

基于局域波分解的循环射流混合槽内压力脉动信号时频特性分析

禹言芳 吴剑华 孟辉波*

(沈阳化工大学 能源与动力工程学院 辽宁省高效化工混合技术重点实验室, 沈阳 110142)

摘要: 为了探讨循环射流混合槽射流混合区内瞬态流动特性,在 $Re = 3660 \sim 32940$ 范围内利用动态数据采集系统对射流混合区内不同轴向、径向和周向位置的瞬态脉动压力进行了测量,并采用基于局域波分解的方法分析了循环射流混合槽内压力脉动信号的时频分布。研究表明:瞬态压力波动信号的波动能量分布随瞬时频率的提高明显降低;在 $\theta_m = \pi/6$ 和 $\pi/3$ 时,频率集中分布在为 $0 \sim 0.25$ Hz,而 $\theta_m = \pi/4$ 和 $\theta_m = 5\pi/12$ 时,瞬时波动频率主要分布在 $0 \sim 6$ Hz 和 $0 \sim 20$ Hz。低雷诺数下流体运动随机性频繁, $Re = 3660$ 时存在 32 Hz, 25 Hz, 7 Hz 和 5 Hz 等多个频率集中分布段,而 $Re = 18300$ 和 $Re = 25620$ 时频率范围为 $0 \sim 8$ Hz 和 $0 \sim 3$ Hz。随着测量位置 z/H 增加, $0 \sim 1$ Hz 内低频能量比例先减小然后增加再减少; $z/H = 0.85$ 时受到自由液面的影响,集中能量频率分布范围较其他轴向位置要广,且 $0 \sim 5$ Hz 低频能量比例减少。

关键词: 局域波分解; 循环射流混合槽; 压力波动信号; Wigner 分布; 频谱

中图分类号: TQ050.5

引言

循环射流混合槽(circulating jet tank, CJT)作为一种新型高效单元混合设备,与传统搅拌器相比可以有效改善混合槽内流动状况,在化工过程强化领域表现出卓越的性能^[1-2]。本课题组已对该混合槽内的稳态流场特性做了初步研究^[1-3],而对其内瞬态流场结构特性缺乏系统研究。考虑到瞬态压力波动信号(PFS)是工程湍流中一个重要的物理量^[4-5],它隐含着反应器内流体运动的动态信息,能够准确的反映混合器内部流场的重要的动力学特征^[6-7]。循环射流混合槽内部环境流体,在压力梯度下从竖直提升管的多层水平喷嘴处高速喷出,通过与其周围环境流体相互掺混、卷吸,形成循环剪切流运动。在多层水平射流与复合挡板的耦合作用下,流体微团的流动呈现很强的非线性,目前对循环射流混合槽内 PFS 的研究尚处于初步阶段,尤其是

混合槽射流混合区内流体的瞬态波动特性在时域的转变和划分还需要很好的掌握和认识。

作为分析时变非平稳信号的有力工具——时频分析,近年来受到越来越多的重视^[6,8-10]。联合时频分析法(TFD)提供时间域与频率域的联合分布信息,清楚地描述信号频率随时间变化的关系。信号处理中最基本和常用的方法是 Fourier 频域分析法,但 Fourier 变换是一种针对平稳信号(全域波)的全局变换方法,为此对传统快速 Fourier 变换(FFT)进行改进提出并发展了一系列适应非平稳信号分析的时频分析方法^[10-12]。短时 Fourier 变换(STFT)、小波变换(WT)、Wigner 分布等常规时频分析方法不同程度上对非平稳、非线性信号的时变性给予了恰当的描述,大大改进 FFT 分解的不足。但总体说来,仍属于全域波的范畴之内。基于局域波分解的时频分析方法能够达到对时变信号进行正确的描述,在机械振动、声发射、故障诊断和地震信号分析等方面得到初步应用^[13-16]。局域波分解是一种自适应时频分析方法,在抑制交叉项、保持分辨率和获得有意义的频率等方面都能达到理想效果。但未见相关文献利用局域波分解方法研究循环射流混合槽内 PFS 的 TFD 时频特性。

本文基于局域波分解法对循环射流混合槽内压力波动信号从时域和频域进行目标特征提取,对信号

收稿日期: 2012-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(21106086); 辽宁省高等学校优秀人才计划(LJQ2012035); 教育部科学技术研究重点项目(212030)

