的特点,振动幅值随着分解的 IMF 分量的阶数增加而逐渐降低;随着颗粒浓度的增加,油液脉动流的压力信号的各阶 IMF 分量随时间的变化逐渐由高频段的调制特征向低频段内发展。

随着颗粒浓度的增加,压力信号边际谱的高频率区的累积分布在 0.7 内,在中频率区出现下降、低频率区呈现上升的态势;随着油液中颗粒浓

度的增加,高频率区的边际谱平均幅值呈现先增加后降低的发展趋势,中低频率成分的幅值呈增加的趋势。

随着颗粒浓度的增加,压力信号的各阶 IMF 分量的欧氏距离越来越小,它们的总能量出现下降趋势,高频率区的能量特征值基本上变化不大,中频率区的能量特征值呈逐渐衰减的变化趋势,低频率区基本上有上升的趋势。

随着油液中颗粒浓度的增加,压力信号经过 Hilbert 变换的包络解调后的载波信号明显表现出调频特征, Hilbert 包络解调信号的瞬时频率均值呈先增加后下降的发展趋势。

参考文献:

- [1] PAN Y, BANERJEE S. Numerical simulation of particle interactions with wall turbulence[J]. *Physics of Fluids*, 1996, 8(10): 2733-2755.
- [2] CROWE C T, GORE R A, TROUTT T R. Particle dispersion by coherent structures in free shear flows [J]. *Particulate Science & Technology*, 1985, 3(3): 149-158.
- [3] HELLEST A S, GHAFARI M, BALAKIN B V, et al. A parametric study of cohesive particle agglomeration in a shear flow. Numerical simulations by the discrete element method[J]. *Journal of Dispersion Science & technology*, 2016, 38(5): 611-620.
- [4] DRITSELIS C D, VLACHOS N S. Numerical study of educed coherent structures in the near-wall region of a particle-laden channel flow [J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(5): 69.
- [5] BIZHAEM H K, TABRIZI H B. Investigating effect of pulsed flow on hydrodynamics of gas-solid fluidized bed using two-fluid model simulation and experiment [J]. *Powder Technology*, 2017, 237(3): 14-23.
- [6] M RASHIDI, G HETSRONI, S BANERJEE. Particle turbulence interaction in a boundary layer [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1990, 16(6): 935-949.
- [8] HUSSAIN A K M F, REYNOLDS W C. The mechanics of an organised wave in a turbulent shear flow [J]. *J. Fluid Mech*, 1972, 54(5): 263-288.
- [9] AHRENS C, RONNEBERGER D. Luftschall dämpfung in turbulent durchstromten schallharten Rohren bei verschiedenen Wandrauigkeiten [J]. *Acoustica*, 1971, (25): 150-157.
- [10] RONNEBERGER D, AHERENS C D. Wall shear stress caused by small amplitude perturbations of turbulent boundary-layer flows: an experimental investigation [J]. *J. Fluid. Mech*, 1977, 83 (3): 433-464.
- [11] GERRARD J H. An experimental investigation of pulsating turbulent water flow in a tube [J]. *J. Fluid Mech*, 2006, 46 (1): 43-64.
- [12] RAMAPRIAN B R, TU S W. An experimental study of oscillatory pipe flow at transitional Reynolds numbers [J]. *J. Fluid Mech*, 2006, 100 (3): 513-544.
- [13] TU S W, RAMAPRIAN B R. Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 1. Main experimental results and comparison with predictions [J]. *J. Fluid Mech*, 2006, 137(137): 31-58.
- [14] TARDU S, BINDER G, BLACKWELDER R F. Turbulent channel flow with largeamplitude velocity oscillations [J]. *J. Fluid Mech*, 2006, 267 (267): 109-151.
- [15] TARDU S F, BINDER G. Wall shear stress mod-

