



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402995

引用格式:郭良林,夏成宇,吉俊杰,等.非连续性指向式旋转导向底部钻具组合力学影响因素分析[J].科学技术与工程,2025,25(12):4967-4974.

Guo Lianglin, Xia Chengyu, Ji Junjie, et al. Discontinuous point-the-bit rotary steerable bottom hole assembly mechanics analysis of influencing factors[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 4967-4974.

## 非连续性指向式旋转导向底部钻具 组合力学影响因素分析

郭良林<sup>1</sup>, 夏成宇<sup>2</sup>, 吉俊杰<sup>1</sup>, 郭铨楹<sup>2</sup>, 车恒达<sup>1</sup>, 黄志强<sup>1\*</sup>

(1. 长江大学石油工程学院, 武汉 430100; 2. 长江大学机械工程学院, 荆州 434023)

**摘要** 深层油气开发钻遇复杂结构井型增多,使用传统滑动钻具时靶向钻进困难。为助力解决复杂结构井型井眼轨迹控制难题,提出一种非连续性指向式旋转导向结构,在此基础上,结合有限元法单元划分思想和纵横弯曲法,建立一种非连续性指向式旋转导向底部钻具组合(rotary steerable bottom hole assembly,RSBHA)力学模型,通过编译力学程序,求解出底部钻具组合钻头侧向力和倾角,并分析井身几何参数、钻井参数和钻具组合结构参数对力学性能的影响规律。得出钻压与井斜对钻头侧向力影响较小,钻具组合结构参数影响较大。研究成果为旋转导向底部钻具组合结构优化及钻井参数优化提供理论前提,为井眼轨迹精确控制提供力学支撑。

**关键词** 旋转导向;底部钻具组合(BHA);侧向力;井眼轨迹

**中图分类号** TE243; **文献标志码** A

## Discontinuous Point-the-bit Rotary Steerable Bottom Hole Assembly Mechanics Analysis of Influencing Factors

GUO Liang-lin<sup>1</sup>, XIA Cheng-yu<sup>2</sup>, JI Jun-jie<sup>1</sup>, GUO Quan-ying<sup>2</sup>, CHE Heng-da<sup>1</sup>, HUANG Zhi-qiang<sup>1\*</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

**[Abstract]** In deep oil and gas development, it is difficult to drill targeted with traditional sliding drilling tools because of the increasing number of wells with complex structure. To help solve the problem of wellbore trajectory control in complex structural wells, a discontinuous directional rotary steerable structure was proposed. Moreover, a mechanical model of discontinuous directional rotary steerable bottom hole assembly(RSBHA) was established by combining the element division idea of finite element method and the continuous beam-column theory. The bit side force and dip angle of were calculated by compiling mechanics program. The effects of borehole geometry parameters, drilling parameters and drill assembly structure parameters on mechanical properties were analyzed. It is concluded that weight on bit and inclination of hole have little influence on bit side force, but the structural parameters of drill assembly have great influence. The research results provide theoretical premise for the optimization of RSBHA structure and drilling parameters, and provide mechanical support for accurate control of wellbore trajectory.

**[Keywords]** rotary steerable; bottom hole assembly(BHA); bit side force; borehole trajectory

指向式旋转导向技术代表当前智能导向技术的发展方向,具备井眼轨迹控制精度高、钻具摩阻小、井眼平滑度高、侧向载荷小等特征<sup>[1-2]</sup>,在薄油层水平井、大位移井、多分枝井、聪明井等复杂结构井的井眼轨迹控制方面起着不可或缺的作用<sup>[3-4]</sup>。但其核心技术长期被国外油服公司所垄断,中国以静态推靠式为主,在执行机构可靠性、高造斜钻进、

高精度靶向控制、自动化信号传递、井下降温隔热等方面存在较大差距,难以满足钻采现场井眼轨迹控制需求<sup>[5-6]</sup>。

底部钻具组合(bottom hole assembly,BHA)力学性能研究是有效实施井眼轨迹控制的前提,是突破旋导技术封锁的关键<sup>[7]</sup>。近年来,中外专家学者对BHA静力学进行大量研究。李飞等<sup>[8]</sup>基于空间

收稿日期:2024-04-23; 修订日期:2025-01-22

基金项目:湖北省重点研发计划(2021BAA053);国家自然科学基金(U1762214)

第一作者:郭良林(1997—),男,汉族,四川达州人,博士研究生。研究方向:井下工具设计及有限元仿真分析。E-mail:2905194193@qq.com。

\*通信作者:黄志强(1964—),男,汉族,河南民权人,博士,教授,博士研究生导师。研究方向:钻完井工艺、钻完井工具。E-mail:huangzq1356@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

