

原书缺此页

原书缺此页

原书缺此页

原书缺此页

原书缺此页

原书缺此页

原书缺此页

原书缺此页

$$N_i/K_i = D_{0i} + D_{xi}A_x + D_{yi}A_y + D_{zi}A_z + \omega_x \cos(i, X) + \omega_y \cos(i, Y) + \omega_z \cos(i, Z) \quad (i=1, 2, 3) \quad (27)$$

式中: N_i ——敏感测量轴 i 单位时间的输出; K_i ——敏感测量轴 i 的当量; D_{0i} ——测量轴 i 的零次项漂移系数; D_{xi} 、 D_{yi} 、 D_{zi} ——分别由 A_x 、 A_y 、 A_z 引起并与其成正比,作用在测量轴上的一次项漂移系数; A_x 、 A_y 、 A_z ——组合坐标系加速度三个分量; ω_x 、 ω_y 、 ω_z ——测试时地速在各轴的分量(已知),使用时为载体运动角速度在组合系各轴的分量(要解算的量); $\cos(i, X)$ 、 $\cos(i, Y)$ 、 $\cos(i, Z)$ ——敏感测量轴 i 在组合系的方向余弦。

7.2 加速度计组件模型

加速度计的数学模型方程为:

$$N_j = K_{0j} + K_{xj}A_x + K_{yj}A_y + K_{zj}A_z$$

或

$$(N_j - K_{0j})/K_j = A_x \cos(j, X) + A_y \cos(j, Y) + A_z \cos(j, Z) \quad (28)$$

式中: $j = 1, 2, 3$ (1 表示该轴与 X 轴靠近; 2 表示该轴与 Y 轴接近; 3 表示该轴与 Z 轴接近); K_{0j} ——敏感测量轴 j 的零次项系数; K_j ——敏感测量轴 j 的当量; K_{xj} 、 K_{yj} 、 K_{zj} —— K_j 的方向数,即第 j 轴的当量沿组合坐标系的分当量; A_x 、 A_y 、 A_z ——输入组合的加速度三维向量; N_j ——加速度计敏感轴 j 单位时间的输出; $\cos(j, X)$ 、 $\cos(j, Y)$ 、 $\cos(j, Z)$ ——敏感测量轴 j 在组合系的方向弦。

其中:

$$K_j = \sqrt{K_{xj}^2 + K_{yj}^2 + K_{zj}^2} \quad (29)$$

$$K_{xj} = K_j \cos(X, j)$$

$$K_{yj} = K_j \cos(Y, j) \quad (30)$$

$$K_{zj} = K_j \cos(Z, j)$$

7.3 “六位置二十四点”编排

捷联组合可从模型方程系数定义出发,从总体及数学物理功能角度,可作如下编排:组合 X 、 Y 、 Z 三轴分别向上、向下共“六位置”绕铅垂线东南西北转 1 圈作 4 点采样以求其均值(6 位置 24 点)。显然,该测试编排有如下特点:

(1)只考虑组合坐标系 $OXYZ$ (不涉及陀螺系),并以此为准正交翻转,作为位置测试采样点的数目达到了极限;

(2)相对于其他编排信息量大,且利用率高,处理计算结果统计性;

(3)该编排测试设备无须对北,首先将 6 位置的每个位置 4 点采样平均:

$$\begin{cases} F(1, i \setminus j) = [N(1, i \setminus j) + \dots + N(4, i \setminus j)]/4 \\ F(2, i \setminus j) = [N(5, i \setminus j) + \dots + N(8, i \setminus j)]/4 \\ \vdots \\ F(6, i \setminus j) = [N(21, i \setminus j) + \dots + N(24, i \setminus j)]/4 \end{cases} \quad (31)$$

