

基于改进小波阈值法的气液两相流特征提取及流型识别^①

陈立^{1,2}, 杜燕连^{1,2}, 彭甫森^{1,2}, 韩振华^{1,2}, 阮荣倩^{2,3}, 沈义俊^{2,3}

(1.海南大学信息与通信工程学院, 海南 海口 570100; 2.海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南 海口 570100; 3.海南大学海洋科学与工程学院, 海南 海口 570100)

摘要: 对垂直管道气力提升实验中采集的气液两相流的压力信号进行小波分析,通过改善信噪比确定最佳小波基函数。根据小波细节系数能量变化确定分解层数范围,采用熵权法结合信噪比、均方根误差以及平滑度确定最佳分解层数。对小波阈值去噪后的信号进行小波包分解,以分解后的第1、2频带能量占比以及熵值作为特征向量对气液两相流进行流型识别。389组压力信号的流型识别结果表明,提取特征向量结合随机子空间决策树模型可以对气液两相流流型进行高效识别分类,采用改进小波阈值法处理后的流型整体平均识别率达98.08%。

关键词: 海洋工程; 气力提升; 气液两相流; 小波分析; 熵权法; 阈值去噪; 流型识别

中图分类号: TD857; TP181

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.006

文章编号: 0253-6099(2025)03-0035-09

Feature Extraction and Flow Pattern Recognition of Gas-Liquid Two-Phase Flow Based on Improved Wavelet Thresholding

CHEN Li^{1,2}, DU Yanlian^{1,2}, PENG Fusen^{1,2}, HAN Zhenhua^{1,2}, RUAN Rongqian^{2,3}, SHEN Yijun^{2,3}

(1.School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570100, Hainan, China; 2.State Key Laboratory of South China Sea Marine Resources Utilization, Hainan University, Haikou 570100, Hainan, China; 3.School of Marine Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570100, Hainan, China)

Abstract: Wavelet analysis was performed for the collected pressure signals of gas-liquid two-phase flow in a vertical pipe in an air lift test. The optimal wavelet basis functions were determined by improving the signal-to-noise ratio (SNR). The range of decomposition levels was determined based on changes in energy of detail coefficients, and optimal decomposition levels were determined by the entropy weight method together with SNR, root mean square error and smoothness. After denoise with wavelet thresholding, three-level decomposition of signal was performed with the wavelet packet method, and then flow patterns were identified for gas-liquid two-phase flow with the energy ratio in the 1st and 2nd frequency bands and entropy values as feature vectors. The flow pattern recognition based on 389 sets of pressure signals shows that the extraction feature vector combined with random subspace decision tree can efficiently identify and classify gas-liquid two-phase flow patterns, and the overall mean recognition rate is up to 98.08% by adopting the improved wavelet thresholding.

Key words: marine engineering; air lift; gas-liquid two-phase flow; wavelet analysis; entropy weight method; thresholding; flow pattern recognition

气力提升系统广泛应用于海底矿物开采、海洋环境保护、海洋油气运输和海水淡化等领域^[1]。气力提

升过程中,受各相密度、表面张力和压力等影响,气液两相流易形成不同流型。流型的变化会显著影响流动

① 收稿日期: 2024-12-23

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2801504);海南省重大科技计划(ZDKJ2021027);国家自然科学基金联合基金(U22A20581);国家自然科学基金重点项目(52231012);海南大学研发创新计划[(KYQD(ZR)-20105]

作者简介: 陈立(2000—),男,江西九江人,硕士研究生,主要从事海洋信息感知与处理、算法设计及开发。E-mail:lichen01172001@163.com

通信作者: 沈义俊(1964—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为深海资源开发与装备。E-mail:sheny2000@hainanu.edu.cn

杜燕连(1985—),女,广西南宁人,博士,副教授,主要从事海洋信息感知与处理、多目标优化、海洋资源与能源的开发利用。E-mail:yldu@hainanu.edu.cn

阻力、压降特性、传热传质效率以及设备运行的稳定性与安全性。因此,研究气液两相流流型识别技术对深海矿物产能提高、设备故障诊断、流动参数测量和生产安全保证等具有重要意义。

近年来,气液两相流流型识别技术主要包括幅值域分析方法、频域分析方法、非线性分析方法、时间-频率域处理方法、小波变换法等。幅值域分析方法通过统计参数揭示气液两相流信号的幅度波动特性^[2-4],其核心工具为 PDF 函数,该方法虽能有效描述信号幅度分布,但在实际工程中存在峰值确定困难、对数据长度要求高等问题,限制了其在高效实时流型识别中的应用。频域分析方法特别是功率谱密度(PSD)分析法,通过揭示信号在频率域中的能量分布,能有效提取气液两相流中与流型相关的特征信息^[5-7],但 PSD 的分布不仅受流型影响,还依赖于单相与混合流速等因素,需借助其他手段进行速度测量。非线性分析方法,尤其是基于混沌理论和熵理论的特征提取手段,混沌参数如 Kolmogorov 熵可用于敏感捕捉流型转变点,信息熵、近似熵及样本熵等则从不同角度度量系统的不确定性与复杂性,表现出对流动状态变化的良好响应特性^[8-10],但这类方法普遍依赖高质量原始信号,对采样率、数据长度及去噪手段有较高要求,同时部分指标计算复杂、参数选择敏感。时间-频率域处理法以小波分析、经验模态分析(EMD)、希尔伯特黄变换等为主^[11-13]。虽然 EMD 及其改进方法在气液两相流流型识别中得到了广泛应用,但仍面临模态混叠、噪声干扰与分量筛选不完善等问题,影响识别精度和特征提取效果。小波变换法具有良好的时频局部化功能,十分适合于突变信号和非线性非平稳强随机性信号的分析,因此,基于小波变换法的信号去噪技术得到了广泛关注,其研究重点聚焦在阈值去噪、小波系数的相关性去噪、模极大值去噪等方面^[14-15]。

