科学通报 2021 年 第 66 卷 第 26 期: 3497 ~ 3504
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

基于图像分析技术的环状流内界面波捕捉与识别

刘莉[1], 王科[2*], 林睿南[2,3], 戴军涛[2]

1. 上海交通大学核科学与工程学院, 上海 200240;
2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249;
3. 中国石油西南油气田分公司输气管理处, 成都 610215

* 联系人, E-mail: wang_ke@cup.edu.cn

2021-03-27 收稿, 2021-06-08 修回, 2021-06-09 接受, 2021-06-10 网络版发表
国家自然科学基金(51906147, 51706245)和中国石油大学(北京)科研基金(2462020XKJS01, ZX20200126)资助

摘要 气液两相环状流是工程应用领域中最为常见的流型, 其最重要的特征是气液相界面分布着多尺度特征的界面波, 对单元过程和系统的传热、传质过程产生重要影响. 本文通过分析高速摄影所获得的竖直管内气液两相环状流的动态图像, 提出了一种基于液膜厚度三维时空演变规律的界面波识别与捕捉新方法, 通过定性和定量分析验证其可行性, 实现了对毫秒级时间尺度和微米级空间尺度界面波的高分辨率追踪, 为气液两相环状流内界面波的识别和特性研究提供了一种操作简单且经济的非接触式研究手段.

关键词 气液两相流, 环状流, 界面波识别, 界面波特性, 图像分析技术

气液两相环状流是石油、化工、核能等工业应用领域中的重要流型, 其相界面最重要的特征就是分布着不同尺度的界面波. 界面波的产生对两相流传热、传质以及阻力特性产生很大的影响, 尤其是界面波在运动过程中受气流剪切力的作用产生形变甚至破碎形成大量的夹带液滴, 严重影响气液相界面的质量、动量和能量交换[1]. 因此, 对界面波的准确识别与捕捉是开展环状流机理研究和工程实践的重要前提.

国内外学者对环状流内界面波的分类识别[2,3]和运动特征[4~7]开展了广泛的实验研究, 实验手段主要包括以电导探针为主的接触式测量[8~10]和以激光诱导荧光成像为主的非接触式测量[11~14], 并根据界面波的尺寸和生存周期将其划分为纹波、扰动波和大振幅界面波[15~17]. 电导探针因价格低廉、方法简单被广泛应用于环状流内扰动波特性研究, 根据测量液膜厚度的动态变化来表征扰动波的运动特性. 值得注意的是, 电导探针仅适用于导电液膜的局部测量, 且其所测得的液膜厚度是探针周围液膜厚度的平均值. 此外, 探针对流场的干扰、流体的"爬杆效应"、探针的老化与杂质沉积等也导致探针对于界面波的特征提取和特性研究存在较大误差. 近年来, 激光诱导荧光技术(laser induced fluorescence, LIF)因具有时空分辨率高、响应速度快等特点成为应用最多的非接触式测量方法[11~16]. 然而, 严格的光学环境条件、复杂且昂贵的测试系统限制了该技术的广泛应用. 因此, 开发一种操作简单且经济的非接触式界面波识别方法显得尤为重要. 高速摄影技术作为一种常见的光学测量手段, 常用于气液两相流宏观流型特征及流型转变动态过程分析, 但鲜有文献报道将其应用于界面波的分类识别和特性研究, 究其原因主要是不同种类的界面波在运动过程中存在相互叠加、吸收以及分离等现象, 很难对其进行提取和区分.

引用格式: 刘莉, 王科, 林睿南, 等. 基于图像分析技术的环状流内界面波捕捉与识别. 科学通报, 2021, 66: 3497–3504
Liu L, Wang K, Lin R N, et al. Capture and recognition of interfacial waves in annular flow based on image analysis technology (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3497–3504, doi: 10.1360/TB-2021-0305

© 2021《中国科学》杂志社

本文对高速摄影所获得的气液两相环状流动态图像进行分析，通过液膜厚度、界面波速度和频率等特征参数的提取，提出了基于液膜厚度三维时空演变规律的界面波识别与捕捉新方法，可为气液两相环状流中界面波动力学实验研究提供可借鉴的测量方法.

