

文章编号:0253-4339(2026)02-0139-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250225002

水平管道内液固两相流流动流型动态识别方法

朱俊亮¹ 赵志锋² 王树刚² 蒋爽³

(1 广州地铁设计院施工图咨询有限公司 广州 510410; 2 大连理工大学建设工程学院 大连 116024;
3 大连民族大学土木工程学院 大连 116600)

摘要 液固两相流的自然现象极为常见,与人类的各种生产、生活过程息息相关。为避免管道内发生堵塞,获取管道内液固两相流的流型对于校正实时流量和确保整个系统运行安全非常重要。基于动态模态分解(DMD)算法,结合预处理措施,对液固两相流的流型进行重构,并搭建实验台对结果进行验证,采用相对误差评价了重构效果。研究表明:基于DMD的液固两相流流型的识别方法所得到的还原流型与真实流型虽存在一定的差异,但误差处于可接受范围,能够较为客观地反映液固两相流流型演变过程。相较于实验法和数值模拟的方法,基于DMD的液固两相流流型的识别方法在数据处理、精度、效率和适用性方面具有显著优势,并且不受限于特定场景,无需提供数据的内在逻辑,可同时获得具有单一频率和增长率的模态和构建降阶动力学模型,节省计算资源。

关键词 液固两相流;流型识别;动态模态分解;流体力学

中图分类号: TB61⁺1; TQ021.1

文献标识码: A

Dynamic Identification Method for Flow Patterns of Liquid-Solid Two-Phase Flow in Horizontal Pipelines

Zhu Junliang¹ Zhao Zhifeng² Wang Shugang² Jiang Shuang³

(1. Guangzhou Metro Design Institute Construction Drawing Consulting Co., Ltd., Guangzhou, 510410, China; 2. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China; 3. College of Civil Engineering, Dalian Minzu University, Dalian, 116600, China)

Abstract The natural phenomenon of liquid-solid two-phase flow is exceptionally common and closely related to various human production and life processes. Obtaining the flow pattern of the liquid-solid two-phase flow in pipelines is crucial for correcting real-time flow rates and ensuring the safe operation of the entire system to prevent obstructions. This study used the dynamic mode decomposition (DMD) algorithm combined with a series of preprocessing measures to reconstruct the flow pattern of a liquid-solid two-phase flow. An experimental platform was constructed to verify the results. The reconstruction effect was evaluated using the relative error. The research results indicate that although certain differences existed between the reconstructed liquid-solid two-phase flow patterns obtained by the DMD-based identification method and the true flow pattern, the differences were within a reasonable range and can objectively reflect the evolution process of the liquid-solid two-phase flow patterns. Compared with experimental and numerical simulation methods, the method for identifying liquid-solid two-phase flow patterns based on the DMD has significant advantages in terms of data processing, accuracy, efficiency, and applicability. It is not limited to specific scenarios, without the need to provide the inherent logic of data, and can simultaneously obtain modes with a single frequency and growth rate and construct reduced-order dynamic models. Thereby, it saves computational resources.

Keywords liquid-solid two-phase flow; flow pattern identification; dynamic mode decomposition; fluid mechanics

液固两相流不仅在自然现象中常见,而且广泛应用于工业生产中,如深海采矿中管道内部流动^[1]、循环流化床反应中二元液固两相流^[2]、食品工业中的冰浆输送^[3]等。为了更好地理解液固两相流的流动

机理,许多学者通过实验或数值模拟的方式对两相流的速度场、颗粒浓度分布特征、压降变化规律和流型开展研究。不同流型对应的物理场特征不同,及时获取液固两相流流型对于校正实时流量和确保系

基金项目:国家自然科学基金(52378090)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52378090).)

收稿日期:2025-02-25;修回日期:2025-03-10;录用日期:2025-04-15

统安全运行非常重要。因此,针对液固两相流的流型研究成为新热点。

相比于单相流,液固两相流的流型分类更为复杂。根据不同的流动结构形态,液固两相流分为悬浮流、移动床和固定床3种类型^[4],悬浮流又可分为均质流和非均质流^[5]。均质流特点是颗粒在管道横截面上均匀分布;非均质流特点是颗粒在管道横截面上非均匀分布。随着流速的降低或颗粒直径的增大,颗粒逐渐堆积在管道上方或下方,形成移动床或固定床^[6]。除了颗粒浓度分布和速度的不同,不同的流型对应的压降也会不同^[7]。当流型为移动床或固定床时,极易发生管道堵塞。因此,识别液固两相流的流型以避免系统运行时出现这2种流型非常重要。

