

# 基于磁阻与倾角传感器的钻孔测斜仪

董韶鹏 袁梅

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院 北京 100083)

**摘要** 为满足煤田测井行业对钻孔测斜仪提出的高精度、小体积、低成本的要求,采用高精度、高集成度的磁阻传感器和倾角传感器设计实现了一款新型钻孔测斜仪。在地理坐标系与探管坐标系上对需要测量的顶角和方位角进行了定义,推导了顶角和方位角的计算公式,并在单片机中用程序实现了顶角和方位角的实时解算。该钻孔测斜仪已成功地应用于煤田测井行业中,可以满足工程需求。

**关键词** 测斜仪 磁阻传感器 倾角传感器 顶角 方位角

中图分类号 TP23 文献标识码 A 国家标准学科分类代码 510.80

## Inclinometer Based on Magnetoresistive and Tilt Sensors

Dong Shaopeng Yuan Mei

(School of Automation Science and Electric Engineering, Beihang University, Beijing, 100083, China)

**Abstract** Currently, a high precision, small volume, low cost inclinometer is needed in the coal-bed logging. A new type of inclinometer is designed based on the magnetoresistive and tilt sensors. The vertex angle and the azimuth angle is defined in the geographical coordinates and the exploring probe coordinates, the computing formula for vertex angle and azimuth angle is deduced, and the vertex angle and azimuth angle is calculated real-time by the MCU programme. This inclinometer has been used successfully in the coal-bed logging, and it can satisfy the engineering requirements.

**Keywords** inclinometer magnetoresistive sensor tilt sensor vertex angle azimuth angle

### 1 引言

钻孔测斜仪是一种用来测量钻孔倾斜度和倾向度的仪器,一般由钻孔中探管部分和地面装置组成,可广泛应用于煤田、工程、水文、地质等测井领域<sup>[1]</sup>。

钻孔的倾斜度用顶角表示,倾向度用方位角表示。钻孔测斜仪的测量原理很多,其中陀螺式测斜仪使用陀螺仪来确定方位角,使用重力加速度计来确定顶角。这种测斜仪不受周围磁环境的影响,测量精度高,但陀螺仪体积大,产品成本高<sup>[2]</sup>。基于地球磁场和重力场的测斜仪通常使用磁性传感器确定磁方位角,使用重力加速度计来确定顶角,目前通常使用的磁性传感器是磁通门。磁通门式测斜仪仅可用于无磁环境中,成本相对较低,但磁通门处理电路复杂,体积大<sup>[3]</sup>。

磁阻式传感器是基于电阻阻值随外部磁场改

变原理的磁传感器,具有体积小、灵敏度高、成本低等特点<sup>[4]</sup>。倾角传感器利用 MEMS 技术开发而成,体积小,且抗跌落性和抗振性均优于通用的重力加速度计<sup>[5]</sup>。用磁阻传感器代替磁通门测量磁方位角,用倾角传感器代替重力加速度计测量倾角,不仅使测斜仪的体积大大减小,而且使测斜仪电路的复杂程度降低,同时还降低了产品的成本。

本文采用三轴磁阻传感器,两轴倾角传感器,自带 8 路 24 位 A/D,集成 8052 内核的单片机,设计完成了一种新的捷联式测斜仪。不仅提高了测斜仪的测量精度,缩小了体积,减少了成本,而且提高了生产仪器的效率。

### 2 基于地球磁场和重力场的测斜仪原理

#### 2.1 坐标系定义

1) 地理坐标系 (ONWD)

原点位于测斜仪探管质心,  $\overline{ON}$ 、 $\overline{OW}$ 、 $\overline{OD}$

轴成右手坐标系, 分别指向磁北、磁西、天方向, 如图1所示。

2) 探管坐标系 (OXYZ)

原点位于测斜仪探管质心,  $\overline{OZ}$  轴为探管的轴向, 指向探管上端,  $\overline{OX}$  和  $\overline{OY}$  轴在径向平面内彼此正交, 三个轴成右手坐标系, 如图2所示。

