

DOI:10.11784/tdxbz202505012

错列管束两相流动中的流型识别研究

朱国瑞^{1,2,3}, 韩佩泽^{1,2}, 陈正巧^{1,2}, 马鹏徽^{1,2}, 谭蔚^{1,2}

(1. 天津大学化工学院, 天津 300350; 2. 天津大学浙江研究院, 宁波 315201;
3. 化学工程与低碳技术全国重点实验室(天津大学), 天津 300350)

摘要: 随着高效紧凑型管壳式换热器的发展, 管束流致振动问题日益受到关注。管外两相流因气液相物性差异与管束结构复杂性, 流动特征呈现显著时空演化特性。传统流型识别方法依赖含气率与压降参数, 存在动态响应迟滞问题。本研究提出高速摄影与管周压力小波分析协同识别系统, 通过高速摄影捕捉流型演变, 结合 16 个测点压力信号多分辨率小波分解, 提取 0.977~250.000 Hz 频带能量特征。实验针对节径比为 1.483 的正三角形管束, 识别出空泡流、分散空泡流、搅拌流与间歇流 4 类流型。小波能量分析表明: 空泡流高频能量占比 45%, 分散空泡流由 A8 尺度低频能量主导, 搅拌流中频能量集中于 D8 和 D7 尺度, 间歇流低频周期性显著。新型流型图较 Noghrehkar 概率密度函数法能更精准地识别过渡边界, 较 Hibiki-Takashi 模型拓展了分散空泡流边界。高速摄影-压力小波分析方法实现流型边界判定误差降低, 为复杂管束两相流动机理研究提供了高精度实验基础。

关键词: 两相流; 流型识别; 换热器

中图分类号: TK172

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)06-0615-10

Flow Regime Identification in Two-Phase Flow Through Staggered Tube Bundles

Zhu Guorui^{1,2,3}, Han Peize^{1,2}, Chen Zhengqiao^{1,2}, Ma Penghui^{1,2}, Tan Wei^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Zhejiang Institute of Tianjin University, Ningbo 315201, China;

3. State Key Laboratory of Chemical Engineering and Low-Carbon Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: With the development of high-efficiency compact shell-and-tube heat exchangers, flow-induced vibration in tube bundles has attracted increasing attention. The external two-phase flow exhibits significant spatiotemporal evolution due to differences in gas-liquid phase properties and the structural complexity of the tube bundle. Traditional flow regime identification methods relying on void fraction and pressure drop parameters suffer from dynamic response hysteresis. To address this, this study proposes a synergistic identification system that combines high-speed photography with wavelet analysis of circumferential pressure signals. The system captures flow regime transitions through high-speed photography while performing multiresolution wavelet decomposition on 16 measurement-point pressure signals to extract energy characteristics in the 0.977—250.000 Hz frequency band. Experimental investigations on an equilateral triangular tube bundle (pitch-to-diameter ratio: 1.483) identified four distinct flow regimes: bubbly flow, dispersed bubbly flow, churn flow, and intermittent flow. Wavelet energy analysis revealed a 45% high-frequency energy dominance in bubbly flow, A8-scale low-frequency energy predominance in dispersed bubbly flow, mid-frequency energy concentration in D8 and D7 scales for churn flow, and distinct low-frequency periodicity in intermittent flow. The novel flow regime map demonstrated higher accuracy in identifying transition boundaries than Noghrehkar's probability density function method and extended the dispersed bubbly flow boundaries beyond

收稿日期: 2025-05-09; 修回日期: 2025-06-16.

作者简介: 朱国瑞(1987—), 女, 博士, 教授.

通信作者: 朱国瑞, zhuguorui@tju.edu.cn.

基金项目: 宁波市重点研发计划资助项目(2024Z096).

Supported by the Key Research and Development Program of Ningbo, China (No. 2024Z096).

those of the Hibiki-Takashi model. The integrated high-speed photography and pressure wavelet analysis method reduced errors in determining flow regime boundaries, establishing a high-precision experimental foundation for investigating two-phase flow mechanisms in complex tube bundles.

Keywords: two-phase flow; flow regime identification; heat exchanger

管壳式换热器作为核能发电^[1]、食品加工^[2]及石油化工^[3]等领域的关键设备,其高效紧凑化设计趋势导致壳侧流体速度提升与结构支撑减少,进而诱发管束流致振动失效风险^[4-6]。研究表明,流致振动参数对两相流型具有显著依赖性,其中间歇流与搅拌流更易引发振动现象^[7-11]。当前研究已系统探讨管内两相流流型识别^[12-15]、流动特性及流态转换机理^[16-19],但管外两相流因气液相物性差异、空隙率分布复杂及管束结构多样性,呈现更强的时空演化特征与流动不稳定性^[20],其研究仍面临显著挑战。

目视观察和高速摄影是对管束间两相流动形态识别的基本方法。局部含气率和压降与两相流态密切相关,基于含气率测量的光纤探头、电容传感器和金属丝网传感器以及基于压差测量的压差传感器对局部流动信息的获取并进行数学分析可以完成流动形态的识别^[21-23]。研究者已从目视观测^[24-26]逐步发展为结合高速摄影^[27-28]、局部空隙率测量^[21-23]与压降信号分析^[23,29]的综合手段。Grant 等^[24]通过侧窗观测定义了折流板换热器横流的 3 类流型,分别为空泡流、间歇流和环状流。而 Ulbrich 等^[26]发现管束外围观测结果难以反映内部真实流态。van Rooyen^[27]与 Hong 等^[28]采用高速摄像技术消除壳体边界效应影响,记录并识别两相流态为空泡流、间歇流、间歇分

