

DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2018.07.19.04

文章编号: 1674-5086(2020)01-0084-07

中图分类号: TE242

文献标志码: A

基于钻柱动力学的井筒摩阻系数预测与应用

宋巍¹, 胡中志^{2*}, 周岩¹, 沈园园¹, 魏纳³

1. 中国石油冀东油田钻采工艺研究院, 河北 唐山 063200; 2. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川 自贡 643000;
3. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

摘要: 井筒摩阻系数是钻井设计和施工阶段准确预测和控制摩阻扭矩的关键因素, 对比摩阻扭矩的实测值与预测值可预防钻井事故的发生。为此, 基于钻柱动力学摩阻扭矩计算模型, 结合近钻头多参数测量仪实测数据, 开展了大斜度井实钻条件下套管段和裸眼段摩阻系数的预测方法研究, 结果成功应用于同类型邻井的三开钻进阶段摩阻扭矩分析与控制。现场应用结果表明, 实钻井筒套管内摩阻系数 0.27~0.29, 裸眼段摩阻系数 0.39~0.41, 均高于经验值; 案例井钩载和扭矩预测值与实际值的误差满足施工精度要求, 依托摩阻扭矩预测图版实时监测实钻摩阻扭矩的异常变化, 保障了该井顺利施工。研究结果可为大斜度井钻机设备优选、井身剖面优化和现场钻井施工方案决策等提供科学依据。

关键词: 钻柱动力学; 摩阻预测; 摩阻系数; 计算模型; 现场应用

Prediction and Application of the Shaft Friction Coefficient Based on Drill-string Dynamics

SONG Wei¹, HU Zhongzhi^{2*}, ZHOU Yan¹, SHEN Yuanyuan¹, WEI Na³

1. Drilling Technology Research Institute, Jidong Oilfield, PetroChina, Tangshan, Hebei 063200, China
2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong, Sichuan, 643000, China
3. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: Accurate prediction and control of friction torque during the design and construction of drilling phases can prevent drilling accidents, and the shaft friction coefficient is a key factor in predicting friction torque. Therefore, we predicted the friction coefficients for the casing and open-hole sections for highly-deviated well drilling based on a calculation model for friction torque. This was based on drill-string dynamics and data from a near-bit, multi-parameter measuring instrument. The results were successfully applied to the analysis and control of friction torque in the third-spud drilling stage of adjacent wells of the same type. The field application results revealed that the friction coefficient of the actual drill casing was 0.27~0.29, and the friction coefficient of the open hole was 0.39~0.41, both of which are higher than the empirical values. The error between the predicted and actual values of the hook load and the torque of the case satisfied the construction accuracy requirements. The friction torque during actual drilling was monitored in real time to detect abnormal changes based on the friction torque prediction chart, which ensured smooth construction of the well. The results provide a scientific basis for optimizing drilling equipment and the well profile of highly deviated wells, and for planning the on-site drilling construction.

Keywords: drill-string dynamics; friction torque prediction; friction coefficient; computation model; field application

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20190930.0839.028.html>

宋巍, 胡中志, 周岩, 等. 基于钻柱动力学的井筒摩阻系数预测与应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 84-90.

SONG Wei, HU Zhongzhi, ZHOU Yan, et al. Prediction and Application of the Shaft Friction Coefficient Based on Drill-string Dynamics[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(1): 84-90.

引 言

近年来,冀东油田大位移井、大斜度井比例逐渐增加,实钻摩阻扭矩的预测与控制已成为保证钻进安全的核心问题,其关键在于如何准确计算摩擦力。而摩阻系数是影响摩阻扭矩的最主要因素。针对该问题,研究人员从多种角度开展了相关研究,主要包括以下几种方式:经验值、实验测定、静力学反算和 BP 算法等,张建群等考虑钻柱拉力增量对侧向力的影响规律,计算了大庆油田定向井井眼摩阻系数^[1];代奎等基于柔性模型编制了摩阻因素计算软件^[2];申静波等基于改进 BP 算法建立了摩阻系数计算模型,将神经网络应用于管柱力学研究^[3];吴泽兵等综合 Johancsik 模型和 Aadnoy 3D 模型并考虑管柱刚度进行了钻柱与井壁摩阻系数的计算与井底钻压的预测^[4];Robello 给出了不同工况下(静止、滑动钻进、复合钻进等)摩阻系数的计算方法,指导了在钻前设计、实钻监测阶段的应用^[5];Wu 和 Hareland 等基于有限元模型计算了钻杆与套管、裸眼井壁的摩阻系数,得到了实钻钻压^[6]。

