文章编号:1673-5005(2011)05-0125-05

深水采油树下放过程钻柱力学分析

林秀娟,肖文生,王鸿雁

(中国石油大学 机电工程学院,山东 青岛 266555)

摘要:根据海洋环境载荷和材料力学理论,考虑钻柱参数、海洋环境载荷、钻井船漂移量、作业水深及采油树重力等特征,建立深水采油树下放过程钻柱力学分析模型。通过对模型进行数值求解,对不同影响因素下沿钻柱的横向位移、漂移角、弯矩和剪力进行分析。结果表明:波浪载荷对钻柱上部的弯矩影响很大而对钻柱横向位移影响很小,对采油树深水下放忽略波浪力不会产生较大的误差;钻井船的漂移量对钻柱横向位移有一定的影响而对钻柱偏移角、弯矩和剪力几乎没有影响;海水阻力系数、海面海流速度及作业水深对深水采油树下放过程钻柱强度均有较大的影响。 关键词:深水采油树;钻柱;海洋环境载荷;强度;分析模型

中图分类号: TE 52; TB 12 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.023

Drill string mechanical analysis of running deepwater oil tree

LIN Xiu-juan, XIAO Wen-sheng, WANG Hong-yan

(College of Electromechanical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: A mechanical analytical model of drill string for running deepwater oil tree was established according to the marine environmental load and material mechanics theory. The drill string parameter, the marine environmental load, drilling ship drift, operating water depth and subsea tree weight were considered in the model. The lateral displacement, angular distortion, bending moment and shear force were analyzed. The results show that wave load has great effect on bending moment of the drill string head, but has little influence on lateral displacement, thus it can't produce large error without considering deepwater wave load. Drilling ship drift has certain effect on lateral displacement of the drill string, but has little influence on angular distortion, bending moment and shear force of the drill string. The resistance coefficient, current velocity and operating water depth all have great influences on the drill string strength of running deepwater oil tree.

Key words: deepwater oil tree; drill string; marine environment load; strength; analytical model

深水采油树下放安装过程比较复杂,易受到海流、波浪等各种恶劣环境因素的影响。下放过程中需要远程控制采油树的旋转及深水采油树下放的精度。如果下放过程中钻柱强度不够或者钻柱横向位移偏大,会影响采油树下放安全及与井口的对准安装。目前国内外对于深水采油树的研究大多局限于施工方案、下放技术以及一般设计的探讨^[15]。Robert Voss等^[1]完整地探讨了深水采油树的下放工艺,并记录了深水采油树下放过程中的主要技术问题,但并没有进行理论分析并找出产生问题的根源。工程中对于深水采油树的结构设计,传统的方法是将采油树上零部

件进行单独分析设计,即考虑不同构件的最不利工况,并以此为设计依据^[68]。利用这种方法进行深水 采油树结构设计时,无法对装配后整体结构力学性能 进行全面精确分析。为了解决安装施工过程中出现 的技术难题,提高深水采油树下放的安全性和可靠 性,笔者根据海洋环境载荷以及材料力学理论建立一 种深水采油树下放过程钻柱力学分析方法,综合考虑 钻柱参数、海水阻力系数及海面海流速度、钻井船漂 移量、作业水深及采油树重力对下放钻柱强度的影 响,运用面向对象的设计、分析思想及开发手段,开发 深水采油树下放过程钻柱力学分析软件系统。

基金项目:国家"863"项目(2007AA09A102)

作者简介:林秀娟(1977-),女(汉族),山东烟台人,讲师,博士研究生,研究方向为石油机械。

1 下放力学分析模型

1.1 受力分析

深水采油树下放过程中钻柱受力比较复杂,为 了便于分析研究,作了如下假设:

(1)下放钻柱材料是均匀的和各向同性的,在 运动和变形时始终处于线弹性范围之内,其刚度不 变。

(2)由于钻柱的直径与长度之比极小,其主要 承受横向载荷,变形以弯曲为主,所以钻柱可以作为 梁来进行力学分析。

(3)海流、波浪及钻柱的运动处于同一平面内, 并且不考虑海流的升力。

(4)钻柱微段的变形是小量,变形角也是小量。

(5)应用小变形梁理论,因此 sin $\theta = dx/ds_{\circ}$

深水采油树下放过程钻柱受力如图1所示。



Fig. 1 Schematic diagram of force on running

deep water oil tree

取变形后钻柱的一个微段 dz,则该微段的示意 图如图 2 所示。将 dz 两端 $A \to B$ 处的 P = x 方向 力 H 沿挠度曲线的切向与法向分解,令 $\theta = dx/dz$ (图 3)。通过力学分析,得到下放钻柱的挠曲微分 方程为

$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}z^2} \left(EI \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}z^2} \right) - P(z) \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}z} = q(x,z) , \qquad (1)$$

其中

$$q(x,z)=f_w+f_c$$
.

