

基于地磁参数和子午线收敛角计算的井斜方位角校正方法

林彦兵, 闫吉曾

(中石化华北分公司工程技术研究院, 河南 郑州 450006)

摘要:井斜方位角的校正对于定向井轨迹控制、中靶分析有非常重要的意义。通过分析大地坐标与高斯克吕格投影坐标之间的关系,根据地磁场球谐函数模型,地磁参数和子午线收敛角的计算模型,提出了实现方式和求解步骤,并编制了相应的计算软件。通过实例计算与分析,表明地磁参数和子午线收敛角的准确计算对于定向井轨迹控制的重要性。

关键词:井斜方位角;磁偏角;子午线收敛角;大地坐标;高斯克吕格投影;动态链接库

中图分类号:P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2012)12-0011-04

Hole Azimuth Angle Correction Methods Based on Geomagnetic Parameters and Meridian Convergence Angle Calculation/LIN Yan-bin, YAN Ji-zeng (Research Institute of Engineering Technology of Huabei Branch, Sinopec, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: Hole azimuth angle correction is very important in directional well trajectory control and target-hitting analysis. By the analysis on the relationship between geodetic coordinate and Gauss-Kruger projection coordinate; and based on the geomagnetic field spherical harmonics model, geomagnetic parameters and meridian convergence angle calculation model, the realizing way and the solving steps are put forward and corresponding calculation software are programmed. With the practical calculation and analysis, the importance of accurate calculation of geomagnetic parameters and meridian convergence angle in directional well trajectory control is shown.

Key words: hole azimuth angle; magnetic declination; meridian convergence angle; geodetic coordinate; Gauss-Kruger projection; dynamic link library (DLL)

在定向井及水平井施工中需要通过磁偏角、子午线收敛角对 MWD 测量数据进行校正,见式(1)和图 1,以便实时监控、调整井眼轨迹,保证准确中靶,因此地磁参数和子午线收敛角的准确计算对于定向井及水平井施工有重要意义^[1-4,9,15]。

$$\varphi = (\varphi^* + \omega)\delta - \gamma \quad (1)$$

式中: φ ——经过方位校正之后用于轨迹计算的方位角; φ^* ——MWD 等测量仪器测得的井斜方位角; ω ——MWD 等仪器测量误差,属于随机变量; δ ——磁偏角,东磁偏角为正值,西磁偏角为负; γ ——子午线收敛角,东收敛角为正值,西收敛角为负值。

目前,地质设计常用高斯克吕格(Gauss-Kruger)投影坐标来提供井位和靶点,在此基础上进行钻完井设计,因把高斯克吕格坐标进行变换,即求得井位和目标点的经度、纬度,进而计算地磁参数和子午线收敛角。

1 高斯克吕格投影坐标

1.1 高斯克吕格投影

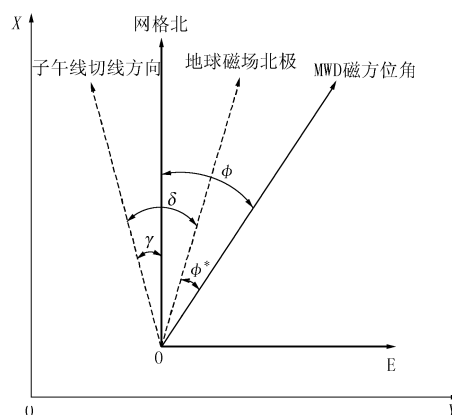


图 1 井斜方位角校正关系

高斯克吕格(Gauss-Kruger)投影是一种等角投影,它首先由高斯提出,后经克吕格加以补充完善,故称高斯克吕格投影,简称高斯投影。如图 2 所示,设想在地球外面横向套一个椭圆柱,椭圆柱的横截面形状与地球子午圈包围的平面完全相等,则此椭圆柱与地球横向相切,相切的这条子午线成为中央子午线。然后把地球表面上的点或线投影到椭圆柱表面上,再把椭圆柱表面展开,就构成了高斯克吕

收稿日期:2012-07-21;修回日期:2012-11-27

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05045-03)资助

作者简介:林彦兵(1978-),男(汉族),河南人,中石化华北分公司工程技术研究院工程师,油气田开发工程专业,硕士,主要从事鄂尔多斯盆地油气田勘探开发部署及研究工作,河南省郑州市陇海西路 199 号,yan1975@126.com。

