

◀ 钻井技术 ▶

# 定向井和水平井测量技术基础

周华林 田树林 李兆东 王华西

(山东东营 257064)

**提要** 介绍了地磁场的四个基本特性、地磁场的球谐分析方法(高斯理论)及国际地磁参考场的发布使用情况。分析认为,定向井水平井并迹实测数据(以地磁北极为基准)和计算数据(以高斯-克吕格坐标北极为基准)都必须校正到以地理北极为基准上来。探讨了地磁场参数在定向钻井中的作用、无磁钻铤长度的选择、测量数据的比较等问题。

**主题词** 高斯定律 大地磁场 坐标系统 电磁干扰 无磁钻铤 测量 测量仪器 定向井 水平井

现代钻井工程中,定向钻井技术的发展相当快,从钻小斜度、小位移的普通定向井发展到能钻大斜度、大位移的高难度定向井,进而发展到钻水平井等特殊工艺井。其测量仪器随着整个工业技术的发展,也在不断地更新,从磁性单、多点照相测斜仪发展到电子多点测斜仪 ESS,进而发展到有线随钻测斜仪 SST 和无线随钻测斜仪 MWD。但其测量基准并没有改变,都与大地有关。比如电子类测量仪器的主要传感元件是敏感大地重力场的重力加速度计和敏感大地磁力场的磁通门。可以说,定向井、水平井现场施工技术人员,只有具备了定向井和水平井测量技术基础知识以后,才能钻出高精度的定向井和水平井。那么,关于地球的哪些理论是测量技术基础?另外,哪些因素影响定向井和水平井的测量精度?本文试作介绍和探讨。

## 一、关于地磁场的理论

### 1. 地磁场的基本特性

由地磁学可知,地磁场的基本特性主要有四点:

(1)地磁场近似于一个置于地心的偶极子磁场。这个偶极子的磁轴与地轴斜交成一个角度,并与按地理位置确定地球表面的地磁南极和北极极性相反。

(2)地磁场是一个弱磁场,在地球表面的平均磁感应强度为 0.05mT。

(3)地磁场  $B$  由各种不同来源的磁场叠加而成,包括主要起源于地球内部的稳定磁场  $B_1$  和主要起源于地球外部的变化磁场  $B_2$ 。即  $B=B_1+B_2$ 。

变化磁场比稳定磁场弱得多。稳定磁场是地磁场的主要部分,占地磁场强度 99%,由地心偶极子磁场和非偶极子磁场和磁异常组成。地磁学将偶极子磁场和非偶极子磁场以及外源稳定磁场的叠加定义为正常地磁场,用来描述地球表面的地磁场分布规律。

(4)地磁场是随时间变化的。长期变化来源于地球内部的物质运动,在其年变化率中显示出来。短期变化来源于地球的外部变化磁场,在其 24h 周期性变化的地磁特性中体现出来,在钻井工程测量中可以忽略。

因此,地磁场基本上是一个相对稳定(包括长期变化)、磁场强度较弱的偶极子磁场,在这个偶极子磁场上还存在不规则部分和叠加着短期变化磁场。而定向钻井工程测量则以包括长期变化的正常地磁场理论为其技术基础之一。

### 2. 高斯理论和国际地磁参考场

#### (1) 计算地磁场的高斯理论

1839 年德国数学家高斯提出了地磁场的球谐分析方法。1885 年施密特又发展了这个理论,从数学分析的角度解决了将地磁要素的地面分布表示成地理坐标的函数,并进一步建立了解决地磁场成因问题的理论基础。这个精确的、定量的数学表达方法,被称为地磁场的高斯理论或称高斯-施密特理论。

该理论有两条假设:①地磁场是由地球内部原因引起的。由于外源场是各种短期变化磁场,比内源场小几个级次,故认为外源场的影响小于测量误差

(通化后),这是合理的。②假设地球是一个半径为 $R$ 的圆球体,不考虑地球的偏心率。因为偏心率对球谐函数的影响只差几个至几十纳特,也在使用误差范围之内。

### (2) 通化的概念

由于地磁要素是随时间变化的,因而必须把观测数值都归算到某一特定的日期,这种步骤称之为通化。

### (3) 国际地磁参考场

为了采用统一的主要场模式和长期变化模式,利用球谐分析方法计算正常地磁场。1968年,国际地磁与超高层大气物理协会(IAGA)在美国华盛顿召开的“地球基本磁场的描述”座谈会上提出了1965年国际地磁参考场(即IGRF1965.0)并确定它作为全世界通用的正常地磁场的标准,以后由该协会每五年通过并发布一次可供全世界使用五年的国际地磁参考场。

