基于静动结合策略与粒子群优化的钻具姿态随钻测量方法

韦康桂，杨永友*，华小茗，郑 健
（中国科学院地质与地球物理研究所，北京 100029）

摘要：钻井工具姿态高精度、动态连续测量是智能导向钻井轨迹精准控制的基础。针对动态钻进时加速度计受强振动干扰、姿态测量依赖停钻静态测量、解算精度与效率难以兼顾等问题，提出一种基于三轴加速度计、三轴磁强计与Z轴角速率陀螺全MEMS组合的“静动结合”随钻姿态测量方法。以陀螺输出判别钻具静态与动态：静态时由加速度计和磁强计解析解算姿态角；动态时舍弃受振动污染的加速度计数据，经卡尔曼滤波和漂移前馈补偿后由陀螺积分求解工具面角，并以磁场测量值构建目标函数，采用粒子群优化算法数值解算井斜角和方位角。实验室模拟与实钻试验表明：垂直姿态下井斜角平均绝对误差由传统方法的1.074°降至0.097°，单点解算耗时＜0.8 ms，井斜角精度和解算效率优于传统方法，方位角精度相当；实钻条件下，静态井斜角、方位角平均绝对误差分别为0.0787°和0.6587°；动态井斜角、方位角动态时间规整（DTW）平均偏差分别为0.0763°和0.7656°，与静态精度接近。该方法无需对加速度信号进行复杂去噪处理，兼顾精度、效率与连续测量需求，可为国产随钻测量系统动态姿态解算提供技术支撑。

关键词：智能导向钻井；钻具姿态；随钻测量；动态连续测量；静动结合；粒子群优化；MEMS传感器；数值解算
中图分类号：P634.7 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9686(2026)06-0052-08

Attitude measurement method for drilling tools based on static-dynamic combination strategy and particle swarm optimization

WEI Kanggui, YANG Yongyou*, HUA Xiaoming, ZHENG Jian
(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: High-precision and dynamic continuous measurement of drilling tool attitude is fundamental to accurate trajectory control in intelligent directional drilling. To address the problems of strong vibration interference on accelerometers during dynamic drilling, the dependence of attitude measurement on static surveys with drilling stopped, and the difficulty in balancing solution accuracy and efficiency, a static-dynamic combination method for attitude measurement while drilling is proposed based on a full MEMS sensor combination of a triaxial accelerometer, a triaxial magnetometer and a Z-axis angular rate gyroscope. The static and dynamic states of the drilling tool are discriminated by the gyroscope output. In the static state, the attitude angles are analytically solved from the accelerometer and magnetometer measurements. In the dynamic state, the vibration-contaminated accelerometer data are discarded; after Kalman filtering and drift feedforward compensation, the toolface angle is obtained by gyroscope integration. An objective function is then constructed with the magnetic field measurements, and the inclination and azimuth are numerically solved using the particle swarm optimization algorithm. Laboratory simulation and field drilling

收稿日期：2026-09-15；**修回日期**：2026-10-29 **DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.006
基金项目：国家科技重大专项（编号：2024ZD1003104.1）
第一作者：韦康桂，男，壮族，1999年生，助理工程师，地球与空间探测技术专业，硕士，主要研究方向为钻井工具姿态测量，北京市朝阳区北土城西路19号，weikanggui@mail.iggcas.ac.cn。
通信作者：杨永友，男，汉族，1980年生，正高级工程师，地球与空间探测技术专业，博士，研究方向为旋转导向系统，北京市朝阳区北土城西路19号，yangyongyou@mail.iggcas.ac.cn。
引用格式：韦康桂，杨永友，华小茗，等.基于静动结合策略与粒子群优化的钻具姿态随钻测量方法[J].钻探工程，2026，53(6)：52-59.
WEI Kanggui, YANG Yongyou, HUA Xiaoming, et al. Attitude measurement method for drilling tools based on static-dynamic combination strategy and particle swarm optimization[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 52-59.

tests show that, in the vertical attitude, the mean absolute error of inclination is reduced from 1.074° with the traditional method to 0.097°, and the solution time per point is less than 0.8 ms, with the inclination accuracy and solution efficiency superior to those of the traditional method while the azimuth accuracy is comparable. Under field drilling conditions, the mean absolute errors of static inclination and azimuth are 0.0787° and 0.6587°, respectively; the mean dynamic time warping (DTW) deviations of inclination and azimuth are 0.0763° and 0.7656°, respectively, close to the static accuracy. The proposed method requires no complex denoising of acceleration signals, balances accuracy, efficiency and continuous measurement requirements, and can provide technical support for dynamic attitude solution of domestic measurement while drilling (MWD) systems.

