

文章编号: 1000-4750(2013)05-0282-05

深海顶张力立管参激-涡激耦合振动响应分析

唐友刚, 邵卫东, 张 杰, 王丽元, 桂 龙

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 该文研究顶张力立管参激-涡激耦合振动计算方法和动力特性。考虑立管顶端动边界条件, 建立顶张力立管模型, 研究其在剪切流中的涡激振动响应和参激-涡激耦合振动响应。提出立管的动力响应分析方法, 分析参数激励对立管横向涡激振动的影响。结果表明, 立管的横向振动响应频率存在 0.5 倍参激亚谱成分, 参数激励对于立管横向振动具有重要影响。

关键词: 顶张力立管; 涡激振动; 参数激励; 参激-涡激耦合振动; 有限差分法

中图分类号: TE58; O322 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.12.0895

DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS FOR COUPLED PARAMETRIC VIBRATION AND VORTEX-INDUCED VIBRATION OF TOP-TENSIONED RISER IN DEEP-SEA

TANG You-gang, SHAO Wei-dong, ZHANG Jie, WANG Li-yuan, GUI Long

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The calculation method and dynamic characteristics of coupled parametric excitation and vortex excitation are investigated for top-tensioned risers. The analysis model of TTRs is presented considering the moving boundary conditions, and the vortex-induced response, coupled parametric excitation and vortex excitation vibration of TTRs in the shear flow are studied. The analysis method of dynamic response is proposed to research the influence of parametric excitation on VIV of the TTRs. The result shows that the VIV response of the TTRs contains the component of 1/2 sub-harmonic induced by parametric excitation, and that the parametric excitation has important significant for transverse vibration of TTRs.

Key words: top-tensioned riser; vortex-induced vibration; parametric excitation; coupled parametric-vortex excited vibration; finite difference method

国内外较多学者研究了深海顶张力立管(TTRs)的涡激振动响应。Kaasen 等通过实验研究 TTRs 涡激振动^[1]; 黄智勇等研究立管在均匀流和非均匀流下的涡激振动及疲劳^[2]; 唐世振建立了顺流与涡激振动的耦合分析模型^[3]。

立管顶部浮式结构的升沉运动对立管造成参数激励。Chatjigeorgiou 等考虑波流作用和浮体运

动, 详细研究了参数激励对立管振动的影响^[4-6]。Kuiper 等考虑浮体升沉由 Floquet 理论分析立管参激稳定性^[7]。国内对于深海顶张力立管参激-涡激耦合振动响应的研究还处于起步阶段。

本文建立了考虑立管可动边界的力学模型, 将浮体升沉简化为参数激励, 考虑流-固耦合的作用计算流载荷, 综合考虑参激-涡激耦合振动, 应用有限

收稿日期: 2011-12-30; 修改日期: 2012-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079097); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51021004)

通讯作者: 唐友刚(1952-), 男, 河北保定人, 教授, 博士, 博导, 从事船舶与海洋工程结构动力学研究(E-mail: tangyougang_td@163.com).

作者简介: 邵卫东(1986-), 男, 山东邹平人, 硕士生, 主要从事海洋工程结构动力学研究(E-mail: wdshao@tju.edu.cn);

张 杰(1982-), 男, 河北邯郸人, 博士生, 主要从事船舶与海洋工程结构振动与疲劳特性研究(E-mail: hdzj@163.com);

王丽元(1986-), 女, 吉林吉林人, 硕士生, 主要从事海洋工程结构动力学研究(E-mail: wangliyuan_tju@126.com);

桂 龙(1988-), 男, 辽宁鞍山人, 硕士生, 主要从事海洋工程结构动力学研究(E-mail: tc-13_tju@163.com).

差分法编程计算立管的动力响应。针对 1500m 深水顶张力立管, 计算剪切流中立管的参激-涡激耦合振动响应。

1 数学模型

考虑立管上部张紧器和沿 x 方向的海流, 立管底端为铰支, 顶端与十几吨的张紧环 M 连接, 浮体运动时, 带动张紧环转动和平移, 所以立管上端为动边界条件, 设坐标原点位于海平面上, 得顶张力立管分析模型如图 1 所示。