1 图像处理方法

1.1 实验系统和测量技术

如图1所示，采用高速摄影结合背光法对圆管内环状流的流型特征进行连续光学拍摄. 管道内径为20 mm，壁厚为5 mm. 为了减弱管内光折射的影响，在测量段位置加装一个与圆管同轴的矩形透明水套以提高拍摄质量. 实验过程中，高速摄影仪镜头正对矩形水箱，在圆管背部布置光源照亮测量段. 为了满足光源覆盖面积大、平行度好、强度高以及稳定性好的拍摄要求，自行设计并制作了一个长1 m、宽0.2 m的LED高亮度灯，功率为100 W. 拍摄过程中，在实验段与LED光源之间布置透光性好的白色宣纸以获得均匀的背光，光均匀性主要通过高速摄影仪记录到圆管管壁以及圆管内气液相分布的成像图形进行评估. 为了实现拍摄的最佳效果，实验开始前，调整镜头高度、焦距、光圈以及光源位置、角度和强度，使气液两相的成像图形清晰. 高速摄影系统采用日本Photro公司的Fastcam Mini UX100高速摄像仪配合尼康AF Micro Nikkor 60mm f/2.8D镜头，拍摄频率设置为6400 frame/s，分辨率为1024 pixel×1280 pixel，对应的空间分辨率成像值为0.023 mm/pixel. 另外，考虑圆管曲率导致的光折射现象对液膜厚度测量结果的影响，对液膜厚度成像值进行修正，修正模型见文献[18]，对应成像值0.023 mm/pixel的真实值约为0.0003 mm/pixel. 因此，本文实现了对毫秒级时间尺度和微米级空间尺度液膜厚度变化的高分辨率追踪. 实验中，气相表观速度u_{sg}为0.58~44.72 m/s，液相表观速度u_{sl}为0.07~0.71 m/s.

1.2 数字图像处理程序

将通过高速摄影仪拍摄得到的环状流成像视频存储在计算机中，采用MATLAB软件编写后处理算法进行数字图像批处理，以获得环状流中液膜厚度分布和界面波特征参数在时间序列上的特征值. 获得环状流中液膜厚度的关键是提取液膜图像中气液相界面信息.

以图2为例，液膜图像处理的具体流程主要包括:

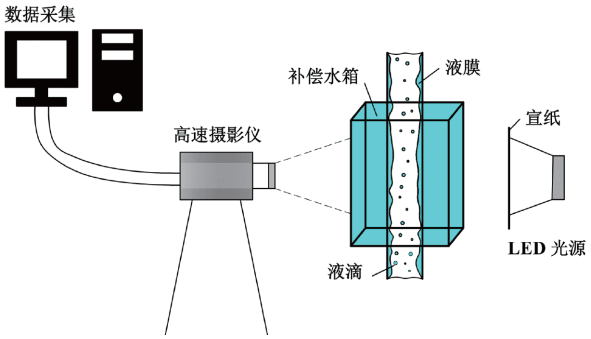


图 1 (网络版彩色)实验示意图
Figure 1 (Color online) Experimental diagram

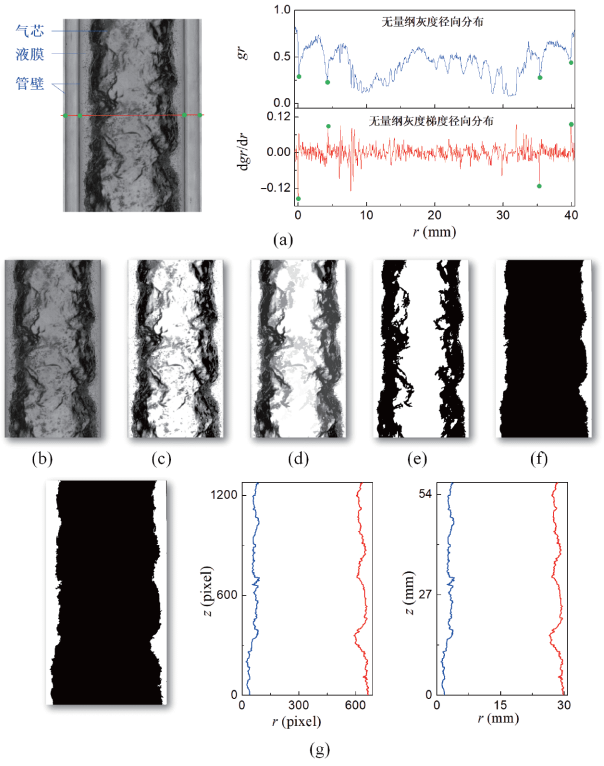


图 2 (网络版彩色)基于MATLAB代码的图像处理流程. (a) 原始图像的径向灰度分布; (b) 液膜和气芯的有效计算域; (c) 增强对比度及滤波后图像; (d) 填洞消去液膜中夹带气泡后图像; (e) 二值化后图像; (f) 填洞消去气芯中光亮区后图像; (g) 液膜厚度计算
Figure 2 (Color online) Image processing procedures based on MATLAB code. (a) Dimensionless gray distribution in radial direction; (b) effective computational domain of liquid film and gas core; (c) image after filtered and enhanced contrast; (d) image after eliminating entrained bubble in liquid film; (e) image after binary conversion; (f) image after filling up bright holes in the core region; (g) liquid film thickness measurement

(1) 图像径向灰度分布分析. 对原始图像进行径向灰度分布分析，图像灰度范围处于0~255之间. 根据无量纲灰度gr和无量纲灰度梯度dgr/dr径向分布曲线中的灰

度突变点, 确定圆管内外壁径向位置, 由此从原始图片上分割出液膜有效区域, 获得液膜和气芯计算域(图2(a)和(b)). (2) 对比度增强和滤波处理. 使用中值滤波函数*mdefilt2*削弱或者降低图像噪音的影响, 以提高图像质量. 同时, 利用对比度调整函数*imadjust*提高图像的对比度, 使得液膜和气芯分界面更加清晰(图2(c)); (3) 填洞消去液膜区夹带气泡. 利用填充函数*imfill*进行图像空洞区域填充, 消除液膜中夹带小气泡的影响(图2(d)); (4) 图像二值化. 采用*Otsu*门限分割法对图像进行阈值分割, 将灰度图转变为黑白二值图像. 其中, 255表示全白液膜区, 0表示全黑气芯区(图2(e)); (5) 填洞消去气芯光亮区. 通过填充函数*imfill*和求反函数*imcomplement*的综合使用消除气芯中的光亮区, 得到完整的液膜和气芯(图2(f)); (6) 气液相界面提取. 从上向下、从左向右依次对图像的像素矩阵进行扫描, 利用MATLAB程序中的求和函数获得单张图片中液膜厚度像素点值. 同时, 通过实验条件下像素单位与长度单位的转换, 获得液膜厚度的空间分布(图2(g)).

基于上述分析, 在一定的流动条件下, 通过批量处理一定拍摄时间内获得的多张图像, 即可得到管内不同位置液膜厚度随时间的时空动态分布, 如图3所示. 其中, r为实验圆管直径, h_{left}为拍摄照片中左侧液膜厚度值. 对于竖直管内环状流, 通常认为环状流特征具有轴对称特性. 因此, 本文仅针对流型图片中左侧液膜厚度进行了提取和分析. 基于液膜厚度的三维时空分布特征, 以界面波的尺寸和生存周期为判据, 对不同尺度的界面波进行分类识别, 如纹波、扰动波和大波等.

1.3 误差分析

环状流中界面波在运动过程中受到气流剪切而产生夹带液滴, 导致部分气液相界面模糊而影响液膜和气芯计算域的划分精度. 同时, 由于像素值是离散的, 像素值向实际值转化的理想误差在一个像素之内(<0.023 mm), 然而受相机分辨率、聚焦和光学畸变的影响, 实际测量值误差可能大于一个像素(>0.023 mm). 当LED光源发出的高强度光线从实验段水箱背部平行射入时, 由于光线在空气、水及有机玻璃中的折射率存在差异(n_{air}=1.00、n_{water}=1.33和n_{acrylic}=1.49), 光线从光源射出后会发生多次折射进入镜头, 对气液两相的最终成像造成一定的影响.

