

# 底部钻具组合造斜率预测新方法

史玉才<sup>1</sup>, 管志川<sup>1</sup>, 赵洪山<sup>2</sup>, 黄根炉<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

**摘要:**基于钻头与地层相互作用模型及钻进趋势评价指标,提出一种底部钻具组合造斜率预测的新方法——平衡趋势法,认为底部钻具组合的造斜率应与钻进趋势角为零时的井眼曲率相等。结合钻具组合受力分析模型和钻头与地层相互作用模型,推导出钻进趋势角的计算表达式,建立平衡趋势法求解底部钻具组合造斜率的计算方法。实例验证表明,该方法具有较高的计算精度,能够实现钻头和地层的各向异性、地层倾角及倾向等各种因素对底部钻具组合造斜率的定量评价,为今后底部钻具结构的合理配置以及钻井参数的优选提供有力的理论依据和分析手段。

**关键词:**钻井; 底部钻具组合; 造斜率; 钻进趋势角; 井眼曲率; 平衡趋势法

**中图分类号:**TE 21 **文献标志码:**A

**引用格式:**史玉才,管志川,赵洪山,等. 底部钻具组合造斜率预测新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017,41(1):85-89.

SHI Yucai, GUAN Zhichuan, ZHAO Hongshan, et al. A new method for build-up rate prediction of bottom-hole assembly in well drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(1):85-89.

## A new method for build-up rate prediction of bottom-hole assembly in well drilling

SHI Yucai<sup>1</sup>, GUAN Zhichuan<sup>1</sup>, ZHAO Hongshan<sup>2</sup>, HUANG Genlu<sup>1</sup>

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Engineering Company Limited, SINOPEC, Dongying 257017, China)

**Abstract:** Based on a bit-rock interaction model and an evaluation index method of drilling tendency, a new method, named as the equilibrium tendency method, was presented to predict the build-up rate of bottom-hole assembly (BHA), which assumes that the build-up rate is equal to the borehole curvature while the drilling tendency angle is zero. The calculation formula of the drilling tendency angle was derived, and the equilibrium tendency method was then established in coupling the mechanical model of BHA and the bit-rock interaction model. Case studies of field operation have shown that the new method has a high calculation precision and can be quantitatively used to evaluate the build-up rate considering various factors, such as the features of drilling bits, the anisotropy of rocks, the stratum dip angle and its variation trend. The new method is useful for designing the BHA's structure and optimizing the drilling parameters.

**Keywords:** drilling; bottom-hole assembly; build-up rate; drilling tendency angle; borehole curvature; equilibrium tendency method

造斜率是井眼轨迹控制过程中衡量底部钻具组合(BHA)造斜能力的重要指标,是现场人员进行底部钻具结构优化及钻井参数选取的重要依据。目前主要采用三点定圆法和平衡曲率法(含极限曲率法)预测钻具组合造斜率<sup>[1-4]</sup>。其中,三点定圆法仅

从几何关系上简单估计导向螺杆钻具的造斜率,没有考虑钻具的受力与变形、钻具刚度、井眼几何条件和工艺参数等因素影响,而后两种方法考虑了钻具受力变形、井眼几何形状及工艺参数等因素影响,但未考虑钻头和地层的各向异性、地层倾角及地层倾

收稿日期:2016-03-04

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05022002);国家自然科学基金项目(51674284);国家“863”计划(2012AA091501)

作者简介:史玉才(1972-),男,副教授,博士,研究方向为定向钻井理论与技术。E-mail:shiyucai2008@163.com。

向等因素影响。钻井实践也表明,上述预测方法考虑因素均不全面,预测出的造斜率均与实际造斜率存在较大误差。为了准确预测底部钻具组合的造斜率,笔者以钻头与地层相互作用理论为基础,综合考虑底部钻具结构、井眼几何形状、钻进参数、钻头以及地层特性等因素影响,提出底部钻具组合造斜率预测的平衡趋势法,为底部钻具结构优化及钻井参数优选提供理论依据和分析手段。

