

一种基于磁强计和倾角传感器的钻井测斜仪

谢川

(重庆工商大学计算机科学与信息工程学院 重庆 400067)

摘要: 描述了利用两轴倾角传感器与三轴磁强计测量钻井过程中的地下钻具顶角、磁方位角和工具面角的方法。针对目前已公开的磁方位角的解算数学模型存在缺陷的问题,结合空间坐标变换、空间直线方程和狗腿角的定义推导出磁方位角的数学模型,并给出了详细的软件和硬件实现方案及测斜仪工作流程。测试结果表明,该方案能获得精准的钻具姿态数据,顶角和工具面角数据非常稳定,磁方位角数据在 $\pm 1^\circ$ 范围内波动,且成本低廉、体积小,是钻井测斜的理想选择。

关键词: 测斜仪; 钻具姿态; 倾角; 磁强计; 活动转台

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Clinometer for artesian well based on magnetometer and inclination angle sensor

Xie Chuan

(College of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University,
Chongqing 400067, China)

Abstract: This paper proposes an approach of measuring the vertex angle, magnetic azimuth angle and tool face angle of underground drilling tool with dual-axis inclinometer and triple-axis magnetometer. Aiming at the problem that the openly published magnetic azimuth angle resolving mathematical model has some flaws, a mathematical model of magnetic azimuth angle is deduced based on combining space coordinates transformation, spatial straight line equation and the dog-leg angle definition. In addition, the software and hardware implementation scheme and the workflow of the clinometer are given in detail. Experiment results indicate that this scheme can obtain accurate values of drilling tool posture; the test data of vertex angle and tool face angle are very stable, and the test data of magnetic azimuth angle fluctuate within $\pm 1^\circ$. The proposed approach features low cost and small volume and is an ideal choice for drilling measurement.

Key words: clinometer; drilling tool posture; inclination angle; magnetometer; active turntable

1 引言

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方法,目前在石油钻井、地质勘探、工业建筑以及地下管线铺设等领域,获得迅速而广泛的应用^[1,4]。

定向钻进过程中,为了能有效地控制钻进轨迹,需要

获取钻具方位姿态信息。这些姿态信息包括方位角、顶角和工具面角等,由安装在钻具内的钻井测斜仪器来进行测量,并将测量结果数据传输到地面设备处理。方位角是钻具当前点的轴心线在水平面的投影与正北方向之间的夹角,它反映了钻具在水平面内的运动方向;顶角是钻具当前点的轴心线与水平面法线之间的夹角,它反映了钻具前进方向相对于水平面垂线的倾斜程度;工具面角是钻具的造斜方向与参考方向之间的夹角,它反映了

钻具下一步钻进的造斜方向,在油井领域通常也称作射孔方位角^[4,5]。钻井测斜仪器从20世纪20年代开始,经历了氢氟酸加浮磁针、机械照相、动调陀螺式测斜仪、光纤陀螺式测斜仪、磁通门测斜仪等^[6-9],所有这些仪器都存在着价格昂贵、测量精度低、温度漂移大、抗振性差、体积庞大等缺点。因此本文提出一种以磁强计与倾角传感器为主的精简式钻井测斜仪,具有价格低廉、测量精度高、温度漂移小、抗振性好、体积小等诸多优点。

2 姿态变换

建立如下的坐标体系:1)地理坐标系 $OXYZ$,其方向分别为东、北、天;2)钻具坐标系 $OX_1Y_1Z_1$,其方向分别为钻具横截面和钻具轴心线。钻井测斜仪安装在钻具内,其坐标系与钻具坐标系重合。

根据旋转变换中的欧拉定理,钻具在空间中的姿态可以用相对于地理坐标系的有限次转动来表示。如图1所示,假设起始的地理坐标系与钻具的坐标系重合, $OXYZ$ 坐标绕 Z 轴转动 ψ 角度得到 $OX'Y'Z'$ 坐标系,再绕 X' 轴转动 θ 角度得到 $OX''Y''Z''$ 坐标系,最后绕 Y'' 轴转动 ϕ 角度得到 $OX_1Y_1Z_1$ 坐标系。每次绕坐标轴转动相当于一次坐标变换,其变换矩阵如式(1)所示,任意空间矢量从 $OXYZ$ 坐标系旋转到 $OX_1Y_1Z_1$ 坐标系的坐标变换矩阵满足式(2)^[2,4,6,7,9]。

