文章编号:1673-5005(2016)01-0134-06 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.01.019

考虑弹性基础的气液两相流海洋立管耦合振动分析

王 琳[1,2], 李玉星[1,2], 刘 昶[1,2], 胡其会[1,2], 王娅婷[3], 王 权[1,2]

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院,山东青岛 266580; 2. 山东省油气储运安全省级重点实验室,山东青岛 266580; 3. 中煤科工集团重庆设计研究院有限公司,重庆 400016)

摘要:基于气液两相流立管系统的模态分析和气液两相流流动特性试验,预测与评估不同流态的气液两相流引起弹性基础上海洋立管的振动特性。模态分析中考虑流体密度分布的变化和不同弹性基础系数对振动模态的影响;气液两相流流动特性试验中,绘制含 7 种流型的流型图,测试各流型的压力波动特性并进行时频分析。模态分析与试验结果相结合,分析不同弹性基础时 7 种流型引起立管共振的可能性,并预测各流型引起立管振动的特性。最后,测试 7 种流型引起的试验装置的振动响应,验证耦合振动分析方法的准确性。结果表明:气液两相流和弹性基础对立管系统的固有频率和振型有显著影响;立管系统无弹性基础支承时,严重段塞流 Ⅰ、严重段塞流 Ⅲ、段塞流和波动气泡流会引起立管系统的共振;基础的弹性系数较大时,两相流不会引起立管系统的共振,试验装置的振动响应与管内两相流流动参数的波动规律一致。

关键词:气液两相流; 海洋立管; 弹性基础; 有限单元法; 模态分析; 流固耦合

中图分类号:O 353; TE 832 **文献标志码**: A

引用格式:王琳,李玉星,刘昶,等. 考虑弹性基础的气液两相流海洋立管耦合振动分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):134-139.

WANG Lin, LI Yuxing, LIU Chang, et al. Fluid structure interaction analysis of gas-liquid two-phase flow in marine riser system on an elastic foundation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2016,40(1):134-139.

Fluid structure interaction analysis of gas-liquid two-phase flow in marine riser system on an elastic foundation

WANG Lin[1,2], LI Yuxing[1,2], LIU Chang[1,2], HU Qihui[1,2], WANG Yating[3], WANG Quan[1,2]

(1. *College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*; 2. *Shandong Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transport Safety Engineering*, *Qingdao* 266580, *China*; 3. *CCTEG Chongqing Engineering Company Limited*, *Chongqing* 400016, *China*)

Abstract: To predict and evaluate the vibration characteristics of the marine risers caused by two phase flow in different flow regimes, the modal analysis and the gas-liquid tow-phase flow experiments were carried out. The influences of fluid density distribution and elastic foundation coefficients on vibration mode were considered in the modal analysis. The flow pattern maps including seven types of flow patterns were plotted in the study. The time domain and frequency domain analysis of the pressure fluctuation characteristics for different flow patterns were conducted, the possibility of resonance caused by seven types of flow patterns in different elastic foundations was analyzed, and the coupling vibration characteristics of the riser system were predicted. In addition, the dynamic response of the riser system was tested to verify the accuracy of the coupling vibration analysis method. The analysis results show that gas-liquid tow-phase flow and elastic foundation have significant impacts on natural frequency and vibration mode of the riser system. Severe slugging Ⅰ, severe slugging Ⅲ, slug flow and dis-

收稿日期:收稿日期:2015-09-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51404290)

作者简介:王琳(1986-),男,博士研究生,研究方向为流固耦合动力学、多相管流及油气田集输技术。E-mail:lincw_wang@qq.com。

通讯作者:李玉星(1970-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为多相管流及油气田集输技术。E-mail:liyx@upc.edu.cn。

turbed bubble flow can cause resonance when the riser system has no elastic foundation. If the elasticity coefficient of the foundation is large enough, two-phase flow can't cause resonance of the riser system. The vibration response of the riser system is consistent with the fluctuation of the gas-liquid two-phase flow characteristics in the riser.