60年代以后的世界地磁图都是根据国际地磁参考场提供的高斯系数计算出结果再编绘的。世界地磁图很清晰和形象地显示了地磁场的数值特征。中国1952年第一次发布了1950年中国地磁图,以后每十年发布一次。

## 二、高斯—克吕格平面直角坐标系

### 1. 关于描述地理位置的坐标系

在地球表面上任何一点的位置和方向都可以采用根据不同目的而设计的坐标系进行不同精度的描述。由于测量工作内容不同、要求精度不同,所以实际采用的坐标系也不尽相同。

#### (1) 地理坐标系

地理坐标系是用经纬度来描述的。它是用来对地球椭球面上任意点定向和定位的常用方法。但由于它是球面坐标系,在实用中有一定的局限性,所以在大地测量中必须将其转换为平面直角坐标系。

#### (2) 常用的测量坐标系

中国于1952年开始采用1940年克拉索夫斯基椭球,并在它的基础上建立了1954年北京坐标系,通过高斯投影形成了全中国大地测量地形图通用的高斯—克吕格平面直角坐标系。在70年代末,为了提高精度,我国又相继建立了1980年、1984年、1995年北京坐标系。我国石油行业仍然采用精度能满足要求的1954年北京坐标系作为其技术基础之一。

### 2. 高斯—克吕格投影

我国测绘的比例尺1:1万~1:50万地形图均采用高斯—克吕格投影。该投影是一种等角横圆柱投影,无角度变形,长度和面积有变形但变形很小,因而,在地形图中广泛应用。

#### (1) 基本概念

1816年德国数学家高斯在总结前人经验的基础上,进一步发展了立体几何学,并于1822年创立了高斯投影。该投影后经克吕格研究改进后形成国际上通用的高斯—克吕格投影。

该投影理论要点:假设有一个椭圆柱面横套在地球椭球体外面,并与某一子午线相切(此子午线被定义为中央子午线,也称中央经线)。根据角度不变的原则,用数学方法将地球椭球体经、纬线转换到这个椭圆柱面上,展开椭圆柱面后即获得平面的经、纬线网图形。为了控制长度变形,中央经线两边不能过宽,一般为左右各经线差 $3^\circ$ 或 $1.5^\circ$ 。这样就将全球分为60个 $6^\circ$ 带,或120个 $3^\circ$ 带,分别对各带进行投影,每带都有自己的中央经线。

#### (2) 基本特征

①赤道和每带的中央经线投影相互垂直。其余各经、纬线的投影为曲线,并且以赤道为轴,南北对称;以中央经线为轴,东西对称。

②投影无角度变形。即投影后地球椭圆面上任意两线之夹角大小不变,投影后的经、纬线成正交。

③中央经线没有长度变形,其余各经线都增长,离中央经线越远则变形越大。在同一条经线上,长度变形随着纬度的减少而增大。

④由于变形小,投影可以满足测量精度要求。

⑤各投影带坐标有一致性,计算出某一带的坐标值对其它各带均适用。

⑥坐标纵线偏角(即真子午线与坐标纵线的夹角,也叫子午线收敛角)很小,最大值不超过 $3^\circ$ 。

#### (3) 分带的规定

高斯—克吕格投影分带方法有两种。

$6^\circ$ 带从起始经线算起,每经差 $6^\circ$ 为一带,由西向东全球共分为60带。用1,2,...,60进行编号。每带中央经线为 $6^\circ$ 。

$3^\circ$ 带是从东经 $1.5^\circ$ 开始算起,每经差 $3^\circ$ 为一带。 $3^\circ$ 带是在 $6^\circ$ 带的基础上分成的;其中央经线一部分与 $6^\circ$ 带的中央经线重合,一部分与 $6^\circ$ 带的边缘重合。

### 3. 高斯—克吕格平面直角坐标系及其它

#### (1) 高斯—克吕格平面直角坐标系

在高斯—克吕格投影带中,中央经线与赤道是

相互垂直的两条直线,由它们构成每个投影带的平面直角坐标系,称高斯—克吕格平面直角坐标系。

中央经线为纵轴,用 X 表示。赤道为横轴,用 Y 表示。中央经线与赤道的交点为坐标原点,用 O 表示。在赤道以北 X 坐标为正值,在赤道以南 X 坐标为负值。我国领土位于赤道以北,所以 X 坐标为正值。中央经线以东 Y 坐标为正值,中央经线以西 Y 坐标为负值。为了使用方便,避免 Y 坐标出现负值,确定将投影带内所有的 Y 坐标值加上 500km,相当于将坐标原点沿赤道向西移动 500km。为了判明坐标值属于哪个投影带,特规定 Y 坐标值前面冠以带号。把这样的 Y 坐标值称为通用横坐标。

