

◀教授专家专栏▶

关于子午线收敛角校正问题

韩志勇

(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东东营 257061)

摘要:论述了子午线收敛角校正在定向井轨迹计算中的重要性,介绍了子午线收敛角的定义和性质,以及子午线收敛角的计算方法和在定向井井眼轨迹计算中进行子午线收敛角校正的方法。希望我国各油田尽快推行石油天然气行业标准SY/T5435—2003规定的子午线收敛角校正。

关键词:定向井; 轨迹计算; 子午线收敛角; 磁偏角; 高斯-克吕格投影; 方位角

中图分类号: TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2006) 04-0001-04

石油天然气行业标准SY/T5435—2003《定向井轨道设计与轨迹计算》在轨迹计算中规定:“井斜方位角应进行磁偏角和子午线收敛角校正”,这是我国石油天然气行业标准关于子午线收敛角校正问题的第一次明确规定。

井斜方位角的磁偏角校正,大约从20世纪80年代初开始,逐渐在我国各油田推行,现在应该是没有任何疑义了。井斜方位角的子午线收敛角校正问题,早在20世纪90年代初就有人提出来^[1],但是直到现在许多油田还没有推行,许多工程技术人员还不了解其必要性和重要性。笔者撰写该文的目的在于宣传和贯彻标准的精神,促进我国各油田尽快推行子午线收敛角的校正。

1 子午线收敛角校正的重要性

先看一个算例。假如我国北方某油田,有一口设计位移1000 m的定向井,设计靶区半径30 m,井位所在位置为北纬42°58',东经89°58',子午线收敛角2.02°。在完钻后进行轨迹计算时,只进行了磁偏角校正,没有进行子午线收敛角校正。假如计算结果是靶心距等于零(100%中靶),但是实际的靶心距却是35.26 m,如图1所示的A点,已经脱靶。

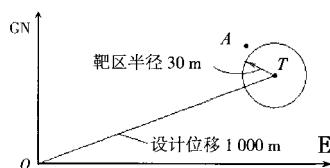


图1 子午线收敛角校正的重要性

这个算例说明,进行子午线收敛角校正是非常必要且非常重要的。水平位移越大的井,越显得重要。即使对于目前广泛应用的中半径水平井,按靶前位移

500 m,子午线收敛角1.5°计算,也会造成超过13 m的中靶偏差。如果是救援井,那就更显得重要了。

文献[2]介绍了一个由于磁偏角和子午线收敛角校正失误导致脱靶造成数百万美元损失的典型例子,值得深思。

我国自20世纪90年代以来,已经大量应用水平井,出现了大量的大位移井。因此,进行子午线收敛角的校正,已经势在必行。

2 子午线收敛角的概念

这要从定向井的坐标谈起,每口定向井的井位和目标点都是用坐标值来表示的,坐标值又与坐标系有关。同一个位置点,坐标系不同,则坐标值有很大区别。

2.1 大地坐标系^[3]

大地坐标系是描述地球上任一点位置的坐标系,常见的大地坐标系如图2所示,某点位置用经、纬度以及该点的高程H来确定,通常称为地理坐标系。为了避免与定向井中其他约定符号相混,文中经度以 τ 表示,纬度以 ϕ 表示。但是,大地坐标系不能给出在地球表面上的距离或长度,不便于在钻井工程应用。

例如,某定向井井口位置的大地坐标为: $\phi_0 = 37^{\circ}35'5.123''$; $\lambda_0 = 118^{\circ}55'3.321''$ 。目标点的位置为: $\phi_T = 37^{\circ}35'11.224''$; $\lambda_T = 118^{\circ}57'5.737''$ 。据此大地坐

收稿日期:2006-02-25; 改回日期:2006-03-24

作者简介:韩志勇(1937—),男,1962年毕业于北京石油学院油井工程专业,教授。系本刊技术顾问。

联系电话:(0546)8396262

标值, 很难确定井口与目标点之间的距离和方位, 很难进行轨道设计和轨迹计算。

所以, 希望能够在平面上把某点的位置表示出来, 这就需要平面坐标系。由于地球表面是球面, 不可能展平到平面上, 所以要想在平面上表示出来, 就要使用投影的方法, 这就是地图学中使用的投影法。地图投影方法很多, 我国采用的是高斯-克吕格投影法^[3-4]。