实钻井眼—钻柱系统工作环境复杂,国内外学者针对摩阻扭矩理论与现场降摩减扭措施开展了大量研究。Maehs 等以复杂“S”型井为例阐述了根据现场实时数据开展降摩减阻的经验做法^[7-8];Tsai 等基于 DAHL 摩擦模型开展了振动减阻效应的分析,并进行了有限元验证^[8-9];易浩等建立了考虑钻杆接头的摩扭计算模型,开展了不同工况下各接头接触力大小及方向的预测分析^[10];何世明等以理论分析和实钻工程特征为基础,建立了小井眼摩扭计算模型,并结合实钻数据全面开展了钻具组合、钻井液性能、井眼轨迹等对计算结果的影响规律研究^[11];高德利等开发出大位移三维井眼摩阻扭矩计算软件,在南海西江大位移井开发工程中应用效果较好^[12];贺志刚等采用空间斜面假设建立了适合大位移井的摩阻扭矩三维软杆计算模型,与实测结果吻合度高^[13],祝效华等针对大位移井钻杆接头剪切失效的突出问题,根据钻杆接头受扭时的变形协调关系,设计了一种高抗扭双台肩钻杆接头^[14]。借鉴

钻柱动力学摩阻扭矩相关计算理论^[15-19],结合冀东油田与中国石油大学(北京)合作研制的近钻头多参数测量仪的实测钻压数据^[20-21],开展了实钻井筒摩阻系数的计算,并成功应用于邻井摩阻扭矩预测,该方法可为精细预测实钻摩阻扭矩、实时评估井眼清洁情况及分析钻井液性能变化规律等提供数据支持,对保证大斜度井钻井安全具有重要意义。

1 钻柱动力学摩扭计算模型

1.1 钻柱—井壁互作用模型

大斜度井钻柱在井眼中的运动形态包括接触井壁和自由运动两种状态,当发生接触时,钻柱与井壁在挤压作用下均发生形变,接触示意图见图 1。

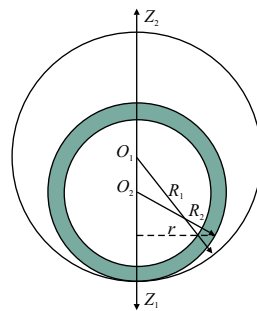


图 1 钻柱与井壁接触示意图

Fig. 1 Contact diagram between drill string and wall

以井壁为研究对象,将接触区域视为圆球面,当钻柱产生最大形变时接触点径向分速度为零,同时钻杆在横截面方向获得最大位移。假设接触圆半径为 r ,趋近距离为 α ,根据弹性力学赫兹接触理论以及逻辑弹簧阻尼理论,发生最大形变时,接触力可表示为

$$F_n = K\alpha + cv_r \quad (1)$$

式中: F_n —接触力, N;

K —岩石和钻柱之间的刚度系数, N/m;

α —趋近距离, m;

c —岩石和钻柱之间的阻力系数, (N·s)/m;

v_r —节点位置的径向速度, m/s。

结合弹性力学半空间体受法向力分析局部变形^[20],可得到接触力的计算公式为

$$3\sqrt[3]{F_n} = K \left[\frac{9}{16} \pi^2 \left(\frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2} \right)^2 \frac{R_1-R_2}{R_1 R_2} \right]^{\frac{1}{3}} - (\sqrt[3]{Y_1} + \sqrt[3]{Y_2}) \quad (2)$$