## 1 平衡趋势法的基本思想

理论分析与钻井实践表明,钻头在地层中的造斜过程实为钻头与地层相互作用并逐渐趋于平衡的过程。钻头与地层相互作用模型如图1所示。其中, $x'$ 为实际钻进方向(井底处井眼轴线的切线方向); $e_r$ 、 $e_f$ 、 $e_a$ 以及 $e_d$ 分别为钻进趋势方向(钻头在地层中将要的钻进方向)、钻头合力方向、钻头轴线方向及地层法线方向的单位矢量; $A_r$ 为钻进趋势方向与实际钻进方向之间的夹角,称为钻进趋势角<sup>[5-8]</sup>。

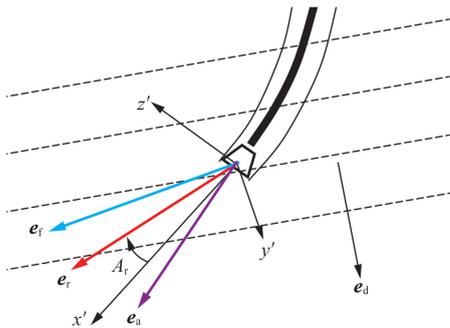


图1 BHA 钻进趋势分析

Fig.1 Analysis of drilling tendency of BHA

假设初始造斜时实际造斜率为 $K_h$ ,造斜达到平衡状态时的最终造斜率为 $K$ 。通常情况下,初始造斜时钻具组合的实际造斜率普遍较低,钻出的井眼曲率也较小,即 $K_h < K$ 。此时钻进趋势方向 $e_r$ 与实际钻进方向 $x$ 之间会存在一个夹角,即钻进趋势角 $A_r \neq 0$ ;之后继续钻进,钻具组合的造斜能力逐渐增强,尽管实际造斜率将逐渐增大,但是钻具造斜率变化会逐渐变缓,钻进趋势方向 $e_r$ 与实际钻进方向 $x$ 之间的夹角 $A_r$ 逐渐减小,直至 $A_r = 0$ ,此时造斜趋势达到平衡,此后钻出的井眼曲率保持不变,与底部钻具组合的最终造斜率 $K$ 趋于相等。

综上所述,平衡趋势法的基本思想简单概括为:钻进趋势角等于零时底部钻具组合的造斜趋势达到平衡,对应的井眼曲率即为钻具组合的造斜率。

## 2 BHA 受力

为了求解钻进趋势角,首先须进行BHA受力分析,计算出钻头侧向力和钻头转角。此处以双稳定器钻具组合为例,BHA受力分析如图2所示。

采用纵横弯曲连续梁方法<sup>[9]</sup>进行BHA受力分析,假设:①BHA各结构单元均处于弹性状态;②钻头居于井底平面中心处,且与地层之间不产生弯矩;③在钻头及扶正器处,井壁对钻柱刚性支承;④在钻柱与井壁的新接触点处(上切点除外),钻柱与井壁均为弹性体;⑤不考虑钻柱所受扭矩和振动的影响;⑥钻柱内外钻井液均为理想流体。

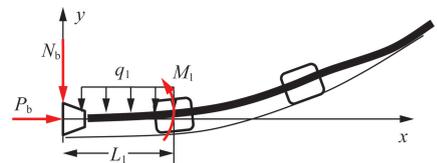


图2 钻头力学特性

Fig.2 Mechanical properties of drill bit

假设当前井眼是位于某个空间斜平面上的一段圆弧,可以将三维井眼中BHA受力分析问题分解成 $P$ 平面(井斜平面)和 $Q$ 平面(方位平面)的两个二维受力分析问题分别进行求解<sup>[9]</sup>。对于钻头到第1稳定器之间的第一跨钻柱,主要受到钻压 $P_b$ 、均布载荷 $q_1$ 、钻头侧向力 $N_b$ 、稳定器处弯矩 $M_1$ 作用。在 $P$ 平面和 $Q$ 平面上,钻头侧向力及钻头转角求解结果如下。