Key words: intelligent directional drilling; drilling tool attitude; measurement while drilling; dynamic continuous measurement; static-dynamic combination; particle swarm optimization; MEMS sensor; numerical solution

0　引言

智能导向钻井是沿预设轨迹钻进以到达地下目标层的技术，在多分支井、大位移井、水平井等复杂井开发中至关重要[1]。导向钻井作业过程中，井筒轨迹精准控制既能保证高效钻达目标，又可规避邻井碰撞风险[2]。钻井工具姿态精准测量是轨迹精准控制的基础。

钻具姿态通常由随钻测量(MWD)系统测量。MWD系统布置在距钻头10～15 m处，通过泥浆脉冲将测量结果传输至地面控制系统[3]。MWD系统是导向钻井系统的“眼睛”，姿态测量精度越高、速度越快，越利于导向钻井技术智能化与精细化，因此MWD系统在业内被广泛研究[1]。传统MWD系统一般集成三轴正交的磁强计与加速度计：加速度计测量解算井斜角与工具面角，磁强计测量解算方位角[4]。在一些设计中，单轴或者多轴的陀螺仪也得到应用[5-7]。部分研究采用冗余三轴加速度计与磁强计构建MWD系统[8]，虽能提供更多测量数据实现高精度测量，但不可避免地增加了系统成本。

无论硬件层面选择何种传感器组合，实际钻井作业中均需在软件层面减少传感器测量误差。传感器测量误差分为固定误差与随机误差：固定误差含安装误差、零偏误差、温漂误差等，可通过成熟的实验室标定量化并在实际中消除；随机误差源于传感器自身特性(如随机漂移)与外部环境干扰(如磁异常、振动、冲击)，对姿态测量精度影响较大，因此降低传感器随机误差成为提升随钻姿态测量精度的关键。

钻井伴随的剧烈振动与冲击使测量加速度时混入各类加速度信号，研究人员通常通过频域与时域特征差异区分重力加速度与非重力加速度信号。Alam等[9]提出采用变带宽滤波自适应调节加速度测量的滤波器带宽，以减小振动与传感器噪声影响；Yang等[10]采用经验模态分解(EMD)与小波去噪重构方法处理加速度测量，解决捷联惯性导航系统累积误差问题；张文秀等[11]提出基于相关检测的重力加速度提取方法，以磁场信号为参考，实现复杂环境下重力加速度信号有效提取。钻井时陀螺同样受强振动与冲击影响，且长时间工作会产生随机漂移，严重影响转速测量精度。常用处理方法包括：根据信号特征提取有效转速、建立数学模型进行误差补偿等。Wang等[12]提出基于改进经验模态分解(EMD)与改进递推最小二乘法(RLS)的EMD-MRLS去噪方法，减小随机漂移对陀螺测量的影响；Li等[13]将无迹卡尔曼滤波(UKF)与循环神经网络(RNN)结合，提出实时估计与补偿MEMS陀螺随机漂移的新方法；Zhang等[14]基于动态阿伦方差建立新型噪声建模方法，并据此设计MWD卡尔曼滤波器，取得显著效果；Li等[15]提出创新双轴旋转调制导航方案，抑制g敏感失准及常规IMU误差引发的速度与位置误差。

单一传感器的抗干扰处理效果有限，需针对加速度计、陀螺、磁强计干扰源不同的特点，融合各自测量值，充分发挥优势、抑制误差。因此，多传感器信息融合方法成为姿态精度提升的突破口。Ligorio等[16]将基于陀螺的重力加速度递推方程与非重力加速度高斯马尔可夫模型作为预测方程，在卡尔曼滤波框架下融合加速度计信号作为观测值，获取重力加速度信息；Liu等[8]采用多传感器配置(MSC)开发监督学习滤波器(SLF)，精准估计方位；Yang等[17]在卡尔曼滤波框架下基于科里奥利传递方程分别解耦加速度计与磁强计测量的振动和磁扰动，再与陀螺角速率读数融合，有效提升姿态测量精度；Yang等[18]提出改进自适应衰减平方根无

迹卡尔曼滤波，消除振动干扰信号，提升测量环境突变时钻井工具姿态参数解算精度；韩冬等[19]提出一种在互补滤波框架下的钻具重力加速度自适应提取算法，利用加速度计和陀螺仪在频域上的互补特性，采用互补滤波器对二者数据进行融合，以滤除近钻头的振动加速度干扰，同时引入模糊算法来动态调整互补滤波器参数；刘鹏威等[20]提出了一种利用变换无迹卡尔曼滤波对惯性传感器误差进行在线辨识的方法，通过建立系统误差模型，对惯性器件误差进行在线辨识和补偿。上述数据融合算法普遍计算量大，MWD系统算力难以同时兼顾效率与精度。

