

# 阶梯来流下细长柔性立管涡激振动的时域响应分析

端木玉<sup>1,2</sup> 付博文<sup>1</sup> 万德成<sup>1\*</sup>

(1 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室  
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海, 200240

2 江苏海事职业技术学院船舶与海洋工程学院, 南京)

\*通信作者, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

**摘要:** 涡激振动是深海立管结构设计的关键问题, 本文研究了在阶梯来流作用下顶端预张力垂直立管的涡激振动响应, 并与 Francisco (2006) 立管涡激振动的标准实验比较分析。本文采用切片法并基于开源 OpenFOAM 平台自主开发出细长柔性立管涡激振动流固耦合的求解器。结果显示立管的流向振动激发出 7 阶和 8 阶振型, 而横向振动激发出 4 阶振型。文章还进一步给出了数值模拟出的模态振幅, 立管位移的平均值和均方根值, 等等, 并且都和实验结果进行了对比且吻合很好。此外, 本文还进一步分析了来流对涡激响应及模态的影响。通过数值验证说明我们自主开发的求解器可以精确的预报出细长柔性立管涡激振动的时域响应, 并从机理上加深对立管涡激振动响应模态的理解。

**关键词:** 柔性立管 涡激振动 多模态 切片法 OpenFOAM

## Vortex-induced Vibration of a Long Flexible Riser under a Step Flow in Time Domain

DUAN Mu-yu, FU Bo-wen, WAN De-cheng

(1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai. 2 Jiangsu Maritime Institute, Nanjing, Jiangsu, China)

\*Email: dcwan@sjtu.edu.cn

**Abstract:** Vortex-induced vibration (VIV) is a key issue in deep water riser design. This paper presents the response of a vertical tension riser model in a step current when subject to VIV. The simulation model is analyzed with the bench mark experiment of Francisco (2006). The simulation is carried out by a multi-strip method based on the open source code OpenFOAM. The numerical results show that the VIV response is mainly dominated by the 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> mode for in-line vibrations and the 4<sup>th</sup> mode for cross-flow vibrations. The results of model amplitude, the mean and RMS displacement of riser, and so on, are also given in the paper. The good agreement is shown between numerical and experimental results. Furthermore, the influence of flow velocity on response and mode of VIV is studied. From the numerical validation, the self-developed solver is practical in predicting the VIV response of long flexible in time domain. The mechanism understanding of vibration mode of riser is obtained from the paper.

**Key words:** flexible cylinder; vortex-induced vibration; multi-mode; strip method; OpenFOAM

# 1 引言

涡激振动问题是很多离岸工程关注的焦点,随着海洋油气资源向深海开发,就迫切需要  
对细长柔性立管的涡激振动问题提出解决方法。只有对涡激振动的位移响应和激励模态正确  
预报的基础上才能为立管的疲劳损伤提供可靠的评估。

就细长柔性立管的研究而言,模型试验的方式是最可靠的手段。但是试验准备时间长,  
开展难度大。由于水池等客观因素的限制,很难得到高阶的模态,试验的结果往往只能得到  
一阶、二阶模态。因为没有得到高阶模态,有很多实验只讨论立管上各个节点处的位移时历  
曲线,而规避对立管的整体模态的研究。此外,流向的模态因为幅值非常小,在实验当中很  
难捕捉,因此极少有实验研究流向的涡激振动响应,通常只讨论横向涡激振动响应。相关试  
验的研究可以参考何长江(2010),张建侨(2009),张永波(2011),任铁(2011)。

经验模型是分析涡激振动的另一种手段,该方法在工业领域应用普遍,主要是一些商业  
软件,如 SHEAR7, VIVA, VIVANA。但是这种方法不考虑涡激振动本身的物理机制,而  
是通过实验数据进行归纳和统计分析,得到各种实验参数和涡激振动响应的数学关系。  
Chaplin et al (2004b) 对一个试验分别选用 14 种经验模型来预报,结果表明这 14 种经验  
模型预报出的振幅响应都小于实验值,且各经验模型的预报结果之间也存在较大差异。