Keywords: gas-liquid two-phase flow; marine risers; elastic foundation; FEM; modal analysis; fluid structure interaction

当海洋立管系统中有气液两相流通过时,流体密度、压力等参数随时间变化,可能引起管道的参数共振和组合共振。尤其在上升管路中,两相流流型会剧烈变化,使得通过流型整改来抑制管道振动的方法难以奏效。立管系统的支承防护和基础设计,须充分考虑气液两相流与立管系统的耦合振动效应。Hara[1] 对段塞流引起的水平管振动进行了理论研究,表明两相流气液比对管道振动影响较大。Pettigrew 和 Taylor[2-3] 对两相流引起振动的机制进行总结,并对两相流横掠管束的振动进行了深入研究。周晓军[4] 采用特征线法计算了考虑流固耦合效应时的多相流管道系统轴向振动效应。这些研究多针对水平管或横掠管束的情况,对立管系统内气液两相流引起管道振动的理论研究较少,这是由于管道中气液两相流动的理论特性非常复杂,即使在管道不振动的情况下亦是如此[5]。笔者基于气液两相流立管系统的模态分析和气液两相流流动特性试验,预测与评估不同流态的气液两相流引起的海洋立管振动特性。模态分析中考虑流体密度分布的变化和不同弹性基础系数对振动模态的影响;开展气液两相流流动特性试验,观测流型并绘制流型图,对气液两相流立管系统进行共振分析,预测和评估不同流型引起的海洋立管振动特性。

1　立管系统的有限元模型建立及模态分析

1.1　模型建立

利用试验室中的组合立管试验装置模拟海洋立管系统,如图 1(m_g、m_l 分别为入口气体和液体质量流量,v_{sh}为液塞头部的移动速度)所示。组合立管主要由下倾管段和上升管段组成,下倾管安装在弹性基础上,下倾管入口处和上升管顶部由固定铰约束。气液两相流从下倾管入口进入,从上升管顶部出口流出。

管道轴向振动微分方程为

$$EA\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}+c\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}+m\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}=F_x(x,t). \tag{1}$$

管道弯曲振动微分方程为

$$EI\frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4}+c\frac{\partial v(x,t)}{\partial t}+m\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2}=F_y(x,t)\ . \tag{2}$$

式中,u、v 分别为轴向、横向位移;EI、EA 分别为弯曲刚度、轴向刚度;F_x、F_y 分别为轴向和横向载荷[6]。

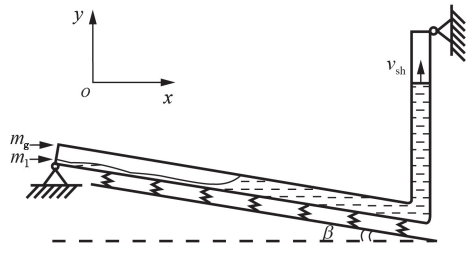

图 1　立管系统示意图

Fig. 1　Schematic view of riser system

下倾管在弹性基础上采用 Winkler 地基模型[7],则有

$$F_y(x,t)=p_y(x,t)-kv(x,t)\ . \tag{3}$$

式中,k 为弹性基础的弹性系数。

利用有限单元法[8],将方程(1)、(2)转化为矩阵紧缩形式:

$$\boldsymbol{K}_e\boldsymbol{U}_e+\boldsymbol{C}_e\dot{\boldsymbol{U}}_e+\boldsymbol{M}_e\ddot{\boldsymbol{U}}_e=\boldsymbol{P}_e. \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{U}_e$ 为节点位移向量;$\boldsymbol{P}_e$ 为载荷列向量;$\boldsymbol{K}_e$ 为弹性基础上单元刚度矩阵;$\boldsymbol{C}_e$ 为单元阻尼矩阵;$\boldsymbol{M}_e$ 为单元质量矩阵。

立管系统无阻尼机制,阻尼采用瑞利阻尼。立管系统的阻尼小,对固有频率影响可以忽略,且线性阻尼对立管系统的振型没有影响[9];另一方面,海洋立管中的流体流速相对较低,流速对立管系统的固有频率影响不大[10]。本文中对立管系统进行无阻尼实模态分析,既有明确的理论意义,又可以和真实情况较好地近似。令式(4)中的阻尼和载荷为 0,则得立管系统的无阻尼自由振动方程为

$$\boldsymbol{K}_e\boldsymbol{U}_e+\boldsymbol{M}_e\ddot{\boldsymbol{U}}_e=0. \tag{5}$$