第一作者: 女, 1979 年生, 工学博士, 讲师

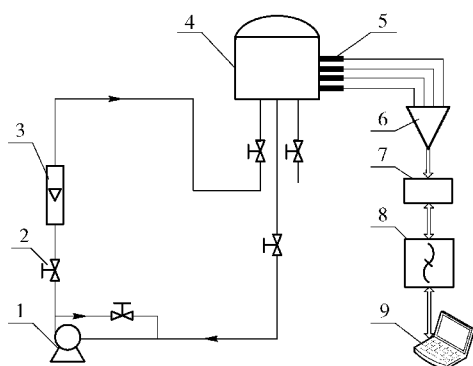
* 通讯联系人

E-mail: mhb_vip@163.com

进行频谱分析,并将其与相关流动特性进行关联进而揭示循环射流混合槽中流体瞬态流动变化的规律。

1 实验部分

循环射流混合槽内瞬态压力脉动时间序列测量装置如图 1 所示。流体在 Wilo MHI802 泵作用下从射流孔内高速喷出,不断卷吸周围流体实现湍流混合,通过不锈钢金属管浮子流量计(北星 LZD-50/Y10/RR1/ESK)控制循环流量。在线压力波动信号采集系统包括 4 支 CYG41000 高频动态压力传感器、电荷放大模块组成(包括相应的放大器和 12 位 AD 转换卡)、一台 TST-6200 动态信号采集器和计算机终端存储构成。每个通道可采集实验数据长度为 126000,采样速率最高可达 1 MHz,本实验设定采样频率为 1000 Hz。



1—离心泵; 2—止回阀; 3—金属转子流量计; 4—射流循环槽; 5—压力传感器; 6—信号放大器; 7—A/D 转换器; 8—数据存储器; 9—信号显示

图 1 瞬态压力波动信号测量实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for instantaneous PFS

为便于实验测量,坐标系选取直角坐标系。混合槽底部的几何中心为直角坐标原点,水平径向向右为 x 轴,垂直向上为 z 轴,右手法则确定 y 轴。忽略提升管上射流孔之间的流动阻力,射流孔处的湍流雷诺数定义为:

$$Re = 4\rho Q / (\pi d_j \mu N) \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; Q 为泵的流量 ($1 \sim 9 \text{ m}^3/\text{h}$), d_j 为射流喷嘴直径, m ; μ 为流体的粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; N 为喷嘴的个数。由泵的流量和结构参数可知雷诺数变化范围为 $3660 \leq Re \leq 32940$, 而当 $Re > 30$ 射流混合槽内流体流动属于湍流流动^[17]。为保证实验的精度,实验循环工质选用蒸馏水。为了准确细致的描绘混合槽内的压力波动分布,在不同轴向和周向

壁面处设置 20 个测量孔。在每个测量孔内调节传感器标尺可实现在径向距离 $r/R = 0.685 \sim 1.0$ 内均匀布置 10 个测量点,测量点的详细信息如图 2 所示。

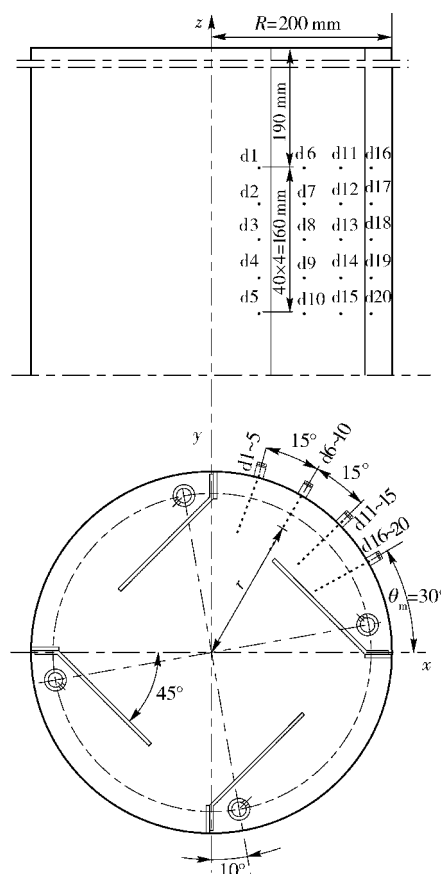


图 2 循环射流混合槽内瞬态压力波动测量点布置

Fig. 2 Location of measured points for PFS in CJT

2 基于局域波分解的压力脉动信号时频分析

基于局域波分解的时频分析方法是一种对频率变化范围能自适应分解的方法,一方面从局域波分解的基本物理意义出发,对每个局域波分解的压力波动内蕴模式函数(IMF)信号进行 Hilbert 变换,直接计算压力波动信号的 Hilbert 谱,求取压力波动剖面的瞬时频率属性;另一方面,对每个局域波分解的 IMF 实施 Wigner 时频分布,实现基于局域波分解的 Wigner 分布,该方法特别适用于含有频率线性变化的复杂信号的分析与处理^[11]。

图 3 对测量点 d18 在 $Re = 32940$ 和 $r/R = 0.86$ 时压力波动信号进行局域波分解,各阶内蕴模式函数 $c_1 \sim c_{11}$ 从上到下呈现压力波动从短周期到长周期,高频到低频的变化。由于 EMD 分解过程中没有

严格满足 IMF 的条件^[18-19], 不同的时间序列包含的特征成分不一定相同, 所以分解得到的内蕴模式函数数量是有限的而且可能不一样, 图 3 所示 IMF 数量为 11。