式中,*EI*为钻柱的抗弯刚度, $kN \cdot m^2$;P(z)为沿z方向变化的轴向拉力,kN;q(x,z)为钻柱单位长度上 所受的环境载荷,kN/m; f_w 和 f_c 分别为钻柱单位长 度上的波浪力和海流力, kN_o

相应的边界条件为

(1) 钻柱顶部固定约束:
$$x_0 = 0, \theta_0 = 0, 即$$

 $EIx \mid_{z=0} = 0, EIx' \mid_{z=0} = 0.$
(2) 钻柱端部自由: $Q_n = M_n = 0, 即$
 $EIx'' \mid_{z=n} = 0, EIx''' - P(z)x' \mid_{z=n} = 0.$



图 2 微段 dz 放大后的示意图





图 3 微段上力的方向

Fig. 3 Force direction of micro-segment

1.2 环境载荷

1.2.1 波浪力

作用在钻柱上的单位长度波浪力由阻力和惯性 力组成,其中阻力是由海水流过钻柱时的速度引起, 惯性力是由海水的加速度引起。根据 Morison 方 程,波浪力的计算式^[9-10]为

$$f_{w} = f_{D} + f_{1} = \frac{1}{2} C_{D} \rho_{1} D | u | u + \frac{\pi}{4} C_{M} \rho_{1} D^{2} \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}.$$

式中, $f_{\rm D}$ 为钻柱单位长度上所承受的阻力,kN/m; $f_{\rm 1}$ 为钻柱单位长度上所承受的惯性力,kN/m; $C_{\rm D}$ 为阻力系数; $\rho_{\rm 1}$ 为海水的密度, kg/m^3 ;D为钻柱的外径, m; $C_{\rm M}$ 为惯性力系数;u为垂直于钻柱轴线的水质点水平速度,m/s;du/dt为垂直于钻柱轴线的水质点水平加速度, m/s^2 。

根据 Airy 波理论,水质点水平速度和水平加速 度^[9]分别为

$$\begin{split} u &= \frac{\pi H \cosh\left[2\pi(z+l_0)/\lambda\right]}{T} \cos\frac{2\pi}{\lambda} \left(x - \frac{\lambda t}{T}\right),\\ \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} &= \frac{2\pi^2 H \cos h\left[2\pi(z+l_0)/\lambda\right]}{T^2 \sin h\left(2\pi l_0/\lambda\right)} \sin\frac{2\pi}{\lambda} \left(x - \frac{\lambda t}{T}\right).\\ \vec{x} \oplus H \ \mathcal{B}$$

为钻柱下入的长度.m。

1.2.2 海流力

因海流力随时间的变化不大,所以主要考虑其 横向阻力的作用。钻柱单位长度上的海流力^[9]为

$$f_{\rm c} = \frac{1}{2} C_{\rm D} \rho_1 D v_{\rm c}^2$$

其中

$$v_{\rm c} = u_1 (z/l_0)^{1/7} + u_2 (z/l_0).$$

式中, v_a 为距海底 z 处的海流速度, m/s; u_1 和 u_2 分 别为海面处的潮流速度和海流速度,m/s。

1.3 轴向拉力

考虑到钻柱随着深度的增加自身重力增加,所 以有

 $P(z) = P+0.25\pi g(\rho-\rho_1)(D^2-d^2)(l_0-z).$

式中,P为深水采油树的浮重, $kN:\rho$ 为钻柱材料的 密度, kg/m³; ρ_1 为海水密度, kg/m³; d 为钻柱的内 径,m。

数值求解 2

由于钻柱受海洋载荷的作用复杂,采用有限差 分法将下放钻柱分成 n 段,每段采用等量分段,分段 长为h,管柱顶节点设为0,管柱底节点为n,延长两 端并设虚拟节点 n-1,n-2 和 n+1,n+2^[11-12],如图 4 所示。



图 4 钻柱数值化

Fig. 4 Sketch map of numerical grid of drill string

利用差分格式代替式(1)中的导数格式,则将 式(1)化为 n+1 个差分方程

 $x_{i+2} + b_i x_{i+1} + c_i x_i + d_i x_{i-1} + x_{i-2} = 0$, i = 0, 1, L, n; (2)其中

$$b_i = -4 + P_i h^2 / EI,$$

 $c_i = 6 - 2P_i h^2 / EI + q_i h^4 / EI,$
 $d_i = -4 + P_i h^2 / EI.$
钻柱顶部固定约束为
 $x_0 = 0, x_1 - x_0 = 0.$ (3)