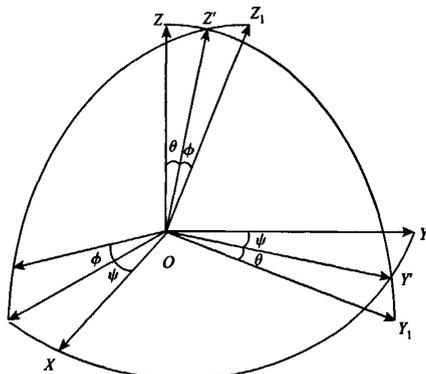


图1 欧拉旋转变换

Fig.1 Euler coordinate system transformation

$$R_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_\theta =$$

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

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = R_\psi R_\theta R_\phi \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

地球的磁场矢量也满足式(2)的变换关系。再结合重力加速度的关系,可计算出绕 Z 轴的旋转的 ψ 角度满足式(3)^[2,4,6,7,9,11],其中的 H_x, H_y, H_z 分别表示钻具坐标系 X_1, Y_1 和 Z_1 方向的磁场强度。

$$\tan \psi = \frac{H_y \cos \theta + H_z \sin \theta}{H_x \cos \phi + H_y \sin \phi \sin \theta - H_z \sin \phi \cos \theta} \quad (3)$$

3 姿态解算

坐标变换后,使用双轴的倾角传感器能够测量 X_1 坐标轴和 Y_1 坐标轴与水平面之间的夹角,使用磁强计能够测量地球磁场在 X_1, Y_1 和 Z_1 三个坐标轴方向的磁分量,此5个参数可解算出钻具的姿态角,即钻具的顶角 α 、磁方位角 β 和工具面角 γ ,并使用MEMS技术实现^[12]。

3.1 顶角解算

ADI公司新近推出的倾角传感器ADIS16209芯片能测量 X 轴和 Y 轴相对于水平面的倾斜角度,外观如图2所示。芯片 X 轴向与水平面的夹角为 α_x ,绕 Y 轴顺时针旋转时 α_x 为正;芯片 Y 轴向与水平面的夹角为 α_y ,绕 X 轴逆时针旋转时 α_y 为正;钻具的顶角即为钻具钻杆与水平面法线的夹角。

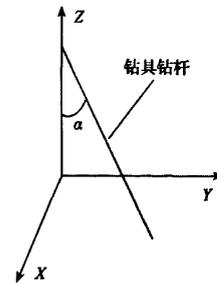
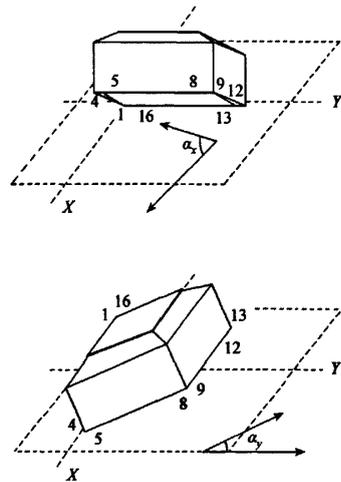


图2 顶角

Fig.2 The vertex angle

当倾角传感器芯片垂直于钻杆安装时,顶角 α 满足式(4)^[13],即利用双轴的倾角传感器芯片 ADIS16209 可获得顶角数据。

$$\alpha = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} \quad (4)$$

3.2 磁方位角解算

把钻具的坐标系与 $OX'Y_1Z'$ 坐标系重合时的姿态称作姿态 A,姿态 A 的顶角和磁方位角分别为 α_A 和 ψ_A 。因 OX' 轴在水平面上,所以,顶角就是 OY_1 轴与水平面的夹角,即 $\alpha_A = \alpha_y = \theta$, ψ_A 即就是坐标旋转时绕 OZ 轴旋转的 ψ ,即 $\psi_A = \psi$ 。钻具的坐标系与 $OX_1Y_1Z_1$ 坐标系重合时的姿态称作姿态 B,姿态 B 的顶角和磁方位角分别为 α_B 和 ψ_B , α_B 即是所要计算的顶角 α , ψ_B 即是所要计算的任意姿态的方位角 β 。两种姿态轴心线的夹角被称作“狗腿角”,计为 φ ,狗腿角 φ 满足式(5)^[5]:

$$\cos \varphi = \cos \alpha_x \cos \alpha + \sin \alpha_x \sin \alpha \cos (\psi - \beta) \quad (5)$$