### (2) 定向钻井工程涉及的坐标系

在定向钻井工程中,关于井斜方位角的测量基准存在着三个北极,即地理北极、地磁北极和高斯—克吕格坐标北极,因而涉及三个相关的坐标系。最终所钻井眼井斜方位角的测量基准是地理北极。但是,井下仪器实测的井斜方位角是以地磁北极为基准的;计算井身轨迹处理数据则以高斯—克吕格坐标北极为基准;这两者都必须校正到以地理北极为基准上来。

坐标校正涉及以下三个参数:①子午线收敛角,即高斯—克吕格平面直角坐标纵线与地理坐标纵线之间的夹角;②磁偏角,即地理坐标纵线与地磁坐标纵线之间的夹角;③地质设计的坐标,即地质部门提供的定向井或水平井井口和井底目标点坐标(属于高斯—克吕格平面直角坐标)。

如果将以地磁北极为基准的测量仪器所测磁方位角仅仅进行磁偏角校正,即将井眼轨迹平面位置确定在地质设计规定的高斯—克吕格平面直角坐标系以外的球面地理坐标系中,那就意味着没有和地质设计在同样的坐标系中确定井眼的实际位置。这从理论上讲是不严格的。

当井下仪器测取磁方位角以后,用测量数据计算结果进行井眼轨迹控制必须首先进行子午线收敛角的校正。

### (3) 全球定位系统(GPS)

GPS 具有很高的测量精度,定位时间短,可以在地球上任意地点和时间直接采用四颗卫星的观测数据定位,而不需要选标设三角基准点,不受距离和电离层的干扰,在沙漠和海洋石油勘探开发的定位工作中发挥了积极的作用。

但由于它采用 WGS84(世界大地测量系统)地

心坐标系,与石油行业现行的坐标系统存在一定的差距。所以,采用其定位数据作为井口定位基准时,一定要注意各个坐标系之间的换算关系,以避免用某一坐标系数值直接套用到另一坐标系中造成的不必要误差。

## 三、地磁场参数在定向钻井中的作用

### 1. 世界地磁图的作用

用世界地磁图或区域地磁图描述的地磁场参数都揭示着正常地磁场的分布情况,它基本上准确地代表了偶极子磁场和非偶极子磁场在描述范围内的数值特征,所以一般都作为描述范围内的正常地磁场标准值。由于井眼轨迹测量采用的测量仪器以磁性测量仪器为主(陀螺类测量仪器也要以磁场参数为基准参考值),所以,井眼轨迹测量和计算理论都是以国际地磁参考场对世界地磁场的理论描述和计算方法为基础的。

在定向钻井施工中,由于采用世界地磁图或区域地磁图来确定地磁参数的精度较低,而且很不方便,因此,90年代以来国际石油钻井界都根据高斯理论及高斯系数(采用与编绘世界地磁图同样的方法)和相应的现场计算机程序来计算井口坐标位置的各项地磁参数。

### 2. 地磁参数与测量仪器的关系

定向井测量中常用的磁性单、多点照相测斜仪磁罗盘的设计和制造,必须根据实际使用的地理位置来确定其磁性参数。电子类磁性测斜仪(含 ESS 型、SST 型、MWD 型)的磁通门设计和制造,也必须根据实用的地理位置来确定其磁性参数。

### 3. 钻井施工中应注意的两大问题

#### (1) 测量基准和三种北极的相互关系

电子类磁性测量仪器(包括 ESS 型、SST 型、MWD 型等)都是以地磁北极为测量基准的。

自寻北式陀螺测斜仪(包括 G2 型电子陀螺、Seeker 型电子陀螺等)按照输入指令的要求,自动地以地理北极或平面坐标北极为基准。

在实际测量工作中,准确选择测量基准,正确处理三种北极之间的相互对应关系,将不同情况下的测量结果校核为需要的结果,这在钻井现场是一项非常重要的基础工作。

#### (2) 磁场参数影响测量精度和井迹计算精度

目前现场使用的较先进的电子类磁性测量仪器,在进行测量前都必须输入当地的磁场强度值和

磁偏角值;电子陀螺测斜仪 BOSS 也要在测量前输入当地的地理纬度,作为测量结果的计算依据。在井眼轨迹计算中,磁偏角的精度直接影响着计算结果的精度。

#### 4. 磁干扰问题及方位角校正

电子类磁性测量仪器在进行测量前都必须人工输入该地点处的理论磁场强度和磁偏角,作为测量参考基准。仪器本身设计参数的允许误差(磁偏角 $\pm 0.3^\circ$ ,磁场强度 $\pm 0.3\mu\text{T}$ )作为检测点是否受地磁异常和钻柱轴向磁干扰影响的依据。

