

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2014.06.001

立管系统泡状流和段塞流的流动特性研究*

高梦忱, 张健, 刘硕, 许晶禹

(中国科学院力学研究所, 北京 100190, Email: gaomengchen@imech.ac.cn)

摘要: 立管系统作为最基本的结构单元, 目前已被广泛应用于海洋工程各领域中。而伴随着现场采出液复杂的气液混合状态, 对于立管系统中的气液两相流动问题, 越来越引起学术界和工程界的广泛关注。该文分别对立管系统中最常见的两种流型: 泡状流和段塞流进行了研究。在绘制流型图的基础上, 针对上述两种流型的转捩边界进行了划分。其中, 对于泡状流中发生的速度滑移现象进行了量化描述, 并采用漂移流模型进行了简要分析。另一方面, 给出了段塞速度、段塞频率、以及段塞长度等特征参量, 随表观流速增大的变化趋势。此外, 对于压差信号的功率谱密度分析, 可能将对在线流型识别产生积极影响。

关键词: 气液两相流动; 泡状流; 段塞流; 立管系统; 流动特征

中图分类号: TH137.5

文献标识码: A

Studies on flow characteristics of bubble flows and slug flows in the pipeline-riser system

GAO Meng-chen, ZHANG Jian, LIU Shuo, XU Jing-yu
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: As one of the most fundamental structures, the pipeline-riser system has been widely used in kinds of fields of ocean engineering. Gas-liquid flows in the pipeline-riser system arouses widespread interest both with academia and engineering, for there is complex mixed state of gas and liquid in the production. In the present work, some flow characteristics of bubble flows and slug flows in the pipeline-riser system are considered. The flow pattern map has been drawn, and the transition from bubble flows to slug flows has been illustrated. One of the most significant phenomena of bubble flows is velocity-slip, which has been stated with quantitative description and explained by drift-flux model. It is demonstrated that the velocity, the frequency, and the length of the liquid slug will increase with the rise of superficial velocity. In addition, the PSD estimation for pressure drops must have a positive effect on process identification of flow patterns.

Key words: gas-liquid two-phase flow; bubble flow; slug flow; pipeline-riser system; flow characteristics

* **收稿日期:** 2014-07-25(2014-10-08 修改稿)

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项“水下油气水高效分离与计量装置”(2011YQ120048-02)

作者简介: 高梦忱(1989-), 男, 北京人, 博士研究生。

通信作者: 许晶禹, Email: xujingyu@imech.ac.cn

Received: September 25, 2014 (**Revised** October 8, 2014)

Project supported by foundation: Supported by the Subsea High Efficiency Oil/Gas/Water Separating and Metering Device for the Special Development of National Key Scientific Instruments in China (2011YQ120048-02)

Biography: GAO Meng-chen (1989-), Male, Ph. D. Candidate.

Corresponding author: XU Jing-yu, Email: xujingyu@imech.ac.cn

引言

当今世界海洋工程领域，管道输运作为一种最常见的油气输运方式，已被广泛应用于海上油气生产系统中^[1]。据相关数据统计，目前全世界各种管路总长度已超过 230×10^4 km。其中，约 60% 为气体输送管路，约 15% 为原油与成品油输送管路。我国南海深水海域的油气地质储量约占全国总储量的 1/3，海洋油气资源开采必将成为我国海洋工程发展的重要方向。无论采取近海铺设海底管线输运，还是采取浮式采油结构进行油气生产作业，都将采用立管系统作为最基本的结构单元。由于油田现场采出液多为复杂的气液混合物，因此关于立管系统中气液两相流问题的研究，越来越引起学术界和工程界的广泛兴趣。

在气液两相流动中，最具代表性的流型为：泡状流和段塞流。为了理解它们的流动特性，已有学者开展了一系列研究工作，其中最具开拓性的成果之一，就是已建立的一套用数学方法进行描述的流动控制方程，如均相流模型以及分相流模型（如式（1）和式（2））等。控制方程的建立，标志着气液两相流理论已经从简单的经验公式，向完备的理论体系进行转化。

