

文章编号: 1001-1986(2017)04-0144-05

# MEMS 加速度传感器在矿用随钻轨迹测量系统中的误差校正

燕 斌

(中煤科工集团西安研究院有限公司，陕西 西安 710077)

**摘要:** 矿用随钻轨迹测量系统的工具面向角和倾角通常采用加速度传感器实现测量, 然而由于传感器制作工艺、探管机械加工以及装配等因素使得工具面向角和倾角的测量出现误差。为了修正上述系统误差, 首先介绍了随钻轨迹测量系统及其工作原理, 进而分析了加速度传感器的误差产生, 并建立了 MEMS 加速度传感器的误差模型; 提出了一种基于三十六位置的加速度标定方法, 并对其进行相应的测试。实验结果表明: 建立的加速度误差模型在随钻轨迹测量系统中, 倾角精度为  $0.2^\circ$ , 工具面向角精度为  $0.2^\circ$ , 且倾角和工具面向角之间相互影响较小, 能够满足实际煤矿井下钻探工艺的精度需求。

**关 键 词:** MEMS 加速度传感器 ; 随钻轨迹测量系统 ; 三十六位置标定方法 ; 误差修正

**中图分类号:** V249      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.04.026

## Error correction of MEMS acceleration sensor used for trajectory measurement while drilling system

YAN Bin

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Acceleration sensor is usually applied to measure the face angle and the inclination angle of the drilling trajectory measurement system, factors such as the manufacturing process, the mechanical processing of probe and the assembly produce measurement error of tool face angle and inclination. In order to correct the above error, the paper first introduced the trajectory measurement while drilling system and its working principle, and then analyzed the error of the acceleration sensor, the error model of MEMS acceleration sensor and 36-position calibration method were built, and the corresponding test was completed. The experimental results indicate that the accuracy for inclination angle is  $0.2^\circ$ , the accuracy for face angle is  $0.2^\circ$ , and the two parameters influence rarely each other. As a result, the acceleration error model can meet the accuracy requirements in actual underground drilling.

**Keywords:** MEMS acceleration sensor; trajectory measurement while drilling system; 36-position-calibration method; error correction

煤矿井下钻探工艺是探查和治理地质构造、老空区、探放水、瓦斯卸压等致灾因素的常用手段之一<sup>[1]</sup>, 目前钻探工艺中常采用钻孔测斜仪和随钻轨迹测量系统两种设备进行轨迹测量。相比于传统的钻孔测斜仪的“先打孔, 再测量”测量方式, 随钻轨迹测量系统具有“边打边测, 实时测量”的特点, 有效地提高了测量施工的效率。钻具的倾角和工具

面向角是测量系统中两个重要的参数, 其测量传感器从 20 世纪 20 年代机械照相到 80 年代发展为采用重力石英加速度传感器进行测量以上 2 个参数, 测量精度较高, 应用较为广泛; 但其恶劣工况环境下, 测量传感器体积较大, 抗震性能较差, 难以适用煤矿井下<sup>[2]</sup>。

随着微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical

收稿日期: 2016-08-18

基金项目: 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2015XAYZD15, 2016XAYZD04)

**Foundation item :** Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2015XAYZD15, 2016XAYZD04)

作者简介: 燕斌(1979—), 男, 四川渠县人, 博士, 助理研究员, 从事地球探测与信息技术研究工作. E-mail: yanbin@cctegxian.com

引用格式: 燕斌. MEMS 加速度传感器在矿用随钻轨迹测量系统中的误差校正[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 144-148.

YAN Bin. Error correction of MEMS acceleration sensor used for trajectory measurement while drilling system[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 144-148.

