

定向钻进控制预测技术

向军文

(中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083)

[摘要]定向钻井技术在矿产勘探及开发、煤层气开发中正发挥重大作用。准确预测定向钻井井底井斜和方位角,可降低定向钻井成本,减少定向钻进失误。目前使用的计算方法不利于现场快速准确预测井底轨迹。本文通过对井斜、方位与造斜工具角、造斜井长和造斜率的数据处理技术,建立了井底井斜和方位增量预测模型,与通用定向井公式比,剪度高,且可在井场快速预测出定向钻井井底轨迹参数。经土耳其46对对接井实际证明,大大地提高井底预测速度和防止定向钻进失误率,对指导定向钻井现场快速预测具有指导意义。

[关键词]定向钻进控制预测 井斜 方位角 造斜率 工具角

[中图分类号]TE243 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2010)06-1123-04

Xiang Jun-wen. Prediction technology for directional drilling control[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(6): 1123-1126.

定向钻井中,需要根据目前测点数据,及时判断该工艺器具能否满足后续工程需要,避免定向失误,从而引起固井分支或其它事故的发生(向军文等, 2001;向军文等, 2003;向军文等, 2007)。因此,现场定向技术人员急需快速准确的定向钻进预测模型。

1 预测原理

因井斜增量和方位增量由后续定向钻进长度、钻具造斜率及造斜工具角有关,则

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= f(\Delta l, i, w) \\ \Delta\theta &= f(\Delta l, i, w)\end{aligned}\tag{1}$$

式中, $\Delta\alpha, \Delta\theta$ 分别为井斜增量和方位增量($^{\circ}$), $\Delta l, i, w$ 分别为定向钻进长度、造斜率及造斜工具角

(m)、($^{\circ}/m$)、($^{\circ}$)。采用最小二乘法拟合多项式 $y = \sum_{j=1}^n a_j x^j$ (同济大学计算数学教研室, 2004), 令 $x_i = x^i$ ($i=0, 1, 2, \dots, n$), 其线性式为:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \tag{2}$$

从而有:

$$\begin{cases} ma_0 + \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m x_{ij}) a_j = \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{j=1}^n x_{ik} a_0 + \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m x_{ij} x_{ik}) a_j = \sum_{i=1}^m x_{ik} y_i \end{cases} \tag{3}$$

($k=1, 2, 3, \dots, n$)

写成矩阵即为:

$$\begin{pmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^n \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} & \sum_{i=1}^m x_i^{n+2} & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^{2n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdots \\ a_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \cdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n y_i \end{pmatrix} \tag{4}$$

[收稿日期]2010-07-16; [修订日期]2010-08-19; [责任编辑]郝情情。

[基金项目]2010年国土资源部地调项目“高精度定向钻进中靶系统”(编号:1212010816011)。

[第一作者]向军文(1967年-),男,2008年毕业于中国地质大学(北京),博士,主要从事定向钻进技术与开发。E-mail:xiangjunwen@vip.sina.com。

2 拟合预测模型建立

确定预测原理后,将涉及定向钻进轨迹控制参数进行数据处理(Craig J T 等, 1976; Callas N P 等, 1979; 韩志勇, 1989; 刘修善等, 1991; 刘修善等, 1993; 刘修善等, 1994; 刘修善等, 1997; 刘修善等, 1998; 陈庭根等, 2006; 刘修善等, 2007)。根据定向钻进控制公式(韩志勇, 1989; 陈庭根等, 2006):

$$\begin{cases} \cos\alpha_2 = \cos\alpha_1 \cos\gamma - \sin\alpha_1 \sin\gamma \cos w \\ \sin w = \frac{\sin\alpha_2 \sin\Delta\theta}{\sin\gamma} \\ \operatorname{tg}\Delta\theta = \frac{\sin\gamma \sin w}{\sin\alpha_1 \cos\gamma + \cos\alpha_1 \sin\gamma \cos w} \\ \cos\gamma = \cos\alpha_1 \cos\alpha_2 + \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \cos\Delta\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: α_1, α_2 —上下测点井斜($^{\circ}$); γ —狗腿角($^{\circ}$)。
不失一般性,现假设当前点井斜 45° ,后续定向造斜钻进 2m 时的造斜率为 $0.23^{\circ}/\text{m}$ 。此时 $i\Delta l = 0.46$ 。根据式(5)可得以此工艺进行定向钻进后的定向造斜井斜增量及方位增量数据表(见表 1)。

表 1 井斜和方位角增量

Table 1 Increment of well inclination and azimuth

w	$\Delta\alpha$	$\Delta\theta$	w	$\Delta\alpha$	$\Delta\theta$
0	0.46	0.00	100	-0.08	0.64
10	0.45	0.11	110	-0.16	0.61
20	0.43	0.22	120	-0.23	0.56
30	0.40	0.32	130	-0.29	0.50
40	0.35	0.42	140	-0.35	0.42
50	0.30	0.50	150	-0.40	0.33
60	0.23	0.56	160	-0.43	0.22
70	0.16	0.61	170	-0.45	0.11
80	0.08	0.64	180	-0.46	0.00
90	0.00	0.65			