质量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_l(1-\alpha)A] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_l(1-\alpha)u_l A] = -\dot{m}_e \quad (1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_g A) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho_g u_g A) = \dot{m}_e \quad (1b)$$

动量方程：

$$-(1-\alpha) \frac{\partial p}{\partial z} - g \rho_l (1-\alpha) \sin \theta - \frac{\tau_0 \chi}{A} + \frac{\tau_{im} \chi_i}{A} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} [(1-\alpha) \rho_l u_l^2 A] + \frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha) \rho_l u_l] \quad (2a)$$

$$-\alpha \frac{\partial p}{\partial z} - \alpha g \rho_g \sin \theta - \frac{\tau_{im} \chi_i}{A} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho_g u_g^2 A) + \frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_g u_g) \quad (2b)$$

然而，由于气液两相流动控制方程的复杂性，一般很难给出解析解。对于工程中遇到的具体问题，大多采用实验研究和理论分析相结合的手段进行更深入的研究。Yehuda 等^[2]针对垂直气液两相流问题展开了研究工作，并发展了相关模型进行流型划分；Durst 等^[3]假设气液流动具备轴向对称性，率先尝试了对流体运动速度进行测量，并给出了上升气泡的半径及形状等信息；Yenjaichon 等^[4]对于气液流动中气体的分布情况，进行了实验测量，并考虑了表观流速等参数对其的影响。

