

变工况气液段塞流诱导的柔性立管振动响应

高岳¹, 朱红钧^{1,2}, 颜知音³, 王珂楠⁴, 胡洁¹, 许兵¹

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 3. 中国石油西南油气田公司天然气净化总厂, 重庆 400021; 4. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘要: 柔性立管广泛用于海洋油气输送, 因管内气液两相流压力、密度等的时空变化, 易激发立管的振动响应。针对水动力段塞流诱导的柔性立管振动响应问题, 在气液两相流循环实验系统中开展了水动力段塞流诱导的悬链线型柔性立管模型振动响应测试, 采用非介入高速摄像测试方法同步捕捉了柔性立管模型的振动位移与管内气液两相的流动特征。通过改变段塞流混合流速(0.8~3.0 m/s)和气液比(1.0~11.0), 剖析了振幅与振频的时空分布、振动模态切换等振动特性与管内液塞长度、运移速度、流动频率间的内在联系。结果表明: 柔性立管模型的振动主要由一阶模态主导, 振动模态随时间发生切换, 即存在时间上的模态切换, 根据其特征, 辨识了三种模态切换形式, 对实验组次进行了分区。不同的模态切换形式与管内的段塞长度、段塞流动频率以及段塞在管内的分布有关。

关键词: 流致振动; 水动力段塞; 柔性立管; 模态切换; 非介入测试

中图分类号: TV131.2; P756.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)04-1044-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.04.018

引言

在海洋油气混输时, 由于地形、流量等因素的影响, 管内常会出现气液段塞流, 其通过海洋立管时, 由于密度、持液率等的时空变化及管内压力的持续波动, 使立管受到不稳定的流体作用力, 由此引发的立管振动称为段塞流致振动(slug flow-induced vibration, SIV)^[1]。段塞流致振动极易诱发立管的疲劳损伤, 增大立管失效的风险。

人们最早研究内流流致振动是从单相流诱导的管道振动开始的。1885年, Brillouin首次观察到了内流流致振动现象, Bourrieres在其基础上推导了单相输液直管的线性振动方程。Chen^[2-3]、Gregory等^[4]分别测试了内流诱导的水平管、竖直管和弯管振动响应, 发现流速和流向对振动起决定性作用。王孚懋等^[5]和徐合力等^[6]则对直管和弯管的流固耦合振动特性进行了数值模拟, 补充了管内的流场细节。然而, 他们的研究仅限于单相流体, 未涉及气液两相流。对于气液两相流诱导的管道振动, Qrtiz-Vidal等^[7]实验研究了气液两相流作用下水平管的振动特性, 发现两相混合流速、持液率和流型是影响振动的关键因素。An等^[8]通过数值分析得出管道的振幅随气体和液体流量的增大而增大。

Al-Kayiem等^[9]发现随着液体表观流速的增大, 管道的振幅增大。Luczko等^[10]、Bai等^[11]、Wang等^[12]以及Mohammed等^[13]也对直管流致振动响应进行了分析, 总结出气液比、流速等的变化是影响流致振动的关键因素。

实际海洋工程中的立管多为弯曲布置, 由于内部流体动量通量方向的变化, 弯管易受到内部流体施加的反作用力影响。Bordalo等^[14]研究表明悬链线型和懒散波型立管在气液两相流的作用下均会产生振动。Riverin等^[15]实验观察到气液两相流诱导U形管产生了剧烈的振动, 总结出气液两相流动方向的改变是振动产生的原因之一。Pontaza等^[16]数值模拟研究了海洋跳接管的多相流流致振动响应, 发现跳接管的振动主要发生在弯曲平面内。Jia^[17]则利用计算流体力学(CFD)方法模拟了海底管道、跳接管及立管在多相流作用下的振动响应, 发现长段塞和大流量会增强管道振动, 同时振动也会对段塞的形成产生影响。Chatjigeorgiou^[18]针对悬链线型立管在段塞流作用下的振动响应进行了数值研究, 发现段塞频率的减小使作用在管壁上的流体力增大, 从而导致立管的振幅增大。Cabrera-Miranda等^[19]通过建立数值模型, 研究了刚性懒散波型立管的段塞流致振动响应特性, 发现高频且较短的段塞流导致立管上部位置产生较弱的振动, 相反, 在段塞

收稿日期: 2022-01-03; 修订日期: 2022-04-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979238); 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开放课题(HSSE-2005)。

频率较低且长度较大时立管的振幅较大。Ma等^[20]通过建立弯曲立管的二维数值模型,研究了气液表观流速及段塞长度、速度等参数对悬链线型立管流致振动响应的影响,其考虑的段塞流是均匀稳定的,而实际工程中段塞流往往不稳定,段塞长度、流动频率等都随时空变化,目前鲜见非稳定段塞流诱导的立管振动响应数值分析方面的报道。

在实验方面,Zhu等^[21-23]利用非介入高速摄像技术研究了不同气液比的段塞流作用下悬链线型柔性立管的振动特性,结果表明,段塞流作用下柔性立管的振动主要发生在立管弯曲平面内,长液塞经过立管时会激发强烈的振动,随着段塞来流的变化,立管的振动响应也随之变化,呈现非线性的时空变化特性。Vieiro等^[24]开展了小尺寸懒散波型柔性立管在气液两相流作用下的振动测试,观察到了柔性立管的一阶模态振动响应,但对管内的流场细节并未进行详细的分析。然而,对于非线性布置的悬链线型柔性立管,在不稳定的段塞来流作用下往往会产生复杂的非线性多模态振动响应,而对于此方面的研究还较少。因此,本研究将悬链线型柔性立管混输油气两相流这一复杂的实际工程问题简化为基础的物理问题,开展概化模型实验,即开展不同气液比、混合流速工况下的水动力段塞诱导的柔性立管模型振动响应实验测试,旨在分析非线性柔性立管模型复杂的多模态振动响应特性,揭示水动力段塞诱导的柔性立管模型振动时的模态切换机理。

