

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209690

旋转导向钻井工具近垂直姿态校正矩阵 误差的等角距均衡校正*

程为彬¹, 胡少兵¹, 张夷非¹, 陈雪菲¹, 李刚²

(1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室 武汉 430100; 2. 长江大学电子信息学院 荆州 434023)

摘要: 旋转导向钻井工具中姿态校正方法的校正点本身包含各种系统误差, 会引入校正矩阵误差, 是近垂直姿态下姿态角解算精度低的原因之一。平均均衡校正方法(ABC)可补偿校正矩阵误差, 但整体误差并不均匀。以等分角度间距设计校正点, 建立一种等角距均衡校正(EABC)模型, 推导校正矩阵误差表达式, 研究其引起的姿态角误差特征。对多组近垂直姿态的测试数据分别进行传统校正、平均均衡校正和等角距均衡校正, 结果表明: 等角距均衡校正后, 井斜角误差平均值均小于 0.012° , 井斜角误差峰峰值均小于 0.027° ; 工具面角误差平均值均小于 0.008° , 工具面角误差的峰峰值和标准差分别降低到平均均衡校正的54%~95%和40%~63%, 进一步提高垂直小井斜井段的姿态解算整体精度。

关键词: 旋转导向钻井; 姿态测量; 垂直姿态; 误差补偿; 均衡校正

中图分类号: TH761 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Equiangular interval balance correction of correction matrix error for rotary steering drilling tool under near-vertical position

Cheng Weibin¹, Hu Shaobing¹, Zhang Yifei¹, Chen Xuefei¹, Li Gang²

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, MOE, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
2. College of Electronics and Information, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: The system errors of the rotary steering drilling tool are included in the designed points of the correction matrix. The correction matrix error occurs, which is one cause of low precision attitude angle under near-vertical position compensated by the traditional correction (TC). Average balance correction (ABC) can compensate for the correction matrix error, but the posture error in the whole self-rotation cycle is still uneven. A kind of equiangular interval balance correction (EABC) model is formulated based on the equal angle interval, the expressions of correction matrix error are induced, those influence characteristics on the posture accuracy are investigated, and the experimental data are computed respectively with TC, ABC, and EABC. The computed results show that compensated by EABC, the average inclination angle errors are lower than 0.012° , and the peak-to-peak inclination angle errors are lower than 0.027° . The average tool face angle errors are lower than 0.008° , the peak-to-peak tool faces angle errors are reduced to 54~95 percent of those by ABC, and the standard deviations of tool face angle error are decreased to 40~63 percent of those by ABC, which means that EABC further reduces the absolute error under near-vertical positions, then improves the attitude angle accuracy.

Keywords: rotary steering drilling; posture measurement; vertical position; error compensation; balance correction

0 引言

向深地深海进军是我国油气勘探开发的战略新方

向, 通常的深井超深井钻井有较长的近垂直井段^[1]; 旋转导向钻井工具的姿态测量系统采用惯性测量单元, 针对刻度因子、零点、安装和位置等误差, 采用误差校正和误差滤波算法^[2-10], 解算出姿态参数, 进而得到井眼轨

迹^[11]。井越深井眼轨迹误差越大,常规随钻测量的深井超深井中,井眼轨迹位置误差可达数十米^[12];而在井斜角 $3^\circ \sim 5^\circ$ 以下时,姿态传感器测量信号微弱^[13-14],不可测、测不准,无法精确解算姿态。

光纤陀螺的民用范围广泛,但难适应井下高温、强振动环境。Gyrodata 全姿态固态陀螺非常先进,利用高温三轴陀螺可实现垂直、水平和定向位置的准确姿态参数^[15],但进口受禁。采用预置欧拉旋转的非正交坐标系^[13],可提高近垂直姿态的原始信噪比和测量精度,但仍有较强的非线性误差。与传统校正方法(traditional correction, TC)相比,均衡校正方法(balance correction, BC)可大幅度减小近垂直姿态解算误差,但校正点未被采用的象限内姿态误差较大;平均均衡校正(average balance correction, ABC)可抑制区域误差^[16-17],在大中井斜处姿态误差及其标准差比较平稳,而在近垂直小井斜处,姿态误差及其标准差仍较大。

姿态校正是消除各类系统误差的常用方法,利用特定姿态位置的测量值与其理论值的映射来求得,而特定姿态位置的测量值本身不可避免地伴随各类系统误差,这些误差被传递到校正矩阵中,又引起新的姿态角误差,前期文献对校正矩阵引起的姿态误差模型和消除方法研究较少。

基于均衡校正思想^[16-17],针对近垂直小井斜处的校正矩阵误差,提出等角距均衡校正方法(equangular interval balance correction, EABC),建立其校正矩阵误差模型,推导姿态角误差表达式,对测试数据进行均衡校正和效果对比。

1 校正矩阵误差建模

1.1 校正矩阵误差模型

导向钻井工具应用加(速度)计等传感器,采用北西天地理坐标系和 Z - Y - Z 旋转,任意井斜角 I 和工具面角 T 姿态下,理论测量值 \mathbf{G} 和实际测量值 \mathbf{M} 的关系为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin I \cos T \\ \sin I \sin T \\ \cos I \end{bmatrix} \times \mathbf{M} + \mathbf{n} = \mathbf{C} \times \mathbf{M} + \mathbf{n} = \mathbf{C} \times \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中: $g_i(i=x,y,z)$ 和 $m_i(i=x,y,z)$ 分别为理论测量值和实际测量值, \mathbf{C} 为校正矩阵, \mathbf{n} 为随机噪声。

那么,理论测量值的绝对误差 $d\mathbf{G}$ 可表示为:

$$d\mathbf{G} = d\mathbf{G}_1 + d\mathbf{G}_2 + d\mathbf{n} = \mathbf{C} \times d\mathbf{M} + d\mathbf{C} \times \mathbf{M} + d\mathbf{n} \quad (2)$$

式中: $d\mathbf{G}_1$ 由仪器误差 $d\mathbf{M}$ 引起, $d\mathbf{G}_2$ 由校正矩阵误差 $d\mathbf{C}$ 引起, $d\mathbf{n}$ 为随机噪声误差。

三位置校正的理论测量值矩阵 \mathbf{W} 可表示^[17]为:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_{x1} & S_{x2} & S_{x3} \\ S_{y1} & S_{y2} & S_{y3} \\ S_{z1} & S_{z2} & S_{z3} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \times \mathbf{S} \quad (3)$$

式中: $S_{ij}(i=x,y,z; j=1,2,3)$ 为校正位置测量值矩阵 \mathbf{S} 的三轴测量值, $C_{jk}(j,k=1,2,3)$ 为校正矩阵 \mathbf{C} 的各项元素。