本文通过垂直管道气力提升装置开展气液两相流实验,对采集的压力信号进行最佳阈值去噪后,使用小波包分解进行气液两相流流型的分析与判断。

1 基本原理

1.1 小波阈值法

垂直管道气力提升装置采集的压力信号含有噪声信号,具体可表示为以下模型。

$$y(m) = f(m) + n(m), \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: $y(m)$ 为采集的含噪压力信号; $f(m)$ 为真实信号; $n(m)$ 为噪声信号。小波阈值去噪过程即在实际采集压力信号中滤除噪声信号得到真实信号的过程。

在小波阈值去噪过程中,阈值的选择对去噪效果起着重要作用。目前常使用的是 Donoho 等人在高斯噪声模型基础上^[16]通过独立正态变量决策理论面得出的阈值,其表达式为:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (2)$$

式中: λ 为阈值; N 为采集的压力信号长度; σ 为信号中噪声的均方差,通过高斯噪声方差 $\delta = \text{median}(|d_{i,l}|)/0.6745$ 来获取, $d_{i,l}$ 为各尺度分解下的小波系数。为了使阈值选取因信号差异而改变,本文采用改进后的阈值算法,其表达式为:

$$\lambda_{\text{new}} = e^{(1-1/n)} \delta \sqrt{2 \ln N} \quad (3)$$

式中: $e^{(1-1/n)}$ 为收缩因子; n 为小波总分解层数。

小波阈值去噪流程如图 1 所示。

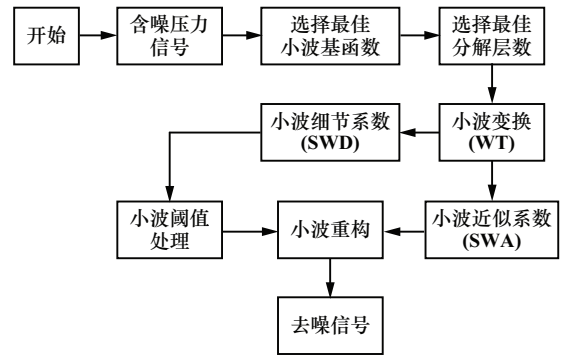


图 1 小波阈值去噪流程

Fig. 1 Denoising process by wavelet thresholding

1.2 基础评价指标选取

选择均方根误差 RMSE、信噪比 SNR 以及平滑度 r 作为小波去噪质量的基础评价指标。

均方根误差 RMSE 计算式为:

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f(i) - s'(i)]^2} \quad (4)$$

式中: $f(i)$ 为初始采集的压力信号; $s'(i)$ 为小波去噪分解重构后的信号。

信噪比 SNR 计算式为:

$$E_{\text{SNR}} = 10 \times \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^N f^2(i)}{\sum_{i=1}^N [f(i) - s'(i)]^2} \right) \quad (5)$$

平滑度 r 计算式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [s'(i+1) - s'(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [f(i+1) - f(i)]^2} \quad (6)$$

1.3 熵权法

在无法得知理论真实信号的情况下,为了有效分

析去噪质量,对选取的指标进行优化。仿真发现,随着分解尺度的增加,RMSE、SNR、 r 的变化量会出现明显的收敛趋势。因此,采用各个指标的变化量来评估去噪质量。

均方根误差变化量 V_{RMSE} 为:

$$V_{\text{RMSE}}(m) = |E_{\text{RMSE}}(m+1) - E_{\text{RMSE}}(m)| \quad (7)$$

式中: $V_{\text{RMSE}}(m)$ 为第 m 层分解尺度下均方根误差变化量; $E_{\text{RMSE}}(m+1)$ 、 $E_{\text{RMSE}}(m)$ 分别为第 $m+1$ 、第 m 层分解尺度下的均方根误差。

信噪比变化量 V_{SNR} 为:

$$V_{\text{SNR}}(m) = |E_{\text{SNR}}(m+1) - E_{\text{SNR}}(m)| \quad (8)$$

平滑度变化量 V_r 为:

$$V_r(m) = |r(m+1) - r(m)| \quad (9)$$

在计算权重之前,将各个指标的变化量数值规划到 $[0, 1]$ 区间内^[17],使其成为纯数值量,数值越小表示去噪效果越好。

$$P_{\text{RMSE}}(m) = \frac{V_{\text{RMSE}}(m) - V_{\text{RMSEmin}}}{V_{\text{RMSEmax}} - V_{\text{RMSEmin}}} \quad (10)$$

$$P_{\text{SNR}}(m) = \frac{V_{\text{SNR}}(m) - V_{\text{SNRmin}}}{V_{\text{SNRmax}} - V_{\text{SNRmin}}} \quad (11)$$

$$P_r(m) = \frac{V_r(m) - V_{rmin}}{V_{rmax} - V_{rmin}} \quad (12)$$

式中: V_{RMSEmax} 、 V_{RMSEmin} 、 V_{SNRmax} 、 V_{SNRmin} 、 V_{rmax} 、 V_{rmin} 分别表示均方根误差变化量、信噪比变化量、平滑度变化量的最大值和最小值; P_{SNR} 、 P_{RMSE} 、 P_r 分别表示信噪比变化量、均方根误差变化量及平滑度变化量的归一化处理结果。

熵值法确定权重的基本步骤^[18]为:

1) 选取 m 种小波去噪参数、 n 个评价指标, x_{ij} 为第 i 种参数的第 j 个评价指标的数值;

2) 归一化处理后的指标,计算第 j 个指标下的第 i 种参数占该指标的比重:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum x_{ij}}, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (13)$$