格投影。经过高斯克吕格投影后,地球表面上的经纬线变成了如图3所示的形状,其中中央子午线和赤道线的投影,在图上成为直线。在图3所示的投影图上,以中央子午线和赤道线的交点为原点,建立平面直角坐标系。纵坐标以 X 表示,正方向为中央子午线的北方向;横坐标以 Y 表示,正方向为赤道线的东方。

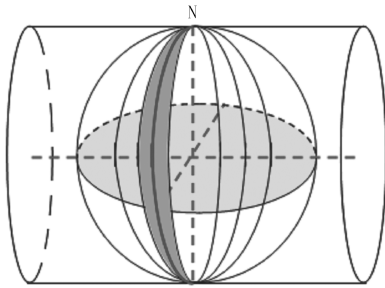


图2 高斯克吕格投影示意图

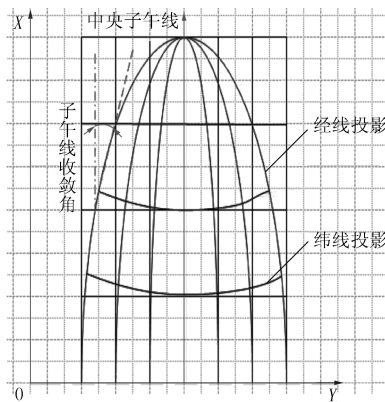


图3 高斯克吕格投影坐标示意图

高斯克吕格投影后,除中央经线和赤道为直线外,其他经线均为对称于中央经线的曲线。高斯克吕格投影没有角度变形,在长度和面积上变形也很小,中央经线无变形,自中央经线向投影带边缘,变形逐渐增加,变形最大处在投影带内赤道的两端。由于其投影精度高,变形小,而且计算简便(各投影带坐标一致,只要算出一个带的数,其他各带都能应用),因此在石油工业中应用广泛,并能在图上进行精确的量测计算。按一定经差将地球椭球面划分成若干投影带,这是高斯投影中限制长度变形的最有效方法,分带时既要控制长度变形使其不大于测图误差,又要使带数不致过多以减少换带计算工作,据此原则将地球椭球面沿子午线划分成经差相等的弧形,以便分带投影,应用比较广泛的是 3° 带和 6° 带。

1.2 高斯投影坐标反算模型

通过已知高斯投影坐标,计算经纬度的过程称

为高斯投影反算^[1,13,14],其计算模型如下:

$$B = B_f - (N_f \tan B_f / R_f) \{ D^2/2 - (5 + 3T_f + C_f - 9T_f C_f) D^4/24 + (61 + 90T_f + 45T_f^2) D^6/720 \} \quad (2)$$

$$L = L_0 + (1/\cos B_f) \{ D - (1 + 2T_f + C_f) D^3/6 + (5 + 28T_f + 6C_f + 8T_f C_f + 24T_f^2) D^5/120 \} \quad (3)$$

$$B_f = \varphi (3e_1^2/2 - 27e_1^3/32) \sin(2\varphi) + (21e_1^2/16 - 55e_1^4/32) \sin(4\varphi) + (151e_1^3/96) \sin(6\varphi)$$

$$D = (Y_E - FE) / (k_0 N_f)$$

$$R_f = a(1 - e^2) / (1 - e^2 \sin^2 B_f)^{3/2}$$

$$M_f = (X_N - FN) / k_0$$

$$\varphi = M_f / [a(1 - e^2/4 - 3e^4/64 - 5e^6/256)]$$

$$N_f = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_f}$$

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$$

$$e' = \sqrt{a^2 - b^2} / b$$

$$e_1 = [1 - (b/a)] / [1 + (b/a)]$$

$$T_f = \tan^2 B_f$$

$$C_f = e'^2 \cos^2 B_f$$

式中: B ——纬度; L ——经度; L_0 ——投影横坐标所在带的中央子午线经度; e ——椭球第一偏心率; e' ——椭球第二偏心率; Y_E ——投影横坐标; $FE = 500000$ m; a ——椭球体的长轴半径; X_N ——投影纵坐标; FN ——纬度偏移,北半球 $FN = 0$,南半球 $FN = 10000000$ m; k_0 ——比例因子,高斯克吕格投影时, $k_0 = 1$; b ——椭球体的短轴半径。

