

# 基于加速度计和磁强计的定向钻进姿态测量及方位校正<sup>\*</sup>

罗武胜,徐涛,杜列波

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

**摘要** 描述了用三轴加速度计与三轴磁强计测量地下钻头倾斜角、工具面向角和方位角的方法,给出了具体的系统结构和详细的姿态解算。针对由于钻具铁磁性材料引入干扰磁场对方位测量的误差,提出了利用当地地磁场进行方位角校正的方法,并给出仿真结果。结果表明,这种校正方法能够在不更换钻具即测量装置仍放在一段无磁钻铤内部的情况下,获得准确的方位角,因此可以大大减少无磁钻铤的长度,节省钻进成本。

**关键词** 定向钻进;姿态测量;方位角;方位校正;磁强计

中图分类号:TH824<sup>+</sup>.4 文献标识码:A

## Directional Drilling Attitude Measurement and Azimuth Correction with Accelerometers and Magnetometers

LUO Wu-sheng, XU Tao, DU Lie-bo

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract**: This paper proposes an approach of determining the pitch, the roll and the azimuth with three mutually orthogonal accelerometers and magnetometers. The configuration of the system and the calculation of the attitude were firstly described. In order to compensate for the effects of perturbing magnetic fields associated with magnetized sections of the drill collar, a correction method of determining the azimuth which relies on the knowledge of local geomagnetic field was described in great detail. Furthermore, the correction process and simulation were presented. Results from simulation show that the correction method can determine an absolute azimuth by means of using a measuring instrument disposed in a relatively short non-magnetic drill collar, so it minimizes the length of non-magnetic drill collar and saves drilling costs greatly.

**Key words**: directional drilling; attitude measurement; azimuth angle; azimuth correction; magnetometer

地下定向钻进(Directional Drilling)是利用专门的定向钻机以可控钻孔轨迹的方式,在不同地层和深度进行钻进的一种钻进方法,目前在石油钻井、地质勘探以及方兴未艾的非开挖管线铺设领域,获得迅速而广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

定向钻进过程中,为了能有效控制钻进轨迹,需要实时获取钻具方位等姿态信息。这些姿态信息的获取是由安装在钻具内的随钻测量仪器来完成的,如图 1 所示。定向钻具一般由一系列钻杆、多节钻铤和导向钻头等组成,测量仪器安装在钻铤的内部,完成钻具姿态的实时测量,并将数据传输到地面。这些需要测量的姿态信息包括方位角、倾斜角和工具面向角等。方位角是钻具当前点的切线在水平面的投影与正北方向之间的夹角,它反映了水平面内钻具运动的方向。倾斜角是钻孔当前点的切线与水平面之间的夹角,它反映了钻具前进方向相对水平面的倾斜程度。工具面向角为钻具的造斜方向与参考方向间的夹角,它反映了钻具下一步钻进的造斜方向。

为了给出姿态角严格的定义,我们在地理坐标系中(NED 北东地坐标系)建立钻具坐标系(XYZ 坐标系),如图 2 所示。图中, $H$  为水平面, $V$  为包含钻进轴线的垂直面, $P$  代表钻具横截面。一般取  $X$  轴与钻具的轴线方向一致, $Z$  轴与造斜钻头的造斜方向一致, $Y$  轴跟二者垂直并构成右手直角坐标系。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2006-06-19  
基金项目:国家 863 基金资助项目(2003AA430120)  
作者简介:罗武胜(1972-),男,副教授,博士。

这样 根据以上角度的定义 ,方位角为  $X$  轴在水平面的投影与磁北之间的夹角 ,图中用  $\psi$  表示 ,倾斜角为  $X$  轴与水平面的夹角 ,图中用  $\theta$  表示 ,面向角为  $Z$  轴与钻孔垂直面的夹角 ,图中角  $\phi$  表示。角度的方向都按照  $XYZ$  坐标系右手系的方向为正。