1 实验方法

1.1 实验装置

本文实验在气液两相流循环装置中开展,图1为实验装置示意图,主要包括内流循环系统和数据采集系统两部分。内流循环系统包括:潜水泵、气泵、气体浮子流量计、液体涡轮流量计、针型阀、T形三通、循环管路和蓄水箱。液体和气体分别通过潜水泵和气泵泵送,经流量计计量后在T形三通混合,然后进入主管路,在水平管内充分发展后进入测试立管模型,最终经管路流回蓄水箱循环使用。数据采集系统包括:高速摄像和压力传感器。实验采用非介入高速摄像技术^[25-26]同步捕捉立管模型振动和段塞流动特征,并利用压力传感器监测管内流动压力的变化,其中高速摄像机型号为HXG20,最大像素为 2048×1088 ,拍摄频率为100 fps(frames per second)。两台高速摄像机布置在柔性立管所在弯曲平面的正前方和斜上方,分别采集平面内(xoz 平

面)和平面外(y 方向)的振动位移及立管模型内的流动特征。三个压力传感器分布在水平管道的上游和柔性立管的进、出口,同步监测管内流体的压力波动,其中上游水平段的压力传感器距立管模型进口的长度为 l_1 。

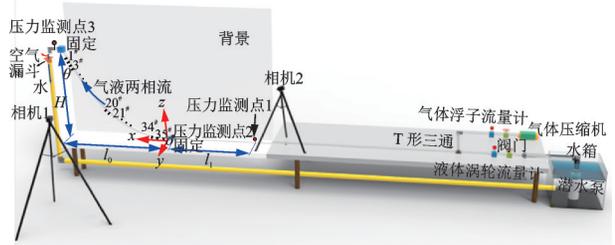


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

为能利用高速摄像这种光学测试手段同时捕捉柔性立管模型的振动位移和管内的气液交界面,选用透明的硅胶管作为模型管道,硅胶管的弹性模量为7.15 MPa,管长为1.440 m,水平跨长 l_0 为1.029 m,详细参数见表1。为了捕捉柔性立管的振动位移,在管道外表面等间距标记了35个黑色标记点,标记点的宽度为8 mm,相邻两个标记点的中心间距为40 mm。

1.2 衰减测试

为得到柔性立管模型的固有频率,首先对立管模型施加初始位移进行衰减测试。考虑到不同流动工况下管内通过的气液两相流质量不同,因此,分别测试了管内充满水和空管两种极端条件下的自振频率,发现柔性立管模型弯曲平面内 x 和 z 方向的自振频率相同,空管时一阶自振频率皆为2.65 Hz,二阶自振频率为3.96 Hz,前两阶自振频率如表1所示。

表1 立管模型参数

Tab. 1 Parameters of riser model

参数	数值	单位
管长 l	1.440	m
内径 d	0.008	m
外径 D	0.010	m
垂直高度 H	0.900	m
弹性模量 E	7.15	MPa
柔性立管模型密度 ρ_r	1041.8	kg/m ³
初始悬挂角 θ	25.98	(°)
平面内前两阶自振频率(空管)	2.65, 3.96	Hz
平面外前两阶自振频率(空管)	1.35, 2.68	Hz
平面内前两阶自振频率(充水管)	2.25, 3.74	Hz
平面外前两阶自振频率(充水管)	1.21, 2.55	Hz

1.3 实验组次

测试开始前,对压力传感器进行了校正,并用高速摄像机采集了柔性立管模型静止时的初始图像,作为图像后处理的参照模板。实验时,为测得稳定的实验数据,待气液两相流在管内循环流动 10 min 后,再同步触发高速摄像和压力监测软件进行数据的采集。测试时,通过调节气体和液体的流量实现混合流速固定的条件下($v_m=0.8\sim 3.0$ m/s)变气液比($Q_G/Q_L=1.0\sim 11.0$)的工况调节。图 2 为本实验测试的流型图谱。其中, v_{SG} 为气体表观流速, v_{SL} 为液体表观流速。由图 2 可知,与 Bhagwat 等^[25]在 45° 倾斜管及 Barnea 等^[26]在垂直管中发现的段塞流区域基本吻合,出现的部分偏差与立管模型的管材、管径及管道布型等因素有关。因气泵、水泵存在一定的脉动特性,本实验立管模型中出现的段塞长度在一定范围内呈正态分布,与工程实际相符。

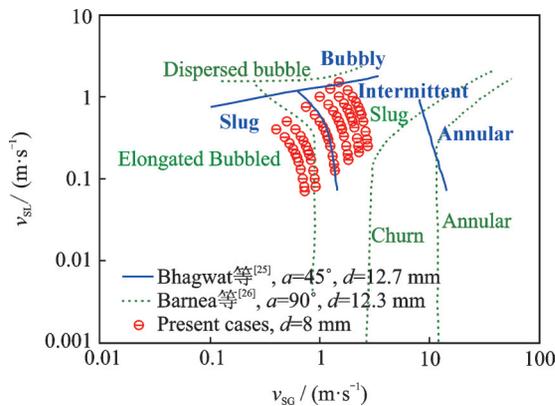
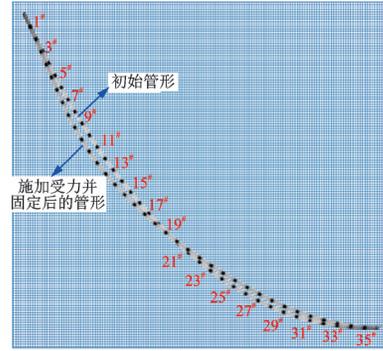


图 2 实验工况流型对比图

Fig. 2 Comparison diagram of flow patterns in experimental working conditions

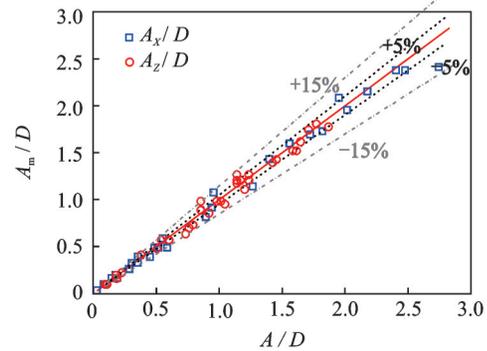
1.4 实验后处理及精度验证

本实验中高速摄像机拍摄的图像为灰度图像,利用基于矩不变量的图像识别及后处理解析的 MATLAB 图像后处理程序^[21-22]对其进行序列处理,得到立管的振动位移数据。为确定利用高速摄像捕捉振动位移的非介入式测试方法的精度,如图 3(a) 所示,实验前,首先给立管模型施加一定的初始位移并固定在网格坐标背景板上,利用高速摄像捕捉此时立管相对于初始位置的位移。将后处理得到的位移与设定的位移对比,得到测量值与设定值在 x 和 z 两个方向的误差。如图 3(b) 所示,两个方向的最大误差都小于 15%,其中 x 方向的平均误差为 1.37%, z 方向的平均误差为 1.79%,均小于 5%,表明该图像后处理方法可以较精确地捕捉柔性立管模型的位移。