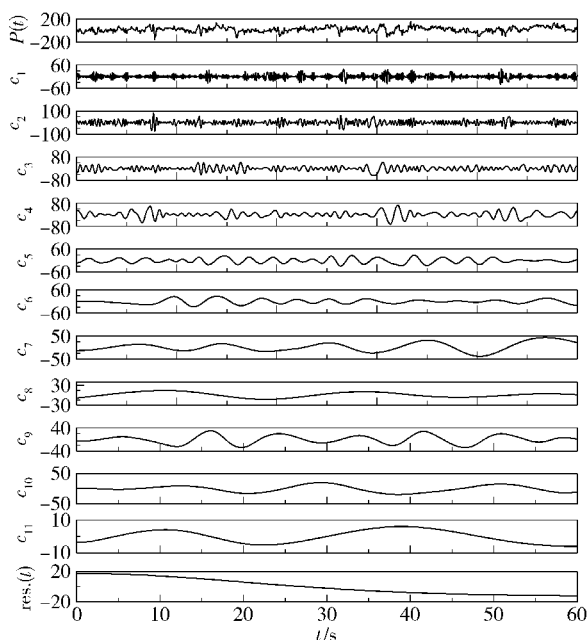


图3 EMD 分解的压力波动 IMF 信号

Fig. 3 The IMF of the PFS by EMD

2.1 基于局域波分解的 Hilbert 谱瞬时频率属性

2.1.1 Hilbert 变换时频谱

由 EMD 分解法可以得到:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n c_i(t) + \text{res.}(t) \quad (2)$$

式中: $P(t)$ 为原信号, $c_i(t)$ 为内蕴模式函数分量, $\text{res.}(t)$ 表示趋势项。对每个内蕴模式函数分量进行希尔伯特变换, 可得 $c_i(t)$ 对应的解析函数 $z_i(t)$:

$$z_i(t) = a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (3)$$

其幅度与频率都是时变的, $P(t)$ 是各个解析信号叠加的实部, 即: $P(t) = P\mathcal{E} \left\{ \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \right\}$ 。式中 P 为柯西主值; \mathcal{E} 表示复函数实部。若

$P(t)$ 用傅里叶级数展开, 有 $P(t) = P\mathcal{E} \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} a_i e^{j\omega_i t} \right\}$, 式中 a_i 和 w_i 均为常数。从信号分解的基函数理论角度来说, 局域波分解法的基函数是依赖于信号本身的, 具有自适应特性。因此, 不同信号分解后的基函数是不同的, 故可得到很好的分解效果。

对图 3 的 PFS 进行 Hilbert 谱分析, 如图 4 所示, 从图中可以看出能量在低频区域分布相对集中,

这也表明低频大尺度漩涡是射流混合区流动特性的控制分量, 它们大小决定混合器内的运动特征。图中的频率与 Fourier 变换的频率有着完全不同的意义: 在 Fourier 分析中, 频率处的能量存在意味着一个正弦或余弦波分量持续于数据的时间长度; 而 Hilbert 谱中, 频率处的能量存在意味着数据的全时长, 像一个局部出现的波。Hilbert 谱是一个加权的非归一化的联合时-频幅值谱, 分配给每个时-频点处的权重是一个局部幅值。为了更加清楚地观察压力信号的时间-频率分布, 下面仅取频率在 50 Hz 以内的 Hilbert 谱分析。

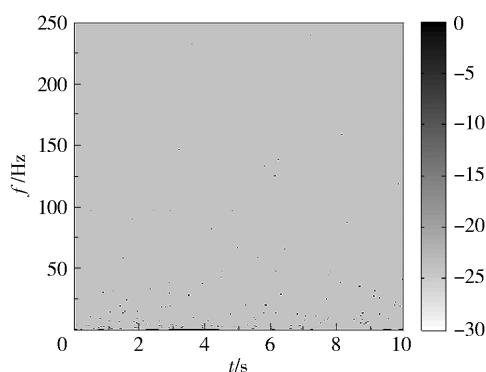


图4 压力波动时间序列的 Hilbert 谱

Fig. 4 Hilbert spectrum of the time series of the pressure fluctuation at d18

2.1.2 基于局域波分解与 Hilbert 变换的压力波动时间序列瞬时频率属性

图 5(a) 是对图 3 所示的压力波动时间序列直接进行 Hilbert 变换计算的第 1 个内蕴模式分量 c_1 瞬时频率, 图 5(b) ~ (d) 分别是第 3, 4 和 8 个内蕴模式分量 c_3 , c_4 和 c_8 对应的瞬时频率。由图 5(a) 可以看出压力波动的频谱主要集中在 20 ~ 50 Hz, 而由图 5(c) 所示的 Hilbert 谱可以得出能量主要分布在 10 Hz 以下的频带。由局域波分解剖面求得的瞬时频率, 其物理意义更明确, 对于多叠加信号避免没有意义的负频率出现。

2.2 基于局域波分解的 Wigner 分布

基于局域波分解的 Wigner 分布 (简称为 LWD), 其基本原理是利用局域波分解法将其分解成有限个内蕴模式函数分量, 然后计算每个内蕴模式函数分量 Wigner 分布, 最后将它们相加起来。对于有多分量叠加的信号, 其 Wigner 分布与两分量之间存在交叉项。交叉项的存在严重干扰对 Wigner 分布的解释, 甚至使其变得毫无意义。为了研究局域波分解的必要性, 以复合高斯信号为例。图 6(a)