式中: μ_1, μ_2 —岩石和钻柱的泊松比, 无因次;

E_1, E_2 —岩石和钻柱的弹性模量, N/m²;

R_1, R_2 —井眼半径和钻柱外径, m。

中间变量 Y_1, Y_2 表达式为

$$Y_{1,2} = -\frac{9}{16}\pi^2 K^3 \left(\frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2} \right)^2 \frac{R_1-R_2}{R_1 R_2} + \frac{9}{2} \left[-3c v_r \pm \sqrt{9c^2 v_r^2 + 3\pi^2 K^3 \left(\frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2} \right)^2 \frac{R_1-R_2}{4R_1 R_2}} \right] \quad (3)$$

1.2 钻柱受力分析

在大斜度井实钻过程中, 钻柱在多种力的综合作用下易发生弯曲变形并与井壁摩擦碰撞, 该过程属于复杂接触非线性力学行为, 受力主要包括: 浮重、大钩拉力、井口扭矩、井壁摩擦力、摩擦扭矩、钻头反作用力及反作用力矩等。根据有限元思想, 将钻柱系统离散为可用空间二节点梁单元代替的多个相连的钻柱单元。取某钻柱单元与井壁接触过程为研究对象, 钻柱单元受力见图 2(其中, T_A, T_B —钻柱单元上下节点 A 和 B 处的轴向力, N ; m —质量, kg ; a_t —钻柱的轴向加速度, m/s^2 ; g —重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$; f —切向摩擦力, N ; N —支持力, N)。

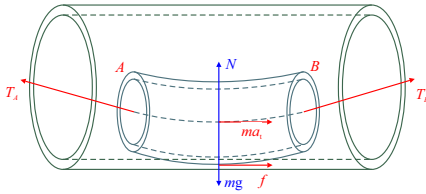


图 2 钻柱单元受力分析

Fig. 2 Mechanical analysis of drill string unit

假设钻柱上节点为 A , 下节点为 B , 分别建立轴线和法线方向的力学平衡方程式。

井眼轴向方向

$$ma_t = -T_A \cos \alpha + T_B \cos \beta + mg \cos \gamma - \text{sign}(f_t(v_A))f_A + \text{sign}(f_t(v_B))f_B \quad (4)$$

井眼法向方向

$$ma_n = T_A \sin \alpha + T_B \sin \beta - mg \sin \gamma + \text{sign}(f_n(u_{A_t}))f_c(u_{A_t} + r_A - R_A)F_{nA} + \text{sign}(f_n(u_{B_t}))f_c(u_{B_t} + r_B - R_B)F_{nB} \quad (5)$$

式中: a_n —法向加速度, m/s^2 ;

α — T_A 与轴向的夹角, $(^\circ)$;

β — T_B 与轴向的夹角, $(^\circ)$;

γ —垂向与轴向的夹角, $(^\circ)$;

$\text{sign}()$ —符号函数;

$f_t()$ —轴向速度实时方向判断函数;

v_A, v_B — A, B 处的速度矢量, m/s ;

f_A, f_B — A, B 处的轴向摩擦力, N ;

$f_n()$ —横向位移方向判断函数, 钻柱在井眼低边运动时为正, 钻柱在井眼高边运动时为负;

$f_c()$ —钻柱节点碰撞判断函数;

u_{A_t}, u_{B_t} — A, B 处的钻柱位移, m ;

r_A, r_B — A, B 处的井壁内径, m ;

R_A, R_B — A, B 处的钻柱外径, m ;

F_{nA}, F_{nB} — A, B 处与井壁碰撞后的接触力, N 。

根据库伦摩擦定律, 切向摩擦力可表示为

$$f = \mu' F_n \quad (6)$$

式中: μ' —切向摩擦系数, 无因次。

钻柱节点的总扭矩为摩擦扭矩与主动扭矩的合成

$$T_u = T_0 + f r_B \quad (7)$$

式中: T_u —总扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$;