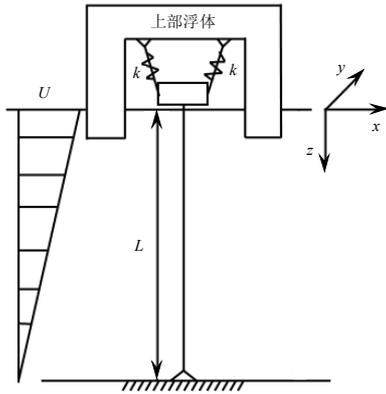


图 1 立管模型示意图

Fig.1 Sketch of a riser system

建立 TTRs 的横向弯曲运动方程为:

$$EI \frac{\partial^4 w(z,t)}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left(T(z,t) \frac{\partial w(z,t)}{\partial z} \right) + (m_r + m_f + m_a) \frac{\partial^2 w(z,t)}{\partial t^2} = f(z,t) \quad (1)$$

其中: EI 为立管的抗弯刚度; $w(z,t)$ 为立管横向位移; m_r 、 m_f 、 m_a 分别为单位长度立管质量、内部流体质量及附加质量; $f(z,t)$ 为立管单位长度上的作用力; $T(z,t)$ 为立管的有效张力, 不考虑参数激励:

$$T(z) = A_s g (\rho_s - \rho_w) (f_1 L - z) \quad (2)$$

考虑浮体升沉的参激激励:

$$T(z,t) = A_s g (\rho_s - \rho_w) (f_1 L - z) + ka \cos(\Omega t) \quad (3)$$

式中: ρ_s 、 ρ_f 和 ρ_w 分别为立管材料密度、立管内部流体密度及海水密度; k 为图 1 中所示张紧器的等效弹簧刚度, $k = LW_a / a_c$ [7], L 是立管长度, W_a 是立管单位长度的湿重, a_c 是与张紧系统效率有关的常数; a 和 Ω 分别为浮体升沉幅值和频率。

立管上端的动边界条件为:

$$w(z,t)|_{z=0} = u(t) + \frac{b}{2} \varphi(t), \quad \left. \frac{\partial w(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \varphi(t) \quad (4)$$

其中: $u(t)$ 为张紧环的水平位移; $\varphi(t)$ 为张紧环的转角; b 为张紧环的高度。

在立管参激-涡激耦合振动数值模拟过程中, 引入立管上端的动边界条件求解。

2 尾流振子模型

基于 Van der Pol 方程描述漩涡的尾流特性, 描述立管漩涡泄放的 Van der Pol 方程为[8]:

$$\ddot{q} + \varepsilon \Omega_f (q^2 - 1) \dot{q} + \Omega_f^2 q = F \quad (5)$$

其中: 变量 q 可以表示成局部脉动的升力系数 C_L 与固定圆柱升力系数 C_{L0} 之比, $q = 2C_L / C_{L0}$; F 为结构对流场的反作用力; Ω_f 是漩涡脱落的圆频率, 满足 Strouhal 关系:

$$\Omega_f = 2\pi St \frac{U_f}{D_0} \quad (6)$$

立管横向振动的涡激升力为:

$$f_y = \frac{1}{2} \rho_w U_f^2 D_0 \frac{C_{L0}}{2} q \quad (7)$$

流体产生的非线性阻尼力用 Morison 方程表示:

$$f'_y = \frac{1}{2} \rho_w D_0 C_D \dot{y} |\dot{y}| \quad (8)$$

由此得到式(1)中 y 方向所受横向力为:

$$f(z,t) = \frac{1}{2} \rho_w U_f^2 D_0 \frac{C_{L0}}{2} q - \frac{1}{2} \rho_w D_0 C_D \dot{y} |\dot{y}| \quad (9)$$

式(5)中反作用力 F 与结构的加速度成正比:

$$F = \frac{A}{D_0} \ddot{y} \quad (10)$$

其中, A 为比例系数, 对于深海立管, 经试验测定。

式(6)~式(8)中的经验参数取值如下: $St = 0.2$ 、 $C_{L0} = 0.3$ 、阻力系数 $C_D = 1.2$ [9-10], 立管附加质量 $C_a = 1.0$, $A = 12$, $\varepsilon = 0.3$ [6]。

由式(1)和式(5)得到顶张力立管振动方程:

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{\partial^4 y(z,t)}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left(T(z,t) \frac{\partial y(z,t)}{\partial z} \right) + (m_r + m_f + m_a) \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial t^2} = \frac{1}{2} \rho_w U_f^2 D_0 \frac{C_{L0}}{2} q - \frac{1}{2} \rho_w D_0 C_D \dot{y} |\dot{y}| \\ \ddot{q} + \varepsilon \Omega_f (q^2 - 1) \dot{q} + \Omega_f^2 q = \frac{A}{D_0} \ddot{y} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