System, 简称 MEMS)技术的发展, MEMS 加速度传感器以体积小、重量轻、功耗小、成本低、易集成、可批量生产等特点已成功应用于钻孔测斜仪中。文献[3]采用零点偏移补偿和横轴传感量补偿方法实现三轴加速度倾斜角的测量, 测量精度不高。文献[4]提出了基于最小二乘法的多项式拟合及约束条件下多变量函数寻优解的安装误差模型, 计算较为复杂。文献[5]提出了对误差进行逐一补偿的方法, 但该方法较为复杂, 且补偿后的修正值相互之间也存在影响。笔者提出的基于三十六位置的标定方法, 能够有效、快速标定加速度传感器, 特别适应于大角度测量的全空间随钻测量系统, 能够满足实际工程的需要。

## 1 随钻轨迹测量系统

随钻轨迹测量系统主要由控制器和探管两部分组成, 控制器部分主要包括以 ARM 为核心处理器的电路、键盘及显示器等; 探管内部安装三轴加速度传感器和三轴磁性传感器, 探管安装在钻具后的无磁钻铤中, 如图 1 所示。测量起始, 探管与控制器相连, 触发同步; 同步后探管和控制器分别各自工作; 控制器记录采样点号和钻孔深度, 探管记录依据加速度传感器和磁性传感器采集数据解算出的钻井方向的倾角、工具面向角、方位角参数。钻孔测量完成后, 探管与控制器相连, 提取出有效采样点号的 4 个参数的数据, 从而完成钻孔轨迹图。

$$\mathbf{R}_l^b = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta - \sin\psi \sin\theta \sin\phi & \sin\psi \sin\theta + \cos\psi \sin\theta \sin\phi & -\cos\theta \sin\phi \\ -\sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\theta & \sin\theta \\ \cos\psi \cos\theta + \sin\psi \sin\theta \sin\phi & \cos\psi \sin\theta - \sin\psi \sin\theta \sin\phi & \cos\theta \sin\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\theta$  为钻具的倾角, ( $^{\circ}$ );  $\phi$  为钻具的工具面向角, ( $^{\circ}$ );  $\psi$  为钻具的方位角, ( $^{\circ}$ )。

分别依据重力场的坐标系和地球磁场的坐标系旋转可以得出以下 3 个参数的计算式:

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

$$\tan\phi = \frac{-G_X}{G_Z} \quad (3)$$

$$\tan\psi = \frac{G_0(B_z G_X - B_X G_Z)}{B_Y(G_X^2 + G_Z^2) - G_Y(B_X G_X + B_Z G_X)} \quad (4)$$

式中  $G_X, G_Y, G_Z$  分别是重力场在仪器坐标系下,  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴上的测量值,  $m/s^2$ ; 其中  $G_0$  为重力加速度的值,  $m/s^2$ ;  $B_X, B_Y, B_Z$  分别是地磁场在仪器坐标系下,  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴上的测量值,  $T$ 。

## 3 加速度误差分析及模型建立

从式(2)一式(4)可以看出加速度测量值的精确

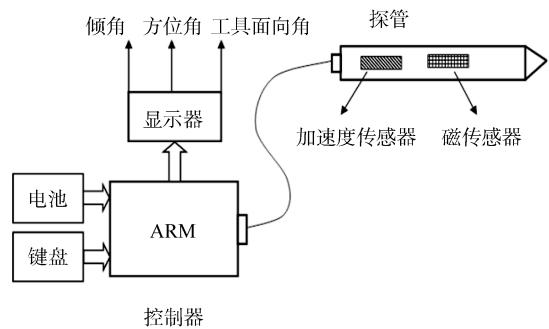


图 1 随钻轨迹测量系统原理框图

Fig.1 Functional block diagram of trajectory measurement while drilling system

## 2 随钻测量系统工作原理

随钻测量系统主要是测量钻孔中的轨迹参数, 从而判断是否按照预期设计的轨迹进行钻进。钻孔的深度、倾角、工具面向角、方位角是随钻测量系统中 4 个最重要的测量参数。钻孔深度通常采用有效的钻杆长度, 倾角和工具面向角则由 MEMS 加速度传感器进行测量, 方位角采用包括磁通门、磁阻、磁感等磁性传感器测量。

欧拉定理是随钻测量系统的基本原理, 即载体在空间中的姿态(即仪器坐标系)可用相对地理坐标系有限次的转动来表示, 每次转动的角度可以分解为方位角、倾角及工具面角在其各自方向上的改变。

式(1)为仪器坐标系和地理坐标系之间的变换矩阵  $\mathbf{R}_l^b$ <sup>[6-7]</sup>:

与否直接影响倾角、工具面向角、方位角的测量精度, 因此本节将重点研究传感器制作工艺、探管的机械加工以及装配等因素对加速度传感器带来的误差, 并建立合适的误差修正模型。

