水文·工程·环境

定向钻进轨迹控制误差矢量分析方法及工程应用

吴　翔[1], 王天放[2], 贺冰新[3], 陈振荣[1]

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉　430074; 2. 山东省鲁南地质工程勘察院, 山东兖州　272100;
3. 中国地质大学图书馆, 湖北武汉　430074)

[摘　要] 定向钻进中, 实钻轨迹与设计控制目标之间往往存在误差, 误差的定量分析对轨迹调整与精度控制至关重要。论文依据定向钻进矢量控制原理, 分析研究了造斜工具实钻矢量与设计轨迹控制矢量之间的误差, 根据实际钻进轨迹参数, 得出了一种误差定量化分析、产生误差综合作用方向角度和强度的简便计算方法。如果可以确知误差产生于地层自然造斜作用, 该方法还可用于地层的各向异性分析和自然造斜作用分析。该方法在地质勘探多回次、短钻程定向钻进工程实践中取得了很好的应用效果, 在随钻测量大钻程定向钻进轨迹的快速准确调整中也具有应用价值。

[关键词] 定向钻进　误差分析　矢量分析　轨迹控制

[中图分类号] P634.7　　[文献标识码] A　[文章编号] 0495-5331(2012)04-0835-5

Wu Xiang, Wang Tian-fang, He Bing-xin, Chen Zhen-rong. A vector analysis method for directional drilling trajectory control and its application to engineering[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(4): 0835-0839.

1　问题的提出

定向钻进中, 钻孔轨迹参数的定向控制是实现定向钻孔或钻孔纠斜达到预期造斜目标的重要保证, 然而, 由于诸多因素的影响, 设计参数与实际定向钻进结果存在有一定的误差, 如果实钻轨迹与设计轨迹之间的偏差超出了允许范围, 就需要进行轨迹误差分析与参数设计修正(刘修善等, 2002; 向军文, 2007; 向军文, 2010)。在不考虑设计计算错误、定向机具故障和人为定向错误的前提下, 影响定向钻进精度的影响因素主要有: 螺杆钻具组合差与反扭转角的补偿精度、地层的自然造斜作用等(黄才启, 1993; T. A. 英格里斯, 1995; 刘涛等, 2011)。理论与实践中虽然已有一定原则、方法供设计参考, 但是, 由于误差产生的多元性, 特别是当存在不确定因素时, 对误差的定量分析则因其较为复杂而少有涉及。本文提出的定向钻进轨迹误差控制的矢量分析法是基于在同样地层和造斜器具及工艺条件下根据上一回次造斜钻进实际效果的黑箱修正方法, 并在工程中取得了较好的实际应用效果。

2　矢量分析方法原理

以重力高边安装角为例, 定向钻进轨迹控制矢量误差分析方法的基本原理如图 1 所示。图中$\overrightarrow{OA}$为造斜前钻孔弯曲面方向(造斜前钻孔弯曲方位), $\overrightarrow{OB}$为造斜工具在孔内按设计安装角定向的面向矢量, 对应的定向安装角为 β_1、造斜强度 i_1 为$\overrightarrow{OB}$向量的长度 $|OB|$; $\overrightarrow{OC}$是定向钻进中造斜工具实际在孔内的面向矢量, 对应的定向安装角为 β_2、造斜强度 i_2 为$\overrightarrow{OC}$向量的长度 $|OC|$; 由于地层的自然造斜作用或螺杆钻具的组合差、反扭转角等因素的影响, 造斜工具在孔内的实际面向与设计面向之间存在一定的误差, 误差 $\triangle\beta=\beta_2-\beta_1$; $\overrightarrow{OD}$向量代表影响因素的作用方向, 对应的影响因素作用面向角为 β_3、影响因素作用强度 i_3 为$\overrightarrow{OD}$向量的长度 $|OD|$。根据造斜前钻孔顶角 θ_0、方位角 α_0 和设计造斜目标顶角 θ_1、方位角 α_1 由公式(1)可以计算得到安装角 β_1(吴光琳, 1991; 刘修善等, 1998; 刘修善, 2007)。

[收稿日期] 2011-8-29; [修订日期] 2012-2-20; [责任编辑] 郝情情。
[第一作者] 吴翔(1964 年—), 男, 1987 年毕业于武汉地质学院, 获得博士学位, 教授, 主要从事勘查技术与工程、定向钻进技术教学研究工作。E-mail: wubox@126.com。