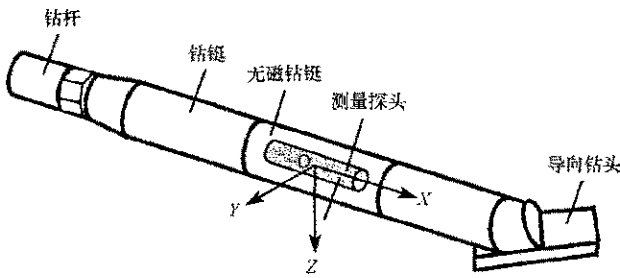


图 1 水平定向钻具构成

Fig.1 Configuration of a directional boring tool

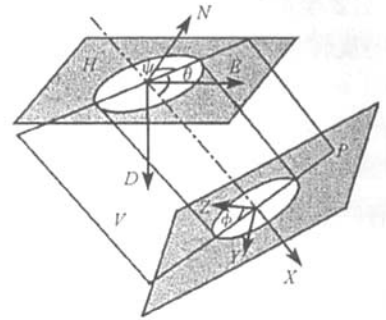


图 2 姿态角的定义

Fig.2 Definition of borehole attitude angles

## 1 测量系统

在航空航天领域 ,载体姿态的测量常用加速度计和陀螺仪来构成。地下钻进中的姿态测量有其本身的特殊性 ,由于测量仪器要放在狭小的钻具空腔内 ,并在钻进过程中随钻具一起破土旋转进给 ,这就要求各种测量传感器除满足精度要求外 ,还必须做到体积小、重量轻、结构可靠、耐振动、耐冲击 ,经受剧烈的温度变化等。传统的加速度计和陀螺仪 ,体积大、成本高、对环境适应性差 ,并不适合地下定向钻进的测量。

随着微电子机械系统 (MEMS) 技术的发展 ,从上个世纪末开始出现了在单片上集成的加速度计和磁强计器件 ,这些器件采用 MEMS 技术 ,在单片上集成加速度敏感元件及相应的调理电路 ,具有体积小、重量轻、功耗低、成本低等优点 ,典型产品如 ADI 公司的 ADXL 系列加速度计 ,HONEYWELL 公司的 HMC 系列磁阻式磁强计等。

基于这些微惯性器件 ,我们设计的地下定向钻进姿态测量系统结构如图 3 所示 ,系统采用沿钻具三个轴向安装的三个互相垂直的加速度计和三个互相垂直的磁强计来实现 ,各加速度计测量的是重力场的分量 ,各磁强计测量的是地磁场的分量 ,经相应的模数转换后 ,送入微处理器。为了实现传感器的校正和温度的补偿 ,测量仪器还配置了温度传感器。微处理器接收这些数据以后 ,将进行实时的信号处理及姿态解算 ,此外 ,为了消除磁场干扰对方位测量造成的影响 ,还须利用地磁场的数据进行方位校正。校正后的数据可以通过 RS-232 接口以有线的方式进行输出 ,但由于传感器是在钻具内部 ,更通常的做法是将数据编码调制 ,通过线圈以无线的方式向地表发射 ,由地面上的仪器进行接收。这样 ,地面司钻人员就能实时掌握钻头的运动姿态 ,并可进行相应的控制 ,以使钻具按照设定轨迹钻进 ,从而实现导向的目的。