在泡状流研究方面，Bunner 等^[5,6]提出了气泡运动的微观结构，并针对气泡形状对泡状流的影响规律进行了研究；Dabiri 等^[7]则通过考虑表面张力

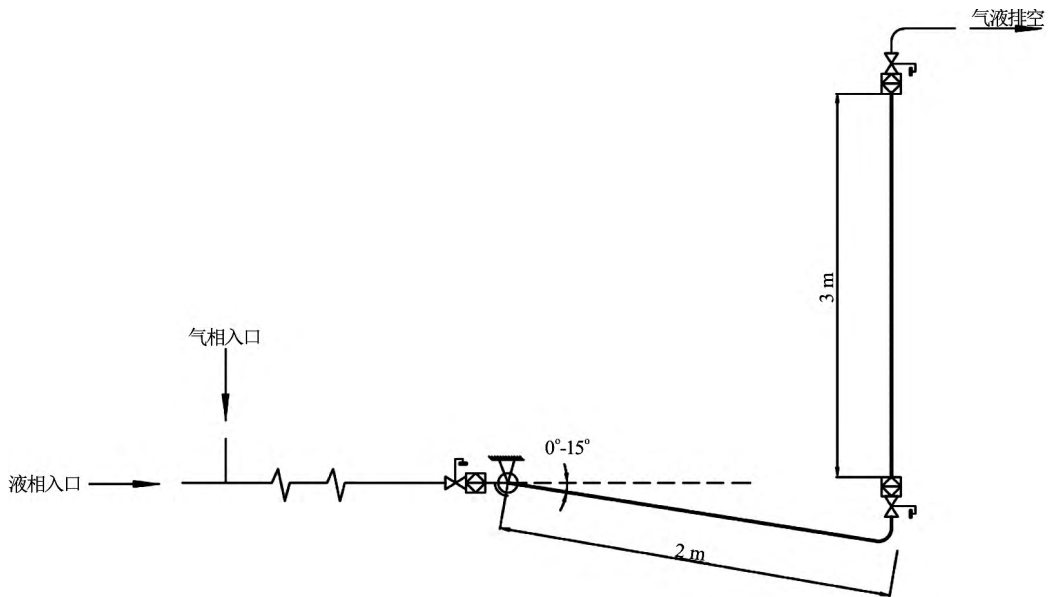


图 1 实验系统示意图
Fig.1. Schematic of experimental setup

以及剪切力对气泡形状的影响, 针对单一空化气泡与剪切流动间的相互作用进行了探讨。对于段塞流动, Wynanskip 等^[8]针对水平管路中, 段塞单元的生成和发展进行了描述; Campos 等^[9]采取图像采集的方式, 研究了垂直管路中的段塞流动, 并试图建立段塞长度与雷诺数之间的函数关系; Zheng 等^[10]针对上下起伏管路中的段塞流动进行了研究, 通过考虑稳定的段塞流动及伴有段塞生成与消失的非定常流动这两种情况, 发展出了一套段塞追踪模型。为保证室内实验模拟海洋工程实际问题的可行性, 吴应湘等^[11]给出了气液两相流实验中的相似参数及模拟准则, 在理论层面上验证了在实验室内通过水-空气两相流动, 模拟现场工况中的天然气-石油的两相流动是可行的。在此基础上, 许晶禹等^[12]针对水平管路中, 流体介质对气液两相流动压降的影响规律展开了实验研究, 并得到了较好的测量结果。本文工作是在总结前人工作的基础上, 主要通过实验测量的方法, 结合数据处理和理论分析, 对立管系统泡状流和段塞流的流动特性进行探讨。

表 1 实验流体介质参数

($\sigma = 72.88 \text{ mN/m}$, $T = 290 \text{ } 294 \text{ K}$)
 Table 1. Properties of liquids in experiment
 ($\sigma = 72.88 \text{ mN/m}$, $T = 290 \text{ } 294 \text{ K}$)

流体介质	密度(kg/m^3)	动力黏度($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	表观流速(m/s)
水	998.203	1.01	0.28–1.42
空气	1.205	1.79×10^{-2}	0.17–1.36

1 实验流程及方法

本文的实验管路系统, 在中国科学院力学研究所多相流实验平台上搭建完成, 其装置图如图1所

示。实验管段为25 mm内径有机玻璃管, 入口发展段长度为3 m, 有效实验长度为1.85 m。沿管长布置压力传感器进行压力数据采集, 并采用快关阀法测量管道截面含气率。测量实际有效工况近三十组, 得到有效数据点上百个。

本文采用空气和水作为流体介质, 其实验参数如表 1 所示。在多相流动过程中, 流型随时间进程时时发生变化, 因而所得各测量数据也应为时间的函数。然而这里仅讨论在入口条件处于充分发展的状态, 忽略时间效应对测量结果的影响。

2 结果与讨论

2.1 流动形态

目前, 对于单一垂直管路气液两相流的研究已取得丰富成果, 其中最重要的概念之一就是流型^[13]。这是由于气液两相流中, 所有参数计算及流动规律的建立都依赖于流型信息。本文工作中的流型采集采用高速摄像机进行, 其结果如图 2 所示。

从图像采集信息中可以直观看出: 当液量保持一定的情况下, 管内流型随气量的不断增大, 由泡状流向段塞流转化; 更进一步, 即使均处在泡状流的流态下, 气泡数量及气泡分散程度也随气量增大呈现明显变化。即表明气泡数量随气量增大而增多, 且气泡多集中于管中心处, 分散程度由管中心处向管壁处递减。