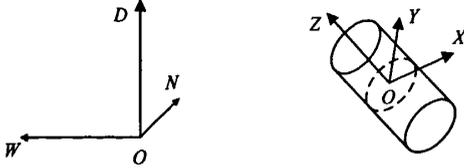


图1 地理坐标系

图2 测斜仪探管坐标系

2.2 顶角及方位角定义

将地理坐标系和探管坐标系组合起来如图3所示, 其中探管坐标系轴  $\overline{OZ}$  与地理坐标系轴  $\overline{OD}$  之间的锐夹角  $\alpha$  即为顶角; 从磁北  $\overline{ON}$  顺时针旋转到探管轴向  $\overline{OZ}$  在水平面的投影  $\overline{O'Z}$  时所形成的夹角  $\beta$  即为方位角。

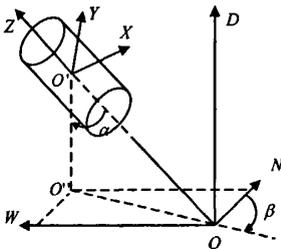


图3 测斜仪测量原理图

2.3 顶角及方位角的计算原理

把三个重力加速度计和三个磁力计安装到探管的三个坐标轴上, 实时测量到三个轴向的静态重力加速度分量和地磁场强度分量, 将探管坐标系旋转到地理坐标系下, 通过数值计算, 误差校正, 就能准确计算出探管的顶角和方位角<sup>[6]</sup>。

3 钻孔测斜仪的实现

3.1 总体方案设计

选用内部集成两个正交加速度计的倾角传感器来感受地球重力场信息; 选用单轴和双轴组合而成的三轴正交磁阻传感器来感受地磁场信息; 选用内部集成 24 位模数转换的单片机来实时解算顶角

和方位角信息, 并将角度信息实时上传至地面仪器或存储在数据存储器中。

测斜仪的实施方案原理框图如下图4所示:

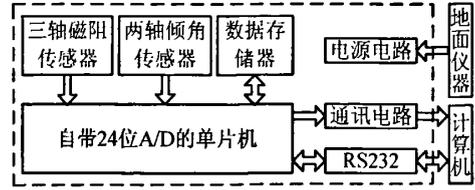


图4 测斜仪实施方案原理框图

图4中的虚线框内是测斜仪探管中包含的电路功能模块, 由它们共同完成测斜仪的测量功能。两种传感器模块完成地球重力场和地磁场信号的测量; 单片机完成传感器信号的模数转换及角度解算; 单片机可直接将角度数据通过通讯电路上传到地面仪器, 也可将角度数据存储在数据存储器中, 待测井完成后将数据存储器中的数据通过 RS232 接口上传到地面计算机中。

地面仪器用于给探管提供工作电源及处理探管上传的角度信息, 地面计算机用于完成井下探管程序更新、标定探管以及接收探管的测量数据。

3.2 角度计算公式推导

测斜仪探管坐标系 OXYZ 可以看作是由地理坐标系 ONWD 经过三次坐标旋转后形成, 具体旋转过程如图5所示。第一次旋转是将地理坐标系 ONWD 绕轴  $\overline{OD}$  顺时针旋转一个方位角  $\beta$  成为坐标系  $OX_1Y_1D$ , 第二次旋转是将坐标系  $OX_1Y_1D$  绕轴  $\overline{OY_1}$  顺时针旋转一个顶角  $\alpha$  成为坐标系  $OX_2Y_1Z$ , 第三次旋转是将坐标系  $OX_2Y_1Z$  绕轴  $\overline{OZ}$  顺时针旋转一个工具面角  $\gamma$  成为探管坐标系 OXYZ。

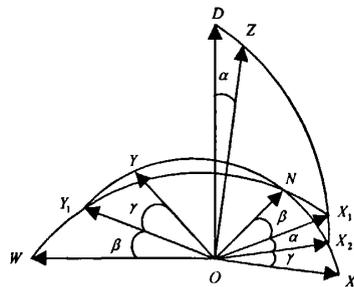


图5 坐标旋转变换示意图

每次旋转相当于一次坐标变换, 相应的变换矩

阵如下:

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

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_\gamma = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

于是探管坐标系与地理坐标系之间满足以下关系:

$$U_{XYZ} = R_\gamma R_\alpha R_\beta U_{NWD} \quad (4)$$

当探管处于地理坐标系下时,重力场和地磁场信息分别为:

$$\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = R_\gamma R_\alpha R_\beta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = R_\gamma R_\alpha R_\beta \begin{bmatrix} H_{x0} \\ 0 \\ H_{z0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $[g_x \ g_y \ g_z]^T$  为探管三个轴向上的重力加速度分量,  $[0 \ 0 \ 1]^T$  为探管在地理坐标系下三个轴向上的重力加速度分量,“1”代表一个“g”的重力加速度。 $[H_x \ H_y \ H_z]^T$  为探管三个轴向上的地磁场分量,  $[H_{x0} \ 0 \ H_{z0}]^T$  为探管在地理坐标系下三个轴向上的地磁场分量。

当在探管轴  $\overline{OX}$  和  $\overline{OY}$  上安装加速度计,在轴  $\overline{OX}$ 、 $\overline{OY}$  和  $\overline{OZ}$  上安装磁力计时,  $g_x$ 、 $g_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$  和  $H_z$  能通过加速度计和磁力计直接获得,  $g_z$  可用  $\sqrt{g^2 - (g_x^2 + g_y^2)}$  来代替,这时由式 (5) 和式 (6) 可推导出顶角和方位角的计算公式如下:

$$\alpha = \arcsin \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (7)$$

$$\beta = \arctan \frac{H_y g_x - H_x g_y}{H_z (g_x^2 + g_y^2) - M} \quad (8)$$

其中式 (8) 中

$$M = (H_x g_x + H_y g_y) \sqrt{1 - (g_x^2 + g_y^2)}$$

### 3.3 顶角及方位角的实时解算

角度解算模块就是用程序代码实现顶角计算公式 (7) 和方位角计算公式 (8)。

顶角计算公式采用三个子函数实现,前两个子函数分别实现式 (7) 中变量 X 轴加速度  $g_x$  和 Y 轴加速度  $g_y$  的计算,第三个子函数将  $g_x$  和  $g_y$  带入式 (7) 实现顶角的计算。 $g_x$  和  $g_y$  是两轴倾角传感器输出值经过标定系数补偿后的数值。

方位角计算公式采用两个子函数实现,第一个子函数实现式 (8) 中分子 (即地磁场水平分量  $M_y$ ) 和分母 (即地磁场水平分量  $M_x$ ) 的计算,第二个子函数根据  $M_y$  和  $M_x$  数值获得方位角数值。在计算  $M_x$  和  $M_y$  时首先要获得空间三个轴向的地磁场分量,计算过程同样是依据三轴磁阻传感器的输出值及对应传感器的标定系数。在计算方位角时,由于采用的是反正切函数,其值域为  $-90^\circ$  到  $90^\circ$ ,而要求计算得到的方位角需从  $0^\circ$  变化到  $360^\circ$ ,这里采用挂限判别法进行处理可得到唯一的方位角。 $M_x$ 、 $M_y$  与方位角的关系如图 6 所示,再结合 C51 里  $a \tan 2(y,x)$  的值域范围,可得判别关系如下:

- 当  $M_x = 0$ , 且  $M_y = 0$  时,  $\beta = 0^\circ$ ;
- 当  $M_x = 0$ , 且  $M_y < 0$  时,  $\beta = 90^\circ$ ;
- 当  $M_x = 0$ , 且  $M_y > 0$  时,  $\beta = 270^\circ$ ;
- 当  $M_x > 0$ , 且  $M_y = 0$  时,  $\beta = 0^\circ$ ;
- 当  $M_x < 0$ , 且  $M_y = 0$  时,  $\beta = 180^\circ$ ;
- 当  $M_y < 0$ , 且  $M_x \neq 0$  时,