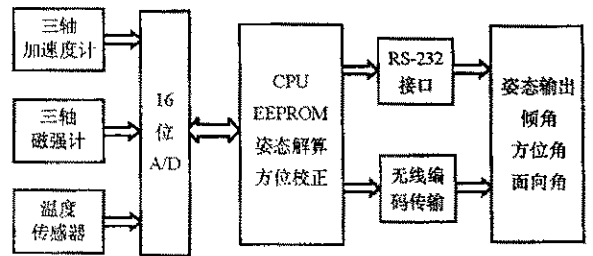


图 3 随钻姿态测量系统框图

Fig.3 Block scheme of attitude measurement system

## 2 姿态解算

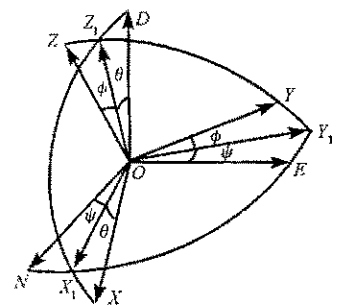


图 4 欧拉旋转变换

Fig.4 Euler rotation transformation

根据旋转变换中的欧拉定理,载体在空间中的姿态可用相对于地理坐标系有限的转动来表示。再结合图2可知, $NED$ 坐标系经过一系列的旋转变换可以变换到 $XYZ$ 坐标系,而这些旋转角度即为上述定义的姿态角。具体变换如图4所示,起始时钻具坐标系与 $NED$ 坐标系重合( $N$ 与 $X$ 轴、 $E$ 与 $Y$ 轴、 $D$ 与 $Z$ 轴相对应),随后绕 $D$ 轴旋转 $\Psi$ 角,成为 $X_1Y_1D$ 坐标系,再绕 $Y_1$ 旋转 $\theta$ 角,成为 $XY_1Z_1$ 坐标系,最后绕 $X$ 轴旋转 $\phi$ 角,就得到钻具当前的坐标系 $XYZ$ 坐标系。

每次的旋转相当于一次坐标变换,可以用相应的变换矩阵来表示,它们有如下的标准形式:

$$R_{\Psi} = \begin{bmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad R_{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

于是任一空间矢量在钻具坐标系中的坐标与其在地理坐标系中的坐标满足以下关系

$$U_{XYZ} = R_{\phi}R_{\theta}R_{\Psi}U_{NED} \quad (2)$$

由于所作旋转变换都是正交变换,反过来,亦有

$$U_{NED} = R_{\Psi}^{\top}R_{\theta}^{\top}R_{\phi}^{\top}U_{XYZ} \quad (3)$$

假设利用沿钻具三个轴向 $XYZ$ 安装的三轴加速度计测量的重力场结果为 $[G_X \ G_Y \ G_Z]^{\top}$ ,而重力场在 $NED$ 坐标系可表示为 $[0 \ 0 \ G]^{\top}$ ,其中 $G$ 为当地重力加速度的大小,利用(2)式,有

$$[G_X \ G_Y \ G_Z]^{\top} = R_{\phi}R_{\theta}R_{\Psi}[0 \ 0 \ G]^{\top} \quad (4)$$

对(4)式求解得倾斜角 $\theta$ 的表达式

$$\tan\theta = \frac{-G_X}{(G_Y^2 + G_Z^2)^{1/2}} \quad (5)$$

亦可得工具面向角 $\phi$ 的表达式

$$\tan\phi = G_Y/G_Z \quad (6)$$

同样,利用沿钻具三个轴向 $XYZ$ 安装的三轴磁强计测量的地磁场为 $[B_X \ B_Y \ B_Z]^{\top}$ ,结合(3)式,有

$$[B_N \ B_E \ B_D]^{\top} = R_{\Psi}^{\top}R_{\theta}^{\top}R_{\phi}^{\top}[B_X \ B_Y \ B_Z]^{\top} \quad (7)$$

其中, $B_N$ 、 $B_E$ 和 $B_D$ 为地磁场在地理坐标系中的分量,由于在地理坐标系中地磁场没有东向分量,即

$$B_E = 0 \quad (8)$$

因此,联合(7)(8)式可得方位角 $\Psi$ 的表达式

$$\tan\Psi = \frac{-(B_Y\cos\phi - B_Z\sin\phi)}{\sin\theta(B_Y\sin\phi + B_Z\cos\phi) + B_X\cos\theta} \quad (9)$$