可将流型信息绘制为流型图进行表述, 并进行流型划分。针对泡状流与段塞流的转化边界, 首先假设气相与液相之间存在滑移速度 U_0 , 并有如下关系

$$U_0 = U_G - U_L \quad (3)$$

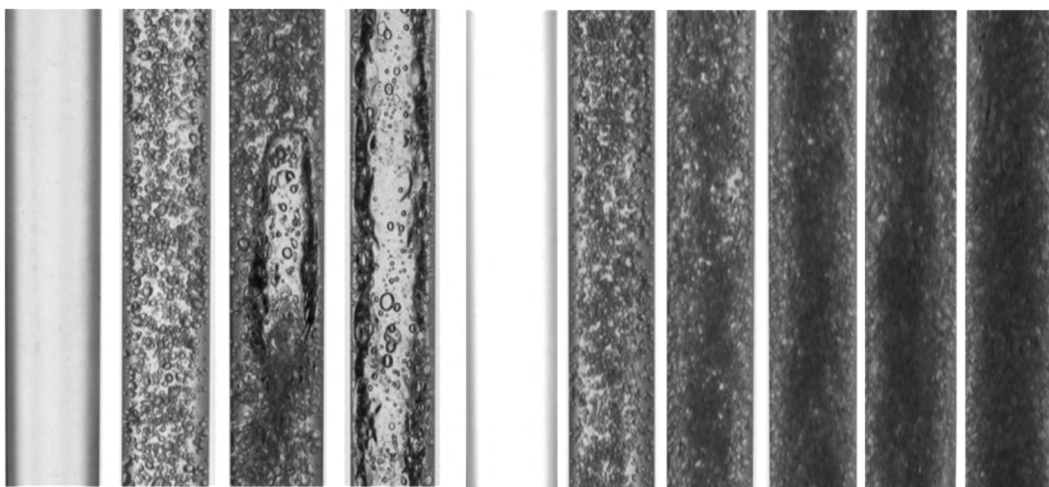


图 2 立管内流动图像

Fig.2. Flow pattern images in the riser

式中, U_G 与 U_L 分别代表气相实际速度与液相实际速度。又假设实际速度与表观流速间满足如下关系

$$U_{GS} = \alpha U_G \tag{4}$$

$$U_{LS} = (1 - \alpha) U_L \tag{5}$$

式中, α 为空泡份额。将式(4)和式(5)代入式(3)可得

$$U_{LS} = U_{GS} \frac{1 - \alpha}{\alpha} - (1 - \alpha) U_0 \tag{6}$$

根据 Harmathy 的理论, 滑移速度 U_0 与液相属性有关, 并满足如下关系^[14]

$$U_0 = 1.53 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \tag{7}$$

同时有学者指出, 当 $\alpha = 0.25$ 时, 会发生泡状流向段塞流的转化^[15]。因此可将式(7)代入式(6), 从而得到流型的判别准则为

$$U_{LS} = 3.0 U_{GS} - 1.15 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \tag{8}$$

基于文献工作^[16,17]可知: 在实线与虚线所规定的范围内(图3), 应形成段塞流动, 这一结论与实验结果大体吻合, 如图3所示。然而, 对于泡状流向段塞流的转化边界仍有一定偏差, 这可能由于文献的工作是基于单一垂直管路进行的推导, 因此需要开展更进一步的研究。

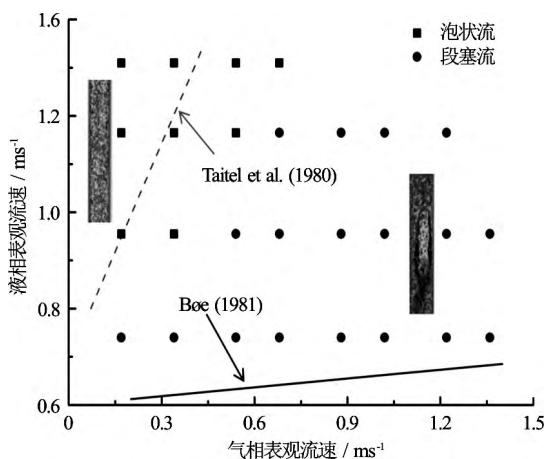


图3 立管中气液两相流型图
Fig.3. Flow pattern map for gas-liquid flows in pipeline-riser system

