

# 一种新的阶梯水平井段轨道设计模型

陈天柱<sup>1,2</sup>, 陆洪智<sup>1,2</sup>, 吴翔<sup>1,2</sup>, 方圆<sup>1,2</sup>, 王成立<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**对于开发有一定高度差的多个薄油层,阶梯水平井较普通的定向井和水平井,节约了钻井成本,提高了单井的开采效率。分析了现有的阶梯水平井的设计模型,采用恒工具面模型进行三维阶梯水平井的轨道设计,以上下靶点的井斜角和方位角作为已知量,造斜工具的造斜率和安装角作为控制因素,将过渡点的井斜角和方位角作为待求参数。所设计的三维井眼轨道,通过计算示例表明,可用于设计阶梯水平井段。

**关键词:**阶梯水平井;恒工具面;三维;安装角轨迹设计

**中图分类号:**TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)02-0036-03

**A New Model of Trajectory Design of Stepped Horizontal Hole Sections/**CHEN Tian-zhu<sup>1,2</sup>, LU Hong-zhi<sup>1,2</sup>, WU Xiang<sup>1,2</sup>, FANG Yuan<sup>1,2</sup>, WANG Cheng-li<sup>1,2</sup> (1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Center of Geotechnical Drilling and Protection of Ministry of Education, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Stepped horizontal hole section is applied to stack-up 2 or more continual thin reservoirs with certain different height, which has the advantages of saving drilling investment and improving the production efficiency of the single well compared with ordinary directional well and horizontal well. The design of 3D stepped horizontal well trajectory was made by the analysis on the existing design model of stepped horizontal well and by the use of the constant tool face model. The upper and lower targets' drift angle and azimuth angle are taken as the known quantity, the build-up rate and installation angle of deflecting tools as control factors. In addition, the drift angle and azimuth angle of flex point are the parameters to be computed. It is shown by the calculation sample that the designed 3D hole trajectory can be used for the design of stepped horizontal hole section.

**Key words:** stepped horizontal well; constant tool face; three dimension; installation angle; trajectory design

## 0 前言

阶梯水平井是在一个井眼中持续钻进有一定高度差的两个或多个阶梯水平井段,用于开发有一定高度差的两个或多个连续薄油层、断块油藏,从而实现一口井多层开采,避免钻两口或两口以上的水平井,减少区域井口数量,降低井眼轨道碰撞的风险以及钻井成本,使开发效果和经济效益显著提高<sup>[1-4]</sup>。

阶梯水平井开发层叠式薄层藏和断块油藏,因为目的层油层薄,区块复杂,中靶要求高,所以在井眼轨道控制方面精度要求高。阶梯水平井段井眼拐点多,井斜角大,不利于井眼的携砂、钻压传递,钻具的摩阻和扭矩增大,需要合理的选择钻具组合和钻井工艺。因此,合理优化阶梯形水平井段井眼轨道显得尤为重要。

阶梯水平井段的设计分为二维和三维轨道设计方法。二维阶梯水平井段的设计较为简单,关键在于拐点的井斜参数和圆弧段的井斜变化率的控制。三维阶梯水平井段的设计则需要众多空间曲线中选择一条曲线使其满足特定的地质要求和施工要求。刘修善<sup>[2]</sup>最早提出了阶梯形水平井段的概念,提出了二维和三维阶梯形水平井段的轨道设计方法:二维模型采用稳—增—降—稳或稳—降—增—稳四段制,根据增斜和降斜的顺序分为上阶梯形轨道(先增后降)和下阶梯形轨道(先降后增);三维模型采用自然曲线模型,井眼的方位变化率和井斜变化率保持为常数,并根据是否限定首末靶的方位,将三维阶梯形水平井段分为4种情况设计。刘巨宝等人<sup>[5]</sup>使用圆柱螺线模型,用两段空间圆柱螺线来连