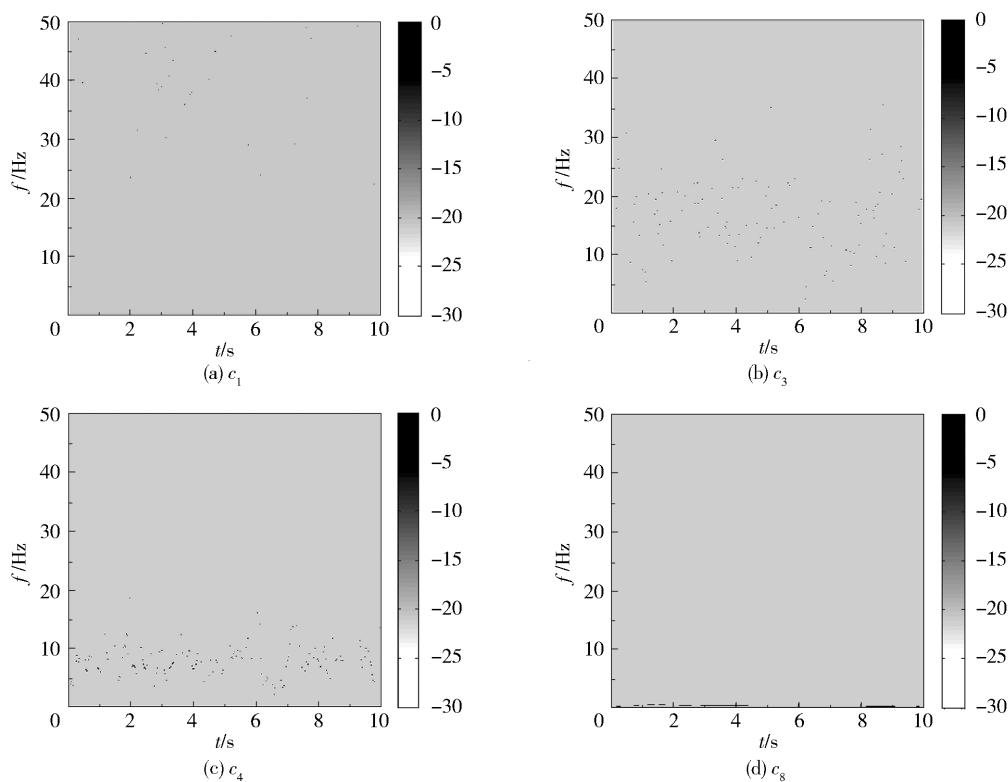
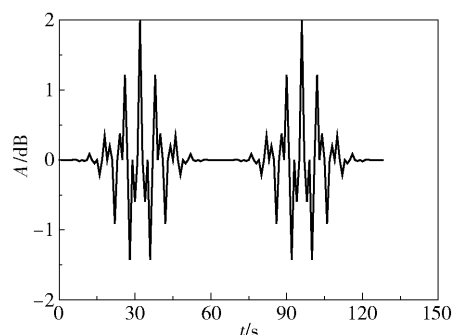


图5 不同瞬时压力波动信号分量的 Hilbert 谱

Fig.5 Hilbert spectra of the different component profiles of PFS

为包含四个高斯分量的信号的时域分布。图 6(b) 是对模拟信号时频能量分布直接应用 Wigner 图表示,从图中可以看出交叉项非常严重,而图 6(c) 描述了模拟信号经局域波分解后得到的 Wigner 分布,可以看出明显减少了交叉项。可见,基于局域波分解的 Wigner 分析是有效的,可以替代时频分析中相应的处理程序,取得较好的结果。

由图 7 可以看出,不同的周向位置信号能量集中分布在不同频率段。由于测点 $\theta_m = \pi/6$ 位于射流喷嘴附近,位于射流主体区,流体流速和压力相对稳定,此时主要是大尺度涡占主要地位,从图中可以看出能量主要分布在 $0 \sim 0.15$ Hz 内。当 $\theta_m = \pi/4$ 时流体位于射流轴线附近,此时流体与环境流体的能量交换相对频繁,由于涡的彼此拉伸机制,使大尺度涡变为略小,此时能量集中分布在 $0 \sim 6$ Hz 内。而 $\theta_m = \pi/3$ 时,主要是由于受到挡板回流的影响,能量在 $0 \sim 0.25$ Hz 范围集中分布。当 $\theta_m = 5\pi/12$ 时由于射流能量沿程衰减和壁面回流的影响,在 $0 \sim 20$ Hz 内能量分布集中,且在相应的频率段内能量成分明显,能量集中在低、中频处,高频较少。所以通过对压力脉动信号的局域波时频分析,根据其能量分布的不同有效地识别混合槽内流体流动状况。