3) 计算第 j 个指标的熵值:

$$e_j = -k \sum [P_{ij} \ln(P_{ij})] \quad (14)$$

式中 k 为非负数。

4) 计算信息熵冗余度:

$$d_j = 1 - e_j \quad (15)$$

5) 计算各项指标的权重:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum d_j} \quad (16)$$

权值分配完成之后,将上述选取的 3 个指标构建为复合指标,具体表达式为:

$$Y = w_{\text{RMSE}} P_{\text{RMSE}} + w_{\text{SNR}} P_{\text{SNR}} + w_r P_r \quad (17)$$

式中: Y 为复合指标计算结果; w_{SNR} 、 w_{RMSE} 、 w_r 分别表示计算得到的信噪比变化量、均方根误差变化量及平滑度变化量的权重。

1.4 小波包分解

对去噪后的压力信号进行小波包分析,通过一定的高频与低频共轭正交滤波器,将信号分解到不同的子频带上^[19-21]。假设 $\Phi(t)$ 为空间范围内的某个尺度函数, $\Psi(t)$ 为该尺度函数对应的正交小波。当有离散时间压力信号序列 S 时,小波分解式如下:

$$S = \sum_{i \in l} A_i + \sum_{i \in l} D_i \quad (18)$$

式中: D_i 为分解得到的小波细节系数, $D_i = g_i(t) = \sum_{k \in z} d_k^i \Psi_{ik}(t)$; A_i 为小波近似系数, $A_i = h_i(t) = \sum_{k \in z} C_k^i \Phi_{ik}(t)$ 。

计算信号的能量 $E(D_i)$ 和 $E(A_i)$ 可由分解得到的小波包系数平方表示:

$$E(D_i) = \frac{1}{N} \int g_i^2(t) dt \quad (19)$$

$$E(A_i) = \frac{1}{N} \int h_i^2(t) dt \quad (20)$$

而压力信号的总能量 E 等于细节信号能量与近似信号能量的总和^[22]:

$$E = E(A) + E(D) = \sum E(A_i) + \sum E(D_i) \quad (21)$$

对采集的压力信号预处理后进行 3 层小波包分解,可提取到从低频到高频的 8 个频带信号,再对得到的小波包系数进行小波包重构^[23],提取各个频带的信号。重构信号与原始分解信号 S 的关系为:

$$S = S_{30} + S_{31} + S_{32} + S_{33} + S_{34} + S_{35} + S_{36} + S_{37} \quad (22)$$

各频带内的能量计算公式为:

$$E_{3i} = \int |S_{3i}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |X_{ik}|^2 \quad (23)$$

各频带能量占比计算公式为:

$$\eta = \frac{E_{3i}}{\sum_{i=0}^7 E_{3i}} \quad (24)$$

根据式(24)计算得到的能量占比可计算不同流型的小波包熵值:

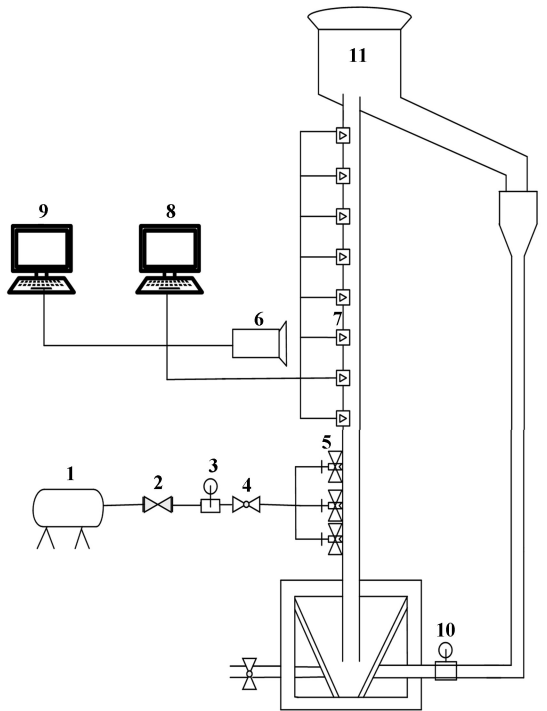
$$H(x) = - \sum_{i=0}^7 (\eta_i \times \log_2 \eta_i) \quad (25)$$

2 实验方案

2.1 实验装置简介

气液两相流液体提升装置如图 2 所示,空气压缩

机中的空气经过稳压阀、气体流量计、流量调节计,最后通过注气口均匀地进入气力提升垂直管道内。进入提升管内的气体、液体流经分离箱,空气从分离箱上端排出,液体则流回到管内实现内部水循环,在水平回流管段安装声波流量计。



1—空气压缩机; 2—稳压阀; 3—气体流量计; 4—流量调节计;
5—注气口; 6—CCD 摄像机; 7—压力传感器;
8—压力数据采集系统; 9—图像采集系统;
10—声波流量计; 11—分离箱

图2 气液两相流液体提升装置

Fig. 2 A lift device for gas-liquid two-phase flow

本实验装置采用连通器原理实现水循环,在提升水的过程中严格保证浸没率(提升管水平液面到进气口距离与进气口到提升管出口距离的比值)恒定,更贴合工程实际情况。提升管由多段亚克力(透明的有机玻璃管)通过法兰连接的方式制成,内径为 50 mm,长度为 3 200 mm,测量段距进气口的距离为 900 mm,进气口分别使用上中下三个不同位置,浸没率分别调为 0.8, 0.7, 0.6 和 0.5。其中压力传感器的采样频率为 10 kHz,实验记录 5 s 共获得 50 K 数据。同时,采用 CCD 摄像机对流型进行可视化观察,使用 USB-6361NI 采集卡以 30 kHz 的采样频率采集 0~5 V 电压信号,并通过 DAQexpress 数据采集软件将电压信号转化为压力信号。CCD 摄像机拍摄的垂直立管实验段气液两相流流型如图 3 所示,观察图 3 可知,气液两相流运动过程中,实验段气液两相流的流动结构发生改变,可以