散流和环空流。Noghrehkar 等^[23]则通过概率密度函数分析提出流型分类,包括空泡流、间歇流和环空流。然而该方法不能有效识别间歇流中的搅拌流,且存在流型识别迟滞缺陷,即该方法确定的流型转变条件滞后于实际流型转变条件。Kanizawa 等^[29]融合可视化与传感器信号,应用机器学习实现流型边界精准判定,识别出空泡流、大空泡流、分散气泡流、搅拌流、间歇流和环空流。尽管 Mao 等^[30]提出水平管束流型转换准则,但其基于内外流型相似性的假设存在适用性局限。de Kerret 等^[31]提出基于压力脉动傅里叶变换和空隙率概率密度函数的客观流型识别方法,识别出空泡流、段塞流、环状流和搅拌流 4 类流型。Zhang 等^[32]结合 Kanizawa 等^[29]和 Mao 等^[30]机理模型,识别了竖直上升流横掠水平管束的 5 种流型,并揭示了流型对两相摩擦乘子的显著影响。此外,Wang 等^[33]基于垂直管束局部参数统计建立的流型判据,进一步拓展了研究维度。Zhao 等^[34]则将 *k*-means 聚类方法应用于降膜管束流型识别,基于空隙率和界面面积参数客观划分出空泡流、环空段塞柱流、半环空流和多桥流 4 类新流型。表 1 为水平管束上向两相交叉流流型转换数据库。但流型识别类别及命名尚未统一,且基于含气率的传统表征参数存在动态响应迟滞问题,难以实时反映瞬态流场演化特征。

表 1 水平管束上向两相交叉流流型转换数据库

Tab.1 Database of flow regime transition criteria for upward two-phase cross-flow in horizontal tube bundles

来源	管束类型	节径比	直径/m	流体系统	识别方法
文献[24]	三角形	1.25	0.019	空气-水	侧窗识别
文献[25]	正方形	1.28	0.009 79	空气-水	侧窗识别
文献[26]	正方形	1.5	0.020	空气-水	高速摄影可视化,压降
文献[27]	三角形	1.17	0.018 95,0.019 05	空气-水	高速摄影
文献[28]	正方形	1.3/1.8	0.02	空气-水	高速摄影
文献[23]	三角形和方形	1.47	0.012 7	空气-水	电阻探头局部含气率概率密度函数
文献[29]	三角形	1.26	0.019	空气-水	高速摄影、差压传感器和电容传感器的信号
文献[30]	—	—	—	—	<i>k</i> -means 聚类方法
文献[31]	转角三角形	1.505	0.038	空气-水	建立流型转换准则
文献[32]	—	—	—	—	压力脉动傅里叶变换和空隙率概率密度函数
文献[33]	三角形	1.42	0.018	蒸汽-水	建立流型转换准则
文献[34]	三角形	1.3	0.019 05	蒸汽-水	光学探针
					<i>k</i> -means 聚类方法

本研究针对垂直向上逆重力场中两相流横掠换热器管束的流型识别,提出一种高速摄影与管周压力小波分析协同的新型两相流型识别系统:通过高速摄

影捕捉流型宏观演变,结合压力信号小波分解提取瞬态流动特征参数。该系统旨在突破传统方法的动态响应瓶颈,精准确认流型特征并统一命名,最终获得

准确的流型过渡边界,为流型-流场动态关联机制研究提供新的实验基础.

1 理论基础

1.1 数据简化

液体和气体表面流速分别为 u_l 和 u_g ,是根据最小流动横截面积来计算的,对应于同排管之间的最小距离.水和空气流量测量点到实验段的密度变化可以忽略不计,根据连续性原理,通过转子流量计测量的空气体积流量和电磁流量计测量的水体积流量与横截面积之比可以直接估算出对应的气体表面流速和液体表面流速,节径比为 1.483 的正三角形管束排布下的液体和气体表面流速计算式分别为

$$u_l = \frac{Q_l}{A} \frac{P}{P-D} \quad (1)$$

$$u_g = \frac{Q_g}{A} \frac{P}{P-D} \quad (2)$$

式中: Q_l 、 Q_g 分别为水、空气的体积流量, m^3/h ; A 为测试段的流通横截面积, $A = 0.26 \text{ m} \times 0.23 \text{ m} = 0.0598 \text{ m}^2$; P 为相邻管中心距离, $P = 0.0386 \text{ m}$; D 为管直径, $D = 0.026 \text{ m}$.

1.2 小波变换的多分辨率分析

空气-水两相流场具有非平稳特性,而小波变换作为一种介于时域和频域之间的分析工具,能够提供信号在时间尺度上的分解.多尺度子信号能够更清晰地展现原始信号在不同频带上的细节特征,结合各个尺度的能量分布,有助于从多个维度理解空气-水两相流动形态.小波基中的母小波和父小波具有正交性和紧支撑特性,这使得小波变换能够高效地分解和重建信号的多尺度结构.母小波和父小波的主要性质如下:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 0 \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 1 \quad (4)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{j,k}(t) \phi_{j,k}(t) dt = 0 \quad j, k \in Z \quad (5)$$

式中: $\varphi(t)$ 为母小波; $\phi(t)$ 为父小波; k 为时间平移量, $k = 1, 2, \dots, N/2^j$; j 为尺度层数, $j = 1, 2, \dots, J$.

通过调整母小波和父小波的尺度和平移,可以精确捕捉信号的局部特征以及其在不同频率上的变化.这一过程产生的一系列小波函数构成小波变换的正交基,即

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in Z \quad (6)$$

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in Z \quad (7)$$

母小波的正交基与离散信号卷积用于提取高频细节,而父小波的正交基与离散信号卷积则用于在不同尺度上生成信号的近似表示.离散信号 $x(t)$ 小波变换系数定义为在小波基上的正交投影,最高尺度近似分量和各尺度细节分量小波系数的表达式分别为

$$a_{j,k} = \int x(t) \phi_{j,k} dt \quad (8)$$

$$d_{j,k} = \int x(t) \varphi_{j,k} dt \quad (9)$$

式中: $a_{j,k}$ 为最高尺度近似分量小波系数; $d_{j,k}$ 为各尺度细节分量小波系数.

小波变换将离散信号分解为一系列正交函数的表达式^[35],即

$$x(t) = \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_k d_{j,k} \varphi_{j,k}(t) \quad j, k \in Z \quad (10)$$

离散信号的能量被定义为其振幅的平方和,近似分量与各尺度细节分量能量可分别表达为

$$E_j^A = \sum_{t=1}^N |A_j(t)|^2 \quad (11)$$

$$E_j^D = \sum_{t=1}^N |D_j(t)|^2 \quad (12)$$

式中: E_j^A 为近似分量能量; E_j^D 为各尺度细节分量能量.