则原始数组 $N(24, 6)$ 转化为 $F(6, 6)$, 这样设备免于对北的优点就显而易见了。

7.4 无真北测试中地球水平分量影响消除原理

设备无定向,即测试设备在测试间的放置无须考虑东南西北,这里要说明的是地速水平分量影响如何消除。

设:测试标定的起始位置与北向有一差角 α ,地速在逆时针每隔 90° 作一点采样的影响分别为(转台或方体旋转 90° 的位置精度,视测试允许误差而定,例如: $\leq 5 \times 10^{-5}$ 量级,精度为 $10''$,主要还涉及到加速度计标定问题):

$$\Delta 1 = \omega_e \cos L \cos \alpha \quad (32)$$

$$\Delta 2 = -\omega_e \cos L \sin \alpha \quad (33)$$

$$\Delta 3 = -\omega_e \cos L \cos \alpha \quad (34)$$

$$\Delta 4 = \omega_e \cos L \sin \alpha \quad (35)$$

式中: $\Delta 1$ ——第 1 点采样时地速北向分量在敏感轴上的投影; $\Delta 2$ ——转 90° ,第 2 点采样时地速北向分量在敏感轴上的投影; $\Delta 3$ ——再转 90° ,第 3 点采样时地速北向分量在敏感轴上的投影; $\Delta 4$ ——再转 90° ,第 4 点采样时地速北向分量在敏感轴上的投影。

对 4 点采样均值影响为:

$$\Delta = \Delta 1 + \Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 = 0 \quad (36)$$

7.5 调平不准引起的地速垂直分量及重力垂直、水平分量影响消除原理

设测试旋转平面与地平面夹角为 γ ($\leq 6'$),则地速的垂直分量影响:

$$\Delta 5 = \omega_e \sin L \cos \gamma \quad (37)$$

重力垂直分量影响:

$$\Delta 6 = g \cos \gamma \quad (38)$$

重力水平分量:

$$\Delta 7 = g \sin \gamma \cos \varphi \quad (39)$$

式中: φ ——加速度计敏感轴与南北或东西夹角。

该影响与地速水平分量一样,通过绕垂线 4 点采样的均值将互相抵消,而当 $\gamma \leq 6'$ 时的 $\cos \gamma$ 变化

($\leq 1.5 \times 10^{-6}$)完全可以忽略。因此,有关对北、调平问题有如下结论:

- A. 计算 D_{0i} 、 D_{xi} 、 D_{yi} 、 D_{zi} 时不会引起误差;
B. 计算 K_{0j} 、 K_{xj} 、 K_{yj} 、 K_{zj} 时不会引起误差。

7.6 加速度组件系数标定

据数学模型式,从数组 $F(6, n)$, 可列出 6 个有关 j 敏感轴的方程, 其中只有 K_{0j} 、 K_{xj} 、 K_{yj} 、 K_{zj} 未知, 方程数多于未知数, 可按多元回归求解。

设:

$$F_j = [F(1, j) \quad F(2, j) \quad \cdots \quad F(6, j)]' \quad (40)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & g & 0 & 0 \\ 1 & 0 & g & 0 \\ 1 & 0 & 0 & g \\ 1 & -g & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -g & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -g \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$K = [K_{0j} \quad K_{xj} \quad K_{yj} \quad K_{zj}]' \quad (42)$$

原方程为:

$$F_i = AK \quad (43)$$

回归系数为:

$$K = A^{-1} F_i \quad (44)$$

或按下列关系式求之。

偏置(零次项系数)为:

$$K_{0j} = [F(1, j) + F(2, j) + \cdots + F(6, j)]/6 \quad (45)$$

分当量(加速度分别沿 X 、 Y 、 Z 作用时 j 轴的输出当量, 一次项系数)为:

$$\begin{cases} K_{xj} = [F(1, j) - F(4, j)]/2G_0 \\ K_{yj} = [F(2, j) - F(5, j)]/2G_0 \\ K_{zj} = [F(3, j) - F(6, j)]/2G_0 \end{cases} \quad (46)$$

则 j 轴当量(当加速度沿 j 轴方向作用时, 单位速度的脉冲数):

$$K_j = \sqrt{K_{xj}^2 + K_{yj}^2 + K_{zj}^2} \quad (47)$$

方向余弦:

$$\begin{cases} \cos(j, X) = K_{xj}/K_j \\ \cos(j, Y) = K_{yj}/K_j \\ \cos(j, Z) = K_{zj}/K_j \end{cases} \quad (48)$$

7.7 陀螺组件系数标定

通过 $X/Y/Z$ 向上时正反转 360° 即可得数组 $(6, m)$, 其中 m 为角速度测量轴的条数, 若正反转时间基本相等(零次项误差可忽略), 则有关 i 轴沿