T_0 —主动扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

与差分公式形式的计算模型相比, 钻柱动力学摩扭计算模型的优势在于: 将钻柱与井壁的碰摩处理成了随机边界, 克服了钻柱单元紧贴下井壁及摩擦阻沿钻柱长度均匀分布的局限性, 同时考虑了钻柱运动的影响。

1.3 边界条件

1.3.1 上端边界

旋转钻进时, 钻柱受转盘限制, 井口节点除了沿轴向平移和绕 z 轴转动, 其余自由度全约束, 可表示为

$$\begin{cases} u_{x=0,t} = 0, u_{y=0,t} = 0 \\ \theta_{x=0,t} = 0, \theta_{y=0,t} = 0, \omega_{z=0,t} = \Omega \end{cases} \quad (8)$$

式中: $u_{x=0,t}, u_{y=0,t}$ —井口节点 x 向和 y 向的横向位移, m ;

$\theta_{x=0,t}, \theta_{y=0,t}$ —井口节点 x 向和 y 向的横向旋转角, $(^\circ)$;

$\omega_{z=0,t}$ —井口节点的旋转角速度, rad/s ;

Ω —钻柱旋转速度, r/min 。

1.3.2 下端边界

结合岩石的弹塑性本构, 以钻头破岩模拟下端钻压, 当发生相互作用时产生节点力(压力和摩擦力), 法向无相对运动, 切向可滑动, 切向接触使用 Coulomb 摩擦模型

$$\sqrt{F_1^2 + F_2^2} \leq \mu F_N \quad (9)$$

式中: F_1, F_2 —切向和法向接触力, N;
 μ —摩阻系数, 无因次;
 F_N —极限摩擦力, N。

2 全井段摩阻系数预测

钻柱动力学仿真分析模块的输入条件包括以下几项: 井眼轨迹(井深、井斜角、方位角)、钻具组合(不同尺寸钻具的内外径尺寸和长度)、泥浆性能(密度和黏度)、井身结构、钻柱转速、实测钻压由近钻头多参数测量仪提供。由于不同井段的摩阻系数存在差异^[2], 因此分段开展套管段和裸眼段摩阻系数预测。计算时设定滑动摩阻系数与切向摩阻系数取值相同。

2.1 套管段摩阻系数的预测方法

给定套管内摩阻系数值初始值和计算误差 ε , 计算得到井口扭矩, 取计算时间段内的平均值, 比较该值与井口扭矩实测平均值的相对误差, 如式(10)所示

$$\left| \frac{T'_u - T_u}{T_u} \right| \leq \varepsilon$$

(10)

式中:

T'_u —计算时间段内井口扭矩平均值, N·m;
 ε —计算误差, %。

同理, 比较钩载的计算平均值与实测平均值的相对误差, 如式(11)所示。

若同时满足式(10)和式(11), 则认为此时摩阻系数即为管内实际摩阻系数; 否则重新选择摩阻系数, 重复上述计算过程, 直至满足条件, 从而确定套管段摩阻系数。

$$\left| \frac{F'_u - F_u}{F_u} \right| \leq \varepsilon$$

(11)

式中:

F'_u —钩载计算平均值, kN;
 F_u —钩载实测平均值, kN。

2.2 裸眼段摩阻系数的预测方法

以得到的套管段摩阻系数为基础, 给定裸眼段摩阻系数初值, 其他步骤与套管段摩阻系数的计算流程类似, 最终得到裸眼段摩阻系数。

2.3 计算实例

以南堡 43-平 4006 井为例, 该井为造斜点 1 810 m 的双增双稳五段制剖面井, 计算基础数据如下: 技术套管下深 2 942 m, 井斜角 53.44°, 钻井液密度 1.15 g/cm³, 漏斗黏度 47 s, 计算井深 3 600 m; 钻具组合: $\phi 215.9$ mm 牙轮钻头 $\times 0.37$ m+ $\phi 172$ mm 螺杆 $\times 8.40$ m+ $\phi 209$ mm 扶正器 $\times 1.51$ m+ 浮阀 $\times 0.50$ m+ $\phi 165$ mm 无磁钻铤 $\times 9.05$ m+MWD 短节 $\times 1.97$ m+ $\phi 165$ mm 无磁钻铤 $\times 8.86$ m+ 近钻头测量短节 $\times 3.07$ m+ $\phi 127$ mm 加重钻杆 $\times 15$ 根 + 震击器 $\times 3.55$ m+ $\phi 127$ mm 加重钻杆 $\times 12$ 根 + $\phi 127$ mm 钻杆; 岩石和钻柱的泊松比分别取 0.33 和 0.20; 岩石和钻柱的弹性模量分别取 5.15×10^{10} , 2.10×10^{11} Pa; 岩石和钻柱间的刚度系数为 6.57×10^{11} N/m; 岩石和钻柱之间阻力系数为 1.56×10^6 N·s/m; 钻柱旋转速度 60 r/min; 套管密度 7.86 g/cm³。

计算套管段的摩阻系数, 取计算误差 ε 为 5%, 记录下钻至套管鞋位置的空转数据, 此时井底钻压为 0, 套管摩阻系数取值不同时扭矩计算值与实测值的对比见表 1。

表 1 套管摩阻系数取值不同时扭矩和钩载计算值与实测值的对比表

Tab. 1 Comparison of calculated/measured torque and hook load with different friction coefficients of casing

摩阻系数	井口扭矩			钩载		
	计算值/(kN·m)	实测值/(kN·m)	误差/%	计算值/(kN·m)	实测值/(kN·m)	误差/%
0.25	16.25	18	-9.72	1 191.34	1 093	8.40
0.26	16.71	18	-7.16	1 145.29	1 093	4.31
0.27	17.39	18	-3.39	1 127.76	1 093	2.80
0.28	17.84	18	-0.89	1 089.22	1 093	-0.62
0.29	18.47	18	2.61	1 066.53	1 093	-2.60
0.30	18.79	18	4.39	1 034.86	1 093	-5.41
0.31	19.16	18	6.44	1 016.75	1 093	-6.97

由表 1 可知, 套管段摩阻系数为 0.27~0.29 时, 扭矩和钩载的计算值与实测值相对误差符合精度要求。取中值 0.28 进行下步裸眼段摩阻系数计算, 并

以近钻头多参数测量仪实测数据作为井底钻压的输入值, 当裸眼段摩阻系数取值不同时, 详细计算结果对比见表 2。

表 2 裸眼井段段摩阻系数取值不同时扭矩和钩载计算值与实测值的对比表

Tab. 2 Comparison of calculated/measured torque and hook load with different friction coefficients of open hole

摩阻系数	井口扭矩			钩载		
	计算值/(kN·m)	实测值/(kN·m)	误差/%	计算值/(kN·m)	实测值/(kN·m)	误差/%
0.37	18.10	20	-9.50	1 213.51	1 110	9.33
0.38	18.71	20	-6.45	1 187.59	1 110	6.99
0.39	19.24	20	-3.80	1 161.48	1 110	4.64
0.40	19.83	20	-0.85	1 145.78	1 110	3.22
0.41	20.35	20	1.75	1 121.42	1 110	1.03
0.42	21.08	20	5.40	1 084.29	1 110	-2.32
0.43	21.73	20	8.65	1 063.63	1 110	-4.18

由表 2 可知,井口扭矩及井口轴力计算值与实测值的相对误差在 5% 范围内时所对应的裸眼段摩阻系数 0.39~0.41,套管内和裸眼段摩阻系数计算值均比经验值(套管内 0.25,裸眼段 0.30)偏大,原因可能是实钻裸眼段井径不规则,且有可能存在沉砂,导致摩阻系数的计算结果较大。