(a) 精度测试示意图

(a) Schematic diagram of precision examination



(b) 标记点位移设定值与计算值误差分析

(b) Error analysis between the set value and the calculated value of marker point displacement

图 3 后处理方法的精度验证

Fig. 3 The precision examination of post-processing method

2 结果分析

2.1 模态切换分区

实验发现柔性立管模型的振动主要发生在平面内 x 和 z 两个方向,振动由一阶模态主导,根据振动形状和主导振动频率,将振动过程中出现的模态分为三种:一阶模态、二阶模态和过渡模态。其中,振动形状呈现一阶模态振型并且主振频率接近一阶固有频率时,判定为一阶模态振动;振动形状呈现二阶模态振型,但主振频率仍接近一阶固有频率,定义为过渡模态振动;当振动形状呈现二阶模态振型且主振频率与二阶固有频率相近时,认为发生了二阶模态振动。振动过程中存在不同模态振动间的切换。根据模态切换特征,将模态切换分为 A1, A2 和 B 三种形式,具体的模态切换分区如图 4 所示。模态切换 A1 和 A2 主要发生一阶模态和过渡模态之间的切换,模态切换 A1 中一阶模态出现的时间较长,过渡模态出现的频次较少,持续时间较短,这种模态切换主要发生在气液混合流速和气液比均较小的工况($Q_G/Q_L \leq 2.5, v_m \leq 2.0$ m/s);模态切换 A2 中一阶模态和过渡模态交替出现,但过渡模态出现的时间相对较长,此种模态切换主要发生在混合流速较大、气

液比较小的工况 ($Q_G/Q_L \leq 2.5, v_m \geq 2.5$ m/s), 此时管内出现的液塞较短, 流速和频率较高。模态切换B主要发生一阶模态和二阶模态间的切换, 一阶模态存在的时间更长, 模态切换B主要出现在气液比相对较大的工况 ($Q_G/Q_L \geq 3.0$), 此种工况下管内液塞流动频率较低。

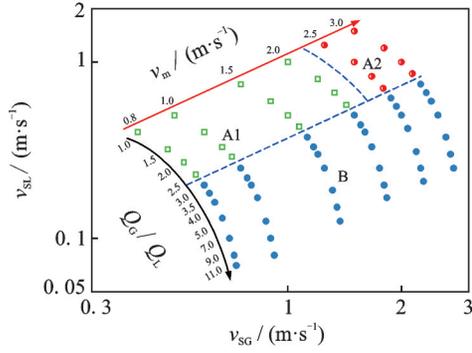


图4 振动模态切换分区

Fig. 4 Vibration mode switching partition

2.2 模态切换A1

2.2.1 振动时空变化

图5为 $v_m=1.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.5$ 时, 柔性立管模型在30 s内 z 方向的振幅时空分布及对应的主导模态变化, 其中, s/l 为柔性立管模型的展向无量纲长度, A_z/D 为 z 向的无量纲振幅, M1代表一阶模态, MT代表过渡模态。从振动形态上看, 此工况下柔性立管模型的振动主要表现为—阶模态振动, 过程中间歇地出现了过渡模态, 即—阶向二阶振动切换的过渡模态振动, 此时振动形状多表现为二阶模态振型, 但振动仍为—阶振动频率主导。如图5中的I时间段(30.68~35.00 s)振动由—阶模态主导, 而在II时间段(35.36~36.62 s)出现了短时间的模态过渡。

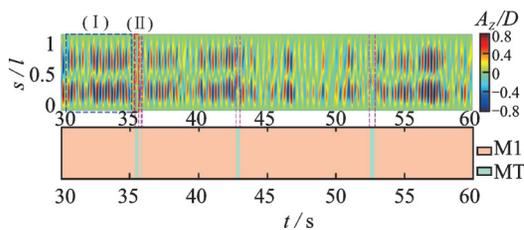
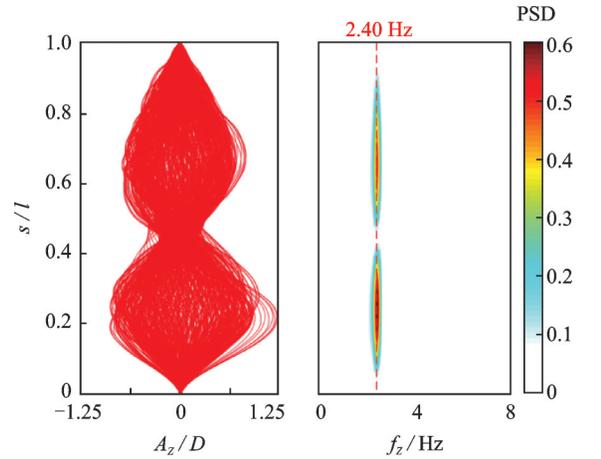


图5 振幅时空分布及对应的振动模态变化 ($v_m=1.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.5$)

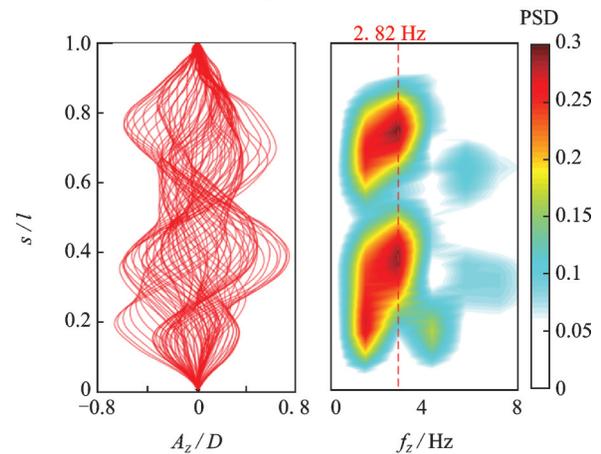
Fig. 5 Temporal-spatial distribution of amplitude and variation of corresponding vibration mode ($v_m=1.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.5$)