收稿日期:2015-09-11; 修回日期:2015-12-23

基金项目:国土资源公益性行业科研专项经费项目资助(编号:2013001059)。

作者简介:陈天柱,男,汉族,1993年生,硕士研究生在读,研究方向为水平井钻井技术,chentz0110@163.com。

通讯作者:陆洪智,男,汉族,1974年生,副教授,博士,主要从事钻井工程自动化、定向钻进技术教学及科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号,luhongzhi@sohu.com。

接两个水平井段,采用曲率半径法进行阶梯水平井段的井眼轨道设计,并应用数值迭代法进行求解,但文中在计算中保持方位变化率为常数,这有悖圆柱螺线模型中关于方位角变化率并不保持为常数的规律,因此该种设计模型的正确性还需商榷。鲁港等人<sup>[6-7]</sup>采用空间圆弧曲线模型,提出稳斜—圆弧—圆弧—稳斜四段制模型,给定圆弧井眼的井眼曲率和入靶井斜角,运用数学机械化思想,给出了求解模型设计的全解方法,较之数值迭代法,更适合编程语言。

本文采用恒工具面模型<sup>[8-9]</sup>,进行阶梯形水平井井眼轨道设计。运用数值迭代和数值积分方法进行轨道设计计算,经结果对比,该模型可用于阶梯形水平井段轨道设计。

## 1 三维阶梯水平井的设计

### 1.1 数学模型

根据阶梯水平井段井眼轨道的设计,采用增斜(降斜)和降斜(增斜)的二段空间曲线型轨迹来设计阶梯水平井轨道。钻进起始点  $A$  和终止点  $C$  之间的阶梯水平井段如图 1 所示,假设:(1)曲线段  $AM$  和曲线段  $MC$  之间的井眼曲率保持为常数,并且相等;(2)曲线段  $AM$  和曲线段  $MC$  各段在钻进过程中的装置角保持为常数(恒工具面);(3)曲线段  $AM$  和曲线段  $MC$  在  $M$  点处光滑连接。

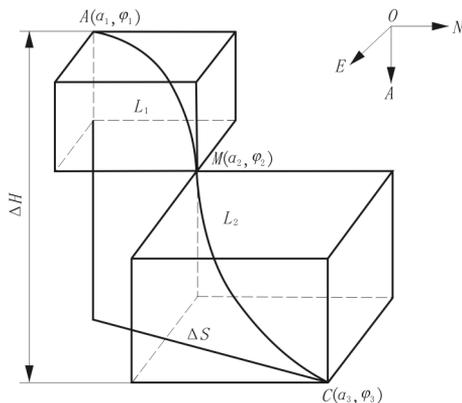


图 1 阶梯水平井轨道设计模型

根据油层井段的地质条件,可以确定起始点  $A$  和终止点  $C$  的井斜角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_3$  和方位角  $\varphi_1$ 、 $\varphi_3$  以及两点之间的垂深  $\Delta H$  和水平位移  $\Delta S$ 。根据所选择的钻具组合可以确定各段钻具的造斜率  $K_1$  和  $K_2$ ,以及每段的装置角  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 。因两次造斜钻进一般选用同种钻具组合,本文假设  $K_1 = K_2$ 。所以将拐点  $M$  的井斜角和方位角  $\alpha_2$  和  $\varphi_2$  作为待求参数。

### 1.2 轨迹设计

约定:具有长度量纲参数的单位为  $m$ ,角度的单位为  $rad$ ,井眼曲率的单位为  $m^{-1}$ 。

阶梯水平井段一般是钻遇有一定高度差的薄油藏,所以轨迹设计选择以垂深为约束条件,进行阶梯轨道设计。其垂直剖面图如图 2 所示。

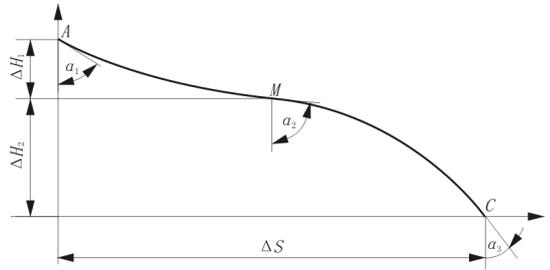


图 2 阶梯水平井垂直剖面

根据恒工具面模型的垂深公式,得:

$$\begin{cases} \Delta H_1 = \frac{\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1}{K_{\alpha_1}} \\ \Delta H_2 = \frac{\sin\alpha_3 - \sin\alpha_2}{K_{\alpha_2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta H_1$ 、 $\Delta H_2$ ——分别为井段  $AM$  和  $MC$  的垂深增量; $K_{\alpha_1}$ 、 $K_{\alpha_2}$ ——分别为井段  $AM$  和  $MC$  的井斜变化率。

