

文章编号: 1000-4882(2010)S2-040-05

海洋立管的涡激振动模型预测方法

吴应湘¹, 徐万海², 钟兴福¹, 潘晓东³, 张艳芳³, 杨 琥³

(1.中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

3. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘 要

本文给出了海洋立管涡激振动模型预测方法, 评述了近年来国内外研究进展, 并对未来的发展趋势进行展望, 为海洋工程领域的立管研究提出建议。

关 键 词: 海洋立管; 涡激振动; 模型预测

0 引 言

近年来, 海洋工业正在向更深的海域中发展, 这是世界海洋石油天然气工业发展的总趋势, 如墨西哥湾、西非、巴西和北海, 开发海域的水深已增至 3000m 以上。最近我国正在勘探南中国海水深约 1000m 以上的海域, 并发现了储量相当丰富的油气资源。

立管是进行海洋油气勘探开发必不可少的关键设备。随着水深的增加, 立管系统在技术上的困难也越来越大。研究与实践还表明, 当波浪和海流绕过立管时, 在一定的流速条件下, 会激发立管横向的涡激振动, 涡激振动会加速结构的疲劳, 减少它的使用寿命。因此, 立管等细长柱状柔性结构的涡激振动问题得到了国内外学术界和工程界的广泛关注。

1 细长柔性立管涡激振动预报模型分类

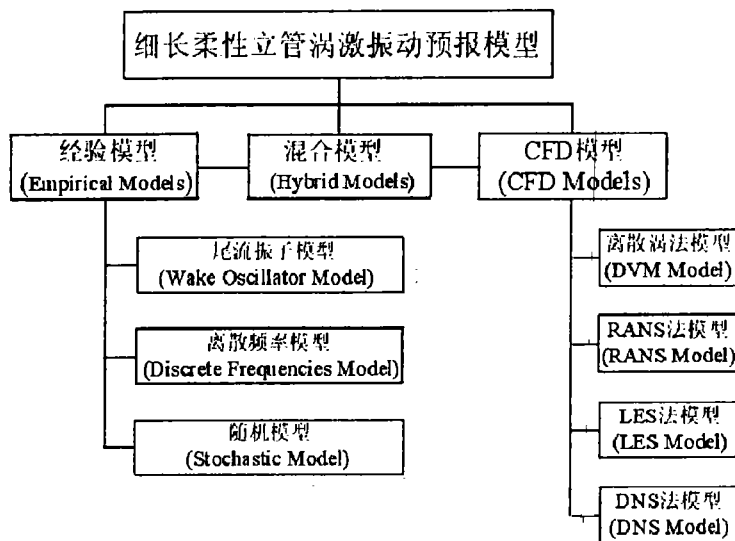


图 1 细长柔性立管涡激振动预报模型分类

基金项目: 国家重大科技专项 (2008ZX05056-03)

目前细长柔性立管垂直流向振动预报模型主要可分为三种类型: 经验模型、CFD 模型和混合模型。经验模型中的流体力的确定是根据实验数据而获得的。CFD 模型中的流体力的确定则是运用 CFD 技术求解粘性 N-S 方程而得到的。混合模型则是综合了这两种方法而得到流体力。按这种分类方法, 可得直观图 1 (ISSC'2000)^[1]。下面对细长柔性立管涡激振动预报的经验模型及 CFD 模型的研究现状作进一步阐述, 由于混合模型非常之少, 在此不作叙述。

2 细长柔性立管涡激振动的 CFD 方法

随着近来计算机软硬件以及 CFD 计算方法的发展, 越来越多的学者开始采用数值方法研究张紧式细长柔性结构的涡激振动。数值方法可以在理想的条件下精确控制影响参数的量值, 可以准确地追踪流场信息、流体力以及结构的位移, 不需要像模型实验中那样从实验仪器中提取并经过复杂的数据处理手续。

按照 CFD 模型对湍流采取的不同模拟方式, 可以将模型大体分为以下四类: 离散涡方法(DVM), 雷诺平均方法(RANS), 直接数值模拟方法(DNS) 以及大涡模拟方法(LES)。

(1) 离散涡法 (DVM)

DVM 方法是把流场中涡量集中或连续分布的地方用很多分散的点涡或线涡来近似表示, 离散涡模型是在集中涡模型的基础上改进的, 利用这种方法成功地预报了在一定雷诺数下的受力、旋涡形态和涡泻频率^[2]。