再结合(5)(6)两式,得到完全由三轴加速度计和三轴磁强计测量结果表示的方位角 $\Psi$ 的表达式

$$\tan\Psi = \frac{G(B_ZG_Y - B_YG_Z)}{B_X(G_Y^2 + G_Z^2) - G_X(B_YG_Y + B_ZG_Z)} \quad (10)$$

其中 $G = (G_X^2 + G_Y^2 + G_Z^2)^{1/2}$ ,为当地重力加速度的大小。因此,任何时候只要知道三轴加速度计和三轴磁强计的输,即可根据(5)(6)以及(10)式,确定钻具当前的姿态角度,这就是定向钻进姿态测量的基本原理<sup>[3-5]</sup>。

### 3 干扰磁场

由上述姿态测量原理可知,姿态角度中方位角 $\phi$ 的测量不仅依赖于加速度计的测量,还依赖于磁强计的测量,虽然(9)或(10)式从理论上给出方位角的确切表达式,但实际钻进中要做到精确测量地磁场的大小并不容易。任何影响地磁场接收的因素都会导致磁强计接收误差,特别是地下定向钻具为了增加强度,通常是由铁磁性材料构成,这些铁磁性材料由于其磁化特性相当于引入巨大的干扰磁场。

为了不影响磁强计对地磁场的测量,其周围不能有磁性材料的存在,故随钻测量装置不能安装在普通的钻具内,而是安装在一段非磁性钻铤的内部,如图1所示。尽管如此,实际的效果表明,由于在非磁

性钻铤的前后段仍有磁性钻铤和磁性钻杆的存在,往往造成附加的干扰磁场,这就使得磁强计接收的信号不完全是地磁场信号(10)式的前提条件得不到满足,用之解算会造成巨大的误差。最简单的解决方法是改变钻具结构,将安装随钻测量装置无磁钻铤周围的一系列钻铤和钻杆都换成无磁性的,但这样做的成本非常昂贵,特别是对应用于非开挖管线铺设领域的广大中小型钻机而言,成本几乎不可承受。

为了解决上述问题,早在上个世纪70年代,英国的M. K. Russell等人就针对垂直钻井中的方位角测量问题,提出了一种利用当地地磁场对所得方位角重新校正的办法来补偿掉干扰磁场的影响<sup>[6]</sup>。后来G. M. Shiells又对该方法作了改进,并给出获取当地地磁场的方法<sup>[7]</sup>。这种补偿仅仅基于以下的假设,即影响测量仪器地磁场接收的干扰磁场是沿钻孔的方向。这个假设无论是在理论上还是在实测中都是合理的,原因在于能造成干扰磁场的钻铤前后的钻铤或钻杆不仅是轴线对称的,而且相对钻孔轴线上的测量点较远,见图1,故可以认为所造成的干扰磁场是沿钻孔轴线方向分布。在此基础上,我们提出定向钻进中的方位校正方法。

### 4 方位校正

如前所述,设由于磁性钻杆等引入的沿钻孔轴线方向的干扰磁场矢量为 $B_E$ ,如图5所示。其在测量坐标系(XYZ坐标系)中可写为 $(0 \ 0 \ B_E)^T$ ,其中 $B_E$ 为干扰磁场矢量的大小。

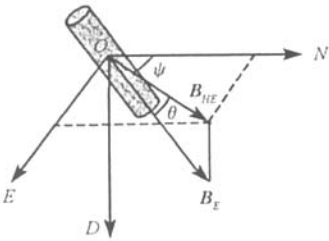


图5 钻杆干扰磁场  $B_E$

Fig.5 Additional error vector  $B_E$

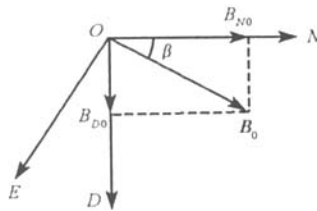
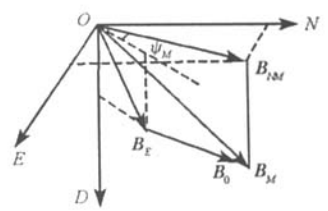