为更好地分析这种模态切换现象, 将I时间段(30.68~35.00 s)和II时间段(35.36~36.62 s)的振动包络图与频谱空间分布绘制于图6中。由图6(a)可知, 振动包络图中的节点位置固定, 频谱能量几乎

为零, 主导振动频率为2.40 Hz, 与—阶自振频率接近, 振动主要由—阶模态主导。由图6(b)可知, 虽然振动形状表现为二阶模态特征, 存在不稳定的非零振动节点, 但主导振动频率约为2.82 Hz, 仍与—阶自振频率接近, 说明此时振动为—阶向二阶振动的过渡过程。因此, 此工况下模态主要发生—阶模态与过渡模态之间的切换。



(a) I时间段
(a) Period I



(b) II时间段
(b) Period II

图6 立管模型的瞬时包络图及频谱的空间分布 ($v_m=1.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.5$)

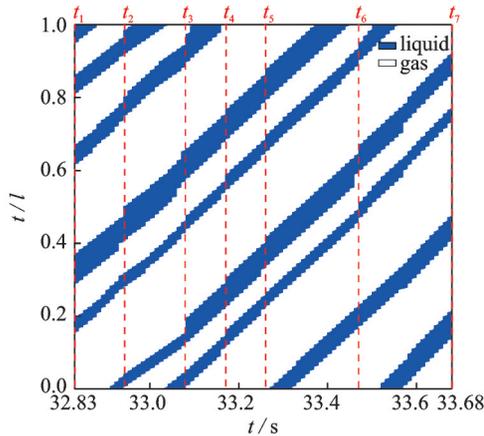
Fig. 6 Instantaneous envelope diagram of riser model and PSD distribution ($v_m=1.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.5$)

2.2.2 管内流动特性

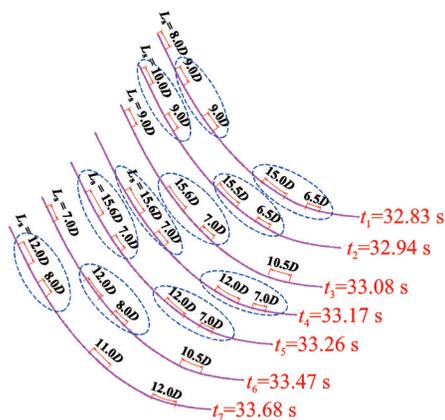
图7为柔性立管模型在I和II时间段管内的段塞流动时空变化和代表性时刻的立管模型瞬时振动形状及管内的液塞分布情况。由图7(a)可知, —阶振动发生时, 管内同时出现的液塞个数较多, 约为4~5个, 长度范围为 $6.5D \sim 15.6D$, 段塞流动频率集中在 $4.28 \sim 7.89$ Hz。其中, 段塞流动频率为段塞运移速度与段塞单元长度之比。

图7(b)为I时间段内代表性时刻立管模型的振动形状及管内的流动变化, 管内长液塞和短液塞一般成对出现, 形成一段长液塞和一段短液塞紧邻

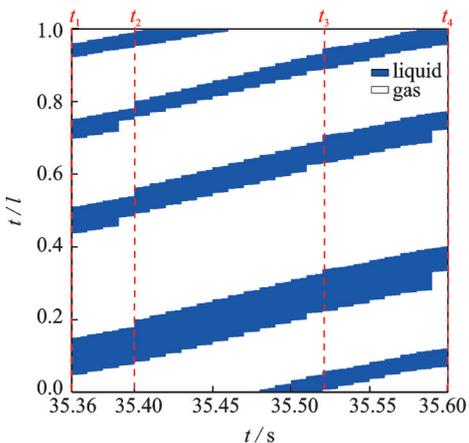
的液塞组,液塞组之间的距离较远,如图7(b)所示, $t_4=33.17$ s时,长度为15.6D和7.0D的液塞成对出现在柔性立管上部位置,而另一长度为12.0D和7.0D的液塞成对出现在柔性立管模型的下部位置,这两个间隔较远的液塞组导致柔性立管模型的受力相对集中,呈现出一阶模态的振动。如图7(c)所示, II时间段液塞的长度范围为8.0D~16.0D,长度相对增加,段塞流动频率降低,主要集中在3.89~5.29 Hz。如图7(d)所示,此时管内段塞分布较散,导致流体作用力分散在管壁上,这可能是导致立管模型振动出现模式过渡的原因。



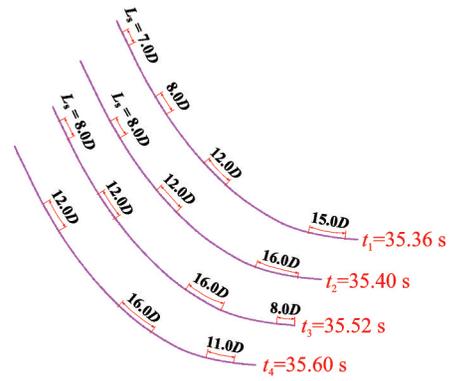
(a) I时间段管内流动时空变化
(a) Temporal-spatial variation of flow in tube in period I



(b) I时间段内代表性时刻
(b) The representative moments in period I



(c) II时间段管内流动时空变化
(c) Temporal-spatial variation of flow in tube in period II



(d) II时间段内代表性时刻
(d) The representative moments in period II

图7 柔性立管模型的瞬时振型及管内的流动特征 ($v_m=1.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.5$)

Fig. 7 The instantaneous vibration mode of flexible riser model and flow characteristics in tube ($v_m=1.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.5$)

2.3 模态切换 A2

2.3.1 振动时空变化

图8给出了 $v_m=2.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.0$ 时, 柔性立管在35 s内 z 方向的振幅时空分布及对应的主导模态变化。此工况下柔性立管在大部分时间的振动形态都表现为二阶模态振型, 但图9中振动频率主要集中在二阶自振频率附近, 表明此工况下的振动由过渡模态主导。振动模态切换主要发生在过渡模态和一阶模态之间, 如图8所示, I时间段(24.50~26.30 s)的振动由一阶模态主导, 而II时间段(20.30~23.60 s)的振动则由过渡模态主导。