(a) 高斯信号

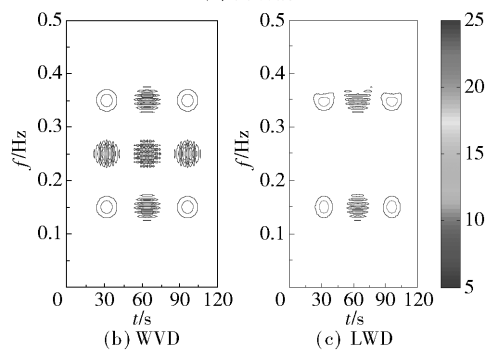


图6 高斯信号局域波分解前后的 Wigner 分布比较

Fig.6 Comparison between the LWD and WVD of the Gauss signal

从图 8 可以看出当雷诺数较小时 ($Re = 3660$),

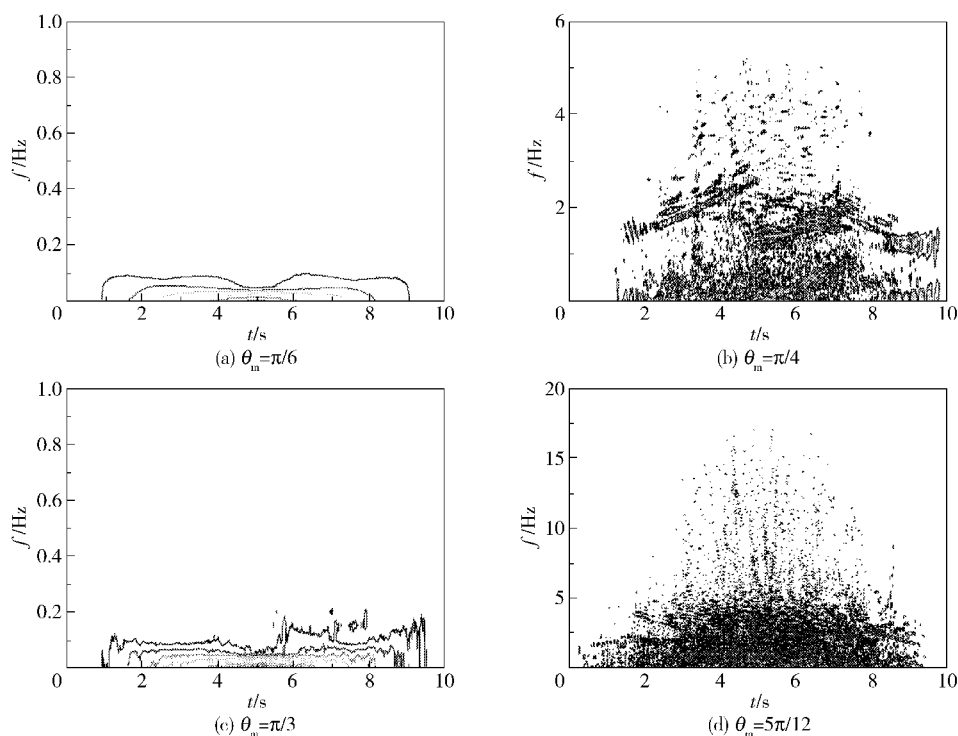


图 7 不同周向位置瞬时压力波动序列的 LWD 分析

Fig. 7 Time-frequency distributions of PFS given by the LWD method at different circumferential positions