目前市场上主流的MWD产品及其技术指标如表1所示。总体来看，各产品测量精度接近但主要依赖停钻静态测量。传统静态测量技术需要停钻数分钟进行测斜，而动态连续测量技术不需要停钻测斜，可以提高钻井时效，还有利于降低卡钻风险[21-22]。目前，只有斯伦贝谢和贝克休斯的产品具备连续测量能力，但精度相较于静态下降较大，反映出随钻动态连续测量技术不成熟，如何攻克钻进过程中传感器测量噪声仍是一个亟待解决的难点。因此，为提升我国智能导向钻井体系整体效能，应重点攻克随钻动态连续测量技术，为导向钻井智能决策提供全面、直接、可靠的数据。

表1 国内外主流MWD产品主要技术指标对照

Table 1 Comparison of main technical indicators of domestic and foreign mainstream MWD products

产品	井斜角精度/(°)	方位角精度/(°)	工具面角精度/(°)
斯伦贝谢 TeleScope ICE	静态测量±0.1、连续测量±0.2	静态测量±1(井斜角>5°)、连续测量±2	静态测量±1、连续测量±1
哈里伯顿Quasar Pulse/Cerebro Force	±0.1	±1	±2.8(475、675、800)、±1(950)
贝克休斯NaviTrak HR	静态测量±0.2、连续测量±0.4	静态测量±1、连续测量±2	±1.5
Noralis NDM	±0.1	±0.25(井斜角<90°)、±0.375(井斜角<45°)	
上海神开SK-TMWD	±0.1	±0.5	±0.5
渤海钻探德玛-MWD	±0.1	±1(井斜角>5°)	±1
中海油服Drilog	±0.1	±0.5	±0.8(磁工具面)、±0.6(重力工具面)

为解决钻井工具姿态连续测量难题，本文提出一种新型测量方案：硬件采用全MEMS器件，包含三轴加速度计、三轴磁场传感器、Z轴角速率陀螺，实现轻量化与小型化；软件层面提出新型姿态解算策略，将钻井工具状态分为静态与动态，静态采用三轴加速度计与磁强计测量值解算姿态，动态使用角速率陀螺解算工具面角，再通过磁场传感器测量值数值求解法实现井斜角与方位角。

1 新型姿态测量方案总体设计

1.1 基于欧拉角的姿态测量

钻井工具姿态定义如图1所示，参考坐标系为北东地坐标系(n系)，其中ON指向磁北，OE指向东，OG垂直指向地心。传感器安装如图2所示，三轴加速度计坐标系与三轴磁场传感器坐标系重合，记为b系($OXYZ$)，OZ平行于工具轴线，Z轴陀螺与OZ同向，测量钻井工具实时转速。传感器姿态包含井斜角(I)、方位角(A)、工具面角(T)(图1)，其中，井斜角为工具轴线Z轴与竖直方向夹角，方位角为工具轴线在水平面投影与地磁北向夹角，工具面角为工具面与重力高边的夹角。

n系由地磁场或重力场表征，b系由三轴加速度计与磁场传感器测量值表征。n系到b系的转换矩阵记为C_n^b：

$$C_n^b=\begin{bmatrix}\cos A\cos I\cos T-\sin A\sin T & \sin A\cos I\cos T+\cos A\sin T & -\sin I\cos T\\ -\cos A\cos I\sin T-\sin A\cos T & -\sin A\cos I\sin T+\cos A\cos T & \sin I\sin T\\ \cos A\sin I & \sin A\sin I & \cos I\end{bmatrix} \tag{1}$$

通过C_n^b可得到n系与b系关于重力场、磁场的两个转换表达式，并定义A、I、T为一组欧拉角。

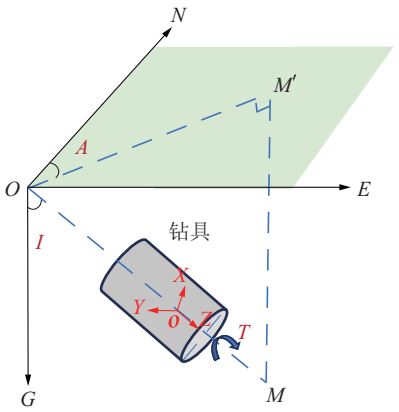

图 1　钻井工具姿态角定义

Fig.1　Definition of attitude angles for drilling tools

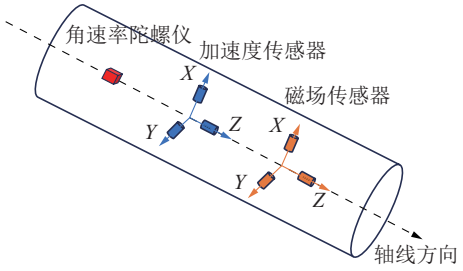

图 2　姿态传感器安装方式

Fig.2　Installation of attitude sensors

$$\begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} = C_{\mathrm{n}}^{\mathrm{b}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} m_X \\ m_Y \\ m_Z \end{bmatrix} = C_{\mathrm{n}}^{\mathrm{b}} \begin{bmatrix} B_{\mathrm{N}} \\ B_{\mathrm{E}} \\ B_{\mathrm{U}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：a——三轴加速度计测量值；m——三轴磁强计测量值；g——重力加速度；B_{N}、B_{E}、B_{U}——分别为地磁场矢量沿北向、东向、竖直向下的分量。