(1) $P$ 平面上变井斜力 $N_{b\alpha}$ 和钻头转角 $A_\alpha$ 为

$$N_{b\alpha} = - \left( \frac{P_b y_{1P}}{L_1} + \frac{q_1 L_1}{2} + \frac{M_{1P}}{L_1} \right), \quad (1)$$

$$A_\alpha = \frac{q_1 L_1^3}{24EI_1} X(u_{1P}) + \frac{M_{1P} L_1}{6EI_1} Z(u_{1P}) - \frac{y_{1P}}{L_1}. \quad (2)$$

(2) $Q$ 平面上变方位力 $N_{b\varphi}$ 和钻头转角 $A_\varphi$ 为

$$N_{b\varphi} = - \left( \frac{P_b y_{1Q}}{L_1} + \frac{M_{1Q}}{L_1} \right), \quad (3)$$

$$A_\varphi = \frac{M_{1Q} L_1}{6EI_1} Z(u_{1Q}) - \frac{y_{1Q}}{L_1}. \quad (4)$$

式中, $E$ 为钻柱材料的弹性模量; $I_1$ 为第1跨钻柱的惯性矩; $L_1$ 为第1跨钻柱长度; $M_{1P}$ 和 $M_{1Q}$ 分别为第1稳定器处弯矩 $M_1$ 在 $P$ 平面和 $Q$ 平面上的分量; $X(u_{1P})$ 、 $Z(u_{1P})$ 和 $Z(u_{1Q})$ 分别为纵横弯曲连续梁三弯矩方程组中的放大因子; $y_{1P}$ 和 $y_{1Q}$ 分别为第1稳定器中点在 $P$ 平面和 $Q$ 平面上纵坐标, $y_{1P}$ 和 $y_{1Q}$ 与当前井眼曲率、第1稳定器位置及该处井眼间隙有关,影响钻头侧向力和钻头转角。

### 3 钻进趋势角计算方法

#### 3.1 钻头与地层相互作用模型

钻头与地层相互作用模型又称 *NL* 模型,该模型综合考虑了钻头和地层的各向异性、地层倾角及倾向影响,是一种较为准确的钻进趋势理论分析模型<sup>[10-13]</sup>。假设地层为横观各向同性,*NL* 模型表达式为

$$r_N \mathbf{e}_r = I_b I_r \mathbf{e}_f + I_r (1 - I_b) \cos A_{af} \mathbf{e}_a + (1 - I_r) r_N \cos A_{rd} \mathbf{e}_d \quad (5)$$

式中,  $I_b$  和  $I_r$  分别为钻头和地层各向异性指数;  $A_{af}$  为钻头合力方向与钻头轴向方向的夹角;  $A_{rd}$  为钻进方向与地层法线方向的夹角;  $r_N$  为一般状态下的钻进效率。

#### 3.2 坐标系建立及关系转换

如图3所示,以井底中心  $o'$  为原点,分别建立井底坐标系  $o'x'y'z'$  和地层坐标系  $o'x''y''z''$ 。在井底坐标系  $o'x'y'z'$  中,以井眼轴线切线方向为  $x'$  轴正向,以井眼高边方向为  $z'$  轴正向,  $y'$  轴正向由右手定则确定;在地层坐标系  $o'x''y''z''$  中,分别以地层下倾方向、垂直于地层面下方向作为  $x''$  轴和  $z''$  轴正向,同样右手定则确定  $y''$  轴正向。

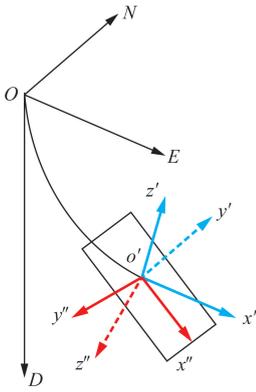


图3 井底和地层坐标系示意图

Fig.3 Sketch map of two coordinate systems

以井口处 *ONED* 大地坐标系作为过渡坐标系,则井底坐标系和地层坐标系的转换关系为

$$(x' \ y' \ z')^T = [k] (x'' \ y'' \ z'')^T \quad (6)$$

其中

$$[k] = \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos \varphi & \sin \alpha \sin \varphi & \cos \alpha \\ \sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \\ \cos \alpha \cos \varphi & \cos \alpha \sin \varphi & -\sin \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \theta & -\sin \theta & -\sin \beta \cos \theta \\ \cos \beta \sin \theta & \cos \theta & -\sin \beta \sin \theta \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

