

大位移井摩阻扭矩力学分析新模型^{*}

秦永和^{1,2} 付胜利^{1,2} 高德利¹
(1. 中国石油大学·北京 2. 大港油田集团有限责任公司)

秦永和等. 大位移井摩阻扭矩力学分析新模型. 天然气工业, 2006, 26(11): 77-79.

摘 要 钻前的摩阻和扭矩分析是大位移井可行性研究、钻机设备选择或升级改造以及优化井眼轨迹剖面设计的重要依据,对比预测的摩阻扭矩和实测的摩阻扭矩,可以监测井筒清洗程度,预防严重事故的发生。为此,建立了一种大位移井摩阻扭矩力学分析新模型。对于井眼轨迹曲率不同的部分及钻柱刚度不同的部分,采用不同的计算模型,这将提高模型的计算精度;钻柱的某个部分采用何种模型不需人为指定,而完全由程序自动判断控制,这将增强模型的适应能力。考虑底部钻具组合(BHA)中稳定器的影响,将底部钻具组合作为纵横弯曲梁模型,采用加权余量法进行力学分析;考虑钻柱的刚度和井斜、方位的变化,对于除底部钻具组合的钻柱其余部分,由程序根据井眼轨迹曲率及钻柱刚度的大小,自动选用软绳分析模型或刚杆分析模型。

主题词 大位移井 井眼曲率 钻具组合 摩阻 扭矩 模型

国内外学者对摩阻扭矩进行了大量的研究工作^[1-5],分别建立了软绳模型和刚杆模型,两种模型各有自己的优点和适用范围。软绳模型忽略了钻柱刚度及稳定器的影响,在曲率不大的光滑井眼条件下,用来计算由刚度较小的常规钻杆组成的钻柱段的摩阻扭矩能够给出足够的精度。因此,现在有的商业软件仍在采用,但应用在井眼曲率变化较大或钻柱刚性较大的单元,会产生明显的误差;刚杆模型在曲率较大的井眼或由刚度较大的加重钻杆组成的钻柱段条件下,其计算结果具有更高的精度,但用于曲率较小刚度较小的平滑井眼中,计算结果收敛困难,对测点数据敏感,解的稳定性较差。底部钻具组合是一段含有大直径稳定器和高刚度钻铤的特殊钻柱,无论用软绳模型还是用刚杆模型均无法给出满意的解答。针对上述存在的问题,笔者提出了一种综合分析模型。

一、大位移井三维摩阻扭矩分析新模型

为了提高大位移井摩阻扭矩计算的精度,本文提出如下新模型:钻柱的底部钻具组合部分,采用三维梁柱力学分析模型,经过有限差分后,应用加权余量法进行数值求解;在大位移井的造斜段、狗腿度比

较大的井段以及刚度较大的加重钻杆段,采用刚杆模型分析求解;在曲率变化小并且刚度较小的常规钻杆段,采用软绳模型分析求解(如图 1 所示)。新模型的求解步骤是,对底部钻具组合采用三维梁柱模型求解,计算出切点处的轴向力、扭矩和弯矩,将这些数据作为 BHA 上部钻柱求解的初始数据;再根据大位移井的井眼轨迹设计数据或是实钻测斜数据,计算当前段钻柱的刚度及钻柱轴线的曲率,将计算的钻柱刚度及曲率与预设的“临界”值对比,如果两者均小于“临界”值,则此段钻柱采用软绳模型,否则采用刚杆模型。这不但可以提高大位移井摩阻扭矩的求解精度,同时,也使开发的软件对井眼轨迹和钻柱刚度具有自适应能力。

