

文章编号: 1000-4750(2011)02-0229-05

钻柱扭转和纵向振动的等效网络分析

*闫向宏^{1,2}, 孙建孟¹, 张美玲², 苏远大¹, 陈雪莲¹

(1. 中国石油大学地球资源与信息学院, 山东, 东营 257061; 2. 中国石油大学物理科学与技术学院, 山东, 东营 257061)

摘 要: 忽略阻尼对钻柱振动的影响, 在一维钻杆扭转振动和纵向振动方程的基础上, 推导出单根钻杆和多根相同钻杆扭转振动和纵向振动的等效网络。利用等效网络级联理论, 结合钻柱系统边界条件, 给出了钻柱扭转振动和纵向振动的等效网络和机械等效阻抗表达式, 阐述了根据机械等效阻抗确定钻柱扭转振动和纵向振动机械共振频率的原理和方法。由等效网络分析法和 ANSYS 有限元法对两例钻柱扭转振动和纵向振动机械谐振频率的计算结果表明: 利用等效网络分析法计算钻柱系统扭转振动和纵向振动的机械谐振频率是一种行之有效的办法, 具有直观、简单易用的特点, 并且其计算结果与 ANSYS 有限元法的数值模拟结果一致。

关键词: 钻井工程; 钻柱; 扭转振动; 纵向振动; 共振; 等效网络; 机械等效阻抗

中图分类号: O326 文献标识码: A

ANALYSIS OF TORSIONAL AND LONGITUDINAL VIBRATION OF DRILL STRINGS USING EQUIVALENT NETWORK

*YAN Xiang-hong^{1,2}, SUN Jian-meng¹, ZHANG Mei-ling², SU Yuan-da¹, CHEN Xue-lian¹

(1. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;

2. College of Physics Science and Technology, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: Ignoring the influence of damping to the vibration of drill strings, the equivalent networks have been given out for a single drill pipe or more of the same drill pipe according to the one-dimensional torsional and longitudinal vibration equation of a drill string. In accordance with the series connection equivalent networks, considering the boundary conditions of the drill string system, the equivalent networks and mechanical equivalent impedance of torsional and longitudinal vibration were derived, and then the principles and methods for determining the mechanical resonance frequency of torsional and longitudinal vibration have been given by using the mechanical equivalent impedance. The resonant frequencies of two drill string systems were calculated by the equivalent network method and ANSYS finite element method. The calculation results indicate that using the equivalent network method to calculate the resonant frequency of torsional and longitudinal vibration of a drill string system is an effective method. It is easy to use and its calculating results are same with those calculated by the ANSYS finite element method.

Key words: drilling engineering; drill string; torsional vibration; longitudinal vibration; resonance; equivalent network; mechanical equivalent impedance

收稿日期: 2009-07-27; 修改日期: 2009-09-27

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2009D-5006-03-03); 山东省自然科学基金项目(ZR2009EL006)

作者简介: *闫向宏(1966—), 男, 陕西蓝田人, 博士生, 从事声波测井研究(E-mail: yanxh@upc.edu.cn);

孙建孟(1964—), 男, 山东博兴人, 教授, 博士, 从事测井研究(E-mail: sunjm@upc.edu.cn);

张美玲(1986—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士生, 从事声波测井研究(E-mail: leiguowuhen2045@163.com);

苏远大(1978—), 男, 吉林长春人, 讲师, 硕士, 从事测井方法研究(E-mail: suyunda@upc.edu.cn);

陈雪莲(1976—), 女, 河北衡水人, 副教授, 博士, 从事测井方法研究(E-mail: chenxl@upc.edu.cn).