分为泡状流、弹状流、搅浑流和环状流。

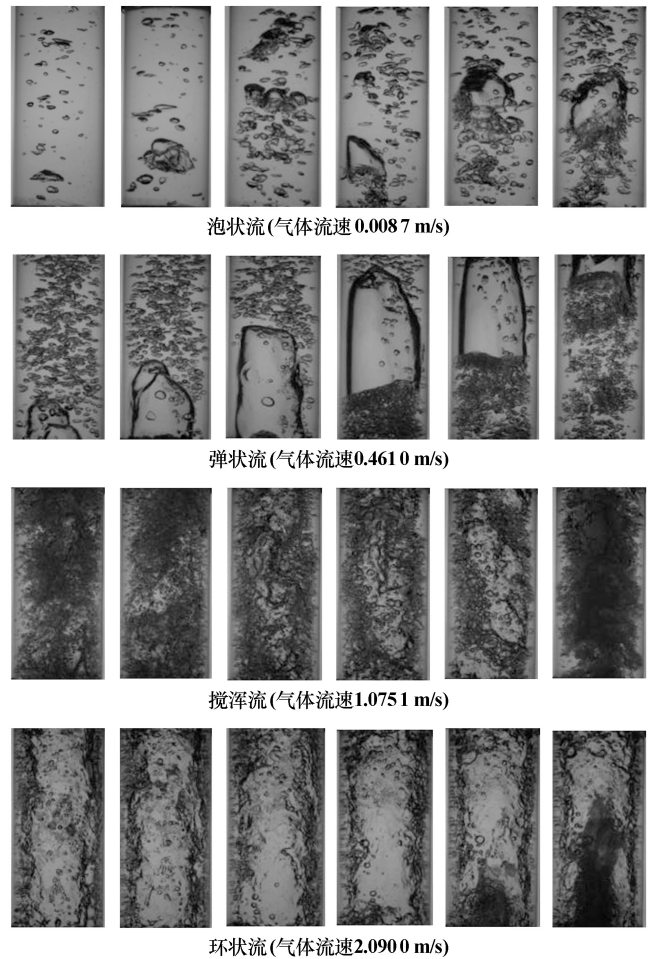


图3 垂直立管实验段气液两相流流型变化

Fig. 3 Flow patterns of gas-liquid two-phase flow in a vertical pipe in test

2.2 小波基函数的确定

对采集的含噪声压力信号进行小波阈值去噪,在对不同流型的气液两相流去噪过程中,首先以可改善的信噪比来确定最佳小波基函数。考虑小波基函数支撑长度、对称性、正交性、相似性等要求,本文选取符合要求的 db、sym、coif 三类小波基函数。以泡状流和弹状流确定的不同小波基函数可改善信噪比如图 4 所示。泡状流中,db5 小波基的信噪比(57 dB)最高。弹状流中,db8 小波基的信噪比(53.59 dB)最高。

2.3 最佳分解层数的确定

在低尺度分解情况下所得到的的小波细节系数以噪声为主,随着分解层数增加,小波细节系数开始包含有效信号,在小波近似系数中包含的有效信号开始出现失真。对不同分解尺度下的小波细节系数能量进行计算,由于有效信号的能量远大于噪声信号的能量,小波细节系数能量最小时的分解层数为最佳分解层数^[24]。

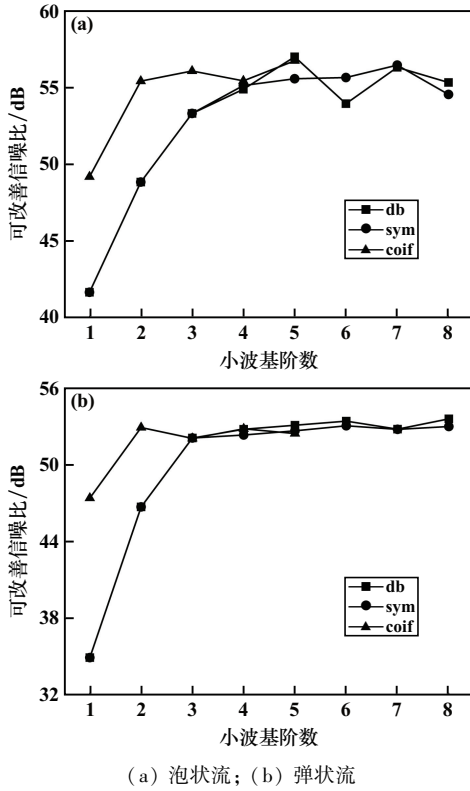


图 4 不同小波基函数可改善信噪比

Fig. 4 Improved SNR for different wavelet basis functions

对不同分解尺度下所得出的指标使用熵权法融合成一个复合指标,进一步判断此分解层数是否为最佳分解层数。对不同分解尺度下流型的小波细节系数能量进行对数处理,结果如表 1 所示。

