

考虑钻头转速影响的新三维钻速方程

刘军波¹, 韦红术², 赵景芳¹, 张 辉³, 张日鹏³

(1. 中海油田服务股份有限公司钻井事业部, 河北三河 065201; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518067; 3. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘 要: 为了更全面地考虑影响机械钻速的因素、提高预测机械钻速和井眼轨迹的准确性, 深入研究了涉及钻头和地层相互作用的三维钻速方程。考虑钻头转速的影响, 重新定义了钻头各向异性指数和地层各向异性指数; 利用地层各向异性指数和钻头各向异性指数的定义以及坐标变换, 建立了考虑钻头转速影响、钻头与地层相互作用的新三维钻速方程。利用新三维钻速方程, 实例分析了钻头转速对机械钻速的影响, 随着钻头转速的增加, 井底平面 X_d 方向、 Y_d 方向及井底法向 Z_d 方向的机械钻速都随之提高, 但井底 3 个方向的机械钻速随钻头转速增加而提高的幅度并不相同, 井底法向 Z_d 方向机械钻速的提高幅度要大于井底 X_d 和 Y_d 方向机械钻速的提高幅度。研究表明, 钻井过程中, 利用新三维钻速模型可以预测钻头转速变化对机械钻速和井眼轨迹的影响, 也可以通过调整钻头转速、钻头各向异性指数、钻头机械力等参数对井眼轨迹进行控制。

关键词: 钻头转速 钻速方程 各向异性指数

中图分类号: TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2015)01-0052-06

A New 3D ROP Equation Considering the Rotary Speed of Bit

Liu Junbo¹, Wei Hongshu², Zhao Jingfang¹, Zhang Hui³, Zhang Ripeng³

(1. Drilling Division of China Oilfield Services Limited, Sanhe, Hebei, 065201, China; 2. CNOOC (Shenzhen) Company, Shenzhen, Guangdong, 518067, China; 3. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: In order to fully consider the factors affecting the ROP and improve the accuracy of predicting the ROP and wellbore trajectory, the 3D ROP equation involving the interaction between bit and formation was studied. Considering the effect of rotary speed of the bit, the bit anisotropic index and the formation anisotropic index were redefined. Based on the definition of both anisotropic indexes and the coordinate transformation, a new 3D ROP equation considering the rotary speed of bit and the bit-formation interaction was established. Using the new 3D ROP equation, a practical case was taken to analyze the effect of rotary speed on ROP. It was found that all ROPs in X_d direction, Y_d direction and normal Z_d direction increased with the increase of rotary speed, but to different extents. ROP in normal Z_d direction increased more than that in X_d and Y_d directions. The results showed that the new model could be used to predict the change of ROP and wellbore trajectory with the change of rotary speed in drilling operations, and that the wellbore trajectory could be controlled by adjusting the rotary speed, bit anisotropic index, bit mechanical force and other parameters.

Key words: rotary speed of the bit; ROP equation; anisotropic index

对钻头和地层相互作用情况的研究已有二三十年的历史,许多学者都建立了相关模型。其中,白家祉等人^[1]建立的“多元幂积侧向切削模型”考虑的因素比较全面,但涉及到大量参数反演,需要大量的现场资料或实验资料,因而现场应用价值不高;高德利、李子丰和闫铁等人^[2-4]的三维钻速方程都只是建立了力与机械钻速的关系,没有考虑钻头转速对机

收稿日期: 2014-01-17; **改回日期:** 2014-11-30。

作者简介: 刘军波(1971—),男,湖北武汉人,1994年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业,2011年获中国石油大学(华东)石油与天然气工程专业工程硕士学位,工程师,现主要从事钻井工艺与技术方面的工作。

联系方式: (022)66916393, liujb13@cosl.com.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目“气体钻井井眼轨迹偏斜机理与控制理论研究”(编号:51174220)、中国石油科技创新基金项目“页岩气水平井钻井优化设计研究”(编号:2011D-5006-0310)资助。