在钻井过程中, 由于地层的非均质性、井底不平、钻头牙齿间歇压入岩石和岩石间歇破碎等原因, 钻头要承受较大的附加冲击载荷和频繁的交变应力, 造成钻头带动钻柱产生纵向、扭转以及横向振动。这三种振动方式相互依存和制约, 使钻柱振动的动态行为表现得十分复杂^[1-2]。当钻头振动的频率为钻柱固有频率的整数倍时, 钻柱处于共振状态, 钻柱内的交变应力和振幅相当大, 易导致钻柱断裂或粘扣, 加剧钻柱的疲劳破坏, 严重时还会引发井筒事故。为减少振动在钻井过程中的危害, 研究钻柱系统的纵向振动和扭转振动对优化设计钻柱、设计减振器、选择合适的转速, 提高钻井效率具有重要的指导意义^[3-10]。刘清友等人采用有限差分法对钻柱振动^[6]进行了分析; 李子丰等人在振动微分方程的基础上建立了力激励法和位移激励法的钻柱纵向振动的数学模型以及扭矩激励法和转角激励法的扭转振动的数学模型^[7-8]; 王珍应利用广义传递矩阵法研究了钻柱的受迫振动问题^[9]; 石晓兵、魏水平等人利用有限元法对钻柱的扭转振动和纵向振动进行了研究^[11-13]。本文在一维钻杆扭转振动和纵向振动方程的基础上, 推导出单根钻杆以及多根相同钻杆扭转振动和纵向振动的等效网络, 根据实际钻柱系统的构成和等效网络级联理论, 结合钻柱系统的边界条件及机械等效机械阻抗表达式, 给出一种新的确定扭转振动和纵向振动机械共振频率的方法。该方法与现有的有限差分法、微分方程法、广义传输矩阵法相比, 具有简单明了、易用、计算速度快、结果可靠等优点。

1 钻柱扭转与纵向振动的等效网络

1.1 基本假设

为了能够对钻柱系统的振动进行有效分析研究, 在建立钻柱振动模型时作如下假设^[5,7-8]: 1) 钻柱处于线弹性变形状态; 2) 钻柱横截面为圆形或圆环形; 3) 钻柱轴线与井筒轴线重合; 4) 略去钻柱重力、平均钻压、钻井液浮力、钻柱匀速运动等静力以及各种阻尼的影响; 5) 研究钻柱的扭转振动时忽略钻柱横向和纵向振动, 而在研究钻柱的纵向振动时忽略钻柱的横向和扭转振动。

1.2 钻柱扭转振动的等效网络

在钻柱系统中任选一根长为 l 的钻杆, 其扭转

振动的力学模型简图如图 1 所示。

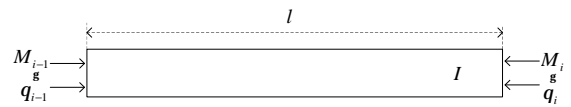


图 1 扭转振动力学模型简图

Fig.1 Schematic diagram for torsional vibration of drill string

设钻杆单位体积质量为 ρ , 剪切模量为 G , 极惯性矩为 I , 极惯性矩由钻杆的截面形状决定, 对于内外半径分别为 r_1 和 r_2 的环形圆截面, $I = \frac{\pi}{2}(r_2^4 - r_1^4)$, 利用一维弹性杆理论可推导出钻杆扭转振动的振动方程为:

$$\frac{\partial^2 q(x,t)}{\partial t^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 q(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: $\theta(x,t)$ 为钻杆扭转振动角位移函数; V_s 为第 i 段钻杆中扭转波传播速度。结合钻杆两端边界条件, 对于简谐激励, 式(1)的解可表示为:

$$\begin{aligned} M_{i-1} &= \frac{rV_s I}{j \sin k_s l} (\dot{q}_{i-1}^{\otimes} + \dot{q}_i^{\otimes}) + jrV_s I \tan \frac{k_s l}{2} \dot{q}_{i-1}^{\otimes}, \\ M_i &= \frac{rV_s I}{j \sin k_s l} (\dot{q}_{i-1}^{\otimes} + \dot{q}_i^{\otimes}) + jrV_s I \tan \frac{k_s l}{2} \dot{q}_i^{\otimes}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $k_s = 2\pi f/V_s$ 为第 i 段钻杆中扭转波波数; f 为简谐激励频率; M_{i-1} 、 \dot{q}_{i-1}^{\otimes} 和 M_i 、 \dot{q}_i^{\otimes} 分别为第 i 段钻杆两端的外力矩与扭转振动角速; $j^2 = -1$ 。

$$\text{令 } Z_1 = jrV_s I \tan \frac{k_s l}{2}, \quad Z_2 = \frac{rV_s I}{j \sin k_s l}, \quad \text{则式(2)}$$

可改写为:

$$\begin{aligned} M_{i-1} &= \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) M_i + Z_1 \left(2 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \dot{q}_i^{\otimes}, \\ \dot{q}_{i-1}^{\otimes} &= \frac{1}{Z_2} M_i + \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \dot{q}_i^{\otimes}. \end{aligned} \quad (3)$$