(2) 雷诺平均法 (RANS)

采用雷诺平均后的 N-S 方程作为基本的控制方程, 针对雷诺应力的计算, 提出不同的湍流封闭模式, 忽略湍流运动中的细节, 揭示了湍流能量产生和消散, 这种方法称为 RANS 方法。Guilmineau 和 Queuty^[3]利用剪切输运(SST)k- ϵ 模型解决湍流问题, 计算在低质量-阻尼情况下弹性支撑刚性圆柱的流体力, 并与物理实验得到的结果进行对比, 模型很好地计算出了最大振幅。潘志远等^[4]在引入的假设较少情况下, 将立管的有限元模态分析与涡激振动响应计算结合在一起, 得到较好的涡激振动预测模型。

(3) 大涡模拟法 (LES)

LES 方法的基本思想是把湍流的瞬时运动分解成大尺度运动和小尺度运动两部分, 利用 N-S 方程模拟大尺度旋涡的运动, 对于湍流中的小尺度旋涡则通过模型近似。大涡模拟(LES) 的方法是介于直接数值模拟(DNS)与雷诺平均法(RANS)之间的折衷物。Al-Jamal 和 Dalton^[5]采用 LES 方法计算了中等雷诺数 ($Re = 1.3 \times 10^4$) 时孤立圆柱的涡激振动(VIV)。将计算的阻力、升力系数等与实验数据相对比, 得出一系列阻尼比和固有频率情况下 ($Re = 8000$) 圆柱涡激振动响应方面的研究成果。

(4) 直接数值模拟法 (DNS)

DNS 方法不需任何假设, 直接求解 N-S 方程, 试图解决任何时间和空间范围内问题。然而网格划分需相当细化, 以致利用现在的技术去解决实际问题将耗费大量的时间, Lucor 等^[6]用这种方法计算了雷诺数为 1000 情况下的此类问题。

由于 CFD 方法对实际流场的模化方式不同, 计算效率也不一样。如何选取 CFD 方法, 存在这样的矛盾: 引入较多的假设, 可以提高计算效率, 但降低了计算精度; 如果不需要任何“模化”, 例如 DNS 方法, 可以追求较高的精度, 但其计算效率对工程需要来讲明显不够。因此, 多数学者都在致力于通过使用 RANS (结合适当的湍流模型) 和 LES (采用适当的亚网格模型), 在保证一定计算效率的前提下, 开发出适用于工程设计的程序^[7]。

3 细长柔性立管涡激振动的经验模型方法

虽然 CFD 计算方法在处理圆柱涡激振动问题方面已经取得了长足的进步,但深海环境十分复杂,Re 数一般在 10^5 量级,同时立管的长径比经常会大于 1000,这对计算机的计算能力和存储能力要求相当高,现阶段还无法满足这方面的要求,因此,CFD 方法应用到工程实际还有一段距离。经验模型的方法通常是在已知物理机理上提出的,具有某些近似和经验性质的描述,相比于直接数值模拟,它们描述的精确性往往不够,有时不能很好的反映物理现象的细节,甚至推导过程也不够严密,但经验模型方法计算简洁,在有效的使用范围内可以得到与实验相当的定量结果,该方法已经广泛的应用于工程实际。常用的经验模型有单自由度模型、力的分解模型及尾流振子模型。

(1) 单自由度模型

单自由度模型的主要思想是采用单独一个常微分方程描述结构的振动特性,Scanlan和Simiu^[8],Basu和Vickery^[9]及Goswami等^[10]对单自由度模型进行了开创性及系统的研究。在力的分解模型方面,Sarpkaya^[11]做了大量前瞻性研究工作,通过分析均匀流作用下,刚性圆柱筒谐横向受迫振动实验数据,提出了将升力看成与圆柱振动位移有关的量,将阻力看成与圆柱振动速度有关的量,以完成对涡激力的分解,运用受迫振动实验数据,完成相关模型参数的确定;国内学者在这方面也做了一些贡献^{[12][13]}。