械钻速以及转速对钻头和地层各向异性指数的影响。而按文献[5]对钻头各向异性指数的定义,不同钻头转速下测量出来的钻头各向异性指数是不同的;同理可知,按以前的地层各向异性指数定义,不同钻头转速下测量出来的地层各向异性指数也是不同的。但是,钻头各向异性指数与地层各向异性指数是钻头和地层本身的性质参数,在自身没有发生改变的情况下,不会因为外界测量参数的改变而改变。为此,笔者重新定义了钻头各向异性指数和地层各向异性指数,建立了考虑钻头转速影响的新三维钻速方程,并利用该方程进行了实例分析,分析了其实用价值。

1 各向异性指数的定义

1.1 地层的各向异性

地层的各向异性程度可以用地层各向异性指数来表征。假设钻头为各向同性,所钻地层为正交各向异性地层,定义钻井效率和地层各向异性指数为:

$$\begin{cases} D_{\text{dip}} = \frac{v_{\text{dip}}}{F_{\text{dip}} n^{\lambda_1}} \\ D_{\text{str}} = \frac{v_{\text{str}}}{F_{\text{str}} n^{\lambda_2}} \\ D_n = \frac{v_n}{F_n n^{\lambda_3}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{r1} = \frac{D_{\text{dip}}}{D_n} \\ I_{r2} = \frac{D_{\text{str}}}{D_n} \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_{dip} , D_{str} 和 D_n 分别为地层倾向、走向及法向的钻井效率; v_{dip} , v_{str} 及 v_n 分别为钻头沿地层倾向、走向及法向的机械钻速, m/h; F_{dip} , F_{str} 和 F_n 分别为钻头沿地层倾向、走向及法向的净作用力, kN; n 为钻头转速, r/min; λ_1 , λ_2 和 λ_3 分别为地层倾向、走向和法向的转速指数; I_{r1} 和 I_{r2} 分别为地层倾向和走向的各向异性指数。

1.2 钻头的各向异性

钻头的各向异性是指钻头在不同方向上钻进能力的差异。一般而言,无论是牙轮钻头还是 PDC 钻头,其结构都有利于向前(即沿轴向)钻进,钻头沿轴向的钻进效率优于沿侧向的钻进效率,即存在钻进效率的各向异性。钻头的各向异性可用钻头各向异性指数 I_b 来表征。假设各向异性钻头在各向同性地层里钻进,可定义钻井效率和钻头各向异性指数为:

$$\begin{cases} D_l = \frac{v_l}{F_l n^{\lambda_4}} \\ D_a = \frac{v_a}{F_a n^{\lambda_5}} \\ I_b = \frac{D_l}{D_a} \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_a 和 D_l 分别为钻头轴向和侧向的钻井效率; F_a 和 F_l 分别为钻头轴向和侧向的净作用力, kN; v_a 和 v_l 分别为钻头轴向和侧向的机械钻速, m/h; λ_4 和 λ_5 分别为钻头侧向和轴向的转速指数; I_b 为钻头的各向异性指数^[6-9]。

2 考虑钻头转速新三维钻速方程的建立

2.1 坐标系的建立

建立了大地坐标系、地层坐标系、井底坐标系、钻头坐标系等 4 个坐标系,均取钻头处为坐标原点 O 。

2.1.1 大地坐标系 ($O-XYZ$)

建立的大地坐标系 ($O-XYZ$) 中, X 在水平面内并指向正东方向, Y 在水平面内并指向正北方向, Z 垂直于 XOY 平面并指向上方,如图 1 所示。

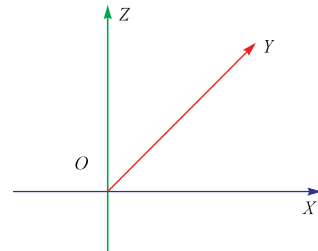


图 1 建立的大地坐标系

Fig. 1 Established geodetic coordinates

2.1.2 地层坐标系 ($O-X_f Y_f Z_f$)