现有的流型识别方法分为直接法和间接法2类。直接法是利用高速摄像机拍摄可视化管段内两相流的流型。T. Hirochi等^[6]利用高速摄像机拍摄了不同流速的冰水两相流的流动状态,并识别出3种流型:分散流、簇状流和柱状流。朱春英等^[8]利用高速摄像机观测了环乙烷-水液液两相流的流型,观测到滴状流、弹状流和平行流3种流型。直接法识别两相流流型的优点是简单、直观,缺点是具有主观性。间接法是通过分析不同工况下的两相流的压力信号、电压信号等数据特征识别出不同的流型。Bai Landi等^[9]基于不同工况下输出电压波形的特征,识别出在内径为125 mm的圆管道垂直向上流动的油水两相流的不同流型。史雪薇等^[10]提出一种采用单模态电导传感器对气液两相流流型识别的方法,识别了分层流、波状流、泡状流、塞状流、弹状流和环状流6种流型。除了对采集到的数据进行分析外,也可直接分析得到的流型图片以提取特征。Nie Feng等^[11]提出一种基于卷积神经网络(CNN, convolutional neural network)算法的流型分类新方法,实现了对气液两相流流型的自动客观识别。利用间接法识别两相流流型的优点是不具有主观性,缺点是系统设计复杂,设备昂贵,识别准确性受测量误差、计算模型、信号质量等影响。

动态模态分解(DMD, dynamic mode decomposition)是一种数据驱动的降阶模型算法,无需知道数据的底层逻辑,广泛应用于数值模拟或实验数据的分析中以提取流动现象中潜在的相干结构。Li Danan等^[12]利用DMD分析了气固两相流中固相体积分、固相速度等物理场中潜在的时空相干结构。C. Spurin等^[13]利用DMD分析了多孔介质中的饱和度数据,并利用部分模态重现了饱和度数据。DMD不仅可以应用于数值模拟或实验数据中,同样可以应用

于流型分析中。E. M. Ramos等^[14]利用动态模态分解分析了水平圆管内气液两相流的流型演变过程,并在新的空间上对原始流型图片进行了还原。P. Sashittal等^[15]利用动态模态分解对气液两相流流型进行了模态分析,并在低维空间上重构和预测了气液两相流的流型。利用DMD进行流型分析的优点是计算复杂度低^[14]、可以在低维空间上重现高维数据。

综上,现有的针对液固两相流流型的研究,由于流型图片的复杂性和多样性、相关算法的复杂性及对大量数据的要求,关于直接利用图片数据和基于DMD进行流型重构的研究工作非常少。本文首先通过直接观察的方法判断来流速度逐渐降低时,液固两相流流型的演变过程,之后利用Matlab获取图片像素点上的颜色值构建快照序列,利用DMD对快照序列进行分析,并分析得到的模态信息,针对液固两相流的流型进行重构,采用相对误差评价重构效果,重构流型十分接近实际流型,研究成果可提高液固两相流流型识别效率,节省计算资源。

1 数学模型

1.1 基于相似变换矩阵的DMD方法

DMD是基于数据驱动降阶的模型降阶算法,无需知道数据的底层逻辑。在对通过数值模拟或实验获得的数据进行DMD分析之前,需要对数据进行预处理。假设有1~ N 时刻的流场数据,将每个时刻的数据储存在列向量中并依次排列形成快照矩阵:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\} \quad (1)$$

其中, x_i 表示第*i*时刻的流场数据,相邻流场的时间间隔均为 Δt 。

再将快照矩阵拆分为2个快照矩阵:

$$X_1 = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N-1}\} \quad (2)$$

$$X_2 = \{x_2, x_3, x_4, \dots, x_N\} \quad (3)$$

DMD的基本思想是认为存在系统矩阵*A*,满足如下关系式:

$$X_2 = \{x_2, x_3, x_4, \dots, x_N\} = AX_1 = \{Ax_1, Ax_2, Ax_3, \dots, Ax_{N-1}\} \quad (4)$$

即 $x_{i+1}=Ax_i$,下一个时刻的流场数据可以用系统矩阵和上一个时刻的流场数据表示。

由于系统矩阵*A*的维度过高,直接求解存在困难,因此下面介绍基于相似变换矩阵的求解方法^[16]。

首先,对矩阵 X_1 进行奇异值分解^[17]:

$$X_1 = U\Sigma V^H \quad (5)$$

其中,*U*和*V*为酉矩阵,*H*表示共轭转置,满足 $UU^H=I$,

$VV^H=I, \Sigma$ 为对角矩阵, 其对角线元素为矩阵 X_1 的奇异值。在奇异值分解过程中, 可以只保留部分奇异值从而减少数值噪声。

将式(5)代入式(4)中, 得到系统矩阵的相似矩阵:

$$\tilde{A} = U^H X_2 V \Sigma^{-1} = U^H A U \quad (6)$$

对相似矩阵 \tilde{A} 进行特征值分解:

$$\tilde{A} = W \Lambda W^{-1}, \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N-1}) \quad (7)$$