延时微分方程,建立复合式旋转导向工具造斜预测模型。狄勤丰等<sup>[9]</sup>建立旋转导向底部钻具组合(rotary steerable bottom hole assembly, RSBHA)静力学微分方程,基于权余法与双重优化法求解上切点位置。Bradley<sup>[10]</sup>结合有限差分法求解 BHA 静力学微分方程。Walker 等<sup>[11]</sup>提出利用最小势能原理来描述钻具组合在三维井眼中的受力行为,并优化底部钻具组合结构。Zaharov 等<sup>[12]</sup>建立 BHA 有限元分析模型,给出了受轴向载荷作用下 BHA 静载问题数值解。Guan 等<sup>[13]</sup>采用有限单元法对推靠式 RSBHA 进行建模,并建立其运动模型。史玉才等<sup>[14]</sup>应用纵横弯曲梁理论重建推靠式钻具组合力学模型,推导 RSBHA 三弯矩方程及侧向力表达式。纪慧等<sup>[15]</sup>基于纵横弯曲法对单弯螺杆钻具防斜纠斜钻具组合进行推荐。李军等<sup>[16]</sup>分析了 RSBHA 结构参数对指向式工具侧向力的影响。王鹏等<sup>[17]</sup>提出一种 RSBHA 力学计算新方法。贾建波等<sup>[18]</sup>模拟分析了 475 型静态推靠式 RSBHA 的弯曲应力分布规律。

综上所述,当前中外学者主要应用微分方程法、有限差分法、能量法、有限元法和纵横弯曲梁法<sup>[19]</sup>,并提出了较为成熟的钻具组合的一维、二维及三维力学求解方法、上切点位置预测方法,力学性能影响因素分析方法等,但现有研究大多基于连续芯轴结构,对非连续芯轴结构(具备单位钻头偏转角所需偏置力小、芯轴弯曲程度小、芯轴承受交变循环应力程度低等优点)的力学研究较少。为助力解决复杂结构井井眼轨迹控制难题,提出一种非连续芯轴指向式旋转导向结构,在此基础上,建立一种非连续型指向式 RSBHA 力学分析模型,结合实钻参数,利用 MATLAB 编译力学计算程序,求解出钻具组合力学参数,并分析了井眼几何参数、钻井工艺参数、钻具组合结构参数对 RSBHA 力学性能的影响规律。研究成果可为非连续型指向式 RSBHA 力学计算提供方法和思路。

## 1 非连续型旋转导向结构

非连续型指向式旋转导向结构如图 1 所示,它主要由旋转芯轴、内外环电机、内外偏心环、动力传递结构、密封装置等组成。导向作业时,两个无框直流电机分别带动内、外偏心环发生相对旋转,由滚针轴承减小滚动摩擦,通过内、外偏心环的配合旋转,驱动旋转芯轴在球座外壳内以球座为支撑点进行偏摆,改变内外偏心环的相对转动角度、速度与方向,使芯轴可以进行周向 360°范围内导向偏置,实现井斜与方位变化;上部钻杆的扭矩通过上接头传递至传动机构,再由旋转芯轴传递至钻头,钻压经由上接头、通过球座外壳传递至旋转芯轴,再由旋转芯轴传递至钻头,由此该动力传递机构联合导向偏置机构,可实现工具在周向 360°任意方向导向偏置的同时实现钻压与扭矩传递;钻采过程中,钻井液经上部钻杆流经上接头与旋转芯轴并最终流入钻头进行携岩返排。

## 2 RSBHA 力学模型

如图 2 所示,非连续指向式旋转导向底部钻具组合主要由钻头、近钻头稳定器、指向式旋转导向工具、无磁钻铤、上稳定器、钻杆等组成。

如图 3 所示,建立非连续芯轴式旋转导向底部钻具组合力学模型,考虑两个稳定器间钻柱截面大小突变,根据变刚度纵横弯曲梁法,取近钻头稳定器与上稳定器间的一跨钻柱为研究对象,视该跨钻柱受纵横弯曲载荷, $M_1$ 与 $M_2$ 为两个稳定器处所受弯矩, $I_1$ 与 $I_2$ 为不同截面直径钻柱所受惯性矩, $q_1$ 与

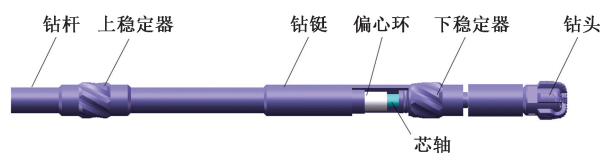
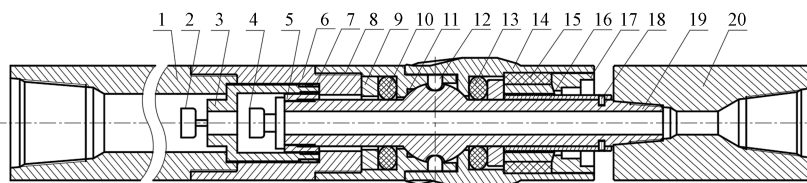


图 2 非连续指向式 RSBHA

Fig. 2 Discontinuous directional RSBH



1 为上接头;2 为外环电机;3 为外偏心环;4 为内环电机;5 为内偏心环;6 为偏置筒;7 为滚针轴承;8 为球座外壳;9 为上密封推板;10 为上密封 O 圈;11 为球面密封圈;12 为球头柱键;13 为下密封 O 圈;14 为锁紧套;15 为弹性纱网;16 为螺旋密封;17 为紧定套筒;18 为限位销钉;19 为旋转芯轴;20 为下接头