理想无测量误差条件下，由式(2)可计算井斜角与工具面角，由式(3)可计算方位角。

$$I = \tan^{-1}\left(\sqrt{a_X{}^2 + a_Y{}^2}\,/a_Z\right) \tag{4}$$

$$T = -\tan^{-1}\left(a_Y/a_X\right) \tag{5}$$

$$A = \cos^{-1}\left(\frac{m_Z + B_{\mathrm{U}}\cos I}{\sin I\sqrt{B_{\mathrm{N}}{}^2 + B_{\mathrm{E}}{}^2}}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{B_{\mathrm{E}}}{B_{\mathrm{N}}}\right) \tag{6}$$

1.2　动态下新型姿态解算策略

钻井工具工作伴随的剧烈振动与冲击对姿态传感器造成极大干扰，姿态解算时需耗费大量时间进行去噪处理。大量钻井实测数据表明：相同作业环境下，加速度计受振动干扰远大于陀螺与磁场传感器，磁场传感器测量值去噪处理难度远低于加速度计。传统方案中，磁场测量值仅被用于计算方位角，或者在低井斜情况下用于计算磁工具面角。可见目前对磁场测量值的应用并不充分，主要原因在于：(1)磁场传感器在井下工作时会遇到磁干扰，干扰源包括磁性地层、涡流等，远小于强振动对加速度计测量值的干扰强度，且使用频带滤波可以有效压制部分噪声。(2)n 系与 b 系关于磁场的转换方程(式 3)为超越方程组，仅用磁场传感器，难以求解姿态的解析解。为解决上述问题，本文提出一种“静动结合”的新型解算方案(图 3)。

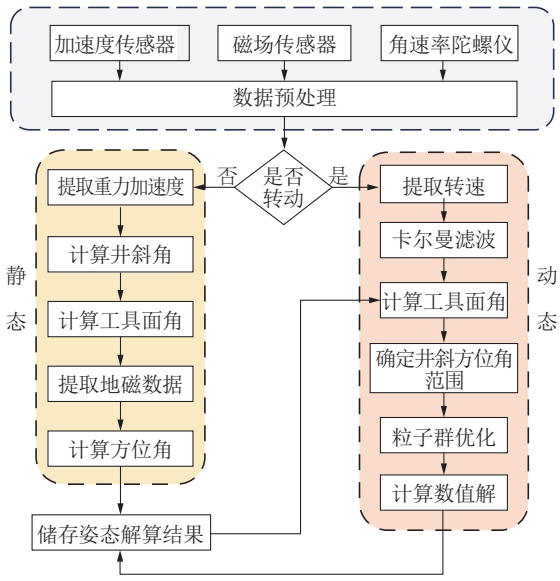

图 3　“静动结合”姿态解算方案

Fig.3　"Static-dynamic combined" attitude solution scheme

该方案通过陀螺仪判断钻具所处状态，当其测量值在连续 30 s 内均值大于 30°/s 时，则认为钻具当前状态为动态，反之为静态。当仪器处于静态时，加速度计与磁场传感器测量精度高，可以直接通过式(4)～(6)计算静态井斜角 I_{s}、方位角 A_{s}、工具面角 T_{s}。当仪器处于动态时，舍弃受强振动严重干扰的加速度计测量值，首先使用卡尔曼滤波对陀螺测量值进行平滑降噪，然后通过陀螺仪测量值计算实时工具面角，计算过程中引入陀螺漂移前馈补偿：

$$T_i = T_{i-1} + (\omega_i + \omega_{i-1})(t_i - t_{i-1})/2 + \varepsilon \tag{7}$$

式中：T_i——当前工具面角；T_{i-1}——上一个采样点的工具面角，其初始值为静态测量工具面角 T_{s}；ω——经过滤波后的陀螺测量值；t——时间；ε——陀螺仪累积误差补偿量，初始值为 0。

钻具由动态切换至静态时，记录动态末时刻陀螺仪测得的实时工具面角，与钻具静止后由加速度计解算得到的静态工具面角之间的差值。通过该差值与动态时累积的测量点数计算单位时间内陀螺仪的累积误差e。同时使用当前静态工具面角作为实时工具面角的初始值。