式中,  $\alpha$  和  $\varphi$  分别为井底井斜角和方位角;  $\beta$  和  $\theta$  分别为地层倾角和地层倾向。

#### 3.3 钻进趋势角计算公式

为了获得钻进趋势角表达式,须对 *NL* 模型进行求解。首先,井底坐标系中的矢量  $\mathbf{e}_f$  和  $\mathbf{e}_a$  用井底坐标系的基向量 ( $\mathbf{e}'_1, \mathbf{e}'_2, \mathbf{e}'_3$ ) 分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_f = \cos \alpha_f \mathbf{e}'_1 + \cos \beta_f \mathbf{e}'_2 + \cos \gamma_f \mathbf{e}'_3, \\ \mathbf{e}_a = \cos \alpha_a \mathbf{e}'_1 + \cos \beta_a \mathbf{e}'_2 + \cos \gamma_a \mathbf{e}'_3. \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\alpha_f, \beta_f$  和  $\gamma_f$  分别为钻头合力矢量  $\mathbf{E}_f$  与坐标轴  $x', y', z'$  的夹角;  $\alpha_a, \beta_a$  和  $\gamma_a$  分别为钻头轴向方向矢量  $\mathbf{e}_a$  与坐标轴  $x', y', z'$  的夹角。

根据 *P* 平面和 *Q* 平面上钻头侧向力和钻头转角计算结果,可得矢量  $\mathbf{e}_f, \mathbf{e}_a$  表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_f = \frac{P_b}{\sqrt{P_b^2 + N_{bc}^2 + N_{bp}^2}} \mathbf{e}'_1 - \frac{N_{bp}}{\sqrt{P_b^2 + N_{bc}^2 + N_{bp}^2}} \mathbf{e}'_2 + \frac{N_{bc}}{\sqrt{P_b^2 + N_{bc}^2 + N_{bp}^2}} \mathbf{e}'_3, \\ \mathbf{e}_a = \cos A_\alpha \cos A_\varphi \mathbf{e}'_1 + \sin A_\varphi \mathbf{e}'_2 + \sin A_\alpha \cos A_\varphi \mathbf{e}'_3. \end{cases} \quad (8)$$

其次,地层坐标系中的矢量  $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_d$  用地层坐标系的基向量 ( $\mathbf{e}''_1, \mathbf{e}''_2, \mathbf{e}''_3$ ) 分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_r = \cos \alpha_r \mathbf{e}''_1 + \cos \beta_r \mathbf{e}''_2 + \cos \gamma_r \mathbf{e}''_3, \\ \mathbf{e}_d = \mathbf{e}''_3. \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\alpha_r, \beta_r$  和  $\gamma_r$  分别表示钻进方向矢量  $\mathbf{e}_r$  与坐标轴  $x'', y''$  和  $z''$  的夹角,为待求参数。由于  $A_{rd}$  表示钻进方向与地层法线方向的夹角,可知  $A_{rd} = \gamma_r$ 。

