

## 大位移井轨道设计方法综述及曲线优选

宋执武<sup>1</sup> 高德利<sup>1</sup> 李瑞营<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油天然气工程学院,北京昌平 102249;2. 大庆石油管理局钻探集团钻井工程技术研究院,黑龙江大庆 163413)

**摘要:** 井眼轨道设计是大位移井的关键技术之一。在总结前人工作的基础上,推导出了圆弧、摆线、悬链线、修正悬链线、拟悬链线、侧位悬链线、抛物线的统一计算公式。对于相同的目标点,计算出了这些曲线的井眼长度、最大造斜率、造斜段长度、下钻摩阻、起钻摩阻、滑动钻进摩阻和旋转钻进摩阻,通过赋给这些项不同的权值,然后用权值乘以各项的值与最小值的比值,最后累加,比较累加后值的大小,即可优选出最佳井眼曲线。

**关键词:** 大角度斜井; 井眼轨迹; 井身结构设计; 加权叠加

**中图分类号:** TE21    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-0890 (2006) 05-0024-04

大位移井由于具有可节省钻井平台的数量、实现海油陆采、大大降低油田开发成本等优点,在海洋油田开发中的应用越来越广泛。井眼轨道设计是大位移井的关键技术之一<sup>[1]</sup>。合理的井眼轨道设计不但能满足现场施工的要求,而且轨道短,摩阻和扭矩小,可实现更大的水垂比,从而可进一步节省费用<sup>[2]</sup>。

大位移井轨道设计主要有圆弧<sup>[3]</sup>、摆线<sup>[4]</sup>、悬链线<sup>[5]</sup>、拟悬链线<sup>[6]</sup>、侧位悬链线<sup>[7]</sup>、侧位抛物线<sup>[8]</sup>、修正悬链线<sup>[9]</sup>等方法。笔者对前人的文献加以总结和重新推导,得到这几种方法的统一计算公式,并给出了一种加权评判计算方法,用来优选最佳曲线。

## 1 井眼轨道设计方法

大位移井的井眼形状大都分三段,即垂直段、造斜段和稳斜段。文献〔3-9〕所列的各种方法主要是针对增斜段的不同形状。设计一口井时,一般已知稳斜段的稳斜角 $\alpha_c$ 、目标点的水平位移 $S$ 、垂深 $H$ 、垂直段长度 $H_0$ 、圆弧过渡段角度 $\alpha_b$ 、圆弧过渡段半径 $R$ (有的有圆弧过渡段,如摆线、悬链线、修正悬链线、拟悬链线,有的没有),求各曲线的特征常数 $a$ 和稳斜段长度 $L_w$ 。求出 $a$ 和 $L_w$ 后,就可用分点计算公式(笔者只给出造斜段分点计算公式,其它段可参考各文献)来设计这口井的井眼形状。

1) 圆弧。特征常数和稳斜段长度计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{(H - H_0) \sin \alpha_c - S \cos \alpha_c}{1 - \cos \alpha_c} \\ L_w = \frac{S - R(1 - \cos \alpha_c)}{\sin \alpha_c} \end{array} \right. \quad (1)$$

分点计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_i = L_{i-1} + \Delta L \\ \alpha_i = \alpha_{i-1} + 180 \Delta L / \pi R \\ H_i = H_0 + R \sin \alpha_i \\ S_i = R(1 - \cos \alpha_i) \\ K_i = 5400 / \pi R \end{array} \right. \quad (2)$$

2) 摆线。特征常数和稳斜段长度计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{S - R(1 - \cos \alpha_b) - \tan \alpha_c (H - H_0 - R \sin \alpha_b)}{2(\alpha_c - \alpha_b) + \sin 2\alpha_b - \sin 2\alpha_c - \tan \alpha_c (\cos 2\alpha_b - \cos 2\alpha_c)} \\ L_w = \frac{H - H_0 - R \sin \alpha_b - a(\cos 2\alpha_b - \cos 2\alpha_c)}{\cos \alpha_c} \end{array} \right. \quad (3)$$

分点计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_i = L_{i-1} + \Delta L \\ \alpha_i = \arccos(\cos \alpha_b - \Delta L / 4a) \\ H_i = H_{i-1} + a(\cos 2\alpha_{i-1} - \cos 2\alpha_i) \\ S_i = S_{i-1} + a[2(\alpha_i - \alpha_{i-1}) + \sin 2\alpha_{i-1} - \sin 2\alpha_i] \\ K_i = 5400 / 4\pi a \sin \alpha_i \end{array} \right. \quad (4)$$