为了分析因光线折射造成的环状流液膜成像误差,

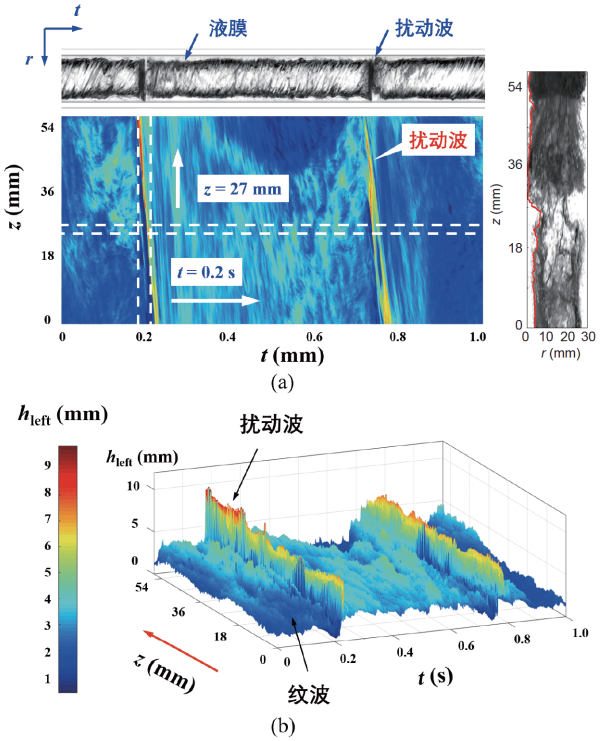


图 3 环状流中界面波时空分布云图典型结果. (a) 二维; (b) 三维
Figure 3 Spatiotemporal fields of interfacial waves in annular flow. (a) Two-dimentional; (b) three-dimentional

实验开始前, 需要拍摄纯空气流动和纯水流动时管道的纵截面图像作为对比. 图4为管内分别为纯空气、纯水及气液两相环状流条件下的管道横截面光路分布图. 其中, 绿线表示入射光线经过光学视窗、有机玻璃管和空气多次折射后从视窗侧面射出, 无法在相机中成像; 蓝线表示入射光线穿过圆管内外壁后能够在相机中清晰成像; 红线表示入射光线穿过管道中心区域经过多次折射后均能在相机中清晰成像. 当圆管内是纯空气流动时, 穿过管道中心和管道内外壁处的光线经过光学视窗、有机玻璃管和空气多次折射后可以在相机中成像, 而在管道内壁附近入射光线从视窗侧面射出无法成像(图4(a)). 当圆管内是纯液体流动时, 整个拍摄区域均能在相机中很好成像(图4(b)). 当管道中是气液两相环状流时, 管壁附近是液膜区域, 而管道中心是气芯区域, 此时入射光线经液膜和气芯区域多次折射后均能在相机中清晰成像, 而气液界面处区域光线无法被相机接受, 呈黑暗状态(图4(c)). 因此, 通过在管道测量段外布置矩形水箱的方法, 能够补偿光折射造成的部分损失, 使得环状流中液膜流动成像清晰, 从而实现对液膜厚度演化特征的定量测量.

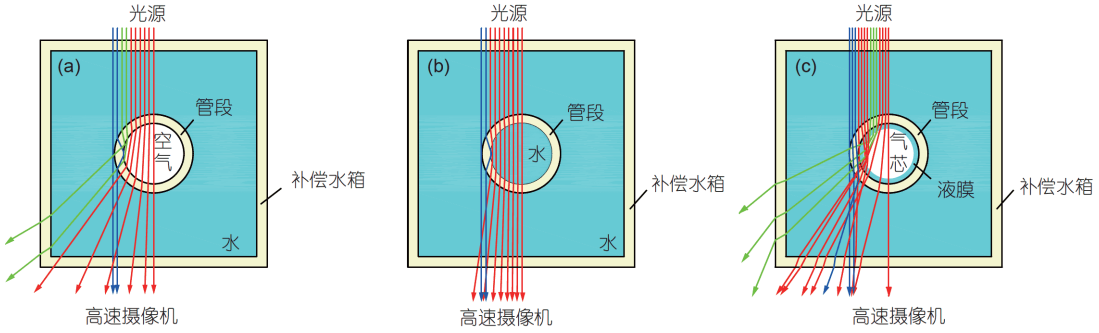


图 4 拍摄区域光路图. (a) 单相气体流动; (b) 单相液体流动; (c) 气液环状流动
Figure 4 Lightpath map of the shooting area. (a) Single air flow; (b) single water flow; (c) air-water annular flow

值得注意的是，环状流内还存在周期性的大振幅界面波(简称为大波). 大波的波幅、波长以及波速均大于扰动波，且在其运动过程中伴随着液滴夹带或气体夹带现象，使得液膜三维时空分布图上出现大量的间断点，如图5所示. 由于部分区域大波的波幅可能会超过*hysteresis3d*函数所设置的阈值，造成所获得的波幅比实际值偏小，但对大波和扰动波分类识别不造成影响.

