

石油技术

定向井钻柱轴向振动有限元分析

毕雪亮 王 健 同 铁 韩春杰

(大庆石油学院提高油气采收率教育部重点实验室,大庆 163318)

摘要 在定向井钻井施工中钻柱受力是很复杂的。仅钻柱振动就存在轴向振动、横向振动和扭转振动,其中钻柱轴向振动是导致钻柱失效的主要因素之一,因此需要进一步对定向井轴向振动进行研究。利用有限元方法分析了钻柱轴向振动规律。首先根据定向井特点建立全井钻柱模型,然后以钻柱单元为研究对象,建立了全井钻柱轴向振动的力学模型,采用线性代数方法,通过计算机分析获得了钻柱轴向振动的共振频率分布规律。钻柱轴向共振,其共振频率取决于钻柱的材料性能及形态特性,与钻柱的长度关系不大。在达到轴向共振状态时,钻柱与井壁激烈地碰撞,使钻柱短时间内产生严重破坏,同时还会造成井塌事件,给钻井施工带来经济损失。该问题的研究对指导钻井施工,减少跳钻、避免钻柱失效等情况有很大意义。

关键词 钻柱 轴向振动 定向井 共振 有限元分析

中图法分类号 TE243; 文献标志码 A

钻井过程中钻柱时刻存在着振动,钻柱的振动对钻井有很大的影响,钻柱振动可以辅助破岩,但强烈的振动也会导致钻井事故发生。钻柱的振动有纵向(轴向)振动、横向振动和扭转振动,其中轴向振动危害较大。定向井稳斜钻进过程中,井底钻具组合很容易发生轴向振动,并沿着钻柱的轴向进行传播。轴向共振一方面会使钻速下降,导致钻头和井底岩石之间产生脉冲性冲击,造成钻头轴承和镶齿的过早破坏;另一方面轴向振动对井底钻具组合产生破坏性的动载,威胁井下作业安全。因此考察轴向振动规律无论对钻杆柱设计,还是对钻井施工都有一定意义^[1]。应用有限元法对整体钻柱建立力学模型,分析定向井井眼中钻柱的轴向振动规律,并结合实例进行分析。

1 钻柱轴向振动模型的建立

钻柱主要包括钻杆柱和底部钻具组合2部分。井底钻具组合部分主要由钻铤、减震器及钻头等组成。钻柱轴向固有振动的离散力学模型可通过适当抽象和概括,只考虑由一种钻杆和一种钻铤组成的简单杆柱系统,那么其模型如图1,图中根据钻柱形态1、2、3段为钻杆段,4为钻铤段。

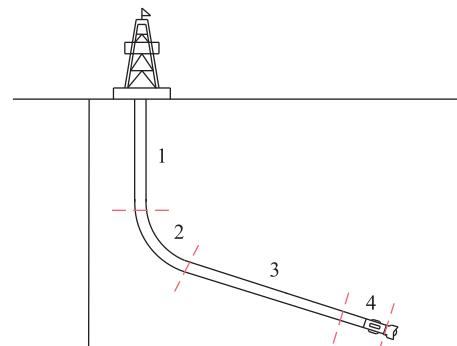


图1 定向井模型

2 基本规律

根据图 1 的简化模型建立相应数学模型, 在建立动力学模型时, 作如下假设。

(1) 钻柱与井眼内壁都是刚性的, 且钻柱的横截面圆环形。

(2) 钻柱是小变形的弹性体。并且钻进过程中, 钻柱轴线只是略微偏离井眼轴线。

将钻柱离散成有限个单元, 先求出各个单元特征参量。划分单元数越多, 结果越精确, 但运算量较大。

2.1 建立单元刚度矩阵和单元质量矩阵

在上述假设的基础上, 建立有限元模型。在局部坐标系下, 对于任意一个标号为 i 的钻柱单元(见图 2)建立有限元模型。单元 i 有前后两个节点, 根据端载荷与其端位移之间线性变换的关系, 建立两个方程

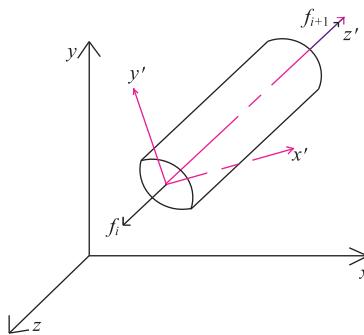


图 2 钻柱单元的有限元模型

$$f_i = \frac{EA}{l} (u_i - u_{i+1}) \quad (1)$$

$$f_{i+1} = \frac{EA}{l} (u_{i+1} - u_i) \quad (2)$$

静力平衡条件要求 f_i 与 f_{i+1} 之和为零, 可用矩阵形式合并式(1)和式(2), 就可以获得钻柱单元的刚度矩阵 K'_i :

$$K'_i = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中 E 为弹性模量; A 为钻柱横截面积; l 为单元钻柱长度^[2]。