井下作业时，井斜角与方位角变化极慢，其取值范围可由静态测量结果推断得出，在此范围内可以选出一组最优姿态角作为当前井斜角与方位角。

$$\begin{cases} m_X^t=(\cos A\cos I\cos T-\sin A\sin T)B_N+(-\sin A\cos I\cos T-\cos A\sin T)B_E+(\sin I\cos T)B_U \\ m_Y^t=(\cos A\cos I\sin T+\sin A\cos T)B_N+(-\sin A\cos I\sin T+\cos A\cos T)B_E+(\sin I\sin T)B_U \\ m_Z^t=(-\cos A\sin I)B_N+(\sin A\sin I)B_E+\cos IB_U \end{cases} \tag{8}$$

$$L=(m_X-m_X^t)^2+(m_Y-m_Y^t)^2+(m_Z-m_Z^t)^2 \tag{9}$$

2 基于粒子群优化的姿态角数值解法

进行数值解算前，需要先定义一个粒子，具有位置和移动速度两种属性。一个粒子的位置由两个维度组成，即井斜角和方位角的估计值，表示为$P_i^k(A,I)$。粒子的移动速度，即粒子位置的变化量，表示为$V_i^k(v_A,v_I)$。其中，k代表迭代的次数，i代表粒子的编号。通过计算目标函数L评估该粒子的可信度，L值越小，粒子的可信度越高。计算流程如图4所示。

第一步需要根据静态解算的姿态角数据和历史解算数据推断当前状态下井斜角和方位角的取值范围。第二步，在确定的取值范围内，初始化第i个粒子及其位置与速度，记其初始位置为P_i，速度为V_i。第三步，计算各粒子的目标函数L。第四步，评选最优粒子，包括群体最优粒子位置P_{gbest}，指所有粒子在历次迭代中目标函数计算结果最小的粒子位置；个体最优粒子位置P_{pbest}，指某一粒子在历次迭代中的目标函数计算结果最小的位置。第五步，判断群体最优粒子位置的目标函数是否达到设置的终止阈值，若达到则直接终止程序，输出当前P_{gbest}的值，若没有达到则更新各粒子速度：

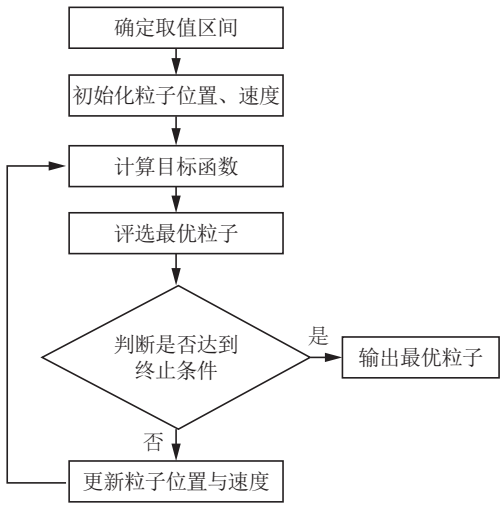

图4 基于粒子群算法的姿态求解方法流程

Fig.4 Flowchart of the attitude solution method based on particle swarm optimization algorithm

首先，将井斜角与方位角取值范围按一定间距网格化，遍历枚举估计值$<\hat{A},\hat{I}>$，通过式(8)计算b系下磁场分量理论值，再通过式(9)比较理论值与测量值的距离L。当L小于预设阈值时，将估计值视为钻井工具真实姿态。使用遍历枚举法求解井斜角与方位角数值解效率极低，为此，本文提出基于改进粒子群优化的快速搜索算法，加速数值求解过程，提升策略实用性。

$$V_i^{k+1}=\omega V_i^k+c_1\left(P_{gbest}-P_i^k\right)+c_2\left(P_{pbest,i}-P_i^k\right) \tag{10}$$

式中：k——迭代次数；ω、c_1、c_2——权重系数。

式(10)右边的第一项称为粒子移动的惯性，即保持粒子初始的速度；第二项为群体间的信息交互，通过计算粒子当前位置与群体最优位置的距离，调节粒子的搜索方向并逐渐向最优位置靠拢；第三项为粒子的记忆，通过回忆过去粒子自身的最优位置来调节方向。通过调节三个权重系数来确定粒子最新的速度，并更新粒子的最新位置：

$$P_i^{k+1}=P_i^k+V_i^{k+1} \tag{11}$$

更新速度与位置后，重复步骤，直到找到满足阈值要求的粒子位置，终止程序并输出，作为钻具姿态的最优估计，完成姿态的数值解算。

3 试验验证

3.1 实验室模拟试验

为了验证基于改进粒子群优化算法的数值求解方法的实用性，将该解算方案部署在实验室自研的姿态测量探管上，并进行了模拟姿态角解算试

验。核心传感器参数如表2所示。

表2　核心传感器关键性能参数

Table 2　Key performance parameters of the core sensors

传感器	ADC	测量范围	灵敏度
加速度传感器	16	$\pm 10g$	80 mV/g
磁场传感器	16	$\pm 6\times10^5$ nT	1.0×10^{-5} mV/(V·nT)
陀螺仪	16	±2000°/s	0.67 mV/[(°)·s^{-1}]