各尺度能量占总能量的比例能直观地反映信号不同频段的能量分布,即

$$\bar{E}_j^A = \frac{E_j^A}{E} \quad (13)$$

$$\bar{E}_j^D = \frac{E_j^D}{E} \quad (14)$$

式中: \bar{E}_j^A 为近似分量归一化能量; \bar{E}_j^D 为各尺度细节分量归一化能量.

2 实验装置

空气-水两相流水洞实验系统和流程分别如图 1 和图 2 所示,空气-水两相水洞实验系统包括空气循环系统、水循环系统、实验测试段和数据采集系统.水循环回路包含容积为 2 m^3 的储水箱、37 kW 离心泵、调节蝶阀和量程为 $318 \text{ m}^3/\text{h}$ 的电磁流量计.压缩空气由 36 kW 螺杆空压机提供,出口工作压力 0.95 MPa,压缩机下游配置储气罐以维持气压稳定,并设置量程为 1.6 MPa 压力表监控气压.压缩空气经转子流量计计量后,通过 8 个周向支管导入水管与液相混合.气液混合流经栅格板与静态混合器,确保气液相在截面均匀分布后进入测试段,消除入口不均匀性.测试段采用 9 排 \times 6 列圆形管束(直径 26 mm,长

度 389 mm),按三角形管束排列方式布置,节径比为 1.483. 流型观测采用 Photron Fastcam Nova R2 高速摄像机,通过测试段侧窗以 1 440 帧/s(分辨率 2 048 像素×2 048 像素)拍摄流场特征,实时获取清晰的气液流动图像. 为避免传统压力测量装置对流场的干扰及由此导致的测试精度损失,本研究开发了压力扫描阀及配套测试管束用于获取管周流体激励数据. 被测圆管表面设置 16 个均布测点,流体压力通过测压管传递至扫描阀,实现管周压力测量. 实验中使用的压力扫描阀量程为 0~100 kPa,采样频率为 500 Hz,精度为 0.1%. 所测流体压力的主导频带小于 10 Hz. 依据 Nyquist 定律,该采样频率在实验设备工作能力下可有效监控并获取压力信号. 该配置可在不干扰流场条件下精确采集管束周围流体激励数据. 实验测试管结构详见图 3.

3 流型识别与讨论

本研究采用高速摄影流场可视化与管周压力小波分析的协同识别方法,针对节径比 $P/D = 1.483$ 的正三角形排列管束开展空气-水两相流型特征研究. 实验设定气相表观流速 u_g 为 0.03~1.59 m/s、液相表观流速 u_l 为 0.08~1.59 m/s 的参数范围,通过多物理量同步测量策略累计采集 150 组实验样本数据. 高速摄影系统以高时空分辨率捕捉管束间两相流动动态演化过程,结合管周压力信号的小波时频特征提取技术,构建了两相流型识别系统. 该实验设计实现了管束流场动态特性分析,为建立高精度两相流型判别准则提供了完整的流型数据库支撑.

3.1 流型定义与流型视觉识别

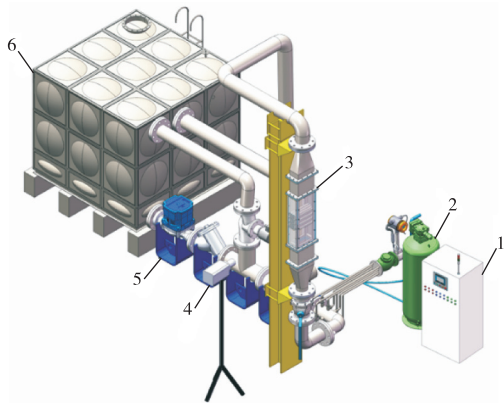
图 4 为通过高速摄影机透过观察窗捕捉到的各类流型图像,图 5 为管束间两相流型的示意,以下是对空气-水两相流型的具体定义.

空泡流是指在连续相液体中分散的近似椭球形小气泡,通常出现在气体流速和液体流速较低的范围. 在这种流动形态下,气泡密度较小,且由于较大的气液界面张力,气泡合并现象不明显,只有在气泡上升过程中遇到阻碍或存在速度差异时,合并才会发生,如图 4(a)所示.

分散空泡流以细小且规则的球形气泡均匀上升为特征,通常出现在较高的液体流速和全气体流速范围内. 在此情况下,高速液流产生更强的湍流,极大地抑制了气泡的合并,同时较高的气液界面张力使气泡形状趋向于球形,如图 4(b)所示.

搅拌流表现为气液混合流体在局部区域的回流和振荡上升. 随着气体流量的增加,气液界面张力减弱,导致气泡体积增大,气泡密度的增加使得合并的概率增大,形成的大气泡与尾流的小气泡共同构成气泡群. 由于气泡群无法为上方流体提供足够的动能以维持其上升,导致上方液体回流,直至获得足够的推动力后才会重新上升. 因此,搅拌流呈现为气液混合的振荡运动,是一种局部且暂时性的非连续流态. 搅拌流发展 I、II、III 如图 4(c)、(d)、(e)所示.

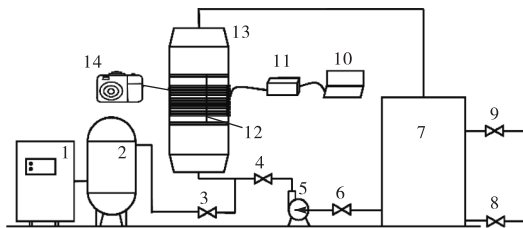
间歇流的显著特征是气液两相交替上升,通常出现在液体流量较低而气体流量较高时. 随着气体含量的显著增加,超大气泡或大气泡聚集体会形成. 由于推动力不足,回流现象随之发生. 在此状态下,气体能量充足,流动过程中并未表现出液体的振荡,而是呈现出气液交替上升的特征. 间歇流可视为搅拌流的完全发展阶段,是一种非连续性流动状态,如图