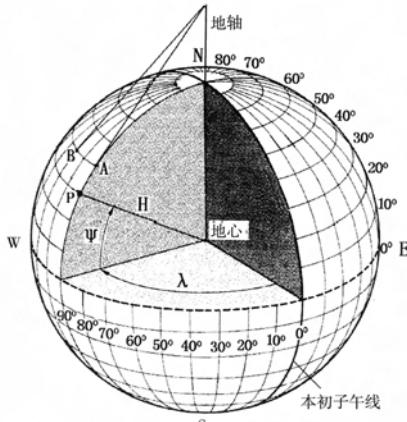


图 2 大地坐标系

2.2 高斯平面坐标系^[3-4]

高斯-克吕格 (Gauss-Kruger) 投影, 又称高斯投影, 在地图投影学中属于椭圆柱横切等角投影。如图 3 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, 再把椭圆柱表面展平, 就构成了高斯-克吕格投影。经过高斯-克吕格投影后, 地球表面上的经纬线变成了如图 4 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 4 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向。

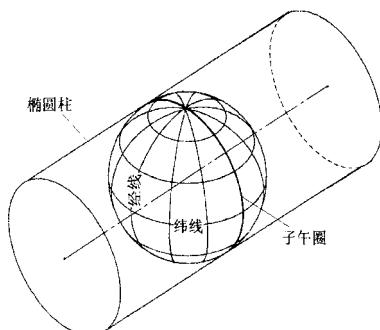


图 3 高斯-克吕格投影方法

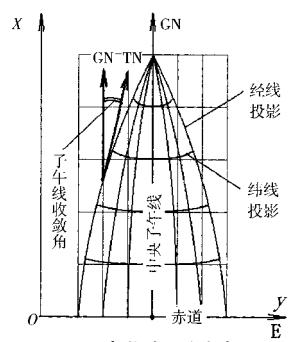


图 4 高斯投影坐标系

为了减小投影变形, 每 6° 或 3° 为一个投影带。为了在一个投影带内横坐标值不出现负值, 将坐标原点向西移动 500 km。这就是高斯投影坐标系。

定向井设计给定的井口和目标点的位置, 就是使用这种坐标系。例如前述的某定向井井口和目标点, 若用高斯投影坐标系表示, 则井口坐标为:

$$x_0 = 4163140.193 \text{ m}, y_0 = 20669380.084 \text{ m}.$$

目标点坐标为:

$$x_T = 4163390.193 \text{ m}, y_T = 20672380.084 \text{ m}.$$

需要注意的是 y 坐标的数字: 小数点以左的 6 位数字是真正的坐标值, 小数点以左第 7、8 位则表示投影带的序号。上述坐标 y_0 和 y_T 中的 20 就是 6° 带的投影带序号, 表示该投影带的中央子午线为 $20 \times 6 - 3 = 117^{\circ}$ 。

2.3 子午线收敛角的定义和性质

在大地坐标系中, 北半球所有子午线均汇交于北极点。过任一纬度线上两点 A 和 B 分别作子午线的切线, 二切线必相交于地轴上, 二切线之间的夹角, 称为 A 、 B 两点的子午线收敛角。

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, 此坐标北方向称为“网格北 (grid north)”, 用 GN 表示。同时, 任一点还有其“真北 (true north)”方向 (沿子午线在该点的切线方向), 以 TN 表示。 GN 与 TN 之间的夹角, 称为高斯平面子午线收敛角。实钻轨迹计算要用的就是这个收敛角。

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。如图 4 所示, 在中央子午线以东, 网格北都在真北以东, 可称为东收敛角, 收敛角为正值; 在中央子午线以西, 网格北都在真北以西, 可称为西收敛角, 收敛角为负值。

在一个投影带内, 高斯平面子午线收敛角的变化有一定规律。距离中央子午线越远, 收敛角越大, 在中央子午线上收敛角等于零。距离赤道线越远, 则收敛角越大。在赤道线上收敛角等于零。表 1 给出 6° 带

投影区内高斯平面子午线收敛角的变化。

表 1 不同纬度和经度差下的高斯平面子午线收敛角

纬度	子午线收敛角			
	0° ^①	1° ^①	2° ^①	3° ^①
10°	0°00'00"	0°10'25"	0°20'50"	0°31'16"
20°	0°00'00"	0°20'31"	0°41'03"	1°01'37"
30°	0°00'00"	0°30'00"	1°00'01"	1°30'04"
40°	0°00'00"	0°38'34"	1°17'09"	1°55'46"
50°	0°00'00"	0°45'58"	1°31'56"	2°17'54"
60°	0°00'00"	0°51'58"	1°43'56"	2°35'54"
70°	0°00'00"	0°56'23"	1°52'46"	2°49'49"
80°	0°00'00"	0°59'05"	1°58'11"	2°57'16"
90°	0°00'00"	1°00'00"	2°00'00"	3°00'00"

