

近靶纠偏轨道设计问题的解析解

申大媛

(中国石油辽河油田公司勘探开发研究院,辽宁 盘锦 124010)

摘要:在钻井监测过程中,当前井底接近目标点时,纠偏轨道一般采用“线段-圆弧”形式来设计。建立了近靶轨道设计的数学模型,对4种求解组合给出了数学模型的解析解。阐述了解析解的一个应用:绘制解析解曲线图能够帮助计算机软件使用者做出更加合理的纠偏轨道设计。实际算例表明,解析解能够准确、快速地给出近靶纠偏轨道的设计方案,对于指导钻井监测工作有一定的指导意义。

关键词:井眼轨道;纠偏设计;圆弧;钻井;解析解

中图分类号:TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)05-0025-04

Analytic Solution of Approach Target Rectification Trajectory Design/SHEN Da-yuan (E & D Research Institute of Liaohe Oilfield Company of PetroChina, Panjin Liaoning 124010, China)

Abstract: In the process of drilling monitoring, when well bottom approaches the target point, rectification trajectory is generally designed with ‘line segment-arc method’. The mathematic model has been established, and analytic solutions of mathematic model are given for 4 solving combinations. One application of analytic solutions is illustrated: drawing graphics of analytic solutions can enable the user of computer software to design rectification trajectory rationally. Actual calculated cases indicated that accurate rectification trajectory could be quickly designed by analytic solutions, which has guiding significance in drilling monitoring.

Key words: trajectory; rectification design; arc; drilling; analytic solution

在实际钻井过程中,如果实钻井眼轨迹偏离设计井眼轨道,就要进行纠偏轨道设计,以保证后续钻进能够钻达目标点。在MWD系统中,随时给出纠偏轨道设计、提供钻进调整控制参数也是一项基本的功能。

在进行纠偏轨道设计时,已知当前井底参数:井深、井斜角、方位角和空间坐标等,这些参数可以根据实钻测斜数据计算而得^[1-4]。纠偏轨道的初始点为当前井底,结束点为要钻达的目标点。纠偏轨道由多段空间曲线连接而成。每个井段的曲线类型可以是线段、空间圆弧、圆柱螺旋曲线、自然曲线等,而线段和空间圆弧是最常用的曲线类型。

在当前井底接近目标点时,由于距离目标点比较近,可供轨迹调整的机会减少,可以使用只用“线段-圆弧”型的设计轨道。尽管是三维轨道设计问题,但是由于线段与圆弧以及目标点在同一个空间斜平面上,根据二维设计问题可以解析求解的结论^[5,6]推测,近靶轨道设计问题也可以求出解析解。本文对近靶轨道设计问题进行了研究,对4种求解组合给出了问题的解析解;并介绍了解析解在协助纠偏轨道设计方面的应用。

1 数学模型

假设:井眼轨道由2个井段组合而成,第一段为线段,第二段为圆弧。两个井段在公共点相切,并且井眼方向一致。

约定:井段依次标记为井段1和井段2,井段端点依次标记为端点0、端点1和端点2;井段或端点的参数标以相应的下标;公式中具有长度量纲的参数其单位为m,角度的单位为弧度,井眼曲率单位为弧度/m。

近靶纠偏轨道设计问题所满足的方程组如下^[7]:

$$\Delta X = l_0 \Delta L_1 + (l_0 + l_2) \lambda_2 \quad (1)$$

$$\Delta Y = m_0 \Delta L_1 + (m_0 + m_2) \lambda_2 \quad (2)$$

$$\Delta Z = n_0 \Delta L_1 + (n_0 + n_2) \lambda_2 \quad (3)$$

$$\lambda_2 = R_2 \tan(\varepsilon_2/2) \quad (4)$$

$$\cos \varepsilon_2 = l_0 l_2 + m_0 m_2 + n_0 n_2 \quad (5)$$

$$l_2^2 + m_2^2 + n_2^2 = 1 \quad (6)$$

式中: ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ——目标点位移; R_2 ——圆弧半径; ε_2 ——圆弧的弯曲角; λ_2 ——临时变量; l_i 、 m_i 、 n_i ——端点*i*($i = 0, 1, 2$)处的井眼方向,由下式计算:

收稿日期:2008-12-09

作者简介:申大媛(1964-),女(汉族),河北丰润人,中国石油辽河油田公司勘探开发研究院工程师,石油地质勘探专业,从事石油地质综合研究工作,辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街95号。

$$l_i = \sin\alpha_i \cos\varphi_i \quad (7)$$

$$m_i = \sin\alpha_i \sin\varphi_i \quad (8)$$

$$n_i = \cos\alpha_i \quad (9)$$

式中: α_i 、 φ_i ——端点处的井斜角和方位角。

方程组(1~6)共有6个方程,待定量为 ΔL_1 、 R_2 、 λ_2 、 ε_2 、 l_2 、 m_2 和 n_2 共7个,必须将其中的一个指定为已知的才能对方程组(1~6)进行求解。

2 方程组的化简

$$\text{记 } D = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} \quad (10)$$

$$M_i = l_i \Delta X + m_i \Delta Y + n_i \Delta Z$$

再定义无量纲参数如下: $v = \Delta L_1 / D$, $u = (\Delta L_1 + \lambda_2) / D$, $w = \lambda_2 / D$, $s_i = M_i / D$, $k_2 = D / R_2$, $\Delta x = \Delta X / D$, $\Delta y = \Delta Y / D$, $\Delta z = \Delta Z / D$

则式(1~4)可以改写成下面的形式:

$$\Delta x = l_0 u + l_2 w \quad (11)$$

$$\Delta y = m_0 u + m_2 w \quad (12)$$

$$\Delta z = n_0 u + n_2 w \quad (13)$$

$$\cos\varepsilon_2 = (1 - k_2^2 w^2) / (1 + k_2^2 w^2) \quad (14)$$

将式(11~13)的等式左右两端分别平方之后再相加,得:

$$u^2 + w^2 + 2uwc\cos\varepsilon_2 = 1 \quad (15)$$

将式(11~13)改写成下面的形式:

$$l_0 u = \Delta x - l_2 w$$

$$m_0 u = \Delta y - m_2 w$$

$$n_0 u = \Delta z - n_2 w$$

上面3个等式左右两端分别平方之后再相加,得:

$$u^2 = 1 + w^2 - 2s_2 w \quad (16)$$

再将式(11~13)改写成下面的形式:

$$l_2 w = \Delta x - l_0 u$$

$$m_2 w = \Delta y - m_0 u$$

$$n_2 w = \Delta z - n_0 u$$

上面3个等式左右两端分别平方之后再相加,得:

$$w^2 = 1 + u^2 - 2s_0 u \quad (17)$$

从式(17)和(15)得:

$$s_0 = u + wc\cos\varepsilon_2 \quad (18)$$

从式(17)和(16)得:

$$s_2 = w + uc\cos\varepsilon_2 \quad (19)$$

3 解析解

根据给定的设计条件的不同,给出方程组(1~6)的解析解公式。

3.1 已知稳斜段长

待求解的未知量为圆弧井段井眼曲率、入靶井

斜角和方位角等。将 $w = u - v$ 代入式(17)得:

$$2(s_0 - v)u = 1 - v^2$$

解得:

$$u = (1 - v^2) / [2(s_0 - v)] \quad (20)$$

$$w = (1 - 2s_0 v + v^2) / [2(s_0 - v)] \quad (21)$$

从式(14)和(18)得:

$$k_2 = (1/w) \sqrt{(w + u - s_0) / (w - u + s_0)}$$

将式(20~21)代入上式,得:

$$k_2 = 2 \sqrt{1 - s_0^2 / (1 - 2s_0 v + v^2)} \quad (22)$$

求出 u 、 w 和 k_2 之后,从

$$\cos\alpha_2 = (\Delta z - n_0 u) / w \quad (23)$$

$$\cos\varphi_2 = (\Delta x - l_0 u) / (w \sin\alpha_2) \quad (24)$$

$$\sin\varphi_2 = (\Delta y - m_0 u) / (w \sin\alpha_2) \quad (25)$$

求出井斜角 α_2 和方位角 φ_2 ,进而计算井眼轨道参数。

3.2 已知圆弧井段井眼曲率

从式(22)可知:

$$v^2 - 2s_0 v + 1 - 2 \sqrt{1 - s_0^2} / k_2 = 0 \quad (26)$$

这是关于未知数 v 的一元二次代数方程,其解为:

$$v = s_0 - \sqrt{s_0^2 - 1 + 2 \sqrt{1 - s_0^2} / k_2} \quad (27)$$

约束条件为: $k_2 < 2 / \sqrt{1 - s_0^2}$

其余参数从式(20~21)和式(23~25)来计算。

3.3 已知入靶井斜角

这时 $n_2 = \cos\alpha_2$ 为已知量,将式(20~21)代入式(13)得:

$$(n_2 - n_0)v^2 + 2(\Delta z - n_2 s_0)v + n_0 + n_2 - 2s_0 z = 0 \quad (28)$$

由于 $n_2 \neq n_0$,式(28)是关于未知数 v 的一元二次代数方程,有实数解的必要条件是:

$$d = (\Delta z - n_0 s_0)^2 + (n_0^2 - n_2^2)(1 - s_0^2) \geq 0 \quad (29)$$

这个条件给出了 n_2 的约束范围:

$$|n_2| \leq \sqrt{n_0^2 + (\Delta z - n_0 s_0)^2 / (1 - s_0^2)} \quad (30)$$

方程(29)的两个实数解为:

$$v' = (\Delta z - n_0 s_0 + \sqrt{d}) / (n_0 - n_2) \quad (31)$$

$$v'' = (\Delta z - n_0 s_0 - \sqrt{d}) / (n_0 - n_2) \quad (32)$$

选择大于0小于 s_0 的实数解作为方程组的解。

求出 v 之后,按照3.1中的方法确定其余未知量。

3.4 已知入靶方位角

这时,式(11~12)改写成:

$$\Delta x - l_0 u = w \sin\alpha_2 \cos\varphi_2 \quad (33)$$

$$\Delta y - m_0 u = w \sin \alpha_2 \sin \varphi_2 \quad (34)$$

得:

$$(\Delta x - l_0 u) \sin \varphi_2 = (\Delta y - m_0 u) \cos \varphi_2$$

即:

$$(l_0 \sin \varphi_2 - m_0 \cos \varphi_2) u = \Delta x \sin \varphi_2 - \Delta y \cos \varphi_2$$

当 $l_0 \sin \varphi_2 = 0$ 时,解得:

$$u = (\Delta x \sin \varphi_2 - \Delta y \cos \varphi_2) / (l_0 \sin \varphi_2 - m_0 \cos \varphi_2) \quad (35)$$

代入式(17)求出 w , 进而求出 v , 然后按照 3.1 中的方法确定其余未知量。

当 $l_0 \sin \varphi_2 = m_0 \cos \varphi_2$ 时, 井眼轨道在一个铅垂平面内, 仅给出入靶方位无法求解。

在以上 4 种求解情况中, 确定了井段关键点参数之后, 再计算出纠偏轨道上每点井身参数^[8,9], 并绘制水平投影图和剖面展开图。

4 算例

辽河油田某井设计垂深 2500 m, 水平位移 200 m, 设计方位 10°, 当钻至井深 2200 m 时, 需要进行纠偏轨道设计。根据测斜数据使用最小曲率法计算出当前井底参数为: 井深 2215.00 m, 井斜角 17.15°, 方位角 22.40°, 相对北坐标 101.96 m, 相对东坐标 13.26 m, 垂深 2200.40 m, 水平投影长度 148.99 m。

算例一: 已知稳斜井段长度 150 m, 求得圆弧井段的井眼曲率和长度分别为 1.748°/25 m 和 165.72 m, 入靶井斜角和方位角分别为 22.48° 和 351.45°, 纠偏轨道钻达井深 2530.72 m。

算例二: 已知圆弧井段的井眼曲率为 1.5°/25 m, 求得稳斜井段长度 136.79 m, 圆弧井段长度 178.85 m, 入靶井斜角和方位角分别为 21.93° 和 353.18°, 纠偏轨道钻达井深 2530.64 m。

算例三: 已知入靶井斜角为 20°, 求得圆弧井段的井眼曲率和长度分别为 0.7234°/25 m 和 257.34 m, 稳斜井段长度 57.98 m, 入靶方位角为 0.62°, 纠偏轨道钻达井深 2530.32 m。

算例四: 已知入靶方位角为 350°, 求得圆弧井段的井眼曲率和长度分别为 1.981°/25 m 和 155.7 m, 稳斜井段长度 160.1 m, 入靶井斜角为 22.98°, 纠偏轨道钻达井深 2530.79 m。

