



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

基于数据融合的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法

宋晓健 郑邦贤 谭勇志 黄秉亚 马鸿彦 董晨曦

Dynamic Measurement Method of Near-Bit Borehole Trajectory Parameters Based on Data Fusion

SONG Xiaojian, ZHENG Bangxian, TAN Yongzhi, HUANG Bingya, MA Hongyan, DONG Chenxi

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近钻头伽马成像仪测量结果环境校正方法研究

Research on Environmental Correction Method of Measurement Results from Near-Bit Gamma Imagers

石油钻探技术. 2021, 49(3): 142–150 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021024>

基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法

Geosteering Methods of a Dynamic Geological Model Based on Kalman Filter

石油钻探技术. 2021, 49(1): 113–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020135>

近钻头伽马高精度实时成像技术研究与应用

Research and Application of High-Precision Real-Time Imaging Technology with Near-Bit Gamma

石油钻探技术. 2021, 49(3): 135–141 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021022>

近钻头随钻伽马成像快速正弦曲线拟合方法

Rapid Sinusoidal Fitting Method for Near-Bit Gamma Imaging While Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(6): 116–122 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019101>

井眼轨迹的主法线角及其方程

Principal Normal Angle of Borehole Trajectory and Its Equation

石油钻探技术. 2019, 47(3): 103–106 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019052>

涪陵江东与平桥区块页岩气水平井井眼轨迹控制技术

Wellbore Trajectory Control Techniques for Horizontal Well in the Jiangdong and Pingqiao Blocks of the Fuling Shale Gas Field

石油钻探技术. 2017, 45(6): 14–18 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201706003>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021054

引用格式: 宋晓健, 郑邦贤, 谭勇志, 等. 基于数据融合的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 38-44.

SONG Xiaojian, ZHENG Bangxian, TAN Yongzhi, et al. Dynamic measurement method of near-bit borehole trajectory parameters based on data fusion [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 38-44.

基于数据融合的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法

宋晓健, 郑邦贤, 谭勇志, 黄秉亚, 马鸿彦, 董晨曦

(中国石油集团渤海钻探工程有限公司定向井技术服务分公司, 天津 300280)

摘要: 采用三轴加速度计、磁通门和速率陀螺测量系统随钻测量井眼轨迹参数时, 由于旋转、振动和磁干扰等因素的影响, 造成测量结果存在较大偏差, 无法满足随钻地质导向的要求。为此, 针对三轴加速度计、磁通门和速率陀螺随钻测量系统, 建立了基于四元数井眼轨迹参数测量模型, 并依据状态方程和量测方程, 应用 3 个捷联式卡尔曼滤波器和磁干扰校正系统对加速度计、磁通门信号进行滤波、校正, 形成了基于数据融合的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法。实验室模拟试验和现场实钻表明, 采用该测量方法测得的井眼轨迹参数精度大幅提高。研究表明, 采用基于数据融合的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法可以消除旋转、振动和磁干扰对三轴加速度计、磁通门和速率陀螺随钻测量系统随钻测量结果的影响, 提高该测量系统随钻测量的精度, 满足随钻地质导向的要求。

关键词: 近钻头; 井眼轨迹; 动态测量; 数学模型; 捷联式卡尔曼滤波

中图分类号: TE27+1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)01-0038-07

Dynamic Measurement Method of Near-Bit Borehole Trajectory Parameters Based on Data Fusion

SONG Xiaojian, ZHENG Bangxian, TAN Yongzhi, HUANG Bingya, MA Hongyan, DONG Chenxi

(Directional Well Technology Service Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin, 300280, China)

Abstract: When borehole trajectory parameters are measured while drilling by a measurement system of triaxial accelerometers, fluxgates, and rate gyros, the results show huge deviations due to the influence of factors such as rotation, vibration, and magnetic interference, etc. As a result, the requirements of geosteering while drilling cannot be met. Considering this, a quaternion-based measurement model of borehole trajectory parameters was built for the above measurement system. In addition, according to state equations and measurement equations, three strap-down Kalman filters and a correction system for magnetic interference were applied to filter and correct accelerometer and fluxgate signals. In this way, a dynamic measurement method of near-bit borehole trajectory parameters based on data fusion was developed. The simulations in the laboratory and on-site drilling showed that the measurement precision of borehole trajectory parameters was significantly improved by using the proposed method. The research indicates that the proposed method can eliminate the influence of rotation, vibration, and magnetic interference on the results of the measurement system of triaxial accelerometers, fluxgates, and rate gyros while drilling to upgrade the measurement precision for geosteering, thus meeting the requirements of geosteering while drilling.

