

文章编号:1673-500X(2006)05-0074-04

导向架隔水管在波流联合作用下的非线性动力响应

畅元江,陈国明,许亮斌

(中国石油大学 机电工程学院,山东 东营 257061)

摘要:考虑了波流联合作用下固定式钻井装置隔水管与导向架之间的间隙-接触条件,讨论了非线性边界条件下瞬态动力学问题的求解方法。应用有限元法,将隔水管简化为海底泥面线下3 m处固支、下层平台简支、中间不同高度的横向振动被导向架限制的梁模型,采用ANSYS软件,利用其combination40单元来模拟隔水管与导向架之间的间隙-接触条件,实例计算了百年重现期环境载荷下隔水管的动力响应,得到了典型节点的位移-时间历程和典型单元的等效应力-时间历程,成功实现了隔水管的强度校核。该计算结果为带导向架隔水管的设计与分析提供了参考。

关键词:隔水管;导向架;间隙-接触;边界非线性;直接积分法

中图分类号:TE 924 文献标识码:A

Non-linear dynamic response induced by wave-current for marine risers with guide-frames

CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, XU Liang-bin

(College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: Considering the gap-contact condition between guide-frames and the fixed drilling unit riser subjected to wave-current loads, the solution method for transient dynamic problem under the nonlinear boundary condition was discussed. By applying the finite element method, the marine riser was modeled as the beam model which was fixed under the seabed mudline at the depth of three meters, simply supported at the lower deck, and its lateral vibration was restricted by guide-frames at different elevation. Using ANSYS software, the gap-contact condition between marine riser and guide-frames was simulated by combination40 element. The non-linear dynamic response of marine riser under one-hundred-year wave-current environmental load was calculated, the displacement-time history of typical nodes and equivalent stress-time history of typical elements were also obtained, and strength check of the riser was then achieved successfully. The results provide reference for design and analysis of the marine risers with guide-frames.

Key words: riser; guide-frames; gap-contact; boundary nonlinearity; direct integration method

隔水管是海洋石油工程中的重要设备,作为连接平台与海底井口之间的重要部件,隔水管的受力状态非常复杂,在波流联合作用下,作为柔性构件的隔水管必然产生较大的动力响应,隔水管动态响应的强度校核是海洋石油钻采设备研究中的重要问题。隔水管的形式很多,主要有顶张力隔水管、固定式钻井装置隔水管等,前者主要用于浮式钻井船,后者主要用于固定式钻井平台。固定式钻井装置隔水管是指隔水管被安装在能够固定的钻井装置上,如

导管架平台、自升式钻井平台等。这种情况下,隔水管被打桩机打入海底几十米深,有时隔水管上部还要承重,也就是要承受一定的垂直方向载荷^[1]。目前,国内外有关隔水管动态响应的研究较多。如采用确定性波浪力模型分析了波流联合作用下的动力响应^[2],应用随机振动的理论和方法,研究了隔水管在随机载荷波浪力作用下的随机响应^[3];从不同角度对隔水管进行了动力分析等^[4,5],但这些研究都是针对隔水管两端被铰支这一比较简单的边界条件。B. J.

收稿日期:2005-08-09

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20030425014)

作者简介:畅元江(1974-),男(汉族),河南洛阳人,博士研究生,主要研究方向为海洋钻井技术与装备、计算机辅助工程与仿真等。

Koo 等人的研究涉及到隔水管与导向架之间的间隙-接触条件^[6],但研究的重点是间隙-接触条件对 Spar 平台整体运动的影响。笔者以我国某海区的平台隔水管为例,考虑波流联合作用下隔水管与导向架之间的间隙-接触条件,采用 ANSYS 软件作为隔水管有限元分析工具^[7],研究非线性边界条件下隔水管的动态响应,得到其动态响应过程中的最大等效应力与最大变形,以实现隔水管的强度校核。

1 隔水管瞬态非线性有限元动力分析

1.1 有限元模型的建立

为得到带导向架固定式钻井装置隔水管在波流联合作用下的非线性动态响应及其规律,采用 ANSYS 软件建立有限元模型。

(1)借鉴对平台进行力学分析的“等效桩法”^[8],取隔水管泥面线以下 3 m 处(相当于隔水管外径的 5 倍)固支来近似替代泥面线以下隔水管与土壤之间的非线性作用。