令传输矩阵 $[M]_s$ 为:

$$[M]_s = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & Z_1 \left(2 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \\ \frac{1}{Z_2} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则式(3)用矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} M_{i-1} \\ \dot{q}_{i-1}^{\otimes} \end{bmatrix} = [M]_s \begin{bmatrix} M_i \\ \dot{q}_i^{\otimes} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(3)、式(5)可得第 i 段钻杆扭转振动时可用如图 2 所示的四端网络表示^[14]。

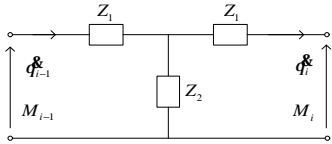


图 2 单根钻杆扭转振动的等效网络

Fig.2 Equivalent network for torsional vibration of single drill string

令传输常数 $g = \text{arch} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)$, 特性阻抗 $Z_0 =$

$\left[Z_1 Z_2 \left(2 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$, 则式(4)传输矩阵 $[M]$ 用传输常

数和特性阻抗可表示为:

$$[M]_s = \begin{bmatrix} \cosh g & Z_0 \sinh g \\ \frac{1}{Z_0} \sinh g & \cosh g \end{bmatrix} \quad (6)$$

如果钻柱系统由 n 个相同的钻杆组成, 则其等效网络视为如图 2 所示的 n 个四端网络级联而成^[15], n 个相同钻杆组成钻柱系统的传输矩阵可表示为:

$$[M]_x^n = \begin{bmatrix} \cosh(ng) & Z_0 \sinh(ng) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(ng) & \cosh(ng) \end{bmatrix} \quad (7)$$

比较式(6)和式(7)可以看出, n 个相同的四端网络级联的特性阻抗和单个的四端网络的特性阻抗 Z_0 相同, 级联网络的传输常数是单个四端网络传输常数 γ 的 n 倍。则 n 个相同的四端网络级联后的等效网络如图 3 所示。

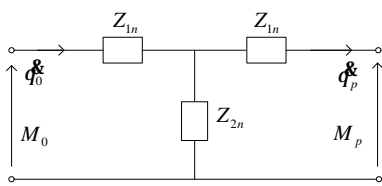


图 3 n 个相同钻杆组成钻柱系统扭转振动等效网络

Fig.3 Equivalent network for torsional vibration of drill strings made up of n -drill pipe

结合式(4)、式(7)可知, 图 3 中各元件的参数由下式给出:

$$\begin{cases} Z_{1n} = jrV_s I \tan \left(n \frac{k_s l}{2} \right) \\ Z_{2n} = \frac{rV_s I}{j \sin(nk_s l)} \end{cases} \quad (8)$$

钻井过程中钻柱扭转振动的同时, 起升系统也随着振动, 考虑到井架是线性弹性体, 将井架受力由压力变为拉力对钻柱的振动特性没有任何影

响^[7-8], 因此实际的钻柱系统可视为由井架、钢丝绳、大钩水龙头、多根多种规格的钻杆和钻铤组成^[7-8], 其扭转振动的等效网络如图 4 所示。在实际钻柱系统等效网络图 4 中, 令:

$$\begin{cases} Z_i = Z_{i1} + Z_{i2}, & i = 1 \\ Z_i = \frac{(Z_{i-1} + Z_{i1}) \cdot Z_{i2} + Z_{i1}}{Z_{i-1} + Z_{i1} + Z_{i2}}, & i = 2, \dots, 7 \end{cases} \quad (9)$$

其中 Z_{i1} 、 Z_{i2} 可由式(8)给出。则加于钻头的机械等效阻抗表示为:

$$Z_m = \frac{(Z_6 + Z_{71}) \cdot Z_{72} + Z_{71}}{Z_6 + Z_{71} + Z_{72}} \quad (10)$$

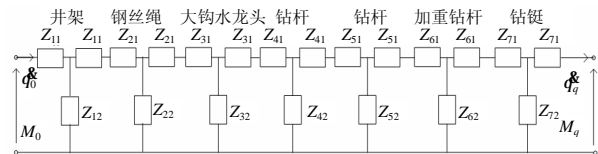


图 4 实际钻柱系统扭转振动等效网络

Fig.4 Equivalent Network for torsional vibration of real drill strings

1.3 钻柱纵向振动的等效网络

设钻杆单位体积质量为 ρ , 弹性模量为 E , 钻杆横截面积为 A , 利用一维弹性杆理论可推导出钻杆纵向振动的振动方程为:

$$\frac{\partial^2 x(x,t)}{\partial t^2} = V_p^2 \frac{\partial^2 x(x,t)}{\partial x^2} \quad (11)$$