杆单元的动能 T_i 可以表示为

$$T_i = \int_0^l \rho_l \left[\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right]^2 dx = \frac{1}{2} \dot{u}_i^T m_i \dot{u} \quad (4)$$

式(4)中 M_i 为单元的质量矩阵; ρ_l 为杆单元的单位质量。

得到单元质量公式

$$M_i = \int_0^l \rho_l N N^T dx \quad (5)$$

式(5)中: N 为形函数矩阵

$$N = \left(1 - \frac{x}{l}, \frac{x}{l} \right)^T \quad (6)$$

转换可得到单元坐标系的单元质量矩阵 M'_i ^[3]:

$$M'_i = \frac{\rho_l A l}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 整体坐标系下的刚度矩阵和质量矩阵

将钻柱单元的刚度矩阵和质量矩阵在局部坐标系下转换的形式转化为整体坐标系下的形式, 才能建立钻柱整体的动力学方程。

由局部坐标系转换为整体坐标系的坐标转换矩阵为易与能动 C 。

设整体坐标系下的刚度矩阵和质量矩阵分别为 K_i 、 M_i , 则由无阻尼振动形式 $M'_i \ddot{\delta}' + K'_i \delta' = \{F_0\}$, 得到:

$$C^T M'_i C \ddot{\delta}' + C^T K'_i C \delta' = C^T \{F_0\} \quad (8)$$

其中: $\{F_0\}$ 为激振力向量^[4,5]

将转换矩阵以及公式(3)、(7)分别带入公式(8), 就可得到整体坐标系下的钻柱单元刚度矩阵和钻柱单元质量矩阵:

$$K_i = C^T K'_i C = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} (\cos\alpha + \sin\alpha)^2 & \sin^2\alpha - \cos^2\alpha \\ \sin^2\alpha - \cos^2\alpha & (\cos\alpha - \sin\alpha)^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_i = C^T M'_i C = \frac{\rho A l}{6} \begin{bmatrix} 2 - \sin\alpha \cos\alpha & \cos^2\alpha - \sin^2\alpha \\ \cos^2\alpha - \sin^2\alpha & 2 + \sin\alpha \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: α 即为井斜角。

2.3 单元刚度矩阵与单元质量矩阵迭加求解

钻井方式多种多样, 对于不同井型、不同井深

有着不同的整体质量矩阵和刚度矩阵。利用有限元思想,进行单元组合,将单元刚度矩阵和单元质量矩阵组合起来得到总体刚度矩阵 K 和总体质量矩阵 M :

将矩阵式(9)和式(10)进行分块,转换成分块矩阵如下:

$$K_i = \begin{bmatrix} k_{11}^i & k_{12}^i \\ k_{21}^i & k_{22}^i \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} m_{11}^i & m_{12}^i \\ m_{21}^i & m_{22}^i \end{bmatrix} \quad (12)$$

公式(11)、(12)即为第 i 个钻柱单元的刚度分块矩阵和质量分块矩阵。

利用有限元方法进行矩阵迭加,得到全井钻柱的整体刚度矩阵 K 和整体质量矩阵 M :

$$K = \begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & & & & \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 + k_{11}^2 & k_{12}^2 & & & \\ & k_{21}^2 & k_{22}^2 + k_{11}^3 & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & k_{22}^{n-1} + k_{11}^n & k_{12}^n & \\ & & & k_{21}^n & k_{22}^n & \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & & & & \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 + m_{11}^2 & m_{12}^2 & & & \\ & m_{21}^2 & m_{22}^2 + m_{11}^3 & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & m_{22}^{n-1} + m_{11}^n & m_{12}^n & \\ & & & m_{21}^n & m_{22}^n & \end{bmatrix} \quad (14)$$

将 M 和 K 代入钻柱系统的频谱方程 $\omega^2 = KM^{-1}$ 中进行矩阵运算,便可获得无阻尼情况下钻柱系统的轴向振动固有频率矩阵,

$$\omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & & & \\ & \omega_2^2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \omega_{n-1}^2 & & \\ & & & & \omega_n^2 & \end{bmatrix} \quad (15)$$

主对角线上的数据即为各个阶数对应的钻柱

固有频率振动数据,进而得到各阶振动固有频率。钻井过程中要避免钻头处受到外界干扰而产生的振动频率接近钻柱系统的纵向固有频率 ω 。

对固有频率矩阵 ω^2 求取特征值与特征向量,可得到钻柱在发生共振时,全井钻柱的振动强弱分布情况。

3 实例分析

以松辽盆地大庆长垣杏树岗某井为例。

该井的设计参数如下:井身剖面类型为直—增—稳—增—稳(水平井段)造斜点为 802.18 m,设计方位 61.61°(真方位),磁偏角偏西 -10.27°,最大井斜角 90°,第一造斜率 7.5°/30 m,第二造斜率 9.1°/30 m,水平目标 A 点入口垂深 1 035.32 m,位移 230.00 m,B 点垂深 1 035.32 m,位移 380.00 m,AB 水平井段长 150 m,完钻井深 1 465 m。