### 3.1 加速度误差分析

加速度传感器的误差主要包括器件误差、安装误差、信号数据处理误差以及温度漂移等误差<sup>[8-9]</sup>。器件误差是由于加速度传感器本身制作工艺等影响引起的误差, 主要表现为 3 个轴的灵敏度偏差和零位偏差。安装误差主要是机械加工及安装等影响引起的误差, 主要表现为 3 个轴与探管的坐标轴不正交、不重合。信号数据处理误差主要包括数据记录及传输引起的误差。目前, 随着半导体工艺的发展, 采用高性能处理器及高精度的 AD 转换器芯片和数字滤波技术, 能够将其误差控制到较低的水平。温度漂移是传感器和元器件受到温度的影响, 其测量值变化较大。不同于石油测井领域, 煤矿井下温度

变化不大，通常采用抗高温元器件从而减小传感器的输出误差。

### 3.2 加速度误差模型

加速度误差模型的建立对倾角和工具面向角 2 个参数的测量至关重要。目前，常规加速度标定的方法多采用简单线形的误差模型，该种模型没有考虑不正交和不重合等误差因素，测量精度不高。对于随钻轨迹测量系统，大角度(倾角 > 60°)和回转钻进的全空间测量精度，尤为关键。针对以上对加速度误差产生原因的分析，本次建立加速度的误差模型如下：

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{xi} \\ a_{yi} \\ a_{zi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 + k_{14}a_{xi}^2 + k_{15}a_{xi}^3 + k_{16}a_{xi}^4 + k_{17}a_{xi}^5 \\ b_2 + k_{24}a_{yi}^2 + k_{25}a_{yi}^3 + k_{26}a_{yi}^4 + k_{27}a_{yi}^5 \\ b_3 + k_{34}a_{zi}^2 + k_{35}a_{zi}^3 + k_{36}a_{zi}^4 + k_{37}a_{zi}^5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $a_x, a_y, a_z$  为加速度传感器的实际测量值， $\text{m/s}^2$ ； $b_1, b_2, b_3$  为加速度传感器的零偏， $\text{m/s}^2$ ； $a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}$  为加速度传感器的理论值， $\text{m/s}^2$ ； $k_{12}, k_{13}, k_{21}, k_{23}, k_{31}, k_{32}$  为加速度传感器的不正交和不重合系数； $k_{11}, k_{22}, k_{33}$  为加速度传感器的刻度因数； $k_{x4}, k_{x5}, k_{x6}, k_{x7}(x=1,2,3)$  为二到五次方有关的加速度非线性误差系数。

从式(5)中可以得出：假设给定单一标定位置，即加速度传感器的实际测量值和理论值已知，从而可获得包含 24 个未知参数的 3 个方程；为了求解式(5)中的 24 个系数，理论上至少需要 8 个位置标定 MEMS 加速度计。为保证求解出的系数能够在全空间范围内有足够的精度，通常采用多于 8 个标定位置的点数求解误差模型的方程，比如 12 位置法、24 位置法等，因此，式(5)为超定方程，未有精确解，只有近似值。

求解超定方程的方法较多，笔者采用最小二乘法来求解该方程，从而获得 24 个误差补偿系数。

### 4 系统的标定及实验结果

#### 4.1 实验装置

为获得高的测量精度，一方面需要提高误差模型的修正，同时必须采用高精度的传感器。实验采用芬兰 VTI 公司的两个高精度双轴加速度传感器 SCAL00T-D02 的拼接组合，作为三轴加速度测量传感单元<sup>[10]</sup>。图 2 给出了具体的实际测斜短节图。系统测试和标定设备均采用大连华天精密仪器有限公司生产的测斜仪调校装置 TX-3S 进行标定和测试。该装置三轴姿态角测量精度  $\leq \pm 0.05^\circ$ ；两两轴正交度  $\leq 0.1^\circ$ ；三轴相交度  $\leq 1 \text{ mm}$ 。



图 2 测斜短节示意图

Fig.2 Nipple for inclination measurement

#### 4.2 不同多个位置数标定实验

图 3 给出了均匀分布于全空间的 4 种标定位置倾角测量结果(十二标定位置参照文献[11]，其他标定位置均在此基础上均匀分布)。从图中得出以下结论：小角度情况下，倾角在 4 种标定位置下的测量精度变化不大；大角度情况下，随着标定位置的增加，倾角精度提高，但标定位置数增大到三十六标定位置时，精度并没有很大提高。