2 可靠性验证

2.1 定性验证

扰动波是气液两相流内最为常见的界面波，总体表现为在基底液膜上运动的孤立非周期波，其传播速度高，通常大于基底液膜流动速度，存在周期长，携带较多流体运动. 判断的依据是扰动波沿管道周向连续分布(存在于整个轴向拍摄区域)，波幅一般是液膜厚度的3~5倍，波峰前后严重不对称，波峰前部很短且较陡峭，波峰后部则较长且变化平缓. 纹波是波幅较小的界面波，波长通常为几个毫米，存在时间短，运动速度较低，沿管道周向分布不连贯. 纹波主要分布在基底液膜和扰动波的背风面，基底液膜上的纹波或被高速传播的扰动波吸收，或在上游扰动波的作用下加速运动到下游扰动波的迎风面. 图6为分别采用基于本文提出的液膜厚度时空分布图像分析技术和文献[13]中的激光诱导荧光技术所获得的界面波在气液相界面的分布. 结果表明，本文提出的图像处理法可以获得与激光诱导荧光技术类似的结果，可以实现对环状流内扰动波和纹波的有效识别. 尽管本文方法所提取的液膜厚度准确性较激光法差，主要存在针对纹波等尺度较小的

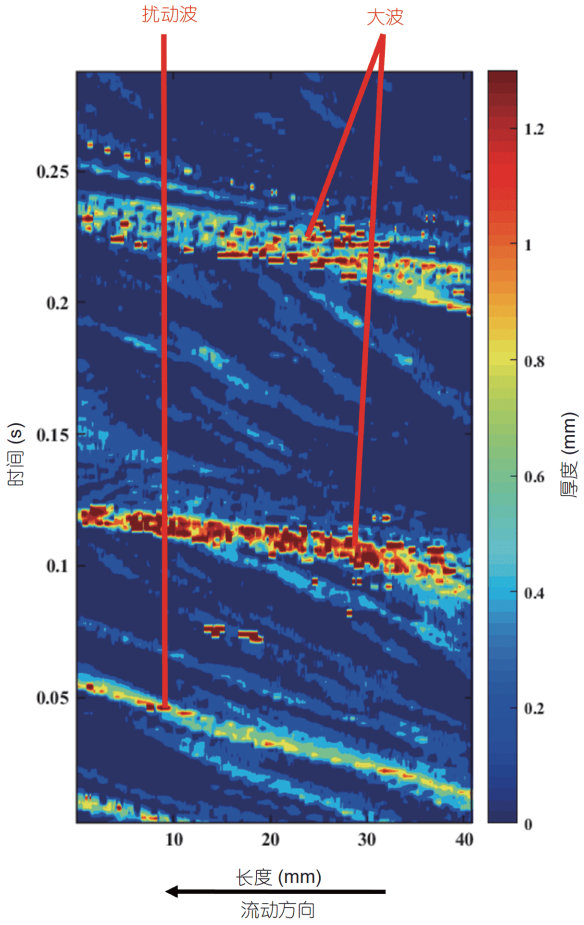


图 5 大振幅界面波的识别
Figure 5 Identification of huge waves

界面波会出现细节丢失等缺陷，但是对于尺度较大的扰动波和大振幅波等有着较高的识别精度. 不可否认，本文提出的图像处理法为界面波的识别与捕捉提供了一种相对经济可行的测量方法.

2.2 定量验证

通过液膜厚度时空分布中扰动波轨迹的斜率和波数与时间的关系，采用GetData Graph Digitizer软件对扰动波的波速v和频率f等特征参数进行提取，并与现有相关界面波特征参数预测经验关系式(表1)进行对比分析，定量验证图像分析技术对界面波识别的准确性，如图7所示. 结果表明，除了部分处于搅拌流/环状流转变界限附近的实验点所提取的界面波特征参数值与预测值存在较大偏差外，绝大部分处于环状流充分发展区域内的实验值与预测值符合良好. 由于在流型转变附近区域两相流动扰动增大，很难对界面波的特征进行准确提取，所选取的经验关系式本身在此区域范围内也存在较大的预测误差，但针对环状流充分发展区域内扰动波相关特性参数的对比分析，证明了采用本文提出的图像处理技术可以较好地对扰动波进行识别和特征参数提取.