图 1 非连续芯轴指向式旋转导向结构

Fig. 1 Discontinuous mandrel pointing rotary steerable structure

$q_2$ 为不同截面直径钻柱所受均布载荷,  $P$ 为轴向载荷。于井眼坐标系中, 在该跨钻柱中间取一微元段  $dx$  进行力学分析, 并在右侧画出微元段  $dx$  受力示意图。

根据  $y$  轴上的力平衡方程得

$$D + dD - D + qdx = 0 \quad (1)$$

再建立微元段  $dx$  右侧中心点的力矩平衡关系式为

$$M - M - dM + Ddx + Pdy - \frac{1}{2}qdx dx = 0 \quad (2)$$

舍去高阶小量  $\frac{1}{2}qdx dx$  得

$$M = -EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3)$$

式(3)中:  $E$  为钻柱弹性模量;  $I$  为惯性矩。

联立式(1) ~ 式(3), 得出非齐次微分方程为

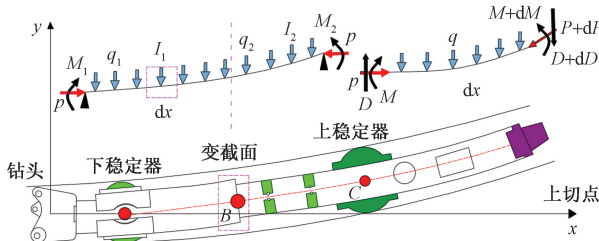
$$\frac{d^4y}{dx^4} + \frac{P}{EI} \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{q}{EI} \quad (4)$$

求解该非齐次微分方程的通解得

$$y = C_1 + C_2x + C_3 \cos(kx) + C_4 \sin(kx) + \frac{1}{2} \frac{q}{P} x^2 \quad (5)$$

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad (6)$$

式(6)为该段钻柱各点位移表达式。其中  $C_1$ 、



$y$  为钻柱位移坐标;  $x$  为钻柱长度坐标;  $M_1$  为下稳定器弯矩;  $M_2$  为上稳定器弯矩;  $q_1$  为粗截面钻柱均布载荷;  $q_2$  为细截面钻柱均布载荷;  $I_1$  为粗截面钻柱惯性矩;  $I_2$  为细截面钻柱惯性矩;  $dx$  为截取的微元段长度;  $P$  为轴向载荷;  $q$  为均布载荷;  $D$  为剪力;  $M$  为弯矩

图3 RSBHA 力学模型

Fig. 3 Mechanical model of RSBHA

$C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  为未知的常数。

对式(5)中  $y$  求一阶导, 得出钻柱各点转角表达式为

$$y' = C_2 - C_3 k \sin(kx) + C_4 k \cos(kx) + \frac{q}{P} x \quad (7)$$

对式(5)中  $y$  求二阶导, 得出钻柱各点弯矩表达式为

$$y'' = EI \left[ -C_3 k^2 \cos(kx) - C_4 k^2 \sin(kx) + \frac{q}{P} \right] \quad (8)$$

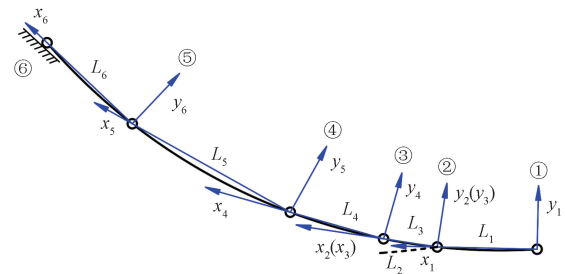
对式(5)中  $y$  求三阶导, 得出钻柱各截面剪切力表达式为

$$y''' = EI [ C_3 k^3 \sin(kx) + C_4 k^3 \cos(kx) ] \quad (9)$$

### 3 边界与求解

为确立动态指向式旋转导向底部钻具组合的力学边界, 如图4所示, 首先基于有限单元划分思想, 在钻头处、下稳定器处、偏置机构处、钻铤变截面处、上稳定器处、上切点处建立节点, 每两个节点间的部分视为1个单元, 拆分为由6个节点连接的6个单元。

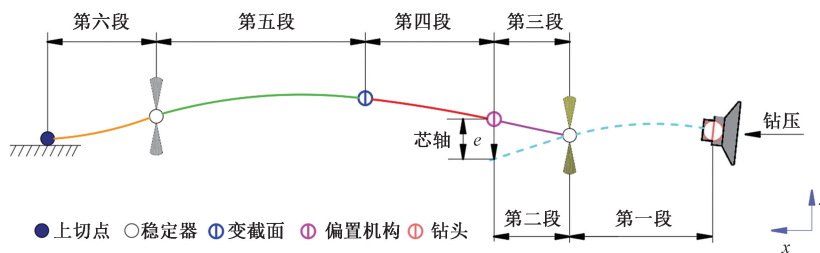
RSBHA 在井眼轨道中由于自身重力、狗腿度、井眼空间限制等影响, 在井眼轨道中近似呈圆弧形, 建立二维分析力学坐标系。如图5所示, 各段钻具以其上两个节点的连线为  $x$  轴, 过  $x$  轴作垂线确定  $y$  轴, 建立各节点处的广义坐标系, 以挠度、转角、