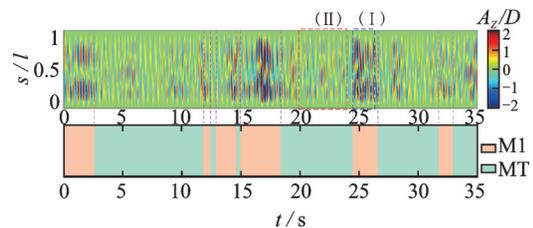


图8 振幅时空分布及对应的振动模态变化 ($v_m=2.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.0$)

Fig. 8 Temporal-spatial distribution of amplitude and variation of corresponding vibration mode ($v_m=2.5$ m/s, $Q_G/Q_L=2.0$)

图9对比了 I时间段(24.50~26.30 s)和II时间段(20.30~23.60 s)的振动包络图和频谱空间分布。在图9(a)中, 沿展向的振动包络图呈现出明显的一阶振型, 其对应的频谱分布也与振动吻合, 在振动波节位置对应的频谱能量较小, 波峰处的能量较大且频率集中在一阶自振频率附近。而图9(b)中的振动包络图呈现二阶模态振型, 但从频谱分布上分析, 柔性立管展向大部分位置的主导频率为2.02 Hz, 在

0.38 s/l <math>< 0.55</math> 的位置主导频率为二阶振动频率,表明该振动为一阶向二阶模态切换时的过渡模态,这种过渡模态的出现主要与柔性立管中多个短液塞产生的不稳定流体力在空间上的竞争有关,如图10(b)所示。此工况下过渡模态出现的时间更长,振动过程中的模态切换主要发生在过渡模态与一阶模态之间。

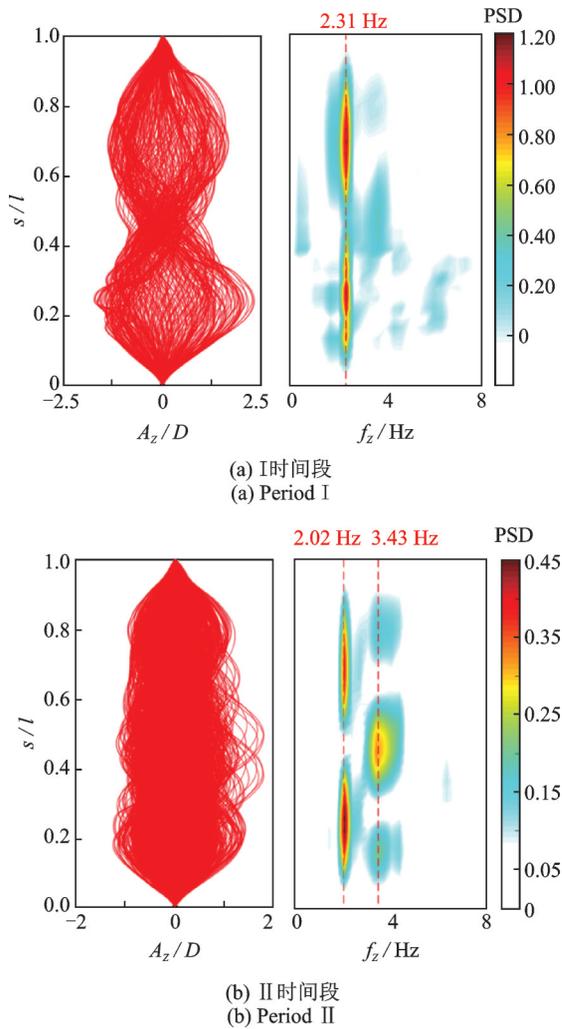


图9 立管模型的瞬时包络图及频谱的空间分布($v_m=2.5\text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=2.0$)

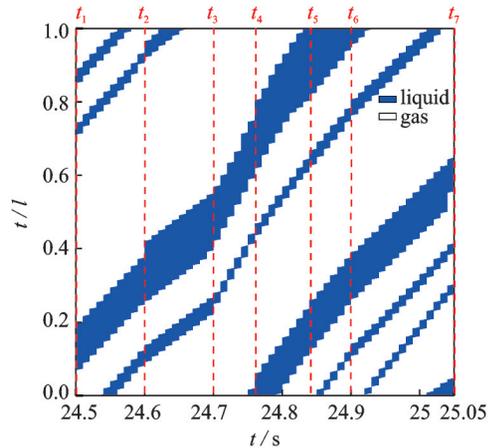
Fig.9 Instantaneous envelope diagram of riser model and PSD distribution ($v_m=2.5\text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=2.0$)

2.3.2 管内流动特性

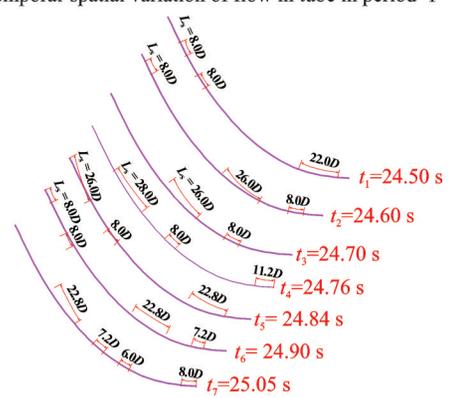
图10给出了柔性立管模型在I和II时间段内的段塞流动时空变化和代表性时刻的立管模型瞬时振动形状及管内的液塞分布情况。如图10(a)所示,柔性立管模型在I时间段(24.50~26.30 s)的振动由一阶模态主导,管内通过的液塞较长,对应的段塞流动频率小于II时间段通过管内的段塞流动频率,主要集中在4.89~8.69 Hz,仍大于二阶自振频率。此时管内同时出现的液塞个数较少,作用在管壁上的流体力相对集中,使立管呈现一阶模态振动。如图10(b)中的 t_1, t_5 及 t_6 时刻,液塞集中分布在柔性立管上、下两端,由于一端受力较大而发生一阶振