应用中心差分格式求解式(11)[11], 将立管长度平均分为 N 份, 得到 N 个单元和 $N+1$ 个节点, 根

据边界条件，确定顶端节点和底端节点运动形式，于是得到关于时间 t 的 $2(N-1)$ 个二阶常微分方程组，由 Runge-Kutta 法求解常微分方程组。

3 算例分析

以 1500m 水深的 TTRs 为例，模型参数如表 1。

表 1 深海 1500m 立管模型参数

Table 1 Parameters of 1500m deep-water riser model

立管特征	符号	参数值
弹性模量	E	210GPa
海水密度	ρ_w	1025kg/m ³
材料密度	ρ_s	7850kg/m ³
内部流体密度	ρ_f	800kg/m ³
立管外径	D_0	0.25m
立管内径	D_i	0.22m
立管长度	L	1500m
顶张力系数	f_t	1.3
附加质量系数	C_a	1.0
张紧环质量	M_r	15000kg
张紧环高度	b	0.5m
张紧环长度	l	1.5m
牵引绳垂向投影高度	L_v	10m
牵引绳和垂向夹角	γ	$\frac{\pi}{12}$ rad

水面最大流速取 $U = 0.5\text{m/s}$ ，计算时间 300s，时间步长 0.002s，计算立管中点处的振动响应。初值位移和速度设为 0。

3.1 顶张力立管涡激振动响应

不考虑参数激励，式(11)中立管的有效张力为式(2)，计算结果如下。

图 2 和图 3 分别显示顶张力立管中点处的位移时程变化曲线和位移频谱特性，振动呈现多频率的“拍频”现象。这是立管在剪切流中涡激振动的特点。

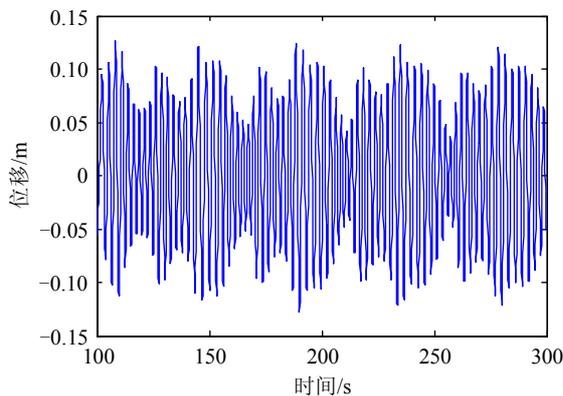


图 2 立管中点涡激振动位移时程曲线

Fig.2 Deflection-time curve of VIV at midpoint of TTRs

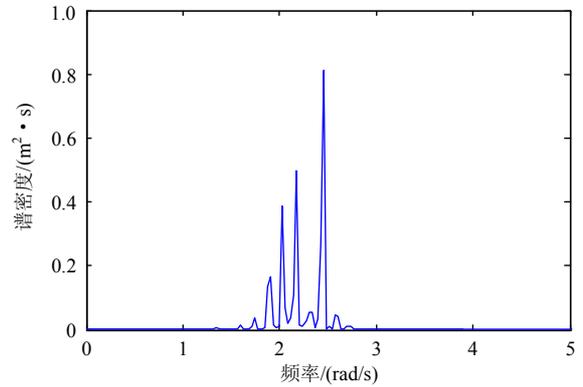


图 3 立管中点位移响应谱

Fig.3 Deflection response spectrum at midpoint of TTRs

统计立管涡激振动响应如表 2 所示。

表 2 立管涡激动力响应统计结果

Table 2 Dynamic response statistics of VIV

统计项目	响应结果
海面流速	0.5m/s
C_D	1.2
立管最大响应	0.1481m
最大响应距水面位置	684m
中点最大响应	0.1276m
中点升力系数最大值	0.72

3.2 顶张力立管参激-涡激耦合振动响应

考虑参数激励和涡激计算振动响应，则式(11)中立管有效张力为式(3)，取 $a_c=10\text{m}$ ， $W_a=75.53\text{kg/m}$ ，得到， $k=113.3\text{kN/m}$ ；浮体升沉幅值 $a=2\text{m}$ ，频率 $\Omega = 0.3888\text{rad/s}$ 。计算得到立管参激-涡激耦合振动响应如图 4。