数值模拟为准备预报出细长柔性管涡激振动响应提供了可能性。考虑到计算域的问题,  
采用切片法来研究细长柔性杆件涡激振动问题应运而生,沿立管轴向位置分布切片来计算流  
体力并加载在结构上,每个计算时间步更新流体力并求解结构动力学方程。切片法最早由  
Whitney&Chung (1981)提出,后人又对该方法做了一些改进。Willden&Graham (2001)用准三  
维的方法模拟了剪切流下长细比  $L/D=100$  立管的涡激振动问题。Yamamoto (2004)采用二维  
离散涡方法首次对长细比高达  $L/D=2600$  的立管进行数值模拟,等等。他们的数值结果证明  
了切片法具有较高的可靠性和精度。

本文基于 OpenFOAM 的求解器-pimpleDyMFoam 为基础进行开发新的求解器,使其能  
够完成流固耦合问题的求解。该求解器具有较强的通用性,可以求解高雷诺数下不同长细比  
柔性立管的涡激振动问题。本文对经典试验 Francisco J. Huera Huarte (2006) 进行了数值验  
证,分析了阶梯流场下长细比为  $L/D=469$ ,顶端预张力为 1610N 的立管的涡激振动特性,  
给出横向和流向的振动模态,分析了主控模态的物理机制,数值预报结果与试验吻合较好。  
在此基础上又进一步研究了不同来流流速对涡激振动的影响。

## 2 控制方程

### 2.1 流体控制方程

流体域的控制方程为粘性不可压 Navier-Stokes 方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

### 2.2 结构控制方程

结构域的控制方程为结构动力学方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3)$$

### 2.3 柔性立管的流固耦合的求解

本文采用切片法求解细长柔性立管涡激振动响应，该方法是数值求解这类超大计算域问题的一种简化模型。该方法相比半经验模型能够获得更加精确的流体力，也可以反馈立管的运动对流场的影响，进一步对流场的变量加以分析。本文基于 OpenFOAM 的求解器-pimpleDyMFoam（湍流不可压缩动网格 RANS 求解器）进行开发新的求解器，使其能够完成流固耦合问题的求解，以流固耦合的强耦合作为程序设计思想，程序流程的设计思想如图 1 所示。