3) 悬链线。特征常数和稳斜段长度计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{H - H_0 - R \sin \alpha_b - [S - R(1 - \cos \alpha_b)] / \tan \alpha_c}{(1 / \sin \alpha_b - 1 / \sin \alpha_c) - \ln \frac{\tan(\alpha_c / 2)}{\tan(\alpha_b / 2)} / \tan \alpha_c} \\ L_w = \frac{S - R(1 - \cos \alpha_b) - (H - H_0 - R \sin \alpha_b) \tan \alpha_c}{\ln \frac{\tan(\alpha_c / 2)}{\tan(\alpha_b / 2)} - (1 / \sin \alpha_b - 1 / \sin \alpha_c) \tan \alpha_c} \end{array} \right. \quad (5)$$

收稿日期: 2006-04-05; 改回日期: 2006-06-06

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(批准号: IRT0411)资助

作者简介: 宋执武(1972—),男,辽宁康平人,2003年获石油大学(北京)工学博士学位,讲师。

联系电话: (010) 89733702

分点计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_i = L_{i-1} + \Delta L \\ \alpha_i = \arctan[1/(\Delta L/a - 1/\tan\alpha_{i-1})] \\ H_i = H_{i-1} + a(1/\sin\alpha_{i-1} - 1/\sin\alpha_i) \\ S_i = S_{i-1} + a \ln \frac{\tan(\alpha_i/2)}{\tan(\alpha_{i-1}/2)} \\ K_i = -\frac{1}{a} \sin^2 \alpha_i \end{array} \right. \quad (6)$$

4)修正悬链线。特征常数和稳斜段长度计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{S - R(1 - \cos\alpha_b) - (H - H_0 - R\sin\alpha_b)\tan\alpha_c}{\alpha_c - \alpha_b - \ln \frac{\sin\alpha_c}{\sin\alpha_b} \tan\alpha_c} \\ L_w = \frac{H - H_0 - R\sin\alpha_b - a \ln \frac{\sin\alpha_c}{\sin\alpha_b}}{\cos\alpha_c} \end{array} \right. \quad (7)$$

分点计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_i = L_{i-1} + \Delta L \\ \alpha_i = 2\arctan[\exp(-\Delta L/a)] \\ H_i = H_{i-1} - a(\ln \sin\alpha_i - \ln \sin\alpha_{i-1}) \\ S_i = S_{i-1} - a(\alpha_i - \alpha_{i-1}) \\ K_i = -\frac{1}{a} \sin\alpha_i \end{array} \right. \quad (8)$$

5)拟悬链线。特征常数和稳斜段长度计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \alpha_b + \frac{L^2 a}{2} + L K_b \\ S_c = \int_0^L \sin\alpha dl \\ H_c = \int_0^L \cos\alpha dl \end{array} \right. \quad (9)$$

$$H_0 + R\sin\alpha_b + H_c + L_w \cos\alpha_c = H$$

$$R(1 - \cos\alpha_b) + S_c + L_w \sin\alpha_c = S$$

分点计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_i = L_{i-1} + \Delta L \\ \alpha_i = \alpha_b + \frac{\Delta L^2 a}{2} + \Delta L K_b \\ H_i = \int_0^{\Delta L} \cos\alpha dl \\ S_i = \int_0^{\Delta L} \sin\alpha_i dl \\ K_i = \Delta L a + K_b \end{array} \right. \quad (10)$$

6)侧位悬链线。特征常数和稳斜段长度计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{S - L_w \sin\alpha_b}{\frac{1}{\cos\alpha_b} - 1} \\ L_w = \frac{\left(\frac{1}{\cos\alpha_b} - 1\right)(H - H_0) - \ln \left[ \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_b}{2}\right) \right]}{\left(\frac{1}{\cos\alpha_b} - 1\right) \cos\alpha_b - \ln \left[ \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_b}{2}\right) \right] \sin\alpha_b} \end{array} \right. \quad (11)$$

分点计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_i = L_{i-1} + \Delta L \\ \alpha_i = \arctan[(L_i - H_0)/a] \\ H_i = H_0 + a \ln \left[ \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_i}{2}\right) \right] \\ S_i = a \left( \frac{1}{\cos\alpha_i} - 1 \right) \\ K_i = -\frac{1}{a} \cos^2 \alpha_i \end{array} \right. \quad (12)$$