1—空气压缩机; 2—空气储罐; 3—实验测试段; 4—高速摄影机; 5—离心泵; 6—水箱

图 1 空气-水两相流水洞实验系统

Fig.1 Air-liquid two-phase flow cavitation tunnel experimental system



1—空气压缩机; 2—空气储罐; 3—气路调节阀; 4—液路调节阀; 5—离心泵; 6—控制阀; 7—水箱; 8—水箱排水阀; 9—水箱入口阀; 10—电脑; 11—电子扫描阀; 12—隔板; 13—实验测试段; 14—高速摄影机

图 2 空气-水两相流水洞实验系统流程

Fig.2 Schematic of the air-liquid two-phase flow cavitation tunnel experimental system



图 3 实验测试管

Fig.3 Experimental test tube

4(f)所示。

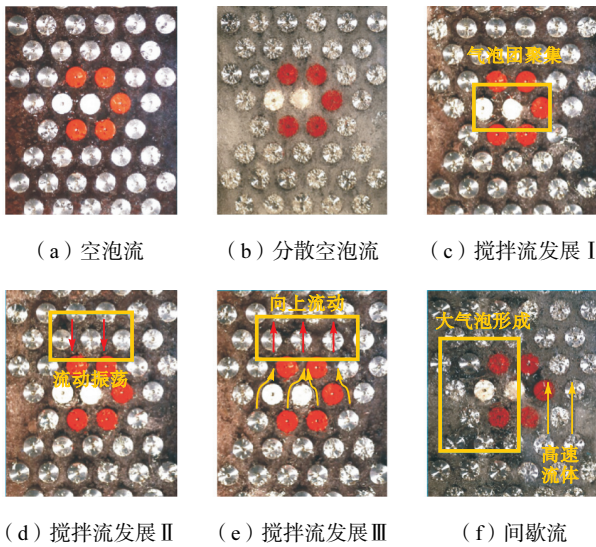


图4 垂直横流水平管束间两相流型视觉识别图

Fig.4 Visual identification diagram of two-phase flow regimes in vertical cross-flow horizontal tube bundles

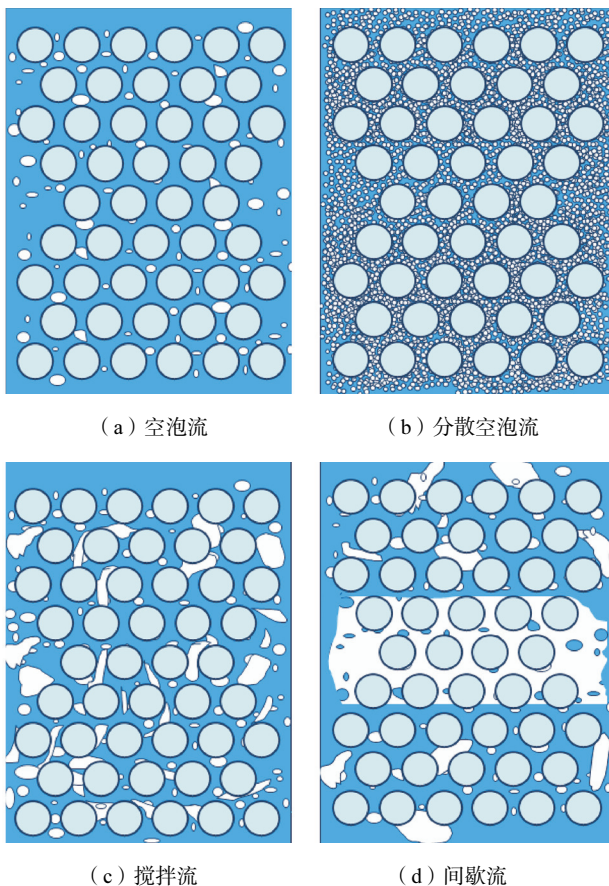


图5 垂直横流水平管束间两相流型示意

Fig.5 Schematic of two-phase flow regimes in vertical cross-flow horizontal tube bundles

3.2 基于管周压力的小波分析流型识别

本文提出了一种基于局部压力测量的新方法，通

过对圆管周向压力进行小波分析以识别两相流型，从而提高对流动形态的识别能力。本文针对两相流横掠水平管束，基于小波分析各尺度时程脉动压力分量与小波能量占比反映不同流型下脉动压力的作用特征。管周脉动压力小波分析能量分布伴随着流型的变化而变化，根本上来讲，这种变化是基于气泡及气泡群与液体的混合以及运动状态的体现。在两相流体信号的主振频带范围内，时域信号成分增多，归一化能量也相对较大。基于这两个压力信号的特征，对两相流的多尺度压力信号及其对应的归一化能量信号进行分析以确定流动形态。

