

基于光纤陀螺和加速度计的测斜仪

吴川^{1,3}, 乌效鸣^{1,3}, 文国军², 韩磊², 维克多·费多罗维奇·契霍特金^{1,3}

(1. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;
3. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要:岩芯钻探过程中, 钻孔延伸的顶角、方位角和孔底的泥浆压力是井眼的重要参数, 而现有的测斜仪无论是在使用环境或使用精度方面均达不到深孔取芯钻探的使用要求。基于此, 本文设计了一种基于光纤陀螺和加速度计的测斜仪, 仪器应用于绳索取芯钻进, 在仪器加工完成后进行了大量的室内及现场试验, 试验结果表明仪器满足实际深孔取芯钻探工程的使用要求。

关键词:测斜仪; 光纤陀螺; 加速度计; 绳索取芯

中图分类号:TE244 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2015)02-0068-05

Gradiograph based on fiber optic gyroscope and accelerometer

Wu Chuan^{1,3}, Wu Xiaoming^{1,3}, Wen Guojun², Han Lei², Чихоткин Виктор Федорович^{1,3}

(1. Faculty of Engine, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Faculty of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. Engineering Research Center of Ministry of Education about Rock Drill and Protection, Wuhan 430074, China)

Abstract: Apex Angle, azimuth angle, and the mud pressure in bottom are critical parameters while drilling. But the current gradiograph can not meet the operating requirements of deep hole drilling not only in operating environment but also in precision. So, a gradiograph was designed which based on fiber optic gyroscope and accelerometer, the gradiograph is used in rope core drilling. When completed, a numbers of tests were operated, and the experimental result proved that the instrument satisfy the demands of practical engineering.

Keywords: gradiograph; fiber-optic gyroscope; accelerometer; wire-line coring

岩芯钻探过程中, 钻孔延伸的顶角、方位角和孔底的泥浆压力是井眼的重要参数^[1-3], 而现有的测斜仪无论是在使用条件(使用深度, 使用温度, 有无磁性干扰等)和使用精度方面均达不到深孔取芯钻探的使用要求, 尤其是在方位角测量方面, 现有的测斜仪测量方位角采用的是电磁计, 电磁计只能应用于无磁的环境中, 否则将会使测量结果错误^[4-6], 而陀螺则是一种可测量出物体转动角速度的惯性元件, 不受电磁干扰, 将陀螺测量到的角速度对时间积分便可得到物体转动的角度^[7-10], 基于此, 本文设计了一种基于光纤陀螺和加速度计的测斜仪, 仪器适用于绳索取芯钻进, 可采集钻孔钻进过程中的方位角, 顶角和泥浆压力。仪器与绳索取芯钻具的连接方式如图 1 所示, 测斜仪端部通过螺纹与绳索取芯钻具的捞矛头相连接, 当打捞器上的打捞钩与捞矛头连接后, 通过钢丝绳便可将测斜仪下放到钻孔内进行数据的采集及存储, 数据采集是在仪器下放过程中进行的, 当仪器下放到井底后便可将整个钻孔的数据采集完毕, 随后通过钢丝绳绞车将仪器提出钻孔。仪器提出钻孔后, 拧开仪器端盖, 将存储数据的存储芯片拿出仪器, 通过上

位机软件便可将存储芯片内的数据进行读取、处理及显示.

1 相关理论研究

要计算出空间任意一个物体的姿态(包括方位角、顶角、俯仰角、滚动角、工具面角、速度、加速度等参数),常用的是基于三轴陀螺和三轴加速度计所组成的捷联惯导系统,利用捷联惯导公式便可计算出该物体的任意姿态,但三轴陀螺的体积过于庞大,且岩芯钻探一般都是小口径,因此三轴陀螺不适用于岩芯钻探测斜仪中.而利用单轴陀螺仪和三轴加速度计虽不能推算出空间物体的任意姿态,但可以推算出物体的方位角和顶角,且单轴陀螺体积符合岩芯钻探孔径的要求,因此本测斜仪采用的是由单轴陀螺和三轴加速度计组成的测量系统.传感器在测斜仪内的安装位置示意图如图2所示.当利用单轴陀螺进行测量时,只能测量一个方向的角度速度,考虑到实际钻孔测量需要,将陀螺安装于垂直于仪器轴线(z 轴)方向,此时陀螺的输出数据经过计算后便可得到钻孔的方位角,而三轴加速度计则分别测量仪器直角坐标系 x, y, z 轴方向的加速度.