建立的地层坐标系 ($O-X_f Y_f Z_f$) 中, X_f 沿地层面指向倾向方向, Y_f 沿地层面走向并符合右手法则, Z_f 垂直于地层面并指向外法线方向,如图 2 所示。图 2 中, β 为地层倾向角, ($^\circ$)。

2.1.3 井底坐标系 ($O-X_d Y_d Z_d$)

建立的井底坐标系 ($O-X_d Y_d Z_d$) 中, X_d 指向井眼低边, Z_d 垂直于井底平面并指向外法线方向, Y_d 垂直于 $X_d O Z_d$ 平面并符合右手法则,如图 3 所示。图 3 中, α 为井斜角, ($^\circ$)。

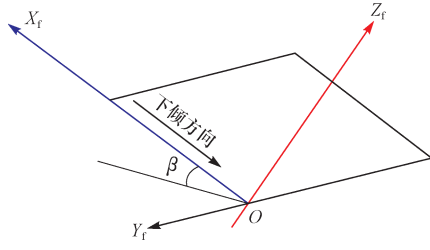


图2 建立的地层坐标系

Fig. 2 Established formation coordinates

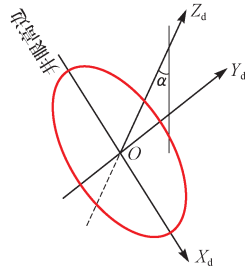


图3 建立的井底坐标系

Fig. 3 Established bottomhole coordinates

2.1.4 钻头坐标系(O-X_b Y_b Z_b)

建立的钻头坐标系(O-X_b Y_b Z_b)中, Z_b 沿钻柱变形后的切线方向指向上方, X_b 轴垂直于 Z_b 轴指向井眼低边, Y_b 轴垂直于 X_b OZ_b 平面并符合右手法则, 如图4所示。

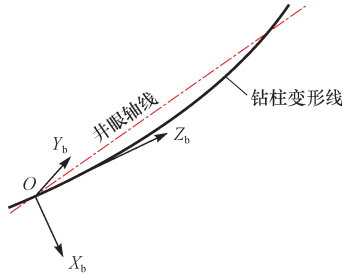


图4 建立的钻头坐标系

Fig. 4 Established bit coordinates

2.2 坐标系之间的转换关系

上述4个坐标系是可以相互转换的。由地层坐标系到大地坐标系的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} e_X \\ e_Y \\ e_Z \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} e_{X_f} \\ e_{Y_f} \\ e_{Z_f} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\cos \beta \sin \phi_f & \cos \phi_f & \sin \beta \sin \phi_f \\ -\cos \beta \cos \phi_f & -\sin \phi_f & \sin \beta \cos \phi_f \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: ϕ_f 为地层下倾方位角, ($^\circ$)。

由井底坐标系到大地坐标系的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} e_X \\ e_Y \\ e_Z \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} e_{X_d} \\ e_{Y_d} \\ e_{Z_d} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \sin \phi & \cos \phi & -\sin \alpha \sin \phi \\ -\cos \alpha \cos \phi & -\sin \phi & -\sin \alpha \cos \phi \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: ϕ 为井斜方位角, ($^\circ$)。