从狗腿角的定义可知, φ 就是坐标变换时 OZ' 轴与 OZ_1 轴之间的夹角,等于第 3 次变换时绕 OY_1 轴旋转的 ϕ 角度,即式(6):

$$\varphi = \phi \quad (6)$$

根据空间解析几何知识,可以确定图 1 中的 OY_1 轴、 OX' 轴和 OX_1 轴在坐标系 $OXYZ$ 的直线方程分别为式(7)、(8)和(9)。其中, $(m, n, \sqrt{1 - m^2 - n^2})$ 为直线 OX_1 的方向向量。

$$x/(\cos \theta \sin \psi) = y/(\cos \theta \cos \psi) = z/(-\sin \theta) \quad (7)$$

$$x/\cos \psi = y/(-\sin \psi) = z/0 \quad (8)$$

$$x/m = y/n = z/\sqrt{1 - m^2 - n^2} \quad (9)$$

OY_1 轴与 OX_1 轴垂直,且 $\alpha_x = \theta$,所以式(10)成立:

$$m \cos \alpha_x \sin \psi + n \cos \alpha_y \cos \psi - \sqrt{1 - m^2 - n^2} \sin \alpha_x = 0 \quad (10)$$

OX_1 轴与 OXY 平面的夹角即为 OX_1 轴基于水平面的倾角 α_x ,所以式(11)成立:

$$\sin \alpha_x = \sqrt{1 - m^2 - n^2} \quad (11)$$

OX' 轴与 OX_1 轴之间的夹角即为坐标旋转时绕 OY_1 轴旋转的 ϕ 角度,且 $\varphi = \phi$,所以式(12)成立:

$$\cos \varphi = m \cos \psi - n \sin \psi \quad (12)$$

综合式(10)、(11)和(12),消除公式中的 m 和 n ,可得到式(13):

$$\sin \varphi = \sin \alpha_x / \cos \alpha_x \quad (13)$$

结合式(3)、(5)和(13),利用 3 个方程求解 3 个变量 β 、 φ 和 ϕ ,可得出磁方位角 β 的计算公式如下:

$$\beta = \arctan\left(\frac{H_y \cos \alpha_x + H_z \sin \alpha_x}{H_x \cos \alpha_x + H_y \sin \alpha_x \sin \alpha_y - H_z \sin \alpha_x \cos \alpha_y}\right) - \arctan\left(\frac{\alpha_y}{\alpha_x}\right) \quad (14)$$

3.3 工具面角方位解算

工具面角是定向钻井中定位钻具行进方向的一个量,是沿井眼向下看时,由重力矢量所确定的高边和 X 轴(钻具的 OX_1 轴)之间的夹角^[3,6],因此,工具面角可由式(15)求得:

$$\gamma = \arctan(\alpha_x / \alpha_y) \quad (15)$$

当顶角很小时, α_x 和 α_y 的值也很小,相对误差较大,工具面角不能准确测出,宜用磁工具面角来代替,具体计算如式(16)所示:

$$\gamma = \arctan(H_x / H_y) \quad (16)$$

4 测斜仪工作流程

4.1 组成框图

霍尼韦尔的磁传感器位于行业内灵敏度最高和可靠性最好的低强度磁场传感器之列。目前,霍尼韦尔公司生产的 HMC5843^[14] 芯片主要应用于电子罗盘,这里把它应用到磁测斜仪,HMC5843 提供标准的 IIC 接口。ADI 公司 2008 年发布了一款高集成度、高精度的双轴倾斜计芯片 ADIS16209,提供小于 0.1° 线性倾斜误差的全补偿直接角度输出,提供 SPI 接口。整个硬件框架如图 3 所示。