3 实钻摩阻预测分析实例

以南堡 43-平 4008 井现场试验数据为依据,进行三开井段(3 100~3 600 m)实钻预测,计算基础数据如下:技术套管下深 3 009.1 m,钻井液密度 1.15 g/cm³;钻具组合:φ215.9 mm PDC 钻头×0.33 m+172 mm 螺杆×8.12 m+210 mm 螺杆扶正器×0.55 m+φ165 mm 浮阀杆×0.50 m+φ172 mm 无磁钻杆×9.24 m+MWD 短节×1.56 m+521/410×0.37 m+φ127 mm 加重钻杆×15 根(141.29 m)+φ127 mm 钻杆;摩阻系数:该井与邻井南堡 43-平 4006 井井型相似,套管段取 0.28,裸眼段取 0.40;钻压 0~300 kN;钻杆转速 45~60 r/min。

图 3 为三开部分井段钩载和扭矩预测图版,可以看出:(1)钩载和扭矩计算值与实测值数据基本吻合,误差满足钻井现场施工精度要求,但计算值均略小于实测值,查看钻井资料发现,三开井段存在连续大肚子井段,最严重处井眼扩大率可达 22%,携砂效果差,导致所取的摩阻系数偏小。(2)在 3 150~3 250 m 井段钩载实测值存在异常,原因是:①该井段井斜角与设计值偏差较大,需减小钻压调整轨迹;②该井段钻速较快,三开钻进后未进行短起下操作,返砂效果差,增大了钻进摩阻。(3)在 3 400 m 左右井口扭矩计算值与实测值误差较大。对比邻井录井资料发现,该井段地层存在砾岩夹层,同时近钻头多参数测量仪数据表明(图 4),

此位置井底扭矩振幅较大,且钻进时存在憋跳,最大井底扭矩可达 10 kN·m,横向振动最大瞬时值可达 1.5 g,遂决定起钻更换三牙轮钻头,保证了后续安全钻进至完钻。

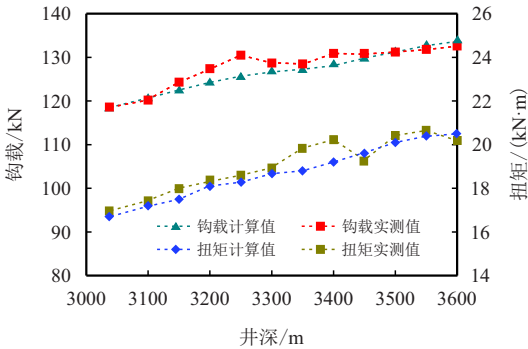


图 3 三开井段钩载和扭矩预测图版(3 100~3 600 m)
Fig. 3 Prediction curves of hook load and torque in third spud section (3 100~3 600 m)

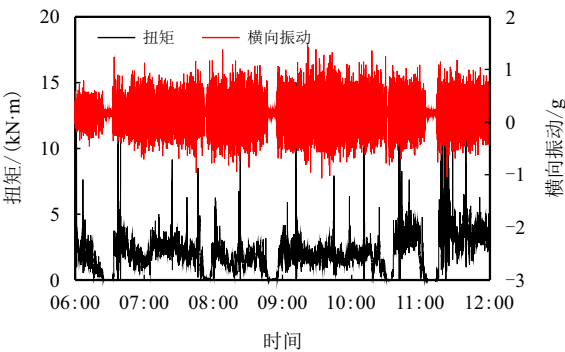


图 4 钻进至 3 400 m 左右时井底扭矩和横向振动随时间的变化规律
Fig. 4 Rules of down hole torque and transverse vibration with time when drilling to about 3 400 m

4 结 论

(1) 以近钻头多参数测量仪实测的井底钻压为基础,利用钻柱动力学摩阻扭矩的计算方法得到了

符合现场钻井施工精度要求的摩阻系数,为同类型井的钻井设计、实钻摩阻扭矩控制及事故处理提供了可靠数据。

(2) 预测得到的摩阻系数为套管段 0.27~0.29,裸眼段 0.30~0.41,均高于经验值或现场实验测得的摩阻系数,且不同井型、不同地层摩阻系数存在较大差异,仍需利用该方法开展不同区块大量实例井的计算与分析,掌握摩阻系数的变化规律。