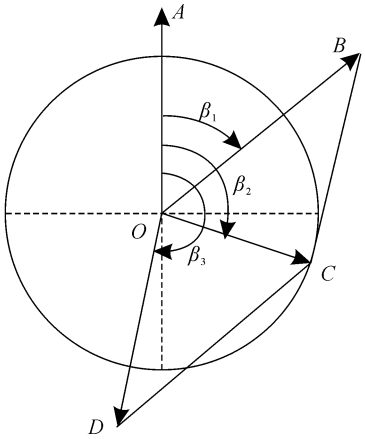

图 1 矢量误差分析方法原理

Fig. 1 Principle of vector error analysis

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_0)}{\cos\theta_0\cos(\alpha_1 - \alpha_0) - \sin\theta_0\cot\theta_1}\right) + k\pi \tag{1}$$

将公式(1)中的 θ_1、α_1 替换为实际造斜钻进结束后测量得到的回次造斜终点顶角 θ_2、方位角 α_2，可以计算得到该回次造斜工具在孔内的实际安装角 β_2，由此可以得到二者误差 $\triangle\beta$。

造斜强度 i_1 取决于造斜工具的类型(螺杆钻具的造斜强度取决于选配的造斜件)，对于确定的造斜工具组合、工艺和地层，其造斜强度 i_1 一般为定值，可由工程经验确定(吴景华，1997；吴振江等，2009)。

实际定向钻进的造斜强度 i_2 可根据该回次造斜段长 $\triangle L$ 和造斜前后的顶角、方位角的变化量由公式(2)计算得到(韩志勇，1989；江天寿等，1994；吴翔等，2006)。

$$i_2 = \frac{\arccos(\cos\theta_0\cos\theta_2 + \sin\theta_0\sin\theta_2\cos(\alpha_2 - \alpha_0))}{\Delta L} \tag{2}$$

由矢量关系，推导得到：

$$i_3 = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 - 2i_1i_2\cos\Delta\beta} \tag{3}$$

$$\beta_3 = \beta_2 + \arccos\left(\frac{i_2^2 + i_3^2 - i_1^2}{2i_2i_3}\right) \tag{4}$$

3 矢量分析方法在 ZK1003 孔的应用

ZK1003 为山东某铁矿床勘探钻孔，设计钻孔深度 1300m，孔深 700m 以上地层主要为页岩、页岩夹灰岩、粉砂岩等，下部地层以黑云变粒岩为主。由于矿体产状陡斜，钻孔设计为顶角 20°、方位角 20°的斜直孔，开孔孔径为 Φ91mm，钻进至 300m，下 Φ89mm 套管，换 S75 绳索取心钻具，钻进至终孔。

该孔钻进至 650m 时，顶角基本保持不变，但钻孔方位角受自然造斜规律影响不断减小，650m 处方位角为 5.6°，钻进至 685m，方位角降至 1°，孔斜超差，如若继续钻进，难以达到勘探要求。根据矿区以往钻孔勘探经验，下部地层钻进钻孔顶角和方位角有一定程度的自然增加趋势，因此，结合矿区勘探精度要求，ZK1003 钻孔纠斜控制目标为：顶角>16°，方位角>16°。

造斜钻进主要设备为：XY-6B 立轴岩心钻机，BW-320 泥浆泵，JTC-2 动调陀螺测斜仪，DXY-1 定向仪，3LZ-60 螺杆钻。造斜钻具组合：Φ75 电镀金刚石造斜钻头 + Φ73 分水接头+ 3LZ-60 螺杆+ 0.75°弯外管(1.0°弯外管)+ Φ60 定向接头 + Φ55.5 绳索取心钻杆 18m + 上部 Φ71 绳索取心钻杆。

自 685m 进行了三个回次的造斜钻进，定向纠斜目标以增方位为主，适当减小钻孔顶角，螺杆钻具(0.75°弯外管)在孔内的定向安装采用经验估算法，反扭转角取 35°并补偿钻具组合差，实际造斜钻进效果除第一回次钻孔方位角略有增加以外，其他二回次方位角基本不变甚至略有降低，而钻孔顶角降低，与设计纠斜目标有很大偏差。自第 4 回次造斜，换 1.0°弯外管螺杆钻具，根据纠斜目标精确计算定向安装角，反扭转角取 30°，再次进行了二回次的造斜钻进，纠斜钻进效果见表 1，有一定效果，但仍然与设计纠斜目标有一定偏差。