$L_1 \sim L_6$  为第 1 ~ 6 段钻柱长度;  $x_1 \sim x_6$  为第 1 ~ 6 段钻柱长度坐标;  $y_1 \sim y_6$  为第 1 ~ 6 段钻柱位移坐标; ① ~ ⑥ 分别表示钻头处节点、下稳定器处节点、偏置机构处节点、变截面处节点、上稳定器处节点、上切点

图5 二维分析力学坐标系

Fig. 5 Two dimensional analytical mechanics coordinate system



$e$  为芯轴偏心距

图4 力学边界表示

Fig. 4 Mechanical boundary representation

弯矩、剪力等作为广义坐标,以井眼轴线为单元参考构型建立位移描述,结合纵横弯曲法建立每个单元的受力变形方程<sup>[20]</sup>。由于芯轴与外壳在偏置机构处存在重合段,因此视第二段钻具与第三段钻具的基准坐标系重合,通过控制两段钻具在  $y$  轴的差值来调控偏置位移。

(1) 钻头处与地层相互作用而限制了其移动自由度,可视作铰接,其边界处理为:当  $x_1 = 0$  时,有

$$\begin{cases} y_1 = 0 \\ E_1 I_1 y_1'' = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} y_1 = \frac{d_{xw} - D}{2} \\ y_2 = \frac{d_{xw} - D}{2} \\ y_3 = \frac{d_{xw} - D}{2} \\ y_1' = y_2' \\ E_1 I_1 y_1'' = E_2 I_2 y_2'' \\ E_3 I_3 y_3'' = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $d_{xw}$  为下稳定器直径;  $D$  为井眼直径;  $L_1 \sim L_6$  分别为第 1 ~ 6 段钻柱长度;  $x_1 \sim x_6$  分别为第 1 ~ 6 段钻柱长度坐标;  $y_1 \sim y_6$  分别为第 1 ~ 6 段钻柱位移坐标;  $E_1 \sim E_6$  分别为第 1 ~ 6 段钻柱弹性模量;  $I_1 \sim I_6$  分别为第 1 ~ 6 段钻柱惯性矩。

(2) 下稳定器由于直径小于井眼直径而靠贴于某侧井壁,同时该处非连续,因此下稳定器处非连续性边界条件表示为:  $x_1 = L_1, x_2 = 0, x_3 = 0$ 。

(3) 偏心环处芯轴与外壳存在重合段且非连续,通过控制两端钻柱在  $y$  轴的差值来给定偏心距,偏心环处非连续性接触条件处理为:当  $x_2 = L_3, x_3 = L_3, x_4 = 0$  时,有

$$\begin{cases} y_3 = y_4 \\ y_3 = y_2 - e \\ E_2 I_2 y_2'' = 0 \\ E_3 I_3 y_3'' = E_4 I_4 y_4'' \\ E_2 I_2 y_2''' + E_3 I_3 y_3''' = E_4 I_4 y_4''' \\ y_3' - y_4' = \frac{K(L_3 + L_4)}{2} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中:  $e$  为芯轴偏心距;  $K$  为井眼曲率。

(4) 钻铤处固接,存在变截面,变截面处连续性接触条件处理为:当  $x_4 = L_4, x_5 = 0$  时,有

$$\begin{cases} y_4 = y_5 \\ y_4' - y_5' = \frac{K(L_4 + L_5)}{2} \\ E_4 I_4 y_4'' = E_5 I_5 y_5'' \\ E_4 I_4 y_4''' = E_5 I_5 y_5''' \end{cases} \quad (13)$$

(5) 上稳定器由于直径小于井眼直径而靠贴于某侧井壁,上稳定器处连续性边界条件为:  $x_5 = L_5, x_6 = 0$  时,有

$$\begin{cases} y_5 = \frac{d_{sw} - D}{2} \\ y_6 = \frac{d_{sw} - D}{2} \\ y_6' - y_5' = \frac{K(L_6 + L_5)}{2} \\ E_6 I_6 y_6'' = E_5 I_5 y_5'' \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中:  $d_{sw}$  为上稳定器直径。

(6) 底部钻具组合与井眼的最后接触点称为上切点,上切点以上部分钻柱平躺于井眼底部。上切点处边界条件为:当  $x_6 = L_6$  时,有

$$\begin{cases} y_6' = \frac{KL_6}{2} \\ y_6 = \frac{d_{sw} - D}{2} \end{cases} \quad (15)$$

若钻柱某节点处位移为  $E$ ,则根据式(5)得

$$E = C_1 + C_2 x_E + C_3 \cos(kx_E) + C_4 \sin(kx_E) + \frac{1}{2} \frac{q}{p} x_E^2 \quad (16)$$