式中: $\zeta(x,t)$ 为钻杆纵向振动位移函数; V_p 为第 i 段钻杆中应力波的传播速度。结合钻杆两端边界条件, 对于简谐激励, 式(11)的解可表示为:

$$\begin{aligned} F_{i-1} &= \frac{rV_p A}{j \sin k_p l} (x_{i-1}^{\–} + x_i^{\–}) + jrV_p A \tan \frac{k_p l}{2} x_{i-1}^{\–}, \\ F_i &= \frac{rV_p A}{j \sin k_p l} (x_{i-1}^{\–} + x_i^{\–}) + jrV_p A \tan \frac{k_p l}{2} x_i^{\–} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $k_p = 2\pi f/V_p$ 为第 i 段钻杆中应力波波数; F_{i-1} 、 $x_{i-1}^{\–}$ 和 F_i 、 $x_i^{\–}$ 分别为第 i 段钻杆两端的外力与纵向振动振速。比较式(12)与式(2)可知, 第 i 段钻杆两端的外力矩 M_{i-1} 、 M_i 和扭转振动角速度 $\varphi_{i-1}^{\–}$ 、 $\varphi_i^{\–}$ 分别与外力 F_{i-1} 、 F_i 和纵向振动振速 $x_{i-1}^{\–}$ 、 $x_i^{\–}$ 相对应, 因此钻柱纵向振动的等效网络具有与扭转振动相似的等效网络, 等效网络图中各部件参数中只需将扭转振动中的 V_s 、 k_s 和 I 用纵向振动对应的 V_p 、 k_p 和 A 替换即可。

当钻柱系统终端满足固定边界条件时, 对应于等效网络左端为开路状态; 当钻柱终端满足自由边界条件时, 对应于等效网络左端为短路状态。实际

钻井工程中，往往井架是固定的，满足终端固定边界条件。设加于钻头的机械等效阻抗为 $Z_m=R_m+jX_m$ ，则钻柱系统发生机械共振时，其共振频率对应于动态回路中总电抗 $X_m=0$ 时的频率，即共振频率方程为：

$$\text{Imag}(Z_m) = 0 \tag{13}$$

2 钻柱扭转和纵向振动结果分析

由以上论述可知，钻柱系统扭转振动和纵向振动的机械共振频率不仅取决于边界条件，还取决于钻柱系统参数。本文数值计算中选用钢介质密度为 $\rho=7850\text{kg/m}^3$ ，应力波的传播速度 $V_p=5050\text{m/s}$ ，扭转波速度为 $V_s=3100\text{m/s}$ ，钻柱其它参数见表 1。

表 1 钻柱振动系统构成参数表^[8]

Table 1 Parameters for vibration system of drill strings^[8]

序号	名称	长度/m	外径/m	壁厚/m
1	井架	4×10.0	0.8	0.4
2	钢丝绳	3×10.0	0.3	0.15
3	大钩水龙头	1×10.0	0.8	0.4
4	钻杆	180×10.3855	0.1397	0.01054
5	钻杆	100×10.5175	0.127	0.0095
6	加重钻杆	3×10.0	0.127	0.0251
7	钻铤	5×9.774	0.1650	0.04678

2.1 钻杆 + 钻铤组成钻柱系统共振频率的计算

选择表 1 中序列号为 5 和 7 的钻杆和钻铤各 5 根组成钻柱系统，其等效网络为图 3 所示四端网络的两级串联，当满足终端固定的边界条件时，则加于钻头的机械等效阻抗表示为：

$$Z_m = Z_{71} + \frac{(Z_{51} + Z_{52} + Z_{71}) \cdot Z_{72}}{Z_{51} + Z_{52} + Z_{71} + Z_{72}} \tag{14}$$

由共振频率方程式(13)可知，当发生扭转振动共振时，满足方程：

$$2\sin^2\left(n\frac{k_s l_c}{2}\right) = \frac{I_d \tan m \frac{k_s l_d}{2} - \frac{I_d}{\sin m k_s l_d} + I_c \tan n \frac{k_s l_c}{2}}{I_d \tan m \frac{k_s l_d}{2} - \frac{I_d}{\sin m k_s l_d} + I_c \tan n \frac{k_s l_c}{2} - \frac{I_c}{\sin n k_s l_c}} \tag{15}$$