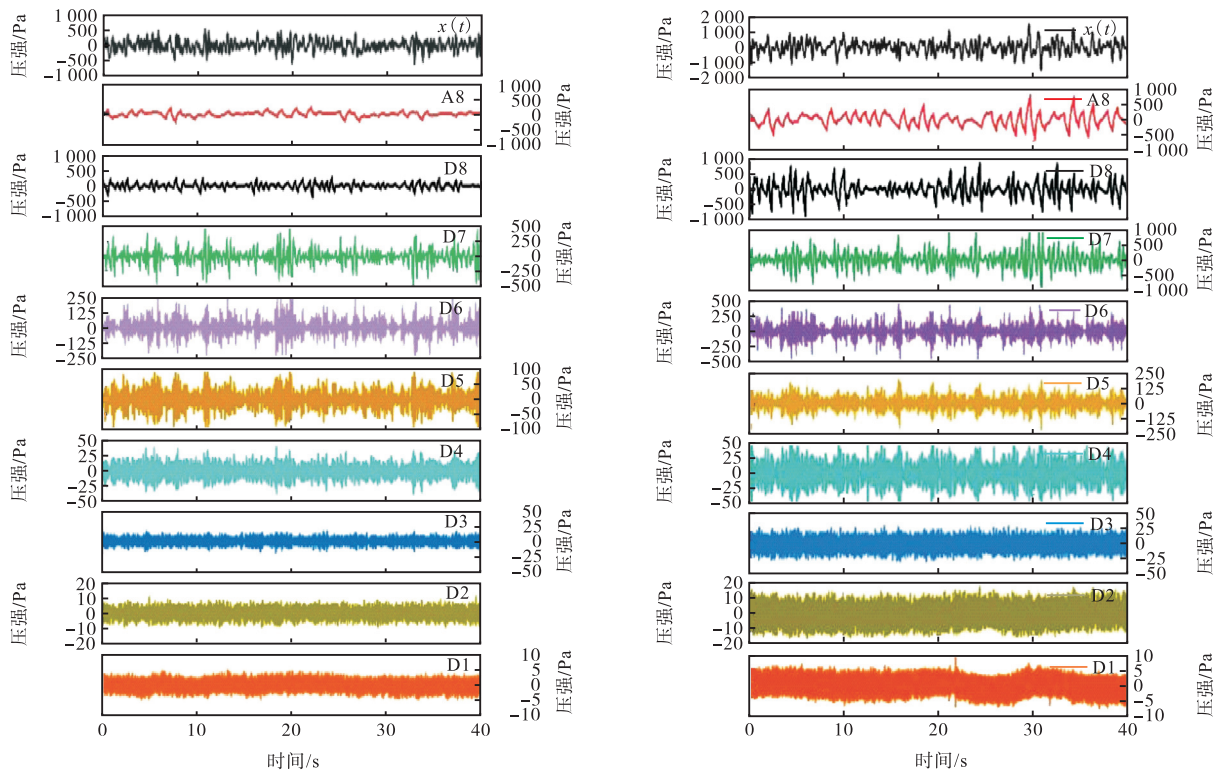
由于两相流动中的压力波动属于非平稳信号，且其波动特征受到空气流量和液体流量的共同影响，特别关注压力信号的波动和周期性特征。为此，对压力扫描阀采集的16个点的压力信号进行均方根计算和去趋势处理，并采用 Daubechies 小波进行多分辨率小波分析，图6为管周压力小波分析流程。考虑到空气-水流动中压力波动信号的频率较低，以及不同流型的压力波动特征频带较为接近，本研究设置了8个尺度以分解压力波动信号，从而获得更精确的分析效果。提取的分解结果包括近似分量 A8(频带范围：0~0.977 Hz)和细节分量 D8(频带范围：0.977~1.953 Hz)、D7(频带范围：1.953~3.906 Hz)、D6(频带范围：3.906~7.813 Hz)、D5(频带范围：7.813~15.625 Hz)、D4(频带范围：15.625~31.250 Hz)、D3(频带范围：31.250~62.500 Hz)、D2(频带范围：62.500~125.000 Hz)及 D1(频带范围：125.000~250.000 Hz)，用于进一步分析压力波动特征与流型的关系。不同流型压力信号的多尺度分解结果如图7所示。通过计算不同尺度信号的能量并进行归一化，分析了不同流型的频带能量分布特征，如图8所示。



图6 小波分析流程

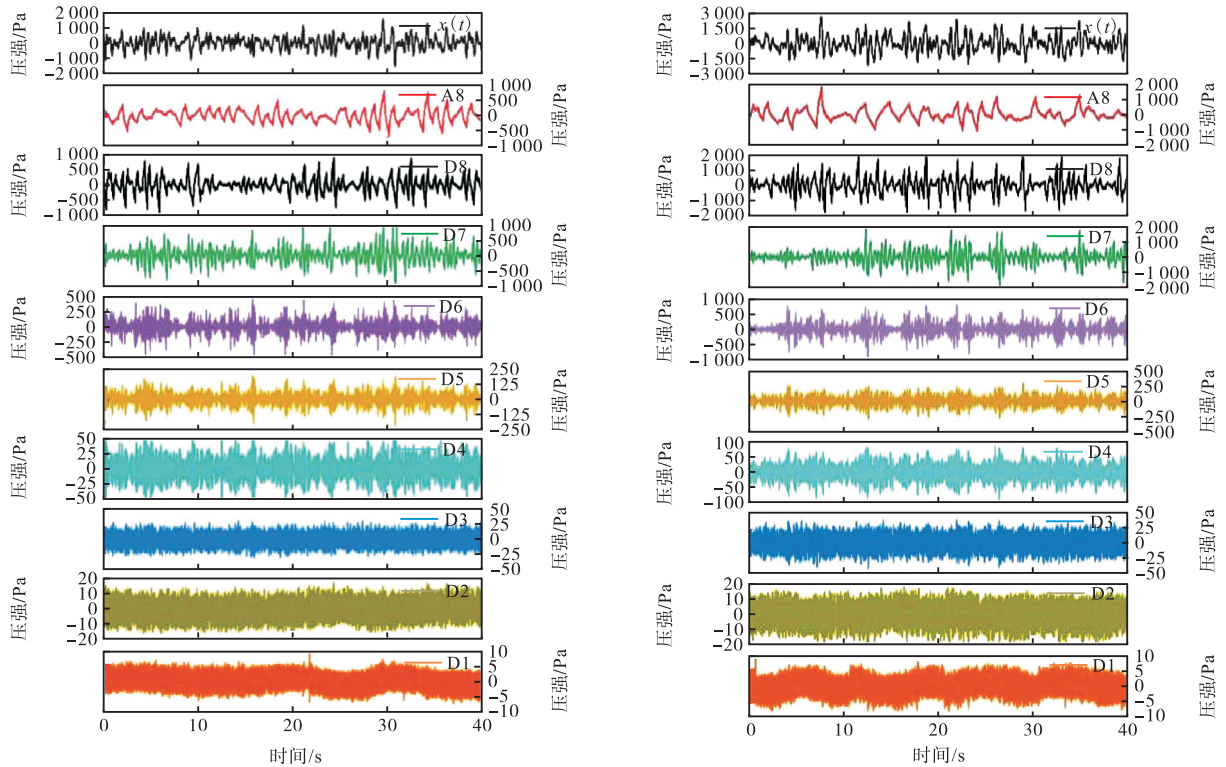
Fig.6 Flow chart of wavelet analysis

图7(a)显示了空泡流状态下管周脉动压力各尺度时程信号。A8尺度反映空泡流整体流动平稳，无显著大尺度周期性运动；D8尺度反映气泡群整体上升速度的缓慢波动(如气泡受浮力与阻力平衡时的低频振荡)；D7尺度对应小尺度气泡尾流涡旋脱落或气泡与管壁的瞬时碰撞；D6~D1尺度主要反映与气泡随