式(16)中:  $x_E$  为钻柱在该节点处的长度。

提取未知系数矩阵  $C_E = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]$ , 系数相关矩阵  $M_E = [1 \ x_E \ \cos(kx_E) \ \sin(kx_E)]$ , 令常量  $N_E = E - \frac{1}{2} \frac{q}{p} x_E^2$ , 则可得

$$C_E M_E = N_E \quad (17)$$

则根据上述矩阵变换思想,将整个钻具组合的约束方程组合在一起,将各节点处系数相关矩阵  $M_1 \sim M_6$  组合为大矩阵  $A$ , 将各节点处常量矩阵  $N_1 \sim N_6$  组合为大矩阵  $B$ , 将未知系数矩阵组合为矩阵  $X$ , 则 RSBHA 的整体力学矩阵方程可表示为

$$AX = B \quad (18)$$

式(18)中:

$$A = \begin{bmatrix} M_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & M_6 \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_6 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_6 \end{bmatrix}; C_i = \begin{bmatrix} C_{i1} \\ C_{i2} \\ C_{i3} \\ C_{i4} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(19)中:  $C_i$  为第  $i$  点边界的未知系数矩阵;  $M_i$  为第  $i$  点边界系数相关矩阵;  $N_i$  为第  $i$  点边界的常量矩阵,  $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

结合川西地区两口水平井实钻参数,设定底部钻具组合各段结构及材料参数如表 1 所示,偏心环组的偏心距为 6 mm,按图 6 所示求解流程,利用 MATLAB 编译力学程序进行求解,求得钻头侧向力为 27.63 kN,钻头转角为 0.194 3°。

表 1 指向式旋转导向 BHA 相关参数

Table 1 Parameters of point-the-bit rotary steerable System

节点	外径/ m	内径/ m	长度/ m	稳定器 直径/m	弹性模 量/GPa	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
钻头段	0.080	0.040	0.85	—	201	7 850
下稳定器段	0.080	0.040	0.20	0.207	201	7 850
偏心环段	0.197	0.149	0.20	—	201	7 850
变截面段	0.197	0.149	0.47	—	201	7 850
上稳定器段	0.168	0.152	2.8	0.207	201	7 850
上切点段	0.168	0.152	—	—	201	7 850

### 4 影响因素分析

#### 4.1 井眼几何参数的影响

井斜角是指井眼轨迹曲线上任意一点井眼的方向线与铅垂线的夹角,是重要的井身几何参数,井斜角的变化将引起非连续指向式 RSBHA 各段钻柱的轴向力与均布载荷发生变化,从而使受力情况随之变化。如图 7 所示,为分析井斜对 RSBHA 力学性能的影响规律,控制其他参数不变,分别在井斜角为 10°~90°时,求解钻头侧向力。可以看出,随着井斜的增大,钻头侧向力有所降低,但总体影响较小。

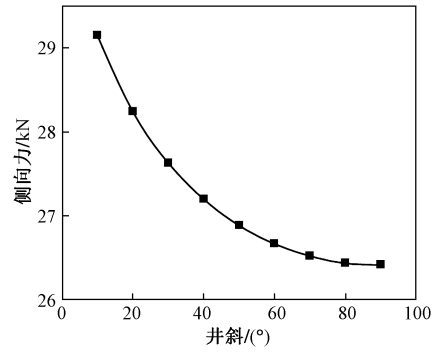


图 7 井斜角对侧向力的影响

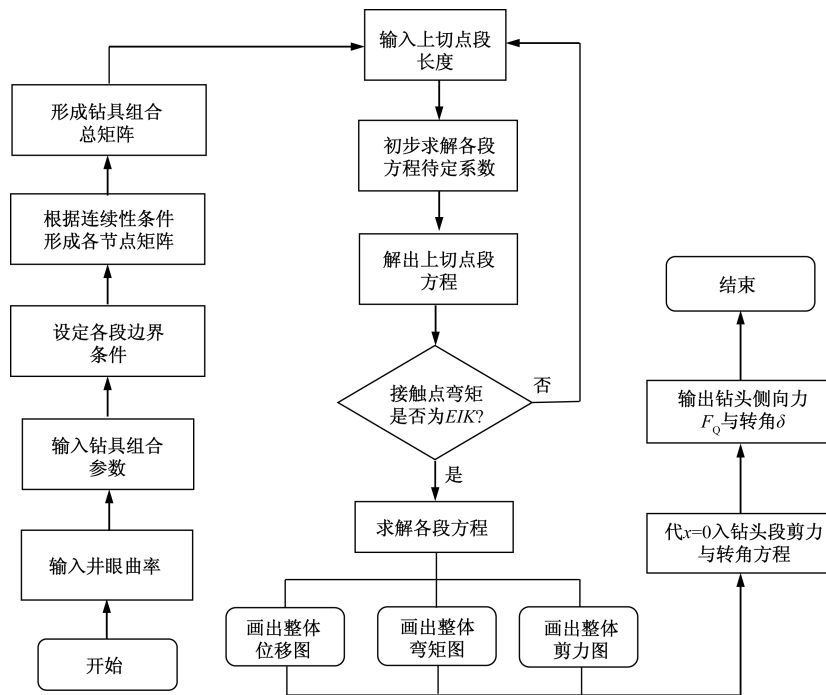
Fig. 7 Influence of well inclination angle on lateral force

#### 4.2 钻井工艺参数的影响

钻压是钻进过程中钻头底部与地层岩石相互作用的轴向压力,是重要的钻井工艺参数,钻压变化将引起旋转导向底部钻头与地层间的压实、吃入程度发生改变,钻柱单位转角所引起的相互作用力发生改变。如图 8 所示,为分析钻压对 RSBHA 力学性能的影响规律,控制其他参数不变,分别在钻压为 10~200 kN 时,求解钻头侧向力。可以看出,随着钻压的增大,钻头侧向力有所增加,但增量不大。