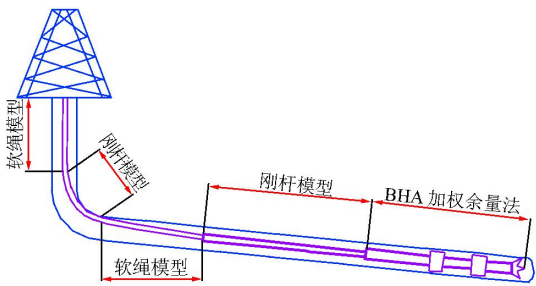


图 1 大位移井摩阻扭矩分析新模型图

^{*} 本文系国家自然科学基金重点项目(编号:50234030)和教育部创新团队项目(编号:IRT0411)。
作者简介:秦永和,1963年生,教授级高级工程师,博士研究生;现任大港油田集团有限责任公司董事长、总经理。地址:(300280)天津市大港。电话:(022)25924948。E-mail:fushli@163.com

二、大位移井三维摩阻扭矩分析 刚杆模型

建立如图2所示的坐标系。 N 轴、 E 轴、 H 轴分别指向地理北向、地理东向、重力方向,它们相互垂直,组成固定坐标系。 e_t 、 e_n 、 e_b 分别是井眼轴线的切线方向、主法线方向、副法线方向的单位矢量,它们相互垂直,组成自然坐标系。

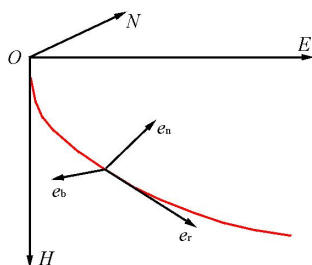


图2 三维摩阻分析的坐标系图

在钻柱上取一单元段 ds ,通过力学分析,可得下方方程组^[3]:

$$\frac{dT}{ds} = -q \pm C_{f1} N \quad (1)$$

$$N_n = [A(s) + C_{f2} B(s)] / (1 + C_{f2}^2) \quad (2)$$

$$N_b = [B(s) - C_{f2} A(s)] / (1 + C_{f2}^2) \quad (3)$$

$$\frac{dM_t}{ds} = C_{f2} N D_t / 2 \quad (4)$$

其中:

$$N^2 = [A(s)A(s) + B(s)B(s)] / (1 + C_{f2}^2)$$

$$A(s) = \frac{d^2 M_b}{ds^2} - [k_b T + k_n (k_b M_t + k_n M_b) + q_n]$$

$$B(s) = \frac{d}{ds} (k_b M_t + k_n M_b) + k_n \frac{dM_b}{ds} - q_b$$

式中: T 为轴向拉力; M_b 为弯矩; M_t 为扭矩; EI 为抗弯刚度; q 为钻柱单位长度有效重量; C_{f1} 、 C_{f2} 分别为管柱在井眼内的轴向和周向摩阻系数; D_t 为管柱外径; N 为钻柱单位长度所受的横向支承力; k_b 、 k_n 分别为钻柱变形线的曲率和挠率。

将由方程(1)~(4)组成的微分方程组进行有限差分变换,考虑钻柱不同工作状态下的边界条件,可以应用数值方法对所得到的方程组求解。从而可以得到钻柱的轴力及横向支撑力沿钻柱长度的分布规律,进而可以求得地面大钩拉力及转盘扭矩。

三、大位移井三维摩阻扭矩分析 软绳模型

如果钻柱刚度较小,井眼不出现严重狗腿度,则

井眼曲率和管柱刚度对其受力的影响较小,在分析计算中采用软绳模型将会得到精度足够的解。这时,式(1)~(4)变为^[3]:

$$\frac{dT}{ds} = -q \pm C_{f1} N \quad (5)$$

$$N_n - N_b C_{f2} = -k_b (T + k_n M_t) - q_n \quad (6)$$

$$N_b + N_n C_{f2} = \frac{d}{ds} (k_b M_t) - q_b \quad (7)$$

$$\frac{dM_t}{ds} = C_{f2} N D_t / 2 \quad (8)$$

应用同样的方法可以算出采用软件杆模型时钻柱的轴力及横向支撑力沿钻柱长度的分布规律,并进而求得地面大钩拉力及转盘扭矩。

四、三维底部钻具组合分析加权余量法

底部钻具组合(BHA)由钻头、钻铤及稳定器等结构单元组成,是一段特殊的钻柱。由于稳定器的外径与井眼直径相差不大,这段钻柱的横向力将主要由稳定器承担。由于钻铤与井壁不接触。因此,这段钻柱不适合采用软绳分析模型或刚杆分析模型。同时,这段钻柱的受力分析在整个钻柱分析中占有重要地位,因为不论是软绳模型还是刚杆模型,都是假设已知钻头处边界条件,从底向上分单元进行计算的。这段钻柱的计算结果,将对整个钻柱的摩阻扭矩分析的精度有重要影响。