表 1 ZK1003 钻孔第 1～5 回次纠斜钻进效果表

Table 1 Correcting drift results of the trips 1～5 in drillhole ZK1003

回次	孔段区间(m)	孔段起点		孔段终点	
		顶角 θ_0	方位角 α_0	顶角 θ_2	方位角 α_2
1	684～692(造斜钻进)	20.9°	1.0°	19.9°	2.6°
2	692～697(造斜钻进)	19.9°	2.6°	19.2°	1.6°
3	697～705(造斜钻进)	19.2°	1.6°	18.2°	1.8°
4	705～711(造斜钻进)	18.2°	1.8°	17.2°	7.7°
5	711-717(常规钻进)	17.2°	7.7°	16.1°	2.8°
6	717～723(造斜钻进)	16.1°	2.8°	16.3°	7.7°

表中第 5 回次系采用 S75 绳索取心常规钻进 6m，顶角与方位角由钻进前的 17.2°降为 16.1° ，方位角由钻进前的 7.7°降为 2.8°。分析达不到预期纠斜目标的原因可能来自于造斜钻具组合差测量、补偿反扭转角、地层的造斜作用等方面的影响，但地

表再次检查仪器和钻具组合差,均未发现异常和错误,由于影响因素的不确定性,引入矢量分析方法研究了第 4 回次和第 6 回次造斜钻进情况。

第 4 回次:按目标顶角 20°、目标方位角 20°计算,依据公式(1),设计安装角 β_1 取值为 82°,反扭角取值为 30°,根据该回次造斜钻进结果反算孔内造斜工具实际安装角 β_2 为 121.9°,误差 $\Delta\beta$ 为 39.9°,按一般情况,此误差超过反扭角的变化范围(吴景华,1997;滕子军等,2004),因此,将该误差值设定为综合因素影响黑箱值。依据公式(2)、(3)、(4),取 i_1 为 0.35°/m(刘广志,1999;吴翔等,2000),可分别计算得到 i_2 为 0.342°/m,i_3 为 0.237°/m,β_3 为 193.7°。

第 6 回次:目标顶角与方位角不变,设计计算安装角 β_1 取值为 62°,反扭角取值为 40°,反算实际安装角 β_2 为 84°,差值为 22°,但是,此时反扭角取值为 40°,对应相同定向仪读数下,安装角等效于减小了 10°,实际黑箱值 32°。i_1 同样取为 0.35°/m,得到 i_2 为 0.276°/m,i_3 为 0.111°/m,β_3 为 194.6°。

显然,从第 5 回次和第 6 回次矢量分析计算结果来看,二回次造斜钻进中影响因素综合作用角度 β_3 基本稳定在 193°~195°,造成的实际定向安装角误差 $\Delta\beta$ 约为 32°~40°。

根据分析结果,对后续的第 7 回次、第 8 回次纠斜定向进行了黑箱补偿修正,取黑箱修正 $\Delta\beta$ 为 36°,纠斜钻进控制参数及效果见表 2。

表 2　ZK1003 第 4.6~8 回次纠斜钻进误差分析及定向参数效果控制表

Table 2　Correcting error analysis and directional control effect of trips 4.6~8 in drillhole ZK1003

回次	纠斜孔段(m)	设计 β_1	定向安装角	反算实际安装角 β_2	误差 $\Delta\beta$	孔段起点		孔段终点	
						顶角	方位角	顶角	方位角
4	705~711	81.9°	82.0°	121.9°	39.9°	18.2°	1.8°	17.2°	7.7°
6	717~723	62.2°	52.0°	84.0°	32.0°	16.1°	2.8°	16.3°	7.7°
7	723~729	52.0°	86.0°	81.8°	-4.2°	16.3°	7.7°	16.7°	14.6°
8	729~735	29.8°	66.0°	67.8°	1.8°	16.7°	14.6°	17.0°	17.0°

由造斜终点的顶角与方位角测斜数据,第 7~8 回次纠斜效果非常理想,定向安装角和反算实际安装角分别误差-4.2°、1.8°,实钻轨迹参数与设计纠斜目标参数完全吻合。考虑到下部孔段常规钻进顶角和方位角有一定的自然增加趋势,且纠斜钻进已达到中靶目标要求,造斜钻进结束,稳斜后换 S75 绳索取心钻进,钻进至 950m 时,钻孔顶角 20.4°,方位角 19.8°,完全达到地质设计中靶精度要求。