其中, W 是一个以列向量为特征向量 w_j 的矩阵; Λ 为对角线包含 \tilde{A} 特征值的对角矩阵。

第 j 个模态对应的增长率 g_j 和频率 ω_j 为^[18]:

$$g_j = \text{Re}[\ln(\lambda_j)] / \Delta t \quad (8)$$

$$\omega_j = \text{Im}[\ln(\lambda_j)] / (2\pi\Delta t) \quad (9)$$

式中: Re, Im 分别表示复数的实部与虚部。

结合式(4)、式(6)和式(7), 可得:

$$x_{i+1} = A x_i = U \tilde{A} U^H x_i = U W \Lambda W^{-1} U^H x_i = U W \Lambda^i W^{-1} U^H x_i \quad (10)$$

DMD 模态的计算式如下^[19]:

$$\Phi = X_2 V \Sigma^{-1} W \quad (11)$$

DMD 模态的另一种计算方式^[16]为 $\Phi = U W$, 当矩阵 X_1 和 X_2 的列空间相同时, 2 种计算方式是等效的。

标准 DMD 是按模态的振幅对模态进行排序, 模态振幅的计算式如下:

$$\alpha = W^{-1} U^H x_i \quad (12)$$

结合式(10)~式(12), 取前 m 个模态对流场进行重构:

$$x_i = \Phi \Lambda^{i-1} \alpha = \sum_{j=1}^m \Phi_j (\lambda_j)^{i-1} \alpha_j \quad (13)$$

1.2 基于 DMD 的流型识别方法

基于 DMD 的流型识别方法流程图和示意图分别如图 1、图 2 所示。

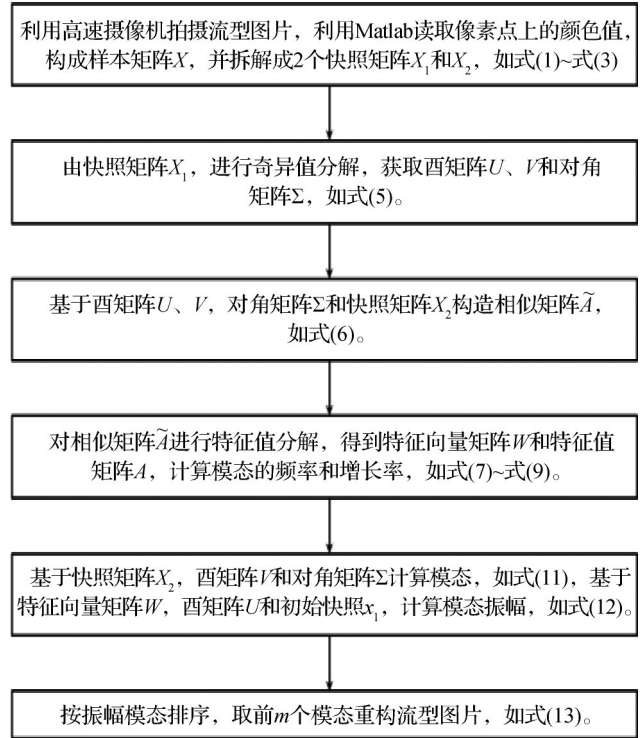


图 1 基于 DMD 的流型识别方法流程图

Fig.1 Flowchart of the flow pattern identification method based on DMD

2 实验测试

图 3 所示为液固两相流流型测试实验原理。实验装置由 3 部分组成, 分别为制备储存系统、管路输送系统和数据采集系统。制备储存系统由存储罐和电动搅拌器组成; 管路输送系统由变频浆料泵、球阀、DN20 不锈钢管件、DN20 可视化直管件组成; 数据采集系统由质量流量计、差压变送器、数据采集仪和高速相机组成。实验测试设备的详细信息如表 1 所示。组成液固两相流的固相、液相材料的具体参数如表 2 所示。聚乙烯颗粒的平均直径为 0.000 23 m,