2.2 泡状流速度滑移

对于气液两相间的速度滑移现象, 可以采用速

度滑移率来进行表征^[18]。其表达式为

$$S = \frac{\lambda_G / \lambda_L}{\varepsilon_G / \varepsilon_L} \tag{9}$$

式中: λ 和 ε 分别表示入口和管道内的相含率, 下标 G 和 L 分别对应气相和液相。从图4中可以看出, 立管中持液量随表观流速的增大呈现减小的趋势。而在所有工况条件下, 其速度滑移率均大于1, 如图5所示。这说明, 在气液两相流动过程中发生了速度滑移现象, 即气相实际速度大于液相实际速度。

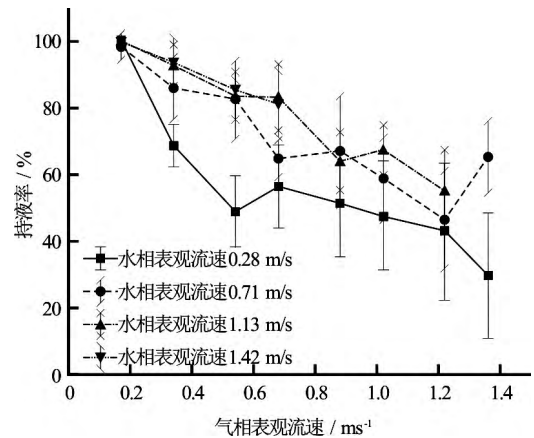


图4 立管中持液率随速度变化曲线
Fig.4. Average water holdup in riser

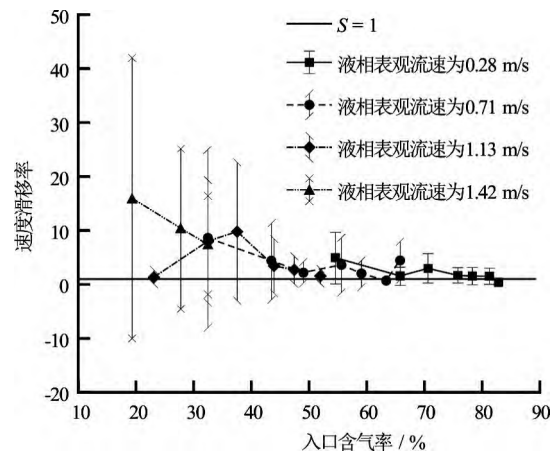


图5 速度滑移率随入口含气率变化曲线
Fig.5. Velocity slip ratio versus input gas fraction

对于泡状流而言, 假设气泡符合 Taylor 气泡模型, 其气泡运动速度可由漂移流模型表示

$$U_T = C U_m + U_d \tag{10}$$

式中: U_T 为气泡运动速度, C 为滑脱系数, U_m 为气液混合速度, U_d 为气泡漂移速度。基于文献工作可知, 气泡漂移速度 U_d 与当地重力加速度以及管道

直径有关, 为一常数, 其表达式如下

$$U_d = 0.54\sqrt{gD} \quad (11)$$

而滑脱系数 C 可由经验公式确定, 通常取值 1.2 左右, 也为一常数。因此气泡运动速度 U_T 仅为气液混合速度 U_m 的函数, 而速度滑移效应主要是由漂移速度 U_d 引起。因此, 当气液混合速度不断增大时, 漂移速度在气泡运动速度中所占的比重越来越小, 速度滑移效应因此越来越弱。这就造成随着混合速度的提高, 管道含气率越来越接近入口含气率, 如图 6 (a) 所示。而对于段塞流动, 由于其不满足泡状流模型, 因此不满足这一流动特性, 如图 6 (b) 所示。