Key words: near-bit; borehole trajectory; dynamic measurement; mathematical model; strap-down Kalman filtering

现代地质导向钻井过程中, 需采用近钻头随钻边界探测技术动态测量近钻头井眼轨迹参数(井斜角、方位角和工具面角), 根据随钻成像预估地层和井眼变化趋势, 据此调整钻头方向, 提高油层钻遇

率。由于振动、旋转、磁干扰等因素的影响, 导致测量的近钻头井眼轨迹参数出现很大误差, 严重影响了随钻测量精度, 出现钻穿油层等情况。

目前旋转导向动态测量技术都掌握在国外油田技

收稿日期: 2021-03-28; 改回日期: 2021-11-15。

作者简介: 宋晓健(1986—), 男, 河北献县人, 2009 年毕业于天津大学测控技术与仪器专业, 高级工程师, 主要从事人工智能与定向井相结合的研究。E-mail: tju210sjx@126.com。

技术服务公司手中, 不对外公开, 因此, 未见到国外有井眼轨迹参数动态测量技术的报道。国内杨全进等人^[1]建立了一种旋转导向系统有色噪声的改进无迹卡尔曼滤波方法, 该算法限制条件较多。高怡等人^[2]提出了采用多源动态姿态组合测量方法测量导向钻具的动态姿态, 但加速度计采集数据的存储周期较长, 造成测量误差较大。Xue Qilong 等人^[3-4]提出了基于卡尔曼滤波状态空间模型的动态井眼轨迹测量方法, 但其只适用于线性系统。徐宝昌等人^[5]提出了基于无迹卡尔曼滤波的动态姿态测量方法, 但没有解决振动及旋转对动态姿态测量的影响。为此, 笔者提出了一种基于数据融合的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法, 该方法针对三轴加速度计、磁通门和速率陀螺的测量系统, 建立了基于四元数井眼轨迹参数测量模型, 推导出加速度计与井眼轨迹平滑预测的关系, 运用 3 个捷联式无迹卡尔曼滤波器和磁干扰校正系对加速度计、磁通门进行消噪, 校正, 实时测量近钻头井眼轨迹参数, 提高随钻近钻头探边能力, 确定最佳储层位置。

1 近钻头动态井眼轨迹测量模型

近钻头动态测量系统由三轴加速度计、三轴磁通门和角速率陀螺仪组成, 针对该系统, 基于四元数方法建立井眼轨迹非线性数学模型。如图 1 所示, 根据地理坐标系 $O\text{-NED}$ 和钻具坐标系 $O\text{-xyz}$ 的对应关系, 建立欧拉角转换矩阵, 并转换为四元数,

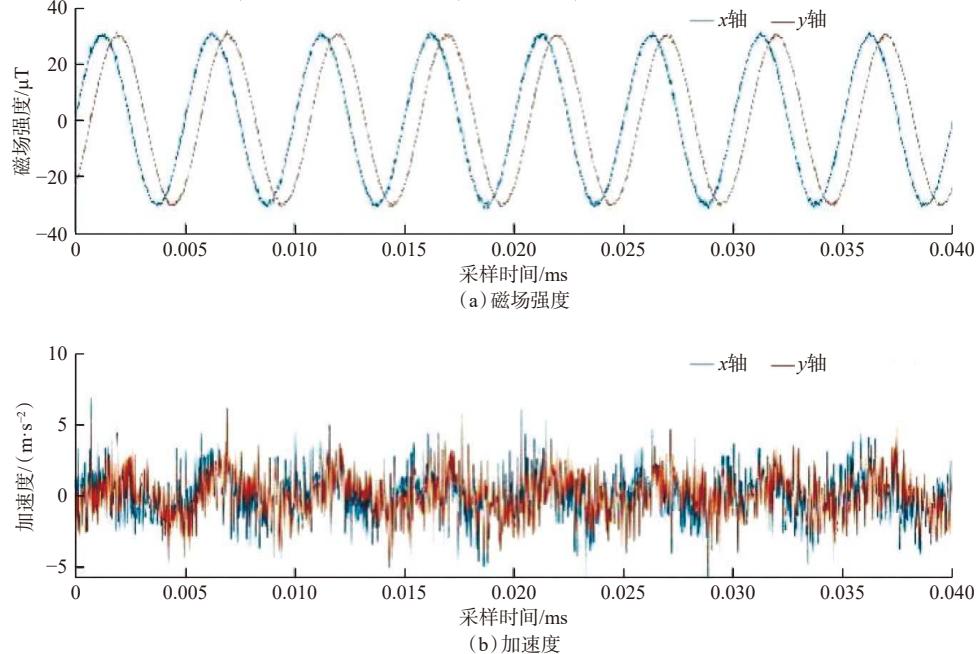


图 2 近钻头磁通门、加速度计实测数据

Fig.2 Measured data of near-bit fluxgates and accelerometers

k 时刻姿态转换矩阵 \mathbf{T} 表示为:

$$\mathbf{T}(k) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_1 q_0) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