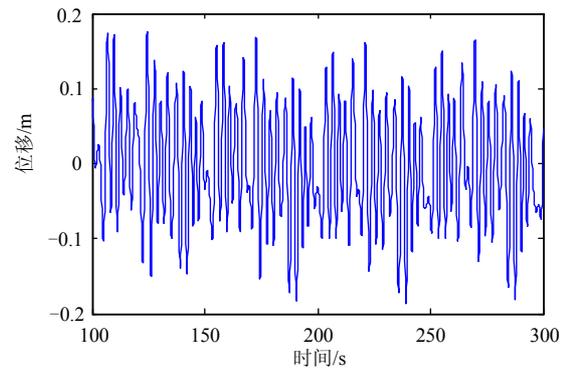


图 4 参激-涡激耦合振动立管中点位移时程曲线

Fig.4 Deflection-time curve of coupled parametric excitation-vortex excitation vibration at midpoint of TTRs

图 4 和图 5 表明，立管中点的振动为“拍频”现象，动力响应的幅值大于纯涡激振动响应。立管中点处的振动存在 0.5 倍参数激励频率的振动，说明参数激励激起了立管的亚谐波振动。

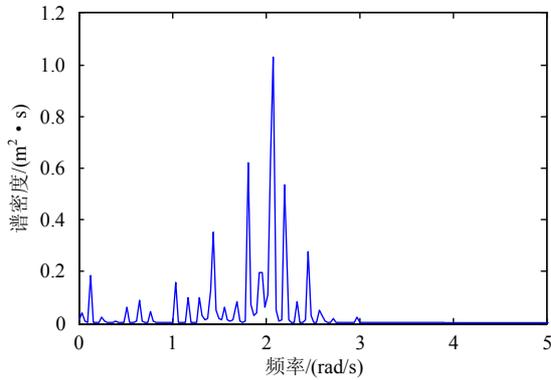


图5 参激-涡激耦合振动立管中点位移响应频谱
Fig.5 Deflection response spectrum of coupled parametric excitation-vortex excitation vibration at midpoint of TTRs

统计参激-涡激耦合振动响应，得到表3结果。

表3 参激-涡激耦合振动响应统计结果
Table 3 Response statistics of coupled parametric excitation -vortex excitation vibration

统计项目	响应结果
海面流速	0.5m/s
x	1.2
立管最大响应	0.8407m
最大响应距水面位置	1468m
中点最大响应	0.1856m
中点升力系数最大值	0.768

立管系统参数不变，选取海面流速为 1.5m/s，应用相同的方法计算立管的纯涡激和参激-涡激耦合振动响应，计算结果统计如表4和表5所示。

表4 流速 1.5m/s 涡激振动响应统计结果
Table 4 Response statistics of VIV at 1.5m/s

统计项目	响应结果
海面流速	1.5m/s
x	1.2
立管最大响应	0.1206m
最大响应距水面位置	398m
中点最大响应	0.0926m
中点升力系数最大值	0.656

表5 流速 1.5m/s 立管参激-涡激耦合振动响应统计结果
Table 5 Response statistics of coupled parametric excitation-vortex excitation vibration at 1.5m/s

统计项目	响应结果
海面流速	1.5m/s
x	1.2
立管最大响应	0.1516m
最大响应距水面位置	340m
中点最大响应	0.1279m
中点升力系数最大值	0.726

对比表3与表2，考虑浮体升沉的参激影响，立管的振动幅值要远远大于无参数激励时立管的最大振动幅值；考虑参激-涡激耦合振动，立管振动的最大位置出现在靠近海底范围内，说明对于该计算模型，立管底部是危险位置。

3.3 改变参激组合参数计算立管动力响应

改变浮体升沉幅值和升沉频率，计算立管参激-涡激耦合动力响应，结果如图6和图7所示。

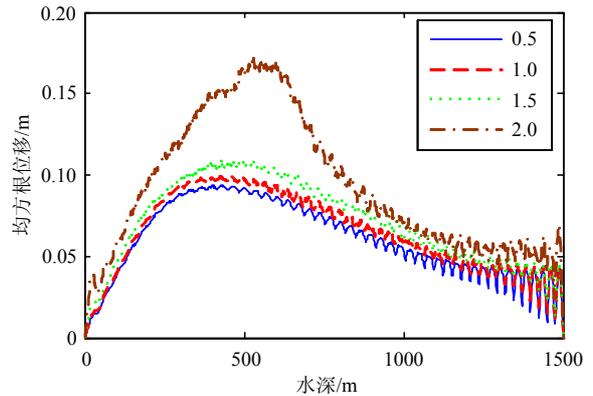


图6 不同升沉幅值立管振动响应($\Omega=0.3888\text{rad/s}$)
Fig.6 Vibration response at different heave amplitude ($\Omega=0.3888\text{rad/s}$)