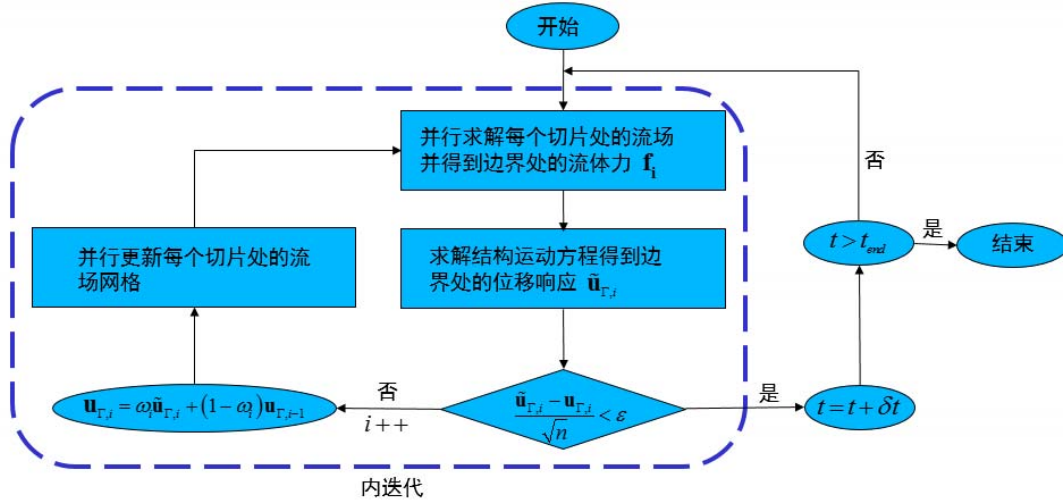


图 1 欠松弛强耦合的流固耦合迭代

## 3 计算模型

本文基于 Francisco J. Huera Huarte (2006) 的标准实验建立模型，实验装置示意图见图 1，数值模型见图 2。立管的直径是 28mm，长度为 13.12m，对应的长细比  $L/D=469$ 。立管被置于阶梯流中，底端 45% 的立管长度被置于均匀流中，流速为 0.6m/s。剩余 55% 的立管长度置于静水中。立管两端固定，顶端施加有预张力，试验的立管的主要参数列于表 1。

表 1 立管模型的主要结构参数

External diameter	D	0.028	m
Length	L	13.12	m
Aspect ratio	L/D	469	-
Submerged Length	$L_s$	5.94	m
Flexural Stiffness	EI	29.88	$Nm^2$
Top Tension	$T_t$	1610	N
Flow speeds	V	0.6	m/s
Mass ratio	$m^*$	3	-
Mass ratio (bumpy cylinder)	$m_b^*$	3.1	-
Reynolds number	Re	16940	-

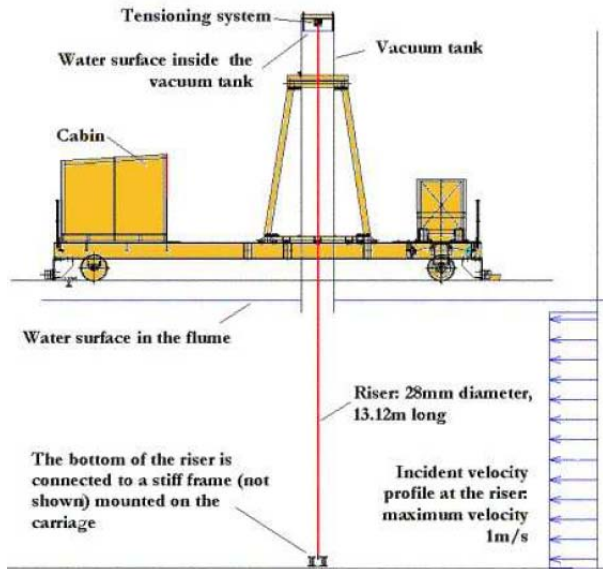


图 1 Fransico (2006)实验装置示意图

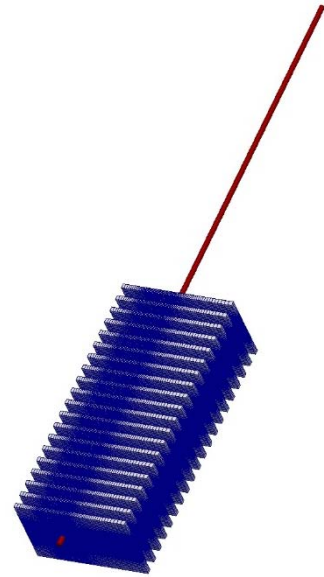


图 2 立管切片划分的计算模型

#### 4 固有频率及固有振型

根据立管的结构参数计算出前 10 阶固有频率并列于表 2 中，立管前 4 阶固有振型见图 3 所示。此时立管所受的顶端预张力  $T = 1610N$ 。有关固有频率和固有振型的研究为后续研究立管涡激振动的主控模态作了铺垫。

表 2 立管模型的前 10 阶振型， $T = 1610N$

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$
1.2237	2.4516	3.6878	4.9364	6.2014	7.4867	8.7961	10.133	11.520	12.906