求逆得到校正矩阵误差 $d\mathbf{C}$ ^[17]:

$$d\mathbf{C} = \mathbf{W} \times d\mathbf{S}^{-1} = \frac{\mathbf{W}}{|\mathbf{S}|} \times \begin{bmatrix} dS_{x1}^* & dS_{x2}^* & dS_{x3}^* \\ dS_{y1}^* & dS_{y2}^* & dS_{y3}^* \\ dS_{z1}^* & dS_{z2}^* & dS_{z3}^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $d\mathbf{S}^{-1}$ 为校正位置测量值矩阵 \mathbf{S} 的逆矩阵 \mathbf{S}^{-1} 的绝对误差矩阵, $dS_{ij}^*(i=x,y,z; j=1,2,3)$ 为伴随矩阵 \mathbf{S}_{ij}^* 的绝对误差, $|\mathbf{S}|$ 为测量值矩阵 \mathbf{S} 的行列式。

在不考虑测量仪器误差和随机误差的条件下,可得校正矩阵误差 $d\mathbf{C}$ 引起的加计绝对误差 $d\mathbf{G}_2$:

$$d\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} dg_{x2} \\ dg_{y2} \\ dg_{z2} \end{bmatrix} = d\mathbf{C} \times \mathbf{M} = \frac{\mathbf{W}}{|\mathbf{S}|} \times \begin{bmatrix} dS_{x1}^* & dS_{x2}^* & dS_{x3}^* \\ dS_{y1}^* & dS_{y2}^* & dS_{y3}^* \\ dS_{z1}^* & dS_{z2}^* & dS_{z3}^* \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: dg_{x2} 、 dg_{y2} 和 dg_{z2} 分别为 X 、 Y 和 Z 轴传感器因校正矩阵误差而引起的理论测量值绝对误差。

根据式(1),加计绝对误差 $d\mathbf{G}_2$ 引起的井斜角绝对误差 dI_2 和工具面角绝对误差 dT_2 为:

$$dI_2 = \frac{-dg_{z2}}{\sin I}$$

$$dT_2 = \frac{\sin I dg_{x2} + \cos I \cos T dg_{z2}}{-\sin^2 I \sin T} \quad (6)$$

$$\text{或 } dT_2 = \frac{\sin I dg_{y2} + \cos I \sin T dg_{z2}}{\sin^2 I \cos T}$$

1.2 常规校正矩阵误差引起的姿态误差

采用单轴最大、其他轴为零的常规校正时, \mathbf{W} 为单位矩阵。采用等精度的理想三轴加计时,它们在最大值和零值点处的测量误差分别相等,即有 $dS_{x1} = dS_{y2} = dS_{z3} = dS_x, dS_{x2} = dS_{x3} = dS_{y1} = dS_{y3} = dS_{z1} = dS_{z2} = dS_0$,并且 S_{x1} 、 S_{y2} 和 S_{z3} 十分接近于最大值, S_{x2} 、 S_{x3} 、 S_{y1} 、 S_{y3} 、 S_{z1} 和

$S_{2,2}$ 均十分接近于 0,则有:

$$\begin{aligned}
 dS_{11}^* &= S_{y2}dS_{z3} - S_{y3}dS_{z2} + S_{z3}dS_{y2} - S_{z2}dS_{y3} \approx 2dS_r \\
 dS_{12}^* &= S_{z2}dS_{x3} - S_{z3}dS_{x2} + S_{x3}dS_{z2} - S_{x2}dS_{z3} \approx -dS_0 \\
 dS_{13}^* &= S_{x2}dS_{y3} - S_{x3}dS_{y2} + S_{y3}dS_{x2} - S_{y2}dS_{x3} \approx -dS_0 \\
 dS_{21}^* &= S_{y3}dS_{z1} - S_{y1}dS_{z3} + S_{z1}dS_{y3} - S_{z3}dS_{y1} \approx -dS_0 \\
 dS_{22}^* &= S_{z3}dS_{x1} - S_{z1}dS_{x3} + S_{x1}dS_{z3} - S_{x3}dS_{z1} \approx 2dS_r \\
 dS_{23}^* &= S_{x3}dS_{y1} - S_{x1}dS_{y3} + S_{y1}dS_{x3} - S_{y3}dS_{x1} \approx -dS_0 \\
 dS_{31}^* &= S_{y1}dS_{z2} - S_{y2}dS_{z1} + S_{z2}dS_{y1} - S_{z1}dS_{y2} \approx -dS_0 \\
 dS_{32}^* &= S_{z1}dS_{x2} - S_{z2}dS_{x1} + S_{x2}dS_{z1} - S_{x1}dS_{z2} \approx -dS_0 \\
 dS_{33}^* &= S_{x1}dS_{y2} - S_{x2}dS_{y1} + S_{y2}dS_{x1} - S_{y1}dS_{x2} \approx 2dS_r
 \end{aligned} \quad (7)$$

代入式(5),可得只考虑校正矩阵误差 dC 引起的加计绝对误差 dG_2 为:

$$dG_2 = dC \times M \approx \begin{bmatrix} 2dS_r & -dS_0 & -dS_0 \\ -dS_0 & 2dS_r & -dS_0 \\ -dS_0 & -dS_0 & 2dS_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sin I \cos T \\ \sin I \sin T \\ \cos I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\sin I \cos T dS_r - (\sin I \sin T + \cos I) dS_0 \\ 2\sin I \sin T dS_r - (\sin I \cos T + \cos I) dS_0 \\ 2\cos I dS_r - \sin I (\cos T + \sin T) dS_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dg_{x2} \\ dg_{y2} \\ dg_{z2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(6),校正矩阵误差 dC 最终引起的倾斜角误差 dI_2 以及工具面角误差 dT_2 可表示为:

$$W_A = \begin{bmatrix} \sin I_c \cos T_1 & \sin I_c \cos T_2 & \sin I_c \cos T_3 \\ \sin I_c \sin T_1 & \sin I_c \sin T_2 & \sin I_c \sin T_3 \\ \cos I_c & \cos I_c & \cos I_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$dT_2 = \frac{-2\cos T}{\sin^2 I \sin T} dS_r + dS_0 + \frac{\cos I (1 + \cos^2 T + \sin T \cos T)}{\sin I \sin T} dS_0 \quad (10)$$

$$\text{或 } dT_2 = \frac{2\sin T}{\sin^2 I \cos T} dS_r - dS_0 - \frac{\cos I (1 + \sin^2 T + \sin T \cos T)}{\sin I \cos T} dS_0 \quad (11)$$

