

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209182

# 基于惯性传感组件和 BP 神经网络的 防冲钻孔机器人钻具姿态解算\*

司 垒,王忠宾,王 浩,魏 东,谭 超  
(中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116)

**摘 要:** 钻孔卸压是高地应力矿井治理冲击地压的首要措施,对实施钻孔作业的防冲钻孔机器人钻具姿态准确测量是保障钻孔位置及卸压效果的前提。为此,本文提出了基于惯性传感组件和 BP 神经网络的防冲钻孔机器人钻具姿态解算方法,通过设计惯性传感组件的空间阵列式布局方式(空间阵列式 IMU),建立了空间阵列式 IMU 的数据融合模型及位姿解算模型,实现了钻具姿态的高精度解算。在此基础上,提出了基于 BP 神经网络的惯性传感组件误差补偿方法,建立了钻具姿态解算误差补偿模型,并通过钻具模拟运动的解算分析对空间阵列式 IMU 解算和误差补偿方法的可行性进行了验证。最后,通过搭建的防冲钻孔机器人钻具姿态监测实验平台,对不同方法的钻具解算结果进行对比分析。实验结果表明,在 BP 神经网络模型进行误差补偿后,本文所提方法解算出的钻具姿态精度明显提高,钻具方位角、倾角和横滚角的平均误差分别为 0.099°、0.079°和 0.045°,有效抑制了惯性传感组件的漂移和误差积累,且钻具姿态解算误差曲线没有出现发散现象。因此,该方法可以持续稳定地对防冲钻孔机器人钻具姿态进行可靠监测,具有较高的推广应用价值。

**关键词:** 防冲钻孔机器人;钻具姿态;惯性传感组件;神经网络;误差补偿

**中图分类号:** TH6 TD42 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.60

## Drilling tool attitude calculation of drilling robot for rockburst prevention based on inertial sensing assembly and BP neural network

Si Lei, Wang Zhongbin, Wang Hao, Wei Dong, Tan Chao

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Borehole pressure relief is the primary measure to control rock bursts in high in-situ stress mines. Accurate measurement of drilling tool attitude of the drilling robot for rockburst prevention is the premise to ensure the drilling hole position and pressure relief effect. Therefore, this article proposes a drilling tool attitude calculation method based on inertial sensing assembly and BP neural network. By designing the spatial array layout of inertial sensing assembly (spatial array IMU), the data fusion model and the attitude calculation model of spatial array IMU are formulated, which could realize the high-precision calculation results of drilling tool attitude. On this basis, the error compensation method of inertial sensing units based on the BP neural network is proposed and the error compensation model of drilling tool attitude calculation is established. The feasibility of spatial array IMUs calculation and error compensation method is evaluated by analyzing the drilling tool simulation motion. Finally, the drilling tool attitude monitoring experimental platform of the drilling robot is established to compare and analyze the drilling tool calculation results of different methods. Experimental results show that after the error compensation of the BP neural network model, the attitude accuracy of the drilling tool calculated by the proposed method is significantly improved, and the average errors of azimuth, inclination, and roll angle are 0.099°, 0.079°, and 0.045°, respectively. The compensation measures effectively restrain the drift and error accumulation of inertial sensing units, and there is no divergence in the error curve of drilling tool attitude calculation. Therefore, this method can continuously and reliably monitor the drilling tool attitude of drilling robot for rockburst prevention s and has high popularization and application value.

**Keywords:** drilling robot for rockburst prevention ; drilling tool attitude; inertial sensing assembly; neural network; error compensation

收稿日期:2022-01-12 Received Date: 2022-01-12

\* 基金项目:国家重点研发计划项目资助(2020YFB1314200)、江苏高校优势学科建设工程(苏政办发[2018]87号)项目资助

## 0 引言

深部煤矿开采时常伴随着冲击地压的发生,近年来我国已有 200 余座煤矿发生过冲击地压,频次与强度较 80 年代均有大幅增加<sup>[1-2]</sup>。钻孔卸压是防治冲击地压的重要方法,目前煤矿井下防治冲击地压主要依靠工人进入危险区域进行人工卸压,存在较大的安全隐患。因此,利用钻孔机器人代替人工进行打孔作业可以有效保障工人生命安全和卸压孔精确位置,而首当其冲就需要解决钻具的姿态监测问题<sup>[3-4]</sup>。

煤矿井下环境特殊,工作环境狭窄,姿态监测过程中常用的卫星定位、无线通讯手段等常规技术无法满足狭长工作环境中获取钻具姿态精确信息。惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU) 获取位姿信息时需要的解算数据均来自自身,无需与外界环境进行交互,可以较好的抵抗外界干扰适应恶劣环境。但 IMU 系统在工作过程中需要对加速度信息进行二次积分,导致解算结果误差累积较大<sup>[5-7]</sup>。近年来,国内外研究学者通过惯性导航冗余系统降低累积误差成为提高定位精度的主要发力点,通过对冗余信息融合修正 IMU 工作过程中的累积误差,进而提高系统测量精度。张共愿等<sup>[8]</sup>提出了基于相对导航的多平台惯导误差联合修正方法,并通过仿真分析证明了该方法在降低 INS 误差方面的有效性。李佳璇等<sup>[9]</sup>提出了一种空间位置相互约束的双 MIMU(微型惯性测量组合)导航方法,提高了定位精度。王彬等<sup>[10]</sup>设计了冗余结构捷联惯导组进行信息数据融合,提高了定位精度。李杨等<sup>[11]</sup>进行小角度建模降低安装误差,并利用 Kalman 滤波进行冗余 MEMS-IMU 分立标定从而提高精度。司垒等<sup>[12]</sup>设计了基于差分式惯性传感组件的采煤机位姿解算方法,明显改善了测量精度。张羽飞等<sup>[13]</sup>针对井下环境,融合了视觉与惯导信息,进而提高机器人的定位精度。李猛钢<sup>[14]</sup>将雷达、IMU 和 UWB(超宽带)数据融合对巷道进行精确建图,实现了机器人巷道动态精确定位。任元等<sup>[15]</sup>提出了一种冗余配置惯性测量单元的双轴旋转调制方法,通过双轴旋转对冗余惯性测量单元进行常值误差修正,实现了误差的有效补偿。汪跃龙等<sup>[16]</sup>和高怡等<sup>[17]</sup>在测量钻具姿态信息时将加速度计、磁力计、陀螺仪信息进行加权融合,提高了动态测量精度。蔡振等<sup>[18]</sup>通过双线性补偿与泰勒展开法建立了钻具姿态控制模型,提高了钻具控制过程中的稳定性。杨全进等<sup>[19]</sup>通过改进无迹卡尔曼滤波消除钻具姿态监测过程中的噪声干扰,实现了钻具姿态的快速解算。