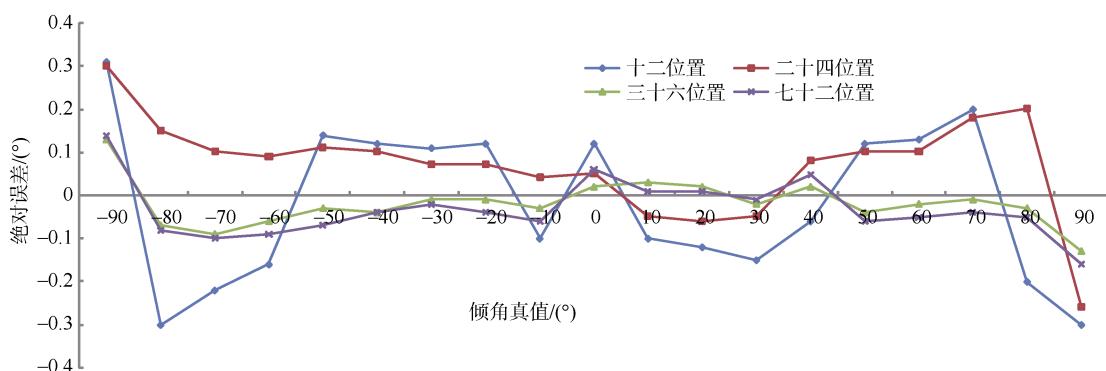


图 3 不同位置点数测量结果

Fig.3 Measurement results of different position points

### 4.3 三十六位置标定实验及结果

根据实验结果,采用三十六位置法对MEMS加速度计的误差模型系数的辨识,具体的标定位置如表1所示。图4a是工具面向角分别为 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 时,每个工具面向角下倾角从 $-90^\circ$ 到 $+90^\circ$ 每次增加 $10^\circ$ 变化时,绝对误差测试结果图。从图中可以看出,倾角的绝对误差小于 $0.2^\circ$ ,工具面向角对倾角影响较小。图4b是倾角分别为 $-60^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 时,每个倾角下工具面向角从 $0^\circ$ 到 $360^\circ$ 每次增加 $10^\circ$ 变化时绝对误差的测试结果图。从图中可以看出,工具面向角的绝对误差 $< 0.2^\circ$ ,倾角变化对工具面向角的影响较小。因此,三十六位置的标定方法既能够满足较高的测量精度,同时能减少标定位置点数,提高标定效率。

## 5 结论

a. 通过分析加速度误差原因,建立了加速度误差的模型。为了得到加速度传感器的高精度的测量参数,利用两个SCAI00T-D02加速度传感器,拼接

组成三轴加速度测量传感单元。

表1 三十六位置实验翻滚顺序  
Table 1 Sequence of 36-position experiment

位置	工具面向角( $\phi=0^\circ$ )		倾角( $\theta=0^\circ$ )
	倾角	位置	
1	$-90^\circ$	19	$0^\circ$
2	$-80^\circ$	20	$20^\circ$
3	$-70^\circ$	21	$40^\circ$
4	$-60^\circ$	22	$60^\circ$
5	$-50^\circ$	23	$80^\circ$
6	$-40^\circ$	24	$100^\circ$
7	$-30^\circ$	25	$120^\circ$
8	$-20^\circ$	26	$140^\circ$
9	$-10^\circ$	27	$160^\circ$
10	$10^\circ$	28	$180^\circ$
11	$20^\circ$	29	$200^\circ$
12	$30^\circ$	30	$220^\circ$
13	$40^\circ$	31	$240^\circ$
14	$50^\circ$	32	$260^\circ$
15	$60^\circ$	33	$280^\circ$
16	$70^\circ$	34	$300^\circ$
17	$80^\circ$	35	$320^\circ$
18	$90^\circ$	36	$340^\circ$