由式(9)~(11)可看出:1)解算姿态角的绝对误差 dI_2 和 dT_2 均包含一个不随 T 函数变化的误差项和若干随 T 周期函数变化的误差项;2)各三角函数在 T 周期内具有正负对称性,恒定项就是其固定偏置,也是平均值,可定义为井斜角误差平均值 dI_{2aver} 和工具面角误差平均值 dT_{2aver} ;3)同样,周期变化的姿态角误差最高值和最低值之差就是其峰峰值,可定义为井斜角误差峰峰值 dI_{2p-p} 和工具面角误差峰峰值 dT_{2p-p} ,则有:

$$\begin{aligned}
 dI_{2aver} &= -2\cot I dS_r \\
 dI_{2p-p} &= 2\sqrt{2}dS_0 \\
 dI_{2aver} &= dS_0
 \end{aligned} \quad (12)$$

1.3 平均均衡校正

根据解算的井斜角绝对误差 dI 的均匀性,均衡校正采取单一类型校正点^[17],其校正井斜角 I_c 保持不变,校正工具面角设计为 $T_n = 90^\circ \times n + 45^\circ$ ($n=0,1,2,3$),则有:

$$\begin{aligned}
 g_{z1} &= g_{z2} = g_{z3} = g_z \\
 dS_{z1} &= dS_{z2} = dS_{z3} = dS_z \\
 |g_{xi}| &= |g_{yj}| = g_{xy} \\
 dS_{xi} &= dS_{yj} = dS_m
 \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $i, j=1, 2, 3$; dS_m 为单一校正点加计测量值的绝对误差; dS_z 为当前井斜角下 Z 轴加计测量值的绝对误差。

每个工具面角周期内有 4 个均衡校正点,而校正矩阵只使用其中 3 个点,共可构成 4 种组合,无论选用何种组合,校正矩阵误差表达式均相同^[17]:

$$dC = 2\sin^2 I_c \begin{bmatrix} dS_z & 0 & -dS_m \\ 0 & dS_z & -dS_m \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

实验测试发现任意 3 个校正点组成的均衡校正矩阵均可较大减小姿态角绝对误差,但出现绝对误差最大值的区域与包含校正点的象限有关。将校正点组合所组成的 4 个均衡校正矩阵平均,得到平均均衡校正 ABC 方法,则加计的绝对误差表示为:

$$\begin{aligned}
 dG_2 &= dC \times M \approx 2\sin^2 I_c \begin{bmatrix} dS_z & 0 & -dS_m \\ 0 & dS_z & -dS_m \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sin I \cos T \\ \sin I \sin T \\ \cos I \end{bmatrix} = 2\sin^2 I_c \begin{bmatrix} \sin I \cos T dS_z - \cos I dS_m \\ \sin I \sin T dS_z - \cos I dS_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)
 \end{aligned}$$

解算后井斜角、工具面角的绝对误差^[17]为:

$$\begin{aligned}
 dI_2 &= \frac{dg_z}{-\sin I} = 0 \\
 dT_2 &= -2\sin^2 I_c \frac{\sin I \cos T dS_z - \cos I dS_m}{\sin I \cdot \sin T} \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$dI_{2aver} = 0$$

$$dI_{2p-p} = 0$$

$$dT_{2aver} = 0$$

可见不考虑测量误差和随机误差时,ABC 校正能消除井斜角误差平均值 dI_{2aver} 、峰峰值 dI_{2p-p} 及工具面角误差平均值 dT_{2aver} ,而工具面角误差峰峰值 dT_{2p-p} 仍存在,实验测试时其值仍然较大。当加计各处精度相等时,如 $dS_z = dS_m$,工具面角误差也不会为 0。

从式(5)和(6)、(8)和(9)~(11)及(15)和(16)可以看出,解算姿态角的绝对误差与 dG_2 密切相关;特别地,式(15)中 dg_{z2} 为 0、 dg_{x2} 和 dg_{y2} 较小时,姿态角绝对

误差变小。由于各姿态下的加计测量值不变, $d\mathbf{G}_2$ 大小与 $d\mathbf{C}$ 有关; 当 $d\mathbf{C}$ 各行数值较小时, 校正矩阵引起的解算姿态角绝对误差小。

2 等角距均衡校正建模

2.1 等角距均衡校正 (EABC) 思想

文献[17]的实验测试和姿态解算证明 ABC 校正方法的有效性, 但部分区域误差仍然较大, 且有明显的周期起伏。借鉴多位置系统误差的校正方法^[18], 提出一种等角距均衡校正 EABC 方法, 努力消除近垂直小井斜区域姿态绝对误差的非均匀性。

根据井斜角在全姿态区域的高精度一致性, 在垂直小井斜区域, 校正井斜角 I_c 不变, 而校正工具面角在全周期内均匀设计为 12 个等角度间距点, 角间距 a_0 为 30° , 则校正工具面角为 $T_n = n \times a_0 + 0.5 \times a_0$ ($n=0, 1, 2, \dots, 11$)。由于每个象限有 3 个校正点, 每点 1 个三轴测量数据, 则各象限内有:

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{C}_i \times \mathbf{S}_i \quad (17)$$

式中: \mathbf{W}_i 、 \mathbf{C}_i 和 \mathbf{S}_i ($i=A, B, C, D$) 分别为第 1、2、3 和 4 象限内校正点的理论测量值矩阵、校正矩阵和实际测量值矩阵。

校正井斜角 I_c 不变, 则 T 的各象限内存在:

$$\begin{aligned} g_{z1} &= g_{z2} = g_{z3} = g_{z4} = g_z \\ dS_{x1} &= dS_{x2} = dS_{x3} = dS_{x4} = dS_x \\ |dS_{x1}| &= |dS_{x3}| \\ |dS_{x3}| &= |dS_{y1}| \\ |dS_{x2}| &= |dS_{y2}| \end{aligned} \quad (18)$$

2.2 EABC 误差模型

以第 1 象限 EABC 为例, 在解算姿态精度相近的井斜角区间内, 校正井斜角 I_c 不变, 3 个工具面角校正点设计分别为 $T_1 = 0.5a_0 = 15^\circ$, $T_2 = 1.5a_0 = 45^\circ$, $T_3 = 2.5a_0 = 75^\circ$, 则存在:

$$\begin{aligned} g_{x1} &= g_{y3}, g_{x3} = g_{y1}, g_{x2} = g_{y2} \\ dS_{x1} &= dS_{y3} = dS_a \\ dS_{x3} &= dS_{y1} = dS_b \\ dS_{x2} &= dS_{y2} = dS_m \end{aligned} \quad (19)$$

并得到校正点测量值矩阵为:

$$\mathbf{W}_A = \begin{bmatrix} \sin I_c \cos T_1 & \sin I_c \cos T_2 & \sin I_c \cos T_3 \\ \sin I_c \sin T_1 & \sin I_c \sin T_2 & \sin I_c \sin T_3 \\ \cos I_c & \cos I_c & \cos I_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