另一种方法称为“ $p-y$ 曲线法”。采用该方法时,泥面线以下隔水管与土壤之间的非线性相互作用可通过非线性弹簧表示,采用水平弹簧来模拟土壤对隔水管的水平载荷($p-y$ 曲线),采用竖直弹簧来模拟土壤对隔水管的纵向表面摩擦载荷($q-z$ 曲线),采用桩端弹簧来模拟土壤对隔水管的承载作用($t-z$ 曲线)^[8]。根据 API 规范中推荐的有关公式计算非线性弹簧的载荷-位移曲线^[9],并用 combination39 非线性弹簧单元来模拟土壤与结构的非线性作用,建立如图 1 所示的有限元模型。

分别对采用这两种方法建立的有限元模型进行结构的静态响应和自振特性研究,结果显示两者的等效应力和固有频率相差很小。由于结构的振动特性决定结构对于各种动力载荷的响应情况,故采用“等效桩法”进行计算的结果是可靠的。模态阶数为

1 2 3 4 5 时,等效桩法和 $p-y$ 曲线法隔水管的相应固有频率分别为 0.049 943, 0.137 55, 0.269 41, 0.444 91, 0.665 92 和 0.049 313, 0.135 88, 0.266 25,

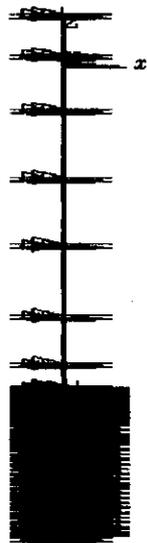


图 1 隔水管与土壤非线性交互有限元模型

0.439 91, 0.656 80。

(2)采用 pipe59 单元模拟海浪、海流载荷对隔水管的作用。pipe59 单元可以考虑纵向拉压、扭转、弯曲变形,能够承受隔水管所输送介质的内压和海洋环境载荷,即浮力、波浪力和海流载荷,还可以模拟隔水管外部被海生物附着等。隔水管泥面线以下部分采用 pipe16 单元进行模拟。

(3)采用 ANSYS 软件提供的组合单元 combination40 来模拟导向架与隔水管之间的间隙-接触条件。

此外,进行波流联合作用下的海洋结构物设计或分析时,波流之间的交互作用应当引起注意。ANSYS 软件的 pipe59 单元支持波流交互作用,在输入波流剖面参数的水表(water table)中有波流交互开关 KCRC,通过 3 个选项(KCRC=0,1,2)可以设定 3 种不同形式的波流交互,不同的选项代表由于波浪的作用,流剖面被“张紧”或者“压缩”的程度。但隔水管有关规范^[10]未对隔水管分析的波流交互做出要求,这里的隔水管分析也就没有考虑波流之间的交互作用(KCRC=0)。研究证实,不考虑波流之间的交互作用将使计算结果偏于保守。

1.2 瞬态非线性有限元动力分析的求解方法

本文中采用的瞬态动力分析方法主要考虑了非线性动态分析中的间隙-边界条件。在周期性波流载荷联合作用下,隔水管产生周期性受迫振动,隔水管与各层导向架之间的间隙存在与消失时有发生,此为间隙-接触边界条件,属于边界非线性问题范畴。在结构动力学问题中,模态叠加法在处理线性动力学分析时非常方便。但如果存在非线性,包括几何非线性、材料非线性和边界非线性等,在结构动力学分析时模态叠加法将不再适用,非线性动态响应只能采用直接积分法进行求解,ANSYS 软件提供了解决此类问题的相应方法和选项。

2 算例

2.1 基本参数

隔水管被安装于水深为 200 m 的固定式钻井平台上,海平面至平台甲板的距离为 25 m,海平面上 8 m 和 25 m 处用管卡将隔水管雇定。除垂直方向以外,管卡限制其他所有自由度。自泥面线到海平面之间共有 6 个导向架,其高度分别是 -164, -129, -98, -69, -41, -15 m,导向架与隔水管之间的装配间隙为 0.125 4 m。隔水管的直内径为 0.609 6 m,壁厚为 0.025 4 m,钢级为 X56,单位长度质量为

302 kg/m, 屈服强度为 386 MPa, 隔水管的设计寿命为 25 a, 隔水管在阴极保护下的腐蚀速率为 0.6 mm/a, 附着海生物厚度为 7 mm。