$$\beta = -180^\circ / \pi * \arctan \frac{M_y}{M_x};$$

当  $M_y > 0$ , 且  $M_x \neq 0$  时,

$$\beta = 360^\circ - 180^\circ / \pi * \arctan \frac{M_y}{M_x}.$$

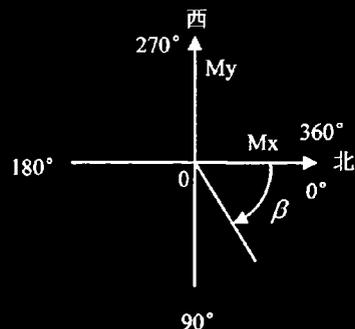


图 6 方位角数值示意图

4 实验结果

图7是研制的测斜仪探管样机实物照片,其机械部分由上接头、连接支架、上密封头、电路板架、下密封头、加长件、外管等部件组成。



图7 测斜仪探管样机

表1 标定台顶角测量数据

理论值 /°	正行程 /°	反行程 /°	正行程 /°	反行程 /°	正行程 /°	反行程 /°	平均值 /°	精度 /%
0.00	0.10	0.09	0.07	0.03	0.02	0.06	0.06	
10.00	10.10	9.99	10.08	9.96	10.06	9.91	10.02	
20.00	20.05	19.90	20.07	19.98	20.05	19.92	20.00	0.24
30.00	30.09	29.97	30.05	29.96	30.08	29.93	30.01	
40.00	40.01	39.98	40.03	40.00	40.05	40.02	40.02	

表1为样机经过标定及数据处理后在标定台上顶角的测量数据,共进行三次实验,各次都包括正行程和反行程。实际测井要求顶角精度为0.2°,用极限点法表示即为0.5%,可见样机可以满足要求。

表2为样机经过标定及数据处理后在标定台上方位角的测量数据,共进行三次实验,各次都包括正行程和反行程。实际测井要求方位角精度为2.5°,用极限点法表示即为0.69%,可见样机可以满足要求。

表2 标定台方位角测量数据

理论值 /°	正行程 /°	反行程 /°	正行程 /°	反行程 /°	正行程 /°	反行程 /°	平均值 /°	精度 /%
0.0	0.4	1.0	0.9	0.3	0.5	0.1	0.53	
90.0	89.3	88.6	91.0	88.4	92.0	90.8	90.02	0.5
180.0	180.0	179.2	178.3	178.9	179.3	181.4	179.52	
270.0	272.0	270.1	270.6	271.0	271.3	271.9	271.15	

5 结论

本文提出了用三轴磁阻传感器与两轴倾角传感器测量钻孔顶角和方位角的方案,详细推导了角度计算公式,并用单片机程序实现了顶角和方位角的实时测量。这种新的设计方案减少了硬件电路,缩小了探管体积,降低了产品成本。实验数据则验证了所研制的测斜仪顶角精度优于0.2°,方位角精度优于2.5°,可以完全满足煤田测井领域的实际需求。

如果采用分段线性化的标定方法、利用微控制器自带的温度传感器进行有效的温度补偿、采用有效的方位校正方法消除各种磁干扰,可以进一步提高钻孔测斜仪的测量精度,从而扩展它的应用范围。

参考文献

- [1] 桂德洙. 浅谈钻井测斜仪[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(5): 45-49.
- [2] 吕妍红, 万民, 崔中兴. 石油钻井倾斜及方位测量的研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23 (2): 186-188.
- [3] 谢子殿, 朱秀. 基于磁通门与重力加速传感器的钻井测斜仪[J]. 传感器技术, 2004, 23 (7): 30-33.
- [4] Honeywell. 3-Axis Magnetic Sensor[EB]. Sensor Products, [www.ssec.honeywell.com](http://www.ssec.honeywell.com).
- [5] 薛琴. 双轴倾角传感器在钻孔测斜仪中测量算法的校正[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35 (6): 70-73.
- [6] 郭爱煌, 傅君梅. 基于地球重力场和磁场测量的测斜技术[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22 (4): 400-403.