综合式 (18) ~ (20), 可得:

$$\begin{aligned} dS_{x1}^* &= S_{y2} dS_{z3} - S_{y3} dS_{z2} + S_{z3} dS_{y2} - S_{z2} dS_{y3} = \\ &= \sin I_c (\sin T_2 - \sin T_3) dS_z + \cos I_c (dS_m - dS_a) = \\ &= -k_1 \sin I_c dS_z + \cos I_c (dS_m - dS_a) \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $k_1 = \cos(2.5a_0) = 0.25882$ 。

依次计算, 可得:

$$dS_{x2}^* = -k_2 \sin I_c dS_z + \cos I_c (dS_b - dS_m) \quad (22)$$

$$dS_{x3}^* = \sin I_c (k_3 dS_a - k_3 dS_b + k_3 dS_m)$$

$$dS_{y1}^* = k_3 \sin I_c dS_z + \cos I_c (dS_a - dS_b)$$

$$dS_{y2}^* = k_3 \sin I_c dS_z + \cos I_c (dS_a - dS_b) \quad (23)$$

$$dS_{y3}^* = 2 \sin I_c (-k_4 dS_a + k_1 dS_b)$$

$$dS_{z1}^* = -k_2 \sin I_c dS_z + \cos I_c (dS_b - dS_m)$$

$$dS_{z2}^* = -k_1 \sin I_c dS_z + \cos I_c (dS_m - dS_a) \quad (24)$$

$$dS_{z3}^* = \sin I_c (k_3 dS_a - k_3 dS_b + k_3 dS_m)$$

式中: $k_2 = \cos(1.5a_0) - \cos(2.5a_0) = 0.44829$,

$k_3 = \cos(1.5a_0) = 0.70710$, $k_4 = \cos(0.5a_0) = 0.96593$ 。

综合得到第一象限内的校正矩阵误差:

$$d\mathbf{C}_A = \mathbf{W}_A \cdot d\mathbf{S}_A^{-1} = \begin{bmatrix} dC_{A11} & dC_{A12} & dC_{A13} \\ dC_{A21} & dC_{A22} & dC_{A23} \\ dC_{A31} & dC_{A32} & dC_{A33} \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中,

$$\begin{aligned} dC_{A11} &= k_3 \sin^2 I_c dS_z + 0.5 \sin 2I_c (-k_1 dS_a - \\ &= k_2 dS_b + k_3 dS_m) \\ dC_{A12} &= 0.5 \sin 2I_c (k_2 dS_a + k_1 dS_b - k_3 dS_m) \\ dC_{A13} &= \sin^2 I_c (-k_6 dS_a - k_6 dS_b + k_7 dS_m) \\ dC_{A21} &= 0.5 \sin 2I_c (k_2 dS_a + k_1 dS_b - k_3 dS_m) \\ dC_{A22} &= k_3 \sin^2 I_c dS_z + 0.5 \sin 2I_c (-k_1 dS_a - \\ &= k_2 dS_b + k_3 dS_m) \end{aligned} \quad (26)$$

$k_2 dS_b + k_3 dS_m)$

$$dC_{A23} = \sin^2 I_c (-k_6 dS_a - k_6 dS_b + k_7 dS_m)$$

$$dC_{A31} = 0$$

$$dC_{A32} = 0$$

$$dC_{A33} = \sin 2I_c (-k_1 dS_a - k_2 dS_b + k_3 dS_m)$$

式中: $k_5 = 1 - \cos(a_0) = 0.13397$, $k_6 = \cos(2a_0) = 0.50000$,

$k_7 = \cos(a_0) = 0.86603$ 。

2.3 传感器等精度时的姿态误差

当理想加计各处等精度时, 如 $dS_z = dS_a = dS_b = dS_m$, 式(25)简化为:

$$d\mathbf{C}_A = 0.13397 \sin^2 I_c \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} dS_z \quad (27)$$

根据式(5), EABC 的理想加计绝对误差为:

$$d\mathbf{G}_{2A} = 0.133\ 97\sin^2 I_c \begin{bmatrix} dS_z & 0 & -dS_z \\ 0 & dS_z & -dS_z \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sin I \cos T \\ \sin I \sin T \\ \cos I \end{bmatrix} = 0.133\ 97\sin^2 I_c \begin{bmatrix} (\sin I \cos T - \cos I) dS_z \\ (\sin I \sin T - \cos I) dS_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dg_{x2} \\ dg_{y2} \\ dg_{z2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

带入式(6), EABC 后井斜角绝对误差 dI_2 和工具面角绝对误差 dT_2 为:

$$dI_2 = 0$$

$$dT_2 = \frac{0.133\ 97\sin^2 I_c (\sin I \cos T - \cos I) dS_z}{-\sin I \sin T} \quad (29)$$

$$\text{或 } dT_2 = \frac{0.133\ 97\sin^2 I_c (\sin I \sin T - \cos I) dS_z}{\sin I \cos T}$$

与式(16)相比,理想等精度加计的解算工具面角绝对误差的系数理论上可减小 14.9 倍。

2.4 传感器各处不等精度时的姿态误差

当加计各处精度不等时,即使 dS_a 、 dS_b 与 dS_m 不相等, dC_{A13} 和 dC_{A23} 项中 dS_a 、 dS_b 和 dS_m 的系数之和为 0.133 97, 其它项中 dS_a 、 dS_b 和 dS_m 的系数之和为 0, 也可降低传感器自身非线性误差项的数值。

dS_z 项用于补偿 Z 轴测量误差, EABC 模型中该项系数为 $1 - \cos(a_0) = 0.133\ 97$, 幅值减小为 ABC 校正时的 6.7%。

dS_m 项用于校正 $T = 1.5a_0$ 处附近的非线性误差, EABC 模型中拆分为 dS_m 、 dS_a 和 dS_b 项, 其中 dS_m 项系数幅度减小为 ABC 校正时的 35%~43%。

增加的 dS_a 和 dS_b 项可减小 $T = 0.5a_0$ 和 $T = 2.5a_0$ 处附近的传感器非线性误差, 其系数符号与 dS_m 项系数符号相反且系数差为 0 或 0.133 97, 可在 dC 矩阵不同项中消弱相应的误差项, 从而降低姿态角的绝对误差。

综上所述, 校正矩阵误差与校正点密切相关, 通过等角距均衡设计校正点, 使校正误差矩阵各项数值降低, 最终减小并均衡解算姿态的绝对误差。

其他象限的校正矩阵误差及其引起的姿态角绝对误差特征类似, 这里不再一一推导。

3 均衡校正测试与对比

选用 DX-4C 型测斜仪 (I 精度: $\pm 0.15^\circ$; T 精度: $\pm 2.5^\circ$ ($1^\circ \leq I < 3^\circ$ 时), $\pm 1.5^\circ$ ($I \geq 3^\circ$ 时)), 其挠性石英加计(模拟输出)的灵敏度系数为 5 V/g 。采用多通道 6-1/2 位的 M300 数据采集开关系统, 数据存储为 CSV 文件。采用含 17 位编码器的 TX-4S 三轴检验台, 其姿态角分辨