这样对应不同的 19 个 w ,均有相应的井斜增量及方位增量。
此时,只有造斜工具角与井斜增量和方位增量的关系,为拟合简单化,对于工具角与井斜增量建立矩阵为:

$$\begin{pmatrix} 19 & \sum_{i=1}^{19} w_i & \sum_{i=1}^{19} w_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{19} w_i^5 \\ \sum_{i=1}^{19} w_i & \sum_{i=1}^{19} w_i^2 & \sum_{i=1}^{19} w_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^{19} w_i^6 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{i=1}^{19} w_i^5 & \sum_{i=1}^{19} w_i^6 & \sum_{i=1}^{19} w_i^7 & \cdots & \sum_{i=1}^{19} w_i^{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdots \\ a_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{19} \Delta\alpha_1 \\ \sum_{i=1}^{19} w_i \Delta\alpha_1 \\ \cdots \\ \sum_{i=1}^{19} w_i^5 \Delta\alpha_1 \end{pmatrix}$$

将表 1 数据代入,对以上矩阵进行求值。从而解得:
 $a_0 = 0.46, a_1 = 0, a_2 = -0.23$
 $a_3 = 0, a_4 = 0.01917, a_5 = 0$

故所拟合的井斜增量与工具角式为:

$$\Delta\alpha = 0.46 - 0.23w^2 + 0.01917w^4$$

根据泰勒级数,从而有:

$$\Delta\alpha = 0.46\left(1 - \frac{w^2}{2!} + \frac{w^4}{4!}\right) = 0.46\cos w$$

即井斜增量预测式为:

$$\Delta\alpha = i\Delta l \cos w$$

同理,对方位增量与工具角建立矩阵,所拟合的方位角增量与工具角式为:

$$\Delta\theta = 0.6505\left(w - \frac{w^3}{3!} + \frac{w^5}{5!}\right) = 0.6505\sin w$$

则方位增量预测式:

$$\Delta\theta = \frac{i\Delta l}{\sin\alpha_1} \sin w$$

即建立的定向钻进预测模型为

3 预测模型应用

土耳其 BEPAZARI 天然碱矿主矿垂深 350 ~ 520m,所开采的天然碱矿厚 1.2 ~ 4.6m,业主所设计的 53 对井主要先期开采的碱矿厚 1 ~ 2.5m,井距大于 450m,水平段长大于 250m,所有井建腔径 0.5 ~ 2.5m,均要求定向钻井一次对接连通(向军文等, 2007; 胡汉月等, 2007; 向军文, 2007; 胡汉月等, 2010; 刘海翔等, 2010)。采用本预测模型,在已完成的 46 对井中均获得很好的控制,均没有发生因定向失败而导致重钻。

如 H004LB 定向水平井需要与 V004LB(一靶点)、V004U+LA(二靶点)和 V004LA(三靶点)三井连通,水平井与第一口直井相距 216.582m,直井相

距 125.62m、227.28m。且所连通的主矿层厚度只有 1.5m,技术套管下到主矿层下 1m。如不很好控制井眼轨迹,就有可能穿矿、过靶点,不得不重新分支。

按预测模型,在井深 338m 时,MWD 显示 $\alpha=45.36^\circ$; $\theta=112.67^\circ$;该套螺杆钻具在该区段造斜率稳定为 $i=0.23^\circ/m$ 。现按设计要求钻进 12m 后, $\alpha=47.7^\circ$, $\theta=115.9^\circ$ 。根据式(5)要求此时的工具角 $w=60^\circ$ 。钻进时工具角不稳定,且在 $\pm 20^\circ$ 变动,现场即时利用式(6)进行预测计算井底井眼参数,是否能达到钻进轨迹要求,从而决定是否需要停钻调整工具角。当钻进按 $w=40^\circ$ 时,此时井底 $\alpha=47.5^\circ$, $\theta=115.12^\circ$,可满足轨迹增顶增方位要求。但按 $w=80^\circ$ 时,此时井底 $\alpha=45.9^\circ$, $\theta=116.47^\circ$,井斜增加过小,后续定向钻进要求增大井斜造斜率,不利于轨迹控制,因此,必须及时停钻调整工具角到设计值。实际钻完后测试,此时 $\alpha=47.76^\circ$, $\theta=115.67^\circ$ 。采用预测模型及时调整钻进工艺参数,实际井眼轨迹参数与设计要求误差井斜为 $+0.06^\circ$,方位为 -0.23° 。