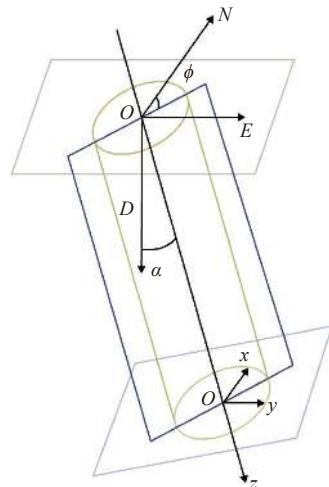


图 1 井眼轨迹参数测量原理

Fig.1 Measurement principle of borehole trajectory parameters

式中: q_0 , q_1 , q_2 和 q_3 为四元数。

理论上由于 x 轴和 y 轴的加速度计、磁通门正交相隔 90° , 其信号为正弦或余弦曲线。由于钻头旋转、振动的干扰, 近钻头 x 轴和 y 轴加速度计、磁通门的实测信号如图 2 所示。由图 2 可以看出, 近钻头的旋转、振动对磁通门的影响相对于加速度计较小, 所以采取磁通门读数校正加速度计读数。

$$\frac{B_x(k+1)}{B_x(k)} = \frac{a_x(k+1)}{a_x(k)} = \frac{B \sin(w_x(k+1))}{B \sin(w_x(k))} = \frac{g \sin(w_x(k+1))}{g \sin(w_x(k+1))} \quad (2)$$

$$\frac{B \sin(w_y(k+1))}{B \sin(w_y(k))} = \frac{g \sin(w_y(k+1))}{g \sin(w_y(k+1))} = \frac{B_y(k+1)}{B_y(k)} = \frac{a_y(k+1)}{a_y(k)} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a_x(k+1) \\ a_y(k+1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_x(k+1)}{B_x(k)} & 0 \\ \frac{B_y(k+1)}{B_y(k)} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x(k) \\ a_y(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; B 为地磁场强度, μT ; $B_x(k)$, $B_y(k)$ 和 $B_z(k)$ 为 k 时刻三轴磁通门测量的磁场强度, μT ; $a_x(k)$, $a_y(k)$ 和 $a_z(k)$ 为 k 时刻三轴加速度计测量结果, m/s^2 ; $w_x(k)$, $w_y(k)$ 和 $w_z(k)$ 为 k 时刻陀螺仪的角速度, rad/s 。

2 数据融合近钻头井眼轨迹参数动态测量方法

基于数据融合算法的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法的测量流程如图 3 所示, 图中 KF1 和 KF2 为基于扩展卡尔曼滤波算法的滤波器, KF3 为基于无迹卡尔曼滤波算法的滤波器。测量步骤: 1) 将加速度计、磁通门、转动角速度四元数带入 KF1 滤波器, 进行扩展卡尔曼滤波, 得出井斜角、方位角估计值; 2) 将加速度计四元数带入 KF2 滤波器, 进行扩展卡尔曼滤波, 得出测深增量 Δh_m ; 3) 将测深增量 Δh_m 、井斜角、方位角估计值带入 KF3 滤波器, 进行无迹卡尔曼滤波, 得出井斜角、方位角最终估计值; 4) 利用井斜角、方位角最终估计值计算磁性工具面角 ω_m 与重力工具面角的差 $\Delta\omega$; 5) 利用磁性工具面角和角差 $\Delta\omega$ 求出重力工具面角 ω_g 。

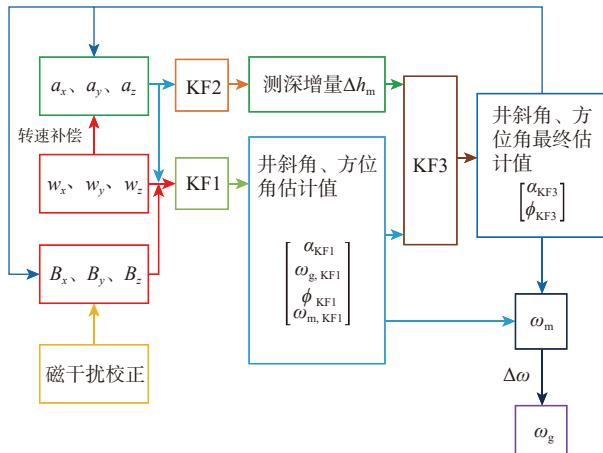


图 3 数据融合测量过程

Fig.3 Measurement process of data fusion

近钻头振动信号是一种幅值大、频率高、频带宽的噪声信号, 可以近似等效为高斯白噪声。动态测量的动力学模型为典型的非线性模型。根据 z 轴陀螺仪测量的转速 w_z , 运用转速补偿策略, 对 x 轴和 y 轴加速度计测量结果进行转速补偿^[5], 减小钻具旋转对加速度计测量结果的影响。根据转速补偿结果以及噪声特性, 采用扩展、无迹卡尔曼滤波滤除振动干扰信号。