将式(8)和(9)中的  $\mathbf{e}_f, \mathbf{e}_a, \mathbf{e}_r$  和  $\mathbf{e}_d$  经坐标转换到井底坐标系后分别代入式(5),然后根据方程两边各单位向量对应的系数相等,经推导最终可得钻进趋势角  $A_r$  的计算表达式为

$$A_r = \arccos \left( \frac{k_{11} w_1 + k_{12} w_2 + k_{13} w_3}{\sqrt{w_1^2 + w_2^2 + w_3^2}} \right) \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} w_1 &= k_{11} s_1 + k_{21} s_2 + k_{31} s_3, \quad w_2 = k_{12} s_1 + k_{22} s_2 + k_{32} s_3, \\ w_3 &= I_r (k_{13} s_1 + k_{23} s_2 + k_{33} s_3), \\ s_1 &= I_b I_r \cos \alpha_f + I_r (1 - I_b) \cos A_{af} \cos \alpha_a, \\ s_2 &= I_b I_r \cos \beta_f + I_r (1 - I_b) \cos A_{af} \cos \beta_a, \\ s_3 &= I_b I_r \cos \gamma_f + I_r (1 - I_b) \cos A_{af} \cos \gamma_a. \end{aligned}$$

平衡趋势法预测造斜率基本过程为:①初步给定井眼曲率  $K$ ;②进行 BHA 受力分析,求出钻头侧向力及转角;③计算钻进趋势角  $A_r$ ,若  $A_r = 0$ ,则造斜趋势刚好平衡,预先给定的井眼曲率  $K$  即为所求造斜率;若  $A_r \neq 0$ ,则造斜趋势尚未平衡,须重新给定

并眼曲率和重新计算钻进趋势角,直至 $A_r=0$ 。

根据钻进趋势角的求解过程可以看出,平衡趋势法综合考虑了底部钻具结构、井眼几何形状、钻进参数、钻头以及地层性质等因素的共同影响,比三点定圆法和平衡曲率法考虑因素更全面。

## 4 实例验证与分析

义123-1HF井是某油田部署在义123-1区块的第一口非常规致密砂岩长水平段水平井。该井设计井深5236 m,水平段长1362 m,设计最大井斜角 $88.1^\circ$ 、方位角 $160^\circ$ 。水平段最后一趟钻采用双扶正器常规钻具组合稳斜钻进,单趟钻进尺192 m,平均机械钻速15.58 m/h,取得了较好的应用效果。

实用钻具组合及钻进参数如下: $\Phi 152.4$  mm PDC钻头 $\times 0.25$  m+双母接头 $\times 0.38$  m+ $\Phi 148$  mm扶正器 $\times 1.41$  m+ $\Phi 120$  mm短钻铤 $\times 5.88$  m+ $\Phi 147$  mm扶正器 $\times 1.41$  m+回压阀 $\times 0.70$  m+ $\Phi 120$  mm无磁钻铤 $\times 9.17$  m+MWD短节 $\times 0.57$  m+ $\Phi 120$  mm钻铤 $\times 9$  m+ $\Phi 101.6$  mm钻杆;钻压40~80 kN。

根据本井地质设计及邻井实钻数据,其他计算参数选取如下:钻头各向异性指数为0.20,地层各向异性指数为0.95,地层倾角为 $3.0^\circ$ ,地层倾向为 $10^\circ$ ,井眼扩大率为4%,钻井液密度为 $1.45$  g/cm<sup>3</sup>。

### 4.1 平衡趋势法的验证

图4为利用平衡趋势法得到的理论造斜率和现场实钻造斜率随钻压的变化曲线。由图4可以看

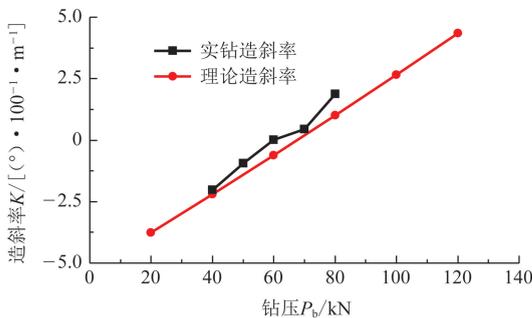


图4 理论造斜率与实钻造斜率对比

Fig.4 Contrast theoretical build-up rate with actual build-up rate

出,理论和实钻造斜率均随钻压近似呈线性变化,且随着钻压升高,理论和实钻造斜率均明显增大,逐渐从降斜效果转变成增斜效果。另外,该井段实际施加钻压为40~80 kN,实钻造斜率为 $-2.03 \sim 1.87$  ( $^\circ$ )/(100 m),而利用平衡趋势法计算得到的理论造斜率为 $-2.20 \sim 1.01$  ( $^\circ$ )/(100 m),该方法具有较