(3) 南堡 43-平 4008 井的现场试验结果表明:编制摩阻扭矩预测图版是有效监测钻井安全的有效途径,通过实时监测摩阻扭矩异常值,达到优选钻井施工参数、优化钻井液性能的目的。

参考文献

- [1] 张建群,孙学增,赵俊平.定向井中摩擦阻力模式及其应用的初步研究[J].大庆石油学院学报,1989,13(4):23-28.
ZHANG Jianqun, SUN Xuezheng, ZHAO Junping. A preliminary study of frictional drag model and its application to directional wells[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1989, 13(4): 23-28.
- [2] 代奎,闫铁.水平井井眼摩阻因素的确定方法[J].大庆石油学院学报,1995,19(3):5-8.
DAI Kui, YAN Tie. Method of determining frictional coefficient of borehole of horizontal wells[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1995, 19(3): 5-8.
- [3] 申静波,闫铁,李井辉,等.基于改进BP算法的摩阻因素预测方法研究[J].计算机技术与发展,2018,28(1):164-168. doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2018.01.035
SHEN Jingbo, YAN Tie, LI Jinghui, et al. The research of friction coefficient prediction based on improved BP algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(1): 164-168. doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2018.01.-035
- [4] 吴泽兵,郭龙龙,潘玉杰.水平井钻井过程中井底钻压预测及应用[J].石油钻采工艺,2018,40(1):9-13. doi: 10.13639/j.odpt.2018.01.002
WU Zebing, GUO Longlong, PAN Yujie. Bottom hole WOB prediction in the process of horizontal well drilling and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 9-13. doi: 10.13639/j.odpt.2018.01.002
- [5] ROBELLO S. Friction factors: What are they for torque, drag, vibration, bottom hole assembly and transient surge/swab analyses?[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 73(3): 258-266. doi: 10.1016/j.petrol.-2010.07.007
- [6] WU A, HARELAND G, FAZAELIZADEH M. Torque & drag analysis using finite element method[J]. Modern Applied Science, 2011, 5(6): 13-27. doi: 10.5539/mas.v5n6p13
- [7] MAEHS J, RENNE S, LOGAN B, et al. Proven methods and techniques to reduce torque and drag in the pre-planning and drilling execution of oil and gas wells[C]. IDAC/SPE 128329, 2010. doi: 10.2118/128329-MS
- [8] TSAI C C, TSENG C H. The effect of friction reduction in the presence of in-plane vibrations[J]. Archive of Applied Mechanics, 2006, 75(2-3): 164-176. doi: 10.1007/s00419-005-0427-0
- [9] GHASEMLOONIA A, RIDEOUT D G, BUTT S D. Vibration analysis of a drillstring in vibration-assisted rotary drilling: Finite element modeling with analytical validation[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2013, 135(3): 032902. doi: 10.1115/1.4023333
- [10] 易浩,唐波,练章华,等.考虑接头的钻柱摩阻扭矩分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2006,28(4):85-89. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2006.04.023
YI Hao, TANG Bo, LIAN Zhanghua, et al. Analysis of drag and torque of drilling string with connectors[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2006, 28(4): 85-89. doi: 10.3863/j.issn.-1674-5086.2006.04.023
- [11] 何世明,汤明,熊继有,等.小井眼长水平段水平井摩阻扭矩控制技术[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(6):85-92. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2013.10.04.02
HE Shiming, TANG Ming, XIONG Jiyong, et al. Friction and torque control technology for slim and long horizontal well[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(6): 85-92. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2013.10.04.02
- [12] 高德利,覃成锦,李文勇.南海西江大位移井摩阻和扭矩数值分析研究[J].石油钻采工艺,2003,25(5):7-12. doi: 10.3969/j.issn.1000-7393.2003.05.002
GAO Deli, QIN Chengjin, LI Wenyong. Research on numerical analysis of drag and torque for Xijiang extended reach wells in South-China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(5): 7-12. doi: 10.3969/j.issn.-1000-7393.2003.05.002
- [13] 贺志刚,付建红,施太和,等.大位移井摩阻扭矩力学模型[J].天然气工业,2001,21(5):52-54. doi: 10.3321/j.issn.1000-0976.2001.05.015
HE Zhigang, FU Jianhong, SHI Taihe, et al. Mechanical model for calculating drag and torque in extended reach well[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(5): 52-54. doi: 10.3321/j.issn.1000-0976.2001.05.015