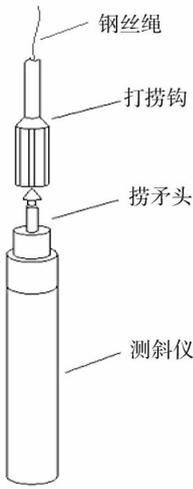


图1 仪器与钻具连接方式

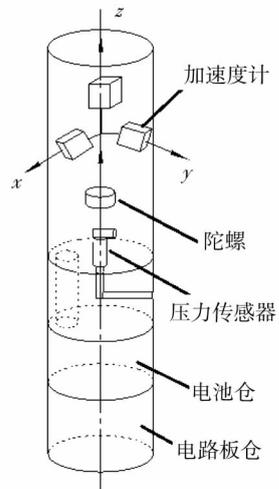
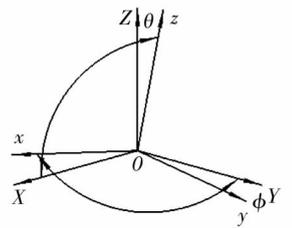


图2 仪器结构示意图

为了方便了解方位角及顶角的计算,选取北、西、天地理坐标系 $OXYZ$ 和仪器坐标系 $oxyz$ 进行说明,2个坐标系存在如图3所示的关系.

假设2个坐标系原来是重合的,则将 oz 轴绕 oy 轴旋转顶角 θ ,然后再将仪器坐标系绕 oz 轴旋转方位角 φ 后便得到了现在的仪器坐标系,2个坐标系之间由转角所形成的方向余弦矩阵为 $C^{[11-13]}$,则

$$C = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\theta & -\sin\varphi & \cos\varphi\sin\theta \\ \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi & \sin\varphi\sin\theta \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} .$$



(1) 图3 仪器坐标系与地理坐标系之间转换关系

此时,3个加速度计所测量的重力分量分别为 A_x, A_y, A_z , 其与重力加速度 g 之间的关系式用矩阵表示如下

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} . \tag{2}$$

联立式(1)和式(2)可得方位角 φ 和顶角 θ 的解析式,即

$$\varphi = \arctan\left(\frac{A_y}{A_x}\right). \tag{3}$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}\right). \tag{4}$$

此外,在设计过程中还应考虑温度变化对陀螺输出数据的影响,由于陀螺存在温漂,因此还要对陀螺的温漂数据进行补偿处理,陀螺的温度补偿方法根据所选用的陀螺型号及使用温度梯度的不同而变化,因此此处不再介绍。

2 电路设计

仪器电路主要实现传感器的信号转换,信号放大,数据的采集及存储等功能,设计采用的电路硬件原理框图如图4所示。电路要采集3个加速度传感器、压力传感器,陀螺共5路电信号,这些信号经过必要的前置处理,获得标准的输出信号以供A/D转换,最后进入微处理器(MCU)进行数据的处理及存储^[14]。

电路中前置电路包括一些芯片的驱动电路以及放大电路等,其中信号放大电路采用AD623芯片搭建,根据陀螺输出需要,放大倍数设定为6倍,AD转换电路采用ADS8365芯片搭建,该芯片为8路单端输入或4路差分输入的16位AD芯片^[15],SD卡存储电路由相应的外围电路、电源电路等构成,可以直接将数据存入SD卡内,SD卡存储电路最大可对8G容量的SD卡进行数据的读取操作^[16]。加工出的电路实物图如图5所示。