由于地层坐标系和井底坐标系是不断变化的, 直接求地层坐标系到井底坐标系的转换矩阵比较困难, 因此要先求出地层坐标系和井底坐标系到恒定大地坐标系的转换矩阵, 再据此求得到地层坐标系到井底坐标系的变换关系。由地层坐标系到井底坐标系的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} e_{X_d} \\ e_{Y_d} \\ e_{Z_d} \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} e_{X_f} \\ e_{Y_f} \\ e_{Z_f} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{D} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \quad (9)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} d_{11} = \cos \alpha \cos \beta \cos \Delta \phi - \sin \alpha \sin \beta \\ d_{12} = -\cos \alpha \sin \Delta \phi \\ d_{13} = -\cos \alpha \sin \beta \cos \Delta \phi - \sin \alpha \cos \beta \\ d_{21} = \cos \beta \sin \Delta \phi \\ d_{22} = \cos \Delta \phi \\ d_{23} = -\sin \beta \sin \Delta \phi \\ d_{31} = \sin \alpha \cos \beta \cos \Delta \phi + \cos \alpha \sin \beta \\ d_{32} = -\sin \alpha \sin \Delta \phi \\ d_{33} = -\sin \alpha \sin \beta \cos \Delta \phi + \cos \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta \phi = \phi - \phi_f \quad (12)$$

由钻头坐标系到井底坐标系的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} e_{X_d} \\ e_{Y_d} \\ e_{Z_d} \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} e_{X_b} \\ e_{Y_b} \\ e_{Z_b} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{其中 } \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \sin \theta_x \sin \theta_y & \sin \theta_x \cos \theta_y \\ 0 & \cos \theta_y & -\sin \theta_y \\ -\sin \theta_x & \sin \theta_y \cos \theta_x & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: θ_x, θ_y 分别为钻头转角在 $X_d OZ_d$ 平面和 $Y_d OZ_d$

平面上的投影角, rad。

钻头坐标系和井底坐标系的相对位置关系如图 5 所示。 θ_x 符号约定: 正对 Y_d 正方向, 如果 Z_d 轴正向旋转到 Z_b 轴正向所转过的角度为逆时针, 则 θ_x 取正, 反之取负。 θ_y 符号约定: 正对 X_d 正方向, 如果 Y_d 轴正向旋转到 Y_b 轴正向所转过的角度为逆时针, 则 θ_y 取正, 反之取负。

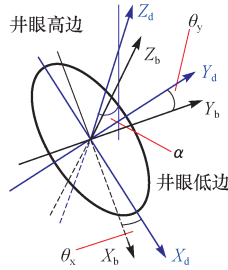


图 5 钻头坐标系和井底坐标系的相对位置关系

Fig. 5 Relative position relation of bottomhole coordinates and bit coordinates

2.3 方程的推导

设 v_{xd} , v_{yd} 和 v_{zd} 分别为井底平面上钻头机械钻速沿 X_d , Y_d 和 Z_d 方向的分量, F_{xd} , F_{yd} 和 F_{zd} 分别为井底平面上钻头机械力沿 X_d , Y_d 和 Z_d 方向的分量, 由地层各向异性和钻井效率的定义, 它们之间的关系可表示为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{dip} \\ v_{str} \\ v_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} D_{dip} & 0 & 0 \\ 0 & D_{str} & 0 \\ 0 & 0 & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n^{\lambda_1} & 0 & 0 \\ 0 & n^{\lambda_2} & 0 \\ 0 & 0 & n^{\lambda_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{dip} \\ F_{str} \\ F_n \end{bmatrix} \\ &= D_n \begin{bmatrix} I_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & I_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n^{\lambda_1} & 0 & 0 \\ 0 & n^{\lambda_2} & 0 \\ 0 & 0 & n^{\lambda_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{dip} \\ F_{str} \\ F_n \end{bmatrix} \\ &= D_n \mathbf{I}_r \mathbf{N}_1 \begin{bmatrix} F_{dip} \\ F_{str} \\ F_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{其中} \quad \mathbf{I}_r = \begin{bmatrix} I_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & I_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} n^{\lambda_1} & 0 & 0 \\ 0 & n^{\lambda_2} & 0 \\ 0 & 0 & n^{\lambda_3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

净作用力 F_{dip} , F_{str} 和 F_n 可以通过井底平面上钻头机械力 F_{xd} , F_{yd} 和 F_{zd} 转换而来。由于得出式 (15) 的前提是钻头为各向同性, 因此, 需要对钻头的机械力进行等效化处理: 首先, 将钻头机械力转换到