试验在三轴磁场发生器内进行,该设备通过调节反馈机制,可以在线圈内部模拟生成任意稳定地磁参考场,磁场发生精度可达±1 nT。通过该设备可以屏蔽实验室强烈的电磁干扰,模拟井下真实钻井环境。将探管安装在线圈内部中心位置的三轴姿态转台上并进行模拟姿态测量。由于设备限制,试验中姿态测量探管无法进行高速旋转,固定工具面角为45°。试验设置模拟地磁参考场B为50000 nT,地磁偏角为0°,地磁倾角为53°。试验测量六组姿态,分别为[0 0]、[45 0]、[45 45]、[45 90]、[45 135]、[90 90](井斜角在前、方位角在后)。姿态测量系统采样频率设置为50 Hz,每组姿态采样1 min,共3000点。为了更真实地模拟实际钻井情况,本文为传感器测量值添加了从振动台和旋转台试验中获取的噪声,以模拟真实钻进情况下伴随的振动噪声。振动台振动频率为5~100 Hz扫频,振动强度均方根为10g,旋转台设置转速为120 r/min。

为了验证本文提出的数值解算算法,采用传统的基于加速度传感器测量值与磁场传感器测量值的姿态解算方案与本文方法进行对比。为了保证两种方法精度在同一级别,采用可变带宽的滤波等方法对加速度测量值进行处理[9]。统计两种方法针对6种姿态解算的平均绝对误差和标准差,见表3、表4。

表3　两种方法姿态角解算的平均绝对误差比较

Table 3　Comparison of the MAE of the attitude by the two methods

姿态[I, A]	基于加速度的方法		本文方法	
	井斜角/(°)	方位角/(°)	井斜角/(°)	方位角/(°)
[0,0]	1.074	0.413	0.097	0.541
[45,0]	0.156	0.556	0.114	0.553
[45,45]	0.155	0.730	0.114	0.700
[45,90]	0.154	0.846	0.113	0.672
[45,135]	0.158	0.746	0.114	0.698
[90,90]	0.625	1.076	0.101	0.704

表4　两种方法姿态角解算的标准差比较

Table 4　Comparison of the STD of the attitude by the two methods

姿态[I, A]	基于加速度的方法		本文方法	
	井斜角/(°)	方位角/(°)	井斜角/(°)	方位角/(°)
[0,0]	1.286	2.434	0.101	0.521
[45,0]	0.173	0.631	0.113	0.634
[45,45]	0.172	0.848	0.131	0.803
[45,90]	0.173	0.861	0.130	0.741
[45,135]	0.174	0.864	0.131	0.806
[90,90]	0.583	1.141	0.116	0.810

从表3、表4可以发现,在方位角解算方面,两种方法表现较为接近。这主要是因为无论是基于加速度的方法,还是本文所提出的方法,在方位角的解算过程中均通过磁场传感器所采集的测量数据进行计算。在井斜角解算方面,本文所提出的方法展现出了明显的优势。在稳定性上,通过对比标准差可以看出,本文方法的解算结果离散程度更小,稳定性更高。在精度方面,本文方法的平均绝对误差在多数姿态下均低于加速度方法,尤其在姿态处于垂直状态(I=0°,业界称之为加速度解算姿态的盲区)时,优势更为突出。加速度方法在该姿态下的倾角解算平均绝对误差达到了1.074°,而本文方法仅为0.097°。这一优势的根源在于当姿态处于垂直状态时,加速度计X轴和Y轴的理论测量值为0,导致其信噪比大幅降低,影响最终解算精度。而本文所提出的方法中,在垂直状态下磁场传感器三轴测量值分布均匀,有效地克服了这一难题,保持较高的解算精度。

除了在解算精度和稳定性方面的比较,计算效率也是衡量一种方法优劣的重要指标。本文通过计算全部测点消耗的时间,再求取每个测点花费的时间均值来衡量两种解算方法的计算效率,结果如表5所示。

由表5可见,本文方法单次解算的平均耗时小于0.8 ms,而加速度方法则接近2.1 ms。深入探究

表5　两种方法平均每点耗时及其分布

Table 5　Average time consumption per point and its breakdown for the two methods

方法	基于加速度的方法		本文方法	
	数据处理	解算	数据处理	解算
耗时/ms	2.023	0.051	0.010	0.721

时间消耗的分布情况，可以清晰地看到两者的差异所在。本文方法在数据处理流程中，只需对磁场传感器测量数据进行相对简单的预处理，大部分的计算时间被分配到了对井斜角和方位角的数值解算过程中。这种时间分配策略使得本文方法能够在保证解算精度的同时，高效地完成姿态解算任务。