高的预测精度,能够满足钻井现场需要。

### 4.2 与平衡曲率法对比

图5为平衡趋势法和平衡曲率法对造斜率的预测结果。由图5可以看出,由于平衡曲率法中没有考虑钻头及地层特性影响,随钻压变化预测出的造斜率始终保持不变(为降斜效果),不符合钻井现场实际情况。对于平衡趋势法,预测出的造斜率随钻压、钻头及地层特性变化明显,符合钻井现场实际情况;其中,当钻头各向异性指数 $I_b=0.20$ 、地层各向异性指数 $I_r$ 分别为0.95和1.00、钻压为80和100 kN时,预测出的造斜率分别减少了2.99和3.72 ( $^\circ$ )/(100 m);当地层各向异性指数 $I_r=0.95$ 、钻头各向异性指数 $I_b$ 分别为0.2和0.4、钻压为80和100 kN时,预测出的造斜率分别减少了2.07和2.47 ( $^\circ$ )/(100 m)。对比分析表明,采用平衡趋势法预测造斜率考虑因素更全面、更合理。

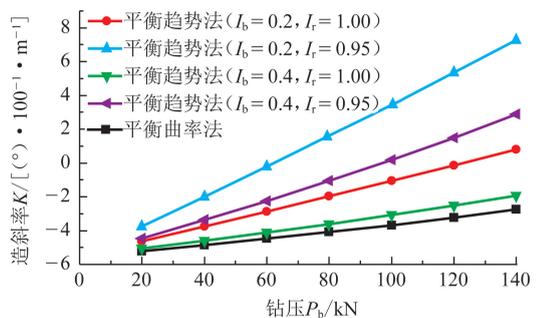


图5 平衡趋势法与平衡曲率法对比

Fig.5 Contrast equilibrium tendency method with balance curvature method

### 4.3 不同类型常规钻具的造斜率对比

以双稳定器钻具组合为原型,增加光钻铤组合(无稳定器)、单稳定器组合(去掉第2个稳定器)和三稳定器组合(第2个稳定器与第3个稳定器间隔1根钻铤)。不同类型常规钻具组合的造斜率预测结果如图6所示。

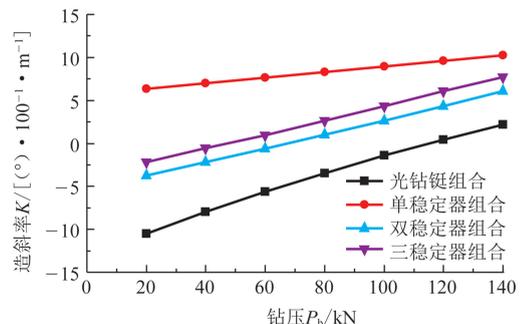


图6 多种常规钻具组合的造斜率对比

Fig.6 Build-up rate of different conventional drill assembly

由图6可以看出,稳定器位置及数量对底部钻具的钻进趋势具有较大影响。在相同钻压下,单稳定器组合的造斜率最大,主要表现为增斜效果;光钻铤组合的造斜率随钻压变化较大,当钻压较低时表现为降斜效果,钻压较大(超过120 kN)时表现为弱的增斜效果;而双稳定器组合和三稳定器组合的造斜率随钻压变化较大,通过调整钻压可实现降斜、稳斜和增斜钻进效果,在现场多表现为稳斜钻具组合,经常应用于致密砂岩、页岩油气等非常规油藏类型水平井长水平段的钻井施工。

## 5 结论

(1)基于钻头与地层相互作用模型,以钻进趋势角为评价指标,提出了钻具组合造斜率预测的平衡趋势法,该方法中钻进趋势角等于零时底部钻具组合的造斜趋势达到平衡,与之对应的井眼曲率即为钻具组合的造斜率。