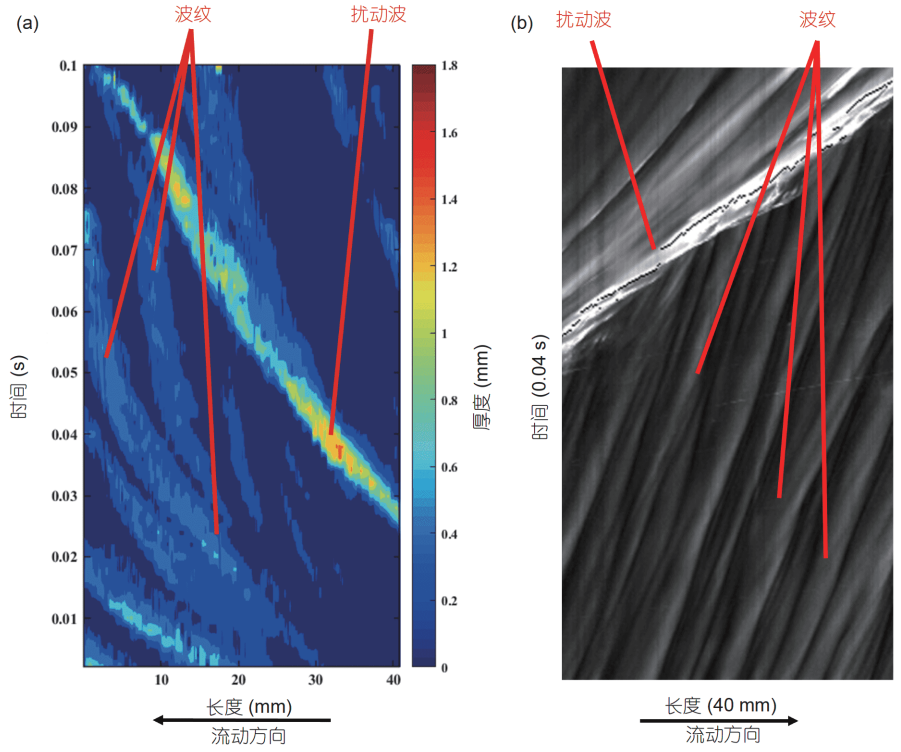


图 6 液膜厚度的时空分布. (a) 基于图像分析技术; (b) 基于激光诱导荧光技术[13]
Figure 6 Spatiotemporal distribution of the liquid film. (a) Image analysis; (b) LIF technique[13]

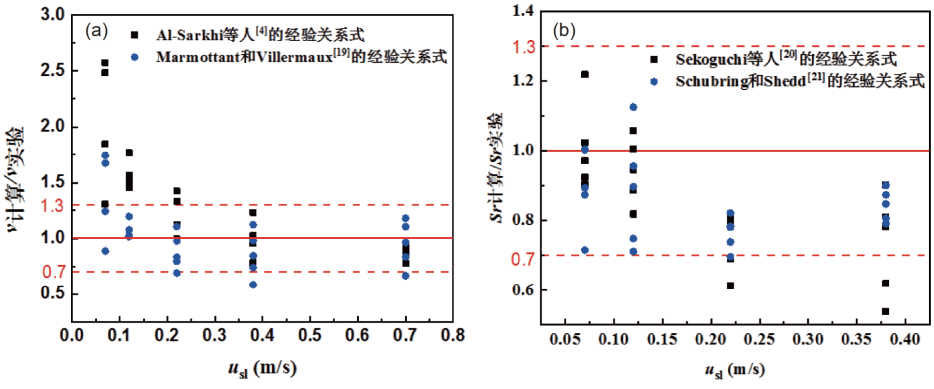


图 7 基于扰动波特征参数的定量验证. (a) 波速; (b) 频率
Figure 7 Quantitative verification based on wave characteristic parameters. (a) Wave velocity; (b) wave frequency

表 1 界面波波速和频率常用预测经验关系式

Table 1 Empirical formulas of interfacial wave velocity and interfacial wave frequency