2.1 估计近钻头井斜角、方位角的扩展卡尔曼滤波算法

基于四元数的 KF1 的状态方程和量测方程:

$$Q(k+1) = (I + t_s A(k))Q(k) + w(k) \quad (5)$$

$$Z(k+1) = F(Q(k)) + v(k) \quad (6)$$

式中: $Q(k)$ 为 k 时刻的状态值; I 为单位矩阵; t_s 为采样周期; $w(k)$ 为 k 时刻系统高斯白噪声; $v(k)$ 为 k 时刻传感器观测噪声; $A(k)$ 为 k 时刻状态转移矩阵; $F(x)$ 为非线性函数; $Z(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的观测值。

$$Z(k+1) = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \\ a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T(k) \begin{bmatrix} B \cos \theta \\ 0 \\ B \sin \theta \end{bmatrix} \\ 0 \\ T(k) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \end{bmatrix} + v(k) \quad (7)$$

$$Q(k+1) = \begin{bmatrix} I + t_s \begin{bmatrix} 0 & -w_x(k) & -w_y(k) & -w_z(k) \\ w_x(k) & 0 & w_z(k) & -w_y(k) \\ w_y(k) & -w_z(k) & 0 & w_x(k) \\ w_z(k) & w_y(k) & -w_x(k) & 0 \end{bmatrix} \\ Q(k) + w(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

三轴加速度信号、三轴磁通门信号、角速率陀螺信号进行数据融合后, 采用扩展卡尔曼滤波算法, 得到最优姿态估计^[6-7], 动态解算出钻井工具的实时姿态参数, 确保钻具姿态测量计算的精度, 减少计算量, 对四元数 Q 进行更新, 求出 KF1 滤波后的井斜角 α_{KF1} 、方位角 ϕ_{KF1} 、高边工具面角 $\omega_{g,\text{KF1}}$ 和磁性工具面角 $\omega_{m,\text{KF1}}$ 。

$$\alpha_{\text{KF1}} = \arctan \frac{2(q_0 q_1 + q_2 q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \quad (9)$$

$$\phi_{\text{KF1}} = \arctan \frac{2(q_0 q_3 + q_1 q_2)}{1 - 2(q_0^2 + q_3^2)} \quad (10)$$

$$\omega_{g,\text{KF1}} = \arctan \frac{(q_0 q_2 + q_1 q_3)}{(q_0 q_1 - q_2 q_3)} \quad (11)$$

$$\omega_{m,\text{KF1}} = \arctan \frac{(q_1 q_2 + q_0 q_3) \cos \theta + (q_1 q_2 + q_0 q_3) \sin \theta}{(q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \cos \theta + (q_1 q_3 - q_0 q_2) \sin \theta} \quad (12)$$

式中: α_{KF1} , ϕ_{KF1} , $\omega_{g,KF1}$ 和 $\omega_{m,KF1}$ 分别为 KF1 滤波后的井斜角、方位角、重力工具面角和磁性工具面角, ($^{\circ}$); θ 为地层倾角, ($^{\circ}$)。

2.2 估计近钻头测深增量的扩展卡尔曼滤波算法

根据式(7)计算出四元数中的 a_z , 运用扩展卡尔曼滤波器计算系统经过 t_s 后测深增量 Δh_m 。 z 轴加速度计主要受到重力加速度和振动的干扰, 由于采样时间 t_s 为毫秒级, 在单位采样周期内, 重力加速度和振动的干扰可以视为近似相同^[8-10], 可以忽略振动对加速度计测量结果的影响。 k 为当前采样点, z 轴加速度增量 Δa_z :

$$\Delta a_z = a_z(k+1) - g \cos(\alpha_{KF1}(k)) \quad (13)$$

$$\Delta a_z = \Delta h_m'' \quad (14)$$

为了提高对测深增量的估计, 对 Δh_m 进行二阶泰勒展开:

$$\Delta h_m(k+1) = \Delta h_m(k) + \Delta h_m(k)' t_s + 0.5 \Delta h_m(k)'' t_s^2 \quad (15)$$

KF2 的状态方程和量测方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta h_m(k+1) \\ \Delta h_m(k+1)' \\ \Delta h_m(k+1)'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_s & t_s^2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_m(k) \\ \Delta h_m(k)' \\ \Delta h_m(k)'' \end{bmatrix} + w(k) \quad (16)$$

$$\Delta a_z = [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} \Delta h_m(k+1) \\ \Delta h_m(k+1)' \\ \Delta h_m(k+1)'' \end{bmatrix} + v(k) \quad (17)$$

2.3 估计近钻头井眼轨迹参数的无迹卡尔曼滤波算法

如图 4 所示, 在单位采样时间内, 井眼轨迹趋于平滑曲线, 可以根据前面 2 个测点的狗腿度和 KF2 输出测深增量对井眼轨迹进行递归式预测^[11]。

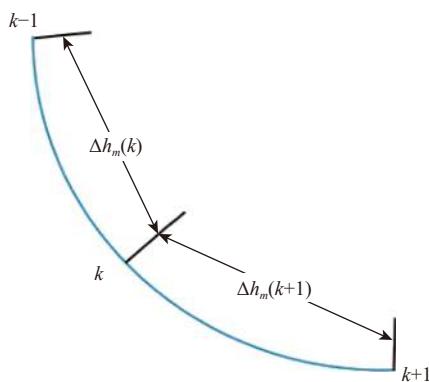


图 4 KF3 预测井深参数的原理

Fig.4 Prediction principle of well depth parameters by KF3

$$h_m(k+1) = h_m(k) + \Delta h_m(k+1) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \arccos [\cos \alpha(k) \cos \alpha(k-1) + \\ &\sin \alpha(k) \sin \alpha(k-1) \cos(\phi(k) - \phi(k-1))] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\Delta \gamma(k+1) = \frac{\gamma \Delta h_m(k+1)}{\Delta h_m(k)} \quad (20)$$