$X/Y/Z$ 的分当量, 每角秒脉冲数为:

$$\begin{cases} K_{xj} = (N_{i1} - N_{i2})/720/3600 \\ K_{yj} = (N_{i3} - N_{i4})/720/3600 \\ K_{zj} = (N_{i5} - N_{i6})/720/3600 \end{cases} \quad (49)$$

$$K_i = \sqrt{K_{xi}^2 + K_{yi}^2 + K_{zi}^2} \quad (50)$$

$$\begin{cases} \cos(i, X) = K_{xi}/K_i \\ \cos(i, Y) = K_{yi}/K_i \\ \cos(i, Z) = K_{zi}/K_i \end{cases} \quad (51)$$

角速度敏感轴的误差系数的标定从数组 $F(6, i)$ 可列出 6 个有关 i 轴的方程, 其中只有 D_{0i} 、 D_{xi} 、 D_{yi} 、 D_{zi} 未知。方程数多于未知数, 可按多元回归求解:

$$F(6, i)/K_i = D_{0i} + D_{xi}A_x + D_{yi}A_y + D_{zi}A_z + \omega_x \cos(i, X) + \omega_y \cos(i, Y) + \omega_z \cos(i, Z) \quad (i=1, 2, 3) \quad (52)$$

设:

$$F_i = \begin{bmatrix} F(1, i)/K_i - \omega_e \sin L \cos(i, X) \\ F(2, i)/K_i - \omega_e \sin L \cos(i, Y) \\ F(3, i)/K_i - \omega_e \sin L \cos(i, Z) \\ F(4, i)/K_i + \omega_e \sin L \cos(i, X) \\ F(5, i)/K_i + \omega_e \sin L \cos(i, Y) \\ F(6, i)/K_i + \omega_e \sin L \cos(i, Z) \end{bmatrix} \quad (53)$$

式中: L ——当地纬度。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & g & 0 & 0 \\ 1 & 0 & g & 0 \\ 1 & 0 & 0 & g \\ 1 & -g & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -g & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -g \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$D = [D_{0i} \quad D_{xi} \quad D_{yi} \quad D_{zi}]' \quad (55)$$

原方程为:

$$F_i = AD \quad (56)$$

回归系数为:

$$D = A^{-1} F_i \quad (57)$$

也可以按下列关系式求之($i=1, 2, 3$):

$$\begin{cases} D_{0i} = [F(1, i) + F(2, i) + \cdots + F(6, i)]/6 \\ D_{xi} = [F(1, i) - F(4, i)]/2 - \omega_e \sin L \cos(i, X) \\ D_{yi} = [F(2, i) - F(5, i)]/2 - \omega_e \sin L \cos(i, Y) \\ D_{zi} = [F(3, i) - F(6, i)]/2 - \omega_e \sin L \cos(i, Z) \end{cases} \quad (58)$$

综上所述, 采用上述标定方法, 降低了对现场标定设备的要求, 具有很强的适应性, 经现场试验表

明,此标定技术满足技术指标要求。

8 存储式测控系统优化设计

8.1 测控系统功能

测控系统主要承担测量仪的电源管理(间歇供电)、数据通信、信息交换、数据存储、探管外温度测量等功能。测井斜的同时也钻孔温度,大大拓展了应用范围,并提高了仪器的使用效力。

8.2 测量控制系统设计

测控系统是整个测量仪器的主控中心,它通过 RS232 接口接收来自测量模块的倾角、方位角、工具面角、温度和时间等信息数据(通讯协议遵从数据测量模块的协议),存储在外扩的 FLASH 存储器中,并对整个测量过程进行控制,同时带有系统电量分配控制、容错和保护功能,在返回地面后,能通过 RS232 接口将存储的数据传输给上位机,配合整个测量工艺流程、通过人机界面对测量过程参数、命令信息、数据信息等进行有效的设置,并读取信息数据、处理数据、存储信息数据等功能。硬件框图如图 10 所示。

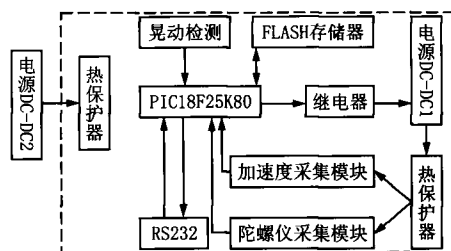


图 10 硬件框图

8.3 钻孔环境温度测量

钻孔环境温度测量,外部温度测量部分,使用高精度的 PT100 温度传感器及专用 PT100 测温转换器 MAX31865 芯片,该芯片可以直接通过 SPI 接口输出 PT100 的实际温度所对应的二进制补码,通过简单转换即可输出温度。测量范围:0~300℃,标定测量精度:±0.2℃。

