

应用新的尾流振子模型研究大长径比下立管的涡激振动

林黎明 宋芳 曾晓辉

(水动力学与海洋工程重点实验室, 中国科学院力学研究所, 100190)

摘要 依据作用力与反作用力原理, 建立了新的耦合结构-尾流振子模型, 用来研究大长径比下柔性立管的涡激振动 (VIV) 问题。对于大长径比下立管的涡激振动, 研究了均匀流, 谐波流和剪切流对结构振动的影响。结果表明, 新的模型同样能够很好地预报结构最大振荡幅值, 以及沿展向的振荡模态, 特别是结构呈现一种驻波和行波的混合状态振动。

关键词: 涡激振动, 大长径比, 立管, 尾流振子模型。

一、前言

当今世界正面临逐渐紧缺的能源资源, 同时各国的现代化发展需要更多的能源, 其中作为主要能源的石油仍然是发展现代工业和未来科技的血脉。长久以来, 人类都是在陆上开采石油, 然而随着海洋勘探和钻探技术的发展, 更大规模的海上油气资源不断被发掘, 并列入能源开采项目。然而, 区别于陆上钻探受到的一系列工程技术问题, 海上钻探也同样面临许多尚未得到很好解决的技术难题, 涉及到材料, 结构和流固耦合等多学科问题。其中对于海底管线以及深水立管等受到各种复杂来流绕过柱体产生的交替脱落涡诱导作用引起的振动, 是一类典型的问题。如何预报这种涡激振动的动力响应, 包括振动幅值, 共振频率等, 及其对结构产生的疲劳破坏, 以及振荡对海面漂浮的石油开采平台的影响, 是当前研究的重点。本次研究拟采用经验模型、物理试验和直接数值模拟进行分析在复杂来流条件下对特定结构引起的涡激振动中存在的一些非线性动力响应特征和预报。

二、物理模型

三维涡激振动问题中, 来流的三维特性, 导致尾迹中旋涡脱落的频率、以及相位沿展向不同; 结构受到的升力不同引起结构振动沿展向振荡幅值不同, 从而呈现不同的振荡波形^[1,2]。三维 VIV 问题的计算模型如图 1 所示, 假设结构的横向位移为时间与展向坐标的函数 $y(z, t)$, 吸收前人对尾流振子模型研究的思想^[3,4,5], 建立如下的基于作用力与反作用耦合模型, 其无量纲控制方程为:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\alpha C_D}{m^* \pi^2 St} \frac{\partial y}{\partial t} + C_{EI} \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} - C_T \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{\alpha \gamma}{m^* \pi^2 St} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \varepsilon \omega_0 (v^2 - 1) \frac{\partial v}{\partial t} + \omega_0^2 v = C_a \frac{\pi}{4} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\gamma}{4\pi St} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2)$$

其中 $v(z, t)$ 表征尾流振子方程中的变量, 与涡升力的变化有关, C_{EI} 是无量纲抗弯刚度系数, C_T 是无量纲张力系数, C_D 是结构受到的拖曳力系数, C_a 是附加质量系数, St 是静止柱体下无量纲涡脱落频率, m^* 是含附加质量的结构质量比, α 是表征来流沿展向变化的不均匀性的参数, γ 为涡升力计算参数, ε 为 van der Pol 方程的参数,

ω_0 为静止柱体下涡脱落角频率。

常用的计算参数分别为, $C_D = 1.2$, $C_a = 1.0$, $\gamma = 0.8$, $\varepsilon = 0.3$ 。计算时设置 v 具有初始扰动量级 10^{-3} , 结构初始位移和速度为 0。

三、研究结果

3.1 均匀来流

计算条件为, 展向无限长柱体, 计算长径比为 $L = 8\pi$, $St = 0.16$, $m^* = 2.273$, $C_{EI} = 0$, $C_T = 16$ 。结构振幅随时间和展向的等值线图表明 (如图 2 所示), 结构从初始驻波振荡状态逐渐发展成为完整的行波状态, 与前人数值模拟的结果保持一致。

3.2 谐波来流

计算条件为, 展向无限长柱体, 计算长径比为 $L = 100$, $St = 0.16$, $m^* = 73$, $C_{EI} = 0$, $C_T = 9$, 来流速度分布为 $1.5 - 0.5\cos(2\pi z/L)$ 。结果表明, 如图 3 所示, 在来流最大处, 结构振荡具有驻波振荡模态, 而在低速流区域内, 结构具有时而驻波, 时而行波的一种混合振动状态, 其原因尚需要深入研究。