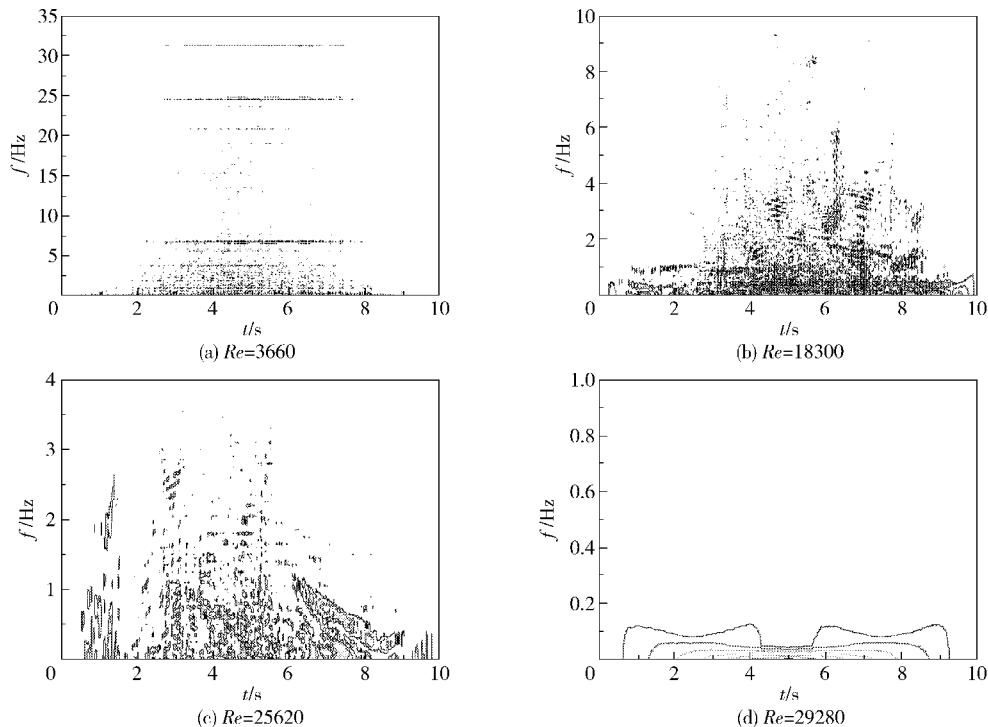


图 8 不同雷诺数下压力波动信号频谱分布

Fig. 8 Frequency spectrum distributions of PFS for different Re values

集中能量频率分布于 0 ~ 35 Hz, 且存在 32 Hz, 25 Hz, 7 Hz 和 5 Hz 以下能量集中分布频率段, 说明低雷诺数下, 混合槽内流体运动随机性频繁, 存在不同尺度

的涡运动。随着雷诺数的增加集中能量分布越来越趋于低频区域, 如 $Re = 18300$ 时存在集中能量分布频率带 0 ~ 8 Hz, $Re = 25620$ 时在 0 ~ 3 Hz 能量集中

分布。说明随着雷诺数的增加,射流混合区内的高速射流流体和周围环境低速流体的卷吸、掺混程度提高,小尺度流体微团振荡产生的涡运动向大尺度漩涡运动转变,导致了压力波动能量主要集中在低频,使系统向稳定状态发展。

图 9 表示轴向位置不同时压力脉动的时频分布,由图可以看出随着 z/H 的增加,0 ~ 1 Hz 低频能

量比例先减小然后增加再减少。说明在轴向高度下流体流动相对复杂,混合槽内沿轴向高度布置多个喷嘴,多股射流流体相互卷吸和干扰使不同能量段的不同尺度的流体相互转换。在 $z/H=0.85$ 处混合槽内流体流动由于受到自由液面的影响,能量集中的频率分布范围较其它轴向位置要广,且 0 ~ 5 Hz 低频能量比例相对减少。

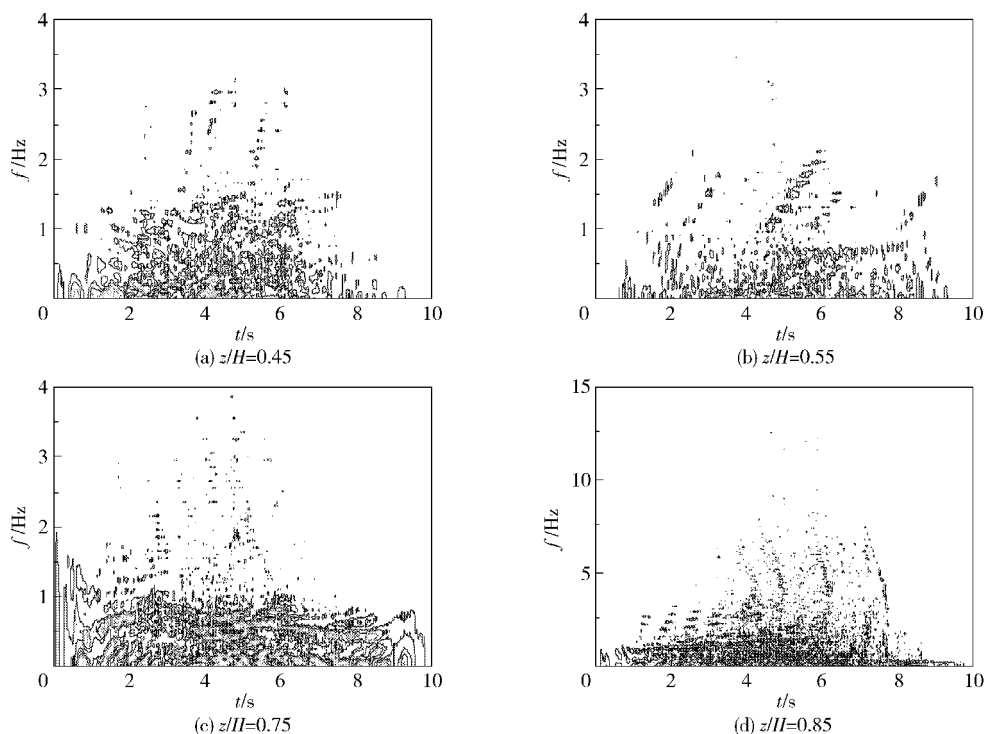


图 9 压力波动信号频谱的轴向分布

Fig. 9 Frequency spectrum distributions of PFS for different z/H values

2.3 提升管结构对 PFS 的影响

在射流循环混合过程中,提升管上的喷嘴尺寸结构的选取对混合效率的影响较大。图 10 表示不同喷嘴结构下时间序列的波动强度分布。从图中可以看出, $d_j/R=0.015$ 时波动强度先随着进口流量的增大明显提高,这是因为小流量下小尺度喷嘴射出的高速流体有效地与周围流体掺混,而大流量时大尺度周向漩涡的存在很大程度减低了混合效果。而 $d_j/R=0.025$ 时波动强度随着进口流量即输入能量的增大明显提高,此条件下形成的射流的半扩展厚度增大,致使可卷吸周围流体的表面积增大,加剧界面更新频率。但 d_j/R 过大时,多层射流出口速率小,界面更新效果差,观察实时流型发现此时主要表现为直径尺度的周向漩涡。

