

导向钻具几何造斜率的实用计算方法^{*}

刘修善

(中国石油化工有限公司石油勘探开发研究院)

刘修善. 导向钻具几何造斜率的实用计算方法. 天然气工业, 2005; 25(11): 50~52

摘要 根据三点定圆的数学原理, 提出了导向钻具几何造斜率的精确计算公式, 进而给出了简明的实用计算公式。文章的几何造斜率计算公式弥补了原三点定圆法没有考虑结构弯角位置对钻具造斜率影响的缺陷, 揭示了三点定圆法误差过大的主要原因, 分析了影响导向钻具几何造斜率的主要因素。还结合实例, 阐述了利用几何造斜率进行弯壳体导向钻具组合设计的原理和方法。

关键词 钻井 导向钻井 钻具工具 数学模型 水平钻井

随着水平钻井技术的不断发展, 导向钻井技术的应用也越来越广泛。作为滑动导向钻井的主要工具, 弯壳体导向钻具已从单弯发展到双弯, 甚至多弯。目前, 几乎每口水平井都会用到基于弯壳体钻具的滑动导向钻井技术。

导向工具的性能是实施导向钻井工艺技术的重要依据。因此准确地预测钻具组合的造斜率以及合理地设计钻具组合, 是实现导向钻井的技术关键。导向工具性能的主要指标是造斜率。由于弯壳体导向钻具的长度较短、刚性较大、变形较小。因此可认为井下的弯壳体导向钻具基本上保持着其原有的刚性形状。基于这种假设的工具造斜率称为几何造斜率。

1985年, H. Karisson 等人率先提出了弯壳体导向工具几何造斜率的计算方法——“三点定圆法”^[1,2]。随后, 引起了国内外学者的广泛关注^[3~6], 并不断地予以改进。根据三点定圆的数学原理, 本文提出了导向钻具几何造斜率的精确计算公式和实用计算公式, 揭示了原三点定圆法误差过大的主要原因, 并阐述了弯壳体导向钻具组合的设计方法。

一、三点定圆的数学原理

数学上, 圆的方程可表述为:

$$x^2 + y^2 + Ax + By + C = 0 \quad (1)$$

不过, 这是圆的一般方程。要使其在实数域内

成圆, 必须满足如下条件:

$$A^2 + B^2 - 4C > 0 \quad (2)$$

此时, 该圆的曲率半径为:

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{A^2 + B^2 - 4C} \quad (3)$$

众所周知, 3个非共线的点将确定一个圆。如果这3个点的坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和 (x_3, y_3) , 则圆的方程为

$$\begin{vmatrix} x^2 + y^2 & x & y & 1 \\ x_1^2 + y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

如图1所示。如果将坐标系的原点选在1点上, 并使y轴通过2点, 则 $x_1 = y_1 = x_2 = 0$ 。于是, 式(4)变为:

$$D(x^2 + y^2) + Ex + Fy = 0 \quad (5)$$

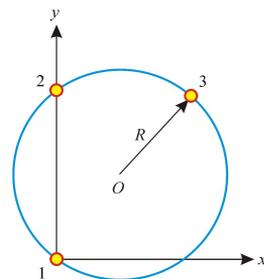


图1 三点定圆原理图

^{*} 本文系中国石油化工有限公司科技攻关项目(编号:P01075)。

作者简介: 刘修善, 1962年生, 教授级高级工程师; 2000年于清华大学博士后工作站出站, 现为中国石油化工有限公司石油勘探开发研究院德州石油钻井研究所副所长。地址: (253005) 山东省德州市东风东路35号。电话: (0534) 2621903。E-mail: xliu@pepris.com

其中

$$D = \begin{vmatrix} 0 & y^2 \\ x_3 & y^3 \end{vmatrix} = -x_3 y^2$$

$$E = - \begin{vmatrix} y^2 & y^2 \\ x_3^2 + y^3 & y^3 \end{vmatrix} = y^2 [(x_3^2 + y^3) - y^2 y^3]$$

$$F = \begin{vmatrix} y^2 & 0 \\ x_3^2 + y^3 & x_3 \end{vmatrix} = x_3 y^2$$

对比式(1)和式(5),得:

$$A = \frac{E}{D}, B = \frac{F}{D}, C = 0 \quad (6)$$

此时,成圆的条件为 $D \neq 0$,而圆的曲率半径变为:

$$R = \frac{1}{2|D|} \sqrt{E^2 + F^2} \quad (7)$$

根据上述各式,圆的曲率为:

$$k = \frac{2|x_3|}{\sqrt{(x_3 y^2)^2 + (x_3^2 + y^3 - y^2 y^3)^2}} \quad (8)$$

二、几何造斜率的计算方法

要利用式(8)计算导向工具的几何造斜率,需要建立坐标系,并选择定圆点。理论上,几何造斜率的计算结果与坐标系的选取无关,不会影响计算结果,但是选取合理的坐标系可以减少计算工作量。而定圆点是和钻具组合与井壁的接触状态密切相关的,应该根据井下的实际工况来确定。通过对钻柱进行力学分析可以得到钻具组合与井壁的接触情况,不过利用几何法来计算钻具的造斜率就是要避开这种复杂的计算过程,况且实际的接触点也是动态变化的,所以定圆点通常选在稳定器和钻头的中心线上。按几何形式进行分类,弯壳体导向钻具主要分为单弯钻具和双弯钻具,其中双弯钻具又可分为同向双弯和反向双弯两种。对于单弯壳体导向钻具,如果采用如图2所示的坐标系,双弯壳体导向钻具示意图见图3;坐标参数为:

$$\begin{cases} y^2 = L_1 \\ x_3 = L_3 \sin \gamma \\ y^3 = L_1 + L_2 + L_3 \cos \gamma \end{cases} \quad (9)$$

式中: L_1 为下稳定器到钻头的距离, m; L_2 为弯曲肘点到下稳定器的距离, m; L_3 为上稳定器到弯曲肘点的距离, m; γ 为结构弯角, $^\circ$ 。

将式(9)代入式(8),得:

$$k = \frac{2L_3 \sin \gamma}{\sqrt{L_1^2 L_3^2 \sin^2 \gamma + [L_2^2 + 2L_2 L_3 \cos \gamma + L_3^2 + L_1(L_2 + L_3 \cos \gamma)]^2}} \quad (10)$$

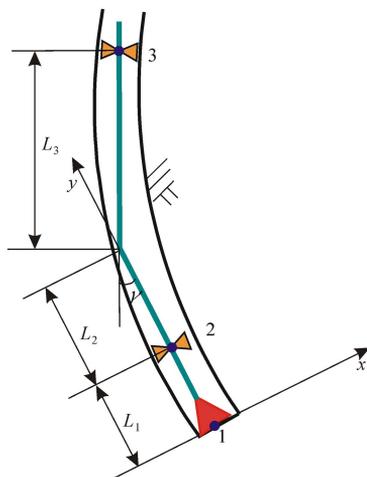


图2 单弯壳体导向钻具示意图

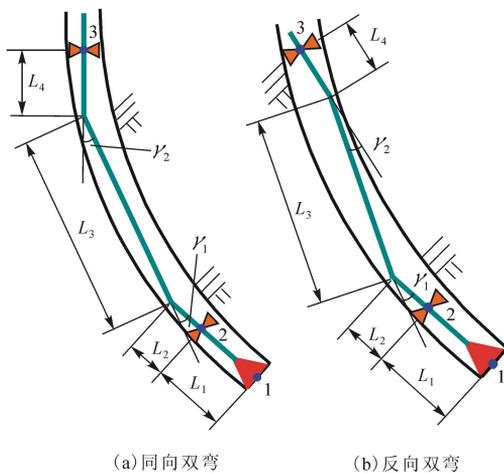


图3 双弯壳体导向钻具示意图

通常,结构弯角 γ 很小,所以可认为 $\cos \gamma \approx 1$, $\sin \gamma \approx \gamma$ 或 $\sin \gamma \approx 0$ 。于是,有:

$$k = \frac{2L_3 \gamma}{(L_2 + L_3)(L_1 + L_2 + L_3)} \quad (11)$$

为简便,令

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3, L_S = L_2 + L_3, \lambda = \frac{L_3}{L_S}$$

$$\text{则: } k = \lambda \frac{2\gamma}{L_T} \quad (12)$$

式中: L_T 为从上稳定器到钻头的钻具总长度, m; L_S 为稳定器间的钻具长度, m; λ 为弯角位置影响因子,它反映了弯角位置对钻具造斜率的影响,无因次。

如果曲率单位采用 $^\circ/30 \text{ m}$,则式(12)变为:

$$k = \lambda \frac{60}{L_T} \gamma \quad (13)$$

同理,对于双弯壳体导向钻具(见图3),有^[6]:

$$k = \frac{60}{L_T} (\lambda \gamma + \lambda \varepsilon) \quad (14)$$

其中

$$\lambda = \frac{L_3 + L_4}{L_S} = 1 - \frac{L_2}{L_S}, \lambda = \frac{L_4}{L_S}$$

式中: L_3 为两个弯曲肘点之间的距离, m; L_4 为上弯曲肘点到上稳定器的距离, m; γ 为下结构弯角, ($^\circ$); ε 为上结构弯角, ($^\circ$)。