当发生纵向振动共振时，满足方程：

$$2\sin^2\left(n\frac{k_p l_c}{2}\right) = \frac{A_d \tan m \frac{k_p l_d}{2} - \frac{A_d}{\sin m k_p l_d} + A_c \tan n \frac{k_p l_c}{2}}{A_d \tan m \frac{k_p l_d}{2} - \frac{A_d}{\sin m k_p l_d} + A_c \tan n \frac{k_p l_c}{2} - \frac{A_c}{\sin n k_p l_c}} \tag{16}$$

其中： l_d 、 l_c 为钻杆和钻铤长度； A_d 、 A_c 为钻杆和钻铤横截面积； I_d 、 I_c 为钻杆和钻铤极惯性矩。根据式(15)、式(16)计算出其扭转振动和纵向振动的机械谐振频率见表 2。按照与之相同的钻柱系统参数，在 ANSYS 中利用弹性单元 SOLID45 建立 3D 模型，不考虑浮重，进行谐响应分析后，在时间历程后处理器 POST26 中可得到钻柱系统扭转振动和纵向振动的共振频率，其计算结果如表 2 所示。由表 2 可见根据等效网络分析法给出钻柱系统扭转振动和纵向振动的共振频率方程式(15)、式(16)求出的谐振频率与 ANSYS 计算结果基本吻合。

表 2 钻杆 + 钻铤系统扭转振动与纵向振动谐振频率结果
Table 2 Mechanical resonance frequency of torsional and longitudinal vibration of drill strings made up of drill pipe and drill collar

扭转振动谐振频率 f/Hz		纵向振动谐振频率 f/Hz	
等效网络法	ANSYS 结果	等效网络法	ANSYS 结果
3.90	3.93	6.65	7.00
26.70	26.84	42.95	43.03
34.70	34.93	56.65	56.99
56.90	57.38	92.25	92.03
65.65	66.24	107.00	106.92

2.2 钻井工程中实际钻柱系统共振频率的计算

钻井工程中实际钻柱系统构成参数如表 1 所示，当钻柱系统发生机械共振时，机械等效阻抗的虚部式(13)为零，由此式计算出实际钻柱系统扭转振动和纵向振动在 0Hz—5Hz 范围内的机械谐振频率见表 3。按照与之相同的参数，在 ANSYS 中对实际钻柱系统利用 SOLID45 弹性单元进行 3D 建模，谐响应分析得到钻柱系统扭转振动和纵向振动机械共振频率计算结果如表 3 所示。由表 3 可知利用文中给出的等效网络分析法求出的钻柱系统扭转振动和纵向振动的机械共振频率与 ANSYS 分析结果一致，比文献[8]中计入阻尼后三牙轮钻激励力法计算出的谐振频率略高。

表 3 实际钻柱系统扭转振动与纵向振动谐振频率结果
Table 3 Mechanical resonance frequency of torsional and longitudinal vibration of Real drill strings

扭转振动谐振频率 f/Hz		纵向振动谐振频率 f/Hz	
等效网络法	ANSYS 结果	等效网络法	ANSYS 结果
0.279	0.276	1.13	1.11
0.692	0.685	1.99	1.97
1.22	1.20	2.82	2.84
1.73	1.71	3.53	3.55
2.18	2.20	4.52	4.50

2.3 阻尼对钻柱振动影响的修正

钻柱振动过程中，各种阻尼的存在会导致钻柱

振动减缓,机械谐振频率会降低^[16]。在无阻尼情形的基础上,对其计算结果进行适当修正,即可得到存在阻尼时钻柱系统的机械谐振频率。若以 $\omega_0=2\pi f_0$ 表示无阻尼时钻柱系统振动的固有圆频率, b 表示阻尼因子,考虑到钻柱振动过程中的阻尼相对较小,即满足 $b < \omega_0$, 钻柱系统仍可认为做谐振动^[17],因此考虑阻尼后钻柱系统的机械谐振频率可由下式给出:

$$f = \frac{\sqrt{\omega_0^2 - b^2}}{2\pi} = \frac{\sqrt{4\pi^2 f_0^2 - b^2}}{2\pi} \quad (17)$$