率为 0.018° 。采用 DP832A 可编程线性电源供电, 其直流纹波指标小于 $350\ \mu\text{Vrms}/2\ \text{mVpp}$ 。

不同垂直小井斜姿态下, 每个工具面角 T 姿态位置上连续测量 4 次, 取其平均值为最终测量值, 并保留 5 位小数点, 再分别进行 TC 常规校正、ABC 平均均衡校正和 EABC 等角距均衡校正。

3.1 常规校正

近垂直小井斜处, TC 常规校正的姿态绝对误差如图 1 所示, 横轴为间隔 5° 的工具面角 T 测量点位置序号, 一周内共有 73 点数据; 纵轴为解算的姿态绝对误差 dI 和 dT , 单位均为 ($^\circ$)。

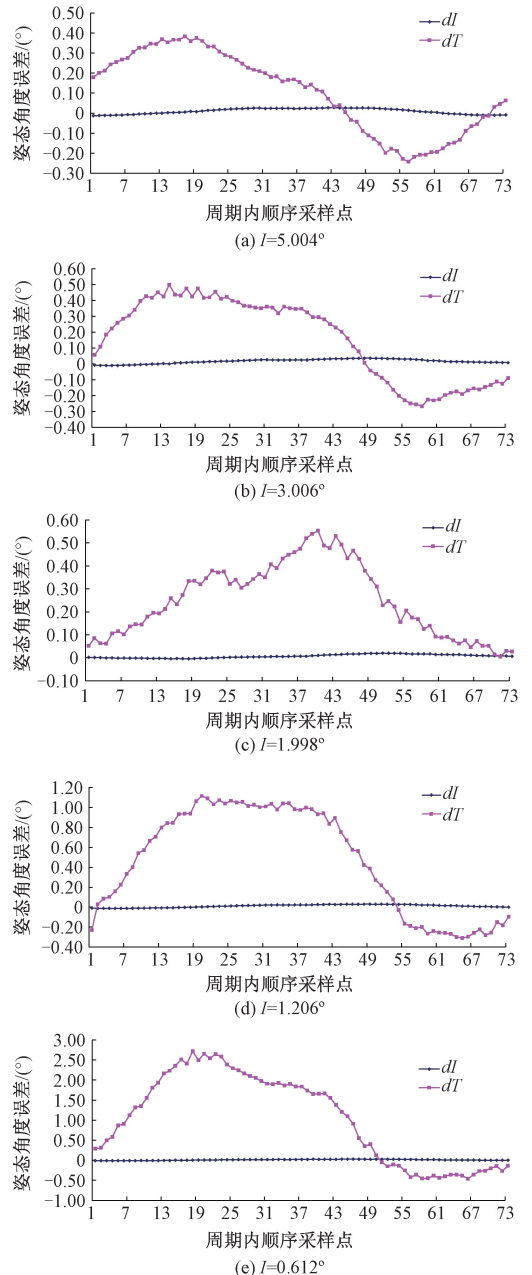


图 1 近垂直姿态常规三位置校正姿态误差 ($^\circ$)

Fig. 1 Attitude error ($^\circ$) of near-vertical position with TC

用 σ_I 和 σ_T 分别表示绝对误差 dI 和 dT 的标准差, TC 校正后解算的姿态角误差参数如表 1 所示。

表 1 常规校正的近垂直姿态误差

Table 1 Attitude errors of TC under near-vertical

position		(°)				
I	dI_{aver}	dI_{p-p}	dT_{aver}	dT_{p-p}	σ_I	σ_T
5.004	0.009 61	0.040 65	0.101 60	0.623 73	0.013 68	0.200 00
3.006	0.017 03	0.046 55	0.157 04	0.764 83	0.013 33	0.255 94
1.998	0.006 75	0.024 76	0.251 32	0.547 83	0.007 68	0.156 85
1.206	0.011 51	0.042 58	0.462 76	1.423 36	0.014 04	0.518 78
0.612	0.011 24	0.038 56	1.037 28	3.178 02	0.012 46	1.090 28

TC 校正后,井斜角绝对误差的平均值在 $0.017\ 03^\circ$ 以下,峰峰值在 $0.046\ 55^\circ$ 以内;工具面角绝对误差较分散,其平均值在 $0.101\ 60^\circ \sim 1.037\ 28^\circ$ 之间,峰峰值在 $0.623\ 73^\circ \sim 3.178\ 02^\circ$ 之间。整体上看,工具面角绝对误差比井斜角绝对误差大 9.2 倍以上。

TC 校正后,解算的工具面角误差的平均值、峰峰值和标准差均很大,并随井斜角变小而逐步增大。在井斜角 1.998° 以下时,工具面角误差的平均值、峰峰值和标准差均急剧增大;同时工具面角误差曲线的三角函数特征明显。

3.2 平均均衡校正

采用 ABC 平均均衡校正方法对图 1 中不同小井斜下的姿态数据进行校正,解算后的井斜角和工具面角绝对误差如图 2 所示,姿态误差参数如表 2 所示。

图 2 中工具面角误差曲线的三角函数特征仍较明显,随机误差也逐步明显。由表 2 可知,ABC 校正后,近垂直小井斜区域的井斜角和工具面角误差均大为降低,但工具面角绝对误差仍有起伏、整体不均匀。

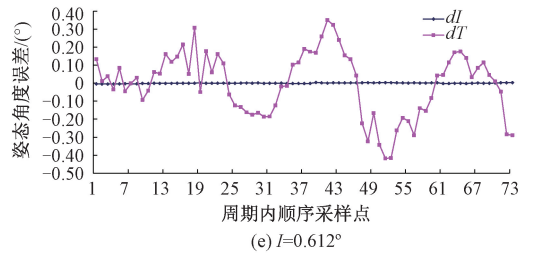
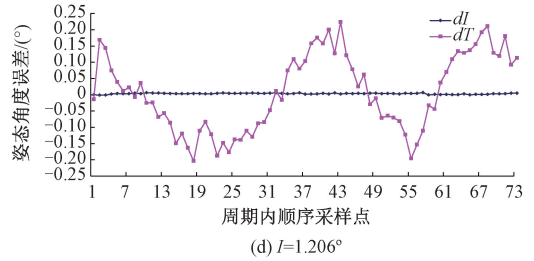
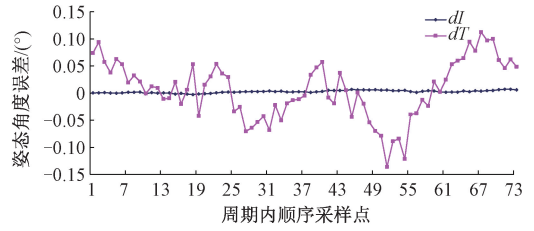