波速v		频率f	
来源	经验关系式	来源	经验关系式
Marmottant和Villermaux[19]	$v=\frac{\sqrt{\rho_g}u_{sg}+\sqrt{\rho_l}u_{sl}}{\sqrt{\rho_g}+\sqrt{\rho_l}}$, 其中, ρ_g为气相密度, ρ_l为液相密度	Sekoguchi等人[20]	$Sr_g=\frac{fD}{u_{sg}}$, $Sr_g=E_0^{-0.5}(0.5\ln E_0-0.47)(0.0076\ln\xi-0.051)$, $E_0=\frac{gD^2(\rho_l-\rho_g)}{\sigma}$, $\xi=\frac{Re_l^{2.5}}{Fr_g}$, $Fr_g=\frac{u_{sg}}{\sqrt{gD}}$, 其中, Sr_g为斯特劳哈尔数, E_0为特弗斯数, Fr_g为弗劳德数, ξ为无量纲参数, g为重力加速度, σ为表面张力系数
Al-Sarkhi等人[4]	$v=1.942u_{sl}X^{-0.91}$, $X=\frac{u_{sl}}{u_{sg}}\sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}$, 其中, X为Lockhart-Martinelli系数	Schubring和Shedd[21]	$f=0.035\frac{u_{sg}\sqrt{Fr_{mod}}}{D}$, $Fr_{mod}=\frac{\rho_g u_{sg}}{\rho_l\sqrt{gD}}$, 其中, Fr_{mod}为修正弗劳德数

3 结论

通过提取和分析竖直管内气液两相环状流中液膜厚度的三维时空演变规律, 本文提出了一种基于图像分析技术的环状流内界面波识别与捕捉新方法, 实现了对毫秒级时间尺度和微米级空间尺度界面波的高分辨率追踪. 在此基础上, 以界面波的尺寸和生存周期为判据, 对界面波进行了分类识别. 此外, 针对扰动波, 通过提取波速和频率等特征参数, 与现有文献中的相关结果进行定性、定量验证. 结果表明, 本文提出的界面波识别技术可以准确地对界面波进行分类识别和特征参数提取, 为气液两相环状流中界面波动力学实验研究提供可借鉴的测量手段和分析方法.

参考文献

1 Wang K, Bai B, Ma W. Huge wave and drop entrainment mechanism in gas–liquid churn flow. Chem Eng Sci, 2013, 104: 638–646
2 Kaji R, Azzopardi B J. The effect of pipe diameter on the structure of gas/liquid flow in vertical pipes. Int J Multiphase Flow, 2010, 36: 303–313
3 Zadrazil I, Matar O K, Markides C N. An experimental characterization of downwards gas–liquid annular flow by laser-induced fluorescence: Flow regimes and film statistics. Int J Multiphase Flow, 2014, 60: 87–102
4 Al-Sarkhi A, Sarica C, Magrini K. Inclination effects on wave characteristics in annular gas-liquid flows. AIChE J, 2012, 58: 1018–1029
5 Azzopardi B J. Disturbance wave frequencies, velocities and spacing in vertical annular two-phase flow. Nucl Eng Des, 1986, 92: 121–133
6 Taylor N H, Hewitt G F, Lacey P M C. The motion and frequency of large disturbance waves in annular two-phase flow of air-water mixtures. Chem Eng Sci, 1963, 18: 537–552
7 Wolf A, Jayanti S, Hewitt G F. Flow development in vertical annular flow. Chem Eng Sci, 2001, 56: 3221–3235
8 Sawant P, Ishii M, Hazuku T, et al. Properties of disturbance waves in vertical annular two-phase flow. Nucl Eng Des, 2008, 238: 3528–3541
9 Sekoguchi K, Takeishi M. Interfacial structures in upward huge wave flow and annular flow regimes. Int J Multiphase Flow, 1989, 15: 295–305
10 Omebere-Iyari N K, Azzopardi B J. A study of flow patterns for gas/liquid flow in small diameter tubes. Chem Eng Res Des, 2007, 85: 180–192
11 van Eckeveld A C, Gotfredsen E, Westerweel J, et al. Annular two-phase flow in vertical smooth and corrugated pipes. Int J Multiphase Flow, 2018, 109: 150–163
12 Charogiannis A, Sik An J, Voulgaropoulos V, et al. Structured planar laser-induced fluorescence (S-PLIF) for the accurate identification of interfaces in multiphase flows. Int J Multiphase Flow, 2019, 118: 193–204
13 Alekseenko S V, Cherdantsev A V, Cherdantsev M V, et al. Study of formation and development of disturbance waves in annular gas–liquid flow. Int J Multiphase Flow, 2015, 77: 65–75
14 Schubring D, Ashwood A C, Shedd T A, et al. Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part I: Methods and data. Int J Multiphase Flow, 2010, 36: 815–824
15 Zhao Y, Markides C N, Matar O K, et al. Disturbance wave development in two-phase gas–liquid upwards vertical annular flow. Int J Multiphase Flow, 2013, 55: 111–129