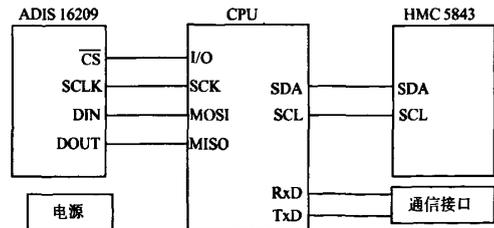


图 3 磁测斜仪硬件框架

Fig. 3 The hardware framework of the clinometer

HMC5843 和 ADIS16209 的外围电路非常简单,器件手册上都有相应的推荐电路;电源模块为整个硬件系统提供 3.3 V 电源;本设计中使用 UART 通信接口向上位机送出解算出的钻具姿态数据。

4.2 工作流程

4.2.1 测斜仪初始化

HMC5843 芯片提供标准的 IIC 接口,对芯片的配置以及结果数据读取很方便,但片内无误差校正系统,因器件的离散性,必须对读取的磁场强度结果数据进行修正,以达到 3 个坐标分量上的数据归一化。修正过程如图 4 所示,步骤如下:

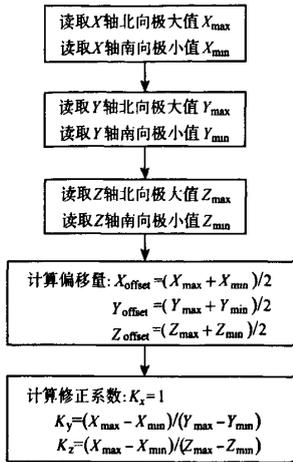


图4 磁场数据修正参数获取流程

Fig. 4 The process of obtaining magnetometer correction parameters

1) 将磁测斜仪固定到专用的活动转台上,转动活动转台,使 HMC5843 芯片处于水平状态,且芯片的 X 轴向与磁北方向重合,读取芯片在 X 轴向上测到的磁场度数据,实为 X 轴向在水平面内测到的最大值,记为 X_{max} ;再转动转台,使芯片的 X 轴向与磁北刚好反向,读取在 X 轴向上测到的磁场强度,实为 X 轴向在水平面内测到的最小值,记为 X_{min} 。

2) 用同样的方法测量出 Y_{max} 和 Y_{min} 。

3) 转动转台,使测斜仪平行与水平面,即 HMC5843 的 Z 轴处于水平状态,且使 Z 轴方向与磁北方向重合,测量出 Z_{max} ,再转动转台,使 Z 轴方向与磁北反向,测量出 Z_{min} 。

4) 理论上,HMC5843 在 X、Y、Z 上测量出的极大值和极小值大小相等,方向相反,但因器件工艺等原因使得 3 个轴的中心点都有不在零位的可能,分别利用 3 个轴测到的极值计算出 3 个轴向数据的中兴点偏移量。

5) 芯片的加工工艺还可能造成 3 个轴向上的单位刻度不相等,需要进行归一化处理,即计算出坐标轴之间的比例关系。

ADIS16209 片内集成有误差校正系统,而且提供标准的 SPI 接口,对芯片的配置以及结果数据读取软件都较为简单,只要满足芯片要求的时序即可,且测试结果不需要用软件再次修正。

因此,测斜仪的初始化除处理器和传感器芯片的初始配置外,还包括 HMC5843 的参数修正过程。

4.2.2 获取顶角数据

通过 SPI 接口分别读取 X 轴向和 X 轴向的倾角 α_x 和 α_y ;

利用式(4)和读取到的倾角计算出顶角 α 。

4.2.3 获取磁方位角数据

通过 IIC 接口分别读取 X、Y 和 Z 轴上的磁场分量 M_x 、 M_y 和 M_z ;

利用初始化过程得到的磁场修正参数对磁场数据进行校正,确保每个轴的量纲统一,中心点为 0;

利用式(14)计算磁方位角。

4.2.4 获取工具面角数据

首先判断获取的顶角数据是不是很小(本设计中以 2 度为门限值)。如果顶角很小,则表明倾角的相对误差较大,用 X 轴和 Y 轴上的磁场强度来计算磁工具面角。如果顶角不小,则以 X 轴和 Y 轴上的倾角来计算重力工具面角。