4　关于矢量分析方法的讨论

地质勘探定向钻进中,钻进地层较硬、单回次钻程较短,矢量分析方法主要是针对钻前定向和钻后测斜工艺的误差分析与修正方法。虽然在随钻测量定向中可以及时测量定向钻孔轨迹参数和进行定向调整,如若回次钻程较长,操作者可以根据经验逐渐调整(刘伟等,2007),但是,如果钻程较短,允许调整的次数有限,应用矢量分析方法定量分析误差,1~2 次即可达到设计目标参数调整。

当经过复核检查,排除钻具组合、反扭转角补偿、定向测斜仪及定向钻进工艺等方面存在问题,确知误差的产生是由于地层方面的原因而造成(刘修善等,2008),误差的矢量分析方法还可以用于地层的各向异性、自然造斜作用方向和强度的定量分析。

5　结论

依据矢量分析方法,针对定向钻进中轨迹控制误差,研究得出不确定因素综合作用强度 i_3 和作用方向角度 β_3 分析计算方法,由于该因素的影响,使得实际造斜安装角与设计安装角之间存在误差,研究提出了误差 $\Delta\beta$ 分析计算与修正方法,根据 ZK1003 孔第 4 和第 6 回次实际造斜中轨迹的控制误差,研究得到影响因素综合作用方向角度 β_3 基本稳定在 193°~195°,安装角误差 $\Delta\beta$ 约为 32°~40°。研究采取 $\Delta\beta$ 为 36°对该孔第 7 和第 8 回次纠斜钻进定向安装角进行修正补偿,实际钻进效果与设计完全吻合,达到理想的轨迹控制目标。

该方法不仅可用于目前地质勘探中钻前定向、钻后测斜的定向钻进误差分析及补偿,同样可用于随钻测量中轨迹控制误差的分析与修正。如果可以确定该误差主要是由于地层的自然造斜作用影响,该方法还可用于地层的各向异性分析和自然造斜作用的定量分析。

[References]

Han Zhi-yong. 1989. Directional well deign and computation[M]. Be-

jing: Petroleum Industry Publishing House: 98-130(in Chinese)

Huang Cai-qi. 1993. Analysis of general problem in the practice of the directional drilling[J]. Geology and Exploration, 29(4): 57-58(in Chinese with English abstract)

Jiang Tian-shou, Zhou Tie-fang, Liu Li-shen, Bi xiu-kun, Tang Guo-qi. 1994. Controlled directional drilling technology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 6-8(in Chinese)

Liu Guang-zhi. 1999. Controlled directional drilling used to explore deep mineral resource[J]. Geology and Exploration, 35(1): 51-56(in Chinese with English abstract)

Liu Tao, Wang Bo-xiong, Cui Yuan-yuan, Luo Xiu-zhi. 2011. Trajectory error analysis and optimization in horizontal directional drilling[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 51(5): 592-596(in Chinese with English abstract)

Liu Wei, Yang Sheng-yu. 2007. Control azimuth of the directional equipment to operate directional drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 29 (4): 16-19(in Chinese with English abstract)

Liu Xiu-shan, Shi Zai-hong, GaoGuang-you. 1998. Advances in thetheory of inclinometry calculation[J]. Drilling& Production Technology, 21(1): 7-10(in Chinesewith English abstract)

Liu Xiu-shan, Shi Zai-hong. 2002. A new method of path-correction planning with the desired dieection[J]. Acta Petrolei Sinica, 23 (2): 72-76(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 Chinesewith English abstract)

Liu Xiu-shan, Zhang Hai-shan. 2008. A method of planning directional well-path sconsidering the strata's bit-walk characteristics[J]. Acta Petrolei Sinica, 29(6): 913-916(in Chinese with English abstract)

T. A. Inglis. 1995. Directional drilling[M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House: 200-206(in Chinese)

Teng Zi-jun, Fan Wan-qing. 2004. Key technology in auger string hole straightening [J]. Coal Geology of China, 16: 118-120(in Chinese with English abstract)

Wu Guang-lin. 1991. Technological principle of the directional drilling [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Publishing House: 98-106 (in Chinese)

Wu Jing-hua. 1997. Technology and problems of controlled directional drilling by positive displacement motor[J]. Geology and Exploration, 33(5): 60-63(in Chinese)