式中: γ 为狗腿角, ($^{\circ}$); $\Delta \gamma$ 为系统经过 t_s 的狗腿角增量, ($^{\circ}$); $h_m(k)$ 为 k 时刻的测深, m。

根据 $\Delta h_m(k)$ 进行无迹卡尔曼滤波, KF3 的状态方程和量测方程为:

$$\begin{aligned} \alpha(k+1) &= \arccos[\cos(\gamma + \Delta \gamma(k+1)) \cos \alpha(k-1) + \\ &\frac{\sin(\gamma + \Delta \gamma(k+1))}{\sin \gamma} (\cos \alpha(k-1) \cos \gamma - \cos \alpha(k))] + w_{\alpha}(k) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \phi(k+1) &= \phi(k) + \operatorname{sgn}(\phi(k) - \phi(k-1)) \cdot \\ &\arccos \frac{\cos(\Delta \gamma(k+1) - \cos \alpha(k) \cos \alpha(k-1))}{\sin \alpha(k) \sin \alpha(k-1)} + w_{\phi}(k) \end{aligned} \quad (22)$$

式中: w_{α} 和 w_{ϕ} 分别为井斜角和方位角的系统高斯白噪声。

$$\alpha_{KF3} = \alpha(k+1) + v_{\alpha}(k) \quad (23)$$

$$\phi_{KF3} = \phi(k+1) + v_{\phi}(k) \quad (24)$$

式中: α_{KF3} 和 ϕ_{KF3} 分别为 KF3 滤波后的井斜角和方位角, ($^{\circ}$); v_{α} 和 v_{ϕ} 分别为井斜角和方位角的系统观测噪声。

2.4 近钻头重力工具面角的估计

根据旋转测量原理, 同一时刻的重力工具面角与磁工具面角的差与测量时刻的井斜角、方位角、地磁倾角呈现一定函数关系^[12-13]。根据 KF3 求出的井眼井斜角和方位角计算磁性工具面角与重力工具面角的差 $\Delta \omega$:

$$\Delta \omega = -90 + \arctan \frac{\sin \phi_{KF3}}{\cos \alpha_{KF3} \cos \phi_{KF3} - \tan \theta \sin \alpha_{KF3}} \quad (25)$$

根据 $\Delta \omega$, 计算旋近钻头动态重力工具面角估计值 $\omega_{dg,e}$:

$$\omega_{dg,e} = \omega_{m,KF3} + \Delta \omega \quad (26)$$

式中: $\omega_{dg,e}$ 为旋近钻头动态重力工具面角估计值, ($^{\circ}$); $\omega_{m,KF3}$ 为 KF3 滤波后的磁性工具面角, ($^{\circ}$)。

2.5 磁干扰情况下的磁性工具面角

近钻头重力工具面角需根据 x 轴和 z 轴磁通门传感器的读数求出^[14-15], 而磁通门测量结果不可避免地会受到周围电磁场的影响, 为了降低井下钻具周围电磁场的影响程度, 采用径向磁干扰的方法校

正 x 轴和 z 轴磁通门的测量结果^[16]。

磁场的干扰导致磁通门测量的磁场强度发生偏移和变形。磁干扰下的测量结果如图 5 所示。

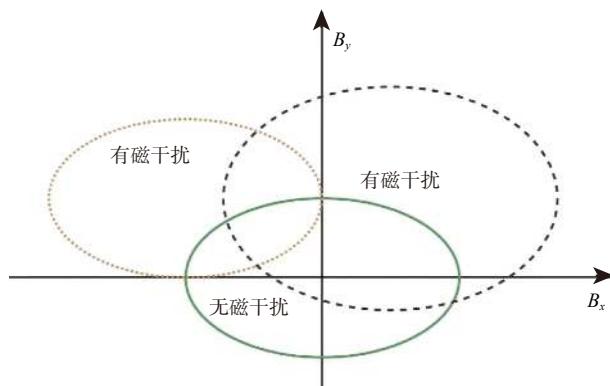


图 5 磁干扰校正示意

Fig.5 Magnetic interference correction

在实际钻井过程中,井下仪器旋转一圈时,钻深可以忽略不计,可以看作仪器在原地旋转了一圈。 z 轴磁通门的测量结果可以认为没有发生变化,而 x 轴和 y 轴磁通门的测量值不断发生变化,如图 2(a) 所示。三轴磁通门传感器的测量数据记为 (B_x, B_y, B_z) , 地球磁场可以看成一个固定值,即:

$$B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 = C^2 \quad (27)$$

式中: C 为常数。

根据椭圆校正原理,对短时间内采集的 B_x , B_y 进行磁干扰校正,得出排除磁干扰的 B_{xm} 和 B_{ym} :

$$a_{xf} = \max \left(1, \frac{B_{y\max} - B_{y\min}}{B_{x\max} - B_{x\min}} \right) \quad (28)$$

$$b_{xf} = \frac{B_{x\max} - B_{x\min}}{2} - a_{xf} B_{x\max} \quad (29)$$

$$B_{xm} = B_x a_{xf} + b_{xf} \quad (30)$$

$$a_{yf} = \max \left(1, \frac{B_{x\max} - B_{x\min}}{B_{y\max} - B_{y\min}} \right) \quad (31)$$

$$b_{yf} = a_{yf} \left(\frac{B_{y\max} - B_{y\min}}{2} - B_{y\max} \right) \quad (32)$$

$$B_{ym} = B_y a_{yf} + b_{yf} \quad (33)$$

式中: a_{xf} 和 a_{yf} 为 x 轴磁通门测量磁场强度的校正系数; b_{xf} 和 b_{yf} 为 y 轴磁通门测量磁场强度的校正值, μT ; B_{xm} 和 B_{ym} 为 x 轴和 y 轴排除磁干扰后的磁场强度, μT 。

3 试验与分析

在实验室对 NWD 施加 $20\sim50\text{ r/min}$ 转速、

$1\text{g}\sim3\text{g}$ 振幅的高斯白噪声振动信号,模拟井下钻进过程。采用上述测量方法测量井斜角和方位角,并与实际井斜角和方位角进行对比,结果见图 6。由图 6 可以看出:测量井斜角与实际井斜角的最大误差为 1.30° ,最小误差为 0.02° ,平均误差为 0.12° ,方差为 1.26° ;测量方位角与实际方位角的最大误差为 1.95° ,最小误差为 0.15° ,平均误差为 0.57° ,方差为 2.46° 。

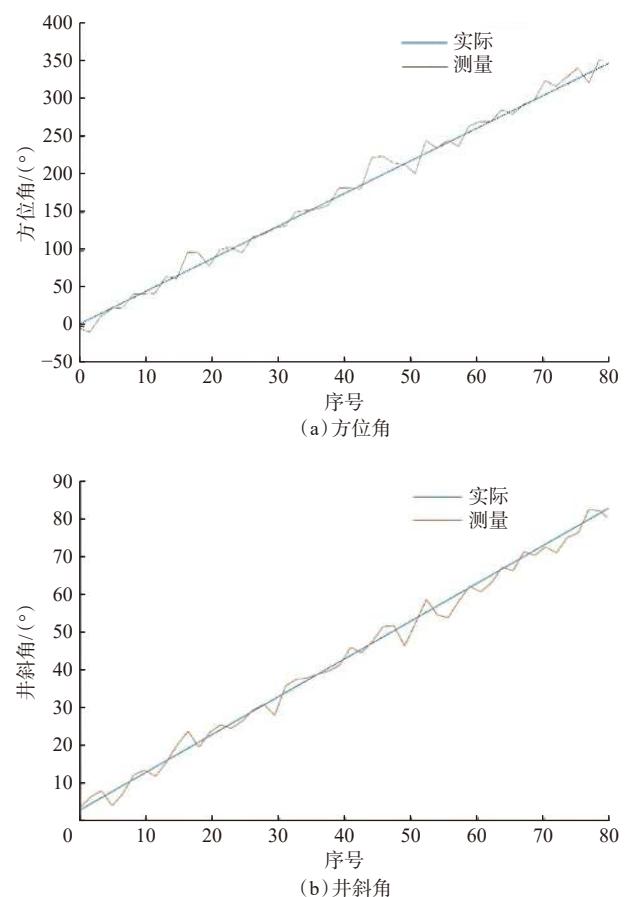


图 6 测量井斜角、方位角与实际井斜角、方位角的对比

Fig.6 Comparison of measured and actual deviation angles and azimuths

图 7 为采用上文测量方法(以下称为动态测量方法)测量工具面角、NWD 探管直接测量工具面角与实际工具面角的差值。由图 7 可以看出, NWD 探管直接测得工具面角与实际工具面角的差最大接近 40° ,已经不能满足测量近钻头伽马重力工具面角的要求,而采用动态测量方法测得的工具面角与实际工具面角的差小于 10° ,满足测量近钻头工具面角的要求。

在井斜角为 0.5° 、方位角度为 142.818° ,地磁场强度为 $53.74\text{ }\mu\text{T}$ 、磁倾角为 55.8° 、磁性工具面角 30° 的测点,对 NWD 探管 x 、 y 方向分别施加 0.1 和