(2)结合钻具组合受力分析模型、钻头与地层相互作用模型,推导出钻进趋势角计算表达式,建立平衡趋势法预测钻具组合造斜率方法。该方法具有很高的计算精度,可用于指导钻具组合设计及钻井参数优选。

(3)平衡趋势法综合考虑了钻具结构参数、井眼几何参数、钻进参数、钻头以及地层特性影响,能够实现钻头和地层的各向异性、地层倾角和倾向等各种因素对造斜率的定量评价分析。

### 参考文献:

- [1] 刘修善,何树山,邹野. 导向钻具几何造斜率的研究[J]. 石油学报,2004,25(6):83-87.  
LIU Xiushan, HE Shushan, ZOU Ye. Study on the geometric build angle rate of steerable motor[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004,25(6):83-87.
- [2] 刘修善. 导向钻具几何造斜率的实用计算方法[J]. 天然气工业,2005,25(11):50-52.  
LIU Xiushan. Practical calculation method of geometric deflection rate of guide drilling tool[J]. Natural Gas Industry, 2005,25(11):50-52.
- [3] 苏义脑. 极限曲率法及其应用[J]. 石油学报,1997,18(3):110-113.  
SU Yinao. Limiting curvature method and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997,18(3):110-113.
- [4] 唐雪平,苏义脑,陈祖锡. 求解中短半径弯螺杆钻具的纵横弯曲法[J]. 力学与实践,2011,33(3):20-24.  
TANG Xueping, SU Yinao, CHEN Zuxi. Beam-column theory for bent housing PDM assemblies with medium-short radius of building capability[J]. Mechanics in En-

gineering, 2011,33(3):20-24.

- [5] 夏焱,管志川,史玉才. 底部钻具组合参数设计的评价方法[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,29(4):48-51.  
XIA Yan, GUAN Zhichuan, SHI Yucui. Evaluation method of parameters design for bottom hole assembly[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(4):48-51.
- [6] 夏焱,管志川. 随钻扩眼钻井钻进趋势影响因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(6):79-82.  
XIA Yan, GUAN Zhichuan. Influencing factors of drilling tendency in process of reaming while drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(6):79-82.
- [7] 管志川,夏焱,王国胜,等. 底部钻具组合的参数设计及优化方法[J]. 石油钻采工艺,2006,28(4):10-13.  
GUAN Zhichuan, XIA Yan, WANG Guosheng, et al. The parameters design and optimization method of the bottom hole assembly[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(4):10-13.
- [8] 史玉才,管志川,夏焱,等. 以井斜趋势角为指标优化防斜钻具设计[J]. 石油钻探技术,2004,32(5):10-12.  
SHI Yucui, GUAN Zhichuan, XIA Yan, et al. Optimizing the design of bottom-hole assembly in deviation control by the trend angle of deviation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004,32(5):10-12.
- [9] 白家祉,苏义脑. 井斜控制理论与实践[M]. 北京:石油工业出版社,1990.
- [10] 高德利,聂翠平,刘希圣. 钻头各向异性钻井特性的理论分析和实验[J]. 石油大学学报(自然科学版),1991,15(6):28-31.  
GAO Deli, NIE Cuiping, LIU Xisheng. Theoretical analysis and experimental study of anisotropic drilling characteristics of drill bit[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1991,15(6):28-31.
- [11] 高德利. 井眼轨迹控制[M]. 东营:石油大学出版社,1994.
- [12] 高德利. 钻头和地层各向异性钻井特性的一种表达方法[J]. 石油学报,1994,15(2):126-132.  
GAO Deli. A diagrammatic method for drilling characteristics of formation anisotropy and drill bit[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994,15(2):126-132.
- [13] 高德利. 井眼轨迹控制问题的力学分析方法[J]. 石油学报,1996,17(1):115-121.  
GAO Deli. A mechanical model for prediction and control of the wellbore trajectory[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996,17(1):115-121.