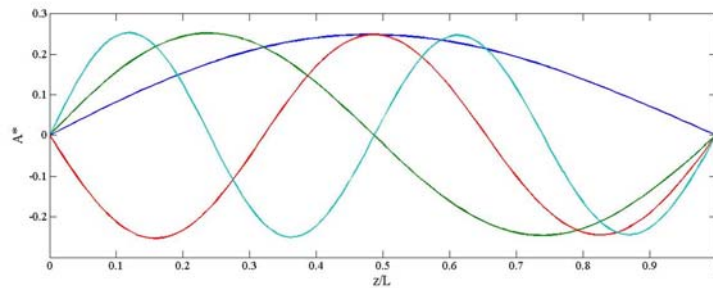


图 3 前四阶固有振型， $T = 1610N$

#### 5 计算结果及讨论

图 4 和图 5 给出了流向视角和横向视角下两个位置处的涡量等值线图，图 5 中可以看出立管横向表现为 4 阶振型，而流向振动由于振幅非常小，所以从图中无法直接观察出来，下面分别就流向和横向展开讨论立管的涡激振动响应。

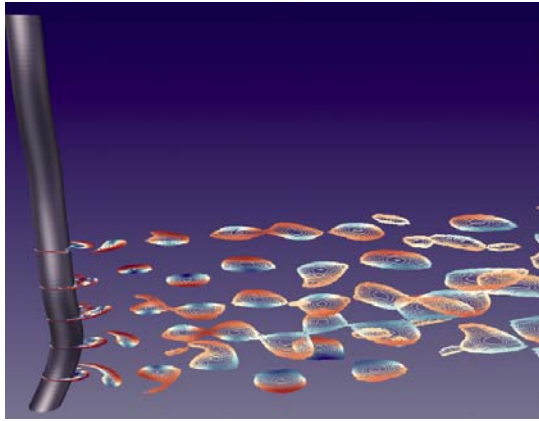


图 4 从流向视角观察沿立管长度方向的尾涡脱落

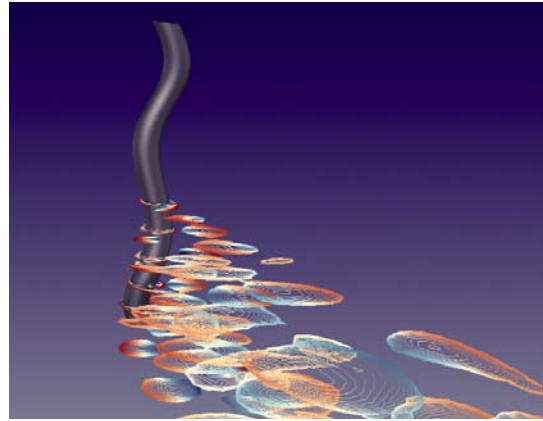


图 5 从横向视角观察沿立管长度方向的尾涡脱落

### 5.1 流向涡激振动响应分析

在来流作用下立管各节点的流向位移从 0 开始逐渐增加，经过一段时间后会达到各自的平衡位置。将各节点所对应的平衡位置连接起来，就得到流向的平衡状态，立管围绕平衡状态做瞬时微幅振动。稳定后将所有节点位移对时间平均后可得图 6 所示的平衡位置，红色的线是数值计算结果，蓝色的线是 Francisco J. Huera Huarte (2006) 的实验结果。从图中可见，立管流向位移的最大值不在立管长度的中间，因为立管上部 55% 的长度是置于静水之中，只有剩下的部分才受到来流的作用。本文给出的计算结果与实验结果吻合得很好。

表 3 给出了平衡后流向位移的最大值及最大值所对应的位置及与实验值的比较。流向位移的最大处所对应的位置为  $z/L=0.367$ ，与实验结果相比，我们精确预报出了流向位移最大处所对应的位置，误差仅为 1.1%。流向位移的最大值为  $3.072D$ ，与实验值相比误差为 6.7%。