表 1 不同分解尺度下小波细节系数能量

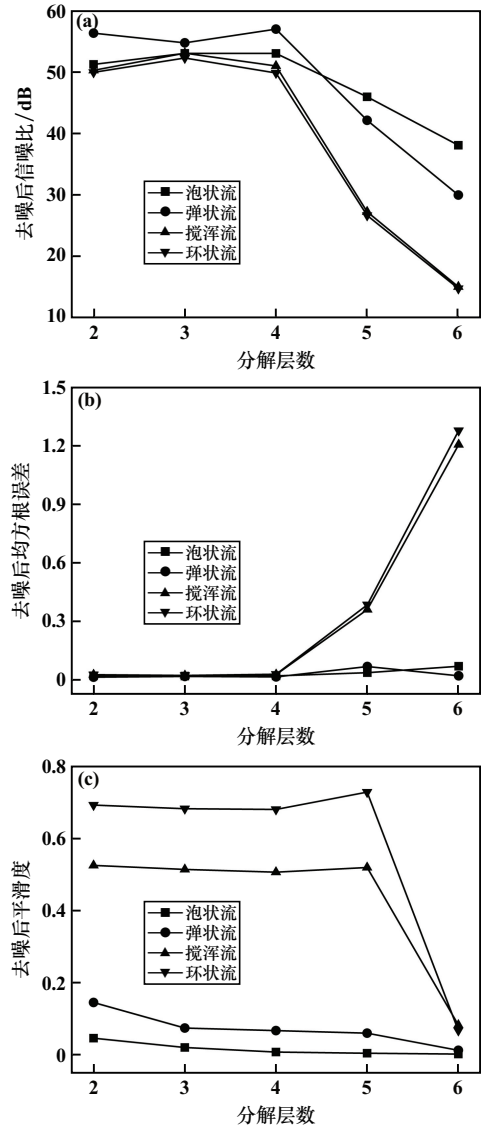
Table 1 Energy of details coefficients of wavelet transformation with different decomposition scales

分解层数	小波细节系数能量			
	泡状流	弹状流	搅浑流	环状流
1	2.34	2.32	2.35	2.34
2	2.32	2.31	2.33	2.33
3	2.31	2.30	2.32	2.31
4	2.30	2.29	2.35	2.34
5	2.33	2.34	3.34	3.56
6	2.40	2.93	5.70	6.53

通过表 1 可知,泡状流和弹状流第 4 层的小波细节系数能量最小,搅浑流和环状流第 3 层的小波细节系数能量最小。

不同分解层数下各流型性能指标如图 5 所示。

对不同流型的信噪比 SNR、均方根误差 RMSE 以及平滑度 r 计算复合指标,结果如表 2 所示。



(a) 去噪后信噪比; (b) 去噪后均方根误差; (c) 去噪后平滑度

图 5 不同分解层数下各流型性能指标

Fig. 5 Performance indicators of each flow pattern with different decomposition levels

表 2 不同流型的复合指标

Table 2 Composite indicators of different flow patterns

分解层数	复合指标			
	泡状流	弹状流	搅浑流	环状流
2	0.46	0.52	0.009 9	0.005 6
3	0.19	0.21	0.000 3	0.001 8
4	0.035	0.007 8	0.35	0.35
5	0.34	0.50	0.90	0.90
6	0.57	0.38	0.077	0.022

由表 2 可知,泡状流与弹状流第 4 层对应的复合指标值最小,搅浑流和环状流第 3 层对应的复合指标值最小。因此,在确定最优小波基函数和最佳分解层数后进行小波阈值去噪,不同流型去噪效果如图 6 所示。