2 子午线收敛角计算模型

在大地坐标系中,北半球所有子午线均汇交于北极点,过不同两点分别作子午线的切线,二切线必相交于地轴上,两线之间的夹角称为午线收敛角。

在高斯投影坐标系中,任一点都有其坐标北方向,且都与中央子午线方向相同,此坐标北方向称网格北(Grid North);任意一点还有其“真北方向”,即沿着子午线投影的切线方向。因此,某点的“网格北”与“真北方向”之间的夹角,称为这点的子午线收敛角,见图3所示。子午线收敛角有正负之分。以网格北相对于真北的方向进行判断,北都在真北以西,可称为西收敛角,收敛角为负值。其计算模型如下:

$$\gamma = L \sin B [1 + (1/3)(1 + 3C_f^2 + 2C_f^4)] [L^2 \cos^2 B + (L^4/15)(2 - \tan^2 B) \cos^4 B] \quad (4)$$

式中: γ ——子午线收敛角。

3 地磁参数计算模型

地球外部空间的地磁场产生的源域可以分为地核场、地壳场和外源场,产生于地核的磁场约占地球总磁场的95%,成为地球的主磁场,而称地壳场与地核场之和为内源场,占地磁场的99%,外源场强度非常弱,在讨论地球外部空间磁场分布时通常将其忽略,内源场可看作一个磁偶极子,用位势函数表示。国际参考地磁场 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)是描述地球主磁场的准全球模型,在 IGRF 模型中,主磁场的标量磁位用球谐函数表达^[1,5~8]:

$$F = - \frac{V(r, \theta, \varphi, t)}{\Delta} \quad (5)$$

对式(5) Laplace 方程进行分离变量求解,得到式(6):

$$V(r, \theta, \varphi, t) = a \sum_{k=0}^k \sum_{m=0}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_k^m(t) \cos(m\varphi) + h_k^m(t) \sin(m\varphi)] P_k^m(\theta) \quad (6)$$

对式(6)分别求3个坐标方向的分量,得到:

$$X = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\sum_{k=0}^{k_{\max}} \sum_{m=0}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n_k+1} [g_k^m(t) \cos(m\varphi) + h_k^m(t) \sin(m\varphi)] dP_{n_k}^m(\cos\theta)/d\theta \quad (7)$$

$$Y = -\frac{1}{r \cos\theta} \cdot \frac{\partial V}{\partial \varphi} = \sum_{k=0}^{k_{\max}} \sum_{m=1}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n_k+1} [g_k^m(t) \sin(m\varphi) - h_k^m(t) \cos(m\varphi)] P_{n_k}^m(\cos\theta) \quad (8)$$

$$Z = \frac{\partial V}{\partial r} = -\sum_{k=0}^{k_{\max}} \sum_{m=0}^k (n_k + 1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n_k+1} [g_k^m(t) \cos(m\varphi) + h_k^m(t) \sin(m\varphi)] P_{n_k}^m(\cos\theta) \quad (9)$$

式中: a ——地球半径; r ——地球径向距离; V ——地磁场强度; g_k^m ——地磁场球谐系数(高斯系数); h_k^m ——地磁场球谐系数(高斯系数); $P_k^m(\theta)$ ——伴随 Legendre 函数; k ——模型截断水平; $\varphi = 90^\circ - B$; B ——纬度; X, Y, Z ——地磁场在3个方向的分量。

地磁场在3个坐标的分量及地磁要素见图4,根据图4不难得出地磁参数模型的计算公式。

磁偏角计算公式:

$$\delta = \tan^{-1}(Y/X) \quad (10)$$

磁倾角计算公式:

$$\beta = \tan^{-1}(Z/\sqrt{X^2 + Y^2}) = \tan^{-1}(Z/H) \quad (11)$$

总磁场强度计算公式:

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (12)$$

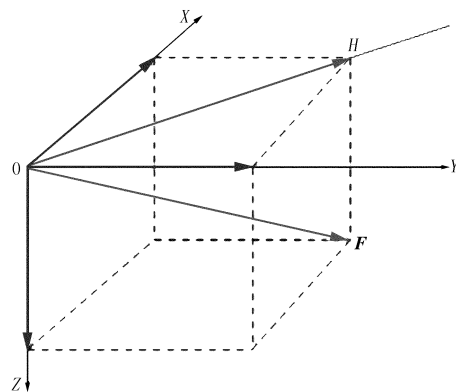


图4 地磁参数要素示意图

4 实现方式与计算步骤

地磁参数的计算比较复杂,涉及到坐标转换、高斯系数读取、伴随 Legendre 函数、矩阵计算等一系列问题。手工计算难以完成,必须进行计算机编程计算。为了增加程序的适用性和移植性,基于 VC++ 或 MATLAB 编写动态链接库 DLL(Dynamic Link Library)^[9~12],用 EXCEL 2003 作为开发平台。计算步骤见图5,计算软件界面见图6。

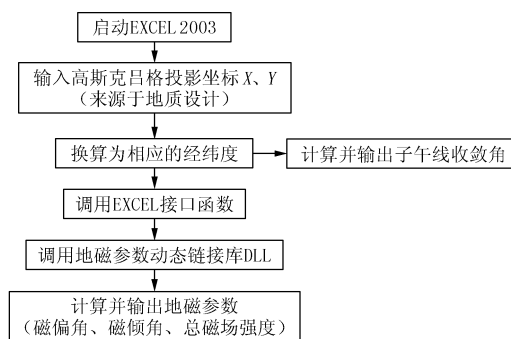


图5 地磁参数计算步骤框图

地磁参数计算软件			
输入:	X	Y	几度带(3或6)
	3932503.98	36440492.07	3
	经度(Lon)	纬度(Lat)	子午线收敛角(°)
	107.34397286	35.51956611	-0.38115030
输出:	107° 20' 38"	35° 31' 10"	-0° 22' 52"
	磁偏角(°)	磁倾角(°)	磁场强度(nT)
	-3.04049369	53.92174165	53015.65519233

图6 地磁参数计算软件界面

5 应用实例

地磁参数模型计算软件在华北分公司各区块钻完井设计、井眼轨迹控制中得到了应用,其井斜方位角校正精度高,对于充分认识井斜方位角准确校正

的重要性提供了依据,下面举例说明。

假设某口定向井,其井口坐标: $X = 4310776.88$, $Y = 19369954.34$;靶点坐标: $X =$

4311340.00 , $Y = 19368316.00$ 。利用上述地磁参数计算模型软件计算结果见表 1。

通过表 1 中的数据,针对不同情况对这口井实

表 1 不同地磁模型计算结果

高斯投影坐标转换结果			IGRF2005 模型			IGRF2010 模型		
经度/(°)	纬度/(°)	子午线收敛角/(°)	磁偏角/(°)	磁倾角/(°)	磁场强度/nT	磁偏角/(°)	磁倾角/(°)	磁场强度/nT
109.501	38.920	-0.942	-3.948	57.839	54654.540	-4.107	58.072	54716.988

钻 MWD 测斜数据进行校正,根据比较常用的圆柱螺线法公式^[1,2](式 13 ~ 20),可以看出方位角仅对东西坐标、南北坐标和井眼曲率产生影响,计算结果见表 2,其水平井投影图见图 7。

表 2 对实钻数据用不同模型校正结果 /m

IGRF2005 模型 参数校正		IGRF2010 模型 参数校正		IGRF2010 模型参数校正(未校正收敛角)	
南北坐标	东西坐标	南北坐标	东西坐标	南北坐标	东西坐标
486.46	-1737.51	481.60	-1738.86	453.01	-1746.52
492.61	-1756.53	487.70	-1757.90	458.80	-1765.66
498.78	-1775.59	493.82	-1776.98	464.61	-1784.84
504.97	-1794.62	499.95	-1796.02	470.42	-1803.98
511.08	-1813.59	506.02	-1815.01	476.17	-1823.07
517.07	-1832.45	511.95	-1833.89	481.80	-1842.04
522.91	-1851.20	517.74	-1852.66	487.27	-1860.90
528.66	-1869.97	523.44	-1871.43	492.66	-1879.77
534.23	-1888.65	528.96	-1890.14	497.88	-1898.56
539.54	-1907.06	534.22	-1908.56	502.83	-1917.07
544.62	-1925.18	539.25	-1926.69	507.56	-1935.28
547.53	-1935.90	542.12	-1937.42	510.26	-1946.05