钻头坐标系中; 然后, 假设钻头为各向同性, 即如果钻头侧向和轴向的受力大小相等, 那么钻头在侧向和轴向的机械钻速也相同, 进一步可以表述为“此时钻头的侧向和轴向切削能力均为 $D_n n^{\lambda_5}$ ”; 在钻头各向同性的假设下, 钻头机械力的等效力在钻头坐标系下可以表示为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{D_1 n^{\lambda_4}}{D_n n^{\lambda_5}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D_1 n^{\lambda_4}}{D_n n^{\lambda_5}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{F}^{-1} \begin{bmatrix} F_{xd} \\ F_{yd} \\ F_{zd} \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} I_b & 0 & 0 \\ 0 & I_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n^{\lambda_4 - \lambda_5} & 0 & 0 \\ 0 & n^{\lambda_4 - \lambda_5} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{F}^{-1} \begin{bmatrix} F_{xd} \\ F_{yd} \\ F_{zd} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: F_1 , F_2 和 F_3 分别为钻头各向同性条件下钻头机械力的等效力在 X_b , Y_b 和 Z_b 方向的分量, kN。

将钻头机械力的等效力从钻头坐标系转换到地层坐标系, 转换式为:

$$\begin{bmatrix} F_{dip} \\ F_{str} \\ F_n \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F}_b \mathbf{N}_2 \mathbf{F}^{-1} \begin{bmatrix} F_{xd} \\ F_{yd} \\ F_{zd} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\text{其中} \quad \mathbf{I}_b = \begin{bmatrix} I_b & 0 & 0 \\ 0 & I_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} n^{\lambda_4 - \lambda_5} & 0 & 0 \\ 0 & n^{\lambda_4 - \lambda_5} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{F}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & 0 & -\sin \theta_x \\ \sin \theta_x \sin \theta_y & \cos \theta_y & \sin \theta_y \cos \theta_x \\ \sin \theta_x \cos \theta_y & -\sin \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{D}^{-1} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (23)$$

将式 (19) 代入式 (15), 得:

$$\begin{bmatrix} v_{dip} \\ v_{str} \\ v_n \end{bmatrix} = D_n \mathbf{I}_r \mathbf{N}_1 \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F}_b \mathbf{N}_2 \mathbf{F}^{-1} \begin{bmatrix} F_{xd} \\ F_{yd} \\ F_{zd} \end{bmatrix} \quad (24)$$

将地层坐标系中的机械钻速转换到井底坐标系中, 可得:

$$\begin{bmatrix} v_{xd} \\ v_{yd} \\ v_{zd} \end{bmatrix} = D_n \mathbf{D} \mathbf{I}_r \mathbf{N}_1 \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F}_b \mathbf{N}_2 \mathbf{F}^{-1} \begin{bmatrix} F_{xd} \\ F_{yd} \\ F_{zd} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式(25)即为考虑钻头转速影响的新三维钻速方程。

针对某种钻头,式(25)中的 I_b, λ_4 和 λ_5 可以通过试验测得,具体方法可以参考文献[5]和修正的杨格钻速方程之五点法钻速试验求解系数,也可以通过三维钻速方程与 BHA 力学分析反演求取。 I_{r1}, I_{r2} 及 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 可以通过岩心地面试验测得[8],也可以通过该三维钻速方程与 BHA 力学分析反演求取; I_{r1}, I_{r2} 还可以通过分析随钻声波测井资料求取[10-12]。

3 钻头转速影响机械钻速实例分析

由式(25)可得,钻头转速、转速指数、钻头机械力、钻头各向异性指数、地层各向异性指数等参数的变化都对机械钻速有影响。钻头机械力、钻头各向异性指数和地层各向异性指数对机械钻速的影响在以前的三维钻速方程中已经分析过,这里仅分析钻头转速对机械钻速的影响规律。