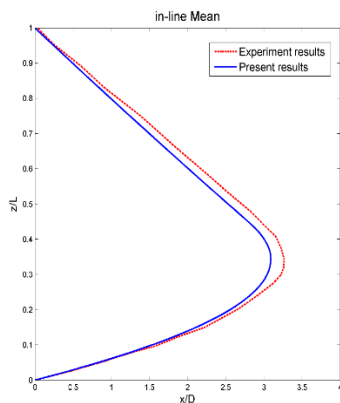


图 6 流向位移的平均值

表 3 流向位移平均值的最大值及所对应的位置

	The maximum of in-line displacement ( $\bar{x} / D$ )	The location of maximum of in-line displacement ( $z / L$ )
Experiment	3.292	0.371
Present	3.072	0.367
Error /-%	6.7	1.1

图 7 给出了本文的流向前 9 阶模态幅值随时间的变化，图 8 是 Francisco (2006) 的试验结果。数值计算结果中一阶模态的幅值虽然较大，但频率很低，因此振动能量并不高。7 阶和 8 阶模态的幅值大、频率高，说明 7 阶和 8 阶振型对流向的整体振型贡献最大，是主控振型。随着时间的变化，有时 7 阶振型的幅值大于 8 阶，有时 8 阶的幅值大于 7 阶。这说明流向振动存在多模态的情况，立管的流向振型并不是稳定不变的，而是像“行波”一样的变化。而图 8 给出的试验结果每一阶模态幅值随时间几乎不变，且 7 阶占主控地位，不存在 7 阶与 8 阶之间的转变。存在的误差主要是因为流向的振幅小，振型相比横向非常不明显，在试验中也很难准确采集到相关响应数据。试验工况下的雷诺数达到  $1.69 \times 10^4$  的量级，流场处于湍流状态，立管所受到的阻力是脉动变化的。湍流的随机性及不稳定特点可能会造成模态振