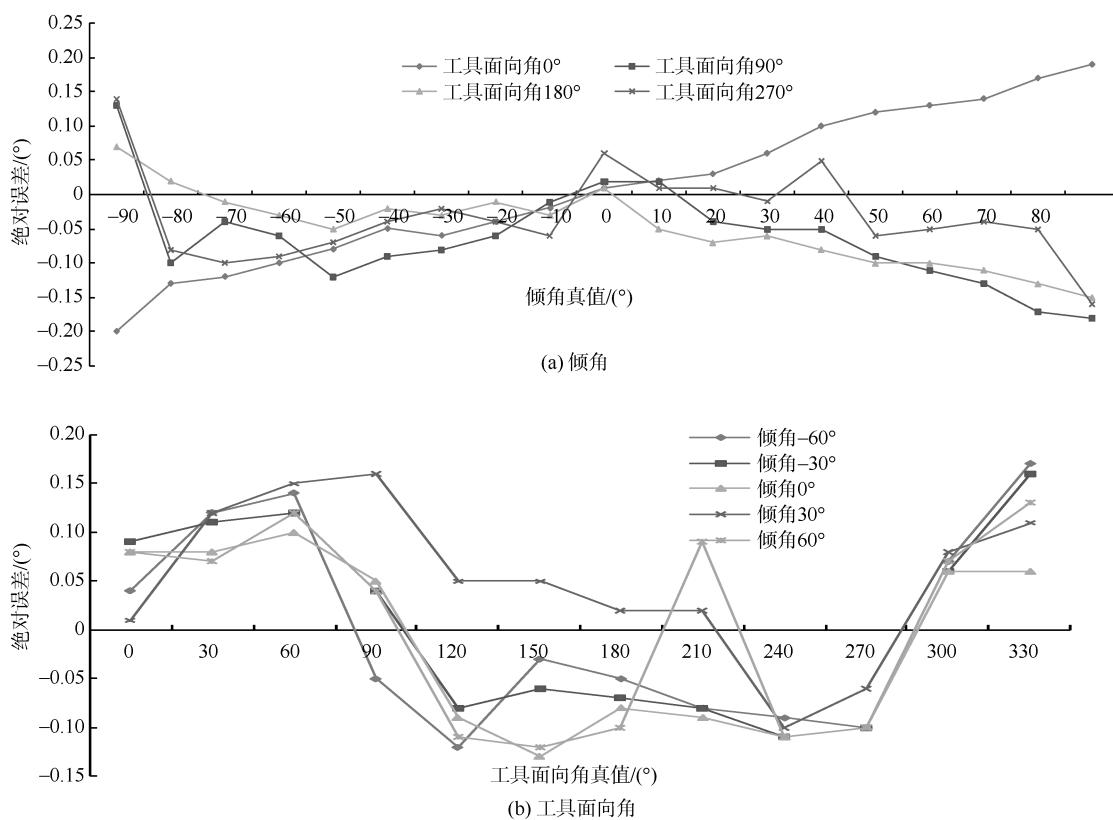


图4 倾角及工具面向角的标定结果

Fig.4 Calibration result of instrument-oriented angle and inclination

b. 采用不同位置点数标定,测量倾角和工具面向角的精度;构建了一种三十六位置标定方法,该方法既能满足较高的标定精度,又能大幅减少标定时间,提高生产效率。实验测试结果表明:该MEMS加速度

误差模型和标定方法能够满足矿用轨迹随钻测量系统的要求。

c. 本方法可推广应用于高温环境石油测井系统中,通过加入温度传感器修正温度对加速度的影

响，从而提升工具面向角和倾角的精度。

## 参考文献

- [1] 向军文. 定向钻进控制预测技术[J]. 地质与勘探, 2010, 46(6): 1123–1126.  
XIANG Junwen. Prediction technology for directional drilling control[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(6): 1123–1126.
- [2] 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.  
XUE Qin. Measurement algorithmic adjustment of 2-axis inclinometer in borehole clinometer[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(6): 70–73.
- [3] 郭敏, 尹光洪, 田曦, 等. 基于三轴加速度计的倾斜角传感器的研究与设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(8): 173–177.  
GUO Min, YIN Guanghong, TIAN Xi, et al. Research and design of tilt-angle sensor based on three-axis accelerometer[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(8): 173–177.
- [4] 江浩, 燕斌. 基于 PNI 磁感式传感器的钻孔测斜仪的研究[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(4): 132–135.  
JIANG Hao, YAN Bin. The research of borehole inclinometer based on PNI magnetic induction sensor[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(4): 132–135.
- [5] 郭爱煌, 傅君眉. 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.  
GUO Aihuang, FU Junmei. The technology of inclination measurement based on the gravitational field and geomagnetic field[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4): 400–403.
- [6] 张玉波, 孟耀华, 魏春明, 等. 随钻测斜仪中传感器信号处理

(上接第 143 页)

国矿业大学出版社, 2009: 16–20.