由式(25)可知机械钻速是由钻头转速的幂函数参与组成的多项式,为了定量描述机械钻速随钻头转速的变化规律,选取实例如下:井斜角 $\alpha=0^\circ$,地层倾角 $\beta=30^\circ$,井斜方位角和地层下倾方位角之差 $\Delta\phi=30^\circ$ 。则地层坐标系与井底坐标系的变换矩阵 D 为:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{3}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

其逆矩阵为:

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{3}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{1}{4} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

为减少计算量,对矩阵 F 和 F^{-1} 进行简化。一般情况下,钻头转角小于 0.4° 可视为小量[1],则可以作如下近似处理:

$$\begin{cases} \cos \theta_x = 1, \sin \theta_x = \theta_x, \\ \cos \theta_y = 1, \sin \theta_y = \theta_y \end{cases} \quad (28)$$

其中 $\theta_x, \theta_y \in [0, 0.007] \text{ rad}$ (29)

将式(28)带入式(14),并忽略二阶小量,则钻头

坐标系与井底坐标系的变换矩阵 F 为:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta_x \\ 0 & 1 & -\theta_y \\ -\theta_x & \theta_y & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

其逆矩阵为:

$$F^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\theta_x \\ 0 & 1 & \theta_y \\ \theta_x & -\theta_y & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

取钻头转角 $\theta_x=0.003 \text{ rad}, \theta_y=0.005 \text{ rad}$,则矩阵 F 为:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.003 \\ 0 & 1 & -0.005 \\ -0.003 & 0.005 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

其逆矩阵为:

$$F^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.003 \\ 0 & 1 & 0.005 \\ 0.003 & -0.005 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

一般而言,钻头的轴向切削能力高于侧向,沿着地层法线方向钻进要比沿着地层倾向或地层走向钻进容易,所以: $0 < I_{r1}, I_{r2} < 1; 0 < I_b < 1, \lambda_3 > \lambda_1, \lambda_3 > \lambda_2, \lambda_5 > \lambda_4$, 并且 $0 < \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5 < 1$ 。取 $\lambda_1 = 0.60, \lambda_2 = 0.65, \lambda_3 = 0.80, \lambda_4 = 0.70, \lambda_5 = 0.80, I_{r1} = 0.70, I_{r2} = 0.75, I_b = 0.50, D_n = 0.01, F_{xd} = F_{yd} = F_{zd} = 100 \text{ kN}$, 将以上数据及式(26)、(27)、(32)和(33)代入式(25)中,计算当钻头转速从 40 r/min 增至 180 r/min 时机械钻速的变化规律,结果如图 6 所示。

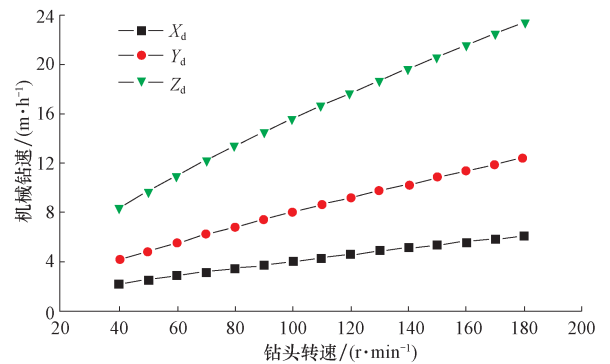


图 6 钻头转速对井底 3 个方向机械钻速的影响

Fig. 6 Influence of rotary speed of the bit on ROP in three directions at bottomhole

从图 6 可以看出,随着钻头转速从 40 r/min 增至 180 r/min ,井底平面 X_d 方向的机械钻速从 2.3 m/h 提高至 6.1 m/h ,井底平面 Y_d 方向的机械钻速从 4.2 m/h 提高至 12.5 m/h ,井底法向 Z_d 方

向的机械钻速从 8.4 m/h 提高至 23.4 m/h。通过实例分析可知:井底 3 个方向的机械钻速随钻头转速增加而提高的幅度并不相同,井底法向 Z_d 方向机械钻速的提高幅度要大于井底 X_d 和 Y_d 方向机械钻速的提高幅度。