这段钻柱承受自重、钻压、扭矩、井壁支撑力及钻井液静水压力等载荷的作用,可作为三维梁柱问题来处理。假设BHA上任一点的弧长坐标为 s ,横向挠度分量为 (u, v) ,则在图3所示的坐标系中,可得如下控制方程组^[3]:

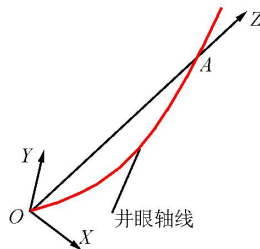


图3 三维底部钻具组合分析的坐标系图

$$u^{(4)} - v''' M_t^* + [(p^* - q_s u)'] - q_s + (\eta u')' = 0 \quad (9)$$

$$v^{(4)} + M_t^* u''' + [(p^* - q_s v)'] + (\eta v')' = 0 \quad (10)$$

$$\text{其中: } u' = \frac{du}{ds}; u'' = \frac{d^2 u}{ds^2}; u''' = \frac{d^3 u}{ds^3}; u^{(4)} = \frac{d^4 u}{ds^4}; \eta =$$

$$u''v' - u'v''; v' = \frac{dv}{ds}; v'' = \frac{d^2v}{ds^2}; v''' = \frac{d^3v}{ds^3}; v^{(4)} = \frac{d^4v}{ds^4};$$

$$M_i^* = M_i/EI; q_r = q\cos\beta/EI; q_t = q\sin\beta/EI。$$

式中: EI 为钻铤的 $p^* = p/EI$ 抗弯刚度; q 表示钻铤在钻井液中单位长度的有效重量; p 表示 BHA 单跨下端点 Z 向压力; M_i 、 β 分别表示 BHA 结构单元上的常扭矩和井斜角。

采用加权余量法求解由式(9)、(10)组成的方程组,为此设所分析的 BHA 单元钻柱变形试函数为^[3]:

$$u(s) = \sum_{i=0}^4 C_{xi} s^i \quad (11)$$

$$v(s) = \sum_{i=0}^4 C_{yi} s^i$$

式中: C_{xi} 、 C_{yi} ($i=0, 1, 2, 3, 4$) 为待定系数。 (12)

将式(11)、(12)代入式(9)、(10)将产生两个残值,应用加权余量法的子域法消除这两个残值,可以得到两个独立的方程。再应用分析单元两端的边界条件,就可以求出式(11)、(12)中的 10 个待定系数,从而可求出本单元任一点的挠度、两端的转角、弯矩及内力。

五、结 论

笔者建立了一种大位移井摩阻扭矩分析新模

型。新模型将底部钻具组合简化为三维梁柱结构,并用加权余量法对其求解;对除底部钻具组合外的其它钻柱,根据井眼轨迹曲率和钻柱单元刚度的大小,选用软绳模型或刚杆模型。新模型具有井眼曲率和钻柱刚度的自适应能力。在具体求解时,新模型不是靠人为指定某段钻柱单元选用何种模型,而是对所计算单元的井眼轨迹设计数据或是实钻测斜数据进行计算,根据计算结果,由程序自动选择精度较高的数学模型。

参 考 文 献

- [1] JOHANSICK C A. Torque and drag in direction wells-prediction and measurement[J]. SPE, 11380.
- [2] HO H S. An improved modeling program for computing the torque and drag in directional and deep wells [J]. SPE, 1804.
- [3] 高德利,刘希圣,徐秉业.井眼轨迹控制[M].山东:中国石油大学出版社,1994.
- [4] 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.
- [5] 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):8-12.

(收稿日期 2006-05-27 编辑 钟水清)