幅的不稳定，从而导致多模态的发生。

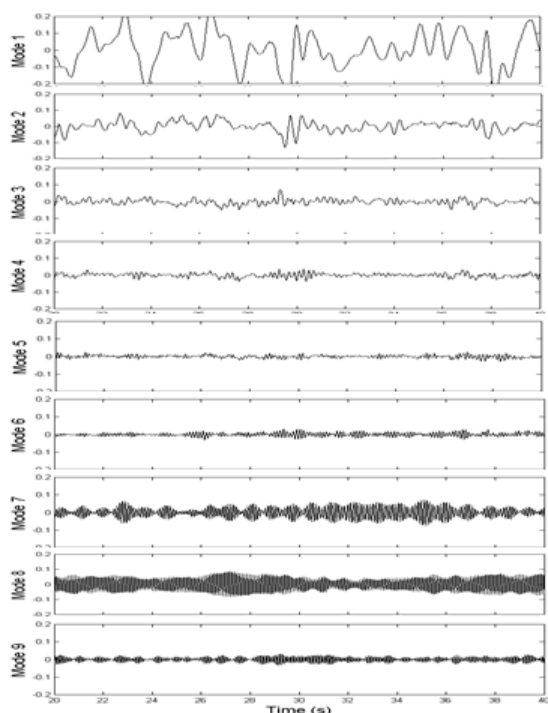


图 7 数值计算得到的无量纲化的流向模态幅值

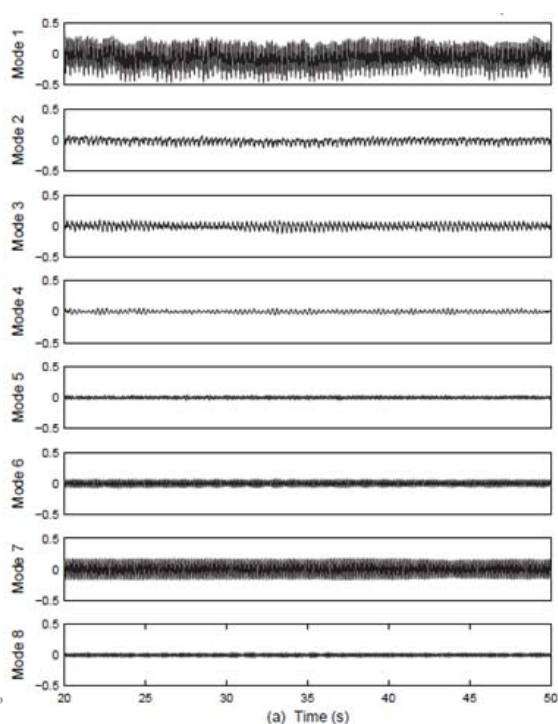


图 8 Francisco (2006) 实验得到的流向模态幅值

我们将节点流向位移随时间的变化做快速傅立叶变换，图 9 给出沿立管长度方向十等分处节点流向位移的能量谱分析。不同等分点处的最大能量谱所对应频率都一致，主控频率是 9.4526Hz。与表 2 给出的固有频率对照，该频率位于固有频率 7 阶（8.7961Hz）和 8 阶（10.133Hz）之间。数值模拟给出的流向模态也是存在 7 阶与 8 阶模态之间的转变。

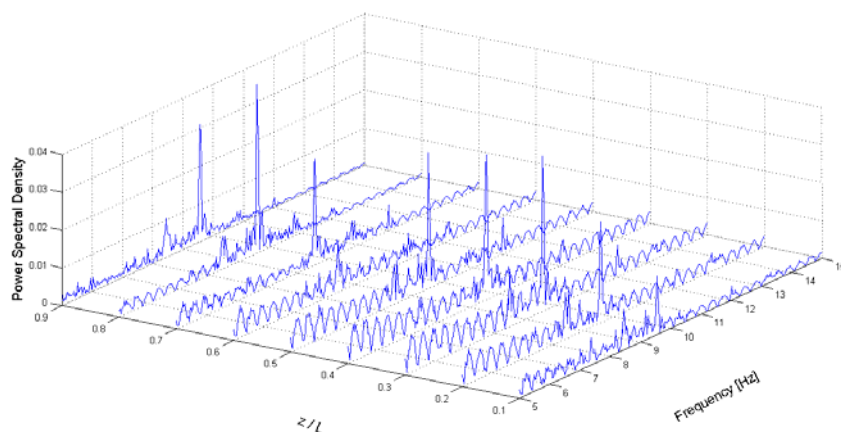


图 9 沿立管长度方向的流向位移的能量谱分析

## 5.2 横向涡激振动响应分析

图 10 是横向位移的均方根与实验值的比较，蓝色的线是本文计算的结果，红色的线是实验值。从图中可见，因为取样时间不一样，两者的幅值基本吻合，振型的节点也相互对应，且处于静水中的立管部分与处于来流中的立管部分的横向位移相当。

图 11 和图 12 分别是本文和实验所得的立管瞬时包络线图，图中的实线是瞬时横向位移 ( $y/D$ ) 沿立管相对标高 ( $z/L$ ) 的变化。图 11 给出了间隔为 0.01s，采样时间为 1s 内的

立管瞬时变形图。因为振动包络线具有统计性质，如果数值给出的振动包络线与实验相差不大，则基本能证明数值模拟方法的准确性。

从图中可见，本文的数值结果无论是从振型还是预报的幅值都和实验相当吻合。对于横向振动我们发现了以下特征：流向振动呈现 4 阶振型，并且振型沿立管轴向上的位置也几乎一致，即 4 阶振型的每一个节点都相互对应。不同瞬时时刻对应的振型鞍点相对固定，只在中心轴附近的小范围内移动，说明横向振动的主控振型是单一四阶振型。另外从振型的无量纲幅值上，两者也基本吻合较好。最大的横向位移达到  $y_{\max} / D = 0.82$ 。

