

连续管钻定向井工具面角调整方法研究

胡 亮, 高德利

(石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘 要:为了解决连续管钻井定向过程中存在的工具面角调整偏差问题,提出了两段式定向施工设计方法。以斜面扭方位计算模式为理论基础,根据工具面角的调整特点,建立了双圆弧定向轨道设计模型,利用数值迭代法对其轨道约束方程组进行求解,从而得到符合定向设计要求的井眼轨道方案。实例计算结果表明,工具面角调整符合定向调整特点,设计的井眼轨道光滑,满足各项井眼约束条件。研究结果表明,两段式定向施工方法理论设计切实可行,符合定向要求,解决了连续管定向偏差问题,具有现场实际应用价值。

关键词:连续管 液压定向器 工具面调整 数值计算

中图分类号:TE249 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)02-0050-04

Study on a Method for Tool Face Re-Orientation with Coiled Tubing Drilling

Hu Liang, Gao Deli

(Key Laboratory of Petroleum Engineering Education Ministry, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: In order to solve the problems in tool face orientation with coiled tubing drilling, this paper presents a method to drill a directional well with a two-section design. Based on the theory of azimuth correcting on an inclined-plane and the skill of re-orientating the tool face, a two-arc directional design model was established, and the corresponding constraint equations set for trajectory design could be solved using numerical iteration method, so as to finalize the well trajectory design which would meet the requirements of directional drilling. Calculation results from an actual well design showed that re-orientation of tool face could meet the requirements of directional drilling, and the well trajectory was designed as a smooth curve within the all constraints of the well. The study results concluded that the two-arc directional design model could meet the needs of directional drilling and the theoretic design was feasible in drilling practice, so problems with directional correction had been solved that would be useful to the drilling practice on location.

Key words: coiled tubing; hydraulic orientator; tool face adjustment; numerical calculation

连续管钻井(coiled tubing drilling, CTD)是 20 世纪 90 年代国外发展起来的热门技术,具有突出的低成本优势和对环境污染小的优点,已经在国外非常规油气资源开发中广泛应用^[1-8],并取得了显著的经济效益。我国的连续管钻井技术还处于起步和尝试阶段,迫切需要发展与之配套的钻井理论并研发井下工具。

连续管的轴向刚度和扭转刚度都很低,在钻井定向过程中无法通过在地面旋转管柱的方式来调整工具面角,因此需要一种在井下实现工具面调整的工具。随着定向器的出现,连续管才得以应用于定向井领域。其中,液压定向器由于结构简单、维护成本低而被广泛应用^[9-13]。液压定向器是通过循环钻

井液的方式进行驱动的,由于其机械结构方面的局限,只能进行单方向固定角度转动。因此,工具面调整的角度只能是其仪器本身固定角度的倍数,是跳跃的、非连续的,这给现场定向施工带来了难度,大多数情况下,调整后的实际钻进工具面角与设计值

收稿日期:2014-10-13; **改回日期:**2015-02-06。

作者简介:胡亮(1984—),男,河北任丘人,2007年毕业于北京理工大学探测制导与控制技术专业,2009年获北京理工大学水声工程专业硕士学位,在读博士研究生,主要从事油气井力学与控制工程研究。

联系方式:18601366385, hl9788@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项“复杂结构井优化设计与控制关键技术”(编号:2011ZX05009-005)资助。

器固定转角, ($^{\circ}$); n 为所需调整的定向器旋转次数, 是一个正整数; 式(9)中的中括号表示为舍去小数部分的取整运算。

1.3.2 ω_2 的计算

根据设计思路, 中间调整点的工具面角加上定向器固定转角(定向旋转一次)为 ω_2 , 即:

$$\omega_2 = \omega_0 + \theta \quad (9)$$

根据三角函数基本公式, 可以得到:

$$\cos \omega_2 = \frac{[\sin \alpha_0 \cos \alpha_1 - \cos \alpha_0 \sin \alpha_1 \cos(\phi_0 - \phi_1)] \cos \theta - \sin \alpha_1 \sin \theta \sin(\phi_0 - \phi_1)}{\cos \alpha_1 \sin \alpha_0 \cos(\phi_0 - \phi_1) - \sin \alpha_1 \cos \alpha_0} \cos \omega_1 \quad (13)$$