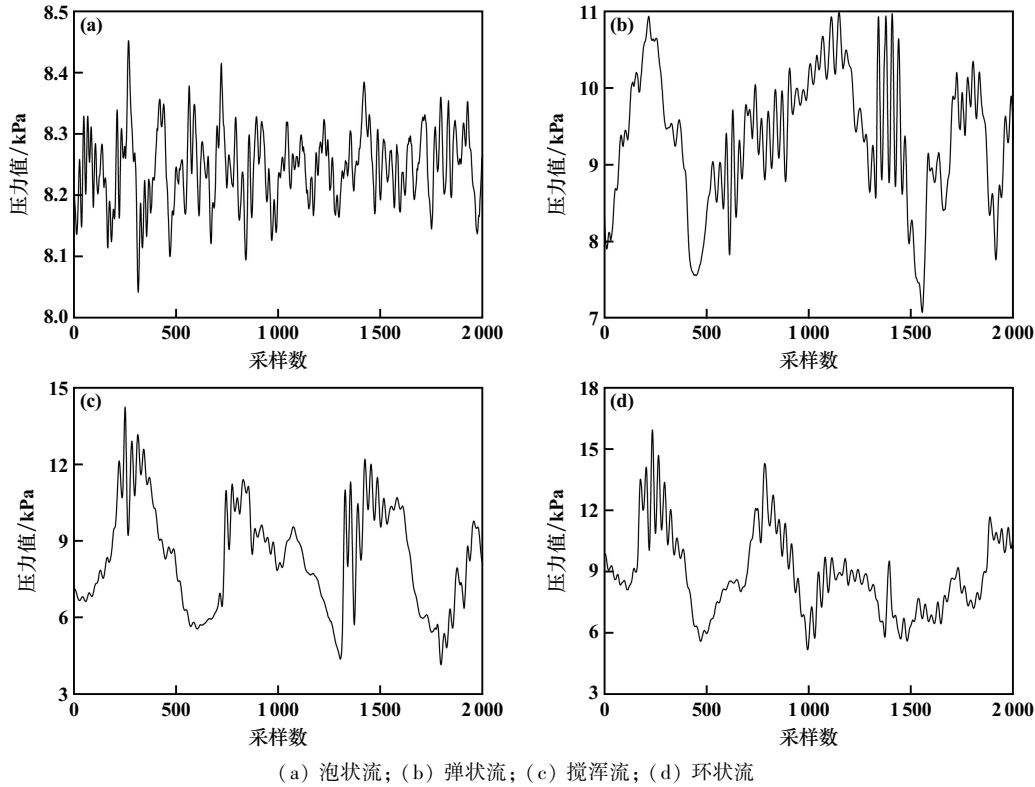


图6 不同流型去噪效果

Fig.6 Denoising effects of different flow patterns

由图6可知,泡状流压力波动范围为8.03~8.45 kPa,环状流压力波动范围扩大至5.30~15.88 kPa。

3 气液两相流压力信号特征提取

3.1 基于小波包能量占比和熵值的流型分析

对去噪后的4种流型压力信号进行3层小波包分解后分别进行8个频带分析,不同流型的频谱如图7所示。

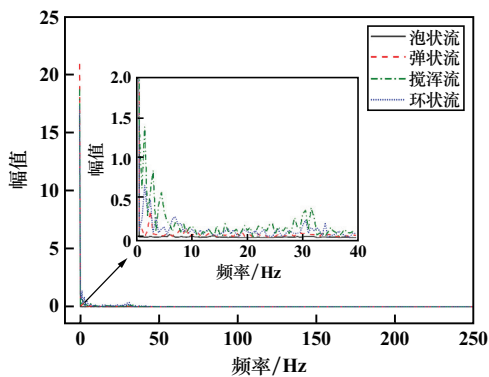


图7 不同流型的频谱

Fig.7 Frequency spectra of different flow patterns

由图7可知,4种流型信号能量主要集中在0~40 Hz,不同流型的能量进行3层小波包分解,主要集中在低频带的第1频带和第2频带内。将第1频带和第2频

带能量占比作为特征向量分析不同流型的运动变化,结合小波包熵值进一步反应不同流型的复杂度和不确定性。不同流型第1、2频带内能量占比和熵值变化如图8所示。

由图8可知,泡状流第1频带能量占总能量的80%以上,主要原因是水作为连续相,由于其低速变化缓慢,在低频带内可以产生较强的压力,气泡在流动水中由于无序流动和不规则形状,可以产生较高的高频压力;弹状流能量在第1频带开始下降,并开始转移到其他频带,大部分第1频带能量占比下降至60%~80%,而第2频带能量占比开始增加。弹状流中液体与液体之间和液体与管壁之间的碰撞加剧,泰勒泡的破裂会产生一些高频振动,旋涡迅速产生并消失,增加了频率的波动。流型变为搅浑流时,大部分第1频带能量占比继续下降至40%~65%,第2频带能量占比增加相较于弹状流更多,大部分为20%~45%。气体流速达到最大时,流型转变为环状流,环状流第1频带能量占比急剧下降,而第2频带能量占比急剧上升至40%~80%,因为小气泡的增加大大降低了混合物的密度,增加了混合物的无序性,并且增加的气流会促使小气泡合并成一些不规则的大气泡群,液体间的碰撞更加激烈,促使第2频带能量占比急剧上升。流型未达

到环状流时,小波包熵值与气体流速成正比。气体流速较小时,小气泡会呈现规则的形状和似周期性的运动,随着气体流速增加,小气泡之间会开始聚并成大气泡,液体之间的碰撞开始加剧,促使大气泡的形状与运动轨迹呈无序性,周期性波动会逐渐减弱并消失,演变成不稳定的混沌运动,导致小波包熵值上升,搅浑流的小波包熵值最大。流型为环状流时,流体有序地环绕管道向上流动,气泡的破裂、聚集和分散偏少,气相体积比远大于液相体积比,气相与液相流动连续,形成相对稳定的界面,此时信号具有一定的周期性,流型相对有规律性,不规则性和混乱性下降,小波包熵值开始出现下降趋势。

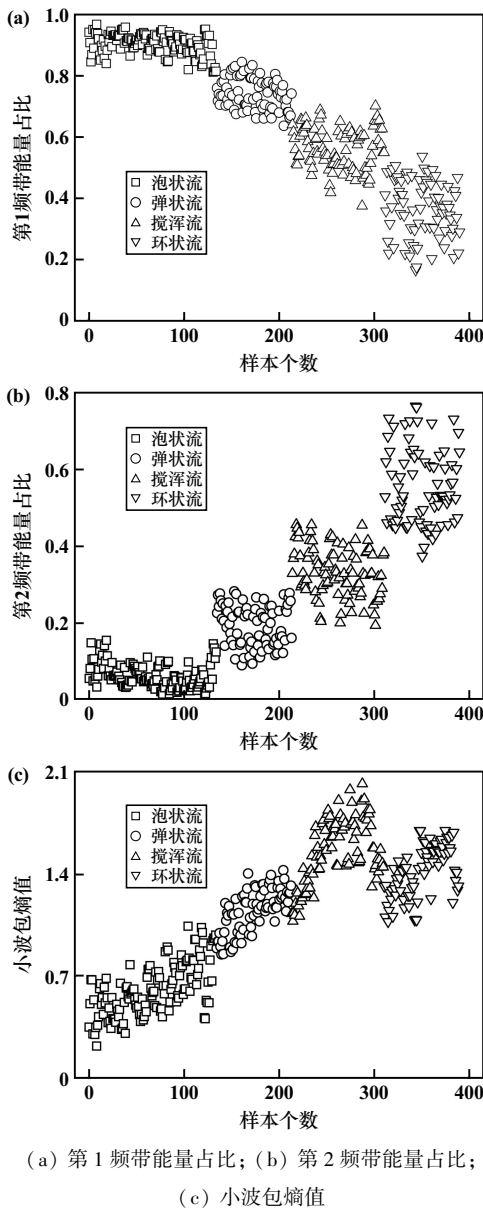


图8 不同流型第1、2频带内能量占比和熵值变化

Fig.8 Changes in energy ratio and entropy values within the first and second frequency bands for different flow patterns