(a) 空泡流 ($u_l = 0.119 \text{ m/s}, u_g = 0.079 \text{ m/s}$)

(b) 分散空泡流 ($u_l = 1.110 \text{ m/s}, u_g = 0.436 \text{ m/s}$)



(c) 搅拌流 ($u_l = 0.238 \text{ m/s}, u_g = 0.231 \text{ m/s}$)

(d) 间歇流 ($u_l = 0.238 \text{ m/s}, u_g = 1.347 \text{ m/s}$)

图 7 不同流型多尺度时域子信号特征

Fig.7 Time-domain subsignals at various scales under different flow regimes

机运动相关的微观结构的运动. 图 8(a) 显示了空泡流状态下管周脉动压力各尺度归一化能量占比. 低

气体流量下, 稀疏气泡独立上升时, 小气泡的快速变形、破裂或局部碰撞会引发高频压力波动, 除此之外

其尾流中周期性生成的小尺度涡旋脱落频率也较高, 能量集中于 D7 尺度, 归一化能量占比 45%.

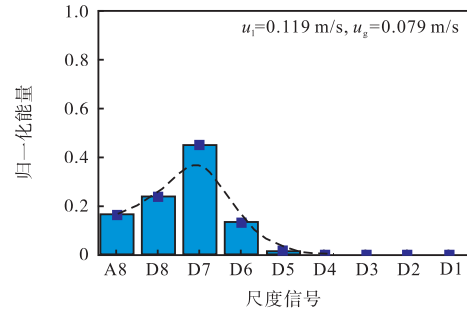
图 7(b) 则为分散空泡流状态下管周脉动压力各尺度时程信号. 高速液流下, A8 尺度对应分散空泡流中的大尺度湍流结构; D8 和 D7 反映高速上升的均匀小气泡和液流带来的压力波动和小尺度涡旋运动与脱落; D6 ~ D1 尺度为主要反映与气泡随机运动相关的微观结构的运动. 图 8(b) 显示了分散空泡流状态下管周脉动压力各尺度归一化能量占比. A8 尺度归一化能量占比高达 65%, 形成脉动压力的主导尺度. 高速液流使气泡细小且稳定, 流动趋于均质化, 能量集中于大尺度流动结构, 小尺度扰动被湍流部分淹没.

图 7(c) 则为搅拌流状态下管周脉动压力各尺度时程信号. D8 尺度反映搅拌流中气泡群上升受阻引发的周期性回流; A8 尺度反映搅拌流依然存在较平稳的压力波动, 相对于空泡流增加了气液振荡带来的波动影响; D7 尺度对应小气泡的相互作用及尾流涡旋的脱落; D6 ~ D1 尺度为主要反映与气泡随机运动相关的微观结构的运动. 图 8(c) 显示了搅拌流状态下管周脉动压力各尺度归一化能量占比. D8 与 D7 归一化能量总和占比高达 73%, 搅拌流状态下气液混合作用加强, 大尺度的气液振荡与小气泡之间的相互作用及小尺度涡旋脱落占据主导, 两相流压力脉动能量向中高频传递.

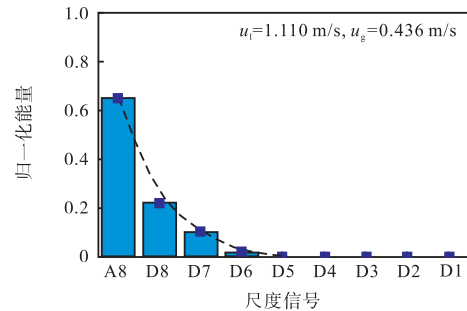
图 7(d) 则为间歇流状态下管周脉动压力各尺度时程信号. D8 尺度对应气塞周期性堵塞与释放; A8 尺度反映间歇流依然存在较平稳的压力波动, 相对于空泡流增加了气液交替上升的宏观间歇性的影响; D7 尺度对应大气泡破裂或大气泡尾流的瞬态扰动; D6 ~ D1 尺度为主要反映与气泡随机运动相关的微观结构的运动. 图 8(d) 显示了间歇流状态下管周脉动压力各尺度归一化能量占比. D8 归一化能量占比高达 50%, A8 和 D7 归一化能量分别占比 25%. 间歇流动下由于大气泡聚集体主导流动, 能量集中于低频周期性运动, 高频扰动仅由局部瞬态事件贡献. 由于搅拌流和间歇流属于非连续流动形态, 因此在 D2 和 D1 高频带区域, 它们相较于连续流动形态表现出不平稳的特性.

压力脉动特征与两相流体流动状态紧密相关, 总的来说, 空泡流小尺度涡旋结构的快速生成和耗散过程产生高频压力波动, 而分散空泡流湍流作用更大, 大尺度涡旋结构的脱落与运动频率较低, 更高的流动速度减少了流动分离和涡脱落的剧烈程度, 因此分散

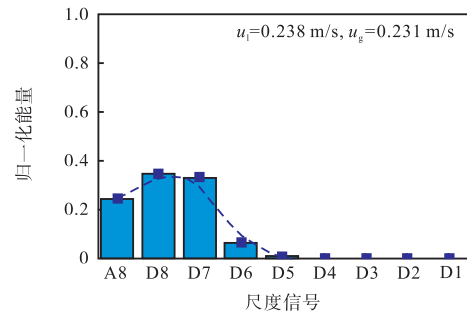
空泡流的压力波动能量集中在低频范围. 搅拌流与间歇流两种流动状态下气水相互作用的增强以及大尺度流动结构的主导使得能量向 D8 与 D7 尺度转移. 压力脉动能量分布与两相流湍流涡旋尺度、单气泡的运动及气液两相的整体运动状态直接相关, 流速



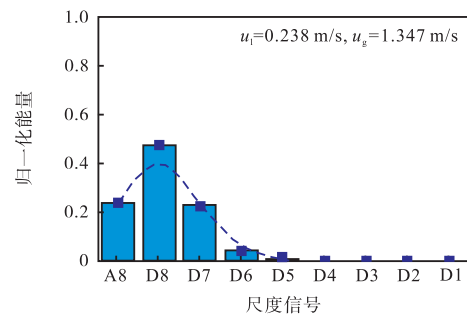
(a) 空泡流



(b) 分散空泡流



(c) 搅拌流



(d) 间歇流

图 8 不同流型各尺度子信号归一化能量分布
Fig.8 Normalized energy of the subsignals at each scale for different flow regimes

差异通过改变湍流结构和气泡相互作用模式,最终导致频带能量分布的显著不同.