#### 4.3 底部钻具组合结构参数的影响

探明非连续指向式 RSBHA 结构参数对 RSBHA 力学性能的影响规律,对 RSBHA 结构优化设计及井眼轨迹控制有指导意义<sup>[21]</sup>。



$EIK$  为接触点弯矩,其中  $E$  为钻柱弹性模量; $I$  为钻柱惯性矩; $K$  为井眼曲率

图 6 力学参数求解流程

Fig. 6 Mechanical parameter solving process

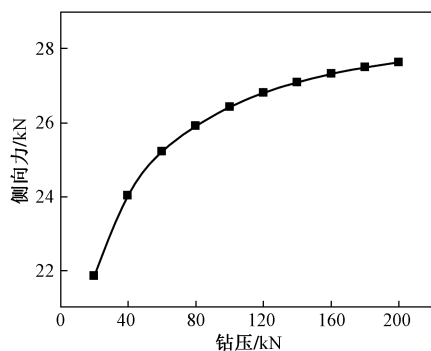


图8 钻压对侧向力的影响

Fig. 8 Influence of weight on bit on lateral force

#### 4.3.1 偏心距的影响

偏心距由偏置机构中内、外偏心环相对旋转产生,改变内外环转动速度与方向,可得到不同大小的偏心距,它在数值上等于偏置机构截面上导向芯轴中心轴线与外壳中心轴线间的距离。偏心距极大影响着造斜作业时钻头对地层的抵靠力。如图9所示,为分析偏心距对RSBHA力学性能的影响规律,控制其他参数不变,分别在偏心距为2~8 mm时,求解钻头侧向力。可以看出,随着偏心距的增大,钻头侧向力有所增加,且增长幅度较高。

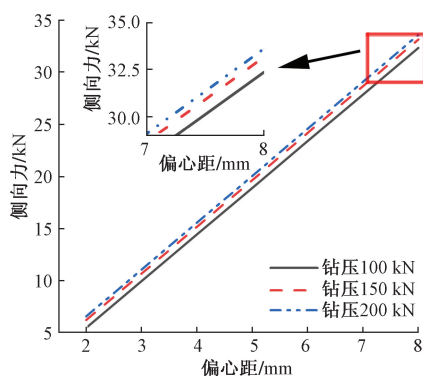


图9 偏心距对侧向力的影响

Fig. 9 Influence of eccentricity on lateral force

#### 4.3.2 上稳定器直径的影响

导向钻进作业时,上稳定器直径变化将直接引起稳定器与井眼之间的间隙值改变,消除间隙值所引起的钻柱端部附加转角值发生改变,从而使钻柱受力情况产生变化。如图10所示,为分析上稳定器直径对RSBHA力学性能的影响规律,控制其他参数不变,分别在上稳定器直径为200~214 mm时,求解钻头侧向力。可以看出,随着上稳定器直径的增大,钻头侧向力有所降低。

#### 4.3.3 下稳定器直径的影响

下稳定器处为三段钻柱交界点,同时该处由传动结构进行钻压扭矩传递,受力情况较为复杂。如

图11所示,为分析下稳定器直径对RSBHA力学性能的影响规律,控制其他参数不变,分别在下稳定器直径为201~215 mm时,求解钻头侧向力。可以看出,随着下稳定器直径的增大,钻头侧向力有所增加,且增长幅度较高。

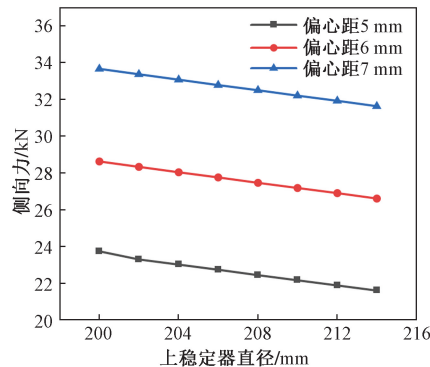


图10 上稳定器直径对侧向力的影响

Fig. 10 Influence of upper stabilizer diameter on lateral force

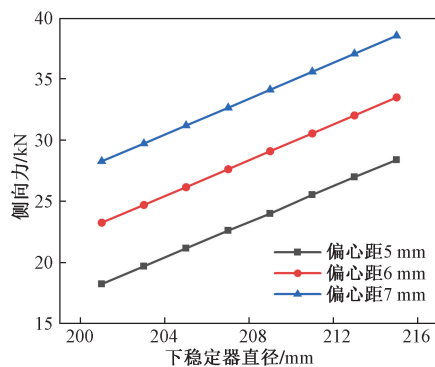


图11 下稳定器直径对侧向力的影响

Fig. 11 Influence of lower stabilizer diameter on lateral force

#### 4.3.4 上稳定器至偏心环距离的影响

稳定器在RSBHA中起到扶正与支撑作用,其安放位置也对钻柱力学性能也有较大影响。如图12所示,为分析上稳定器至偏心环距离对RSBHA力学性能的影响规律,控制其他参数不变,分别在上稳定器至偏心环距离为220~340 mm时,求解钻头侧向力。可以看出,随着上稳定器至偏心环距离的增大,钻头侧向力有所降低。