即:在已知阻尼因子 b 时,利用文中等效网络分析法求出的机械谐振频率 f_0 ,代入式(17)可求出计入阻尼后钻柱系统的机械谐振频率。

3 结论

(1) 由等效网络可推导出加于钻头两端的机械等效阻抗,并由共振频率方程可求出扭转振动和纵向振动的机械谐振频率。

(2) 利用等效网络分析法给出的钻柱扭转振动和纵向振动机械共振频率的计算结果与 ANSYS 有限元法数值模拟的结果相吻合。有阻尼时的机械共振频率可由式(17)对无阻尼时的机械谐振频率 f_0 修正后求出。

(3) 等效网络分析法是一种行之有效的钻柱系统扭转振动和纵向振动分析方法,具有直观、简单易用的优点,其计算速度优于微分方程法、有限元法、有限差分等方法。

参考文献:

- [1] Sampaio R, Piovan M T, Venero Lozano G. Coupled axial/torsional vibrations of drill-strings by means of non-linear model [J]. *Mechanics Research Communications*, 2007, 34: 497-502.
- [2] Raymond David W, Elsayed M A. Analysis of coupling between axial and torsional vibration in a compliant model of a drill string equipped with a PDC bit [J]. *American Society of Mechanical Engineers*, 2002, 2: 897-904.
- [3] 李子丰,梁尔国. 钻柱力学研究现状及进展[J]. *石油钻采工艺*, 2008, 30(2): 1-9.
Li Zifeng, Liang Erguo. Research and development of drill string mechanics [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2008, 30(2): 1-9. (in Chinese)
- [4] 吴泽兵,马德坤,况春雨. 钻柱纵向振动仿真分析[J]. *石油学报*, 2000, 21(3): 73-76.
Wu Zebing, Ma Dekun, Kuang Chunyu. Simulation of drill string's longitudinal vibrations [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(3): 73-76. (in Chinese)
- [5] 高岩,刘志国,郭学增. 钻柱轴向振动固有频率的计算和测量[J]. *西安石油学院学报(自然科学版)*, 2000, 15(1): 39-43.
Gao Yan, Liu Zhiguo, Guo Xuezheng. Calculation and measurement of the natural frequency of axial drilling string vibration [J]. *Journal of Xian Petroleum Institute (Edition of Natural Science)*, 2000, 15(1): 39-43. (in Chinese)
- [6] 刘清友,马德坤,钟青. 钻柱扭转振动模型的建立及求解[J]. *石油学报*, 2000, 21(2): 78-82.
Liu Qingyou, Ma Dekun, Zhong Qing. A drilling string torsional vibration model and its solution [J]. *Acta Petrole Sinica*, 2000, 21(2): 78-82. (in Chinese)
- [7] 李子丰,李志刚. 钻柱纵向振动分析[J]. *天然气工业*, 2004, 24(6): 70-73.
Li Zifeng, Li Zhigang. Analysis of longitudinal vibration of drill string [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(6): 70-73. (in Chinese)
- [8] 李子丰,张永贵,侯绪田. 钻柱纵向和扭转转动分析[J]. *工程力学*, 2004, 21(6): 203-210.
Li Zifeng, Zhang Yonggui, Hou Xutian. Analysis of longitudinal and torsion vibration of drillstring [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(6): 203-210. (in Chinese)
- [9] 王珍应,林建,施太和. 钻柱轴向振动仿真与井底状态监测方法探讨[J]. *石油机械*, 2001, 29(6): 43-45.
Wang Zhenying, Lin Jian, Shi Taihe. Computer simulation of drill string axial vibration and online monitoring of bottom hole condition [J]. *China Petroleum Machinery*, 2001, 29(6): 43-45. (in Chinese)
- [10] 艾池,盖伟涛,王黎明. 钻柱在扭转、纵向振动下的疲劳寿命估算[J]. *大庆石油学院学报*, 2006, 30(4): 9-11.
Ai Chi, Gai Weitao, Wang Liming. Prediction of drill string's fatigue life under torsion and axial vibration [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2006, 30(4): 9-11. (in Chinese)
- [11] 石晓兵,陈平,熊继有. 油气深井随钻扩眼钻柱扭转振动分析[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(6): 81-84.
Shi Xiaobing, Chen Ping, Xiong Jiyou. Twisting vibration analysis of drill string reaming while drilling in deep oil/gas well [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2008, 30(6): 81-84. (in Chinese)
- [12] 魏水平,况雨春,夏宇文. 基于 ANSYS 的钻柱纵向振动有限元分析及应用[J]. *河南石油*, 2006, 20(1): 66-68.
Wei Shuiping, Kuang Yuchun, Xia Yuwen. Ansys-based finite element analysis method of longitudinal vibration of drilling string and its application [J]. *Henan Petroleum*, 2006, 20(1): 66-68. (in Chinese)