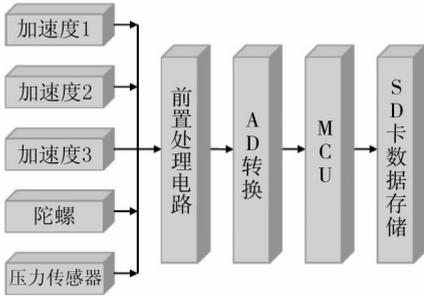


图4 硬件电路程序框图

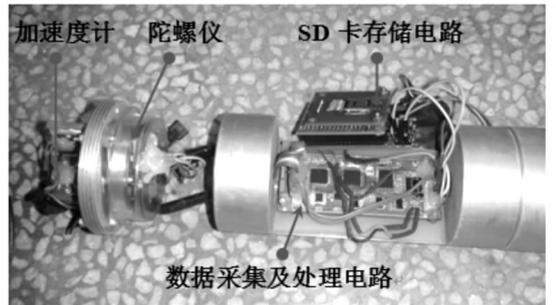


图5 电路实物图

3 上位机软件设计

软件采用虚拟仪器语言 LabVIEW 编写,软件的功能是对SD卡内存储的数据进行进一步的分析处理及显示,软件界面如图6所示。

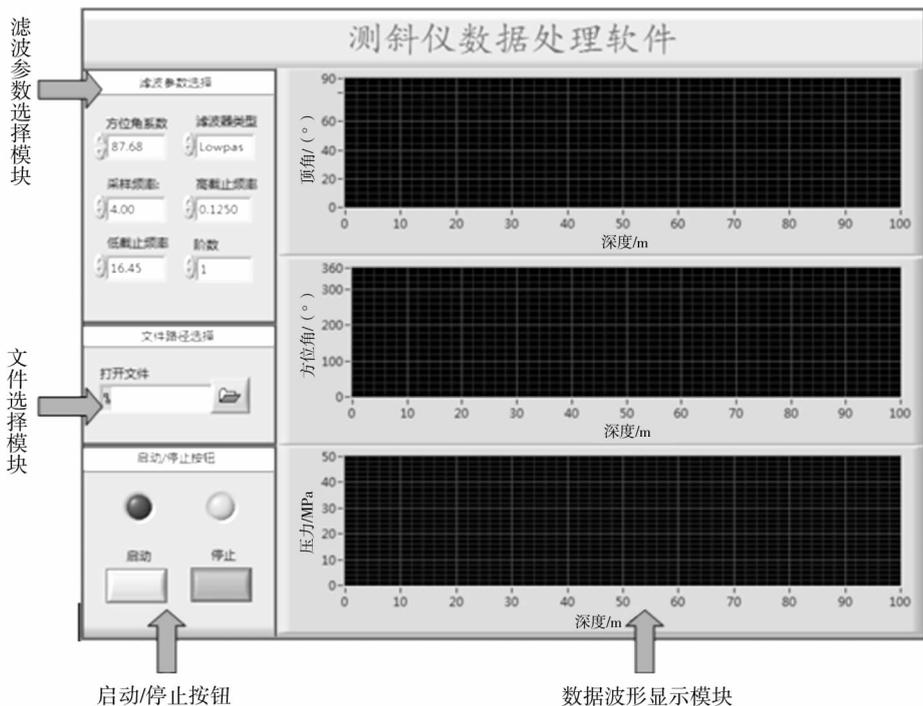


图6 软件界面

由图6可见软件主要分为滤波参数选择模块,文件选择模块,启动/停止按钮和数据波形显示模块,下面分别对这4个模块进行叙述.

1) 滤波参数选择模块

滤波参数选择模块主要用于对采集到的数据进行滤波处理,包括滤波器的选择,滤波阶数选择,采样频率选择,低通截止频率选择,高通截止频率选择等.

2) 文件选择模块

文件选择模块用于选择将要处理的文件.

3) 启动/停止按钮

启动/停止按钮用于启动/停止软件的运行.

4) 数据波形显示模块

数据波形显示模块用于将处理后的数据进行图形显示.

4 仪器试验

利用测斜仪校验平台对仪器进行了大量的室内实验,根据室内试验数据对仪器的输出结果进行了修正,对式(3)、式(4)进行修正后的公式分别为式(5)、式(6).

$$\varphi = k_1 \cdot \arctan\left(\frac{A_y}{A_x}\right). \tag{5}$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}\right) - k_2 t. \tag{6}$$

式中: k_1, k_2 均为修正系数, t 为温度. 修正系数 k_1, k_2 的解法如式(7)所示.

$$k = \frac{D_c}{D_z}. \tag{7}$$

式中: k 为修正系数, D_c 为所需测量数据的测量值, D_z 为所需测量数据的真实值. 即修正系数为测量值与真实值的比值,通过求多个修正系数的平均值,可得最终修正系数. 修正系数与传感器型号,电路采集精度等均有关.

在求得修正系数后对仪器进行试验,部分室内实验数据如下表1所示.

从表1中可以看出仪器方位角的最大误差不超过 3° ,顶角的最大误差不超过 1° ,该精度可以满足工程实际需求,仪器在满足室内试验的精度要求后,于2013年3月至5月在中国铀矿第一科学钻探现场进行了大量的试验,根据现场实际情况,仪器增加了配重. 增加配重后的仪器实物及仪器现场下井时的情况如图7所示.