将式(13)代入式(6), 整理得到:

$$\cos \alpha_2 = \cos \alpha_0 \cos \gamma_2 - \frac{[\sin \alpha_0 \cos \alpha_1 - \cos \alpha_0 \sin \alpha_1 \cos(\phi_0 - \phi_1)] \cos \theta - \sin \alpha_1 \sin \theta \sin(\phi_0 - \phi_1)}{\cos \alpha_1 \sin \alpha_0 \cos(\phi_0 - \phi_1) - \sin \alpha_1 \cos \alpha_0} \sin \alpha_0 \sin \gamma_2 \cos \omega_1 \quad (14)$$

1.3.3 井眼轨道设计参数的求解

由式(3)、式(4)、式(5)和式(14)构成新的井眼轨道约束方程组, 其中 $\alpha_1, \alpha_2, \phi_1, \phi_2$ 和 θ 为已知量, ω_1 通过式(8)计算得出, 方程组未知数为 $\alpha_0, \phi_0, \gamma_1, \gamma_2$, 方程组中 4 个方程对应 4 个未知数, 因此方程组是适定的。由于方程组中的方程皆为隐函数超越方程, 无法通过公式化简导出未知数的具体表达式, 需要采用数值迭代法进行求解^[18]。因其求解步骤繁杂, 非本文重点, 在此不再赘述。

2 计算实例

2.1 实例 1

某井进行连续管钻井, 起始点井斜角 20° , 井斜方位角 30° , 工具造斜率 $15^{\circ}/30\text{m}$, 液压定向器固定转角 20° , 要求增斜增方位钻进, 井斜角降至 60° 时井斜方位角为 60° , 当前井底的工具面角为 27° 。

根据题意, 已知条件是: $\alpha_1 = 20^{\circ}, \phi_1 = 30^{\circ}, \alpha_2 = 60^{\circ}, \phi_2 = 60^{\circ}, K = 15^{\circ}/30\text{m}, \omega_a = 27^{\circ}, \theta = 20^{\circ}$ 。

首先, 根据式(1)和式(2)求出所需理想的工具面角 $\omega = 39^{\circ}$, 已知当前井底工具面角 $\omega_a = 27^{\circ}$, 两者差值 $\lambda = 12^{\circ}$, 此时 $\lambda < \theta$, 说明第一调整段不需要旋转工具面角, 可以直接在当前工具面角的情况下开始钻进, 即 $\omega_1 = 27^{\circ}$ 。

然后, 对新的井眼轨道约束方程组进行数值迭代计算, 得到: $\alpha_0 = 38.18^{\circ}, \phi_0 = 44.05^{\circ}, \gamma_1 = 19.30^{\circ}, \gamma_2 = 24.81^{\circ}$ 。

设起始点位于空间坐标系原点, 其他各点参数

$$\begin{aligned} \cos \omega_2 &= \cos(\omega_0 + \theta) \\ &= \cos \omega_0 \cos \theta - \sin \omega_0 \sin \theta \end{aligned} \quad (10)$$

根据圆弧段终点工具面角的相关计算公式^[17], 可以得到:

$$\sin \omega_0 = \frac{\sin \alpha_1 \sin(\phi_0 - \phi_1)}{\sin \gamma_1} \quad (11)$$

$$\cos \omega_0 = \frac{\sin \alpha_0 \cos \gamma_1 - \sin \alpha_1 \cos(\phi_0 - \phi_1)}{\sin \gamma_1 \cos \alpha_0} \quad (12)$$