- [14] 祝效华, 张智. 大位移井超高抗扭双台肩钻杆接头的设计[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 89–97. doi: 10.3787/j.jssn.1000-0976.2017.04.011
ZHU Xiaohua, ZHANG Zhi. Design of an ultra-high torque double-shoulder tool joint for extended reach wells[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(4): 89–97. doi: 10.3787/j.jssn.1000-0976.2017.04.011
- [15] 祝效华. 旋转钻柱系统动力学特性研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
ZHU Xiaohua. Dynamic characteristics of rotary drill string system[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2005.
- [16] 祝效华, 刘清友, 童华. 三维井眼全井钻柱系统动力学模型研究[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 288–291, 295. doi: 10.7623/syxb200802025
ZHU Xiaohua, LIU Qingyou, TONG Hua. Research on dynamics model of full hole drilling-string system with three-dimensional trajectory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 288–291, 295. doi: 10.7623/syxb200802025
- [17] 刘建勋. 大斜度井全井钻柱动力学数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
LIU Jianxun. Numerical simulation of whole drill string dynamics in deviated wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [18] ZHU Xiaohua, LI Bo, LIU Qingyou, et al. New analysis theory and method for drag and torque based on full-hole system dynamics in highly deviated well[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015: 1–13. doi: 10.1155/2015/535830
- [19] 祝效华, 李柯, 安家伟. 水平井钻柱动态摩阻扭矩计算与分析[J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 75–82. doi: 10.3787/j.jssn.1000-0976.2018.08.011
ZHU Xiaohua, LI Ke, AN Jiawei. Calculation and analysis of dynamic drag and torque of horizontal well strings[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(8): 75–82. doi: 10.3787/j.jssn.1000-0976.2018.08.011
- [20] 刘永辉, 徐小峰, 冀月英, 等. 井底钻压测量数据校正方法研究与应用[J]. 石油机械, 2017, 45(9): 21–26. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2017.09.004
LIU Yonghui, XU Xiaofeng, JI Yueying, et al. Calibration method for measured data of downhole WOB measurement tool[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(9): 21–26. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2017.09.004
- [21] 王超, 李军, 柳贡慧, 等. 近钻头井下钻具运动特征及异常状态分析方法[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2):

50–57. doi: 10.11911/syztjs.2018026

WANG Chao, LI Jun, LIU Gonghui, et al. An analytical method for determining the motion characteristics and abnormal conditions of near-bit bottom hole assembly[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 50–57. doi: 10.11911/syztjs.2018026

作者简介



宋 巍, 1985 年生, 男, 汉族, 河北唐山人, 工程师, 主要从事钻井工艺方面的研究工作。E-mail: jd_sw@petrochina.com.cn



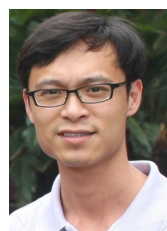
胡中志, 1981 年生, 男, 汉族, 黑龙江桦川人, 高级工程师, 主要从事油气井工程方面的研究工作。E-mail: 40898672@qq.com



周 岩, 1983 年生, 男, 汉族, 吉林松原人, 工程师, 主要从事钻井工艺方面的研究工作。E-mail: jdzc_zhouyan@petrochina.com.cn



沈园园, 1984 年生, 女, 汉族, 湖北黄冈人, 工程师, 主要从事钻井工艺方面的研究工作。E-mail: zcy_shenyy@petrochina.com.cn



魏 纳, 1980 年生, 男, 汉族, 四川成都人, 副教授, 博士, 主要从事海洋天然气水合物绿色钻采技术、控压钻井、欠平衡钻井与气体钻井系列技术井下流动控制理论及实验评价研究。E-mail: weina8081@163.com

编辑: 王旭东

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>