#### 4.3.5 下稳定器至偏心环距离对侧向力影响

如图13所示,为分析下稳定器至偏心环距离对RSBHA力学性能的影响规律,控制其他参数不变,分别在下稳定器至偏心环距离为150~500 mm时,求解钻头侧向力。可以看出,随着下稳定器至偏心环距离的增大,钻头侧向力有所减小,降低幅度值较大。

#### 4.3.6 下稳定器到钻头距离对侧向力的影响

如图14所示,为分析下稳定器到钻头距离对

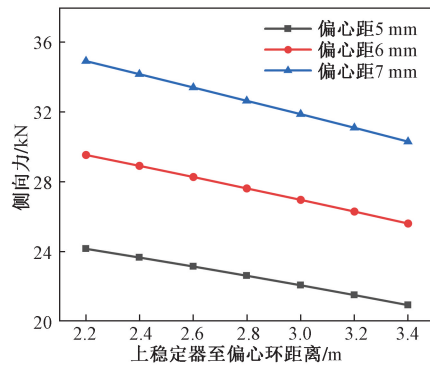


图 12 上稳定器至偏心环距离对侧向力的影响

Fig. 12 Influence of distance from upper stabilizer to eccentric ring

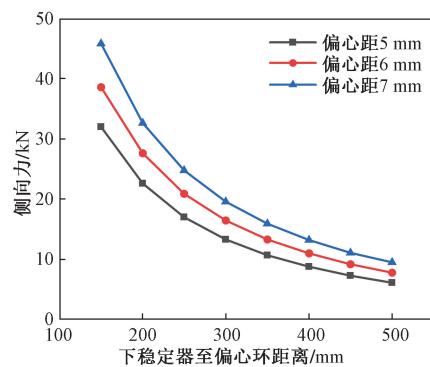


图 13 下稳定器至偏心环距离对侧向力的影响

Fig. 13 Influence of distance from lower stabilizer to eccentric ring

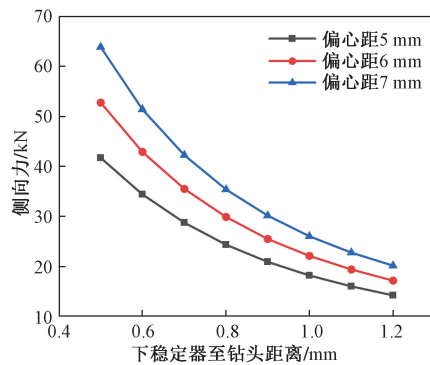


图 14 下稳定器到钻头距离对侧向力的影响

Fig. 14 Effect of distance from lower stabilizer to bit

RSBHA 力学性能的影响规律,控制其他参数不变,分别在下稳定器到钻头距离为 0.5 ~ 1.2 m 时,求解钻头侧向力。可以看出,随着下稳定器到钻头距离的增大,钻头侧向力有所减小,且降低幅度较大。

## 5 结论

(1)提出一种非连续型指向式旋转导向结构,结合有限单元法和纵横弯曲法,建立一种非连续性指向式旋转导向底部钻具组合力学求解方法,利用

川西地区水平井现场实钻参数,计算得出钻头侧向力为 27.63 kN,钻头转角为 0.194 3°。

(2)所建立的非连续性指向式旋转导向 BHA 力学分析模型,相比现有研究,可适用于非连续、多刚度以及动态边界问题。

(3)研究井身几何参数、钻井参数和钻具组合结构参数对底部钻具组合力学性能的影响,可以看出,随着钻压、偏心距与下稳定器直径的增大,钻头侧向力与造斜率有所增加;随着井斜、上稳定器直径、上稳定器至偏心环距离、下稳定器至偏心环距离、下稳定器至钻头距离的增大,钻头侧向力与造斜率有所降低。有助于进行参数优选和底部钻具组合优化设计。