动。此时,柔性立管模型的振幅比II时间段过渡模态振动产生的振幅大,这主要与液塞长度增大且作用力集中有关。

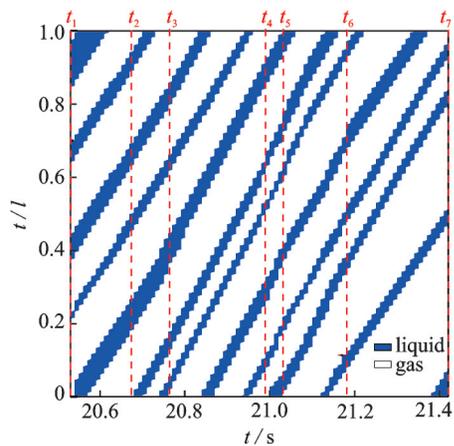
如图10(c)所示,II时间段(20.30~23.60 s)管内段塞长度变化不大,主要集中在7.0D~14.0D范围内,由于段塞流速较大,长度较小,导致段塞流动频率较高,集中在5.71~17.77 Hz范围内,所以同一瞬时刻出现在管内的段塞个数较多,约为4~6个。如图10(d)所示,多个长度相当的液塞同时出现在立管模型内,使得作用在管壁上的流体力相互竞争,易使立管模型产生过渡模态振动。



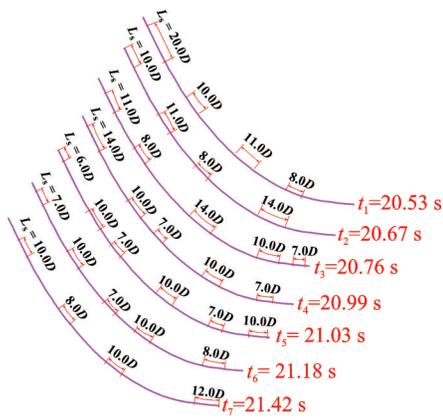
(a) I时间段管内流动时空变化
(a) Temporal-spatial variation of flow in tube in period I



(b) I时间段内代表性时刻
(b) The representative moments in period I



(c) II时间段管内流动时空变化
(c) Temporal-spatial variation of flow in tube in period II



(d) II时间段内代表性时刻

(d) The representative moments in period II

图10 柔性立管模型的瞬时振型及管内的流动特征 ($v_m=2.5 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=2.0$)

Fig.10 The instantaneous vibration mode of flexible riser model and flow characteristics in tube ($v_m=2.5 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=2.0$)

可见,柔性立管模型的振动大小与经过管内的液塞长度及流动频率有关,流动频率较低且长度较长的液塞引起的振动幅度较大,相反,液塞流动频率较高且长度较短时,柔性立管模型的振动减弱,这与Cabrera-Miranda等^[19]的研究结果一致。

2.4 模态切换B

2.4.1 振动时空变化

图11为 $v_m=2.0 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=3.0$ 时,柔性立管模型在30 s内 z 方向的振幅时空分布及对应的振动模态变化,其中M2代表二阶模态。此工况下柔性立管的振动由一阶模态主导,但振动中间歇出现了二阶模态振动。如图11中I时间段(36.70~39.30 s)的振动由一阶模态主导,而II时间段(40.70~42.30 s)的振动主导模态变为二阶。从图11中可以看出,柔性立管模型在一阶模态主导时,振动表现出明显的驻波特性,但随着高阶模态的参与,行波特性逐渐突显。

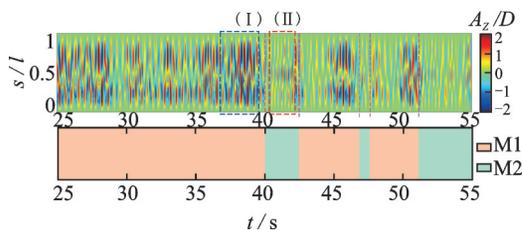
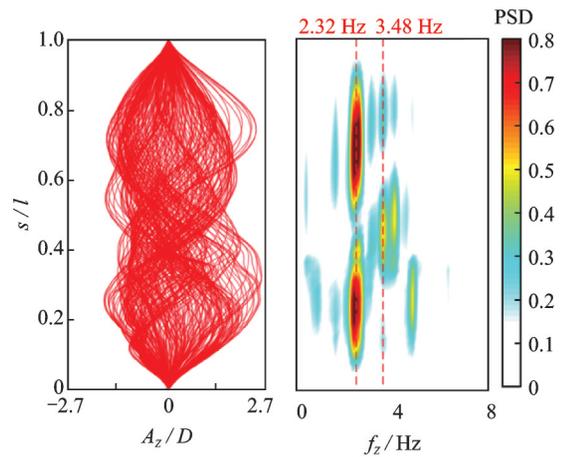


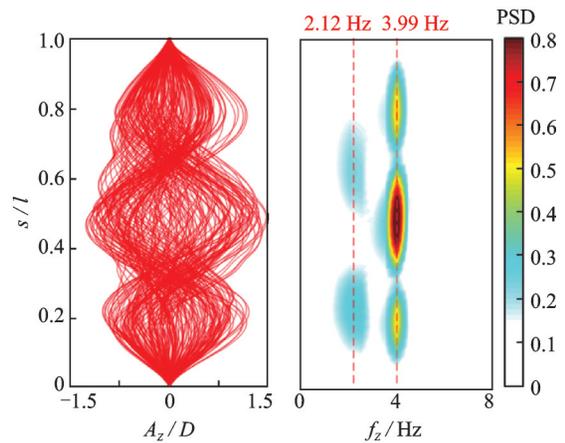
图11 振幅时空分布及对应的振动模态变化 ($v_m=2.0 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=3.0$)

Fig.11 Temporal-spatial distribution of amplitude and variation of corresponding vibration mode ($v_m=2.0 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=3.0$)

图12给出了I时间段(36.70~39.30 s)和II时间段(40.70~42.30 s)的振动包络图和频谱空间分布。图12(a)中的振动包络图和频谱分布表明I时间段(36.70~39.30 s)的振动主要由一阶模态主导,此时的主导频率为2.32 Hz。而在图12(b)中存在两个明显的非零振动节点,节点处的能量较小,主导振动频率转移到3.99 Hz,频谱能量集中在振动包络的三个峰值处,且在 $0.30 \leq s/l \leq 0.65$ 处能量更大,表明此时的振动主导模态为二阶。



(a) I时间段
(a) Period I



(b) II时间段
(b) Period II

图12 立管模型的瞬时包络图及频谱的空间分布 ($v_m=2.0 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=3.0$)