- ulation in unsteady turbulent channel flow with high imposed frequencies[J]. *Phys. Fluids A*, 2002,5(2):2028-2037.
- [16] BINDER G, TARДУ J, VEZIN P. Cyclic modulation of Reynolds stresses and length scales in pulsed turbulent channel flow[J]. *Proc Roy. Soc. London Ser. A*, 1995,451(1941):121-139.
- [17] TARДУ S, BINDER G. Reaction of bursting to an oscillating homogeneous pressure gradient[J]. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 1997,16(1):89-120.
- [18] TARДУ S F, COSTA P D. Experiments and modelling of an unsteady turbulent channel flow [J]. *AIAA J*, 2005,43(43):140-148.
- [19] 徐斌,温广瑞,苏宇,等.多层次信息融合在铁谱图像磨粒识别中的应用[J]. *光学精密工程*, 2018,26(6):1551-1560.
- XU B, WEN G R, SU Y, *et al.*. Application of multi-level information fusion for wear particle recognition of ferrographic images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018,26(6):1551-1560. (in Chinese)
- [20] 田昊. 液压油路气液两相传质的光学测量[J]. *光学精密工程*, 2018,26(12):2902-2908.
- TIAM H. Optical measurement of mass transfer between gas and liquid phases in hydraulic circuits [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12):2902-2908. (in Chinese)
- [21] HUANG N E, CHEN X, LO M, *et al.*. On hilbert spectral representation: a true time-frequency representation for nonlinear and nonstationary data [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2011, 3(01):63-93.
- [22] 刘铮,毛宏霞,戴聪明,等.基于多源数据多特征融合的弱小目标关联研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(5): 526001-0526001.
- LIU Z, MAO H X, DAI C M, *et al.*. Heterogeneous sensors faint targets data association based on multi-feature fusion[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 526001-0526001. (in Chinese)
- [23] 董红生,张爱华,邱天爽,等.基于 Hilbert 谱的心率变异信号时频分析方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011,32(2):271-278.
- DONG H SH, ZHANG A H, QIU T SH, *et al.*. Time frequency analysis method of heart rate variability signal based on the Hilbert spectrum[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011,32(2):271-278. (in Chinese)
- [24] BIN S, HONGJIAN Z, LU C, *et al.*. Flow regime identification of gas-liquid two-phase flow based on HHT [J]. *Chinese J. Chem. Eng.*, 2006, 14(1): 24-30.
- [25] 周云龙,张学清,张松林.基于希尔伯特-黄变换和隐马尔可夫模型的气液两相流流型识别方法[J]. *仪器仪表学报*, 2009,30(7):1512-1517.
- ZHOU Y L, ZHANG X Q, ZHANG S L. Applied study on flow regime identification of gas-liquid two-phase flow based on Hilbert-Huang transform and HMM[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009,30(7):1512-1517. (in Chinese)
- [26] 徐平平,柳靖,马飞,等.自振射流喷嘴腔内压力信号分析方法的研究[J]. *振动与冲击*, 2015,34(17):180-184.
- XU P P, LIU J, MA F, *et al.*. Analysis methods for flow pressure signals in oscillation cavity of a self-resonating jet nozzle[J]. *Journal vibration and shock*, 2015,34(17):180-184. (in Chinese)
- [27] 瞿伟廉,刘少兵,王锦文,等.弧形闸门流激振动脉动压力 HHT 分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2006,28(9):68-71.
- QU W L, LIU S B, WANG J W, *et al.*. HHT Analysis of Stochastic Fluctuant Pressure for Flow-induced Vibration in Radial Gate[J]. *Journal of wuhan university of technology*, 2006,28(9):68-71. (in Chinese)
- [28] LU P, LI W, ZHENG X, *et al.*. Experimental research and HHT analysis on the flow characteristics of pneumatic conveying under high pressure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016,108: 502-507.
- [29] 赵凯,仲兆平,王肖祎,等.基于 HHT 法的流化床内生物质和石英砂双组分颗粒压差脉动信号分析[J]. *化工学报*, 2015,66(04):1282-1289.
- ZHAO K, ZHONG ZH P, WANG X Y, *et al.*. Pressure fluctuation signal analysis of two-component biomass and quartz sand particles based on Hilbert-Huang transform in fluidized-bed [J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2015,66(4):

1282-1289. (in Chinese)

- [30] LI J, WANG H, LIU Z, *et al.*. An experimental study on turbulence modification in the near-wall

boundary layer of a dilute gas-particle channel flow [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 53(5): 1385-1403.

作者简介:



陈 彬(1972—),男,博士,教授,2007年于华中科技大学获得博士学位,主要研究方向为在线监测和信号处理技术研究。E-mail: hustchb@163.com



刘 阁(1973—),女,副教授,主要研究方向为传质分离技术研究。E-mail: lycy9945@163.com

(本栏目编辑:秦 思)