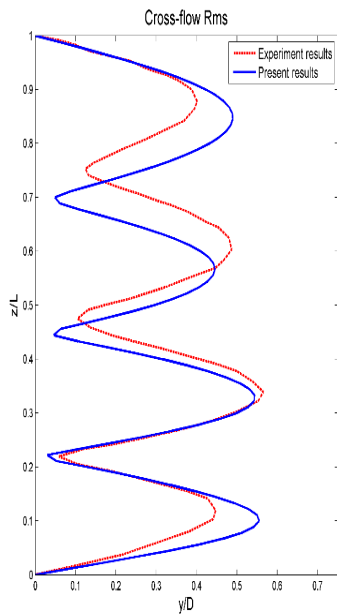


图 10 横向位移的均方根值

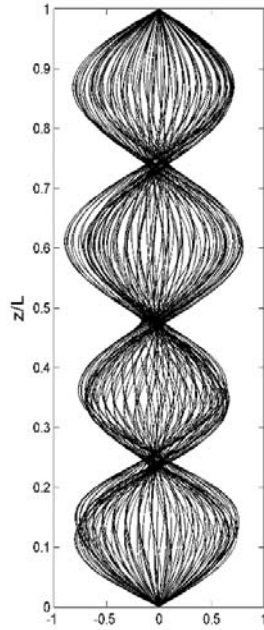


图 11 立管横向变形包络线

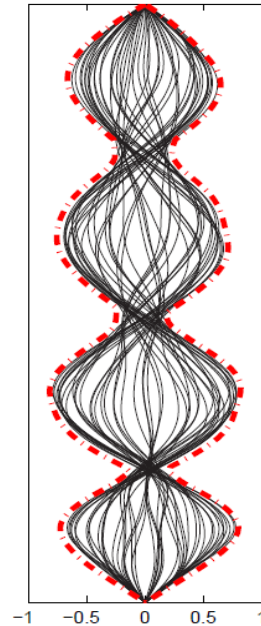


图 12 试验所得立管横向变形包络线

同样可以对横向位移随时间的变化做快速傅立叶变换，图 13 给出沿立管长度方向十等分处节点横向位移的能量谱分析。不同等分点处的最大能量谱所对应的频率完全一致，主控频率是 4.4558Hz，该频率约为流向位移最大能量谱对应频率（9.4526Hz）的一半。与固有频率相比（表 2），该频率与固有频率中的 4 阶频率（4.9364Hz）非常接近，与邻近频率 3 阶（3.6878Hz）5 阶（6.2014Hz）相差较远。因为流向和横向振动分别是由阻力和升力引起，而升力系数的频率约为阻力系数的一半左右，所以造成横向振动频率约为流向振动频率的一半。

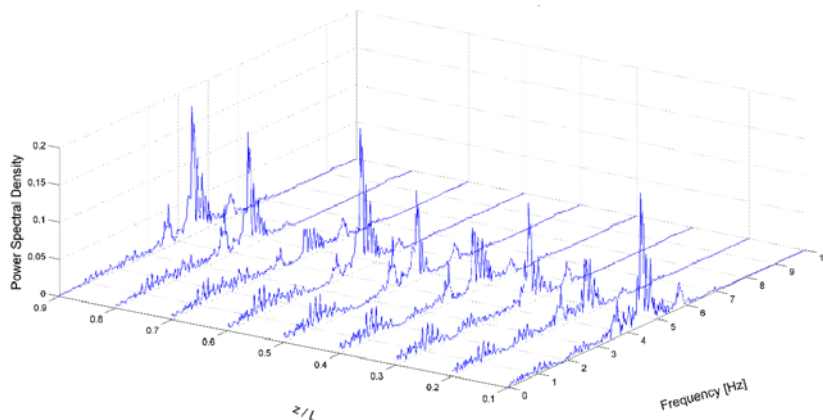


图 13 立管长度方向的横向位移的能量谱分析

### 5.3 流速对涡激振动响应的影响

表 4 三种流速下涡激振动响应对比

Flow velocity	$\bar{x}_{\max} / D$	Location of $\bar{x}_{\max}$	Max of $x_{RMS} / D$	Max of $y_{RMS} / D$	In-line Mode	Cross-flow Mode
U=0.2m/s	0.389	0.341	0.157	0.834	2	1
U=0.4m/s	0.910	0.352	0.053	0.126	5	3
U=0.6m/s	3.072	0.367	0.177	0.561	7	4