图6 地磁场矢量  $B_0$

Fig.6 Geomagnetic field vector  $B_0$

图7 实际测量磁场  $B_M$

Fig.7 Measured magnetic field vector  $B_M$



假设当地真正的地磁场矢量 $B_0$ 为

$$B_0 = B_{N0}U_N + B_{D0}U_D \tag{11}$$

其中 $B_{N0}$ 、 $B_{D0}$ 分别为地磁场矢量沿北向和垂向分量的大小, $U_N$ 、 $U_E$ 、 $U_D$ 分别为NED坐标系三个轴线的单位矢量。地磁场矢量 $B_0$ 如图6所示,图中 $\beta$ 为磁倾角。地磁场数据 $B_0$ 的获得,一方面可以根据当地的经纬度通过查表得到,更通常的做法是通过已有的磁强计在确保没有磁场干扰的情况下(如测量探头还没有放入钻头内部)事先测得<sup>[7]</sup>。

由于附加干扰磁场 $B_E$ 的存在,按照(9)或(10)式测量得出的方位角并不是真正的方位角 $\psi$ ,而是钻孔轴线在水平面的投影相对于总的磁场矢量 $B_M$ 在水平面投影的夹角 $\psi_M$ ,如图7所示。因此,要得到真正的方位角 $\psi$ ,必须利用已知的地磁场 $B_0$ 进行校正。

参照(2)式,将地磁场矢量 $B_0$ 变换到测量坐标系,有

$$\begin{bmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{bmatrix} = R_\phi R_\theta R_\psi \begin{bmatrix} B_{N0} & 0 & B_{D0} \end{bmatrix} \tag{12}$$

将(1)式中的各变换矩阵代入,并写成分式的形式,即

$$B_X = B_{N0} \cos \Psi \cos \theta - B_{D0} \sin \theta \tag{13}$$

$$B_Y = B_{N0} (\cos \Psi \sin \theta \sin \phi - \sin \Psi \cos \phi) + B_{D0} \cos \theta \sin \phi \tag{14}$$

$$B_Z = B_{N0} (\cos \Psi \sin \theta \cos \phi + \sin \Psi \sin \phi) + B_{D0} \cos \theta \cos \phi \tag{15}$$

而由三轴磁强计测量得到的数据实际上为

$$B_{XM} = B_X + B_E \tag{16}$$

$$B_{YM} = B_Y \tag{17}$$

$$B_{ZM} = B_Z \tag{18}$$

由于干扰磁场矢量 $B_E$ 的存在,而 $B_E$ 的大小未知,在这样的情况下,就不能再利用(16)式,只能利用已知的地磁场数据并通过(17)(18)式来确定。仔细研究(14)(15)式,根据它们的对称性,有以下关

系式成立

$$B_Y \sin \phi + B_Z \cos \phi = B_{N0} \cos \Psi \sin \theta + B_{D0} \cos \theta \tag{19}$$

$$B_Y \cos \phi - B_Z \sin \phi = -B_{N0} \sin \Psi \tag{20}$$

于是 根据上两式 ,可以得到校正后的方位角表达式

$$\frac{\sin \Psi}{\cos \Psi} = \frac{-(B_Y \cos \phi - B_Z \sin \phi) \sin \theta}{B_Y \sin \phi + B_Z \cos \phi - B_{D0} \cos \theta} \tag{21}$$

而倾角  $\theta$ 、面向角  $\phi$  则根据加速度计测量结果分别由(5)(6)式决定。这样 ,通过(21)式我们仅仅利用地磁场的垂向分量  $B_{D0}$  ,再加上与钻进轴线垂直的两个磁强计的数据  $B_{YM}$ 和 $B_{ZM}$  ,就可以得到真实的方位角  $\Psi$  ,从而实现了在干扰磁场存在的情况下对方位角的正确测量。