Wu Xiang, He Bing-xin, Wang Yan. 2000. Technical method of improving whip stocking intensity in controlled directional drilling[J]. Geology and Exploration, 36(2): 55-57(in Chinese with English abstract)

Wu Xiang, Yang Kai-hua, Jiang Guo-sheng. 2006. Principle and application of the directional drilling[M]. Wuhan: China University Of Geosciene Publishing House: 14-17 (in Chinese)

Wu Zhen-jiang, Liu Gong-hui, Li Jun. 2009. Analysis and prediction of build-up rate using screw drill[J]. Oil Field Equipment, 38(8): 61-65 (in Chinese with English abstract)

Xiang Jun-wen. 2007. Accurate processing of directional drilling data [J]. Mineral Exploration Engineering(Drilling and Tunnelling Engineering), 34(9): 37-39(in Chinesewith English abstract)

Xiang Jun-wen. 2010. Prediction Technology for DirectionalDrilling Control[J]. Geology And Exploration, 46(6): 1123-1126(in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

韩志勇. 1989. 定向井设计与计算[M]. 北京: 石油工业出版社: 98-130

黄才启. 1993. 定向钻探施工中常见问题分析[J]. 地质与勘探, 29(4): 57-58

江天寿, 周铁芳, 刘励慎, 毕秀崑, 汤国起. 1994. 受控定向钻探技术[M]. 北京: 地质出版社: 6-8

刘广志. 1999. 用受控定向钻探勘探深部矿产资源[J]. 地质与勘探, 35(1): 51-56

刘　涛, 王伯雄, 崔园园, 罗秀芝. 2011. 水平定向钻进的轨迹误差分析与优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 51(5): 592-596

刘　伟, 杨盛余. 2007. 控制定向装置方位角进行定向钻井实践[J]. 石油钻采工艺, 29(4): 16-19

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. 2002. 给定井眼方向的修正轨道设计方法[J]. 石油学报, 23(2): 72-76

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

刘修善, 张海山. 2008. 考虑地层方位漂移特性的定向井轨道设计方法[J]. 石油学报, 29(6): 913-916

T. A. 英格里斯. 1995. 定向钻井[M]. 北京: 石油工业出版社: 200-206

滕子军, 范万庆. 2004. 螺杆钻具纠斜的关键技术[J]. 中国煤田地质, 16(增刊): 118-120

吴光琳. 1991. 定向钻进工艺原理[M]. 成都: 成都科技大学出版社: 98-106

吴景华. 1997. 螺杆定向钻进工艺及存在问题[J]. 地质与勘探, 33(5): 60-63

吴　翔, 贺冰新, 王　艳. 2000. 提高定向钻孔造斜弯曲强度的技术方法[J]. 地质与勘探, 36(2): 55-57

吴　翔, 杨凯华, 蒋国盛. 2006. 定向钻进原理与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 14-17

吴振江, 柳贡慧, 李　军. 2009. 螺杆钻具造斜能力分析及预测[J]. 石油矿场机械, 38(8): 61~65

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. 2010. 定向钻进控制预测技术[J]. 地质与勘探, 46(6): 1123-1126

A Vector Analysis Method for Directional Drilling Trajectory Control and Its Application to Engineering

WU Xiang[1], WANG Tian-fang[2], HE Bing-xin[3], CHEN Zhen-rong[1]

(1. *The Faculty of Engineering of China University of Geoscience, Wuhan, Hubei* 430074;

2. *Shandong Provincial Lunan Geo-engineering Exploration Institute, Yanzhou, Shandong* 272100;

3. *The Library of China University of Geoscience, Wuhan, Hubei* 430074)

Abstract: In the directional drilling, the practical trajectory of the well is often inconsistent with the projected objective. The quantitative analysis of the error is crucial for the track adjustment and accuracy control. According to the principle of the vector manipulation in directional drilling, the vector error between the practical drilling direction of the deflection tool and the controlled direction of the designed well has been studied in this paper. Based on the practical drilling trajectory parameters, a simple calculation method for the quantitative analysis of the error and the directional angle and intensity of the comprehensive effects which produce the error has been deduced. The method can be used to analyze the aeolotropy and the natural oblique effect of strata if it is sure that the error is produced by stratum deflecting characteristics. The method has been used successfully in the directional drilling projects of multi-trip and short-roundtrip. Furthermore, it is of the practical value for the trajectory accurate adjustment in the long-roundtrip engineering of measurements while drilling

Key words: directional drilling, error analysis, vector analysis, trajectory control