3.2 实钻试验

为了验证该方案在实际工作中的应用效果，使用自研姿态测量探管跟随旋转导向仪器进行实钻试验。为了进一步验证该方案的解算精度，将自研探管与技术成熟的商业探管Noralis NDM探管连接（图5）。Noralis NDM探管测量精度参见表1，其解算结果可以用来评估自研探管的解算精度。本次试验位于延长油田某井场，试验钻进深度井段为1767～1906 m共139 m，累计钻进时间22.8 h。钻进过程中使用Noralis NDM探管和自研探管进行8次静态测斜，结果如表6所示。

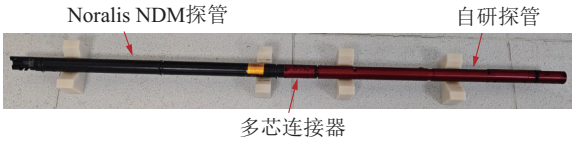

图5 商业探管与自研探管实物及连接方式

Fig.5 Photos and connection scheme of the commercial probe and self-developed probe

表6 自研探管与商业探管静态测斜点精度对比

Table 6 Accuracy comparison of static inclination measurement points between self-developed probe and commercial probe

深度/m	Noralis NDM探管		自研探管	
	井斜角/(°)	方位角/(°)	井斜角/(°)	方位角/(°)
1767.00	31.25	330.21	31.1	331.1
1771.89	31.38	330.47	31.3	331.2
1802.03	31.21	326.78	31.2	327.9
1831.37	31.21	331.08	31.2	331.4
1849.79	30.68	332.58	30.7	333.0
1859.35	30.37	335.30	30.5	335.7
1879.41	30.86	338.38	30.9	339.4
1888.47	30.59	338.73	30.4	339.1

静态条件下，自研探管和商业探管井斜角平均绝对误差为0.0787°，最大误差为0.19°，方位角平均绝对误差为0.6587°，最大误差为1.12°。说明在静态条件下，搭载了本文所提出的姿态解算方案的探管精度与成熟的商业探管相当，具有较高的应用价值。

自研探管在钻进过程中还进行了若干次动态测斜，结果如图6、图7所示。动态情况下，由于没有上传Noralis NDM探管实时解算数据，无法直接对自研探管解算精度进行量化，因此使用动态时间规整（Dynamic Time Warping，DTW）算法对动态解算精度进行评估。该方法通过各测点总累积误差除以最优匹配路径的测点总数得到匹配点的平均偏差，消除序列长度带来的量纲干扰，能够更客观、稳定地定量评价两条测量曲线的吻合程度与一致性水平。经过计算，井斜角的平均DTW为0.0763°，方位角平均DTW为0.7656°，该结果与静态下的测量精度接近，也说明本文所提出的姿态解算方案在不同工况下具有较好的解算稳定性。

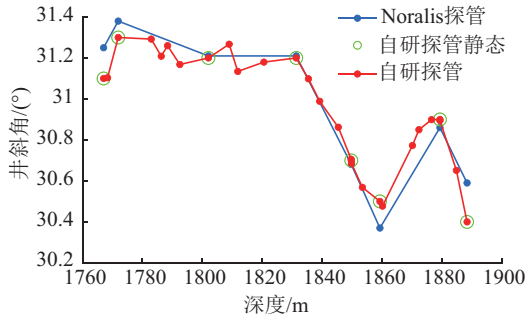

图6 井斜角测量精度对比

Fig.6 Comparison of inclination angle measurement accuracy

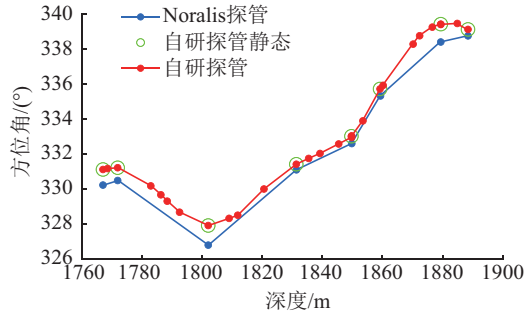

图7 方位角测量精度对比

Fig.7 Comparison of azimuth angle measurement accuracy

4 结论

本研究提出一种新型钻具姿态解算方案。该方案根据各类传感器在不同工况下的干扰特征，将钻具运行状态划分为静态与动态两类：静态工况下使用加速度传感器与磁场传感器观测数据完成姿态解算，动态工况下依托陀螺仪与磁强计实测数据

求解姿态参数。该方案无需对加速度信号开展复杂去噪处理,有效提升了姿态解算的运算效率。同时提出一种改进粒子群优化数值求解算法。该算法仅依靠磁场观测数据,即可同步完成方位角与井斜角的数值解算,在解算精度与运算效率两方面,均优于传统解算方法。在实钻试验中,该方案测量结果能与成熟商业探管保持良好的一致性,具有广阔的应用前景。

后续研究将持续开展实钻试验,进一步检验该套解算方案在实际钻井工程中的适用范围与工程价值。

参考文献(References):

[1] 朱日祥,金之钧,底青云,等.智能导钻技术体系与相关理论研发进展[J].地球物理学报,2023,66(1):1-15.
ZHU Rixiang, JIN Zhijun, DI Qingyun, et al. Research and progress of intelligent drilling technology system and related theories[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023,66(1):1-15.

