

欠位移水平井的设计方法^{*}刘修善¹ 张海山²

(1.中国石化石油勘探开发研究院 2.大庆钻探工程公司钻井五公司)

刘修善等.欠位移水平井的设计方法.天然气工业,2008,28(10):61-63.

摘要 当地面条件、造斜点位置和工具造斜能力的可选范围受到限制时,如果采用常规的井身剖面,有些水平井会因靶前位移不足而无法实现设计和施工。为解决欠位移水平井设计和施工难题,提出了设计这种欠位移水平井的双S剖面,它是由直线段和圆弧段相间排列的7段式剖面。系统地研究了双S剖面的特征参数和约束方程,其设计方法不仅适用于各种三弧剖面,而且还避免了分步设计和试算,保证了井眼轨道设计的科学性和实用性。研究表明:欠位移水平井设计的实质是确定出合理的造斜点位置和反向造斜所钻达的井斜角,以满足井身剖面对于垂深和水平位移的要求,并给出了设计示例。

关键词 钻井理论 井眼 轨迹 数学模型 水平钻井 设计方法

20世纪90年代初期,我国开展了大规模的水平井钻井技术攻关。经过近20a的研究与应用,水平井已应用于几乎所有类型的油气藏,成为油气田开发中的一项成熟实用技术。2006年以来,我国又掀起了推广应用水平井的热潮。对于新区产能建设、老区调整及剩余油挖潜,优先考虑水平井方案;对于边底水油藏、稠油油藏、裂缝性油藏、天然气藏,主要用于提高采收率和开发效益;对于薄层及低渗透油藏,主要是实现低效储量的有效动用和高效开发。井眼轨道设计是实现水平钻井的首要环节,其优化设计的基本原则是有利于安全、优质、快速钻井,节约钻井成本。由于地面条件等方面的限制,有时水平井的靶前位移(从井口到首靶的水平位移)不足。笔者系统地研究了这种欠位移水平井的典型剖面、数学模型和设计方法,保证了井眼轨道设计的科学性和实用性。

一、典型剖面及特征参数

目前,我国的水平井多为中半径水平井,普遍设计成双增剖面,造斜率为 $(6^\circ\sim 20^\circ)/30\text{ m}$ 。在地面条件和造斜点可选范围受限的情况下,有时靶前位移过小,而需要先反向造斜,然后再“反扣”到靶区方向上^[1-5]。其井身剖面是在双增剖面的上部再增加一个直线段和圆弧段,即“直线—圆弧—直线—圆弧—

直线—圆弧—直线”剖面,简称为双S剖面。如图1所示。该剖面的特点是:直线段和圆弧段相间排列,

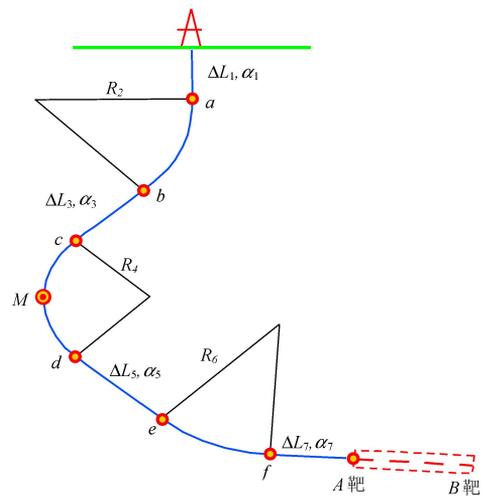


图1 欠位移水平井的典型剖面图

且以直线段开始并以直线段结束。为方便,直线段的序号取为奇数,圆弧段的序号取为偶数,共7个井段。对于二维井身剖面而言,直线段的特征参数是段长和井斜角,圆弧段的特征参数是曲率(或曲率半径)及起止井斜角。由于整个井身剖面必须是连续光滑的,所以圆弧段的起止点井斜角等于相邻直线段的井斜角。因此,该井身剖面的特征参数共有11个。显然,这些特征参数决定着井身剖面的形状。确

^{*} 本文受到中国石油化工股份有限公司科技攻关项目的资助。

作者简介:刘修善,1962年生,教授;2000年于清华大学博士后工作站出站,现为中国石化石油勘探开发研究院首席专家。地址:(100083)北京市海淀区志新东路14号。电话:(010)51616602。E-mail:xliu@pepris.com

定出了这些特征参数,井身剖面就随之确定了。反之,亦然。井身剖面设计就是根据设计条件和要求,确定出井身剖面的特征参数。双S剖面的第2个圆弧段上存在一个井斜角为零的点M。M点以上为S型剖面,M点以下为双增剖面,所以双S剖面可以看作是由S型剖面和双增剖面构成的。对于下部的双增剖面,如果给出了全部特征参数,就可以计算出M点和A靶之间的垂深增量和水平位移。然后,根据该垂深增量和水平位移,可以设计出上部的S型剖面。当然,也可以先设计下部的S型剖面,再设计下部的双增剖面。显然,这种“分步设计”的方法,可以得到双S剖面的设计结果,但是计算过程繁琐而且往往需要多次的试算,难以实现优化设计。笔者将把双S剖面作为一个整体进行研究,并给出其设计方法。