其中

$$\boldsymbol{K}_e=\boldsymbol{K}_{es}+\boldsymbol{K}_{ew},\ \boldsymbol{M}_e=\boldsymbol{M}_{es}+\boldsymbol{M}_{ef},$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{es}}=E\iint_A \mathrm{d}A\int_0^l \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\mathrm{d}x=\begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 & -EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & 0 & -12EI/l^3 & 6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 4EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 2EI/l \\ -EA/l & 0 & 0 & EA/l & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/l^3 & -6EI/l^2 & 0 & 12EI/l^3 & -6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 2EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 4EI/l \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{ew}}=\int_0^l \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}k\boldsymbol{N}\mathrm{d}x=\frac{kl}{420}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{es}}=\rho_{\mathrm{s}}A_{\mathrm{s}}\int_0^l \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\mathrm{d}x=\frac{\rho_{\mathrm{s}}A_{\mathrm{s}}l}{420}\begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{ef}}=\alpha\rho_{\mathrm{l}}A_{\mathrm{f}}\int_0^l \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\mathrm{d}x=\frac{\alpha\rho_{\mathrm{l}}A_{\mathrm{f}}l}{420}\begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix}.$$

式中,$\boldsymbol{K}_{\mathrm{es}}$为结构单元刚度矩阵;$\boldsymbol{K}_{\mathrm{ew}}$为弹性基础刚度矩阵;$\boldsymbol{M}_{\mathrm{es}}$为结构单元质量矩阵;$\boldsymbol{M}_{\mathrm{ef}}$为流体附加质量矩阵;$\boldsymbol{B}$ 为应变矩阵;$\boldsymbol{N}$ 为形函数矩阵;ρ_{s}、A_{s} 分别为管道结构的密度和截面积;ρ_{l}、A_{f} 分别为液体的密度和管道内截面积;α 为管道单元内的平均持液率;l 为管道单元长度。

将各单元的运动方程组合起来形成系统的运动方程为

$$\boldsymbol{KU}+\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{U}}=0. \tag{6}$$

此二阶常系数齐次微分方程解的形式为

$$\boldsymbol{U}(t)=\boldsymbol{\varphi}\sin(\omega t). \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{\varphi}$ 为振幅向量;ω 为自振频率。

将式(7)代入式(6)得 n 阶线性齐次方程组为

$$(\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\varphi}=0. \tag{8}$$

在自由振动中结构各点的振幅不全为 0,则其系数矩阵的行列式必须等于 0。计算管道结构固有频率和振型转化成求解广义特征值和特征向量问题。

由流体附加质量矩阵的计算表达式可看出,流体附加质量矩阵随持液率的变化而变化,即气液两相流流动过程中整个立管系统的固有频率和振型是不断变化的。较大的持液率对应较小的固有频率。在模态分析时,计算持液率较大时的固有频率及对应振型以用于流固耦合振动分析。

1.2 模态分析

利用有限单元法对试验室中的立管试验装置进行实模态分析,试验装置参数如下:管道外径为 63 mm,壁厚为 5.8 mm,管材密度为 926 kg · m^{-3},弹性模量为 800 MPa,立管高度为 3.5 m,下倾管长为 12 m,下倾管倾角为 4°。

图 2 为不同弹性基础条件下立管系统的前三阶固有频率对比。由图 2 可见:下倾管无弹性基础时,立管系统的固有频率最小;立管系统的固有频率随弹性基础系数的增大而增大,弹性基础系数对高阶固有频率的影响更大。

图 3 为第 1、2、3 阶振型在不同弹性基础时的对比图,其横、纵坐标的数值只对平衡位置的立管位形曲线有意义,而振型向量可以是等比例的任意值。

由图 3 可知:弹性基础对振型的影响很大;弹性基础系数越大对低阶振型的振幅抑制效果越明显,对高阶振型不明显。弹性基础上立管系统振型的计算对立管系统的支承防护、位移传感器的选型和安装位置选择具有指导意义。

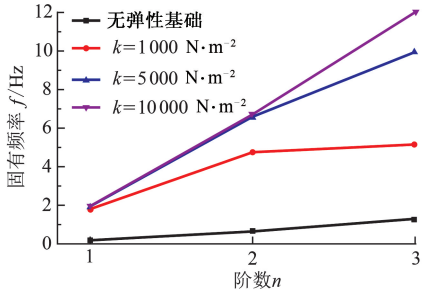

图 2　不同弹性基础立管系统的前三阶固有频率

Fig. 2　The first 3 natural frequencies of riser system on different elastic foundations