注: ①为经度差。

3 子午线收敛角的计算^[3-4]

设计给定的井位和目标点的坐标, 都是高斯投影坐标系(网格坐标系)的坐标。要计算子午线收敛角, 首先要进行坐标系转换, 把高斯投影坐标系转换到大地坐标系, 即求得井位和目标点的经、纬度。这个坐标系转换较为复杂, 需要借助专用软件进行计算, 在此不作介绍。完成坐标转换之后, 即可计算子午线收敛角。

3.1 传统计算公式

传统的子午线收敛角计算公式为:

$$\gamma = \frac{\sin \psi}{3600} \left[\Delta L + \frac{\cos^2 \psi (1 + 3\eta^2 + 2\eta^4)}{3\rho^2} \Delta \lambda^3 + \frac{\cos^4 \psi (2 - \tan^2 \psi)}{15\rho^4} \Delta \lambda^5 \right] \quad (1)$$

式中, $\eta^2 = (e')^2 \cos^2 \psi$, $(e')^2 = 0.006\ 739\ 501\ 819\ 17$; γ 为子午线收敛角, (°); ψ 为计算点所在的纬度, (°); $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$, $\Delta \lambda$ 为计算点与中央子午线之间的“经度差”, λ_0 为中央子午线经度, λ 为计算点的经度, ('); ρ 为把 (') 换算为弧度的常数, $\rho = 206\ 264.806\ 3$ 。

显然, 采用式(1)计算子午线收敛角较为复杂, 在定向井工程计算中可以采用简易计算公式。

3.2 简易计算公式^[5]

由图 1 可以推导出一种简易计算公式:

$$\gamma = \Delta \lambda \sin \psi \quad (2)$$

式中, γ 为子午线收敛角, (°); $\Delta \lambda$ 为计算点与中央子午线之间的“经度差”, (°); ψ 为计算点所在的纬度, (°)。

实际计算表明, 该简易公式的计算误差, 随着纬度 ψ 的减小而增大, 随着经度差 $\Delta \lambda$ 的增大而增大。在 $\psi = 10^\circ \sim 70^\circ$ 和 $\Delta \lambda = 1^\circ \sim 3^\circ$ 范围内, 最大相对误差不超过 0.083%, 可以满足工程计算中的精度要求。

求。

4 子午线收敛角的校正方法^[2]

井斜方位角的测量通常使用磁性测量仪器, 测得的方位角是以磁北为基准。当使用非磁性测量仪器(例如陀螺仪)时, 测得的方位角是以真北为基准。可是进行定向井轨道设计和轨迹计算时都使用的是高斯投影坐标系, 是以网格北为基准的。所以需要把测量的以磁北为基准的井斜方位角转换成以网格北为基准的井斜方位角, 这项工作称为“方位角校正”, 国外称为“方位参照系转换 (azimuth conferences system conversion)”^[2]。

当使用磁性测斜仪时, 井斜方位角校正包括磁偏角校正和子午线收敛角校正。这两个校正应结合起来一起完成, 方位角的校正公式为:

$$\phi_c = \phi_s + \delta - \gamma \quad (3)$$

式中, ϕ_c 为经过方位校正之后用于轨迹计算的方位角, (°); ϕ_s 为测量仪器测得的井斜方位角, (°); δ 为磁偏角, 东磁偏角为正值, 西磁偏角为负值, (°); γ 为高斯平面子午线收敛角, 东收敛角为正值, 西收敛角为负值, (°)。

当使用非磁性测量仪器(例如陀螺仪)时, 只进行子午线收敛角校正, 校正公式为:

$$\phi_c = \phi_s - \gamma \quad (4)$$

例如, 我国某油田一口井的井口坐标为: $x = 4\ 163\ 140.193$ m, $y = 20\ 669\ 380.084$ m。 y 坐标前两位数字表明, 该井口位于高斯投影 6°带的第 20 投影带, 其中中央子午线为东经 117°。经过坐标换算, 可求得该井口的大地坐标(1980 年西安坐标系): $\psi = 37^\circ 35' 2.798''$, $\lambda = 118^\circ 55' 3.149''$; 该井口处的子午线收敛角: $\gamma = 1.169\ 881\ 29^\circ$ (若用简易公式计算, $\gamma = 1.172\ 375\ 01^\circ$), 近似取 $\gamma = 1.17^\circ$ 。已知当地当年的磁偏角 $\delta = 6.30^\circ$, 则该井井斜方位角校正公式为:

$$\begin{aligned} \phi_c &= \phi_s + \delta - \gamma \\ &= \phi_s - 6.30^\circ - 1.17^\circ = \phi_s - 7.47^\circ \end{aligned} \quad (5)$$