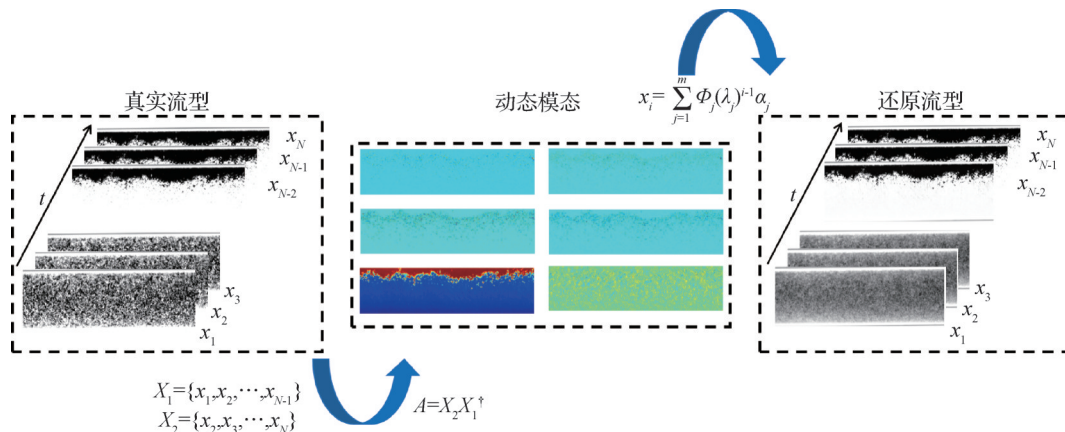


图 2 基于 DMD 的流型识别方法

Fig.2 The flow pattern identification method based on DMD

其电镜扫描图像及粒径分布如图 4 所示。

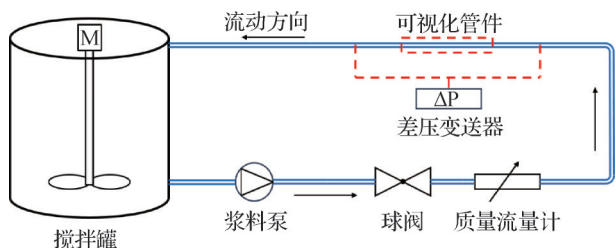


图 3 实验原理

Fig.3 Experimental principle

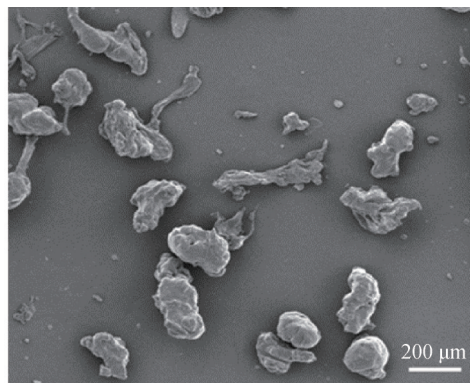
实验过程中的测试参数包括液固两相流的密度、质量流量、压差和流型。实验过程中采用的液固两相流的质量分数为 3%，密度为 995.66 kg/m^3 ，因为若采用更高的质量分数，液固两相流在直径为 20 mm 的水平圆管内流型演变不明显。

实验步骤如下：首先配置质量分数为 3% 的液固两相流，调节泵的速率使入口流速为 2 m/s ，待系统运行稳定，关闭泵的同时开启高速摄像机，记录液固两相流在可视化直管件的流型演化，待流型呈稳定的固定床后关闭高速摄像机。为了使拍摄的流型图片更加清晰，采用 LED 光源对可视化直管件进行打光。当关闭泵时，直管件的流量随时间的变化如图 5 所示，图中的红色虚线表示拍摄开始和结束时刻，从开始至结束的拍摄时长为 22.4 s 。高速摄像机的曝光时间为 $1 \mu\text{s}$ ，帧数设置为 100 fps ，像素为 1280×800 。用于 DMD 分析的流型图片包括采集的整个时间段，相邻图片的时间间隔为 0.02 s 。

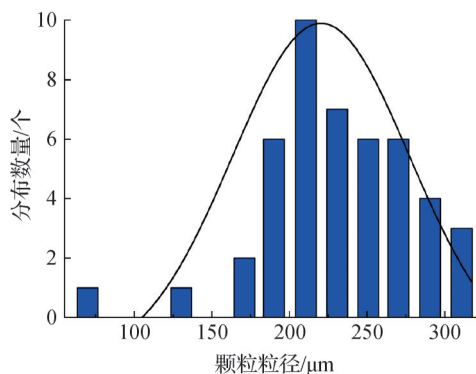
3 结果和讨论

3.1 水平直管件流型结果分析

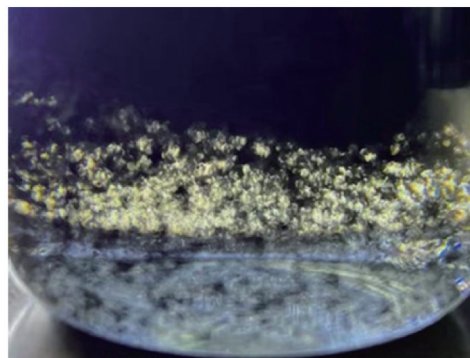
以拍摄开始的时刻作为初始时刻，直管流型演变图如图 6 所示，可以看到，当入口流量逐渐降低时，液固两相流的流型从均质流变为非均质流，最后变