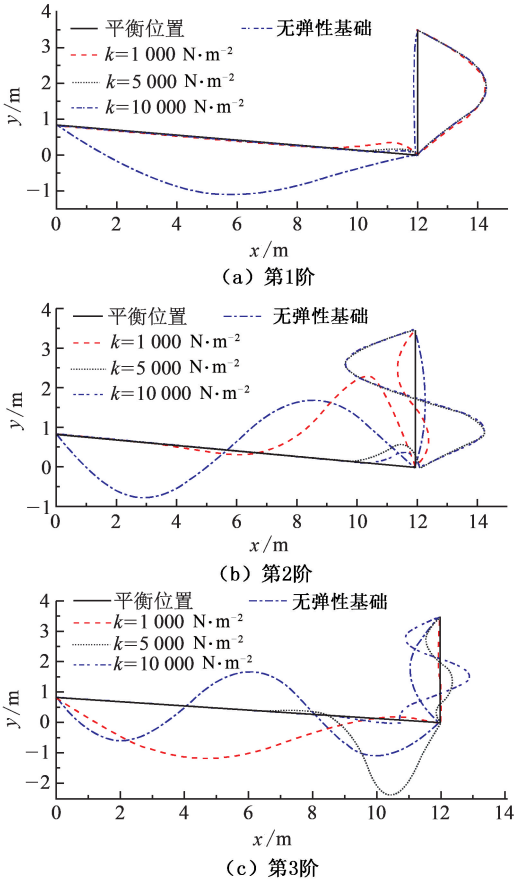

图 3　不同弹性基础时立管系统的第 1 阶、第 2 阶和第 3 阶振型

Fig. 3　The first order, the second order and the third order modes of riser system on different elastic foundations

2　气液两相流流动特性

利用立管试验装置对气液两相流的流动特性进行测试,流程见图 4。通过大量试验对不同气液流量范围内的流型进行测试。试验中观测到段塞流、稳定气泡流、波动气泡流、乳沫流[11]、严重段塞流Ⅰ(典型严重段塞流)、严重段塞流Ⅱ[12]和严重段塞流Ⅲ[13]共 7 种流型,并绘制流型图(图 5),从流型图中可以划分出 7 种流型出现的气液流量范围。

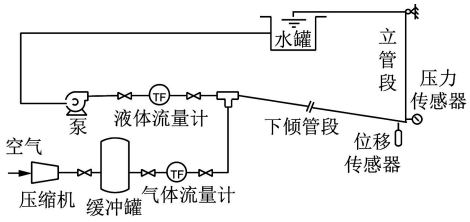

图 4　气液两相流立管试验装置流程

Fig. 4　Schematic diagram of experimental facility of riser system

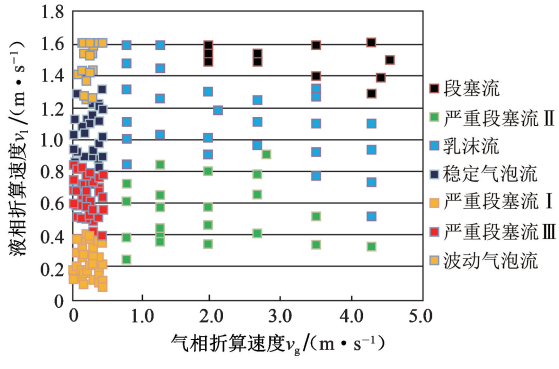

图 5　立管中的气液两相流流型

Fig. 5　Flow pattern of gas-liquid two-phase flow in riser

由于立管底部压力波动与流体力、两相流密度等流动参数的波动一致,因此,通过对 7 种流型压力波动的测试研究其流动特性的波动规律。图 6 为 7 种流型的压力时程曲线。对比可知:严重段塞流Ⅰ、

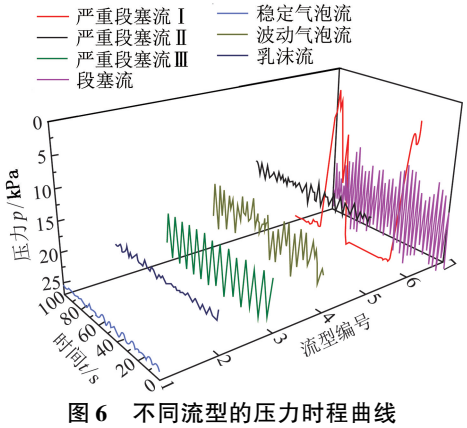

图 6　不同流型的压力时程曲线

Fig. 6　Time history of pressure of different flow patterns

严重段塞流Ⅲ、段塞流的压力波动有较强的周期性,且严重段塞流Ⅰ的周期远大于其他两种流型;压力

波动幅度从大到小依次为严重段塞流Ⅰ、段塞流、波动气泡流、严重段塞流Ⅲ、严重段塞流Ⅱ、稳定气泡流和乳沫流。

图 7 为 7 种流型的压力频谱。由图 7 可见:严重段塞流Ⅰ、严重段塞流Ⅲ、段塞流和波动气泡流的频谱有明显的峰,说明其流动过程有明显周期性波动;严重段塞流Ⅰ的波动频率较小,幅值最大,段塞流的波动频率最大,幅值较大;严重段塞流Ⅱ、稳定气泡流和乳沫流的频谱曲线比较平坦,其流动状态相对稳定。