整个测斜仪的软件流程如图 5 所示。

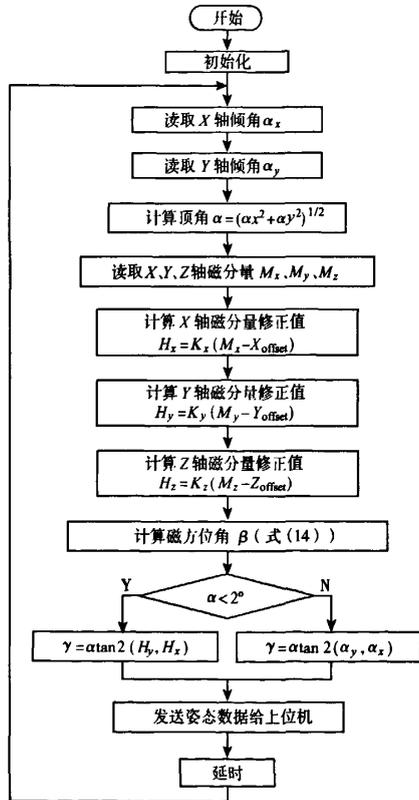


图5 测斜仪软件流程

Fig. 5 The software flow chart of the clinometer

5 测试结果

利用活动转台,对所研制的磁测斜仪进行测试,测试情况如图 6 所示。活动转台要水平校准,磁测斜仪要保证与转台夹具同心。为 2 个传感芯片 HMC5843 和 ADIS16209 单独设计 PCB 小板,并垂直于钻具轴心线,且 HMC5843 的 X 轴和 Y 轴与 ADIS16209 的 X 轴和 Y 轴分别平行。主板负责对数据进行采集。

- urement based on the gravitational field and geomagnetic field[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4):400-403.
- [10] 蒋庆仙,马小辉,陈晓璧. 光纤陀螺寻北仪的二位置寻北方案[J]. 中国惯性技术学报,2006,14(3):1-5.
JIANG Q X, MA X H, CHEN X B. North determining scheme by two-position for a FOG north seeker[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(3):1-5.
- [11] 徐涛,刘翠海,黄青斌. 水平定向钻进随钻测量系统研究与设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9):1976-1980.
XU T, LIU C H, HUANG Q B. Research and design of a measurement-while-drilling system for horizontal directional drilling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(9):1976-1980.
- [12] 朱荣,周兆英. 基于MEMS的姿态测量系统[J]. 测控技术, 2002, 21(10):6-8.
ZHU R, ZHOU ZH Y. A MEMS-based attitude reference system[J]. Measurement & Control Technology, 2002, 21(10):6-8.
- [13] 吴晓鹏,赵祚喜,胡炼. ADIS16209 IMU在倾角测量中的应用[J]. 现代电子技术, 2010, 33(13):110-113.
WU X P, ZHAO Z X, HU L. Application of ADIS16209 IMU in inclination measurement[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(13):110-113.
- [14] 李文新,王广龙,陈建辉. 基于WinCE的数字罗盘集成电路I²C驱动程序开发[J]. 电子测量技术, 2009, 32(10):73-76.
LI W X, WANG G L, CHEN J H. Development of I²C driver for digital compass IC based on WinCE[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(10):73-76.
- [15] 赵建辉,孔琪颖,李帆. 捷联惯性连续测斜算法仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11):1286-1289.
ZHAO J H, KONG Q Y, LI F. Simulation of a strapdown inertial continuous wellbore survey algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11):1286-1289.

作者简介



谢川,分别于1993年和1996年在四川工业学院获得学士和硕士学位,现为重庆工商大学计算机科学与信息工程学院讲师,主要研究方向为计算机应用、通信技术、仪表科学等。

E-mail: chuanxie@yeah.net

Xie Chuan received B. Sc. and M. Sc. both from Sichuan Institute of Technology in 1993 and 1996, respectively. He is a lecturer in College of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University. His research interests are computer application, communication technique, instrumentation science.