如采用不同的工具角进行定向钻进轨迹参数结果及对比精度见表 2 示。由表 2 可以看出钻进 12m 后的预测模型精度和传统计算方法比,井斜角和方位角最大误差均不超过 0.1° 。

表 2 计算公式与预测式部分数据对比
Table 2 Comparison of data from calculation and prediction formulas

w	式(5)		式(6)	
	α	θ	α	θ
0	48.12	112.67	48.12	112.67
30	47.77	114.57	47.75	114.61
60	46.79	115.99	46.74	116.03
90	45.43	116.55	45.36	116.55
120	44.03	116.07	43.98	116.03
150	42.99	114.65	42.97	114.61
180	42.60	112.67	42.60	112.67

此时如果后续钻进仍按工具角 $w=60^\circ$ 钻进 12m,则可采用式(6)很快预测井底 $\alpha=49.14^\circ$, $\theta=118.9^\circ$ 。与设计要求的方位 $\theta=117^\circ$ 基本接近,但仍有差距,说明不能采用此工具角,采用式(6)反预测,结果工具角定为 $w=20^\circ$,此时,预测井底 $\alpha=50.35^\circ$, $\theta=116.95^\circ$ 。经与式(5)比,结果一致,但现场效率大大提高。最终再钻完 12m 后,井底 MWD 显示 $\alpha=50.46^\circ$, $\theta=116.84^\circ$ 。说明预测与实际精度

控制误差可行。

但预测模型进行预测井段不宜过长,如该对井预测定向造斜井段长 120m,初始井斜 45.36° ,方位为 112.67° ,以工具角 60° ,按造斜率 $0.23^\circ/m$ 钻完后,公式(5)计算井底井斜 62.75° ,方位 142.19° ;而采用预测式(6)井斜 59.16° ,方位为 146.26° 。可见预测井段达 120m,其井斜误差为 -3.59° ,预测误差率为 -5.7% ;方位误差为 4.07° ,预测误差率为 2.9% 。

工程中,也根据预测结果可及时修正定向钻进工艺技术,调整定向工具或定向钻进控制参数,及时发现问题,避免定向失误。

4 结语

- (1) 本论文通过对井眼参数分析,采用数据处理方法,建立了定向钻进预测模型。
- (2) 该模型的重要作用是可快速预测定向钻进中各参数变化引起的结果,便于工程及时控制与调整。
- (3) 因钻头与 MWD 相距约 9m,根据 MWD 显示的当前定向钻进值,可及时预测钻头处的井眼参数。

[References]

Chen Ting-geng, Guang Zhi-quan. 2000. Well drilling theory and technology[M]. Dongying: Petroleum University Publishing House:186-192 (in chinese)

Craig J T, Randall B V. 1976. Directional survey calculation[J]. Petroleum Engineer, 48(3):38-54

Callas N P, Novak P C, Henderson J R. 1979. Directional survey calculation methods compared and programmed[J]. Oil & Gas Journal, 77(4):53-58

Han Zhi-yong. 1989. Directional well deign and computation[M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House:98-130 (in Chinese)

Hu Han-yue, Xiang Jun-wen, Liu Hai-xiang, Cheng Jian-yao. 2010. Industrial experiment of smartmag magnetic ranging system for well intersection[J]. Mineral Exploration Engineering (Drilling and Tunnelling Engineering), 37(4):6-10 (in Chinese with English abstract)

Hu Han-hue, Xiang Jun-wen, Dong Di-zhuang. 2007. Field calibration of MWD in Beypazari, Turkey[J]. Mineral Exploration Engineering (Drilling and Tunnelling Engineering), 34(7):1-4 (in Chinese with English abstract)

Liu Xiu-shan, Ai Chi, Wang Xin-qing. 1997. Value-insertion method for well trajectory[J]. Oil Drilling & Production Technology, 19(2):11-14, 25 (in Chinese with English abstract)

Liu Xiu-shan, Wang Shan. 1993. Well trajectory design theory and description method[J]. Harbin: Helongjiang Science and Technology Publishing House:93-102 (in Chinese with English abstract)