整理式(10)、式(11)和式(12), 可以得到:

$$\cos \omega_2 = \frac{[\sin \alpha_0 \cos \alpha_1 - \cos \alpha_0 \sin \alpha_1 \cos(\phi_0 - \phi_1)] \cos \theta - \sin \alpha_1 \sin \theta \sin(\phi_0 - \phi_1)}{\cos \alpha_1 \sin \alpha_0 \cos(\phi_0 - \phi_1) - \sin \alpha_1 \cos \alpha_0} \cos \omega_1 \quad (13)$$

均以此为基准, 每段圆弧 4 等分, 3 个等分点的井斜方位和空间坐标见表 1。

表 1 实例 1 轨道设计结果

Table 1 Design trajectory data of Example 1

井深增量/ m	井斜角/ ($^{\circ}$)	方位角/ ($^{\circ}$)	垂深增量/ m	北坐标 增量/m	东坐标 增量/m
0	20.00	30.00	0	0	0
9.65	24.40	35.31	8.93	3.06	1.98
19.30	28.92	39.05	17.56	6.50	4.60
28.95	33.53	41.86	25.81	10.30	7.85
38.60	38.18	44.05	33.63	14.43	11.70
51.01	43.41	49.17	43.02	19.98	17.60
63.42	48.82	53.37	51.62	25.56	24.57
75.83	54.37	56.92	59.32	31.10	32.55
88.22	60.00	60.00	66.04	36.54	41.44

2.2 实例 2

某井进行连续管钻井, 起始点井斜角 70° , 井斜方位角 40° , 工具造斜率 $15^{\circ}/30\text{m}$, 液压定向器固定转角 20° , 要求减斜减方位钻进, 井斜角降至 40° 时井斜方位角为 20° , 当前井底的工具面角为 175° 。

根据题意, 已知条件是: $\alpha_1 = 70^{\circ}, \phi_1 = 40^{\circ}, \alpha_2 = 40^{\circ}, \phi_2 = 20^{\circ}, K = 15^{\circ}/30\text{m}, \omega_a = 175^{\circ}, \theta = 20^{\circ}$ 。

首先, 根据式(1)和式(2)求出所需理想的工具面角 $\omega = 203^{\circ}$, 已知当前井底工具面角 $\omega_a = 175^{\circ}$, 两者差值 $\lambda = 28^{\circ}$, 根据式(7)和(8)计算得到 $\omega_1 = 195^{\circ}$ 。

然后, 对新的井眼轨道约束方程组进行数值迭代计算, 得到: $\alpha_0 = 49.85^{\circ}, \phi_0 = 33.03^{\circ}, \gamma_1 = 21.01^{\circ}, \gamma_2 = 13.44^{\circ}$ 。

设起始点位于空间坐标系原点, 其他各点参数

均以此为基准,每段圆弧 4 等分,3 个等分点的井斜方位和空间坐标见表 2。

表 2 实例 2 轨道设计结果

Table 2 Design trajectory data of Example 2

井深增量/ m	井斜角/ (°)	方位角/ (°)	垂深增量/ m	北坐标 增量/m	东坐标 增量/m
0	70.00	40.00	0	0	0
10.51	64.93	38.50	4.02	7.51	6.14
21.01	59.88	36.87	8.89	14.87	11.83
31.52	54.85	35.07	14.55	22.03	17.03
42.02	49.85	33.03	20.97	28.91	21.69
48.74	47.26	30.18	25.42	33.20	24.33
55.46	44.74	27.08	30.09	37.44	26.65
62.18	42.32	23.70	34.96	41.62	28.64
68.90	40.00	20.00	40.02	45.72	30.28

从以上 2 个实例的设计数据可以看出,设计的井眼轨道符合定向要求,整个设计轨道光滑,易于在施工现场实现。

3 结论与建议

1) 两段式定向调整方法解决了连续管钻井定向过程中的工具面角调整偏差问题,根据设计模型和数值计算方法开发了相应的连续管定向优化设计软件,该软件使用简单,便于现场应用,为实现连续管钻井定向自动优化控制奠定了基础。