8.4 测控软件设计与实现

本系统软件是集参数设置和数据导出等功能于一体的一个工具软件。

软件功能模块主要包括:串口通信、读取数据、参数设置、使用说明等四个模块,见图 11。

硬件配置要求:CPU 为酷睿 2 及其以上型号、内存为 2G 及以上、硬盘容量为 40G 或以上;

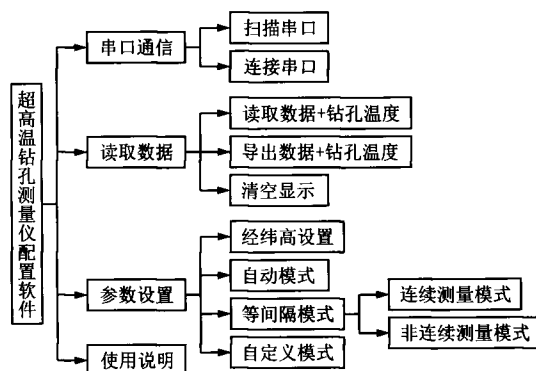


图 11 软件系统结构

硬盘软件要求:操作系统为 Windows7 或 Windows8、Windows10 及以上版本;Net Framework 4.0;office2010 及以上版本(需要完全安装 excel 组件)。

图 12 为程序流程图。它包括等时间间隔测量、定时测量二个流程。

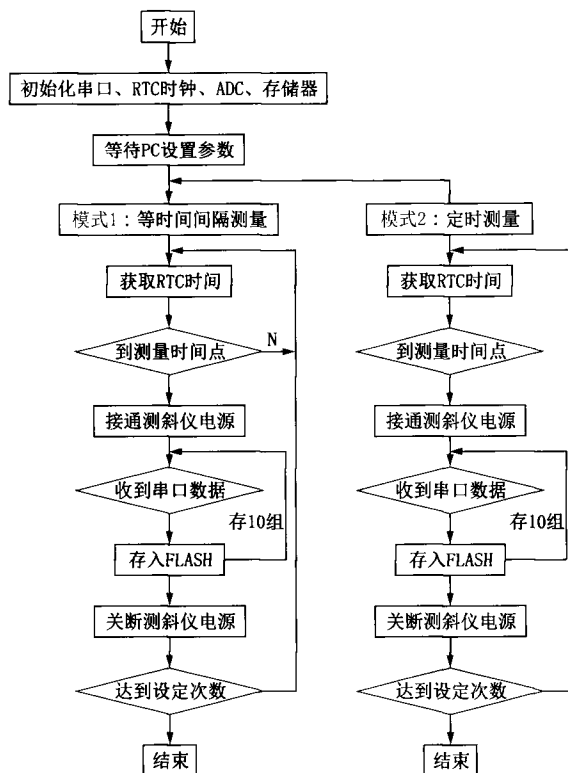


图 12 程序流程图

串口实现主控器与 PC 机软件、测斜仪之间的通信;RTC 用于主控器的实时时间,该时间可以使用 PC 机软件进行设置;当模式 1 或者模式 2 时,钻孔环境温度传感器也工作;存储器为外挂 512Kbit (64KByte)字节 EEPROM 存储器,用于存储来自测斜仪的数据。

PC 参数设置界面如图 13 所示。



图 13 参数设置界面

选中模式 1 连续,在点保存设置时,将会读取 PC 机当前时间,并将当前时间、图 13 中的首次测量时间、测量时间间隔、测量次数通过串口发送到主控器中,主控器将这些数据保存到单片机片内的 EEPROM 中,单片机根据 EEPROM 中的模式参数进入模式 1 的工作程式,其工作过程如图 12 程序流程图左间部分所示。

选中模式 2 定时,在点保存设置时,将会读取 PC 机当前时间,并将当前时间、图 13 中的 T1~T24 的时间(小时:分钟)通过串口发送到主控器中,主控器将这些数据保存到单片机片内的 EEPROM 中,单片机根据 EEPROM 中的模式参数进入模式 2 的工作程式,其工作过程如图 12 程序流程图右边部分所示。