百年一遇环境载荷下有效波高为 21.5 m, 波浪周期为 14.5 s, 按照 ANSYS 软件的规定, 采用 pipe59 单元进行有限元计算时, 总体坐标系的原点必须位于海平面处, 即海平面的高度为 0 m^[11]。海平面以下高度分别为 0, -20, -40, -80, -100, -120, -160, -200 m 时, 流速分别为 2.09, 1.79, 1.49, 1.04, 0.91, 0.77, 0.67, 0.00 m/s。拖曳力系数和惯性力系数分别取 1.2 和 2.0, 取波浪和海流的入射角均为 0°, 采用 Stokes5 阶波浪理论和 Morison 方程计算作用于隔水管的波流联合作用力。

2.2 计算模型及结果

计算模型如图 2 所示, 共有 131 个节点, 130 个单元, 其中泥面上 pipe59 单元 115 个, 泥面下 pipe16 单元 3 个, combination40 单元 12 个, 在导向架位置对称建立。

依据隔水管的结构参数及其所处的环境载荷参数, 采用 ANSYS 软件的 APDL(ANSYS Parametric Design Language)^[12] 编写了相应的计算程序, 完成了对带隔水管导向架在波流联合作用下的非线性瞬态动力学分析, 得到了隔水管振



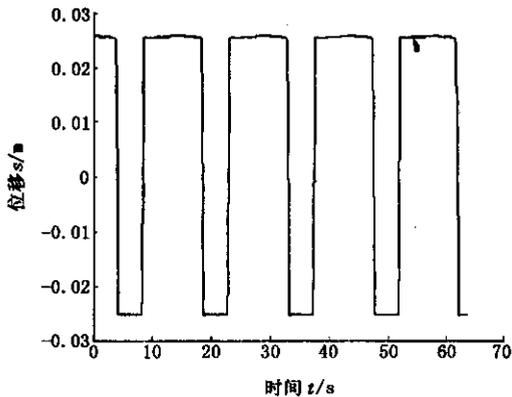
图 2 隔水管简化有限元模型

动过程中的最大变形和最大等效应力。

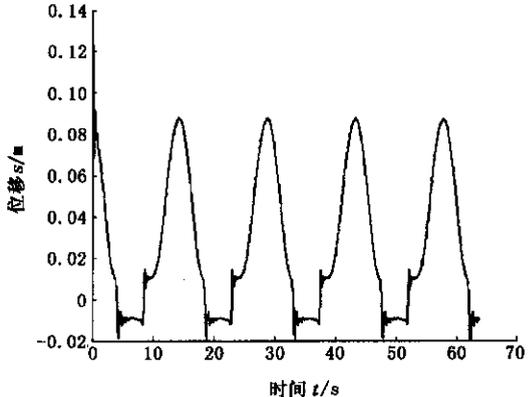
计算结果主要包括隔水管在导向架位置所有 6 个节点(即隔水管建立 combination40 单元处的节点)的位移-时间历程曲线和隔水管在两个导向架之间管跨的中点节点(共 5 个)的位移-时间历程曲线。前者目的在于考察导向架对于隔水管振动的限制作用, 主要用来证明本文中所采用的利用 combination40 单元来模拟隔水管与导向架之间的间隙-接触条件的可行性; 后者目的在于考察隔水管在海流、海浪的联合作用下发生强迫振动以及强迫振动进入稳态时整个隔水管的最大变形。此外, 计算结果还包括隔水管在靠近所有导向架和管卡正下方所有单元(共 8 个)的等效应力-时间历程曲线和隔水管在两个导向架间的管跨中点单元(共 7 个)的等效应力-时间历程曲线。

2.2.1 典型节点的位移-时间历程

从计算结果中提取 -164~25 m 具有代表性的 11 个节点的位移-时间历程, -15 m 和 -4 m 处节点的位移-时间历程见图 3。由图 3(a)可知, -15 m 处的导向架在隔水管振动过程中均较好地抑制了隔水管的横向振动, 隔水管的振动被限制在 -2.54~2.54 cm 间隙内, 这表明采用 combination40 单元来模拟隔水管与导向架之间的间隙-接触边界条件是可行的。由图 3(b)可知, 隔水管振动的最大变形发生在 -4 m 处, 最大变形为 8.74 cm, 其原因是隔水管在此处所承受的横向波流联合作用力最大, 此处也正好位于 8 m 与 -15 m 两个导向架的中间。