表1 部分室内实验数据

| 方位角/ $^\circ$ | | 顶角/ $^\circ$ | |
|---------------|-----|--------------|-----|
| 测量值 | 真实值 | 测量值 | 真实值 |
| 10.21 | 10 | 4.98 | 5 |
| 40.82 | 40 | 9.05 | 9 |
| 68.18 | 70 | 13.10 | 13 |
| 122.11 | 120 | 19.07 | 19 |
| 152.09 | 150 | 30.16 | 30 |
| 167.37 | 170 | 39.81 | 40 |

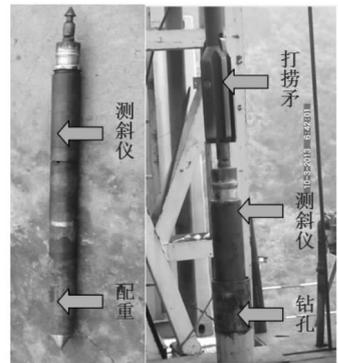


图7 仪器实物及下井情况图

通过大量的现场试验验证,仪器的测量精度达到了设计要求,可以满足实际工程需要.

5 结论

针对现有测斜仪不能满足深孔取芯钻探使用要求的情况,设计了一种基于光纤陀螺和三轴加速度计

的测斜仪,仪器加工完成后进行了大量的室内及现场试验,试验结果表明仪器满足实际工程的精度要求,但仍然存在如下问题:

1) 仪器需要借助管钳(或链钳)来拧紧密封,比较麻烦,下一步应改进密封结构,使得仪器拧卸简单.

2) 仪器密封结构中所使用的 O 型圈容易磨损,在每一次测量完毕后需要更换新 O 型圈以防止泄露,比较麻烦,下一步打算采用唇形密封,将 O 型圈换成 U 型或 Y 型密封圈,这样可减少密封圈的更换次数,同时可增加密封性能.

3) 目前设计的仪器电路板的采样频率为 100 Hz,虽然仪器所测量的数据精度已经满足了实际工程要求,但若将采样频率再提高些,测量精度还会进一步的提高.

参考文献:

- [1] 朱朝发,杨甘生,杨海雨,等. 胶莱盆地白垩纪科学钻探施工技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(12):36-39.
- [2] 罗光强,胡郁乐,刘狄磊,等. 深部钻探大钩位置检测装置的设计与应用[J]. 煤田地质与勘探,2013,41(2):87-89.
- [3] 胡郁乐,张晓西,张恒春,等. 科学深钻岩心钻探钻进参数随钻检测与监控系统研究[J]. 工程地球物理学报,2011,8(1):122-124.
- [4] 曾自强,王玉茜,高建华. 基于重力加速度传感器与磁通门的测井测斜仪[J]. 石油仪器,2011,25(4):38-41.
- [5] 谢川. 一种基于磁强计和倾角传感器的钻井测斜仪[J]. 仪器仪表报,2010,31(10):2357-2362.
- [6] 杜仕强. 磁干扰源对磁性测量仪器的干扰特性分析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2012(11):134-135.
- [7] 王丽琴. 光纤陀螺仪及其应用[J]. 自动化与仪器仪表,2013(5):132-135.
- [8] 吕伟,李玮燕,张龙,等. 基于光纤陀螺仪的油井测绘系统[J]. 测井技术,2011,35(6):581-584.
- [9] 颜延洋,张春熹,高爽,等. 光纤陀螺测斜仪设计和实验[J]. 中国惯性技术学报,2013,21(2):179-181.
- [10] 李艳. 用于油井测斜仪的光纤陀螺研究[J]. 测井技术,2007,31(1):14-16.
- [11] 任建新,任思聪,王博. 陀螺测斜仪的研究[C]//惯性仪表与元件学术交流会议论文集,2003:191-196.
- [12] 朱金冬,任建新,唐品利,等. 一种新型陀螺测斜仪的硬件设计及其误差补偿技术[J]. 测井技术,2006,30(6):580-586.
- [13] 张春熹,高爽. 自主式光纤陀螺油井测斜仪[J]. 仪表技术与传感器,2006(11):9-11.
- [14] 马斌,罗柏文,陈奇,等. 互相关技术在海底沉积物电阻率测量中的应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(3):31-34.
- [15] 赵诣,李杰,刘喆,等. 旋转弹用 MEMS 惯性测量组合数据硬回收系统设计[J]. 传感技术学报,2012,25(9):1251-1255.
- [16] 王仲夏,居鹏,吴蓉. 电子全站仪机载雷达标校系统研究与开发[J]. 公路工程,2013,38(3):64-66.