对该井所有测点的井斜方位角按照上述公式进行校正之后, 然后才能进行轨迹计算。

5 结 论

1) 标准 SY/T5435—2003《定向井轨道设计与轨迹计算》规定“井斜方位角应进行磁偏角和子午线收敛角校正”, 这是一条非常重要的规定, 推行子午线收敛角的校正, 势在必行, 刻不容缓。

2) 介绍了子午线收敛角定义和性质, 给出了子午线收敛角的计算方法和校正方法, 为促进我国各油田尽快推行子午线收敛角的校正, 提供了有利条件。

致谢: 本文受到李海峰先生的帮助, 特表感谢。

参考文献

[1] 李宏伟, 李淑伟. 井口坐标系及地磁参数的确定 [J]. 石油钻

- 探技术, 1992, 20 (4).
- [2] Wright J W. Directional drilling azimuth reference systems [R], IADC/SPE 17212.
- [3] 胡毓钜, 龚剑文. 地图投影 [M]. 北京: 测绘出版社, 1981.
- [4] 李汝昌, 王祖英. 地图投影 [M]. 湖北: 中国地质大学出版社, 1991.
- [5] 北京矿业学院普通测量教研组编. 普通测量学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1959.

[审稿 刘修善]

Problem of Meridian Convergence Correction

Han Zhiyong

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China)

Abstract: The necessity and importance about grid correction in survey calculation of directional drilling are discussed. The concept of the meridian convergence angle is introduced. The methods to calculate the meridian convergence angle and the methods of grid correction are given. The purpose of the paper is to spread the rule of grid correction according to specification of SY/T5435—2003 in our country soon.

Key words: directional well; trajectory calculation; meridian convergence angle; magnetic declination; Gauss-Kruger Projection; azimuth

《石油钻探技术》编辑部关于稿件的几点要求

为了方便石油工程界的技术及管理人员投稿, 并进一步加快稿件处理速度, 缩短论文发表周期, 从 2006 年起, 本刊对所投稿件提出几点要求, 请广大作者理解和支持。

- 1) 文章题目力求简洁、明了、切实。作者署名一般不超过 5 人, 其余人员可以以附言形式注明, 并译成英文。
- 2) 摘要 300~500 字, 反映文章的主要论点和结论等, 并译成英文。
- 3) 初选 3~5 个关键词。
- 4) 正文一般不超过 5 000 字。要求: 主题突出, 层次清楚; 文字精炼, 语句通顺; 数据准确, 文责自负。公式符号应分清文种、大小写、上下角、正斜体, 易混淆的要注明, 建议使用公式编辑器。
- 5) 参考文献请按照本刊 2004 年第 1 期公布的参考文献著录格式要求著录, 或参考本刊最新期刊。
- 6) 作者简介包括: 出生年份、性别、籍贯、毕业(进修)时间及学校、专业、主要经历、成就及现任职务等。
- 7) 本刊编辑部不反对一稿两投, 但如果他刊已经确定刊发, 请及时告知本刊编辑部, 以避免重复劳动。
- 8) 请注明联系人详细通讯地址、电话(包括手机)、电子信箱等信息。
- 9) 请从网上投稿, 本刊 E-mail: syzt@vip.163.com; 联系电话: 0534—2670163, 2670121。
- 10) 如果稿件内容为自然科学基金、863、973、省部级以上科研项目, 请务必在文章最后注明项目名称及编号。本刊对于这类稿件会以最快的速度送审, 并在最短的时间内刊出。
- 11) 稿件自收到之日起约 2 个月内处理完毕。作者可以根据本刊提供的稿件编号到本刊网站(<http://syzt.chinajournal.net.cn>)上查询稿件处理情况。如果您对稿件处理意见存在疑问, 可以致电本刊编辑部(0534—2670121, 2670163), 或者在本刊网页“交流园地”里留言, 我们会及时进行答复。
- 12) 为了进一步提高本刊电子邮箱的稳定性, 方便广大读者、作者投稿, 本刊已经启用新的电子邮箱: syzt@vip.163.com, 原电子邮箱(syzt@vip.sina.com 及 syzt@chinajournal.net.cn)已经废弃, 早期使用的电子邮箱 chn6816@sohu.com 是私人邮箱, 请尽量不要使用, 以免耽误稿件的处理。