[2] Yang H, Zhang L Z, Luo T, et al. Research on improving accuracy of MWD based on support vector classifier and K-proximity method[J]. IEEE Sensors Journal, 2021,21(6):8078-8088.

[3] Li W, Nie Z P, Sun X Y. Wireless transmission of MWD and LWD signal based on guidance of metal pipes and relay of transceivers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016,54(8):4855-4866.

[4] Jurkov A S, Cloutier J, Pecht E, et al. Experimental feasibility of the in-drilling alignment method for inertial navigation in measurement-while-drilling [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011,60(3):1080-1090.

[5] Noureldin A, Irvine-Halliday D, Mintchev M P. Measurement-while-drilling surveying of highly inclined and horizontal well sections utilizing single-axis gyro sensing system[J]. Measurement Science and Technology, 2004,15(12):2426.

[6] Ledroz A G, Pecht E, Cramer D, et al. FOG-based navigation in downhole environment during horizontal drilling utilizing a complete inertial measurement unit: Directional measurement-while-drilling surveying[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005,54(5):1997-2006.

[7] Dai M P, Zhang C X, Pan X, et al. A novel attitude measurement while drilling system based on single-axis fiber optic gyroscope[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022,71:9500311.

[8] Liu H, Shor R J, Park S S. Data fusion by a supervised learning method for orientation estimation using multi-sensor configuration under conditions of magnetic distortion and shock impact [J]. IEEE Access, 2020,8:7776-7791.

[9] Alam M, Rohac J. Adaptive data filtering of inertial sensors with variable bandwidth[J]. Sensors, 2015,15(2):3282-3298.

[10] Yang H, Luo T, Li L, et al. Research on drilling bit positioning strategy based on SINS MWD system[J]. IEEE Access, 2019,7:109398-109410.

[11] 张文秀,陈文轩,底青云,等.近钻头井斜动态测量重力加速度信号提取方法研究[J].地球物理学报,2017,60(11):4174-4183.
ZHANG Wenxiu, CHEN Wenxuan, DI Qingyun, et al. An investigation of the extraction method of gravitational acceleration signal for at-bit dynamic inclination measurement[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(11):4174-4183.

[12] Wang D, Xu X S, Zhang T, et al. An EMD-MRLS de-noising method for fiber optic gyro signal[J]. Optik, 2019, 183:971-987.

[13] Li D H, Zhou J, Liu Y Y. Recurrent-neural-network-based unscented Kalman filter for estimating and compensating the random drift of MEMS gyroscopes in real time[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021,147:107057.

[14] Zhang C X, Wang L, Gao S, et al. Vibration noise modeling for measurement while drilling system based on FOGs[J]. Sensors, 2017,17(10):2367.

[15] Li D, Lou Q X, Xiao Y Q, et al. A dual-axis rotation scheme for high-precision RLG inertial navigation systems considering the G-sensitive misalignment[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024,73:8502415.

[16] Ligorio G, Sabatini A M. A novel Kalman filter for human motion tracking with an inertial-based dynamic inclinometer [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015, 62(8): 2033-2043.

[17] 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.

[18] Yang Y, Li F, Gao Y, et al. Multi-sensor combined measurement while drilling based on the improved adaptive fading square root unscented Kalman filter[J]. Sensors, 2020,20(7):1897.

[19] 韩冬,孙伟,陈龙,等.随钻姿态测量重力加速度自适应提取算法[J].仪器仪表学报,2022,43(2):17-25.
HAN Dong, SUN Wei, CHEN Long, et al. An adaptive extraction algorithm of gravity acceleration in MWD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(2):17-25.

[20] 刘鹏威,杨金显.基于变换无迹卡尔曼滤波的随钻测量误差在线辨识[J].计算机应用,2021,41(S1):327-331.
LIU Pengwei, YANG Jinxian. Online identification of measurement error while drilling based on transformed unscented Kalman filter[J]. Journal of Computer Applications, 2021,41(S1):327-331.

[21] 汪存圣,王潘,张莹,等.松辽盆地南部青山口组水平井定向钻进地质导向技术[J].地质找矿论丛,2025,40(03):297-305.
WANG Cunsheng, WANG Pan, ZHANG Ying, et al. Geological guidance technology for directional drilling of horizontal wells in the Qingshankou Formation in the southern Songliao Basin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research,2025,40(3):297-305.

[22] 王植锐,王俊良.国外旋转导向技术的发展及国内现状[J].钻采工艺,2018,41(2):37-41.
WANG Zhirui, WANG Junliang. Development of rotary steering technology in foreign countries and its status quo in China [J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(2):37-41.

(编辑　王跃伟)