注意:参数设置完成后,主控器不允许断电,否则时间数据会丢失,因为主控器上没有使用 RTC 电源。

读取数据:在主控器完成井下测量之后,可以通过 RS232 串口与 PC 机连接,然后读取保存在主控器 FLASH 中的数据,读取数据界面如图 14 所示。当选择了对应的串口号,并且连接成功以后,点击读取数据按钮,则会读出保存在主控器中的数据。

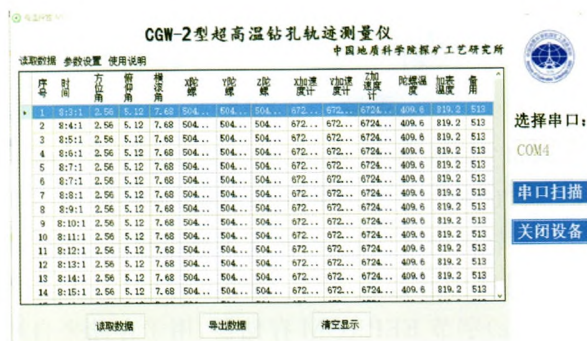


图 14 读取数据界面

然后点导出数据,可将数据保存在一个 TXT 文本文档中用于数据分析和记录。

9 测试分析

通过测试,顶角、方位角计量测试见图 15、温度计量测试见图 16,测量仪机芯工作温度在 $-10\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,加保温瓶后工作温度在 $-10\sim 270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,承压管承压达 120 MPa,方位角测量范围与精度为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ (误差 $\pm 1.5^{\circ}$, 井斜 $> 3^{\circ}$ 时),井斜测量范围与精度为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ (误差 $\pm 0.15^{\circ}$)。实现了最大限度解决电池续航的问题,可以让光纤测斜测温仪持续工作超过 4 h;实现存储光纤测斜仪采集的数据,且掉电不丢失;实现探管外部温度并存储,可用于地热探测等功能。

XKT-CG-1超高温钻孔轨迹测量仪顶角和方位角值检测报告(磁北为基准)

序号	顶角/度	方位角/度	顶角/度	方位角/度	顶角/度	方位角/度	顶角/度	方位角/度	顶角/度	方位角/度
1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
6	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
7	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
8	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
9	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
11	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
14	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
15	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
17	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
21	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
22	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
23	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
24	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
26	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
27	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
28	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
29	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
30	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
31	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

图 15 顶角、方位角计量测试

校准数据/结果
Data/Results of calibration

序号	示值/℃	误差/℃
1	0.00	+0.05
2	10.00	-0.09
3	20.00	-0.09
4	30.00	-0.02
5	40.00	-0.05
6	50.00	-0.02
7	60.00	+0.02
8	70.00	+0.03
9	80.00	+0.03
10	90.00	+0.09
11	100.00	+0.09
12	110.00	+0.09
13	120.00	-0.05
14	130.00	-0.12
15	140.00	+0.16
16	150.00	+0.13
17	160.00	+0.18
18	170.00	+0.18
19	180.00	-0.20
20	190.00	-0.20
21	200.00	-0.05
22	210.00	-0.04
23	220.00	-0.11
24	230.00	-0.11
25	240.00	-0.16
26	250.00	-0.04
27	260.00	+0.14
28	270.00	+0.06
29	280.00	+0.14
30	290.00	+0.15
31	300.00	+0.12

校准不确定度为: $U=0.15^{\circ}\text{C}$, $k=2$

图 16 温度计量测试

10 结语

通过本研究的实施,在三维光纤陀螺、三维石英挠性加速度传感器温度漂移和误差分析校正、测控技术等方面取得重大进展,研制出了耐温 $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、耐压 120 MPa 的超高温钻孔轨迹测量仪,解决了高温