3.3 两相流型图

两相流型识别实验设置气相表观流速 u_g 范围为 0.03 ~ 1.59 m/s, 液相表观流速 u_l 范围为 0.08 ~ 1.59 m/s, 基于节径比为 1.483 正三角形排布管束间不同流动条件下的空气-水两相流型的高速摄影录像以及流场脉动压力的小波分析结果对两相流型进行综合性识别, 对流型识别实验点划分为空泡流、搅拌流、间歇流以及分散空泡流, 进而在以气相表观流速为横轴、液相表观流速为纵轴的对数坐标系内绘制流型过渡边界得到节径比为 1.483 正三角形排布管束间空气-水两相流型图, 如图 9 所示.

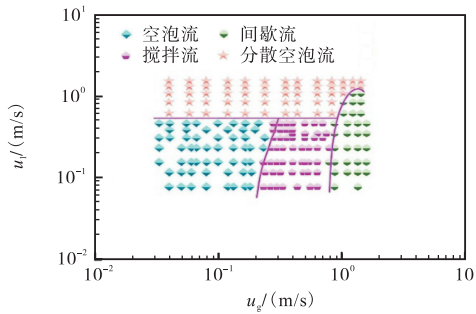
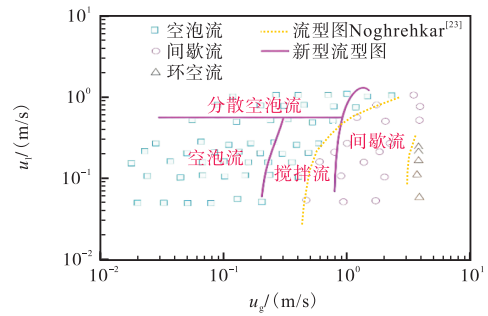


图 9 $P/D = 1.483$ 正三角形排列管束内空气-水两相流型图
Fig.9 Flow regime map for air-liquid flow in an equilateral triangular tube bundle with $P/D = 1.483$

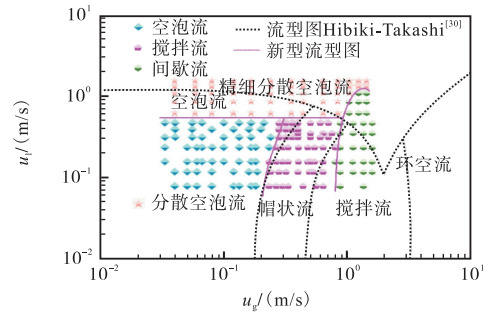
在 Jones 等^[36]指出搅拌流和间歇流的局部含气率概率密度函数结果均呈现双峰特性的研究基础上, Noghrehkar 等^[23]通过对两相流局部含气率的概率密度函数分析结果对两相流型进行了识别, 图 10(a) 为 Noghrehkar 等^[23]开发的流型图. 但是基于局部含气率的概率密度函数分析方法无法进行连续流态和非连续流态的过渡流型即搅拌流的识别. 此外, 此方法仅能在完全发展的流动形态下表达出明显的信号峰值特征来进行流型识别, 因此获得的流型过渡边界相对于实际流型转变边界条件存在迟滞. 小波分析通过多尺度分解提取信号中的不同频率成分, 有效识别流型转变的局部特征, 并提供时域和频域的深刻洞察. 本研究结合流态录像与流场压力小波分析的流型识别系统, 可及时精确地识别搅拌流与空泡流及间歇流之间的过渡边界, 弥补了 Noghrehkar 等^[23]流型图识别精度低的不足. 由于实验设备的限制, 本研究未观察到环空流的出现.

在 Mao 等^[30]的研究中帽状空泡流被定义为小气泡和大气泡混合流动的状态, 而搅拌流则被定义为气液混合物的混沌运动. 这一流型的定义与本研究中

的流型定义有所不同. 在本研究中, 实验观察到的小气泡和大气泡混合流动形成气泡群, 导致局部混合流体因推动力不足而出现振荡现象, 因此可以认为该研究中的帽状流对应于本研究中的搅拌流. 同时, 气液混合物的混沌运动是完全发展非连续流的典型特征, 这与本研究中的间歇流相符. Mao 等^[30]的研究基于流态转变机制和气泡相互作用的宏观假设, 发展了流态过渡边界模型. 然而, 由于管外两相流和环境结构的复杂性, 过渡边界存在偏差. 如图 10(b) 所示, 本研究获得的空泡流与搅拌流、搅拌流与间歇流的过渡边界与 Mao 等^[30]研究中的空泡流与帽状流、帽状流与搅拌流的过渡边界存在偏差. 相较之下, 本研究中的分散空泡流出现在较低液体表观流速条件下. 基于均相流模型, 本研究中的分散空泡流的含气率范围为 5% ~ 57%, 这一结果与 Taitel 等^[16]对强湍流作用下气泡抑制效应的研究相符. 此外, 通过高速摄影, 本研究在实验条件下也观察到了分散空泡流. 综合来看, 本研究对分散空泡流过渡边界的确定具有较高的准确性和科学性.