界之间的外域)计算固定箱形船非线性波浪场和波浪压力。模型的非线性的计算精度直接依赖于 Boussinesq 方程的非线性精度,为此在外域控制方程中加入高阶非线性项 G 项,使方程近似到 $O((h/L)^2)$ 为完全非线性,使该准三维模型更加适用于非线性波浪与结构物作用的时域问题。

为了验证计算模型,进行了测量波浪压力的物理模型实验。计算结果除波面升高与测量结果符合外,非线性波浪压力也与测量结果符合良好,这表明虽然本文模型是准三维的(速度和压力沿水深是二次多项式分布),但对所研究波况仍能考虑波浪和压力主要三维分布特征,并且该数值模型具有计算速度快、能适应港口存在航道等地形变化及大区域的计算。

参考文献:

- [1] 宁德志. 快速多极子边界元方法在完全非线性水波问题中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
Ning Dezhi. Application of the fast multipole boundary element to fully nonlinear water wave problems [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [2] Bai W, Eatock Taylor. Numerical simulation of fully nonlinear regular and focused wave diffraction around a vertical cylinder using domain decomposition [J]. Appl Ocean Res, 2007, 29(1-2): 55—71.
- [3] Qi Peng, Zou Zhili, Wang Yongxue. A 3-D composite model for numerical simulation of nonlinear waves [C]. Seattle, USA: Proceedings of the Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2000: 68—73.
- [4] Wang Daguo, Zou Zhili, Tham L G, Tang Chun'an. A three-dimensional coupled numerical model of nonlinear waves in a harbor [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(12): 2185—2196.
- [5] Li Y S, Zhan J M. Boussinesq-type model with boundary fitted coordinate system [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2001, 127(3): 152—160.
- [6] 王大国, 邹志利, 唐春安. 波浪对箱形船作用的三维耦合计算模型[J]. 船舶力学, 2007, 11(4): 533—544.
Wang Daguo, Zou Zhili, Tang Chun'an. Time stepping solutions of nonlinear wave forces on a three-dimensional box-shaped ship in a harbor [J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(4): 533—544. (in Chinese)
- [7] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zou Zhili. Water wave theories and their applications [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 王大国, 邹志利. 波浪水槽中非线性浅水长波的传播特性与模拟[J]. 海洋工程, 2005, 23(3): 23—30.
Wang Daguo, Zou Zhili. Experimental study and numerical simulation of long non-linear shallow-water waves [J]. Ocean Engineering, 2005, 23(3): 23—30. (in Chinese)
- [9] Zou Z L. Higher order Boussinesq equations [J]. Ocean Engineering, 1999, 26: 767—792.
- [10] Zou Zhili, Wang Tao, Zhang Xiaoli, Darren Spratt. One dimensional numerical model of higher order Boussinesq equations with high dispersion accuracy [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 22(2): 287—300.
- [13] 朱焕刚, 张宝, 张慢来. 基于 ANSYS 软件的钻柱纵向振动分析[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(10): 56—58.
Zhu Huangang, Zhang Bao, Zhang Manlai. Drilling string longitudinal vibration analyses with ANSYS software [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(10): 56—58. (in Chinese)
- [14] 付志强, 王芬, 林书玉. 锥形截面环状聚能器扭转振动的研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 37—41.
Fu Zhiqiang, Wang Fen, Lin Shuyu. Torsional vibration of annular plate concentrator with conical section [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Edition of Natural Science), 2009, 37(3): 37—41. (in Chinese)
- [15] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
Luan Guidong, Zhang Jinduo, Wang Renqian. Piezoelectric transducer and transducer array [M]. Beijing: Peking University Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 李子丰, 李敬元, 赵金海. 钻井流体粘度对钻柱纵向振动的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(2): 134—137.
Li Zifeng, Li Jingyuan, Zhao Jinhai. Influence of drilling fluid viscosity on drill string longitudinal vibration [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(2): 134—137. (in Chinese)
- [17] 贾瑞皋. 大学物理教程[M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2009.
Jia Ruigao. College physics course [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)

(上接第 233 页)