(2) 力的分解模型及尾流振子模型

多年的研究发现,单自由度模型不能描述流体与结构之间的非线性耦合及能量传递,力的分解模型准确性取决于受迫振动实验数据,而尾流振子模型采用经典的Van der Pol方程或Rayleigh方程描述旋涡的尾迹特性,同时与线性的结构方程耦合,具有自激励自限制特性,满足Strouhal关系,可以很好地解决工程中关心的圆柱涡激振动问题。Bishop和Hassan^[14]、Birkoff和Zarantanello^[15]最先采用Van der Pol方程描述旋涡的尾迹特性;Hartle和Curie^[16]第一个提出了尾流振子模型;1974年Iwan和Blevins^[17]通过假设一个流体变数,由动量方程导出了一个与Hartle和Curie的模型相类似的方程,并给出了用于二维流场弹性支撑刚性圆柱体的尾流振子模型,后又将其推广到弹性圆柱体。在此模型基础上,Iwan^[18]进一步提出了预测非均匀弹性圆柱体涡激动力响应的方法。此外,Griffin、Skop和Landle等人对尾流振子方程进行了细微的改进,建立了经验系数与物理参数之间的经验关系式^{[19][20][21]}。近几年,尾流振子模型有了进一步发展。Balasubramanian等^[22],郭海燕等^[23]以及潘志远等^[24]对不同类型的尾流振子模型进行了改进。2004年Facchinetti等^[25]总结了近30年来20多篇关于尾流振子模型理论和实验研究的文献,系统地阐述了均匀流作用下刚性圆柱的涡激振动问题,提出了新的尾流振子模型,分析了三种不同的流体与结构耦合作用形式:位移耦合、速度耦合和加速度耦合,研究结果表明,加速度耦合可以很好的定性描述涡激振动特性;相同的作者^[26]应用该模型研究拖拽揽线的VIW(vortex induced waves),所得的结果与实验结果吻合的较好;Facchinetti和Langre^[27]将该模型的适用范围由均匀流推广到了剪切流,研究揽线在剪切流作用下的涡激振动特性;Violette等^[28]应用Facchinetti的尾流振子模型研究海洋细长结构的涡激振动问题,将尾流振子模型计算结果与直接数值模拟(DNS)及实验结果进行了对比。徐万海等^[29]^[30]修正了加速度耦合的尾流振子模型,给出了尾流振子模型经验参数确定的新方法,分析了均匀流作用下弹性支撑刚性圆柱横向涡激振动;并将修正的尾流振子模型应用范围拓展到张紧式细长柔性结构,研究了大长径比立管的涡激振动特性,将模型预测结果与实验结果及CFD结果进行了对比。研究发现:修正的尾流振子模型不仅能定性,而且能定量描述张紧式细长柔性结构横向涡激振动特性。而且该模型还具有模型简单、适用范围广、对计算机的计算能力和存储能力要求不高等优点。

4 结 语

总结立管模型预测方面的研究现状,可以发现,随着计算机的计算能力和存储能力的提高,使得 CFD 方法应用到海洋工程实际,解决细长柔性结构的动力响应成为可能,如何改进计算方法的准确性和高效性将成为未来一段时间的研究重点。

现有的经验振子模型在一定程度上都有缺陷,大部分能定性的预测立管涡激振动的固有特性,但在共振阶段的定量数值预报上与实验结果还有一定的偏差,建立一个合理的经验模型,使其能够反映流固耦合作用机理,定性上能够正确的反映 VIV 的变化特征,定量上能够准确的预报共振状态下结构的振动幅值,具有十分重要的意义,这一领域也需要系统深入的研究。

参考文献:

- [1] OHTSUBO H, SUMI Y. Structural design of pipeline, riser and subsea system: Special Task Committee V.5 Report[C]//Proc. of the 14th ISSC, Nagasaki, Japan, 2000.
- [2] ZHOU C Y, SO R M, LAM K. Vortex-induced vibrations of elastic circular cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 1999, 13: 165-189.
- [3] GUILMINEAU E, QUEUTEY P. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a circular cylinder with low mass-damping in a turbulent flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19: 449-466.
- [4] 潘志远, 崔维成. 细长海洋立管涡激振动预报模型[J]. 船舶力学, 2006, 10(3): 5-11.
- [5] AL-JAMAL H, DALTON C. Vortex induced vibrations using large eddy simulation at a moderate Reynolds number[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 18: 73-92.
- [6] LUCOR D, IMAS L, KARNIADAKIS G E. Vortex dislocation and force distribution of long flexible cylinders subject to sheared flows[J]. Journal of Fluids and Structures, 2001, 15: 641-650.
- [7] 秦延龙, 王世澎. 海洋立管涡激振动计算方法进展[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(4): 14-17.
- [8] SIMIU E, SCANLAN, R H. Wind Effects on Structures[M]. Wiley, New York, 1986.
- [9] BASU R I, VICKERY B J. Across-wind vibrations of structures of circular cross-section, part 2: development of a mathematical model for full-scale application[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 12(1): 75-97.
- [10] GOSWAMI I, SCANLAN R H, Jones, N.P. Vortex-induced vibration of circular cylinders, part 2: new model[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(11): 2288-2302.
- [11] Sarpkaya T. Fluid forces on oscillating cylinders. Journal of Waterway[J]. Port, Coastal and Ocean Engineering, 1978, 104: 275-291.
- [12] 潘志远, 崔维成, 刘应中. Prediction model for vortex-induced vibration of circular cylinder with data of forced vibration[J]. China Ocean Engineering, 2007, 21(2): 239-254.
- [13] 王艺, 陈伟民, 林緬. Variation of added mass and its application to the calculation of amplitude response for a circular cylinder[J]. China Ocean Engineering, 2007, 21(3): 429-437.
- [14] BISHOP, R E D, HASSAN A Y. The lift and drag forces on a circular cylinder in a flowing fluid[J]. Proceedings of the Royal Society Series A, 1963, 277: 32-50.
- [15] BIRKOFF G, ZARANTANELLO, E H. Jets, wakes and cavities[M]. New York: Academic Press; 1957.
- [16] HARTLEN, R T., CURRIE, I G. Lift-oscillator model for vortex-induced vibrations[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division EM5, 1970, 577-591.
- [17] IWAN, W D, BLEVINS R D. A model for vortex-induced oscillation of structures[J]. Journal of Applied Mechanics, 1974, 41: 581-586.
- [18] IWAN W D. The vortex induced oscillation of non-uniform structure systems. Journal of Sound and Vibration[J]. 1981,

- 79(2): 291-301.
- [19] SKOP R A, GRIFFIN O M. A model for the vortex-excited response of bluff cylinders[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 27: 225-233.
- [20] GRIFFIN O M, SKOP R A, KOOPMAN G H. The vortex-excited resonant vibration of circular cylinders[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 31: 235-249.
- [21] LANDLE R, A mathematical model for the vortex-excited vibrations of bluff bodies[J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 42: 219-234.
- [22] BALASUBRAMANIAN S, SKOP R A, HAAN F L, SZEWCZYK A A. Vortex-excited vibrations of uniform pivoted cylinders in uniform and shear flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 2000, 14: 65-85.
- [23] 郭海燕,傅强,娄敏.海洋输液立管涡激振动响应及其疲劳寿命研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 220-224.
- [24] 潘志远,崔维成,刘应中. 阶梯状来流中立管的涡激振动响应预报[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 1064-1068.
- [25] FACCHINETTI M L, LANGRE E, DE, BIOLLEY F. Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19 (2): 123-140.
- [26] FACCHINETTI M L, LANGRE E, DE, BIOLLEY F. Vortex-induced travelling waves along a cable[S]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2004, 23: 199-208.
- [27] FACCHINETTI M L, LANGRE E, de. Vortex-induced vibrations and waves under shear flow with a wake oscillator model[J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2005, 24: 478-490.
- [28] VIOLETTE R, LANGRE, E, DE, 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.
- [29] WANHAI XU, XIAOHUI ZENG, YINGXIANG WU. High aspect ratio (L/D) riser VIV prediction using wake-oscillator model[J]. Ocean Engineering, 2008, 35:1769-1774.

The Methods for Predicting Vortex-Induced Vibration of Marine Risers

WU Yingxiang¹, XU Wanhai², ZHONG Xingfu¹, PAN Xiaodong³,
ZHANG Yanfang³, YANG Hu³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract

The methods for predicting vortex-induced vibration (VIV) of marine risers are presented in this paper, the recent literatures on the computational methods used to investigate VIV of marine risers are reviewed, and some suggestions are made for further research on VIV.

Key words: marine riser; vortex-induced vibration; predicting method

作者简介

吴应湘 男, 1956年生, 研究员。主要从事海洋工程相关力学问题研究。