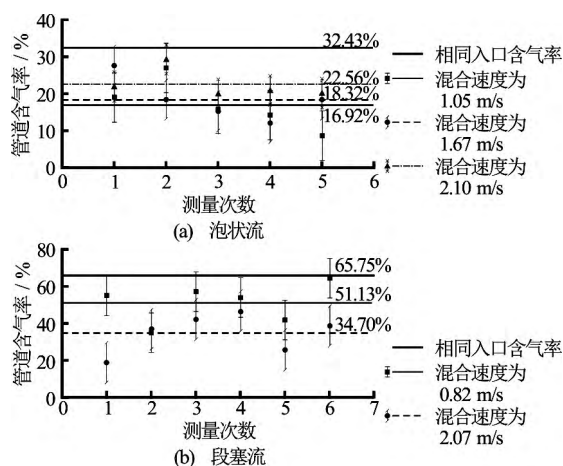


图 6 相同混合速度下管道含气率随入口含气率的变化情况
Fig.6. Average gas fraction versus input gas fraction on the same mixture velocity

2.3 段塞流特性分析

对于段塞流动而言, 其流动特性主要包括: 段塞速度、段塞频率以及段塞长度^[19]。这些流动特性参数, 不仅受管道尺寸等工程参数的影响, 同时受入口条件等操作参数的制约。本文仅考虑表观流速的变化对段塞特征的影响。

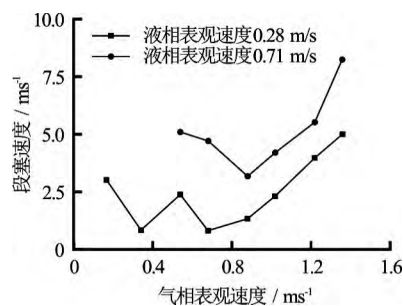


图 7 段塞速度随表观流速变化曲线
Fig.7. Velocity of the slug unit

假设两相邻传感器距离已知, 那么当一段塞单

元通过传感器时, 其压力信号便得以记录。用传感器间距除以段塞单元通过传感器所用的时间, 可得该工况条件下的段塞速度, 如图 7 所示。从图中可以看出: 随着液相表观速度的增大, 段塞速度也呈现增大的趋势; 而当液相表观速度一定时, 段塞速度随气相表观速度的增大而呈现先减小再增大的规律。然而这一现象表现得并不十分明显, 需要进一步通过实验进行验证。

段塞频率的定义为: 单位时间内有多少个段塞单元经过^[20]。图 8 给出了不同工况条件下, 段塞频率的变化情况。从图中可以看出, 随着表观流速的变化, 段塞频率也随之波动, 但大体趋势仍随表观速度的增大而增大的趋势。同时可以看出, 其波动范围大约在 0.1 Hz ~ 0.3 Hz 之间, 因此波动程度并不十分剧烈。然而在同一液相表观流速下, 段塞频率可能随着气相表观流速的增大, 而呈现出先减小再增大的变化规律。这一现象可能是由于在气相速度较小时, 气泡更易聚并, 极易形成段塞; 当气相速度较大时, 含气率较高, 也易出现气液交替出现的段塞流动。而在此之间可能存在一个临界值, 使段塞频率最低。

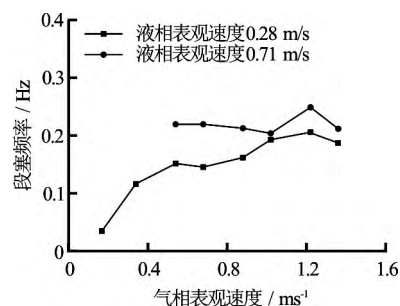


图 8 段塞频率随表观流速变化曲线
Fig.8. Frequency of the slug unit

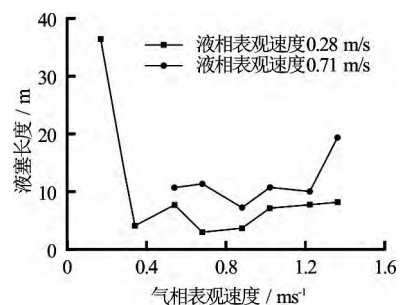


图 9 液塞长度随表观流速变化曲线
Fig.9. Length of the liquid slug unit

用液塞经过的时间乘以液塞速度, 就可以得到液塞长度。这一参数对于实际工程设计具有十分重要的指导意义。相对于气相速度而言, 液相速度对液塞长度具有更显著的影响。当液塞形成后, 会阻碍其后方气体前进, 且塞前液膜内的速度较小, 因此会将液膜内液体卷吸到液塞当中, 使液塞长度增加。