二、约束方程及设计方法

井身剖面设计应满足坐标要求,即各井段垂深和水平位移增量之和应等于靶点的垂深和水平位移。所以:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 \Delta L_{2i-1} \cos \alpha_{i-1} + \sum_{j=1}^3 R_{2j} (\sin \alpha_{j+1} - \sin \alpha_{j-1}) = H_t \\ \sum_{i=1}^4 \Delta L_{2i-1} \sin \alpha_{i-1} + \sum_{j=1}^3 R_{2j} (\cos \alpha_{j-1} - \cos \alpha_{j+1}) = S_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: L 为井深,m; α 为井斜角, $(^\circ)$; R 为曲率半径,m; H_t 为靶点垂深,m; S_t 为靶点水平位移,m。

二维井身剖面的约束方程包含2个方程。因此,可以求解出2个待求的特征参数^[3]。理论上,这2个待求参数是可以任意选取的,其常用的求解组合为:

(1)求两个直线井段的长度

$$\begin{cases} \Delta L_p = \frac{H_0 \sin \alpha_q - \cos \alpha_q}{\sin(\alpha_q - \alpha_p)} \\ \Delta L_q = \frac{H_0 \sin \alpha_p - S_0 \cos \alpha_p}{\sin(\alpha_q - \alpha_p)} \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} H_0 = H_t - \sum_{i \in S(p,q)} \Delta L_i \cos \alpha_i - \sum_{j \in C} R_j (\sin \alpha_{j+1} - \sin \alpha_{j-1}) \\ S_0 = S_t - \sum_{i \in S(p,q)} \Delta L_i \sin \alpha_i - \sum_{j \in C} R_j (\cos \alpha_{j-1} - \cos \alpha_{j+1}) \end{cases}$$

式中: p, q 为待求参数所属的井段序号; $i \in S(p, q)$ 表示除 p, q 之外的直线井段; $j \in C$ 表示圆弧井段。

(2)求直线井段的长度和井斜角

$$\begin{cases} \Delta L_p = B - \sqrt{B^2 - C} \\ \tan \frac{\alpha_i}{2} = \frac{b - \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a + c} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} B = H_0 \cos \alpha_p + S_0 \sin \alpha_p \\ C = H_0^2 + S_0^2 - \Delta L_q^2 - (R_{q-1} - R_{q+1})^2 \\ H_0 = H_t - \sum_{i \in S(p,q)} \Delta L_i \cos \alpha_i - \sum_{j \in C(p,q)} R_j (\sin \alpha_{j+1} - \sin \alpha_{j-1}) \\ S_0 = S_t - \sum_{i \in S(p,q)} \Delta L_i \sin \alpha_i - \sum_{j \in C(p,q)} R_j (\cos \alpha_{j-1} - \cos \alpha_{j+1}) \\ a = (R_{q-1} - R_{q+1}) \cos \alpha_p + \Delta L_q \sin \alpha_p \\ b = (R_{q-1} - R_{q+1}) \sin \alpha_p - \Delta L_q \cos \alpha_p \\ c = H_0 \sin \alpha_p - S_0 \cos \alpha_p \end{cases}$$

式中: $j \in C(p, q)$ 表示除 p, q 之外的圆弧井段。

应该注意的是:在双S剖面上,下部的2个圆弧段向靶点方向弯曲,而上部的圆弧段则是反向弯曲的。由于上部圆弧段将使井眼轨道背离靶点,所以其曲率或曲率半径应取为负值。同理,序号为3的直线井段也使井眼轨道向靶点的相反方向倾斜,其井斜角亦应取为负值。因此,将 R_2 和 α 取为负值,其余参数均为正值,就标明了各井段的行进方向,从而井身剖面被唯一地确定。这样,在井口和靶点位置确定的情况下,根据井身剖面的特征参数,从井口开始沿着井眼轨道依次经历各井段,便会抵达靶点而不会引起歧义。

三、设计实例

例1:某水平井设计方位为 60° ,A靶的垂深和水平位移分别为1200m和138m,B靶的垂深和水平位移分别为1210m和450m。因靶前位移不足,需要采用双S型剖面。造斜点选在673m处,3个圆弧段的造斜率依次为 $-4.5^\circ/30\text{m}$ 、 $8^\circ/30\text{m}$ 和 $10^\circ/30\text{m}$,第3个直线段(井段序号为5)的段长和井斜角分别为32m和 65° 。在进行水平井轨道设计时,应先设计水平井段,然后再设计从井口到A靶的靶前轨道。若将该水平井段设计成直线段,则其段长和井斜角分别为312.159m和 88.164° 。对于靶前轨道,如果以第3个圆弧段直接着陆至A靶,则根据上述设计条件,第2个直线段(井段序号为3)的段长和井斜角分别为17.073m和 -28.827° 。该水平井的设计计算结果,见表1。