(a) 聚乙烯颗粒电镜扫描



(b) 聚乙烯颗粒粒径分布



(c) 浆液

图 4 聚乙烯颗粒和浆液

Fig.4 Polyethylene particles and slurry

为移动床、固定床。当来流速度较大时，由于湍流掺混作用，颗粒和水呈混合均匀的状态，速度逐渐变小

表 1 实验测试设备

Tab.1 Experimental testing equipment

设备名称	型号	量程	精度	生产厂家
科氏流量计	RCCT36	0~9 t/h	$\pm 0.1\%$	YOKOGAWA
		0~5 kPa	$\pm 0.075\%$	
差压变送器	PCM950A	0~20 kPa	$\pm 0.075\%$	苏州轩胜仪表
		0~100 kPa	$\pm 0.075\%$	
数据采集仪	DAQ6510			Keithley
浆液泵	20-RXB-PG-1.5	流量 $0.3 \sim 2 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 20 m		上海亚泉泵业
高速相机	T2410	分辨率 1280×800 曝光时间最低 190 ns		PHANTOM

表 2 固相和液相材料物理属性

Tab.2 Physical properties of solid-phase and liquid-phase materials

材料	密度/(kg/m ³)	黏度/[kg/(m·s)]
聚乙烯颗粒	920	0.004 14
自来水	998.2	0.001 003

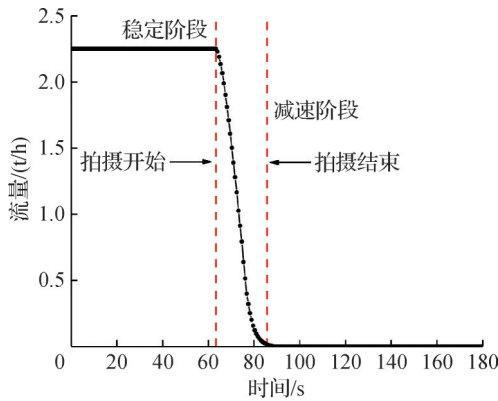


图 5 直管件流量随时间的变化

Fig.5 Flow rate in the straight pipe fitting changing with time

时,湍流掺混作用减弱,颗粒和水混合不再均匀,由于颗粒的密度较轻,大部分颗粒聚集在管道上方,速度非常接近 0 时,颗粒和水几乎不再移动,呈颗粒在上、水在下的分层状态。

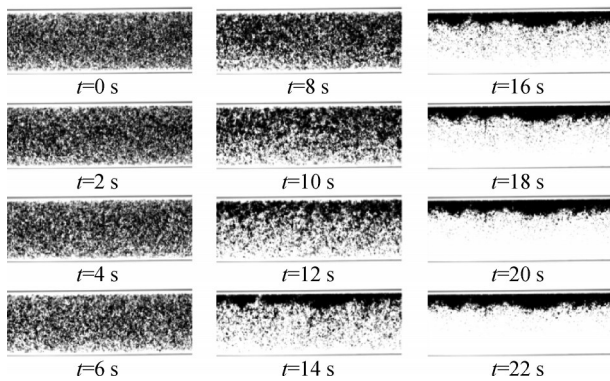


图 6 直管流型演变图

Fig.6 Evolution diagram of flow patterns in straight pipe

为节省计算资源,同时关注重点区域的流型演变过程,对得到的原始图片集进行了裁剪,裁剪后的直管流型图片像素大小为 795×310。对 1 121 个直管流型图片进行了 DMD 分析,2 个相邻图片的时间间隔为 0.02 s。根据模式的频率和增长率,DMD 模式可分为 3 种类型,分别是共轭模式、漂移模式和稳定模式。其中,共轭模式的增长率相同,频率互为相反数;稳定模式的增长率和频率均为 0,模式的空间结构反映时均结构;漂移模式的频率为 0,增长率不为 0。将共轭模式称为同一阶模式。直管件对应模式

的空间结构、频率 f (Hz)和增长率 g 如图 7 所示。由于直管内的流型演变并非周期性现象,因此不存在稳定模式,只存在共轭模式和漂移模式。每种模式反应的流场结构特点与流动状态如图 7 所示。频率的高低表示模式时间系数变化的快慢。增长率为正表示随着时间相应模式在流型重构中的作用越来越重要,增长率为负表示随着时间相应模式在流型重构中的作用越来越弱。图中的颜色积聚状态反映的是颗粒和水的某种混合状态。图 7 中,1 阶模式和 40 阶模式为漂移模式,其中第 40 阶模式表示颗粒和水的分层状态;颜色深浅可以理解为颗粒的堆积状态,颜色越深表示颗粒堆积越严重。