图 1 给出了算例一和算例三的纠偏设计轨道水平投影图(图中只绘出了纠偏设计轨道, 省略了实钻井眼轨迹)。

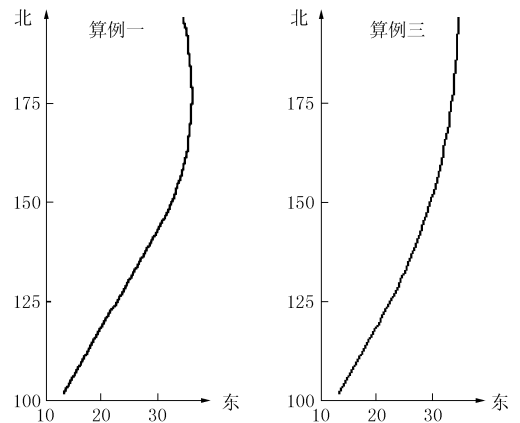


图 1 纠偏设计轨道的水平投影图

5 解析解的应用

解析解不仅用于进行轨道设计, 而且还能够进行设计参数分析。例如, 在 3.1 中给出了圆弧井段井眼曲率 K_2 、入靶井斜角 α_2 和方位角 φ_2 随稳斜井段长度 ΔL_1 而变化的函数关系式。这样, 就可以在一张图中绘制出以 ΔL_1 为横轴变量、以角度为纵轴的 3 条曲线来, 用以直观地描述 K_2 、 α_2 和 φ_2 随 ΔL_1 而变化的形态。例如, 对于算例一的数据, 所制作的曲线图见图 2、图 3。

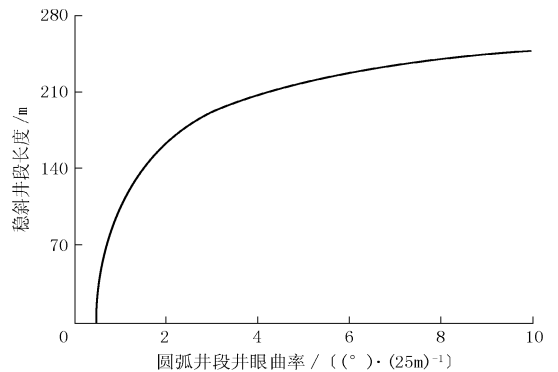


图 2 解析解曲线图一(算例一)

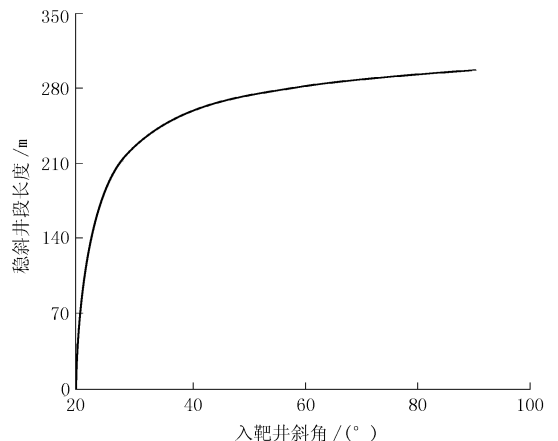


图 3 解析解曲线图二(算例一)

从图中可以明显看出,当 ΔL_1 增加时,入靶方位角逐渐减小,入靶井斜角和圆弧曲率逐渐增加。在 $\Delta L_1 > 200$ m之后,入靶井斜角和圆弧曲率急剧增大。参照图2、图3,就可以合理地设定设计条件(即给定 ΔL_1 的合适值)。特别是在钻井软件开发中,绘制解析解曲线图能够帮助使用者设计出合理的纠偏设计轨道来。

6 结论

(1)建立了近靶纠偏轨道设计问题的数学模型,针对4种不同的常用已知设计条件,给出了数学模型的解析解。编写了计算机程序对解析解进行了验证,大量实际算例表明,解析解给出的纠偏轨道设计结果准确、计算速度快。

(2)使用解析解计算公式可以绘制待设计参数随已知设计参数变化的曲线图,能够帮助设计人员直观地设定设计参数,使纠偏轨道设计更加合理。

参考文献:

- [1] 韩志勇.定向钻井设计与计算[M].北京:中国石油大学出版社,2007.
- [2] 许玲,鲁港,赵辉.圆柱螺线法测斜计算中的数值方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(5):1-4.
- [3] 杨帆,鲁港,谭静.最小曲率法计算中的数值方法[J].钻采工艺,2008,31(S1):17-19,23.
- [4] 鲁港,鲍继红.自然曲线法测斜计算中的数值方法[J].石油地质与工程,2008,22(1):72-74.
- [5] 鲁港.常规二维定向井剖面计算的新方法[J].石油地质与工程(河南石油),1995,9(4):8-13.
- [6] 鲁港,王立波,孙忠国,等.二维圆弧型井眼轨道设计问题的通解[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(1):9-13.
- [7] 鲁港,王刚,孙忠国,等.定向井井中空间圆弧轨道计算的两个问题[J].石油地质与工程,2006,20(6):53-55.
- [8] 陈铁铮,鲁港,商维斌,等.最小曲率法中水平投影长度的计算[J].石油地质与工程,21(5):82-84.
- [9] 张积锁,鲁港.圆弧井段井斜变化率和方位变化率的计算[J].石油地质与工程,2007,21(4):68-70.
- [10] 向军文.定向钻进技术及其应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):28-32,36.

SDC-1000型全液压钻机试验圆满成功

本刊讯 2009年5月2~9日,由中国地质科学院勘探技术研究所研制的SDC-1000型全液压车装钻机在山西晋煤集团寺河矿CZ-205号煤层气预抽采井进行生产试验。试验历时8天,进尺564.00 m,终孔直径216 mm,累计时间103.83 h,平均小时效率5.43 m,经测井验证孔斜 $< 1^\circ$,符合钻井质量要求,为优质钻孔,钻机生产试验圆满完成。钻机各项性能指标均接近进口钻机,受到用户的充分肯定,认为该钻机配置适合国内施工特点,功能设置符合国内工人的操作习惯,性能稳定,质优价廉具有广阔的市场应用前景。

SDC-1000型全液压钻机为勘探技术研究所承担的地质大调查项目“全液压多功能车装深水井钻机研制”生产的样机,主要用于大口径水井、煤层气抽采井、浅层油气井等深度不超过1000 m的钻井施工。采用汽车柴油机动力,全液压驱动方式,动力头设计最大提升力465 kN,加压力170 kN。全液压操纵形式,拧卸扣、吊装钻具采用液压控制,减少工人的劳动强度并增加工作效率;设有双卷扬机,方便辅助作业;配备1500 L/min泥浆泵,泡沫泵,离心泵等,可满足多工艺钻进需要。可选用2 $\frac{1}{2}$ 、3 $\frac{1}{2}$ 、4 $\frac{1}{2}$ 、5 in双壁钻杆,适应性强。

本次试验地点选在山西沁水县后河村,试验井为晋煤集团寺河煤矿煤层气抽采井。地层主要为泥岩、砂岩互层,煤层顶、底板为坚硬灰岩,设计孔深571 m。开孔直径311 mm,下 $\varnothing 245$ mm孔口管,终孔直径216 mm,下 $\varnothing 140$ mm生产套管。采用 $\varnothing 127$ mm钻杆+ $\varnothing 165$ mm钻铤的钻具组合形式。

试验中采用空气潜孔锤钻进、泥浆正循环钻进、液动潜孔锤钻进等钻进工艺,并在各种实验下的数据比对,找出液动潜孔锤在山西煤层气钻进中比较适合的钻进参数。由于进行了多种钻进工艺试验,增加了3次提、下钻操作,并受到天气及井场协调原因造成辅助时间较长。剔除应付检查、井场协调停机的时间因素,初步统计钻进时间为80 h左右,辅助时间为110 h,钻机钻进效率可达到7.0 m/h左右。

液动潜孔锤钻进中受液动锤水击作用的影响,钻井液在钻杆柱、高压软管内产生高压、高频振荡,致使钻机动力头、桅杆、高压胶管剧烈抖动。该钻机针对液动锤钻进特点专门设计减震结构,经过试验证明钻机的减震结构合理,完全满足液动冲击回转钻进时对钻机的要求。同时通过试验对比表明液动冲击回转钻进效率在灰岩地层中比传统牙轮钻进效率提高1倍以上,有广阔的应用前景。

本次试验合作对象为河南豫中公司,该公司拥有2台进口车装钻机,有7~8年的煤层气施工经验,在山西煤层气施工钻井质量极佳,是煤层气公司固定合作单位。试验中,双方为保证试验的顺利进行,采用一井双钻机配套方案:德国RB50型钻机作为备用钻机,若试验钻机出现异常则备用钻机立即替换上来,以保证施工能正常进行。试验中RB50型钻机一直未启用,SDC-1000型钻机独立完成了试验任务。

(冯起赠 供稿)