图 2 近垂直姿态平均均衡校正姿态误差

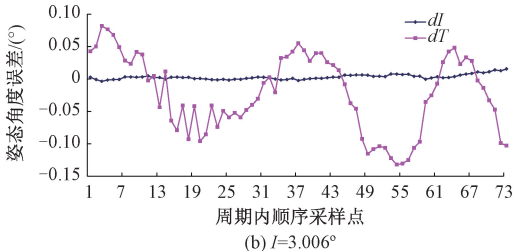
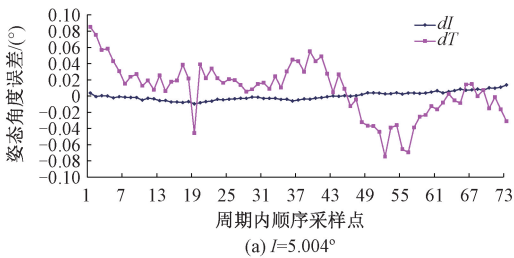
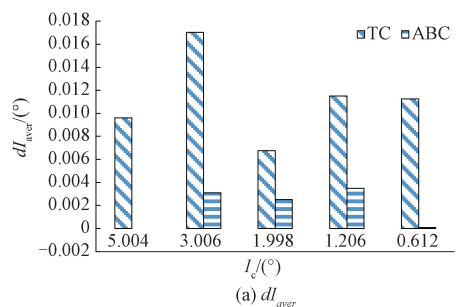
Fig. 2 Attitude error of near-vertical position with ABC

表 2 平均均衡校正的近垂直姿态误差表

Table 2 Attitude errors of ABC at near-vertical position

position		(°)				
I	dI_{aver}	dI_{p-p}	dT_{aver}	dT_{p-p}	σ_I	σ_T
5.004	-0.000 01	0.023 37	0.007 69	0.159 63	0.005 18	0.030 94
3.006	0.003 09	0.019 08	-0.022 35	0.213 38	0.003 89	0.058 33
1.998	0.002 52	0.009 68	0.005 77	0.248 46	0.002 35	0.053 23
1.206	0.003 50	0.007 79	0.007 35	0.427 75	0.001 70	0.118 11
0.612	0.000 09	0.008 04	-0.004 28	0.767 58	0.001 89	0.176 52

将 ABC 校正和 TC 校正的姿态角绝对误差分项对比如图 3 所示。



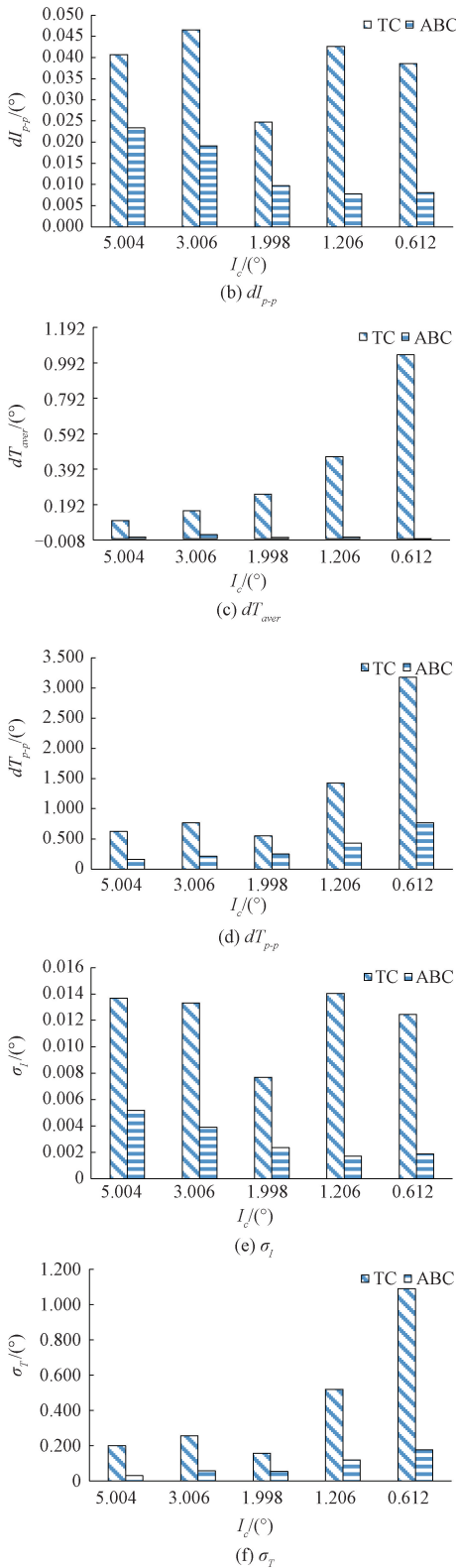


图 3 平均均衡校正与传统校正的姿态误差对比
 Fig. 3 Attitude error comparisons of ABC with TC

ABC 校正后, dI 平均值小于 0.00350° , dI 峰峰值小于 0.02337° , σ_I 小于 0.00518° , 各姿态角绝对误差指标

数值分别降低到 TC 校正的 $0.1\% \sim 30\%$ 、 $18\% \sim 57\%$ 和 $15\% \sim 38\%$ 。同样, dT 平均值小于 0.02235° , dT 峰峰值在 $0.15963^\circ \sim 0.76758^\circ$ 之间, σ_T 在 $0.03094^\circ \sim 0.17652^\circ$ 之间, 各姿态角绝对误差指标数值分别降低到 TC 校正时的 $0.4\% \sim 14\%$ 、 $24\% \sim 45\%$ 和 $15\% \sim 34\%$ 。