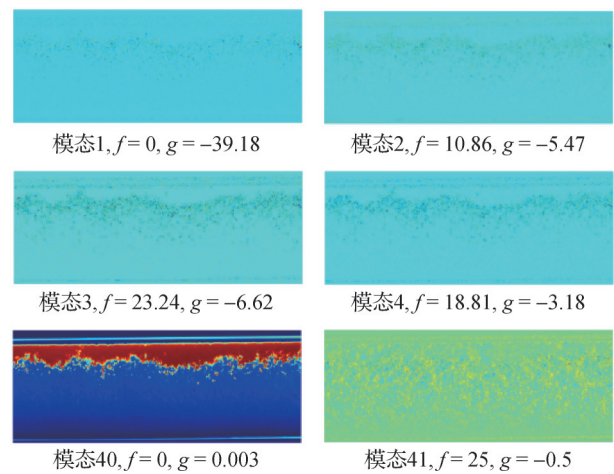


图 7 直管件模式的空间结构

Fig.7 Spatial structure of the modes in the straight pipe fitting

直管件前 100 阶模式的特征值如图 8 所示,其中黑色虚线表示单位圆,黑色空心圆圈表示模式的特征值。当模式对应的特征值位于单位圆上时,表示对应模式为稳定模式,位于单位圆外时,表示对应模式为增长模式,位于单位圆内时,表示对应模式为衰减模式。由图 8 可知,大部分模式对应的特征值位于单位圆内,表示大部分模式为衰减模式,即随着时间的增长,模式的重要性越来越低,只有少量模式的特征值位于单位圆外,没有模式的特征值位于单位圆上,因为流型演变过程是一个复杂的非线性过程。

为研究用于流型还原的模式数量的收敛性,此处引入了收敛性函数,如式(14)所示,直管件的模态数量收敛图如图 9 所示。对于直管件,当用于还原的模态数量逐渐增多时,收敛值先上升再逐渐呈阶梯状下降,最后降至约 27%。

$$L = 100 \frac{\|X - X_{\text{recon}}\|_F}{\|X\|_F} \quad (14)$$

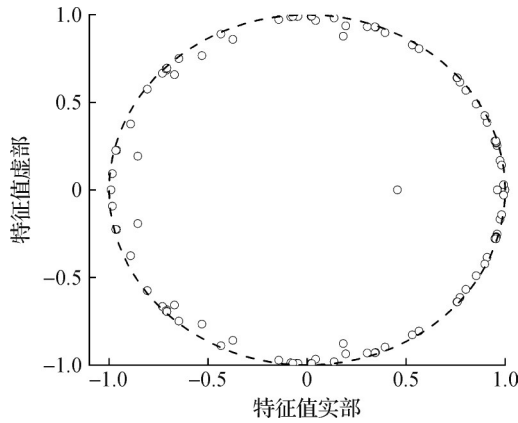


图 8 直管模态特征值分布

Fig.8 Distribution of modal eigenvalues of the straight pipe

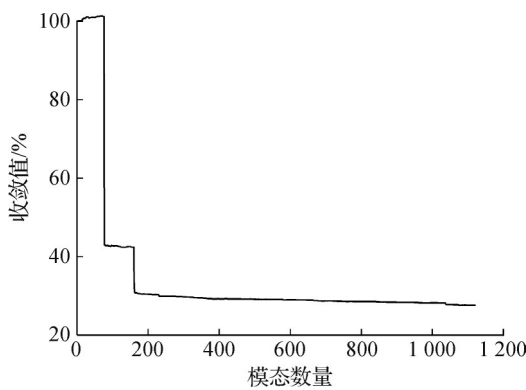


图 9 直管模态数量收敛图

Fig.9 Convergence diagram of the number of modes in the straight pipe

式中： L 为收敛值， X 为真实快照矩阵； X_{recon} 为重构快照矩阵； $\| \cdot \|_F$ 表示矩阵的 F 范数。

直管件不同时刻的还原流型和真实流型的对比如图 10 所示，不同时刻的真实流型位于左边，还原流型位于右边，可以发现还原流型和真实流型存在一定的差异，这是由于同一像素点上的颜色值存在误差，虽然存在误差，但还原流型也可以反映出流型演变过程中颗粒与水的混合状态。 $t=14$ s 的真实流型为移动床， $t=22$ s 的真实流型为固定床，两者的重建流型虽然近似，但仔细观察 $t=14$ s 的重建流型管道下部存在颗粒， $t=22$ s 的重建流型管道下部不存在颗粒，且两者均反映出管道上部的颗粒堆积现象，即此时管道存在堵塞风险，该方法并不会对流型的认识与判断产生较大影响。

为了评价还原效果，引入相对误差评价方式量化了还原误差的大小。相对误差的计算式如下：

$$E(i) = \frac{\left| \|X(i)\|_F - \|X_{recon}(i)\|_F \right|}{\|X(i)\|_F} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