(a) -15m 处



(b) -4m 处

图 3 不同节点处的位移-时间历程

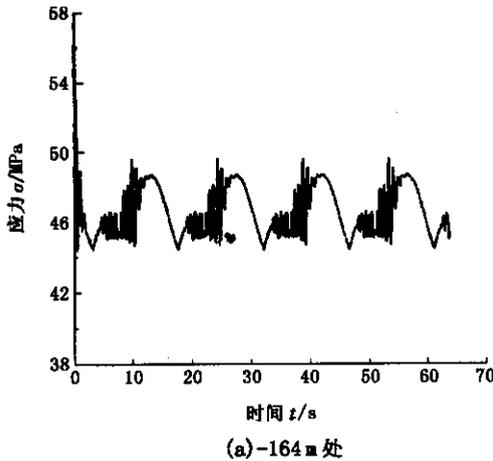
由图 3 可以看出, 在时间 $t=0^+$ 时刻, 各节点振动都出现一个瞬时极大值, 这是由于指定波浪力和海流为阶跃加载所引起的, 实际情况下, 隔水管所受到的波浪力和海流并不是阶跃载荷, 故考察各节点振动的位移只能以受迫振动的稳态响应为依

据。

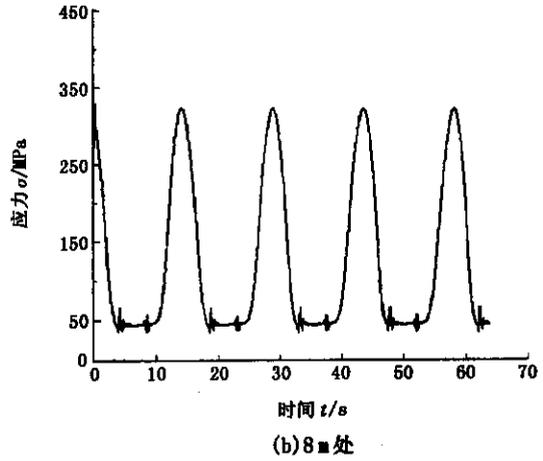
2.2.2 典型单元的等效应力-时间历程

从计算结果中提取 -164~25 m 具有代表性的 15 个单元的等效应力-时间历程, -164 m 和 8 m 处隔水管单元的等效应力-时间历程见图 4。结果

表明 动态响应过程中 隔水管最大等效应力发生在海平面上方 8 m 处,数值为 322 MPa。而在考虑波流交互情况下,计算得到的隔水管最大等效应力分别为 313 MPa(KCRC=1)和 304 MPa(KCRC=2)。取安全系数为 1.5,该隔水管不满足强度条件,故应修改隔水管参数(如改变隔水管壁厚为 38.1 mm 等)重新进行设计和强度校核。



(a)-164 m 处



(b)8 m 处

图 4 不同位置单元等效应力-时间历程

3 结束语

采用‘等效桩法’对固定式钻井装置隔水管进行了静力和动力分析。ANSYS 单元库提供的 combination40 单元可用来模拟波流联合作用下隔水管与导向架之间的间隙-接触边界条件,可用于隔水管的非线性动力学分析。利用本文中提出的方法得到了隔水管振动过程中的最大变形和最大等效应力,实现了隔水管的强度校核。

参考文献:

- [1] R. 谢菲尔德. 浮式钻井设备及其应用[M]. 周邦杰, 译. 北京: 石油工业出版社, 1988.
- [2] 贾星兰, 方华灿. 海洋钻井隔水管的动力响应[J]. 石油机械, 1995, 23(8):18-22, 28.
JIA Xing-lan, FANG Hua-can. Dynamic response of marine drilling riser[J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(8):18-22, 28.
- [3] 李军强, 刘宏昭, 何钦象, 等. 波浪力作用下海洋钻井隔水管随机振动研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(1):7-10.
LI Jun-qiang, LIU Hong-zhao, HE Qin-xiang, et al. On

由图 4 看出,在时间 $t=0^+$ 时刻,各单元等效应力都出现一个瞬时极大值,同理,这是由于指定波浪力和海流力为阶跃加载所引起的,实际情况下,隔水管所受到的波浪力和海流力并不是阶跃载荷,故考察隔水管动态响应时的最大等效应力也只能以受迫振动的稳态响应为依据。

random vibration of riser system in marine drilling subjected to wave force[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(1):7-10.