可见 ABC 校正后井斜角精度又有提高, 工具面角绝对误差和标准差也大幅减小, 其精度得到较大提高。

3.3 等角距均衡校正

采用 EABC 校正方法同样对图 1 中 5 组不同小井斜下的所有姿态数据进行校正, 解算后的井斜角和工具面角绝对误差曲线如图 4 所示。

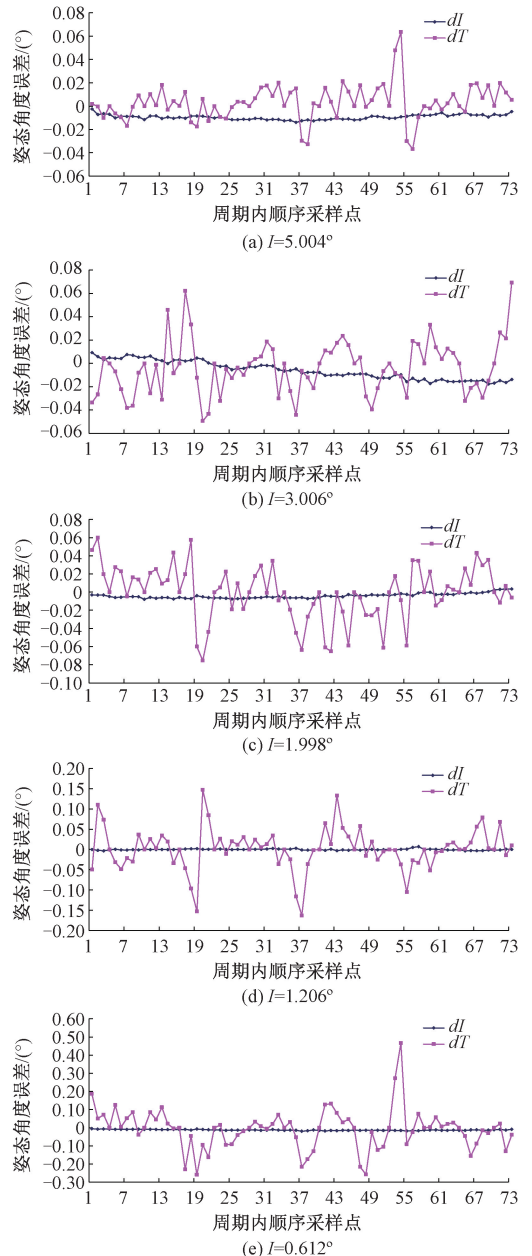


图 4 近垂直姿态等角距均衡校正姿态误差
 Fig. 4 Attitude error of near-vertical position with EABC

与图1和2相比,图4中工具面角绝对误差曲线的三角函数特征明显减弱,其峰值幅度也大幅降低;同时随机误差特征较明显。

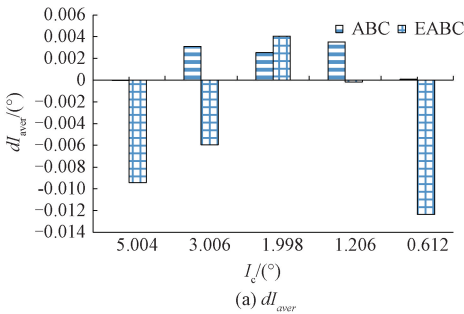
同样,EABC校正的各近垂直小井斜姿态下井斜角和工具面角误差的各性能参数如表3所示。

表3 等角距均衡校正的近垂直姿态误差表

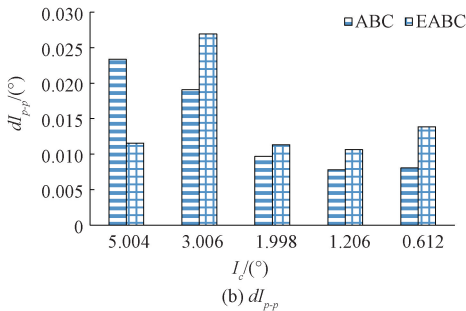
Table 3 Attitude errors of EABC at near-vertical position (°)

I	dI_{aver}	dI_{p-p}	dT_{aver}	dT_{p-p}	σ_I	σ_T
5.004	-0.009 43	0.011 56	0.003 21	0.100 31	0.001 95	0.015 44
3.006	-0.005 94	0.026 93	-0.004 29	0.118 61	0.007 54	0.023 12
1.998	0.004 06	0.011 34	-0.000 95	0.135 49	0.002 72	0.029 91
1.206	-0.000 17	0.010 64	0.001 51	0.309 43	0.001 70	0.052 64
0.612	-0.012 36	0.013 84	-0.008 31	0.725 48	0.002 77	0.110 38

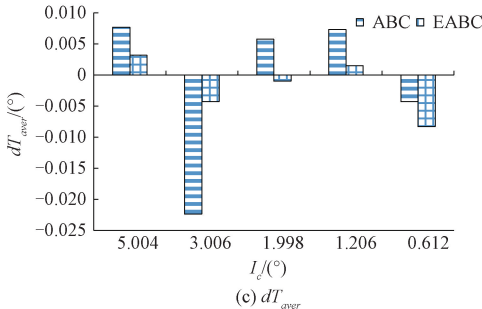
EABC和ABC校正的姿态误差各指标对比如图5所示。EABC校正后, dI 平均值小于 $0.012\ 36^\circ$, dI 峰峰值小于 $0.026\ 93^\circ$, σ_I 小于 $0.007\ 54^\circ$,整体井斜角误差及其精度与ABC校正基本相当。



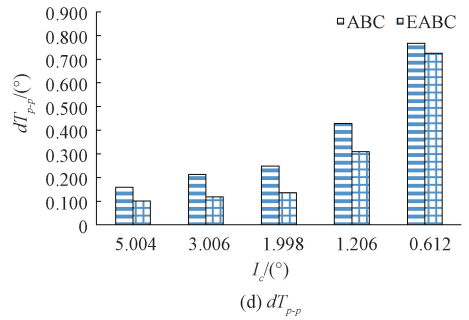
(a) dI_{aver}



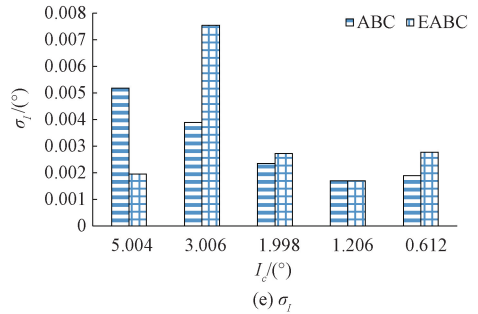
(b) dI_{p-p}



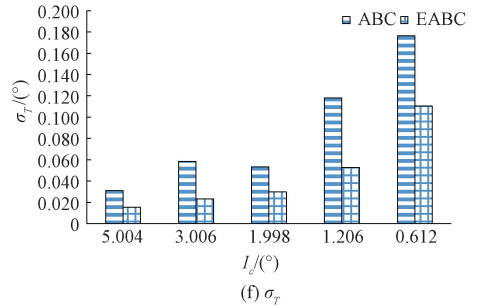
(c) dT_{aver}



(d) dT_{p-p}



(e) σ_T



(f) σ_T

图5 等角距均衡校正和平均均衡的姿态误差对比
Fig. 5 Attitude error comparisons with EABC and ABC

同样, dT 平均值数值小于 $0.008\ 31^\circ$, dT 峰峰值在 $0.100\ 31^\circ \sim 0.725\ 48^\circ$ 之间, σ_T 在 $0.015\ 44^\circ \sim 0.110\ 38^\circ$ 之间,各误差指标分别降低到ABC时的 $0.16\% \sim 42\%$ ($I=0.612^\circ$ 除外)、 $55\% \sim 95\%$ 和 $40 \sim 63\%$ 。总体上,EABC对工具面角校正效果更好。