3.2 流型识别

在气液两相流实验中,采集的流型压力信号组成的数据集共有389组(其中泡状流134组、弹状流79组、搅浑流97组、环状流79组),随机选取70%数据集作为训练集,剩余数据集作为测试集,泡状流、弹状流、搅浑流、环状流标签分别设为1,2,3,4,输入模型中进行流型识别。识别模型采用朴素贝叶斯分类器(Naive Bayes classifiers, NB)、K近邻(K-nearest neighbor classification, KNN)、随机森林(random forest, RF)、自适应提升决策树(adaptive boosted decision tree, AB-DT)和随机子空间决策树(random subspace decision tree, RS-DT)模型预测结果。为验证不同算法的性能,每个模型分别运行50次,计算各模型的识别率,结果如表3所示。

表3 5种模型的识别率

Table 3 Recognition rates of five models	
算法	识别率/%
NB	93.97
KNN	94.82
RF	94.87
AB-DT	98.06
RS-DT	98.66

根据表3的结果,采用5种模型中识别率最高的RS-DT模型对改进前后小波阈值法处理的数据集进行流型识别,结果如表4所示。

表4 流型识别结果

Table 4 Flow pattern recognition results			
处理方法	流型类别	平均识别率/%	整体平均识别率/%
改进后 小波阈值去噪	泡状流	100	98.08
	弹状流	100	
	搅浑流	96.67	
	环状流	95.65	
改进前 小波阈值去噪	泡状流	92.50	90.92
	弹状流	83.33	
	搅浑流	96.55	
	环状流	91.30	

实验结果证明,气液两相流压力信号采用改进后的小波阈值去噪,小波包分解所提取能量和熵值,构建反映压力信号的特征向量,利用随机子空间决策树模型可以快速高效地对流型进行分类识别。

4 结语

1) 采集气液两相流的压力信号,结合小波分解后

的小波细节系数能量特征确定最佳分解层数范围,采用熵权法确定有效指标最佳分解层数。

2) 小波包分解发现能量分布主要在第1频带内,随着气体流速逐渐增加,气泡开始出现聚并时,第1频带能量呈线性下降,而第2频带能量开始逐渐回升。

3) 流型未达到环状流时,小波包熵值与气体流速成正比;流型过渡到环状流时,流型的稳定性和周期性增加,小波包熵值开始急剧下降。

4) 气液两相流压力信号采用改进的小波阈值去噪后,利用随机子空间决策树模型可以快速高效识别流型,流型整体平均识别率达98.08%。

5) 实际工业中出现的流型可能并不是单一的流型,而是多种流型混合的复杂流动。未来将进一步开展在实际提升过程中更为复杂的两相流情况以及气液固三相流混合流型的识别研究,验证提出流型识别方法的有效性和可靠性。

参考文献(References):

- [1] DU Y L, ZHU J Y, HAN X H, et al. Gas state equation and flow mechanism of gas-liquid two-phase flow in airlift pump system[J]. *Physics of Fluids*, 2024,36(5):055142.
- [2] HOSSEINI S, ROSHANI G H, SETAYESHI S. Precise gamma based two-phase flow meter using frequency feature extraction and only one detector[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 72: 101693.
- [3] SHI Y Y, SUN Y X, WANG M, et al. Flow pattern recognition for horizontal gas-liquid two-phase flow with a hybrid deep-learning model[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2025,102:829.
- [4] 纪健. 气液两相流管道流动背景噪声分析研究[J]. *油气田地面工程*, 2019,38(增刊1):24-30.
JI Jian. Analysis and study on background noise of gas-liquid two-phase flow pipeline[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2019,38(S1): 24-30.
- [5] XU W T, CHENG L, LEI S H, et al. Mixed-flow pump cavitation characteristics extraction based on power spectrum density through pressure pulsation signal analysis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024,208:110904.
- [6] 方立德,张涛,徐英. 垂直于水平流向的气液两相流重位压差波动信号分析[J]. *传感技术学报*, 2008(7):1184-1189.
FANG Lide, ZHANG Tao, XU Ying. Analysis of gravity differential pressure fluctuation signal against to the horizontal flow direction in gas-liquid two-phase flow[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008(7):1184-1189.
- [7] LI N L, LI W S, GUO L J. PSD characteristics of gas-liquid two-phase flow in pipeline S-shaped flexible riser[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012,33(7):1160-1162.
- [8] 潘慧,李海广,吴晖. 气液两相流压差波动信号的混沌特性及 Volterra 自适应短期预测研究[J]. *实验流体力学*, 2020,34(4):102-108.
PAN Hui, LI Haiguang, WU Xuan. A study on chaotic characteristics and short-term prediction of pressure difference fluctuation signal of gas-liquid two-phase flow in small channel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2020,34(4):102-108.
- [9] ZHANG L F, ZHANG S J. Analysis and identification of gas-liquid two-phase flow pattern based on multi-scale power spectral entropy and pseudo-image encoding[J]. *Energy*, 2023,282:128835.
- [10] SUN B, CHANG H, ZHOU Y L. Flow regime recognition and dynamic characteristics analysis of air-water flow in horizontal channel under nonlinear oscillation based on multi-scale entropy[J]. *Entropy*, 2019,21(7):667.
- [11] ZHU L L, ZHONG Z P, WANG X Y, et al. Chaotic analysis and flow regimes identification for pressure fluctuation of gas-solid fluidized beds[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2016,46(6):1240-1245.
- [12] 陈露阳,尹佳雯,孙志强,等. 基于 EEMD-Hilbert 谱的气液两相流钝体绕流流型识别[J]. *仪器仪表学报*, 2017,38(10):2536-2546.
CHEN Luyang, YIN Jiawen, SUN Zhiqiang, et al. Flow regime identification of gas-liquid two-phase flow with flow around bluff-body based on EEMD-Hilbert spectrum[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017,38(10):2536-2546.
- [13] 刘起超,周云龙,陈聪. 基于 CEEMDAN 和概率神经网络的起伏振动气液两相流型识别[J]. *仪器仪表学报*, 2021,42(10):84-93.
LIU Qichao, ZHOU Yunlong, CHEN Cong. Flow pattern identification of fluctuating vibration gas liquid two phase flow based on CEEMDAN and probabilistic neural network[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021,42(10):84-93.
- [14] 张春晓,张涛. 基于多小波相邻系数法的热式油水两相流相含率测量[J]. *化工学报*, 2009,60(2):325-331.
ZHANG Chunxiao, ZHANG Tao. Measurement of phase holdups of heat method oil/water two-phase flow based on multiwavelet neighboring coefficient method[J]. *Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China*, 2009,60(2):325-331.
- [15] 顾春来,董守平. 气液两相管流流型信号的小波去噪处理[J]. *北京科技大学学报*, 2002(1):76-78.
GU Chunlai, DONG Shouping. Wavelet denoising treatment of flow pattern signals in liquid-gas two phase flow pipelines[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002,24(1):76-78.
- [16] 杨章静,钱建军,黄璞,等. 基于 Gabor 变换的 GrabCut 纹理图像分割[J]. *控制与决策*, 2016,31(1):149-154.
YANG Zhangjing, QIAN Jianjun, HUANG Pu, et al. GrabCut texture image segmentation based on Gabor wavelet transform[J]. *Control and Decision*, 2016,31(1):149-154.
- [17] 李莎莎. 基于改进层次分析法和熵权法的采矿方法优选研究[J]. *化工矿物与加工*, 2020,49(3):1-4.
LI Shasha. Optimization of mining methods based on improved AHP and entropy weight method[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2020,49(3):1-4.
- [18] 李宁,孙刚友,王合祥,等. 基于信息熵与模糊决策理论优选采矿方法[J]. *铀矿冶*, 2018,37(3):166-170.
LI Ning, SUN Gangyou, WANG Hexiang, et al. Optimization of mining