式(14)对于同向双弯和反向双弯钻具都是适用的。对于同向双弯钻具, ε 取正值; 对于反向双弯钻具, ε 取负值。

三、方法评述及应用

按照本文对各段钻具长度的定义和所采用的曲率单位, H. Karisson 等人所提出的几何造斜率计算公式为^[1,2]:

$$k = \frac{60}{L_T} \gamma \quad (15)$$

可见, 式(13)和式(15)之间相差一个弯角位置影响因子 λ 。H. Karisson 等人的计算公式没有反映出结构弯角位置对几何造斜率的影响。换言之, 几何造斜率与结构弯角的位置无关, 无论结构弯角位于何处, 所得到的造斜率都是相同的。这显然是不符合实际的。为了说明二者计算结果之间的差异, 现取 $L_1 = 1.10$ m、 $L_2 = 1.15$ m、 $L_3 = 4.25$ m、 $\gamma = 2^\circ$ 。计算结果表明: 原三点定圆法为 $\kappa = 18.46^\circ/30$ m, 本文方法为 $\kappa = 14.53^\circ/30$ m。由于 $\lambda = 0.7870$, 所以本文所计算出的几何造斜率只是原三点定圆法的 78.70%。研究表明: ①结构弯角趋近于下稳定器时, 钻具的几何造斜率最大; ②结构弯角趋近于上稳定器时, 钻具的几何造斜率最小。此时, 所计算出的几何造斜率为零, 说明导向钻具失效; ③如果稳定器的位置保持不变, 几何造斜率随着结构弯角的位置呈线性变化; ④原三点定圆法给出的是导向钻具的最大几何造斜率。三点定圆法出现之初, 由于计算简单, 受到了工程技术人员的普遍欢迎。但是, 现场应用表明所计算出的造斜率过高, 与实际造斜率有很大的差距。其中的一个重要原因是: 所计算出的造斜率不是真正的理论造斜率, 而是导向钻具的最大几何造斜率。在这一点上, 应该说本文解决了这个问题。除了计算导向钻具的造斜率之外, 几何造斜率的另一个重要应用是设计弯壳体导向钻具组合。尽管影响钻具造斜率的因素很多, 但是弯壳体导向钻具的结构参数往往占据着主导地位。根据几

何造斜率来设计导向钻具组合突出了关键因素对钻具造斜率的影响, 是一种行之有效的方法。

在给出钻具的预期造斜率条件下, 根据上述的关系式, 可以求出任意一个钻具结构参数。作为设计示例, 假设单弯导向钻具的 $L_1 = 1.10$ m、 $L_2 = 1.15$ m、 $L_3 = 4.25$ m, 从而 $L_T = 6.50$ m、 $L_S = 5.40$ m、 $\lambda = 0.7870$ 。若预期的造斜率为 $10.5^\circ/30$ m, 则 $\gamma = 1.45^\circ$ 。由于结构弯角是按 0.25° 进行分级的, 所以取 $\gamma = 1.5^\circ$ 。

四、结论

(1) 根据三点定圆的数学原理, 本文给出了导向钻具几何造斜率的精确计算公式和实用计算公式, 弥补了原三点定圆法没有考虑结构弯角位置对钻具造斜率影响的缺陷。

(2) 几何造斜率与钻具的总长度成反比, 与结构弯角的大小及位置呈线性变化关系。

(3) 几何造斜率突出了关键因素对钻具造斜率的影响, 计算公式简单, 可用于计算导向钻具的造斜率和设计导向钻具组合。

(4) 几何法假设钻具为刚性, 而且没有考虑地层特性、已钻轨迹、钻进参数等因素的影响, 因此所计算出的几何造斜率一般要高于实际造斜率。从某种意义上来说, 可以把几何造斜率近似地看作为导向钻具的最大造斜率。

参考文献

- 1 Karisson H, Brassfield T, Krueger V *et al.* Performance drilling optimization. SPE/IADC paper No. 13474, 1985
- 2 Karisson H, Cobbley R, Jaques G E. New developments in short medium and long-radius lateral drilling. SPE/IADC paper No. 18706, 1989
- 3 Hassen B R, MacDonald A J. Field comparison of medium-and long-radius horizontal wells drilled in the same reservoir. IADC/SPE paper No. 19986, 1990
- 4 王宝新, 许岱文, 程存志. 弯壳动力钻具造斜率的几何分析与计算. 石油钻采工艺, 1994; 16(1): 32~37
- 5 帅健, 于永南, 洪学福. 短弯外壳导向钻具的造斜率计算. 石油钻采工艺, 1996; 18(1): 4~9
- 6 刘修善, 何树山, 邹野. 导向钻具几何造斜率的研究. 石油学报, 2004; 25(6): 83~87

(收稿日期 2005-05-09 编辑 钟水清)