钻柱端部自由约束为

可见,此最大正应力小于许用应力,所以算例中钻柱 强度安全。

海水的阻力系数及钻柱的弹性模量对下放钻 3 1 柱强度的影响

图 5 为不同的海水阻力系数和钻柱材料弹性模 量对深水采油树下放过程钻柱强度的影响。从图 5 中可以看出,随着海水深度的增加,钻柱横向位移和 偏移角逐渐增大,而对钻柱偏移角的影响主要集中 在 300 m 以内的一段区域内.300 m 以外偏移角随

$$\begin{cases} x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n = 0, \\ x_{n+3} - 3x_{n+2} + (3 - P(nh)h^2 / EI)x_{n+1} - \\ (1 - P(nh)h^2 / EI)x_n = 0. \end{cases}$$
(4)

由式(2)及边界条件(3),(4)组成 n+5 个方程组, 可以求出 n+5 个节点的横向位移。由于式(2)~ (4)构成的线性方程组属于大型稀疏矩阵方程组 (阶数很大,但零元素较多),采用全选主元高斯-约 当消去法求解^[13]。通过该算法运用 matlab 编制了 相应的计算机程序,可以快速地实现钻柱在不同深 度的横向位移,求出不同深度钻柱的偏移角及所受 的内力。计算式为

$$\theta_{n+1} = (x_{n+1} - x_n)/h,$$

$$M_{n+1} = (EI(x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n))/h^2,$$

$$Q_{n+1} = (EI(x_{n+3} - 3x_{n+2} + 3x_{n+1} - x_n))/h^3 - P(nh)(x_{n+1} - x_n)/h.$$

以上对钻柱的内力和位移正负号规定为:0和 x 以顺 x 轴的正方向为正, θ 以逆时针为正,M 以使 管柱左侧纤维受拉时为正,反之则为负。

算例及影响因素分析 3

某深水采油树重力为 300 kN, 钻柱外径为 139.7 mm, 壁厚为 10.54 mm, 弹性模量为 210 GPa, 海水阻力系数为1.0,海面海流速度为1.0 m/s²,海 面潮流速度为0.5 m/s,波浪高为8 m,波浪周期为 10 s, 惯性力系数为 2.0, 钻柱材料密度为 7 850 kg/ m³,海水密度为1030 kg/m^{3[14]}。由于波浪力的作 用深度有限,对采油树深水下放忽略波浪力不会产 生较大的误差,所以在计算非波浪载荷的其他因素 对深水采油树下放过程钻柱强度影响时只考虑海流 力的作用 ,该钻柱材料的许用应力 $[\sigma]$ =160 MPa。

十算机程序,求出 M_{max} = 4.9 kN・ 伸及弯曲组合变形下钻柱在下放 过程中最大正应力为

 $\sigma_{\text{max}} = M_{\text{max}} / W + P_{\text{max}} / A = 61$ MPa.

深度的增加几乎不变;钻柱剪力和横向弯矩在海平 面最大,在钻柱底部几乎为零。这说明在海平面附 近的钻柱截面是危险截面,最容易发生破坏。

对不同海水阻力系数和钻柱材料弹性模量的影响进行对比,结果表明,在钻柱材料的弹性模量均是 210 GPa时,在600 m水深处,海水阻力系数为1.1 比阻力系数为0.7 的横向位移增加了60%左右,剪 力也相应增加了 55% 左右。同时,在海水阻力系数 均为 1.0 时,在 600 m 水深处,弹性模量为 169 GPa 的钻柱比弹性模量为 210 GPa 的横向位移增加了 30% 左右,剪力增加了 20% 左右。由此可知,海水 阻力系数的减小及钻柱材料弹性模量的增加会增大 钻柱的安全强度,同时便于深水采油树落底的对接 安装。



图 5 海水的阻力系数和钻柱材料的弹性模量对下放钻柱强度的影响

Fig. 5 Effects of resistance coefficient and elastic modulus of drill string material on strength of running drill string

3.2 钻井船漂移量及海面海流速度对下放钻柱强 度的影响

图 6 为不同的钻井船漂移量 s₁ 和海流速度 u₂ 对钻柱横向位移和弯矩的影响。结果表明,钻井船 漂移量对不同深度钻柱的横向位移有一定的影响而 对横向弯矩没有影响。钻井船漂移量越大,横向位 移越大。在同一深度,横向位移的增大值就是钻井 船的漂移量,所以可以通过给钻井船一个适当的反 向位移量来抵消一部分海流力引起的钻柱的横向位 移。海流速度对不同海水深度下钻柱的横向位移和 弯矩影响较大。随着海流速度的增加,不同深度钻 柱的横向位移和弯矩显著增加。