- [4] 李华桂. 海洋钻井隔水管的动力分析[J]. 石油学报, 1996, 17(1):122-126.
LI Hua-gui. Dynamic analysis of offshore drilling risers[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1):122-126.
- [5] 郭海燕, 王树青, 刘德辅. 海洋环境荷载下输油立管的静、动力特性研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(4):605-611.
GUO Hai-yan, WANG Shu-qing, LIU De-fu. Study on static and dynamical analysis of a marine riser conveying flowing fluid subjected to environmental load[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(4):605-611.
- [6] KOO B J, KIM M H, RANDALL R E. The effect of nonlinear multi-contact coupling with gap between risers and guide frames on global spar motion analysis[J]. Ocean Engineering, 2004, 31(1):1469-1502.
- [7] BAI Yong, BAI Qiang. Subsea Pipelines and Risers[M]. Elsevier Science Ltd, 2005.
- [8] 中国船级社. 海上移动平台入级与建造规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1992.

(下转第 83 页)

具有重要意义。

参考文献：

- [1] American Petroleum Institute. API Bulletin 5C3, 6th edition. Bulletin on formulas and calculations of casing, tubing, drill pipe and line properties[S]. Dallas: API Production Department, 1994.
- [2] 中国国家石油和化学工业局. SY/T 5322-2000 套管柱强度设计方法[S]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 郝俊芳, 龚伟安. 套管强度计算与设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 14-15, 108-111.
- [4] RAHMAN S S, CHILINGARIAN G V. Casing design theory and practice[M]. Amsterdam: Elsevier Science B V, 1995: 51-71.
- [5] 法国石油研究院. 钻井数据手册[M]. 6版. 王子源, 苏勤, 王泽林, 译. 北京: 地质出版社, 1995: 107-110.
- [6] 中国国家经济贸易委员会. SY/T 6194-2003 石油天然气工业油气井套管或油管用钢管[S]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] ADAMS A J, PARFITT S H L, REEVES T B, et al. Casing system risk analysis using structural reliability [R], SPE/IADC 25693, 1993.
- [8] GALAMBOS T V, RAVINDRA M K. Properties of steel for use in LRFD[J]. Proc J Struct Divn ASCE, 1978, 104(9): 1459-1468.
- [9] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 116-152.
- [10] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 438-439.
- [11] 何水清, 王善. 结构可靠性分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 29-30.
- [12] 刘清友, 王国荣, 钟青, 等. 套管的随机可靠性设计方法[J]. 钻采工艺, 2000, 23(2): 40-43.
LIU Qing-you, WANG Guo-rong, ZHONG Qing, et al. Random reliability design of casing[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(2): 40-43.
- [13] 王仲茂, 卢万恒, 胡江明. 油田油水井套管损坏的机理及防治[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 2-5.
- [14] 邓金根. 水泥环性质对套管外载影响的模拟试验[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1997, 21(6): 24-28.
DENG Jin-gen. Simulation experiment on effects of cement mantle features on casing loading[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1997, 21(6): 24-28.
- [15] 崔孝秉, 岳伯谦, 罗维东, 等. 注水油田套管损坏区套管损坏预测法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994, 18(1): 50-55.
CUI Xiao-bing, YUE Bo-qian, LUO Wei-dong, et al. A predictive method for casing damage wells of oilfield with water-injection[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1994, 18(1): 50-55.
- (编辑 沈玉英)
- ~~~~~
- (上接第77页)
- [9] 徐长航, 陈国明, 谢静, 等. 风暴状态下自升式平台非线性动力分析模型[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 80-83, 87.
XU Chang-hang, CHEN Guo-ming, XIE Jing, et al. Nonlinear dynamic analysis model for JACK-UPS under extreme storm condition[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(4): 80-83, 87.
- [10] DET Norske Veritas. DNV-OS-F201 Dynamic risers: offshore standard[S]. 2001.
- [11] 杨树耕, 滕明清, 孟昭瑛, 等. 有限元分析软件 ANSYS 在海洋工程中的应用[J]. 中国海洋平台, 2000, 15(5): 40-46.
YANG Shu-geng, TENG Ming-qing, MENG Zhao-ying, et al. Application of finite element software ANSYS to offshore engineering[J]. China Offshore Platform, 2000, 15(5): 40-46.
- [12] 龚曙光, 谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- (编辑 沈玉英)