- Liu Xiu-shan, Shi Zai-hong, Gao Guang-you. 1998. Advances in the theory of inclinometry calculation[J]. Drilling & Production Technology, 21(1):7-10 (in Chinese with English abstract)
- Liu Xiu-shan, Shi Zai-hong, Zhou Da-qian. 1994. The curve structure method of borehole trajectory calculation[J]. Acta Petrolei Sinica, 15(3):126-133 (in Chinese with English abstract)
- Liu Xiu-shan, Zhou Da-qian, Gu Ling-di. 1991. How to simulate actual well trajectories with spline function[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 15(1):45-51 (in Chinese with English abstract)
- Liu Hai-xiang, Xiang Jun-wen, Liu Zhi-qiang. 2010. EXCEL-based directional drilling software and its application[J]. Mineral Exploration Engineering (Drilling and Tunnelling Engineering): 14-17 (in Chinese with English abstract)
- Liu Xiu-shan. 2007. Convergence of azimuth and coordinates in directional drilling[J]. Oil Drilling and production, 29(4):1-5 (in Chinese with English abstract)
- Tongji University computational mathematics education & research office. 2004. Modern numerical mathematics and computation[M]. Shanghai: Tongji University Publishing House: 57-89 (in Chinese)
- Xiang Jun-wen, Hu Han-yue, Liu Zhi-qiang. 2007. Intersection of 30 pairs of mining wells in Turkey[J]. Salt Borehole Mining of China, 38(5):25-28 (in Chinese with English abstract)
- Xiang Jun-wen. 2007. Directional drilling technology and its application[J]. Mineral Exploration Engineering (Drilling and Tunnelling Engineering), 34(9):28-32
- Xiang Jun-wen. 2007. Accurate processing of directional drilling data[J]. Mineral Exploration Engineering (Drilling and Tunnelling Engineering), 34(9):37-39 (in Chinese with English abstract)
- Xiang Jun-wen, Cheng Xiao-lin. 2003. Development and outlook of directional drilling technology[J]. Mineral Exploration Engineering (Drilling and Tunnelling Engineering): 20-23 (in Chinese with English abstract)
- Xiang Jun-wen, Liu Chun-shen, Liu Zhi-qiang. 2001. Research on the slim-hole medium-radius directional drilling process[J]. Mineral Exploration Engineering (Drilling and Tunnelling Engineering): 175-178 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 陈庭根, 管志川. 2006. 钻井工程理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社: 186-192
- 韩志勇. 1989. 定向井设计与计算[M]. 北京: 石油工业出版社: 98-130
- 胡汉月, 向军文, 刘海翔, 陈剑奎. 2010. SmartMag 定向中靶系统工业试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 37(4):6-10
- 胡汉月, 向军文, 董迪壮. 2007. 土耳其贝帕扎里天然碱矿钻井工程 MWD 实地校核[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 34(7):1-4
- 刘修善, 艾池, 王新清. 1997. 井眼轨道的插值法[J]. 石油钻采工艺, 19(2):11-14, 25
- 刘修善, 王珊. 1993. 井眼轨道设计理论与描述方法[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社: 93-102
- 刘修善, 石在虹, 高广友. 1998. 测斜计算理论的新进展[J]. 钻采工艺, 21(1):7-10
- 刘修善, 石在虹, 周大千. 1994. 计算井眼轨道的曲线结构法[J]. 石油学报, 15(3):126-133
- 刘修善, 周大千, 顾玲娣. 1991. 如何用样条函数模拟实际井眼轨迹[J]. 大庆石油学院学报, 15(1):45-51
- 刘海翔, 向军文, 刘志强. 2010. 基于 EXCEL 的定向钻井应用程序及其工程应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程): 14-17
- 刘修善. 2007. 定向钻井中方位角及其坐标的归化问题[J]. 石油钻采工艺, 29(4):1-5
- 同济大学计算数学教研室. 2004. 现代数值数学与计算[M]. 上海: 同济大学出版社: 57-89
- 向军文, 胡汉月, 刘志强. 2007. 土耳其天然碱矿 30 对对接井钻井工程[J]. 中国井矿盐, 38(5):25-28
- 向军文. 2007. 定向钻进技术及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 34(9):28-32
- 向军文. 2007. 关于定向井数据的精确处理问题探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 34(9):37-39
- 向军文, 陈晓琳. 2003. 定向对接连通井技术的发展及其展望[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程): 20-23
- 向军文, 刘春生, 刘志强. 2001. 小直径中半径水平定向井钻探工艺研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程): 175-178

Prediction Technology for Directional Drilling Control

XIANG Jun-wen

(China University of Geo-sciences, College of Geophysics and Information Technology, Beijing 100083)

Abstract: Directional drilling is playing a great role in mineral exploration and exploitation, and coalbed methane (CBM) development. Accurate prediction of the well inclination and azimuth at the well bottom can reduce drilling cost and errors. The existing calculation method is not favorable for predicting the drilling path accurately at site. In this study, a model for prediction of increment in well inclination and azimuth is established by use of data processing for well inclination, azimuth, and tool face as well as interval and rate of well inclination build-up. Compared with the general formula of directional wells, it has a high precision and is capable of predicting trace parameters of the directional well bottom rapidly at site. This model has been applied to 46 pairs of docking wells in Turkey. The result demonstrates that it can greatly enhance the speed of predicting well bottom and reduce failure ratio of directional drilling.

Key words: prediction for directional drilling control, well inclination, azimuth, build-up rate of inclination, tool face