式中： $X(i)$ 为真实流型第 i 时刻快照； $X_{recon}(i)$ 为 DMD

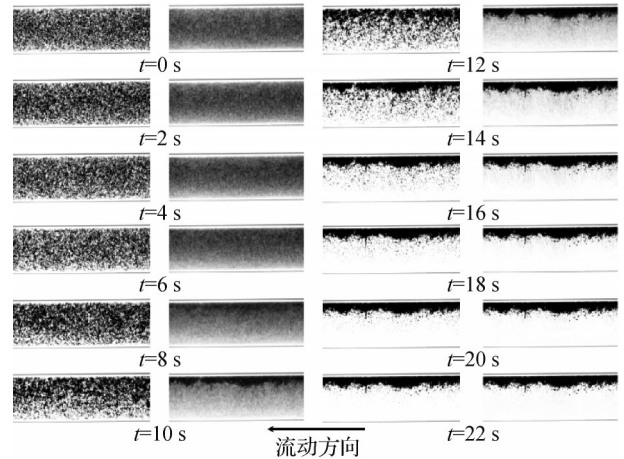


图 10 不同时刻直管还原流型和真实流型的对比

Fig.10 Comparison between the restored flow patterns and the real flow patterns in the straight pipe at different times

重构流型第 i 时刻快照。

直管件不同时刻的相对误差如图 11 所示，最大值为 11.07%，可以看出，颗粒和水呈混合均匀或不均匀状态时，相对误差较大，颗粒和水呈分层状态时，相对误差接近 0。

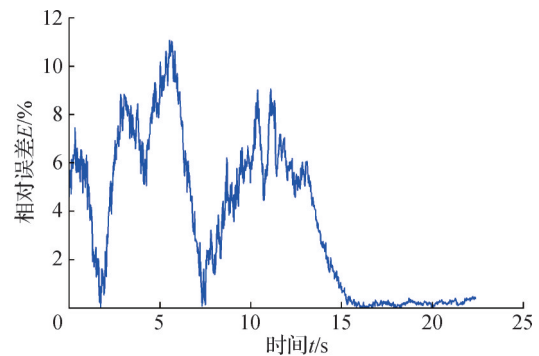


图 11 直管不同时刻的相对误差

Fig.11 Relative errors in the straight pipe at different times

3.2 基于 DMD 的流型识别方法与实验法、数值模拟法的对比

3.2.1 数据处理和分析能力

在数据处理与分析能力方面，DMD 作为一种数据驱动的方法，能够直接从流场数据中提取流动的动态信息，将复杂动力系统转化为低维信息，具有强大的数据处理和分析能力。实验法需要耗费大量时间和资源来收集实验数据，且数据容易受到实验条件和环境因素的影响。数值模拟法虽然能够模拟复杂的流动现象，但对计算资源的要求较高，且模拟结果的准确性需要进行实验验证。

3.2.2 流型识别精度和效率

在流型识别精度和效率方面，DMD 方法通过模态分析，能够清晰地识别出不同频率的流动结构对

流场的贡献,具有较高的流型识别精度。同时,DMD方法具有短期预测能力^[20],能够预测流场的未来演化趋势。实验法的流型识别精度受实验条件和测量误差的限制,且实验过程复杂,效率较低。数值模拟法虽然能够模拟出流场的详细结构,但计算过程耗时较长,且模拟结果的精度和效率受到模型复杂度和计算资源的影响。

3.2.3 适应性和灵活性

在适用性和灵活性方面,作为一种通用的动力学建模方法,DMD方法适用于各种复杂的流动现象,具有较高的适用性和灵活性。通过调整算法参数,可以适应不同的流场特征和识别需求。实验法通常针对特定的流动现象和条件进行,适用性和灵活性较差。数值模拟法虽然能够模拟出各种复杂的流动现象,但模型参数和边界条件的设定需要较高的专业知识和经验。

4 结论

本文基于DMD算法对液固两相流的流型进行重构,并通过实验测试对还原结果进行了验证,得到如下结论:

1)当直管段中液固两相流来流速度逐渐降低时,颗粒和水从一开始的混合均匀状态,逐渐变为混合不均匀状态,最后呈颗粒在上、水在下的分层状态。

2)DMD用于分析流型演变过程图片集时,可以得到单一频率的模态空间结构,直管中的第40阶模态表示颗粒和水的分层状态。大部分模态对应的特征值位于单位圆内,表示大部分模态为衰减模态;只有少量模态对应的特征值位于单位圆外,表示对应模态为增长模态。

3)还原流型和真实流型虽然存在误差,但仍可较为准确地反映流型演变过程。直管还原相对误差的最大值为11.07%。误差偏大的原因是流型演变过程的复杂非线性,而DMD是一种基于线性假设的算法,且流型图片采样间隔过大影响了还原精度。

4)基于DMD的液固两相流流型识别方法相比于实验法和数值模拟的方法,在数据处理、精度与效率和适用性方面有较大优势。基于DMD的液固两相流流型识别方法的最大优势是不受限于特定场景,无需知道数据的内在逻辑,能够同时获得具有单一频率和增长率的模态和构建降阶动力学模型,节省计算资源。

参考文献

[1] DAI Yu, ZHANG Yanyang, LI Xuyang. Numerical and

experimental investigations on pipeline internal solid-liquid mixed fluid for deep ocean mining [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108411.