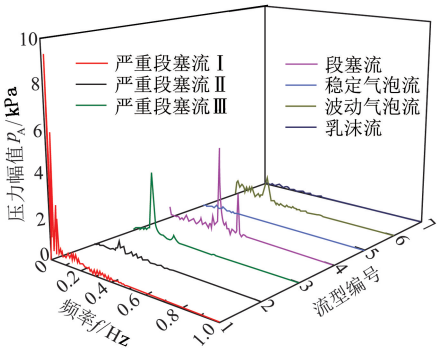

图 7　不同流型的压力频谱

Fig. 7　Pressure frequency spectrum of different flow patterns

3　流固耦合作用下的振动分析

3.1　耦合振动分析

从气液两相流压力波动测试结果中提取 7 种流型的频谱特征(表 1),并与立管系统固有频率进行对比,见图 8,分析不同流型引起立管系统共振的可能性。

表 1　不同流型压力波动的频谱特征

Table 1　Characteristic parameters of pressure frequency spectrum of different flow patterns

流型	主频/Hz	压力幅值/kPa
严重段塞流Ⅰ	0.049 8	9.3
严重段塞流Ⅱ	0.3	0.558
严重段塞流Ⅲ	0.27	3.168
段塞流	0.45	4.19
稳定气泡流	0	0.19
波动气泡流	0.22	1.33
乳沫流	0	0.18

从图 8 中可以看出:无弹性基础立管系统的基频(0.199 Hz)较小,而严重段塞流Ⅱ、严重段塞流Ⅲ、段塞流和波动气泡流的波动主频均高于无弹性基础立管系统的基频,即说明这 4 种流型会引起无弹性基础立管系统的共振;其中段塞流波动的主频、幅值较大,且带宽高,应特别关注;弹性基础弹性系数分别为 1 000、5 000、10 000 N·m^{-2}的立管系统的基频均远远大于 7 种流型的波动主频,不会发生共振,这说明采用弹性基础对立管系统进行支撑可以有效抑制气液两相流立管系统的共振。

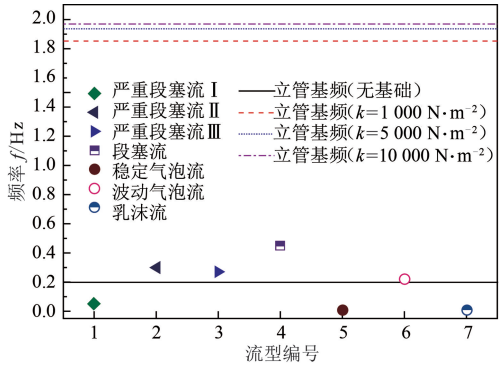

图 8　不同流型波动主频与立管基频对比

Fig. 8　Comparison of dominant frequency of two-phase flow and fundamental frequency of riser

本文中采用的试验装置安装在弹性基础上,弹性系数为 10 000 N·m^{-2},其基频远高于气液两相流的波动主频。由振动力学理论可以预测:立管试验装置没有发生共振的可能,相对安全;这种情况下,立管试验装置的振动响应与管内两相流流动参数的特征值是一致的。