(a) 与文献[23]流型对比



(b) 与文献[30]流型对比

图 10 新型流型图与既有流型图的对比研究

Fig.10 Comparison of the newly developed flow regime map with existing flow regime maps

4 结 论

基于空气-水两相流水洞实验, 本研究针对垂向上逆重力场中正三角形排列 ($P/D = 1.483$) 换热器

管束的流型识别难题,开发了高速摄影与管周压力小波分析协同的流型识别系统,重点突破以下关键问题。

(1) 流型种类准确识别:结合文献定义,明确识别并界定管束间4种流型,即空泡流、分散空泡流、搅拌流与间歇流,精准获取其过渡边界。

(2) 过渡边界及时性提升:通过管周压力小波分析提取瞬态流动特征,克服传统含气率概率密度函数分析的模糊性,显著提升流型边界识别的时效性。

(3) 流动形态真实性保障:采用高速摄影捕捉宏观流型演变,结合压力信号双重验证,精确界定离散空泡流边界并揭示管外流动对相间作用的影响,经150组实验验证可有效区分搅拌流与间歇流的动态特征,确保识别结果与真实流动形态高度吻合。

(4) 系统先进性突破:融合宏观图像与微观瞬态信号解析能力,为复杂环境下的两相流动机理研究及管束间流场动态特性分析提供创新性技术路径与表征手段。

参考文献:

- [1] Pettigrew M J, Taylor C E. Vibration analysis of shell-and-tube heat exchangers: An overview—Part 2: Vibration response, fretting-wear, guidelines[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, 18(5): 485-500.
- [2] Bassols J, Kuckelkorn B, Langreck J, et al. Trigeneneration in the food industry[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(6): 595-602.
- [3] Mousa M H, Miljkovic N, Nawaz K. Review of heat transfer enhancement techniques for single phase flows [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110566.
- [4] Paidoussis M P, Price S J, Delangre E. *Fluid-Structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [5] Khalifa A. *Fluidelastic Instability in Heat Exchanger Tube Arrays*[D]. Hamilton: McMaster University, 2012.
- [6] Darwish S, Mureithi N, Hadji A, et al. Experimental investigation of fluidelastic instability of a rotated square array subjected to two-phase and air cross-flow[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 404: 112155.
- [7] Taylor C, Pettigrew M J. Effect of flow regime and void fraction on tube bundle vibration[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2001, 123(4): 407-417.
- [8] Pettigrew M J, Taylor C E. Two-phase flow-induced vibration: An overview (survey paper) [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1994, 116(3): 233-253.
- [9] Pettigrew M J, Tromp J H, Taylor C E, et al. Vibration of tube bundles in two-phase cross-flow: Part 2—Fluid-elastic instability[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1989, 111(4): 478-487.
- [10] Shahab K, Zaffar M, Malik M. A review of heat exchanger tube bundle vibrations in two-phase cross-flow [J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2004, 230: 233-251.
- [11] Green S J, Hetsroni G. PWR steam generators[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21: 1-97.
- [12] Wang D Y, Jin N D, Zhai L S, et al. Characterizing flow instability in oil-gas-water three-phase flow using multi-channel conductance sensor signals[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 386: 121237.
- [13] Elperin T, Klochko M. Flow regime identification in a two-phase flow using wavelet transform[J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 32(6): 674-682.
- [14] Yuan P, Deng J, Pan L M, et al. Air-water two-phase flow regime and transition criteria in vertical upward narrow rectangular channels[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, 136: 103750.
- [15] Li X C, Wei T, Wang D X, et al. Study of gas liquid two-phase flow patterns of self-excited dust scrubbers [J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 151: 79-92.
- [16] Taitel Y, Barnea D, Dukler A. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas liquid flow in vertical tubes[J]. *AIChE Journal*, 1980, 26(3): 345-354.
- [17] Zou S F, Guo L J, Yao T. Upstream-flow-based mechanisms for global flow regime transition of gas/liquid two-phase flow in pipeline-riser systems[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 240: 116542.
- [18] Montoya G, Lucas D, Baglietto E, et al. A review on mechanisms and models for the churn-turbulent flow regime[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 141: 86-103.
- [19] Lokanathan M, Hibiki T. Flow regime, void fraction and interfacial area transport and characteristics of co-current downward two-phase flow[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 307: 39-63.
- [20] Feenstra P, Sawadogo T, Smith B, et al. Investigations of in-plane fluidelastic instability in a multispan u-bend tube array—Part II: Tests in two-phase flow[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2023, 145(2): 021402.

- [21] Julia J E, Hibiki T, Ishii M. Two-phase flow regime identification methodologies in thermal-hydraulic applications[J]. *Advances in Multiphase Flow and Heat Transfer*, 2009, 1: 93-112.
- [22] Mi Y, Ishii M, Tsoukalas L. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2001, 204(1/2/3): 87-100.
- [23] Noghrehkar G, Kawaji M, Chan A. Investigation of two-phase flow regimes in tube bundles under cross-flow conditions[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, 25(5): 857-874.
- [24] Grant I, Chisholm D. Two-phase flow on the shell-side of a segmentally baffled shell-and-tube heat exchanger [J]. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 1979, 101(1): 38-42.
- [25] Xu G P, Tso C P, Tou K W. Hydrodynamics of two-phase flow in vertical up and down-flow across a horizontal tube bundle[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1998, 24(8): 1317-1342.
- [26] Ulbrich R, Mewes D. Vertical, upward gas-liquid two-phase flow across a tube bundle[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1994, 20(2): 249-272.
- [27] van Rooyen E. *Boiling on a Tube Bundle: Heat Transfer, Pressure Drop and Flow Patterns*[D]: Lausanne: EPFL, 2011.
- [28] Hong W P, Teng F Y. The flow pattern and differential pressure fluctuations of transition flow across tube bundles[J]. *Energy Procedia*, 2012, 17: 1507-1512.
- [29] Kanizawa F T, Ribatski G. Two-phase flow patterns across triangular tube bundles for air water upward flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 80: 43-56.
- [30] Mao K Y, Hibiki T. Flow regime transition criteria for upward two-phase cross-flow in horizontal tube bundles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1533-1546.
- [31] de Kerret F, Beguin C, Etienne S. Two-phase flow pattern identification in a tube bundle based on void fraction and pressure measurements, with emphasis on churn flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 94: 94-106.
- [32] Zhang K, Hou Y D, Tian W X, et al. Flow pattern effect on two-phase pressure drops in vertical upward flow across a horizontal tube bundle[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, 120: 253-264.
- [33] Wang T, Liu Z H, Gui M, et al. Flow regime identification of steam-water two-phase flow using optical probes, based on local parameters in vertical tube bundles[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 79: 101928.
- [34] Zhao C Y, Yao Z L, Qi D, et al. Intercolumn two-phase flow patterns across falling film tube bundles[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35: 075113.
- [35] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [36] Jones O C Jr, Zuber N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1975, 2(3): 273-306.

(责任编辑:田 军)