2.4 一阶压力主频分布

图 11 描述压力脉动特征频率(一阶主频 f_s^1)空

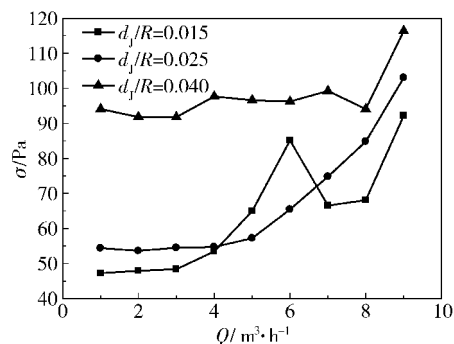


图 10 不同喷嘴尺寸下压力波动强度分布

Fig. 10 Standard deviation distributions of PFS for different d_j/R values

间分布规律,从图中可以看出,给定雷诺数下 ($Re=32940$) 不同监测面上特征频率最大值不同,且出现在不同的径向位置处。从图中可以看出,在 $\theta_m \leq \pi/4$ 时随着 r/R 的增加 f_s^1 先线性增加然后减小再增加

然后再减小最后增加,最大值 $f_{s_{\max}}^1$ 位于 $r/R = 0.755$ 和 $r/R = 0.825$ 处,数值为0.35 Hz和0.86 Hz。最小值 $f_{s_{\min}}^1$ 均在 $r/R = 0.93$ 处。当 $\theta_m \geq \pi/3$ 时,随着 r/R 的增加 f_s^1 先线性减小然后增加再减小然后再增加最后减小,但是波动幅值要大, f_s^1 在0.13 Hz ~ 1.55 Hz之间变化。最小值 $f_{s_{\min}}^1$ 均在 $r/R = 0.755$ 处,数值分别为0.21 Hz和0.12 Hz。这些充分说明径向位置上存在不同尺度的兰金涡。

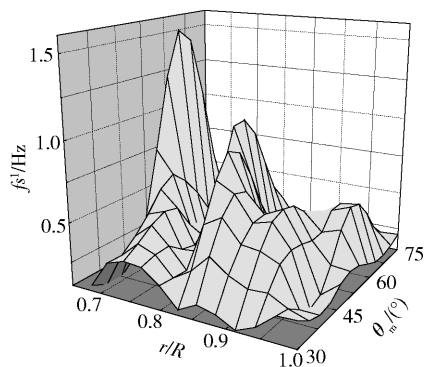


图11 压力波动信号一阶主频分布

Fig. 11 The first order intrinsic frequency of PFS

3 结论

(1) 混合槽内压力波动信号在相应的频率段内能量成分明显,能量集中分布在低频区域。不同的周向测量点位置信号能量集中分布的频率段不同,在 $\theta_m = \pi/6$ 和 $\pi/3$ 时,能量主要分布在0 ~ 0.25 Hz范围,而 $\theta_m = \pi/4$ 时,能量集中分布在0 ~ 6 Hz内;在 $\theta_m = 5\pi/12$ 时,能量在0 ~ 20 Hz内集中分布。

(2) 随着雷诺数的增加能量越来越集中分布在低频区域, $Re = 3660$ 时能量集中分布0 ~ 35 Hz范围,且存在32 Hz, 25 Hz, 7 Hz和5 Hz以下能量集中频率段。而 $Re = 18300$ 和 $Re = 25620$ 时集中能量分别分布于0 ~ 8 Hz, 0 ~ 3 Hz。

(3) 混合槽内不同轴向高度流体流动相对复杂,随着 z/H 的增加,0 ~ 1 Hz低频能量比例先减小然后增加最后再减少。在 $z/H = 0.85$ 处流体流动由于受到自由液面的影响,能量分布范围较其它轴向位置要广,0 ~ 5 Hz低频能量比例减少。

参考文献:

- [1] Yu Y F, Wu J H, Meng H B. Numerical simulation process aspects of the novel static circulating jet mixer [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2011, 89(3): 460-468.
- [2] 禹言芳, 吴剑华, 孟辉波. 新型循环射流混合器湍流特性分析[J]. 过程工程学报, 2011, 11(1): 1-8.
Yu Y F, Wu J H, Meng H B. Turbulent characteristics of a novel circulating jet mixer [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] Yu Y F, Liu X R, Wu J H, et al. Comparison among turbulence models for a novel static circulating jet mixer [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 26-28: 382-385.
- [4] Zhang W H, Li X G. Origin of pressure fluctuations in an internal-loop airlift reactor and its application in flow regime detection [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(5): 1009-1018.
- [5] Ghasemi F, Ommen J R V, Sahimi M. Analysis of pressure fluctuations in fluidized beds. I. Similarities with turbulent flow [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(12): 2627-2636.
- [6] 高建强, 姜华伟, 夏豹, 等. 鼓泡流化床风帽压力信号的频谱分析[J]. 动力工程学报, 2011, 31(5): 336-341.
Gao J Q, Jiang H W, Xia B, et al. Frequency spectrum analysis on pressure signals of wind caps in a bubbling fluidized bed [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(5): 336-341. (in Chinese)
- [7] 段锋, 黄亚继, 李斌, 等. 基于小波模极大值的湍流态化流型转变特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 71-75.
Duan F, Huang Y J, Li B, et al. Flow pattern transition characteristic study of turbulent fluidization based on wavelet modulus maxima method [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(26): 71-75. (in Chinese)
- [8] 张建伟, 伍沅, 舒安庆, 等. 浸没循环撞击流反应器的压力脉动特性[J]. 化工学报, 2005, 56(2): 266-269.
Zhang J W, Wu Y, Shu A Q, et al. Characteristics of pressure fluctuation in submerged circulative impinging stream reactor [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2005, 56(2): 266-269. (in Chinese)
- [9] 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Dai G C, Chen M H. Chemical fluid mechanics [M]. 2nd Ed. Beijing: Chemistry Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [10] Ronald N B. The Fourier transform and its applications [M]. 3rd Ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [11] 葛哲学, 陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.

- Ge Z X, Chen Z S. Time frequency analysis and application using Matlab [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2006. (in Chinese)
- [12] Qian S, Chen D. Joint time-frequency analysis: Method and application [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [13] 马孝江, 王凤利, 蔡悦, 等. 局域波时频分布在转子系统早期故障诊断中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 161-164, 168.
- Ma X J, Wang F L, Cai Y, et al. Application of local wave time-frequency distribution to early faults diagnosis of rotor system [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 161-164, 168. (in Chinese)
- [14] 王凤利, 赵德有. 基于提升小波和局域波的故障特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 789-793.
- Wang F L, Zhao D Y. Fault feature extraction based on lifting wavelet and local wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 789-793. (in Chinese)
- [15] 栗然, 陆凤怡, 徐宏锐, 等. 基于局域波与近似熵的负荷分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 51-58.
- Li R, Lu F Y, Xu H R, et al. Novel approach for load analysis based on local wave and approximate entropy [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 51-58. (in Chinese)
- [16] Lin L, Zhao D Y. Local wave applied to detect and characterize acoustic emission signals [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(6): 669-677.
- [17] 刘沛清. 自由紊动射流理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- Liu P Q. The theory of turbulent free jets [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008. (in Chinese)
- [18] Meng H B, Liu Z Q, Yu Y F, et al. Intrinsic mode entropy analysis of tube-wall pressure fluctuation signals in the Kenics Static Mixer [J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2011, 9(A70): 1-19.
- [19] Meng H B, Liu Z Q, Yu Y F, et al. Time-frequency analysis of Hilbert spectrum of pressure fluctuation time series in Kenics Static Mixer based on empirical mode decomposition [J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(1): 167-182.

Analysis of the time-frequency attributes of pressure fluctuation signals in a circulating jet tank based on local wave decomposition

YU YanFang WU JianHua MENG HuiBo

(Liaoning Key Laboratory of Chemical Technology for Efficient Mixing, School of Energy and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang Liaoning 110142, China)

Abstract: In order to investigate the instantaneous flow characteristics in the jet mixing zones of a circulating jet tank (CJT), a dynamic data acquisition system was employed to measure the instantaneous pressure fluctuation signals (PFS) in the Reynolds number (Re) range 3660-32940, at different axial, radial and circumferential positions. Frequency spectra were evaluated based on the local wave decomposition. The fluctuation energy distribution of instantaneous PFS was found to decrease markedly with increasing instantaneous frequency. For positions $\theta_m = \pi/6$ and $\theta_m = \pi/3$ the energy distributions were in the range 0-0.25 Hz, while it was in the range 0-6 Hz and 0-20 Hz for $\theta_m = \pi/4$ and $\theta_m = 5\pi/12$, respectively. The degree of fluid irregularity increased at low values of Re . Four concentrated energy bands at 32 Hz, 25 Hz, 7 Hz and below 5 Hz existed for $Re = 3660$. However the energy was distributed in the range 0-8 Hz and 0-3 Hz for $Re = 18300$ and $Re = 25620$, respectively. With increasing values of z/H , the energy ratio in the range 0-1 Hz initially decreased, then increased and finally decreased again. The energy was distributed in a relatively wide frequency band affected by the free liquid for $z/H = 0.85$ and the energy ratio at low frequency (0-5 Hz) decreased.

Key words: local wave decomposing; circulating jet tank; pressure fluctuation signals; Wigner distribution; frequency spectrum