3.2　试验验证

对 7 种流型流过立管试验装置时靠近立管底部的测试点的垂直方向位移响应进行测试,并对测试结果进行时频分析。图 9、10 分别为 7 种流型引起

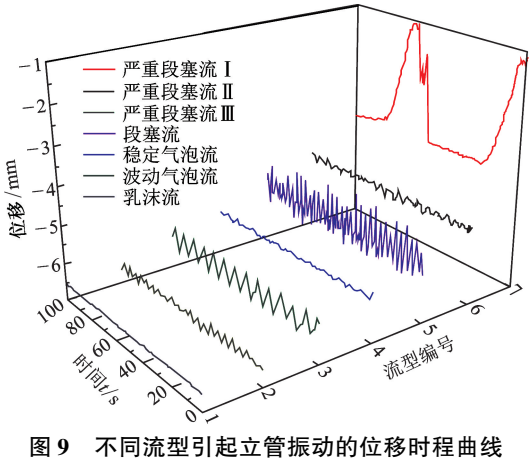

图 9　不同流型引起立管振动的位移时程曲线

Fig. 9　Time history of displacement of riser conveying different flow patterns

的立管系统振动的位移时程曲线和位移频谱。从图中可以看出:立管振动的主频与两相流压力波动的主频基本相同;振动幅度也与气液两相流的压力波动幅度一致。验证了对立管试验装置振动特性预测的准确性和流固耦合振动分析方法的可靠性。

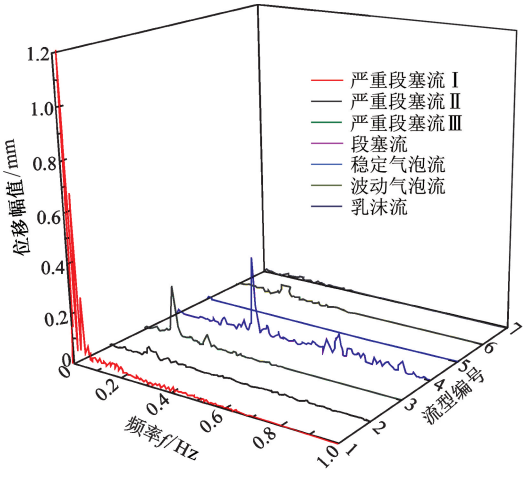

图 10　不同流型引起立管振动的位移频谱

Fig. 10　Displacement frequency spectrum of riser caused by different flow patterns

4　结　论

(1)立管系统固有频率随管内持液率的升高而降低,随基础弹性系数的升高而升高;气液两相流和基础弹性系数对立管系统的振型影响很大,两个因素共同作用下振型呈非对称性。

(2)在立管中观测到 7 种流型,测得 7 种流型的气液流量范围;严重段塞流Ⅰ、严重段塞流Ⅲ、段塞流和波动气泡流的流动参数有明显的周期性波动;严重段塞流Ⅱ、稳定气泡流和乳沫流的流动状态相对稳定。

(3)立管系统无弹性基础支承时,严重段塞流Ⅱ、严重段塞流Ⅲ、段塞流和波动气泡流会引起立管系统的共振;而弹性系数较大时,气液两相流不会引起立管系统的共振,此时试验装置的振动响应与管内气液两相流流动参数的波动规律一致。

参考文献:

[1]　HARA F. Two phase flow induced vibrations in a horizontal piping system[J]. JSME, 1975, 42(360): 2400-2411.

[2]　PETTIGREW M J, TAYLOR C E. Two phase flow induced vibration[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1994, 116(3): 233-253.

[3]　PETTIGREW M J, TAYLOR C E. Flow-induced vibration: recent findings and open questions[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 185(2): 249-276.

[4]　周晓军. 海洋立管系统流固耦合效应分析[D]. 北京:中国石油大学,2005.
ZHOU Xiaojun. FSI analysis of marine riser system[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2005.

[5]　CHEN S S. Flow-induced vibration of circular cylindrical structures[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1985.

[6]　CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. Berkeley: Computers & Structures, 2003.

[7]　DINEV D. Analytical solution of beam on elastic foundation by singularity functions[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 19(6): 381-392.

[8]　BATHE K J. Finite element procedures[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

[9]　余旭东,赵育善. 飞行器结构动力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1998.

[10]　王世忠, 刘玉兰,黄文虎. 输送流体管道的固-液耦合动力学研究[J]. 应用数学和力学, 1998, 19(11): 987-993.
WANG Shizhong, LIU Yulan, HUANG Wenhu. Research on solid liquid coupling dynamics of pipe conveying fluid[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1998, 19(11): 987-993.

[11]　李玉星, 冯叔初. 油气水多相管流[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2010.

[12]　SCHMIDT Z, BRILL J P, BEGGS H D. Experimental study of severe slugging in a two-phase flow pipeline riser-pipe system[J]. SPE J, 1980, 20: 407-414.

[13]　马华伟. 组合立管系统中严重段塞流特性及其消除方法研究[D]. 青岛:中国石油大学,2008.
MA Huawei. Investigation on severe slugging phenomenon and elimination methods in multiphase riser pipe system[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.

(编辑　沈玉英)