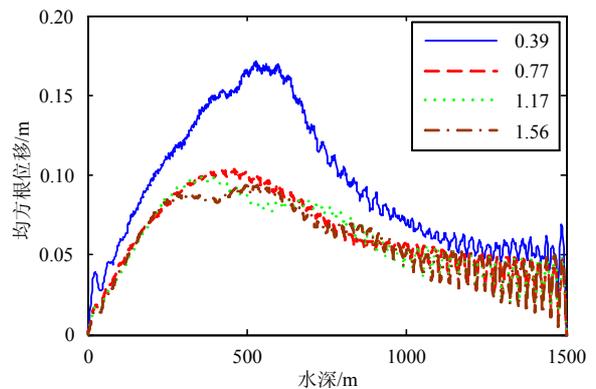


图7 不同升沉频率立管振动响应($a=2\text{m}$)
Fig.7 Vibration response at different heave frequency ($a=2\text{m}$)

根据图6和图7，立管横向振动响应随浮体升沉幅值增加而增大；在浮体运动幅值不变时，随浮体升沉频率的增加而减小，初步分析出现该现象的原因可能是：随着参数激励频率增加，立管振动过程中高阶振动能量向低阶振动转移的能量减少，立管低阶VIV振动受高频参激影响减小，从而造成振动响应幅值变小，这种现象是否具有一般规律还需要进一步研究。

4 结论

综合考虑参数激励和涡激, 计算立管参激-涡激耦合振动响应, 并与纯涡激振动结果进行比较, 得到如下结论:

(1) 考虑参激影响时, 立管的动力响应幅值明显变大; 立管振动频率出现更多组成成分, 振动响应出现且 1/2 亚谐成分, 立管底部的振动响应远远大于纯涡激振动响应, 参激-涡激耦合振动增大; 立管振动响应。

(2) 随流速增大, 立管发生涡激共振的区域减小, 且流速越大, 立管振动的模态阶数越高, 相比于立管低阶模态振动响应幅值变小; 随浮体升沉幅值增大, 立管的横向振动动力响应增大; 随浮体升沉频率增大, 立管横向振动动力响应减小, 对于这一现象还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Kaasen K E, Lie H. Analysis of vortex-induced vibrations of marine risers [J]. *Modeling, Identification and Control*, 2003, 24(2): 71—85.
- [2] 黄智勇, 崔维成, 黄小平. 均匀平面剪切流作用下圆柱体的涡激振动[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, 28(12): 1301—1306.
Huang Zhiyong, Cui Weicheng, Huang Xiaoping. Vortex-induced vibration of a cylinder in uniform planar shear flow[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(12): 1301—1306. (in Chinese)
- [3] 唐世振. 考虑顺流向振动的深水顶张力立管涡激振动分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Tang Shizhen. Study of the vortex induced vibration for the deepwater top tensioned risers considering the in-line vibration [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese)
- [4] Chatjigeorgiou I K, Mavrakos S A. Nonlinear resonances of parametrically excited risers-numerical and analytical investigation for $\Omega=2\omega_1$ [J]. *Computers and Structures*, 2005, 83: 560—573.
- [5] Chatjigeorgiou I K, Mavrakos S A. Bounded and unbounded coupled transverse response of parametrically excited vertical marine risers and tensioned cable legs for marine applications [J]. *Applied Ocean Research*, 24(6): 341—354.
- [6] Chatjigeorgiou I K. On the parametric excitation of vertical elastic slender structures and the effect of damping in marine applications [J]. *Applied Ocean Research*, 2004, 26: 23—33.
- [7] Kuiper G L, Brugmans J, Metrikine A V. Destabilization of deep-water risers by a heaving platform [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 310: 541—557.
- [8] Facchinetti M L, Langre E D, Biolley F. Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19(2): 123—140.
- [9] Violette R, Langre E D, Szydlowski J. Computation of vortex-induced vibrations of long structures using a wake oscillator model: Comparison with DNS and experiments [J]. *Computers and Structures*, 2007, 85: 1134—1141.
- [10] Yamamoto C T, Meneghini J R, Saltara F, et al. Numerical simulation of vortex-induced vibration on flexible cylinders [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19: 467—489.
- [11] Facchinetti M L, Langre E D, Biolley F. Vortex-induced travelling waves along a cable [J]. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2004, 23: 199—208.