- [4] GOODWAY B, CHEN T, DOWNTON J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters[C]//67th Annual International SEG meeting. 1997: 183–186.
- [5] 陈建江. AVO 三参数反演方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2007: 11–21.
- [6] GRAY D, GOODWAY B, CHEN Taiwen. Bridging the gap: Using AVO to detect changes in fundamental elastic constants[C]//69th Annual Internet Expanded Abstract. 1999: 852–855.
- [7] 张玉华. 基于岩石物理的 AVO 正演模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2007: 27–43.
- [8] 王一兵, 田广文, 李五忠. 中国煤层气选区评价标准探讨[J]. 地质通报, 2006, 25(9/10): 1104–1107.  
WANG Yibing, TIAN Guangwen, LI Wuzhong. Criteria for the evaluation of coalbed methane area selection in China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9/10): 1104–1107.
- [9] 王红岩, 李贵中, 李景明. 中国煤层气的富集特征[J]. 中国煤层气, 2006, 3(2): 7–10.  
WANG Hongyan, LI Guizhong, LI Jingming. Characteristics of CBM enrichment in China[J]. China Coalbed Methane, 2006, 3(2): 7–10.

技术研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2010, 35(2): 32–35.

ZHANG Yubo, MENG Yaohua, WEI Chunming, et al. Research on signal processing technique of sensors in MWD[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Science and Technology), 2010, 35(2): 32–35.

- [7] 王岚. 受控定向钻进测量系统三维校正问题研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2008.
- [8] 张兴梅, 高彩虹, 范月荣. 影响数字式连续测斜仪测量精度的因素分析[J]. 河南石油, 2002, 16(5): 39–43.  
ZHANG Xingmei, GAO Caihong, FAN Yuerong. An analysis of influential factors on accuracy of measurements of digital continuous clinometer[J]. Henan Petroleum, 2002, 16(5): 39–43.
- [9] 刘匡晓. 随钻测斜系统的数学模型分析及应用[J]. 石油仪器, 1996, 10(2): 37–39.  
LIU Kuangxiao. The analysis and application of the mathematical model on MWD[J]. Petroleum Instruments, 1996, 10(2): 37–39.
- [10] 余小平, 庾先国, 王洪辉. 基于 SOC 的高精度倾角测量系统的设计[J]. 电子设计工程, 2012, 18(12): 34–37.  
YU Xiaoping, TUO Xianguo, WANG Honghui. Design of high-accuracy tilt angle measurement system based on SOC[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 18(12): 34–37.
- [11] 郭鹏飞, 任章, 邱海韬, 等. 一种十二位置不对北磁罗盘标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 5(15): 598–601.  
GUO Pengfei, REN Zhang, QIU Haitao, et al. Twelve-position calibrating method without north reference for magnetic compass[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 5(15): 598–601.

(责任编辑 聂爱兰)

- [10] 彭苏萍, 高云峰. 含煤地层振幅随偏移距变化正演模型研究[J]. 科学通报, 2005, 50(1): 131–137.  
PENG Suping, GAO Yunfeng. Research of amplitude variation with offset by forward modeling[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(1): 131–137.
- [11] 彭苏萍, 杜文凤, 苑春方. 不同结构类型煤体地球物理特征差异分析和纵横波联合识别与预测方法研究[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1311–1322.  
PENG Suping, DU Wenfeng, YUAN Chunfang. Identification and forecasting of different structural coals by P-wave and S-wave from well-logging[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1311–1322.
- [12] 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 基于 Gray 近似的弹性波阻抗方程及反演[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 435–439.  
WANG Baoli, YIN Xingyao, ZHANG Fanchang. The elastic impedance equation based on Gray approximate and inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(4): 435–439.
- [13] 孙鹏远. 多属性 AVO 分析及弹性参数反演方法研究[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2004: 35–79.

(责任编辑 聂爱兰)