- method based on information entropy and fuzzy decision theory[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2018,37(3):166-170.
- [19] 唐川林,汪志能,胡东,等. 基于小波包与Elman神经网络的气力提升装置流型识别技术研究[J]. 振动与冲击, 2016,35(15):149-153.
- TANG Chuanlin, WANG Zhineng, HU Dong, et al. Flow pattern identification for airlift devices based on wavelet packet and Elman neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(15):149-153.
- [20] 计时鸣,胡科东,谭大鹏,等. 基于小波包的固液两相流流型识别方法[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2012,34(3):88-92.
- JI Shiming, HU Kedong, TAN Dapeng, et al. Pattern recognition of the soft abrasive flow based on wavelet packet[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2012,34(3):88-92.
- [21] 盛碧霞,冀海峰,王保良,等. 基于新型C⁴D的小管道气液两相流流型辨识方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017,43(11):2273-2279.
- SHENG Bixia, JI Haifeng, WANG Baoliang, et al. Flow pattern identification method of gas-liquid two-phase flow in ductule based on new C⁴D[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017,43(11):2273-2279.
- [22] 孙斌,刘天栋,周云龙. 小波包主成分分析在气液两相流流型识别中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009,39(6):1532-1537.
- SUN Bin, LIU Tiandong, ZHOU Yunlong. Application of principal component analysis of wavelet packet on flow regime identification of gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009,39(6):1532-1537.
- [23] 王杰,李爱蓉. 小波包分析识别气液固三相流流型[J]. 石油化工, 2020,49(1):62-69.
- WANG Jie, LI Airong. Identification of gas-liquid-solid three-phase flow patterns by wavelet packet analysis[J]. Petrochemical Technology, 2020,49(1):62-69.
- [24] 何小宇,张霖,唐德东,等. 拉曼光谱小波阈值去噪最佳分解层数自适应确定方法的研究[J]. 自动化与仪表, 2023,38(6):61-65.
- HE Xiaoyu, ZHANG Lin, TANG Dedong, et al. Research on adaptive determination of optimal decomposition layers for wavelet threshold denoising of Raman spectroscopy[J]. Automation & Instrumentation, 2023,38(6):61-65.
- 引用本文:陈立,杜燕连,彭甫森,等. 基于改进小波阈值法的气液两相流特征提取及流型识别[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):35-43.
- CHEN Li, DU Yanlian, PENG Fusen, et al. Feature extraction and flow pattern recognition of gas-liquid two-phase flow based on improved wavelet thresholding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):35-43.

(上接第34页)

- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 非煤露天矿边坡工程技术规范:GB 51016—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for non-coal open-pit mine slope engineering: GB 51016—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 滑坡防治设计规范:GB/T 38509—2020[S]. 北京:中国标准出版社, 2020.
- State administration for market regulation, National standardization administration. Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509—2020[S]. Beijing: Standards Press for China, 2020.
- [16] 代雪,张家明. 某场地边坡稳定分析方法的比较研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021,17(11):119-124.
- DAI Xue, ZHANG Jiaming. Comparative study on analysis methods of slope stability at a certain site[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021,17(11):119-124.
- [17] 王思源,童小东. 基于动态强度折减-改进矢量和法的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2023,45(7):1384-1392.
- WANG Siyuan, TONG Xiaodong. Stability analysis of slopes based on dynamic strength reduction improved vector sum method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023,45(7):1384-1392.
- 引用本文:刘杨,李京,张长锁,等. 露天矿并段台阶边坡崩塌诱因分析及治理方案研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):29-34.
- LIU Yang, LI Jing, ZHANG Changsuo, et al. Causes and management scheme of slope collapse at bench merging section in open-pit mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):29-34.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2025年6月