例2:某水平井设计方位为 180° ,A靶的垂深和水平位移分别为1500m和202.5m,B靶的垂深和水平位移分别为1512.6m和563.5m。水平井段采用稳斜设计,其段长和井斜角分别为361.22m和 88.00° 。靶前轨道采用双S型剖面设计,造斜点选在960m处,3个圆弧段的造斜率依次为 $-4^\circ/30\text{m}$ 、

表1 例1的设计结果表

井深 (m)	井斜角 (°)	方位角 (°)	垂深 (m)	北坐标 (m)	东坐标 (m)	水平位移 (m)	平移方位 (°)	井眼曲率 [(°)/30 m]	备注
0.00	0.00	/	0.00	0.00	0.00	0.00	/	0.00	井口点
673.00	0.00	240.00	673.00	0.00	0.00	0.00	/	0.00	a点
865.18	28.83	240.00	857.17	-23.67	-40.99	47.33	240.00	4.50	b点
882.25	28.83	240.00	872.13	-27.78	-48.12	55.57	240.00	0.00	c点
1 234.10	65.00	60.00	1 170.46	20.93	36.26	41.86	60.00	8.00	d点
1 266.10	65.00	60.00	1 183.98	35.43	61.37	70.87	60.00	0.00	e点
1 335.60	88.16	60.00	1 200.00	69.00	119.51	138.00	60.00	10.00	A靶
1 647.76	88.16	60.00	1 210.00	225.00	389.71	450.00	60.00	0.00	B靶

7.5°/30 m 和 7.5°/30 m。若要求在进入 A 靶之前 15 m 提前着陆,圆弧段间两个直线段的井斜角依次为一24°和 56°,则其段长分别为 22.5 m 和 39.126 m。该水平井的设计计算结果,见表 2。

表2 例2的设计结果表

井深 (m)	井斜角 (°)	方位角 (°)	垂深 (m)	北坐标 (m)	东坐标 (m)	水平位移 (m)	平移方位 (°)	井眼曲率 [(°)/30 m]	备注
0.00	0.00	/	0.00	0.00	0.00	0.00	/	0.00	井口点
960.00	0.00	360.00	960.00	0.00	0.00	0.00	/	0.00	a点
1 140.00	24.00	360.00	1 134.78	37.15	0.00	37.15	0.00	4.00	b点
1 162.50	24.00	360.00	1 155.34	46.30	0.00	46.30	360.00	0.00	c点
1 482.50	56.00	180.00	1 438.56	-34.91	0.00	34.91	180.00	7.50	d点
1 521.63	56.00	180.00	1 460.43	-67.35	0.00	67.35	180.00	0.00	e点
1 649.63	88.00	180.00	1 499.48	-187.51	0.00	187.51	180.00	7.50	f点
1 664.63	88.00	180.00	1 500.00	-202.50	0.00	202.50	180.00	0.00	A靶
2 025.85	88.00	180.00	1 512.60	-563.50	0.00	563.50	180.00	0.00	B靶

四、结 论

(1)在造斜点可选范围和工具造斜能力相对确定的条件下,由于地面条件的限制可能出现靶前位移不足的情况。对于这种欠位移水平井,可以采用双 S 剖面来实现轨道设计。

(2)双 S 剖面是具有 4 个直线段和 3 个圆弧段的七段式剖面,直线段和圆弧段相间排列,以直线段开始并以直线段结束。井身剖面上共有 11 个特征参数,给出其中的 9 个特征参数即可实现二维设计。在圆弧段曲率和稳斜段长度等参数确定的条件下,双 S 剖面设计的实质是设计出合理的造斜点位置和反向造斜所钻达的井斜角,以满足该剖面对于垂深和水平位移的要求。笔者的设计方法适用于所有的三弧剖面。当特征参数均为正值时,三弧剖面即为三增剖面;而双 S 剖面也是一种三弧剖面,其上部圆弧段的曲率(或曲率半径)和所钻达的井斜角应取为

负值。如果圆弧段的曲率和直线段的井斜角采用不同的正负值组合,而且将直线段的段长取为零来表示没有该直线段,还可以衍生出很多更为复杂的剖面。

参 考 文 献

- [1] 王峰.短位移、浅垂深“反勾”型水平井钻完井技术[J].石油钻采工艺,2005,27(3):5-7.
- [2] 王志国.冷 41—平 14“L”型水平井轨迹优化与控制技术[J].石油钻探技术,2006,34(2):72-74.
- [3] 刘修善.井眼轨道几何学[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [4] 陈海龙.水平井段最优长度的确定方法研究[J].西南石油学院学报,2003,25(1):47-48.
- [5] 范翔宇.井眼轨迹和地层剖面及测井曲线综合成图研究[J].西南石油学院学报,2004,26(2):1-3.

(收稿日期 2008-08-17 编辑 钟水清)