在 $I=0.612^\circ$ 处,EABC后的工具面角绝对误差峰峰值为 $0.725\ 48^\circ$,与 $I=5.004^\circ$ 处TC校正的 $0.623\ 73^\circ$ 相近,说明近垂直小井斜处的姿态解算精度达到大中井斜处TC传统校正的姿态精度。

比较而言,EABC后姿态角误差整体均匀,周期性的姿态误差得到消除,均衡效果更好。

4 结 论

分析校正矩阵误差的形成和影响,建立等角距均衡校正模型,推导校正矩阵误差表达式,研究其对姿态解算绝对误差的影响特征,对多组近垂直姿态下的测试数据进行3种校正方法姿态解算性能对比,结果表明等角

距均衡校正可较好地消除系统误差,较大地提高近垂直姿态参数精度及其均匀性。

参考文献

- [1] SUN W G, SONG W Q, NI H J, et al. Progress of automatic vertical drilling systems: Selection for deep wells with high temperature and pressure in China[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1965(1): 012016.
- [2] 汪跃龙,李凌云,贺艳,等.近钻头钻具姿态测量的多传感器最小二乘原理加权融合方法[J].石油学报,2021,42(4):500-507.
- WANG Y L, LI L Y, HE Y, et al. A multi-sensor weighted least squares weighted fusion method for attitude measurement of near-bit drilling tool[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021,42(4):500-507.
- [3] XUE Q L, HENRY L, WANG R H, et al. Continuous real-time measurement of drilling trajectory with new state-space models of Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(1):144-154.
- [4] YANG J X, YANG C, JIANG J B. A robust mag/INS-based orientation estimation algorithm for measurement while drilling [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7971-7980.
- [5] CHANG H T, CHANG J Y. Sensor glove based on novel inertial sensor fusion control algorithm for 3D real-time hand gestures measurements [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 658-666.
- [6] 王岁儿,杨功流,王丽芬,等.一种IMU全零偏快速标定方法[J].中国惯性技术学报,2020,28(3):316-322.
- WANG S ER, YANG G L, WANG L F, et al. A fast calibration method for the all biases of IMU [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020,28(3): 316-322.
- [7] 班朝,任国营,王斌锐,等.基于IMU的机器人姿态自适应EKF测量算法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(2):33-39.
- BAN CH, REN G Y, WANG B R, et al. Research on self-adaptive EKF algorithm for robot attitude measurement based on IMU [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2):33-39.
- [8] 李荣冰,鄢俊胜,刘刚,等.基于LSTM深度神经网络的MEMS-IMU误差模型及标定方法[J].中国惯性技术学报,2020,28(2):165-171.
- LI R B, YAN J SH, LIU G, et al. MEMS-IMU error model and calibration method based on LSTM deep neural network [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020,28(2):165-171.
- [9] 耿艳峰,孙建,王伟亮,等.旋转导向钻井工具姿态测量陀螺仪故障估计与处理方法[J].中国惯性技术学报,2021,29(2):273-280.
- GENG Y F, SUN J, WANG W L, et al. Fault estimation and processing method of attitude measurement gyroscope for rotary steerable tools [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021,29(2):273-280.
- [10] 刘自理,严卫生,康思民,等.导向钻井工具冗余姿态测量与系统重构方法[J].石油学报,2015,36(11):1433-1440.
- LIU Z L, YAN W SH, KANG S M, et al. Redundant posture measurement and system reconfiguration method of steering drilling tool [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11):1433-1440.
- [11] 刘修善.导向钻具定向造斜方程及井眼轨迹控制机制[J].石油勘探与开发,2017,44(5):788-793.
- LIU X SH. Directional deflection equations for steerable drilling tools and the control mechanism of wellbore trajectory [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(5):788-793.
- [12] 刘修善.井眼轨迹不确定性表征方法[J].石油勘探与开发,2019,46(2):391-396.
- LIU X SH. Borehole trajectory uncertainty and its characterization [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019,46(2):391-396.
- [13] 程为彬,潘萌,汤楠,等.基于预置欧拉旋转的垂直姿态测量[J].仪器仪表学报,2014,35(8):1817-1822.
- CHENG W B, PAN M, TANG N, et al. Vertical attitude measurement based on Euler's pre-rotation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8):1817-1822.
- [14] 程贤箬,程为彬,高怡,等.垂直姿态位置误差的虚拟正交建模与均衡补偿[J].石油学报,2017,38(7):840-845.
- CHENG X R, CHENG W B, GAO Y, et al. Virtual orthogonal modeling of vertical-posture position error and

isostatic compensation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(7):840-845.

- [15] BEATTIE K, SHOUP R, WESTON J, et al. All-attitude gyro while drilling technology provides accurate surveys in high angle east/west directional wellbores delivering reduced costs and increasing the length of the producing zone[J]. *SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings*, 2015(January), 1091-1104.
- [16] CHENG W B, HU S B, ZHANG M J, et al. Near-vertical attitude determination based on balance correction[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, DOI: 10.1109/TIM.2021.3070888.
- [17] 程为彬,陈烛姣,张夷非,等. IMU 姿态误差均衡校正模型与验证 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9): 202-213.
CHENG W B, CHEN ZH J, ZHANG Y F, et al. Balance correction and verification of IMU posture error [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(9):202-213.
- [18] 孙佳,邹靖,胡桐. 基于 24 位置的 MEMS 惯性传感器快速标定方法 [J]. *压电与声光*, 2019, 41(3): 440-444.
SUN J, ZOU J, HU T. A fast calibration method for MEMS inertial sensors based on 24-position [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2019, 41(3): 440-444.

作者简介



程为彬,1991年、1994年和2007年分别于长江大学、石油大学(北京)和西安理工大学获得学士、硕士和博士学位。现为长江大学地球物理与石油资源学院教授,主要研究方向为油气井下智能测控技术。

E-mail: wbcheng@yangtzeu.edu.cn

Cheng Weibin received his B. Sc. degree from Yangtze University in 1991, received his M. Sc. degree from China University of Petroleum in 1994, and received his Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2007. He is currently a professor at Yangtze University. His main research interests include intelligent measurement and control for downhole oil and gas.



胡少兵(通信作者),2001年、2006年和2018年于长江大学分别获得学士、硕士和博士学位。现为长江大学地球物理与石油资源学院讲师,主要研究方向为石油仪器与测井。

E-mail: hushaobing@yangtzeu.edu.cn

Hu Shaobing (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Yangtze University in 2001, 2006, and 2018, respectively. He joined the school of Geophysics and Petroleum Resources at Yangtze University. His main research interests include petroleum instruments and well logging.