它们满足下列约束方程式:

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 = \Delta H \quad (2)$$

$$K_{\alpha_i} = K_i \cos\beta_i, i = 1, 2 \quad (3)$$

将式(1)代入式(2),得到关于未知数  $\alpha_2$  的三角函数方程,解得:

$$\sin\alpha_2 = \frac{K_{\alpha_1} K_{\alpha_2} \Delta H + K_{\alpha_2} \sin\alpha_1 - K_{\alpha_1} \sin\alpha_3}{K_{\alpha_2} - K_{\alpha_1}} \quad (4)$$

只要  $K_{\alpha_2} \neq K_{\alpha_1}$  且都不等于零,就可以从式(4)中反解出  $M$  点井斜角  $\alpha_2$ 。

又根据恒工具面模型,可知:

$$\begin{cases} \alpha_2 = \alpha_1 + K_{\alpha_1} \Delta L_1 \\ \alpha_3 = \alpha_2 + K_{\alpha_2} \Delta L_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta L_1$ 、 $\Delta L_2$ ——分别为井段  $AM$  和  $MC$  的井段长度。

当已经求出  $\alpha_2$  之后,解得:

$$\begin{cases} \Delta L_1 = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{K_{\alpha_1}} \\ \Delta L_2 = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{K_{\alpha_2}} \end{cases} \quad (6)$$

恒工具面模型的方位角方程如下:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \tan\beta_1 \ln \frac{\tan(\alpha_2/2)}{\tan(\alpha_1/2)} \quad (7)$$

$$\varphi_3' = \varphi_2 + \tan\beta_2 \ln \frac{\tan(\alpha_3/2)}{\tan(\alpha_2/2)} \quad (8)$$

式中: $\varphi_3'$ ——根据给定的设计参数  $K_1 = K_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  而计算出来的井眼轨道末端的方位角。

由于井眼轨道末端方位角  $\varphi_3$  为已知数,必须反复调整设计参数,直到下式成立:

$$|\varphi_3' - \varphi_3| \leq \delta_\varphi \quad (9)$$

式中: $\delta_\varphi$ ——给定的方位角允许误差,可取  $\delta_\varphi = 0.01$  或更小。

若上式不满足,则所求解无效,需重新设计造斜钻具和工具面角。若上式满足,则带入式(8)求得  $\varphi_2$ 。由此得到阶梯轨道设计的主要参数。

但在计算各段空间曲线的东北坐标分量时,由于其方位变化率并不保持为常数,其在水平面上的投影曲率也不保持为常数,所以在计算东北坐标分量时,需要采用积分的方法。

$$\begin{cases} \Delta N_i = \int_{L_i}^{L_{i+1}} \sin\alpha \cos\varphi dL \\ \Delta E_i = \int_{L_i}^{L_{i+1}} \sin\alpha \sin\varphi dL \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

根据上式可得,起始点与终止点的闭合  $\Delta S$  为:

$$\Delta S = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^2 \Delta N_i \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^2 \Delta E_i \right]^2} \quad (11)$$

通过选择不同的造斜工具以及确定不同的工具面角,重复上述计算过程,可以得到在垂深和方位角误差的约束下,不同的造斜率和工具面角的设计轨道。在这些众多的设计方案中,可以根据闭合距最短,造斜工具简单,易于造斜钻进和扭方位等特点,来选择最优的设计方案,完成阶梯水平井轨道设计。