## 参 考 文 献

- [1] 冯定,王鹏,张红,等. 旋转导向工具研究现状及发展趋势[J]. 石油机械, 2021, 49(7): 8-15.  
Feng Ding, Wang Peng, Zhang Hong, et al. Research status and development trend of rotary steerable system tool[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(7): 8-15.
- [2] 唐博,王鹏,张红. 基于整体传递矩阵法的导向工具偏心主轴动力学特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8289-8294.  
Tang Bo, Wang Peng, Zhang Hong. Dynamic characteristics of eccentric spindle of steerable tool based on whole transfer matrix method[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(19): 8289-8294.
- [3] 高德利,黄文君,刁斌斌,等. 复杂结构井定向钻井技术现状及展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(2): 11-21.  
Gao Deli, Huang Wenjun, Diao Binbin, et al. Current status and prospect of directional drilling technologies for complex wells[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2): 11-21.
- [4] 苏义脑,窦修荣,高文凯,等. 旋转导向系统研究现状及发展趋势[J]. 钻采工艺, 2024, 47(3): 1-8.  
Su Yinao, Dou Xiurong, Gao Wenkai, et al. Research status and development trends of rotary steerable system[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(3): 1-8.
- [5] 张鑫鑫,梁博文,张晓龙,等. 智能钻井装备与技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 20-30.  
Zhang Xinxin, Liang Bowen, Zhang Xiaolong, et al. Research progress of intelligent drilling equipment and technology[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(9): 20-30.
- [6] 宋红喜,曾义金,张卫,等. 旋转导向系统现状及关键技术分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2123-2131.  
Song Hongxi, Zeng Yijin, Zhang Wei, et al. Current situation and key technology analysis of rotary steering system[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2123-2131.
- [7] 毕研涛,柳贡慧,杨宁宁,等. 柔性短节对静态推靠式旋导工具造斜力的影响[J]. 石油机械, 2022, 50(5): 9-15.  
Bi Yantao, Liu Gonghui, Yang Ningning, et al. Influence of flexible sub on deviating force of static push-the-bit rotary steering BHA[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(5): 9-15.
- [8] 李飞,张楠. 基于延时微分的旋转导向工具造斜率预测方法研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 166-173.

- Li Fei, Zhang Nan. Build-up rate prediction of rotary steerable tools based on delay differentiation [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 166-173.
- [9] 狄勤丰, 芮子翔, 周星, 等. 带旋转导向工具的底部钻具组合横向振动特性研究[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(6): 8-16.  
Di Qinfeng, Rui Zixiang, Zhou Xing, et al. Research on lateral vibration characteristics of bottom hole assembly with rotary steerable tool [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 49(6): 8-16.
- [10] Bradley W B. Factors affecting the control of borehole angle in straight and directional wells [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1975, 27: 679-688.
- [11] Walker B H, Friedman M B. Three-dimensional force and deflection analysis of a variable cross section drill string [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1977, 99(2): 367.
- [12] Zaharov D O, Sokolov A P. Finite element modeling of bottom hole assembly stress-strain state [J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2020, 9(6): 803-807.
- [13] Guan Z C, Wang H, Shi Y C, et al. Dynamic behavior analysis of push-the-bit rotary steerable bottom hole assembly [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33: 1501-1511.
- [14] 史玉才, 滕志想, 白璟, 等. 改进的静态推靠式旋转导向钻具组合力学模型 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(5): 75-80.  
Shi Yucai, Teng Zhixiang, Bai Jing, et al. improved mechanical model of the static push-the-bit rotary steerable bottom-hole assembly [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(5): 75-78.
- [15] 纪慧, 李军, 杨宏伟, 等. 底部钻具组合力学性能分析及优化 [J]. *石油机械*, 2024, 52(6): 20-28.  
Ji Hui, Li Jun, Yang Hongwei, et al. Mechanical property analysis and optimization of bottom hole assembly [J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(6): 20-28.
- [16] 李军, 李东春, 张辉. 指向式旋转导向工具造斜能力影响因素研究 [J]. *钻采工艺*, 2018, 41(1): 1-6.  
Li Jun, Li Dongchun, Zhang Hui. Research on influencing factors of deflection ability of directional rotary steerable tool [J]. *Drilling & Production Technology*, 2018, 41(1): 1-6.
- [17] 王鹏, 唐博, 吉进元, 等. 旋转导向系统底部钻具组合力学计算新方法 [J]. *力学季刊*, 2022, 43(3): 670-680.  
Wang Peng, Tang Bo, Ji Jinyuan, et al. A new method for mechanical calculation of bottom hole assembly in rotary steerable system [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2022, 43(3): 670-680.
- [18] 贾建波, 兰洪波, 菅志军, 等. 475 型静态推靠式旋转导向钻具组合的弯曲应力分布规律 [J]. *地球物理学报*, 2023, 66(1): 95-100.  
Jia Jianbo, Lan Hongbo, Jian Zhijun, et al. Bending stress distribution rules of the 475 static push-the-bit rotary steerable assembly [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 66(1): 95-100.
- [19] 何俊杰, 毛良杰, 杨森, 等. 推靠式旋转导向系统钻具组合力学性能分析 [J]. *石油机械*, 2024, 52(4): 41-48.  
He Junjie, Mao Liangjie, Yang Sen, et al. Mechanical property analysis of bottom hole assembly with decentralized rotary steering system [J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(4): 41-48.
- [20] 洪迪峰, 唐雪平, 苏义脑, 等. 非连续性旋转导向钻具组合的广义纵横弯曲法 [J]. *石油学报*, 2014, 35(3): 543-550.  
Hong Difeng, Tang Xueping, Su Yinao, et al. Generalized beam-column method for non-continuous rotary steering drilling of bottom-hole assembly [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(3): 543-550.
- [21] 王恒, 管志川, 史玉才, 等. 柔性短节对推靠式旋转导向底部钻具组合造斜能力的影响分析 [J]. *钻采工艺*, 2018, 41(6): 19-22, 6.  
Wang Heng, Guan Zhichuan, Shi Yucai, et al. Effects of flex sub on build-up performance of push-the-bit RSBHA [J]. *Drilling & Production Technology*, 2018, 41(6): 19-22, 6.