2) 文中所述方法理论上切实可行,比传统的经验调整方法更具有现场应用价值,有利于提高连续管定向钻进井眼轨迹的控制效率,降低作业风险。

3) 如何在保证定向要求的同时满足目标点位置要求,需要进一步研究。

参 考 文 献

References

- [1] Byrom T G. Coiled-tubing drilling in perspective[J]. Journal of Petroleum Technology, 1999, 51(6): 57-61.
- [2] Fraser R G, Ravensbergen J. Improving the performance of coiled tubing underbalanced horizontal drilling operations[R]. SPE 74841, 2002.
- [3] Cox R J, Li Jeff, Lupick G S. Horizontal underbalanced drilling of gas wells with coiled tubing[J]. SPE Drilling & Completion, 1999, 14(1): 3-10.
- [4] Scherschel S R, Graves D G. Underbalanced-directional drilling with coiled tubing: challenges and solutions[R]. SPE 37062, 1996.
- [5] Crouse P C, Lunan W B. Coiled tubing drilling: expanding application key to future[R]. SPE 60706, 2000.
- [6] 宋先知, 李根生, 王梦抒, 等. 连续油管钻水平井岩屑运移规律数值模拟[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 28-32.
Song Xianzhi, Li Gensheng, Wang Mengshu, et al. Numerical simulation on cuttings carrying regularity for horizontal wells drilled with coiled tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 28-32.
- [7] 吕选鹏, 周承富, 陈辉, 等. 连续管技术在页岩气勘探开发中应用前景[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(2): 67-70.
Lv Xuanpeng, Zhou Chengfu, Chen Hui, et al. Coiled tubing technology prospect in exploration and development of shale gas[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(2): 67-70.
- [8] 陈朝伟, 周英操, 申瑞臣, 等. 连续管钻井减摩技术综述[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 29-31.
Chen Zhaowei, Zhou Yingcao, Shen Ruichen, et al. Overview of drag reducing technologies in coiled tubing drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 29-31.
- [9] Zagarra E, Meek D, Cassee U, et al. Intelligent wireless orienter for coiled tubing drilling: development to field test[R]. SPE 74836, 2002.
- [10] Garfield G L, Mackenzie G. Latest developments and new technology for coiled-tubing sidetracking applications[R]. SPE 112587, 2008.
- [11] 贺会群. 连续管钻井技术与装备[J]. 石油机械, 2009, 37(7): 1-6.
He Huiqun. The technology and equipment of coiled tubing drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(7): 1-6.
- [12] Turner D R, Harris T W R, Slater M, et al. Electric coiled tubing drilling: a smarter CT drilling system[R]. SPE 52791, 1999.
- [13] Tinkham S K, Meek D E, Staal T W. Wired BHA applications in underbalanced coiled tubing drilling[R]. SPE 59161, 2000.
- [14] 刘修善. 井眼轨道几何学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 133-138.
Liu Xiushan. Geometry of wellbore trajectory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 133-138.
- [15] 高德利. 复杂结构井优化设计与钻井完井控制技术[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011: 3-5.
Gao Deli. Optimized design and control techniques for drilling and completion of complex-structure wells[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2011: 3-5.
- [16] 韩志勇. 定向钻井设计与计算[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007: 285-291.
Han Zhiyong. Design and calculation of directional drilling[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007: 285-291.
- [17] 鲁港, 佟长海, 夏泊溆, 等. 空间圆弧轨迹的矢量描述技术[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 759-764.
Lu Gang, Tong Changhai, Xia Boyi, et al. Vector description of spatial-arc wellbore trajectory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 759-764.
- [18] 冯果忱. 非线性方程组迭代解法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 130-168.
Feng Guochen. Iterative solution of nonlinear equations[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989: 130-168.

[编辑 滕春鸣]