## 2 工程实例应用

算例使用 C#语言编程来完成,为检验计算精度,数据小数点后保留足够的位数。

### 2.1 算例 1

该算例是理论算例,为检验上述算法而构造的数据。阶梯水平井段主要由 A、C、M 三点确定,AM 和 CM 由 2 段空间曲线连接而成,在 M 点连接。A 点井斜角  $\alpha_1 = 87^\circ$ 、方位角  $\varphi_1 = 57^\circ$ ,C 点井斜角  $\alpha_3 = 92^\circ$ 、方位角  $\varphi_3 = 55^\circ$ ,A、C 两点间的垂增  $\Delta H = 2$  m,选取的工具造斜率  $K = 4.01528^\circ/30$  m,第一曲线段的工具面角  $\beta_1 = 185^\circ$ ,第二曲线段的工具面角  $\beta_2 = 5^\circ$ 。设计轨道参数见表 1。

表 1 算例 1 的轨道设计数据

井段	井段长/ m	完钻井斜 角/(°)	完钻方位 角/(°)	完钻垂增/ m	闭合距/ m
AM	12.17873	85.37617	56.85754	0.8097	12.1527
MC	49.47873	92.00000	57.43782	1.1369	49.6400

计算结果无明显异常数据,符合实际轨道施工数据,说明文中模型计算方法有其合理性。

### 2.2 算例 2

计算数据来源于文献[7]的算例 1。起始点的井斜角  $\alpha_1 = 88^\circ$ 、方位角  $\varphi_1 = 25^\circ$ ,终止点井斜角  $\alpha_3 = 90^\circ$ 、 $\varphi_3 = 34^\circ$ ;造斜工具的造斜率为  $K = 8.067843^\circ/30$  m,两个靶点间的垂增  $\Delta H = 1.7811$  m。选取第一曲线段的工具面角为  $\beta_1 = 115^\circ$ ,第二曲线段的工具面角为  $\beta_2 = 42^\circ$ ,运用恒工具面模型计算文献[7]得到的计算结果如表 2 所示,其中还包含了文献[7]中的部分数据。

计算结果与文献[7]的计算结果几乎相同,可见采用恒工具面模型进行阶梯水平井轨道设计是可行的。

表 2 文献[7]算例轨道设计数据

井段	井段长/m		完钻井斜角/(°)		完钻方位角/(°)		完钻垂增/m	
	本文方法	文献[7]方法	本文方法	文献[7]方法	本文方法	文献[7]方法	本文方法	文献[7]方法
1	19.7956	20.00000	86.0921	86	29.9794	30	1.0200	1.0473
2	20.9183	21.02627	90.0000	90	34.0312	34	0.7131	0.7339

## 3 结论

阶梯水平井段的轨道优化设计是水平井顺利施工的关键,本文提出了采用恒工具面模型进行三维阶梯水平井的轨道设计,利用空间两段曲线实现阶梯型油藏的开采。同时,在井斜角变化的同时进行

扭方位,可实现轨道绕障。通过实例计算对比分析,可以得到以下结论:

(1) 利用恒工具面模型进行轨道设计,选取合适的工具面角来控制工具的造斜能力和扭方位能力,易于轨迹监控。

(下转第 42 页)