考虑三种不同流速对涡激振动的影响，流场仍是阶梯流，下半段均匀流场的流速分别是 U=0.2m/s, 0.4m/s, 0.6m/s, 其中流速为 0.6m/s 的与上面的标准试验一致。改变流速时，顶端预张力不变，都与标准实验一致，为 T=1610N。将不同流速下的涡激振动响应的计算结果汇总列于表 4。

当流速非常低的时候，仅为 0.2m/s 时，立管的振动模态发生了很大的改变。流速减小使得流向平衡位置的最大值减小很多，由 0.6m/s 对应的 3 倍立管直径减小为仅有不到 0.4 倍直径。立管的横向振动表现为非常简单的来回振动，振动模态仅为 1 阶，横向振动的最大位移位于立管长度的中点。这种振动形式与简支梁受周期性的均布载荷很相似。

当流速为 0.4m/s 时，立管的流向振动模态为 5 阶。流向平衡位置的最大值较 0.2m/s 时大，为 0.91 倍立管直径。立管的横向振动模态为 3 阶。

## 6 结论

本文针对 Francisco J. Huera Huarte (2006) 的标准实验，建立了基于切片法的数值计算模型，利用自主开发的求解器对标准问题进行验证。数值结果从多个方向进行分析，包括：振动位移的平均值和均方根值，振动模态幅值，位移的能量谱分析，振动的包络线等各个方面对结构场进行详细分析，且所有结果都与实验值进行了对比，显示数值结果与实验吻合很好。从而对自主开发的求解器的可靠度及精度予以肯定。

在验证了标准算例的基础上，本文还进一步讨论了流速对细长柔性立管涡激振动响应的影响：随着流速增大，立管流向平衡位置偏离原初始位置越大，但是流向最大位移所对应的立管长度位置没有改变。这不难理解流速越大对立管的冲击力也越大，所以偏移量越大。同时流速对立管模态的影响也很明显，流速越高立管流向与横向振动的模态也越高。

## 7 致谢

本文得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 1143200, 51579145, 11272120)、长江学者奖励计划(T2014099)、上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)、工信部数值水池创新专项(2016-23/09)资助，在此表示衷心感谢！

## 参考文献

- 1 Chaplin, *et al.* "Blind predictions of laboratory measures of vortex induced vibrations of a tension riser," *Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference on Flow-Induced Vibration, FIV2004*, Paris.



- 2 Francisco J. Huera Huarte. "Multi-mode vortex-induced vibrations of a flexible circular cylinder," University of London, 2006
- 3 Whitney A.K., *et al.* "Vibrations of long marine pipes due to vortex shedding," J. Energy Resour. Technol, 1981, vol. 103, pp. 231-236.
- 4 Willden, R.H.J., *et al.* "Numerical prediction of viv on long flexible circular cylinders,," Journal of Fluids and Structures, 2001,vol.15, pp 659-669
- 5 Yamamoto C.T., *et al.* "Numerical simulations of vortex-induced vibrations on flexible cylinders," Journal of Fluids and Structures, 2004, vol. 19, pp. 467-489
- 6 何长江. 柔性立管涡激振动试验与数值模拟[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- 7 任铁. 实尺度雷诺数复杂来流条件下的立管涡激振动试验研究[D]. 上海交通大学, 2011.
- 8 张建桥. 细长柔性立管涡激振动的实验研究[D]. 大连理工大学, 2009.
- 9 张永波. 深海输液立管涡激振动预报及抑制技术研究[D]. 中国海洋大学, 2011.