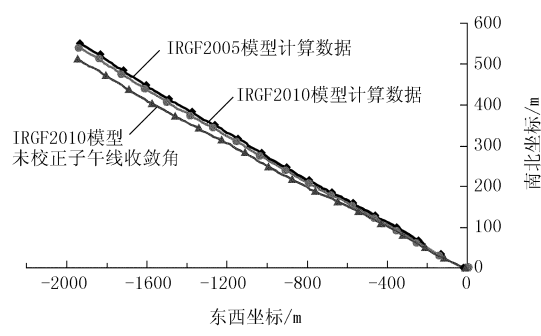


图 7 磁偏角和子午线收敛角对定向井轨迹的影响

$$R_H = \Delta L / \Delta \alpha \tag{13}$$

$$R_A = \Delta L (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) / (\Delta \alpha \Delta \varphi) \tag{14}$$

$$\Delta D = R_H (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \tag{15}$$

$$\Delta S = R_H (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \tag{16}$$

$$\Delta N = R_A (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) \tag{17}$$

$$\Delta E = R_A (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \tag{18}$$

$$\alpha_c = (\alpha_1 + \alpha_2) / 2 \tag{19}$$

$$K = \sqrt{(\Delta \alpha / \Delta L)^2 + (\Delta \alpha / \Delta L)^2 \sin^2 \alpha_c} \tag{20}$$

式中: α_1 、 α_2 ——上下测点井斜角; φ_1 、 φ_2 ——上下测点井斜方位角; R_H ——垂直剖面图上的曲率半径;

R_A ——水平投影图上的曲率半径; K ——井眼曲率。

从表 2 和图 7 可以看出,在水平位移大约 2000 m 的定向井中,若磁偏角误差 0.2°,东西坐标和南北坐标误差在 5 m 以上,如果未校正子午线收敛角,则误差更大,这表明地磁参数模型选取、参数计算精度和子午线收敛角的校正,对于定向井轨迹调整、随钻监测和中靶分析有重要意义。

6 结论

(1)通过对高斯克吕格投影坐标和地磁参数模型的分析,基于 EXCEL2003 软件平台开发了相应的计算软件,实例计算表明,软件计算准确,操作维护简单。

(2)通过实例分析,得出地磁场模型的选取及磁偏角和子午线收敛角的准确计算,对于定向井轨迹控制、调整和中靶分析有非常重要的意义。

参考文献:

[1] 韩志勇. 定向井设计与计算(第二版)[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,2007.
[2] 陈庭根,管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,2000.
[3] 刘修善. 定向钻井中方位角及其坐标的归化问题[J]. 石油钻采工艺,2007,29(4):1-5.
[4] 韩志勇. 关于子午线收敛角校正问题[J]. 石油钻探技术,2006,34(4):1-4.
[5] 王喜臣,王光杰,等. 利用球冠谱分析方法提取不同波长重力场异常[J]. 世界地质,1996,15(3):80-83.
[6] 王解先,李浩军. 磁偏角与磁倾角的公式推导与运算[J]. 大地测量与地球动力学,2009,29(3):88-94.
[7] 曹月玲,王解先. 利用球冠谱分析拟合 GPS 水准高程[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2008,(7).
[8] 顾左文,安振昌,等. 京津冀地区地磁场球冠谱分析[J]. 地球物理学报,2004,47(6):1003-1007.
[9] 谭浩强. C++ 面向对象程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
[10] 吴翊,李永乐,等. 应用数理统计[M]. 北京:国防科技大学出版社,1995.
[11] 文世鹏. 应用数值分析[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
[12] 薛毅. 最优化原理与方法[M]. 北京:北京工业大学出版社,2001.
[13] GB/T 15314-94,精密工程测量规范[S].
[14] 郭刚. 一种大地坐标变换的快速算法[J]. 测绘科学,2001,26(3):33-35.
[15] SY/T 5518-2000,石油天然气井位测量规范[S].