3.3 剪切来流

计算条件为, 展向有限长柱体, 计算长径比为 $L = 500$, $St = 0.2$, $m^* = 3.546$, $C_{EI} = 9$, $C_T = 225$, 来流速度分布为 $0.5 + 2 \times 10^{-3}z$ 。结果表明, 如图 4 所示, 结构沿展向始终以驻波振动状态出现。

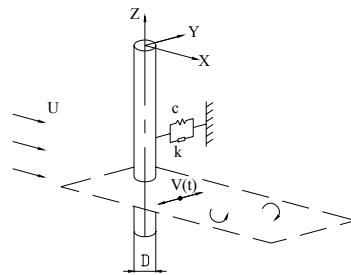


图1 结构沿展向受到的涡激振动

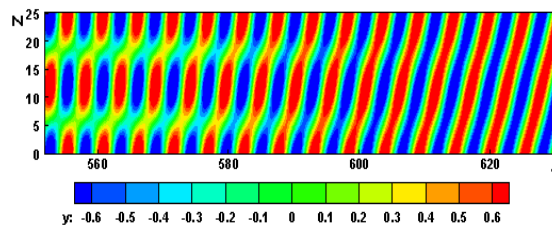


图2 均匀来流下无限长柱体振动沿展向和时间的等值线图

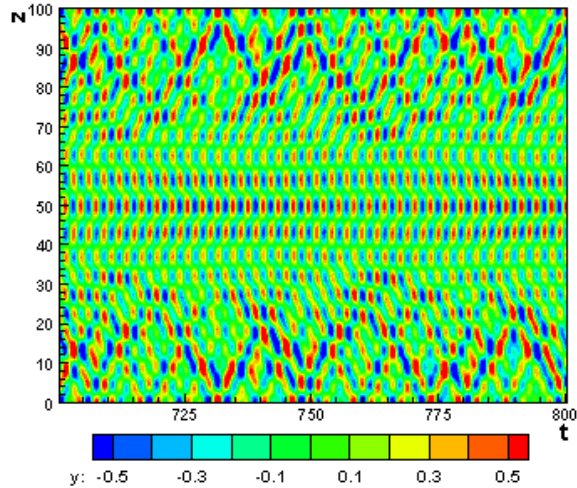


图3 谐波型来流下无限长柱体振动沿展向和时间的等值线图

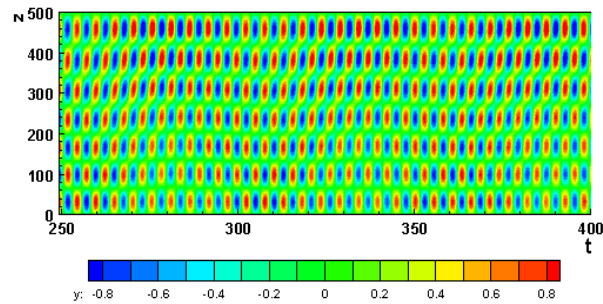


图4 剪切来流下有限长结构柱体的振荡沿展向和时间变化的等值线图

四、结论

通过新建立的作用力和反作用力耦合模型，对大长径比立管的涡激振动进行研究。在当前计算条件下，结构振荡幅值计算结果表明，对于无限均匀来流情况下，结构最终以稳定的行波状态振动；而在谐波型来流下，结构会以局部驻波和驻波与行波交替出现的混合波状态振荡；在线性剪切来流下，有限长立管始终以驻波振动状态出现。因此，本文模型可以应用于此类结构的涡激振动研究。

参 考 文 献

- 1 Williamson C H K, Govardhan R. Vortex-induced vibrations. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2004; 36: 413
- 2 Sarpkaya T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *J. F. M.* 2004; 19: 389
- 3 Facchinetti M L, Langre E De, Biolley F. Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 2004; 18: 123
- 4 Krenk S, Nielsen S R K. Energy balanced double oscillator model for Vortex-induced Vibrations. *Journal of Engineering Mechanics*, 1999; 125: 263
- 5 Iwan W D. The vortex induced oscillation of elastic structure elements. *Journal of Engineering for Industry*, 1975; 97: 1378