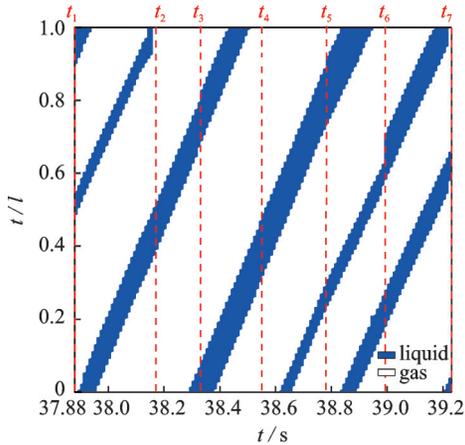
Fig.12 Instantaneous envelope diagram of riser model and PSD distribution ($v_m=2.0 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L=3.0$)

2.4.2 管内流动特性

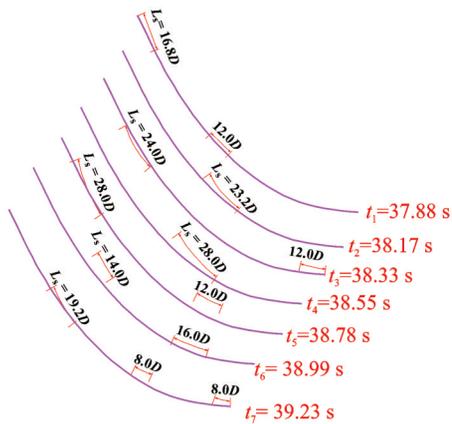
为分析产生这种模态切换的原因,选取I时间段(36.70~39.30 s)和II时间段(40.70~42.30 s)中代表性时刻柔性立管模型的瞬时振动形状和管内的流动信息进行分析如图13所示。

图13(a)展示了柔性立管模型在I时间段管内的段塞流动时空变化。由于入口流量固定不变,所以不同长度的液塞运移速度相差不大,但段塞频率

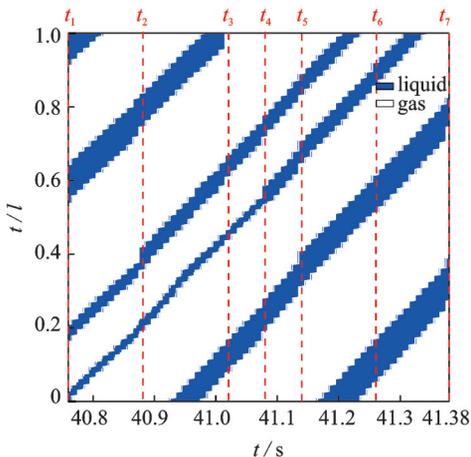
随段塞长度的变化而变化。图13(b)中 $t_1 \sim t_7$ 时刻展示了液塞经过立管时立管模型的瞬时振动形状及管内流动特征。一阶振动发生时,柔性立管模型内液塞较长,最长达 $28D$,对应的段塞流动频率为 2.56 Hz ,与一阶自振频率接近。图13(c)为II时间段管内的段塞流动时空变化。管内通过的液塞长度变短,长度范围在 $4.0D \sim 15.2D$,对应的段塞流动频率增大,且与二阶自振频率接近。如图13(d)所示,柔



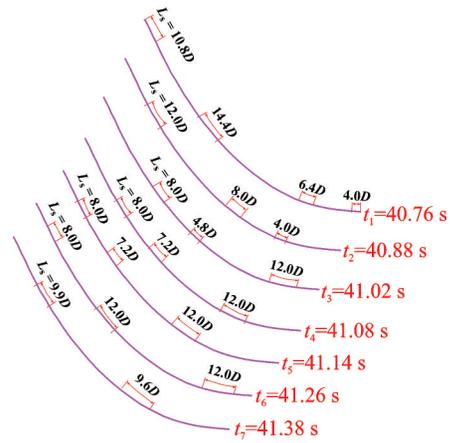
(a) I时间段管内流动时空变化
(a) Temporal-spatial variation of flow in tube in period I



(b) I时间段内代表性时刻
(b) The representative moments in period I



(c) II时间段管内流动时空变化
(c) Temporal-spatial variation of flow in tube in period II



(d) II时间段内代表性时刻
(d) The representative moments in period II

图13 柔性立管模型的瞬时振型及管内的流动特征 ($v_m = 2.0 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L = 3.0$)

Fig. 13 The instantaneous vibration mode of flexible riser model and flow characteristics in tube ($v_m = 2.0 \text{ m/s}$, $Q_G/Q_L = 3.0$)

性立管模型的振动由二阶模态主导。可见,此种工况下的模态切换主要发生在一阶模态和二阶模态之间,模态切换主要与段塞流动频率有关,振动模态随管内通过的段塞流动频率的变化而改变。

3 结论

本文通过建立气液两相流循环装置,开展了多工况下气液段塞流诱导的悬链线型柔性立管模型振动响应实验,分析了柔性立管模型的振动响应及模态切换特性,得出以下结论:

(1)在本文实验研究的条件下,尽管不同流动工况的立管模型振动主导模态均为一阶,但振动过程中存在三类模态切换现象:当 $Q_G/Q_L \leq 2.5$, $v_m \leq 2.0 \text{ m/s}$ 时,柔性立管模型的模态切换主要发生在一阶和过渡模态之间,一阶模态振动存在的时间较长;当 $Q_G/Q_L \leq 2.5$, $v_m \geq 2.5 \text{ m/s}$ 时,柔性立管模型的振动也主要发生一阶与过渡模态间的切换,但过渡模态出现的时间更长;当 $Q_G/Q_L \geq 3.0$ 时,柔性立管模型的振动过程中发生一阶与二阶模态间的切换。

(2)由于实际段塞频率是波动变化的,导致柔性立管同一位置受到的流体力的频率也随之脉动变化。因此,振动频率的带宽较大,不同长度的液塞拟流动频率不同,振动模态也随之变化,从而使振动响应呈现不同的模态切换现象。不同模态切换的发生与管内的液塞长度、液塞流动频率及液塞分布位置都有关,较长的液塞或液塞组相对集中地分布在立管中,易使立管产生一阶模态振动;而段塞流动频率

较高且液塞较短时,多段液塞均布在立管中,多个段塞频率相互竞争,易使立管模型产生过渡模态振动。段塞流动频率较低时,流动频率的变化也会使振动模态发生切换。

参考文献:

- [1] Gourma M, Verdin P G. Nature and magnitude of operating forces in a horizontal bend conveying gas-liquid slug flows[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 190: 107062.
- [2] Chen S S. Flow-induced in-plane instabilities of curved pipes[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1972, 23(1): 29-38.
- [3] Chen S S. Vibrations of continuous pipes conveying fluid [M]. *Flow-Induced Structural Vibrations*, 1974: 663-675.
- [4] Gregory R W, Paidoussis M P. Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid II . experiments[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1966, 293(1435): 528-542.
- [5] 王孚懋, 许宗岭, 吴文兵, 等. 脉动力作用下充液直管动态特性分析[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(2): 11-14.
WANG Fumao, XU Zongling, WU Wenbing, et al. Dynamic characteristic analysis of fluid-filled pipe under the action of fluctuating pressure[J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 33(2): 11-14.
- [6] 徐合力, 蒋炎坤. 弯曲输流管道流固耦合流动特性研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2008, 32(2): 343-346.
XU Heli, Jiang Yankun. Research on flow characteristics of fluid-solid coupling in bent pipe[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2008, 32(2): 343-346.
- [7] Ortiz-Vidal L E, Mureithi N W, Rodriguez O M H. Vibration response of a pipe subjected to two-phase flow: analytical formulations and experiments[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 313: 214-224.
- [8] An Chen, Su Jian. Dynamic behavior of pipes conveying gas-liquid two-phase flow[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, 292: 204-212.
- [9] Al-Kayiem H H, Mohammed A O, Al-Hashimy Z I, et al. Statistical assessment of experimental observation on the slug body length and slug translational velocity in a horizontal pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 105: 252-260.
- [10] Łuczko J, Czerwiński A. Nonlinear three-dimensional dynamics of flexible pipes conveying fluids[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2017, 70: 235-260.
- [11] Bai Y C, Xie W D, Gao X F, et al. Dynamic analysis of a cantilevered pipe conveying fluid with density variation[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 81: 638-655.
- [12] Wang L, Yang Y R, Li Y X, et al. Dynamic behaviours of horizontal gas-liquid pipes subjected to hydrodynamic slug flow: modelling and experiments[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2018, 161: 50-57.
- [13] Mohammed A O, Al-Kayiem H H, Nasif M S, et al. Effect of slug flow frequency on the mechanical stress behavior of pipelines[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2019, 172: 1-9.
- [14] Bordalo S N, Morooka C K. Slug flow induced oscillations on subsea petroleum pipelines[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 165: 535-549.
- [15] Riverin J L, Pettigrew M J. Vibration excitation forces due to two-phase flow in piping elements[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2007, 129(1): 7-13.
- [16] Pontaza J P, Menon R G. Flow-induced vibrations of subsea jumpers due to internal multi-phase flow [C]. *Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Rotterdam, The Netherlands, 2011: 585-595.
- [17] Jia D. Slug flow induced vibration in a pipeline span, a jumper and a riser section [C]. *Offshore Technology Conference*. Houston, USA, 2012.
- [18] Chatjigeorgiou I K. Hydroelastic response of marine risers subjected to internal slug-flow [J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 62: 1-17.
- [19] Cabrera-Miranda J M, Paik J K. Two-phase flow induced vibrations in a marine riser conveying a fluid with rectangular pulse train mass[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 174: 71-83.
- [20] Ma B, Srinil N. Planar dynamics of inclined curved flexible riser carrying slug liquid-gas flows[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 94: 102911.
- [21] Zhu H J, Gao Y, Zhao H L. Experimental investigation of slug flow-induced vibration of a flexible riser[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106370.
- [22] Zhu H J, Gao Y, Srinil N, et al. Mode switching and standing-travelling waves in slug flow-induced vibration of catenary riser[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 203: 108310.
- [23] Zhu H J, Gao Y, Zhao H L. Coupling vibration response of a curved flexible riser under the combination of internal slug flow and external shear current[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 91: 102724.
- [24] Vieiro J J, Akhiiartdinov A, Sævik S, et al. Two-way coupled fluid-structure interaction of gas-liquid slug flow in a flexible riser: small-scale experiments and simula-

- tions[J]. *Multiphase Science and Technology*, 2019, 31(1): 27-43.
- [25] Bhagwat S M, Ghajar A J. Experimental investigation of non-boiling gas-liquid two phase flow in upward inclined pipes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 79: 301-318.
- [26] Barnea D, Luninski Y, Taitel Y. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1983, 61(5): 617-620.

Slug flow-induced vibration of a flexible catenary riser model with variable gas-liquid flows

GAO Yue¹, ZHU Hong-jun^{1,2}, YAN Zhi-yin³, WANG Ke-nan⁴, HU Jie¹, XU Bing¹

(1.School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2.State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
3.Natural Gas Purification Plant, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chongqing 400021, China;
4.Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: Flexible risers are widely used in offshore oil and gas transportation. The internal oil-gas mixed flow contributes to the vibration response of flexible risers due to the temporal-spatial evolution of fluid pressure and density. Experiments were conducted in an air-water test loop to investigate the vibration response of a flexible catenary riser model excited by internal hydrodynamic slug flows. A non-intrusive technique of high-speed imaging method was employed to record the vibration displacements of riser model and the characteristics of two-phase flow in the riser simultaneously. The gas-liquid ratio ranges from 1.0 to 11.0 with a constant mixture velocity that increases from 0.8 m/s to 3.0 m/s. An in-depth discussion is conducted on the intrinsic link between the spatial-temporal evolution of the response displacements, vibration frequency, mode switching and the slug flow features including the length of liquid slug, migration velocity, recurrence frequency of slugs. Experimental results indicate that there is mode switching in time, and three types of mode switching are identified on the basis of the switching characteristics. A partition map of considered cases in terms of mode switching is proposed. The results show that the mode switching mainly depends on the length, recurrence frequency and the distribution of slug flow in the riser model.

Key words: flow-induced vibration; hydrodynamic slug flow; flexible riser; mode switching; non-intrusive measurement

作者简介:高岳(1991—),女,博士,讲师。电话:18782263439; E-mail: 202199010177@swpu.edu.cn。

通讯作者:朱红钧(1983—),男,博士,教授。电话:(028)83037077; E-mail: zhuhj@swpu.edu.cn。