更进一步分析可知,由于在实际输运管道中很难对管内流型进行直接观测,因此大多采用压差信号作为表征。对压差信号进行功率谱密度分析,能够通过给定样本数据进行估计,得到一个平稳随机信号,特别是在无法使用清楚的数学关系式来进行描述的时候,更能找到压差信号的特征,从而可对流型识别产生积极影响。

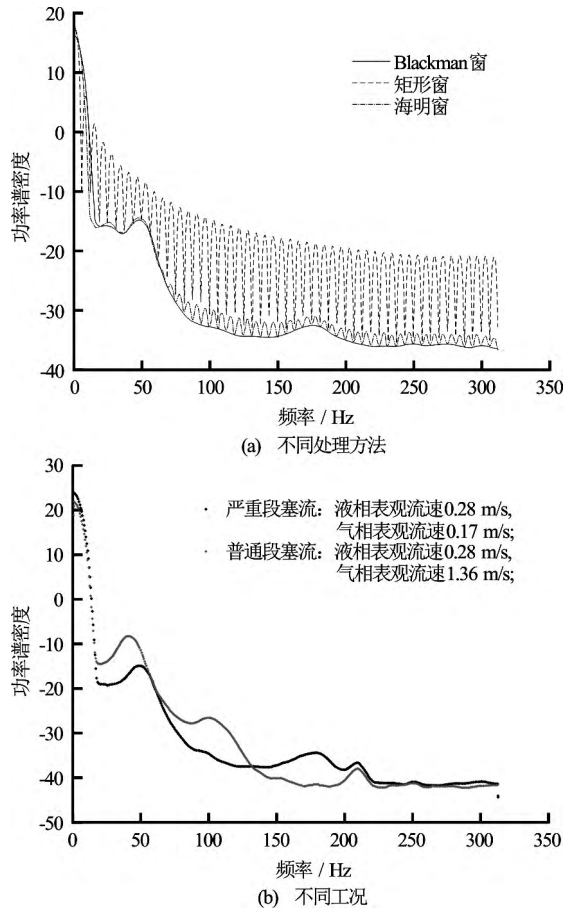


图 10 压差信号功率谱密度分布

Fig.10. Power spectrum density of the pressure drop

不同的处理方法可以得到不同的功率谱密度分布,如图 10(a)所示。从图中可以看出,选用不同窗口条件,可以得到不同的处理结果,因此可以根据实际需要,选择适当的处理方法从而得到包含清晰特征的处理结果。无论何种工况条件,段塞流动都呈现出多峰特性,如图 10(b)所示。根据这一结论,可以对管道在线流型进行辅助识别。

3 结论

本文针对水平-立管系统内的气液两相流动进行了实验研究,并得到如下主要结论:

(1) 对于水-空气两相流动,其流动形态与工况

条件息息相关。总结不同流型可以绘制流型图,并使用相关预测模型进行流型划分,然而在局部范围内,流型划分并不十分准确,这主要是由于水平-立管的复杂结构造成的,需要对此开展进一步的研究工作。

(2) 对于泡状流而言,速度滑移作为其最重要的流动特征之一,本文给出了定量化的描述,并结合漂移流模型,对速度滑移率随混合流速的变化进行了分析。从结果分析可知,速度滑移率随混合流速的增大而减小。