为了能有效地稳定井壁和提高水平井钻井液携岩效果以及润滑效果,现场采用以下几项技术措施。

(1)合理控制钻井液的密度,钻井液密度控制在 $1.23 \sim 1.26 \text{ g/cm}^3$ ,能有效地平衡地层压力并减少压差卡钻的可能性。

(2)降低钻井液的滤失量,加入降滤失剂的含量 $\leq 1\%$ ,减少钻井液侵入地层的滤失量,控制井壁泥饼厚度和质量。

(3)降低钻井液粘度的同时,提高钻井液的动切力,加入XC维护钻井液的动切力,保证钻井液的携岩能力。

(4)加入润滑剂DYRH-3、ORH,每种润滑剂的含量 $\leq 3\%$ 。

(5)降低钻井液中的固相含量,利用固控设备,除去钻井液中的有害固相。

#### 4 结论与建议

(1)通过实钻表明,在富拉尔基油田薄油层开展水平井钻井,能最大限度地钻遇油层,大幅度地提高采收率,进行稠油开采切实可行,取得了明显的经济效益。

(2)简化下部钻具组合能有效地避免钻井风险,避免复杂情况的发生,同时又降低了下部钻具的强度,有效地提高了工具造斜率。

(3)合理运用LWD进行地质导向,能准确地预测油层界面,加之精确的轨迹控制,能最大限度地提高油层钻遇率,加大采收面积。

(4)加强钻井液性能维护,合理运用钻井液固控净化系统,及时补充润滑剂,保证钻井液润滑性能,及时短起下,能有效地修正井壁,保证井下井眼畅通,保证安全高效钻井。

#### 参考文献:

- [1] 张和茂,赵子仁,伊明.浅层水平井井眼轨迹控制技术[J].石油钻采工艺,1998,(5):1-5.
- [2] 苏义脑.水平井井眼轨道控制[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [3] 陈晓华.富县区块中浅层水平井优快钻井技术探讨[J].长江大学学报(自科版),2013(26):89-91.
- [4] 陶红胜,杨全枝,于小龙,等.鄂尔多斯盆地东部低浅层渗透油藏大位移水平井钻井实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(2):37-40.
- [5] 阴艳芳.水平井技术在薄层低渗透油藏开发中的应用[J].石油地质与工程,2007,21(6):50-52.
- [6] 刘魁威,刘霞,邱建君,等.井楼超浅层大位移水平井钻井液体系[J].断块油气田,2008,15(5):88-90.
- [7] 李增乐.中浅层水平井井眼轨道优化设计与现场施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):43-45.
- [8] 窦玉玲.长水平段大位移井井眼轨道优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):50-52.
- [9] 方庆,刘云燕,张国良,等.超薄油层水平井开发技术[J].大庆石油地质与开发,2009,28(5):141-146.
- [10] 王凤波,贺兆顺.地质导向钻井技术及其应用[J].西部探矿工程,2006,(7):204-205.
- [11] 赵春生.吉林扶余地区浅层水平井钻井液研究[D].黑龙江大庆:大庆石油学院,2008.
- [12] 赵景山.胜利油田薄油层水平井钻井技术[J].石油钻探技术,2003,31(5):72-74.

#### (上接第38页)

(2)在进行东北坐标增量计算时,由于方位变化率的非线性化,采用分度计算的方法,计算结果表明该种算法的误差在可接受的范围内。

(3)选用恒工具面模型进行阶梯水平井的轨道设计,利用井斜变化率保持为常数的特性,进行轨道设计,无须考虑方位变化率的不确定性,将三维阶梯水平井轨道设计的计算过程简化。

#### 参考文献:

- [1] 冯志明,顾金玲.阶梯水平井钻井技术[J].石油钻采工艺,2000,5(5):22-26.
- [2] 刘修善.阶梯形水平井段设计方法研究[J].石油钻探技术,

- 2005,33(3):1-5.
- [3] 王波.二维阶梯水平井设计方法研究[J].中外能源,2013,18(7):56-59.
- [4] 王爱国,王敏生,牛洪波.深部薄油层、双阶梯水平井钻井技术[J].石油钻采工艺,2003,25(2):5-8.
- [5] 刘巨保,李治森,李树亮.阶梯水平井水平段三维轨道设计与计算[J].大庆石油学院学报,2004,(6):44-47.
- [6] 鲁港,巩小明,曹传文,等.限定入靶井斜的双圆弧型纠偏轨道设计问题的全解[J].石油天然气学报,2009,31(1):75-79,99.
- [7] 鲁港,陈崇斌.阶梯形水平井段等曲率双圆弧设计问题的解析解[J].石油钻探技术,2014,42(6):13-17.
- [8] 韩志勇.定向钻井设计与计算[M].山东东营:中国石油大学出版社,2007:321-328.
- [9] 刘修善.井眼轨道几何学[M].北京:石油工业出版社,2006:149-152.