三开探油层段和水平井段(608.00—1 465) m,这段井眼轨道控制的主要特点是:井斜大,地层松软,易发生井漏和油气侵,轨道控制困难,振动对该井段的影响大。

在探油顶段—水平段使用钻具组合:
 $\phi 215.9$ mm 钻头 $\times 0.45$ m + 165 mm 导向马达 $(1.5^\circ) \times 6.43$ m + 165 mm LWD $\times 13.34$ m + 4 $\frac{1}{2}$ IF-PIN $\times 4 \frac{1}{2}$ " IF-BOX 接头 $\times 0.44$ m + $\phi 127$ mm 无磁 $\times 9.3$ m + $\phi 127$ mm 斜坡钻杆 $\times 770.0$ m + $\phi 127$ mm 加重钻杆 $\times 223.20$ m + $\phi 127$ mm 钻杆。

钻井参数:钻压:(80~100) kN;排量:33 L/s;泵压:(18~19) MPa。

利用 delphi 软件进行编程得到钻柱的纵向振动频率:

表 1 杏 6-2-平 36 井钻柱的轴向振动频率

阶数	1	2	3	4	5
频率/Hz	0.03	9.67	20.6	25.22	61.76

从表1中可以看出在不同阶数时钻柱的轴向振动的频率,将共振频率转化为转速,并根据表中数据绘制合理转速区间图(见图3)。

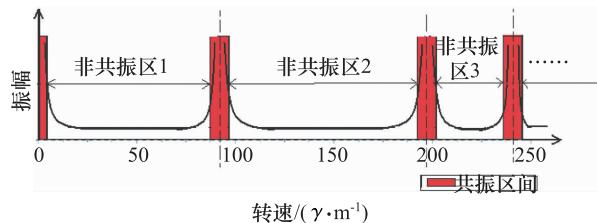


图3 钻柱共振区示意图

图中红色区域为共振区间,即危险转速范围,白色区间为的非共振区间,即安全转速范围。因此从安全方面应控制转速在合理的范围内,就能有效避免跳钻、钻具失效等钻井事故发生,从而保证钻井施工正常进行。

4 结论

(1) 井斜角对振动规律存在影响,因此在钻井

设计前需要对全井进行振动情况分析。在井斜角变化较大的地方,振动产生的钻柱碰撞和摩擦比较剧烈,钻柱的磨损比较严重。

(2) 钻柱在产生轴向共振状态时,其共振频率取决于钻柱的材料性能及形态特性,而与钻柱的长度关系不大。

(3) 在实际钻井施工时,会存多个共振区间。并且每个共振区间不连续,因此在施工过程时,尽量避免转速落在共振区间中。

参 考 文 献

- 1 韩致信,周和平,刘密霞,等. 钻柱的纵向固有振动频率. 石油矿场机械,2002;31(2):23—26
- 2 Moaveni S. 有限元分析——ansys 理论与应用. 王崧,董春敏,金云平,等译. 北京:电子工业出版社,2005:1—40
- 3 同铁,韩春杰,毕雪亮. 斜井眼内钻柱轴向振动的有限元分析. 石油钻探技术,2006;34(4):5—8
- 4 欧珠光. 工程振动. 武汉:武汉大学出版社,2003:103—129
- 5 任兴民,秦卫阳,文立华,等. 工程振动基础. 北京:机械工业出版社,2006:38—56

Finite Element Analysis of Longitudinal Vibration of Direction Well Drill String

BI Xue-liang, WANG Jian, YAN Tie, HAN Chun-jie

(Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery of the Ministry of Education, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, P. R. China)

[Abstract] The force on the drill string is very complex in the process of drilling direction wells. A merely drill string vibration includes longitudinal vibration, transverse vibration and torsional vibration, of which longitudinal vibration is one of the major factors leading to drill string failure. Therefore, the longitudinal vibration of direction wells is needed to further study. The regularity of longitudinal vibration was analyzed by using finite element method. Firstly, according to the characteristics of direction wells, a whole-well drill string model was established, then with the drill string module as an object of study, a whole-well drill string mechanical model of longitudinal vibration was established. Through analysis of the computer by means of linear algebra, the regular distribution of longitudinal vibration resonant frequency of direction wells was obtained. The resonant frequency of drill string longitudinal vibration depends upon material properties of drill string and morphological characteristics, but has little to do with the length of the drill string. In the longitudinal resonance state, drill string comes into intense collision with the wall, which will cause serious damage on drill string in a short time. At the same time even give rise to bore-hole collapse, result in economic loss to the drilling operation. It is very significant that the study of this issue can be used to direct drilling operation and reduce accidents such as bit bounce, drill string failure and so on.

[Key words] drill string longitudinal vibration direction well resonance finite element analysis