### 5 结果仿真

针对以上校正方法 ,通过一组数据仿真来验证其正确性。例如 ,随钻测量当地地磁场大小为  $B_0 = 4.0 \times 10^{-5} \text{T}$  ,磁倾角  $\beta = 12^\circ$  ,此时  $B_{N0} = B_0 \cos \beta = 3.9126 \times 10^{-5} \text{T}$  , $B_{D0} = B_0 \sin \beta = 0.8316 \times 10^{-5} \text{T}$  ,并取倾斜角  $\theta = -23^\circ$  ,面向角  $\phi = -68^\circ$  ,于是由以下磁强计三组测量数据所得的仿真结果如表 1 所示。

表 1 三组不同测量数据下的仿真结果

Tab.1 Simulating results of three groups of data

组数	$B_{XM} (\times 10^{-5} \text{T})$	$B_{YM} (\times 10^{-5} \text{T})$	$B_{ZM} (\times 10^{-5} \text{T})$	$B_E (\times 10^{-5} \text{T})$	未校正的方位角	校正后的方位角
					$\Psi_M (^\circ)$	$\Psi (^\circ)$
1	5.0014	-0.6372	-2.5662	2.0	28.87	42.0
2	7.0014	-0.6372	-2.5662	4.0	21.67	42.0
3	11.0014	-0.6372	-2.5662	8.0	14.30	42.0

以上三组数据的区别仅仅在于干扰磁场  $B_E$  的大小不同 ,干扰磁场分别为当地地磁场的 0.5、1 和 2 倍。由计算结果可知 ,不管干扰磁场如何变化 ,通过(21)式校正的方位角均为  $42^\circ$ 。若不加方位修正 ,直接按照公式(10)计算 ,则所得的测量方位角  $\Psi_M$  分别为  $28.87^\circ$ 、 $21.67^\circ$ 、 $14.30^\circ$  ,显见误差巨大 ,已无法接受 ,并且干扰磁场越强 ,造成的误差就越大。以上仿真结果也形象说明了实际姿态测量中利用地磁场数据进行方位校正的必要性。

### 6 结论

描述了用三轴加速度计与三轴磁强计测量地下钻头姿态——倾斜角、工具面向角和方位角的方法 ,给出了具体的测量系统和详细的姿态解算。特别针对随钻测量中存在由于铁磁性材料而造成干扰磁场的问题 ,提出了利用测量数据与当地地磁场结合进行方位角校正的方法 ,并给出了详细的理论分析和仿真结果。结果表明 ,该方法能够消除钻杆磁性材料对测量方位引入的误差 ,能够在不更换钻具即测量装置仍放在一小段无磁钻铤内部的情况下 ,获得准确的方位角测量 ,大大减少无磁钻铤的长度 ,节省钻进成本。

### 参考文献 :

[1] Cooper G A. Directional Drilling[J]. Scientific American , 1994 , 270 : 82 - 87.

[2] Allouche E N , Ariaratnam S T , Lueke J S. Horizontal Directional Drilling : Profile of an Emerging Industry [ J ] . ASCE Journal of Construction Engineering and Management , 2000 , 126 : 68 - 76.

[3] Xu T , Luo W S , Lu H B , et al. Design of Underground Sonde of a Directional Drilling Locator System [ J ] . Sensors and Actuators A physical , 2005 , 119 ( 2 ) : 427 - 432.

[4] 徐涛 ,罗武胜 ,吕海宝. 地下定向钻进姿态测量系统的设计 [ J ] . 中国惯性技术学报 2004 , 12 ( 2 ) : 5 - 8.

[5] 周丽弦 ,崔中兴. 无陀螺钻并测量技术研究 [ J ] . 中国惯性技术学报 2000 , 8 ( 2 ) : 54 - 57.

[6] Russell M K , Russell A W. Surveying of Boreholes [ P ] . United States Patent , US 4163324 , 1979.

[7] Shiells G M , Kerridge D J. Boreholes Surveying [ P ] . United States Patent , US 6021577 , 2000.