如果超过这个范围的值由地磁异常或邻井套管所造成,则该方位角测量值是不能用的。至于该测量点是否具有地磁异常可用高精度的磁力计数据和邻井资料来证实。

如果这个磁场干扰来自钻柱轴方向,即由于所用无磁钻铤长度不够等原因所造成,则仪器同时显示的校正方位角可作为准确的测量结果使用。

校正方位角是根据磁场校正理论计算出来的井斜方位角。磁干扰主要作用在钻柱轴向  $B_z$  上,因而采用开始测量前人工输入的地磁场强度和地磁偏角计算出  $B_z$  理论值代替  $B_z$  实测值,并与实际测得的  $B_x$  和  $B_y$  值一起可计算出井斜方位角。

研究表明,在大斜度井和水平井的井斜方位角测量中,当井眼朝向接近正东或正西的方位钻进而且井斜角较大时,只有采用短无磁钻铤方法(即校正方位角),才能保证测量精度。因为如果此时钻柱轴向的磁干扰为 $\pm 8\mu\text{T}$ ,原始方位角的误差就会达到 $\pm 16^\circ$ 。

### 四、无磁钻铤长度的选择

在定向井、水平井的钻井施工中,无磁钻铤长度的选择非常重要,它直接影响着井眼轨迹数据的测量精度。

#### 1. 地区选择

(1) 作为定向井工程技术人员和测量技术人员,首先应当明白自己所施工的井处于地理上的什么位置。

(2) 根据国际区域地磁图,查看你所施工的井处于哪个区域,是 A 区、B 区或 C 区。

(3) 中华人民共和国境内都按 A 区处理。

#### 2. 测量仪器在无磁钻铤中的位置选择

(1) A、B、C 三个区域都分两种情况,即转盘钻进和动力钻具或满眼钻具钻进情况,并附有专用

的图供查看。

(2) 根据施工时的井斜和井斜方位角从专用图中可以查找使用无磁钻铤的长度,并确定测量仪器在无磁钻铤中的位置。

### 五、测量数据比较

如果要做测量数据比较,必须注意以下问题:

1. 测量深度必须一致。一定要在同一深度做多种仪器的比较测量。

2. 做比较测量时,可以是同一套仪器;也可以是同一种仪器;还可以针对不同种类的仪器。

3. 任何测量仪器都有它自身的系统误差。

4. 当井斜低于  $7^\circ$  时,其比较效果不太好,测量仪器的测量重合性较差。

5. 比较测量必须是在离开套管鞋 30m 以远。

6. 在稳斜井段做比较测量时,测量重合性较好。

7. 比较测量应考虑无磁钻铤的长度,分析其测量数据是否受磁干扰。

8. 钻具结构不同、井眼条件不同(如大肚子井眼等)、操作人员不同等因素,都可能造成测量数据重合性较差。但是,可以多做几个点的重合性测量。

●1997—10—17 收稿

### 参 考 文 献

- [1] 张佐民. 地形图测绘入门. 西安:陕西科学技术出版社, 1984
- [2] 北京大学、中国科技大学地球物理教研室. 地磁学教程. 北京:地震出版社, 1986

### 作 者 简 介

周华林, 1963 年生。1985 年毕业于胜利油田职工大学钻井专业。一直从事定向井、水平井钻井工程及测量工作。现任胜利石油管理局钻井工程技术公司定向井公司定向二队指导员, 工程师。

田树林, 1958 年生。1984 年毕业于胜利油田职工大学钻井专业。一直从事定向井、水平井工程及测量工作。现任胜利石油管理局钻井工程技术公司定向井公司副经理, 工程师。

李兆东, 1963 年生。1985 年毕业于胜利油田职工大学钻井专业。一直从事定向井、水平井钻井工程及测量工作。现任胜利石油管理局钻井工程技术公司定向井公司生产办副主任, 工程师。

王华西, 1965 年生。1986 年毕业于胜利油田石油学校钻井专业。一直从事定向井、水平井钻井工程及测量工作。现任胜利石油管理局钻井工程技术公司定向井公司助理工程师。