4 结论与认识

1) 建立的新三维钻速方程考虑了钻头转速对机械钻速的影响,这样更符合现场实际情况。对钻头和地层的各向异性指数重新进行了定义,考虑钻头转速因素,避免了因钻头转速改变而导致测出的各向异性指数不同。

2) 井底 3 个方向的机械钻速随钻头转速增加而提高的幅度并不相同,井底法向 Z_d 方向机械钻速的提高幅度要大于井底 X_d 和 Y_d 方向机械钻速的提高幅度。

3) 新三维钻速方程与 BHA 力学分析相结合,作为正演模型可以预测钻头转速变化对机械钻速和井眼轨迹的影响,进一步可以通过调节钻头转速、钻头机械力、钻头各向异性指数等参数来控制井眼轨迹;作为反演模型可以进行钻头和地层各向异性参数反演。

参 考 文 献

References

- [1] 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,1990:3-25.
Bai Jiazhì, Su Yinao. Theory and practice of deviation control [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 3-25.
- [2] 高德利,刘希圣,黄荣樽.钻头与地层相互作用的三维宏观分析[J].石油大学学报:自然科学版,1989,13(1):23-31.
Gao Deli, Liu Xisheng, Huang Rongzun. Three dimensional macro analysis of rock bit interaction[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1989, 13(1): 23-31.
- [3] 闫铁,张建群.钻头与地层相互作用的三维理论分析[J].天然气工业,1991,11(6):40-46.
Yan Tie, Zhang Jianqun. Analysis of three dimensional theory of rock bit interaction[J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(6): 40-46.
- [4] 李子丰,李敬元.三维钻速方程及其反演模型[J].西部探矿工程,1994,6(2):8-11.
Li Zifeng, Li Jingyuan. Three dimensional drilling rate equation and the inversion model[J]. West-China Exploration Engineering, 1994, 6(2): 8-11.
- [5] 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试验[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 test of bit anisotropic drilling characteristics[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1991, 15(6): 28-31.
- [6] 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. An expression method of bit and formation of anisotropic drilling characteristics[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(2): 126-132.
- [7] 高德利,刘希圣,徐秉业.井眼轨迹控制[M].东营:石油大学出版社,1994:130-190.
Gao Deli, Liu Xisheng, Xu Bingye. Prediction and control of wellbore trajectory[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1994: 130-190.
- [8] 高德利.地层各向异性的评估方法[J].石油学报,1993,14(2):96-101.
Gao Deli. Method for the evaluation of formation anisotropy [J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(2): 96-101.
- [9] 高德利,刘希圣.典型地层的各向异性钻井特性[J].石油大学学报:自然科学版,1990,14(5):1-8.
Gao Deli, Liu Xisheng. Anisotropic drilling characteristics of typical formation[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1990, 14(5): 1-8.
- [10] 潘起峰,高德利.用声波法评价地层可钻性各向异性的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):162-167.
Pan Qifeng, Gao Deli. Experimental study on evaluation of formation drillability anisotropy by acoustic wave velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 162-167.
- [11] 周祖辉,尹宏锦.岩石可钻性各向异性的微钻头试验研究[J].华东石油学院学报:自然科学版,1986,10(4):22-24.
Zhou Zuhui, Yin Hongjin. Study of micro drill test of rock drillability anisotropy[J]. Journal of East China Petroleum Institute: Edition of Natural Science, 1986, 10(4): 22-24.
- [12] 王瑞甲,乔文孝,鞠晓东.利用随钻正交偶极子声波测井评价地层各向异性的数值研究[J].地球物理学报,2012,55(11):3871-3873.
Wang Ruijia, Qiao Wenxiao, Ju Xiaodong. Numerical study of formation anisotropy evaluation using cross dipole acoustic LWD[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3871-3873.

[编辑 令文学]