7)侧位抛物线。特征常数和稳斜段长度计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{S - R(1 - \cos\alpha_b) - (H - H_0 - R\sin\alpha_b)\tan\alpha_c}{\tan\alpha_b \tan\alpha_c - \frac{\tan^2 \alpha_b + \tan^2 \alpha_c}{2}} \\ L_w = \frac{H - H_0 - R\sin\alpha_b - a(\tan\alpha_c - \tan\alpha_b)}{\cos\alpha_c} \end{array} \right. \quad (13)$$

分点计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_i = \alpha_{i-1} + \Delta\alpha \\ x_i = \frac{a \tan^2 \alpha_i}{2} \\ y_i = a \tan\alpha_i \\ L_i = \frac{a}{2} \left[ \sqrt{\frac{2x_i}{a} \left( 1 + \frac{2x_i}{a} \right)} + \ln \left( \sqrt{\frac{2x_i}{a}} + \sqrt{1 + \frac{2x_i}{a}} \right) \right] \\ K_i = -\frac{a}{4 \left( \frac{a}{2x_i} + 1 \right)^{\frac{3}{2}}} \end{array} \right. \quad (14)$$

在分点计算公式中,  $L_i$  为分点的斜深, m;  $\Delta L$  为两分点间的长度, m;  $\Delta\alpha$  为两分点间的井斜角的差值, rad;  $\alpha_i$  为分点的井斜角, rad;  $H_i$  为分点的垂深, m;  $S_i$  为分点的水平位移, m;  $K_i$  为分点的造斜率,  $(^\circ)/30m$ 。

需要特别说明的是: 拟悬链线特征常数和稳斜段长度的计算公式只能用数值法解, 而没有解析解; 侧位抛物线的分点计算公式要用增加井斜角的方法来计算。

## 2 加权评判法

### 2.1 加权评判法曲线优选计算公式

在相同的垂深、水平位移、稳斜角和造斜点深度的

情况下,计算出各种曲线的井眼长度、最大造斜率、造斜段长度、下钻摩阻、起钻摩阻、滑动钻进摩阻和旋转钻进摩阻。

表 1 为加权评判法计算过程,其中:

$$R_i = \sum_{n=1}^7 \frac{C_{in}}{C_{mn}} J_n \quad (15)$$

表 1 加权评判法曲线优选计算过程

| 曲线     | 井眼长度     | 最大造斜率    | 增斜段长     | 下钻摩阻     | 起钻摩阻     | 滑动摩阻     | 旋转摩阻     | 计算结果  |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| 权值     | $J_1$    | $J_2$    | $J_3$    | $J_4$    | $J_5$    | $J_6$    | $J_7$    |       |
| 圆弧法    | $C_{11}$ | $C_{12}$ | $C_{13}$ | $C_{14}$ | $C_{15}$ | $C_{16}$ | $C_{17}$ | $R_1$ |
| 摆线法    | $C_{21}$ | $C_{22}$ | $C_{23}$ | $C_{24}$ | $C_{25}$ | $C_{26}$ | $C_{27}$ | $R_2$ |
| 悬线法    | $C_{31}$ | $C_{32}$ | $C_{33}$ | $C_{34}$ | $C_{35}$ | $C_{36}$ | $C_{37}$ | $R_3$ |
| 修正悬链线法 | $C_{41}$ | $C_{42}$ | $C_{43}$ | $C_{44}$ | $C_{45}$ | $C_{46}$ | $C_{47}$ | $R_4$ |
| 拟悬链线法  | $C_{51}$ | $C_{52}$ | $C_{53}$ | $C_{54}$ | $C_{55}$ | $C_{56}$ | $C_{57}$ | $R_5$ |
| 侧位悬链线法 | $C_{61}$ | $C_{62}$ | $C_{63}$ | $C_{64}$ | $C_{65}$ | $C_{66}$ | $C_{67}$ | $R_6$ |
| 抛物线    | $C_{71}$ | $C_{72}$ | $C_{73}$ | $C_{74}$ | $C_{75}$ | $C_{76}$ | $C_{77}$ | $R_7$ |

## 2.2 实际算例

现以垂深 2 500 m、水平位移 5 000 m、造斜点深度为 300 m、稳斜角为 74°、Φ244.5 mm 套管下深 3 000 m、平均摩阻系数 0.25 为前提条件,进行井眼轨道设