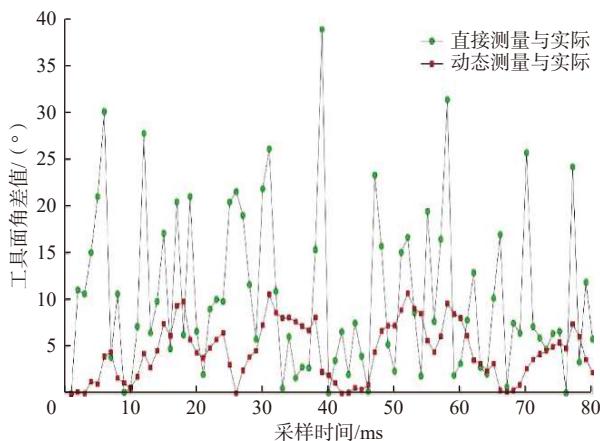


图 7 动态测量和直接测量工具面角与实际工具面角的差值

Fig. 7 Difference between actual tool face angles and tool face angles measured by dynamic and direct methods

0.2 μ T 的磁干扰, 未进行磁干扰校正前测得磁性工具面角为 23.56° , 经过磁干扰校正后, 磁性工具面角为 29.82° , 与真实工具面角相差 0.18° 。

为了验证动态测量方法的可行性和有效性, 在某井 3 800.00~4 100.00 m 井段进行验证, 首先在钻进过程利用动态测量方法测量井斜角、方位角和工具面角, 然后再停钻测量井斜角、方位角和工具面角(下文称之为静态测量), 然后对比静态和动态测量结果。因为钻具停止时没有旋转、振动和磁干扰, 因此以静态测量结果为真实值。

图 8 为动态测得井斜角与静态测得井斜角的对比。由图 8 可以看出, 动态测得井斜角与静态测得井斜角的平均误差为 0.19° , 方差为 0.9342° 。图 9 为动态测得方位角与静态测得方位角的对比。由图 9