3.3 作业水深及波浪载荷对下放钻柱强度的影响 图 7 为波浪载荷和不同作业水深对钻柱横向位 移和弯矩的影响。从图 7 中可以看出,波浪载荷对 不同深度钻柱的横向位移几乎没有影响,而对钻柱 上部的弯矩影响很大。在海平面处波流联合作用的 横向弯矩比不考虑波浪载荷的横向弯矩增加了约一 倍,而对 80 m 水深以下的横向弯矩几乎没有影响。 这说明波浪力的作用深度有限,所以对采油树深水 下放忽略波浪力不会产生较大的误差。作业水深对 钻柱横向位移和弯矩影响较大。作业水深越大,钻 柱横向位移和弯矩越大。因此下放深度越大,采油 树下放越不稳定。但是在同一深度下,作业深度越 大,横向位移反而有所减小。



on strength of running drill string

3.4 深水采油树的重力对下放钻柱强度的影响

图 8 为深水采油树的重力对钻柱横向位移和弯 矩的影响。从图 8 中可以看出,随着深水采油树重 力的增加,深水钻柱的横向位移和横向弯矩均有所 减小。因此,增加深水采油树的重力能一定程度上 增加下放钻柱的强度安全。



of running drill string

4 结 论

(1)波浪载荷对钻柱上部的弯矩影响很大而对 钻柱横向位移影响很小,对采油树深水下放忽略波 浪力不会产生较大的误差;钻井船的漂移量对钻柱 横向位移有一定的影响而对钻柱偏移角、弯矩和剪 力几乎没有影响。

(2)随着海水深度的增加,钻柱横向位移增大 较明显。

(3)钻柱强度安全受海水阻力系数、海面海流 速度及作业水深等的影响较大。随着海水阻力系 数、海流速度及作业水深的增加,下放钻柱强度的安 全性降低。

参考文献:

- [1] ROBERT Voss, MOORE Tony, ABB Vetco Gray. Subsea tree Installation, lessons learned on a west Africa development[R]. OTC 15371,2003.
- [2] 王懿,段梦兰,李丽娜,等. 深水立管安装技术进展
 [J]. 石油矿场机械, 2009,38(6):4-8.
 WANG Yi, DUAN Meng-lan, LI Li-na, et al. Progress of deep water riser installation [J]. Oil Field Equipment, 2009,38(6):4-8.
- [3] JORDAN M M, SJURAETHER K, COLLINS I R, et al. Life cylce management of scale control within subsea fields and its impact on flow assurance, Gulf of Mexico and the North Sea Basin[R]. SPE 71557,2001.
- [4] 谢彬,张爱霞,段梦兰. 中国南海深水油气田开发工程 模式及平台选型[J]. 石油学报,2007,28(1):115-118.

XIE Bin, ZHANG Ai-xia, DUAN Meng-lan. Engineering mode and platform selection for deepwater oilfield development in South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(1);115-118.

- [5] ONATHAN Bellarby. Tubing stress analysis [J]. Developments in Petroleum Science, 2009,56,473-556.
- [6] BOUQUIER Aurent, JEAN Pierre Signoret Total, ROB-ERT Lopez, et al. First application of the all-electric subsea production system-implementation of a new technology[R]. OTC 18819, 2007.
- [7] EVANGELISTA A, CHAGAS C M, MELO J A F, et al. Removal of a hydrate plug from a subsea christmas-tree located in ultra-deep waters with the aid of a heat-releasing treating fluid [R]. OTC 19730,2009.
- [8] CARRE D, SULLIVAN J O, CONGO Total EP. Subsea production system experience[R]. OTC 20280, 2009.
- [9] WILSON J F. 海洋结构动力学[M]. 杨国金,郭毅,唐 钦满,等,译. 北京:石油工业出版社,1991.
- [10] 何生厚,洪雪福. 浅海固定式平台设计与研究[M]. 北京:石化出版社,2003:47-49.
- [11] 管志川,苏堪华,苏义脑. 深水钻井导管和表层套管 横向承载能力分析[J]. 石油学报,2009,30(2):285-290.

GUAN Zhi-chuan, SU Kan-hua, SU Yi-nao. Analysis on lateral load-bearing capacity of conductor and surface casing for deepwater drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(2):285-290.

- [12] 苏堪华,管志川,苏义脑. 深水钻井水下井口力学稳 定性分析[J]. 石油钻采工艺, 2008,30(6):1-4.
 SU Kan-hua, GUAN Zhi-chuan, SU Yi-nao. Mechanical stability analysis of subsea wellhead for deepwater drilling[J]. Oil Drilling Technology, 2008,30(6):1-4.
- [13] 李维国,黄炳家,同登科. 数值计算方法[M]. 东营: 石油大学出版社,2004
- [14] 李中,杨进,曹式敬. 深海水域钻井隔水管力学特性 分析[J]. 石油钻采工艺,2007,38(6):4-8.
 LI Zhong, YANG Jin, CAO Shi-jing. Mechanical analysis of deep-sea drilling riser[J]. Oil Drilling Technology, 2007,38(6):4-8.

(编辑 沈玉英)