式中,  $R_i$  为第  $i$  行计算结果;  $C_{in}$  为第  $i$  行第  $n$  列的数值, 可由前面的公式经软件计算得出;  $C_{mn}$  为第  $n$  列所有计算出的数中最小值;  $J_n$  为第  $n$  列的权值, 根据各项的重要程度由人为给定。将所有行的“计算结果”进行对比, 最小值者就是最优者。

表 2 各曲线的几何特征与摩阻扭矩情况

| 曲线     | 井眼长度/m   | 最大造斜率/(°) • (30m) <sup>-1</sup> | 增斜段长/m   | 下钻摩阻/kN | 起钻摩阻/kN | 滑动摩阻/kN | 旋转摩阻/kN • m |
|--------|----------|---------------------------------|----------|---------|---------|---------|-------------|
| 圆弧法    | 6 048.57 | 1.69                            | 1 313.34 | 404.9   | 578.0   | 418.1   | 42.2        |
| 摆线法    | 6 017.97 | 2.63                            | 1 542.85 | 411.8   | 519.4   | 421.2   | 40.8        |
| 悬链线法   | 6 062.98 | 4.71                            | 1 117.20 | 407.3   | 609.1   | 422.3   | 44.1        |
| 修正悬链线法 | 6 048.91 | 2.59                            | 1 227.27 | 405.5   | 597.6   | 419.2   | 43.0        |
| 拟悬链线法  | 6 035.23 | 2.11                            | 1 307.30 | 406.2   | 573.7   | 419.1   | 42.3        |
| 侧位悬链线法 | 5 979.22 | 2.71                            | 2 210.89 | 417.8   | 511.0   | 423.4   | 41.9        |

表 3 各项的加权系数情况及计算结果

| 曲线     | 井眼长度  | 最大造斜率 | 增斜段长  | 下钻摩阻  | 起钻摩阻  | 滑动摩阻  | 旋转摩阻  | 计算结果  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 权值     | 4     | 1     | 1     | 2     | 1     | 2     | 2     |       |
| 圆弧法    | 1.012 | 1.000 | 1.176 | 1.000 | 1.131 | 1.000 | 1.034 | 13.41 |
| 摆线法    | 1.006 | 1.556 | 1.381 | 1.017 | 1.016 | 1.007 | 1.000 | 14.02 |
| 悬链线法   | 1.014 | 2.787 | 1.000 | 1.006 | 1.192 | 1.010 | 1.080 | 15.22 |
| 修正悬链线法 | 1.012 | 1.533 | 1.098 | 1.001 | 1.169 | 1.003 | 1.054 | 13.96 |
| 拟悬链线法  | 1.009 | 1.249 | 1.170 | 1.003 | 1.123 | 1.002 | 1.037 | 13.66 |
| 侧位悬链线法 | 1.000 | 1.604 | 1.979 | 1.032 | 1.000 | 1.013 | 1.027 | 14.73 |

由表 3 可见,圆弧法的最后加权值最小,所以为最佳井身剖面。

## 3 结 论

1) 针对大位移井轨道优化设计这一关键问题,在前人工作的基础上,推导出了圆弧、摆线、悬链线、修正悬链线、拟悬链线、侧位悬链线、抛物线的统一计算公式,使编程计算更简洁、方便。

2) 给出了加权评判法优选曲线的计算公式,可根据井眼长度、造斜段长度、造斜率及相应的摩阻、扭矩等因素优选出最佳曲线。

## 参 考 文 献

- 吴爽,李骥,张焱.大位移井技术研究的现状分析[J].石油钻探技术,2002,30(5):17-19.
- 卢明辉,管志川.大位移井轨道设计中关键参数的确定[J].石油钻探技术,2003,31(5):70-71.