[2] REN Wanlong, ZHANG Yan, ZHANG Xuhui, et al. Investigation of the characteristics and mechanisms of the layer inversion in binary liquid-solid fluidized beds with coarse particles [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(10): 103325.

[3] LI Xiang, WU Weidong, LI Kun, et al. Experimental study on a wet precooling system for fruit and vegetables with ice slurry [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 133: 9-18.

[4] DORON P, BARNEA D. Flow pattern maps for solid-liquid flow in pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(2): 273-283.

[5] WANG J, BATTAGLIA F, WANG S, et al. Flow and heat transfer characteristics of ice slurry in typical components of cooling systems: a review [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 922-939.

[6] HIROCHI T, MAEDA Y, YAMADA S, et al. Flow patterns of ice/water slurry in horizontal pipes [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(3): 436-441.

[7] BORDET A, PONCET S, POIRIER M, et al. Flow visualizations and pressure drop measurements of isothermal ice slurry pipe flows [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 99: 595-604.

[8] 朱春英,付涛涛,高习群,等.微通道内液液两相流流型 [J]. *化工进展*, 2011, 30(增刊2): 65-69. (ZHU Chunying, FU Taotao, GAO Xiqun, et al. Flow pattern of liquid-liquid two-phase flow in microchannel [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(Suppl. 2): 65-69.)

[9] BAI Landi, JIN Ningde, ZHANG Jiachen, et al. Experimental study of oil-water two-phase flow patterns in a vertical large diameter pipe [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2024, 99: 102681

[10] 史雪薇,谭超,董峰.基于环形电导传感器的气液两相流流型识别与过程参数测量 [J]. *化工进展*, 2024, 43(2): 637-648. (SHI Xuewei, TAN Chao, DONG Feng. Gas-liquid two-phase flow pattern identification and flow parameters measurement based on the ring-shape conductance sensor [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(2): 637-648.)

[11] NIE Feng, WANG Haocheng, SONG Qinglu, et al. Image identification for two-phase flow patterns based on CNN algorithms [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, 152: 104067.

[12] LI Dandan, ZHAO Bidan, WANG Junwu. Data-driven identification of coherent structures in gas-solid system

- using proper orthogonal decomposition and dynamic mode decomposition [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35 (1) : 013321
- [13] SPURIN C, ARMSTRONG R T, MCCLURE J, et al. Dynamic mode decomposition for analysing multi-phase flow in porous media [J]. *Advances in Water Resources*, 2023, 175: 104423.
- [14] RAMOS E M, DARZE G M, DO NASCIMENTO F R T, et al. Comparison of dynamic mode decomposition and deep learning techniques for two-phase flows analysis [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2020, 105 (4) : 1345–1379.
- [15] SASHITTAL P, CHIODI R, MORGAN T B, et al. Modal analysis and interface tracking of multiphase flows using dynamic mode decomposition [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, 157: 104198.
- [16] SCHMID P J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 656: 5–28.
- [17] TREFETHEN L N, BAU D. *Numerical linear algebra* [M]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.
- [18] ZHAO Xutao, SHEN Xi, GENG Linlin, et al. Comparative study on the wake dynamics of pump-jet and ducted propeller based on dynamic mode decomposition [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(11): 115135.
- [19] TU J H, ROWLEY C W, LUCHTENBURG D M, et al. On dynamic mode decomposition: theory and applications [J]. *Journal of Computational Dynamics*, 2014, 1 (2) : 391–421.
- [20] YIN Yuhui, JIA Shengkun, YUAN Xigang, et al. Reconstruction and prediction of rising bubble by Lagrange DMD in data-driven [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, 189: 220–233.

通信作者简介

蒋爽,男,副教授,大连民族大学土木工程学院,18698681335, E-mail: shjiang@dlnu.edu.cn。研究方向:建筑节能与液固两相流。

About the corresponding author

Jiang Shuang, male, associate professor, College of Civil Engineering, Dalian Minzu University, 86–18698681335, E-mail: shjiang@dlnu.edu.cn. Research fields: building energy efficiency and liquid-solid two-phase flow.