高压环境钻孔轨迹测量难题,完全满足高温高压地热能、科学钻探、深部矿产资源勘探以及深部油气资源勘探工程的需求,支持国家重要能源资源勘探工程。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李番军.连续测斜仪研究[D].黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [3] 周春,刘白雁,龚勋.井下实时测斜的理论分析与实验研究[J].中国测试,2009,35(6):1-4.
- [4] 曹华.光纤IMU误差标定及温度补偿技术的研究与实现[D].江苏南京:南京航空航天大学,2008.
- [5] 刘瑞江,张业旺,闻崇伟,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
- [6] 于昌龙,张红线,吴衍记,等.基于均匀设计的光纤陀螺温度建模实验方案研究[J].红外与激光工程,2009,38(2):330-334.
- [7] 白雪峰,赵刻.单轴速率三轴位置惯性测试转台误差及传递分析[J].航天控制,2006,24(2):26-29.
- [8] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994.
- [9] 何辛.用WdW模型估算定向井轨迹误差[J].钻采工艺,1989,12(2):23-28.
- [10] 张桂才,杨清生.干涉式光纤陀螺的温度特性研究[J].光电子技术与信息,2001,14(1):17-21.
- [11] 毋伟,李道明,毋涛.随钻测斜仪温度补偿方法的研究[J].电子测量与仪器学报,2000,14(3):64-66.
- [12] 董本京,高德利,柳贡慧.井眼轨迹不确定性分析方法的探讨[J].天然气工业,1999,19(4):59-63.
- [13] 马劲松.定向井随钻测量新模型误差源分析[J].科技专论,2014,(13):325.
- [14] 夏斯.三轴测试转台精度特性分析和控制系统设计[D].黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [15] 吕彦明,袁艺.在正交实验数据处理中引进相对方差的讨论[J].实验技术与管理,1996,13(2):57-58.
- [16] 陈伟卿.定向井轨迹误差分析及三维可视化描述研究[D].北京:中国石油大学,2006.
- [17] 许昊东,黄根芦,韦红术.改进仪器不对中误差的轨迹系统误差模型研究[J].科学技术与工程,2013,13(31):9180-9183.
- [18] 柳贡慧,董本京,高德利.误差椭圆(圆)及井眼交碰概率分析[J].钻采工艺,2000,23(3):5-12.
- [19] 曲志勇,姚郁.仿真转台误差分析及误差建模[J].计算机仿真,2006,23(3):301-304.
- [20] 李凡,朱国力.三轴标定转台的指向误差建模与仿真分析[J].机械工程与自动化,2014,187(6):147-149.
- [21] Y Lin, Y Shen. Modeling of Five-Axis Machine Tool Metrology Models Using the Matrix Summation Approach[J]. Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(4): 243-248.
- [22] V.S.B.Kiridena, P.M. Ferreira. Kinematic Modeling of Quasistatic Errors of Three-axis Machining Centers[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1994, 34(1):85-100.
- [23] Louis A, DeMore. Design Study for a High-Accuracy Three-Axis Test Table[J]. AIAA Guidance and Control Conference, 1985, 10(1):104-114.
- [24] Zhiyong QU, Yu Yao. Derivation of Error Models and Error Compensation Procedure for Simulation Turntable Using Multi-Body Kinematics[C]// International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, 2005: 1408-1411.
- [25] Z. S. Wang, Y. Wang, B. K. Su. Friction Compensation for High Precision Turntable Using Adaptive Sliding Mode Controller[J]. Industrial Electronics and Applications, 2007: 1090-1094.
- [26] Tuckness M. Analysis of optical navigation error during mass enery applied mathematics and computation[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 80(1):1-22.
- [27] Johann Borenstein, Lauro ojed, Surat Kwanmuang. Heuristic Reduction of Gyro Drift for Personnel Tracking Systems[J]. Journal of Navigation (S0373-4633), 2009, 62(1):41-58.
- [28] Cornell, J.A. Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data[M]. New York:1990:32-41.
- [29] Chris J.M. Wolff, John P. De Wardt. Borehole Position Uncertainty—Analysis of Measuring Methods and Derivation of Systematic Error Model[J]. SPE 9223, 1980:1-7.
- [30] H.S. Williamson. Accuracy Prediction for Directional Measurement While Drilling[J]. SPE67616, 2000:221-233.
- [31] G. A.麦埃尔欣尼, H.M.J.伊尔费尔德.用于地下井的相对和绝对误差模型;中国, CN102356212 A[P].2012-02-15.
- [32] Angus Jamieson. Introduction to Wellbore Positioning[M]. THE RESEARCH OFFICE OF UHI, 2012.
- [33] S Madry. Global positioning systems, inertial navigation, and integration[J]. Wiley-Interscience, 2007, 46(5):23-39.
- [34] A Malatip, N Wansophark, P Dechaumphai. Fractional four-step finite element method for analysis of thermally coupled fluid-solid interaction problems[J]. Neuropharmacology, 2012, 33(1):253-257.