- [3] 崔红英,张建国,韩志勇. 两维定向井轨迹设计的通用方程[J]. 钻采工艺,1999,22(4):6-8.
- [4] 卢明辉,管志川. 大位移井摆线轨道设计方法[J]. 石油大学学报(自然科学版),2003,27(6):33-35.
- [5] 韩志勇. 定向井悬链线轨道的无因次设计方法[J]. 石油钻采工艺,1997,19(4):13-16.
- [6] 雷正义,付建红,姜伟,等. 拟悬链线轨迹设计方法及其摩阻扭矩评价[J]. 石油钻采工艺,2004,26(6):13-17.
- [7] 张建国,黄根炉,韩志勇,等. 一种新的大位移井轨道设计方法[J]. 石油钻采工艺,1998,20(6):6-10.
- [8] 张建国,崔红英. 侧位抛物线大位移井轨道设计[J]. 中国海上油气(工程),2000,12(2):35-38.
- [9] 韩志勇. 关于大位移井轨道设计问题的思考[A]. 陕西西安:大位移井理论研讨会,石油工程学会,1997-11.

〔审稿 韩志勇〕

## Summary and Optimization of Extended-Reach-Well Trajectory Design Methods

Song Zhiwu<sup>1</sup> Gao Deli<sup>1</sup> Li Ruiying<sup>2</sup>

(1. Department of Oil & Gas Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China; 2. Drilling Technology Research Institute, Drilling & Exploration Group, Daqing Petroleum Administration, Daqing, Heilongjiang, 163413, China)

**Abstract:** Well trajectory design is one of the key techniques for successfully drilling an extended reach well. Based on summarizing researches done by others, a comprehensive formula has been deducted to calculate curve coordinates of arc, cycloid, catenary, amended catenary, near catenary, lateral catenary, lateral parabola. For the same target, after figuring out curve parameters of wellbore length, the maximum build up rate, build section length, trip into and out friction, sliding drilling friction, rotary drilling friction, etc, and assigning different weights to these parameters, then the optimum well path curve can be selected by comparing the sum of parameter values multiplied by their weights.

**Key words:** high angle deviated hole; hole trajectory; casing program design; weight stacking

## 欢迎订阅 2007 年《石油钻探技术》

《石油钻探技术》创刊于 1973 年,经国家科委批准,1979 年在全国发行,1988 年对国内外公开发行。她是我国石油天然气钻井方面历史悠久的综合技术性刊物,深得国内外读者的厚爱和钻井工程界的好评。她是中文核心期刊和历年全国科技论文统计源刊,被《中国石油文摘》和《中国地质文摘》等大量摘录,被美国《石油文摘》等数据库大量录用,同时进入国际最大联机检索系统 DIALOG、国际第二大联机检索系统 ORBIT 以及 Ulrich 国际期刊指南数据库。1996 年加入《中国学术期刊(光盘版)》全文数据库系统,1999 年加入 ChinaInfo 网络信息资源系统《电子期刊》,从而为中文钻井论文进入世界信息高速公路架起一座桥梁。2001 年入选《中国核心期刊(遴选)数据库》,成为评价国内期刊技术、学术水平的主要刊源之一。

本刊选题注重指导性、先进性和适用性,坚持理论与实践相结合,以多刊快刊应用性文章为特色。主要报道国内石油钻探工程(包括钻井、钻井液、固井、完井、开采等专业)以及钻探机械设备与自动化方面的科技进展和现场经验,适当介绍国外石油钻探技术发展的水平和动向。栏目包括:教授专家专栏、钻井与完井、固井与泥浆、工具与设备、试井与开采、管理与发展、动态与信息。适合于石油、海洋、地矿行业广大钻井工程技术人员、高等院校师生和经营管理者阅读。

本刊自 1993 年开办彩色广告以来,成效显著,已成为石油、海洋、地矿、机电、化工、轻工、冶金、煤炭、军工、建材、信息等行业科技人员联系的纽带、科研人员交流信息的园地和高校师生了解现场的益友。本刊广告刊出及时,收费合理,采用彩色桌面系统制作高精度彩页与插页。欢迎随时联系广告业务。

本刊逢单月末出版。2007 年每期定价 12 元,全年 6 期共 72 元。自办发行,邮汇与电汇均可。欢迎有关单位和个人及时订阅。订阅办法:

1. 认真填写订阅单及汇款单,切勿潦草,以免因地址不详而无法邮寄。可破季订阅。
2. 银行汇款请寄:山东省德州市建行交通支行,账号 37001842901050002128,户名“中国石油化工股份有限公司德州石油钻井研究所”,并注明“期刊”字样。
3. 邮局汇款请寄:山东省德州市东风东路 35 号石油钻井研究所编辑部(邮编 253005,电话:0534-2670163,2670121, E-mail: syzt@vip.163.com, 传真:0534-2622468, http://syzt.chinajournal.net.cn)。