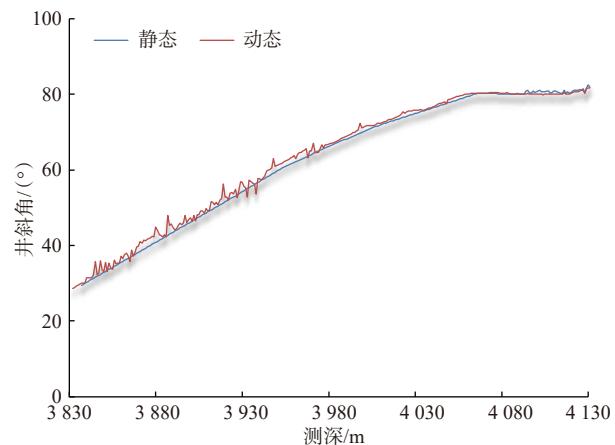


图 8 动态测量井斜角与静态测量井斜角的对比

Fig. 8 Comparison of deviation angles measured by dynamic and static methods

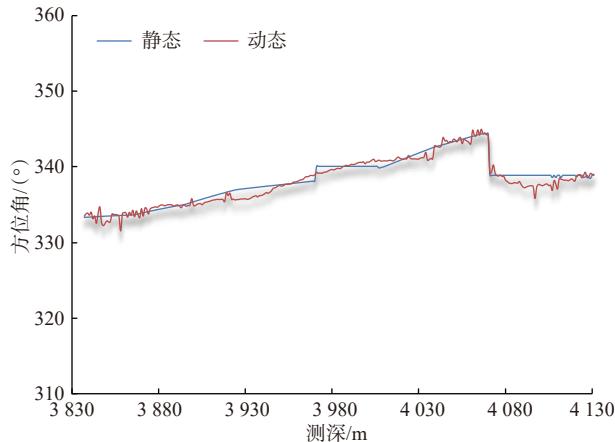


图 9 动态测量方位角与静态测量方位角的对比

Fig. 9 Comparison of azimuths measured by dynamic and static methods

可以看出, 动态测得方位角与静态测得方位角的平均误差为 1.19° , 方差为 1.943642° 。

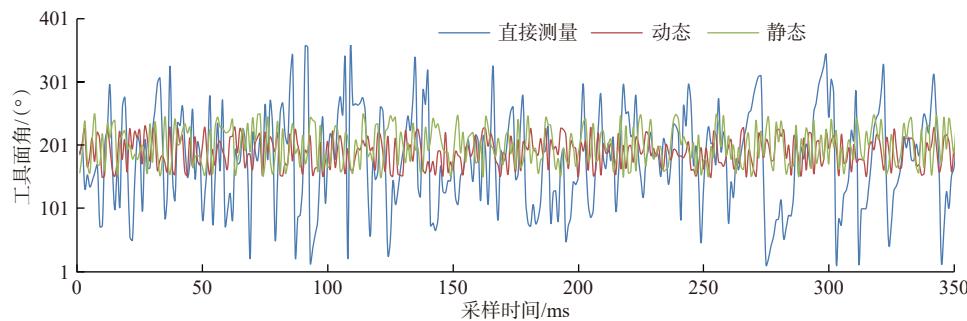


图 10 动态测量工具面角与静态测量工具面角的对比

Fig. 10 Comparison of tool face angles measured by dynamic and static methods

图 10 为动态测量工具面角与静态测量工具面角的对比。由图 10 可以看出, 动态测得工具面角与静态测得工具面角的误差小于 5° 。

以上分析可以得出, 基于数据融合的井眼轨迹参数测量方法能够有效消除旋转、振动、磁干扰的影响, 井斜角、方位角和工具面角的测量精度得到

明显提高,满足了随钻地质导向对井眼轨迹参数测量的要求。

4 结 论

1) 针对旋转、振动、磁干扰对近钻头测量仪器的影响,提出了基于数据融合的井眼轨迹参数动态测量方法。该方法采用捷联式卡尔曼滤波器和磁干扰校正系统对测量信号进行滤波、校正,利用四元数法处理测量数据,求出近钻头井眼轨迹参数。

2) 实验室模拟试验和现场试验均表明,基于数据融合的井眼轨迹参数动态测量方法可以消除旋转、振动、磁干扰的影响,使测得井眼轨迹参数的精度明显提高,满足了随钻地质导向对井眼轨迹参数测量的要求。

3) 建议在现在研究成果基础上,进一步优化数据融合算法,比如基于机器学习的井眼轨迹预测模型,基于遗传算法的卡尔曼滤波器的参数调优。

参 考 文 献

References

- [1] 杨全进,徐宝昌,左信,等.旋转导向钻具姿态的无迹卡尔曼滤波方法[J].石油学报,2013,34(4):1168–1175.
YANG Quanjin, XU Baochang, ZUO Xin, et al. An unscented Kalman filter method for attitude measurement of rotary steerable drilling assembly[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 1168–1175.
- [2] 高怡,程为彬,汪跃龙.近钻头钻具多源动态姿态组合测量方法[J].中国惯性技术学报,2017,25(2):146–150.
GAO Yi, CHENG Weibin, WANG Yuelong. Multi-source dynamic attitude combination measurement for near-bit drilling tool[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(2): 146–150.
- [3] XUE Qilong, WANG Ruihe, SUN Feng. Continuous measurement while drilling utilizing strap down multi model surveying system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(3): 650–657.
- [4] ZHEN Ziyang, XING Dongjing, GAO Chen. Cooperative search-at-attack mission planning for multi-UAV based on intelligent self-organized algorithm[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 76: 402–411.
- [5] 徐宝昌,杨全进,蒋海旭.旋转导向系统有色噪声的改进无迹卡尔曼滤波方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(2):157–163.
XU Baochang, YANG Quanjin, JIANG Haixu. Improved unscented Kalman filtering method for colored noises of rotary steerable system[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2015, 39(2): 157–163.
- [6] COLUCCIA A, RICCIATO F. On ML estimation for automatic RSS-based indoor localization: IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing, Modena, May 5–7, 2010[C].
- [7] OUYANG R W, WONG A K, LEA C, et al. Received signal strength-based wire-less localization via semidefinite programming: Proceedings of the Global Communications Conference, Honolulu, November 30–December 4, 2009[C].
- [8] 高怡,汪跃龙,程为彬.抗差自适应滤波的导向钻具动态姿态测量方法[J].中国惯性技术学报,2016,24(4):437–442.
GAO Yi, WANG Yuelong, CHENG Weibin. Robust adaptive filtering method for dynamic attitude measurement of steering drilling[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, 24(4): 437–442.
- [9] 鲁港,佟长海,夏泊涬,等.空间圆弧轨迹的矢量描述技术[J].石油学报,2014,35(4):759–764.
LU Gang, TONG Changhai, XIA Boyi, et al. Vector description of spatial -arc well bore trajectory[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 759–764.
- [10] 路保平,倪卫宁.高精度随钻成像测井关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(3):148–155.
LU Baoping, NI Weining. The key technologies of high precision imaging logging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 148–155.
- [11] 陆自清.基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法[J].石油钻探技术,2021,49(1):113–120.
LU Ziqing. Geosteering methods of a dynamic geological model based on Kalman filter[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(1): 113–120.
- [12] WANG Ruihe, XUE Qilong, SUN Feng. Study on lateral vibration of rotary steerable drilling system[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2014, 16(6): 2702–2711.
- [13] XUE Qilong, HENRY L, WANG Ruihe, 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.
- [14] SHAO Hujie, ZHANG Xiaoping, WANG Zhi. Efficient closed-form algorithms for AOA based self-localization of sensor nodes using auxiliary variables[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(10): 2580–2594.
- [15] YACLAN Y, BICAN B. Empirical mode decomposition based denoising method with support vector regression for time series prediction A case study for electricity load forecasting[J]. *Measurement*, 2017, 103: 52–61.
- [16] 许昊东,黄根炉,张然,等.磁力随钻测量磁干扰校正方法研究[J].石油钻探技术,2014,42(2):102–106.
XU Haodong, HUANG Genlu, ZHANG Ran, et al. Method of magnetic interference correction in survey with magnetic MWD[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(2): 102–106.

[编辑 刘文臣]