(3) 对于段塞流动而言,其流动特征主要包括:段塞速度、段塞频率以及段塞长度,并表现出随表观流速的增大而增大的变化趋势。然而在同一液相表观流速下,段塞特性参数可能随气相表观流速的增大,出现先减小再增大的变化过程。因此,对于压差信号进行功率谱密度计算,可对在线流型识别产生积极影响。

参 考 文 献:

- [1] XU J Y, GAO M C, ZHANG J. Pressure drop models for gas/non-Newtonian power-law fluids flow in horizontal pipes[J]. Chemical Engineering and Technology, 2014, 37(4): 717-722.
- [2] YEHUDA T, DVORA B. Counter current gas-liquid vertical flow, model for flow pattern and pressure drop[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1983, 9(6): 637-647.
- [3] DURST F, SCHÖNUNG B, SELANGER K, et al. Bubble-driven liquid flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 170: 53-82.
- [4] YENJAICHON W, GRACE J R, LIM C J, et al. Gas dispersion in horizontal pulp-fibre-suspension flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 49: 49-57.
- [5] BUNNER B, TRYGGVASON G. Dynamics of homogeneous bubbly flows: Part 1 rise velocity and microstructure of the bubbles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 466: 17-52.
- [6] BUNNER B, TRYGGVASON G. Effect of bubble deformation on the properties of bubbly flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 495: 77-118.
- [7] DABIRI S, SIRIGNANO W A, JOSEPH D D. Interaction between a cavitation bubble and shear flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 651: 93-116.
- [8] WYGNANSKI I J, CHAMPAGNES F H. On transition in a pipe: Part 1 the origin of puffs and slugs and

- the flow in a turbulent slug[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, 59: 281-335.
- [9] CAMPOS J B L M, GUEDES DE CARVALHO J R F. An experimental study of the wake of gas slugs rising in liquids[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, 196: 27-37.
- [10] ZHENG G, BRILL J P, TAITEL Y. Slug flow behavior in a hilly terrain pipeline[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1994, 20(1): 63-79.
- [11] 吴应湘, 郑之初, 李东晖, 等. 油气混输系统的实验研究与实验模拟准则[J]. *海洋工程*, 1999, 17(4): 1-9.
WU Ying-xiang, ZHENG Zhi-chu, LI Dong-hui, et al. An experimental study and simulation principles of an oil-gas multiphase transportation system[J]. *The Ocean Engineering*, 1999, 17(4): 1-9.
- [12] 许晶禹, 吴应湘, 李东晖. 液相介质对水平气液间歇流动压降的影响[J]. *过程工程学报*, 2006, 6(2): 161-166.
XU Jing-yu, WU Ying-xiang, LI Dong-hui. Effects of liquid phase properties on pressure drop during horizontal gas-liquid intermittent flow[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2006, 6(2): 161-166.
- [13] FERNANDES R C. Experimental and theoretical studies of isothermal upward gas-liquid flows in vertical tubes[D]. Houston, USA: University of Houston, 1981.
- [14] HARMATHY T Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent[J]. *AIChE Journal*, 1960, 6(2): 281-288.
- [15] XU J Y, WU Y X. A simple model for predicting the void fraction of gas/non-Newtonian fluid intermittent flows in upward inclined pipe[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2009, 196(6): 746-753.
- [16] YEHUDA T, DVORA B. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes[J]. *AIChE Journal*, 1980, 26(3): 345-354.
- [17] BØE A. Severe slugging characteristics[C]. *Selected Topics in Two-phase Flow*, Trondheim, Norway, 1981.
- [18] TAITEL Y, BARNEA D, DUKELER A E. A film model for the prediction of flooding and flow reversal for gas-liquid flow in the vertical tubes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1982, 8(1): 1-10.
- [19] XU J Y, WU Y X, SHI Z H, et al. Studies on two-phase co-current air/non-Newtonian shear-thinning fluid flows in inclined smooth pipes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2007, 33(9): 948-969.
- [20] TAITEL Y, DUKELER A E. A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1977, 3(6): 585-596.