16 Cherdantsev A V, Cherdantsev M V, Isaenkov S V, et al. Study of development of disturbance waves in annular gas-liquid flow. J Phys-Conf Ser, 2017, 899: 032008
17 Dasgupta A, Chandraker D K, Kshirasagar S, et al. Experimental investigation on dominant waves in upward air-water two-phase flow in churn and annular regime. Exp Thermal Fluid Sci, 2017, 81: 147–163
18 Liu L, Bai B. Error analysis of liquid holdup measurement in gas-liquid annular flow through circular pipes using high-speed camera method. J Shanghai Jiaotong Univ (Sci), 2018, 23: 34–40
19 Marmottant P, Villermaux E. On spray formation. J Fluid Mech, 2004, 498: 73–111
20 Sekoguchi K, Takeishi M, Ishimatsu T. Interfacial structure in vertical upward annular flow. J Visual-Japan, 1985, 5: 61–66
21 Schubring D, Shedd T A. Wave behavior in horizontal annular air–water flow. Int J Multiphase Flow, 2008, 34: 636–646

Summary for “基于图像分析技术的环状流内界面波捕捉与识别”

Capture and recognition of interfacial waves in annular flow based on image analysis technology

Li Liu[1], Ke Wang[2*], Ruinan Lin[2,3] & Juntao Dai[2]

[1] *School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;*
[2] *College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*
[3] *Gas Management Office, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610215, China*
* Corresponding author, E-mail: wang_ke@cup.edu.cn

Annular flow is often encountered in many industrial applications, which features a circumferential liquid film at the pipe wall and a continuous gas core with entrained droplets in the tube center. One of the most remarkable features of annular flow is the distribution of various scales of interfacial waves in wavelength and amplitude on the liquid film. It is generally known that the generation, movement, and breakup of interfacial waves play an essential role in the heat and mass transfer in annular flow. Thus, complete knowledge of the interfacial waves is of great importance for the characterization of mass, momentum and energy exchange process of the unit process and the system. So far, extensive research has been carried out to investigate the characteristics of interfacial waves. There are two major groups of measurement methods for the capture of the interfacial waves, i.e., the contact measurement method and the non-contact measurement method. The conductivity probe is widely used as a typical contact measurement method to investigate the properties of the interfacial waves. However, it is only suitable for local measurement of the conductive liquid film, and the measured liquid film thickness is the average of the thickness of the liquid film around the probe. It is also worth noting that the accuracy of the probe is restricted to the interference to the flow field, the rod-climbing effect of the fluids, the aging of the probe, and the deposition of impurities. The laser-induced fluorescence technology has become one of the most promising non-contact measurement methods due to its high temporal and spatial resolution and fast response speed. However, strict optical environmental conditions, complex and expensive test systems limit its wide application. Therefore, it is important to develop a simple and economical non-contact measurement method to capture and identify interfacial waves. As a common optical measurement method, high-speed photography technology is often employed to analyze the macroscopic characteristics of flow patterns and their transitions. Due to the superimposition, absorption, and separation of the interfacial waves during their movement, it is almost impossible to extract and distinguish waves from the original images. In the present study, a delicate approach for interfacial wave capture and recognition is developed through analyzing the temporal and spatial evolution of liquid film thickness in the annular flow. According to the difference in size and life span, three main types of interfacial waves are recognized as ripples, disturbance wave, and huge wave in gas-liquid two-phase flow. Compared with the laser-induced fluorescence technology, the proposed image processing method is qualitatively demonstrated to have effective identification abilities. Additionally, the velocity and frequency of the disturbance waves are obtained for quantitative verification. Compared with the experimental data in the literature, the proposed wave capture method is proved to implement a high resolution tracking for the interfacial wave at the millisecond time scale and micron level. Although the proposed image processing method offers a relative dearth of detailed information about interfacial waves compared with the laser-induced fluorescence technology, it provides a simple operation and non-contact measurement for interfacial waves in annular flow.

gas-liquid two-phase flow, annular flow, interfacial wave recognition, interfacial wave property, image analysis technique

doi: 10.1360/TB-2021-0305