尽管国内外学者在获取井下移动装备位姿信息方面进行了大量研究,但仍然存在如下问题:

1) 惯性导航系统对载体定位过程中会产生随时间不断增大的累积误差,目前主流补偿手段是通过辅助定位手段,缺少通过结构创新降低累积误差的方法。

2) 在惯性导航系统误差补偿方面,许多学者根据惯导系统物理模型建立近似的误差补偿模型,但误差补偿模型存在的偏差会随时间累积不断放大,导致补偿效果并不理想。

针对上述问题,本文分析了 IMU 解算过程中的确定性与非确定性误差,建立了基于空间阵列式惯性传感组件(空间阵列式 IMU)的数据融合模型,提高了防冲钻孔机器人钻具姿态的解算精度;研究了基于 BP 神经网络的空间阵列式 IMU 姿态解算误差补偿方法,并进行了仿真分析与实验验证,证明了本文所提方法可以有效对钻具姿态进行可靠监测。

## 1 钻具姿态调节原理及坐标系建立

### 1.1 钻具姿态调节原理

防冲钻孔机器人的基本结构如图 1 所示,防冲钻孔机器人钻具的方位角为钻具与防冲钻孔机器人前进方向的夹角;钻具倾角为钻具与水平面的夹角;钻具的横滚角为钻具与铅垂线的夹角,该角度一般在钻孔卸压过程不进行调节。其钻进系统一般布置于履带车上方,通过水平回转减速器相连接,并由液压马达驱动水平减速器实现钻具方位角的调节。水平减速器顶部通过螺栓固定连接有导向立柱,其穿过提升套内部,具有导向功能,增强钻进系统工作的稳定性。提升套被提升油缸推起不同的高度,从而调节钻具的高度。通过调节提升油缸推移量,使得前后油缸推动位移不同,进而实现钻具倾角的调节。

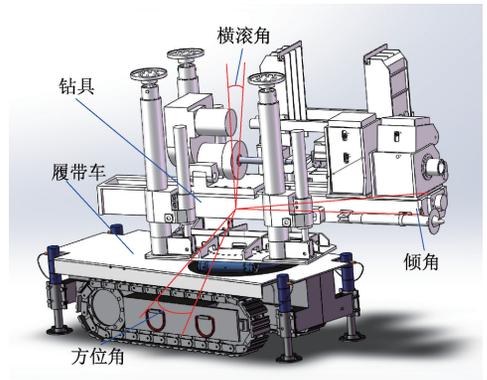


图 1 防冲钻孔机器人钻具姿态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of drilling tool attitude of the drilling robot for rockburst prevention

### 1.2 坐标系建立

本文建立的坐标系如图 2 所示,其中,惯性坐标系用  $i$  表示,地球坐标系用  $e$  表示,导航坐标系用  $n$  表示,原点

设置在井下卸压区域入口处,设置  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴分别指向东北天;载体坐标系与钻具固连,用  $b$  表示;计算导航坐标系,用  $m$  表示。

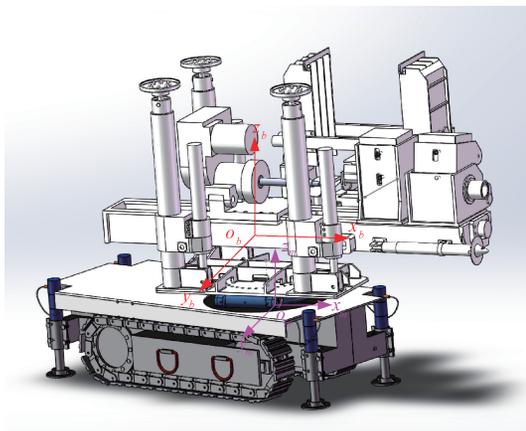
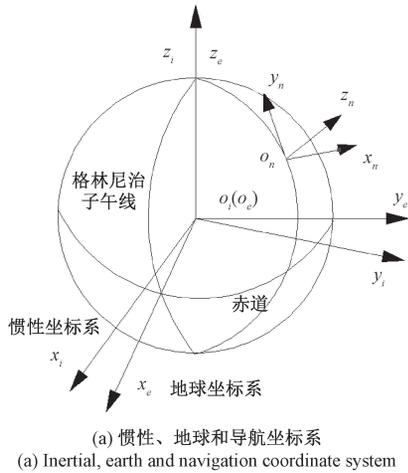


图 2 坐标系建立过程

Fig. 2 Coordinate system establishment process

防冲钻孔机器人钻具姿态信息是根据导航坐标系进行描述的,而惯性传感组件对钻具进行姿态监测需要在载体坐标系下进行,因此需要进行坐标系的转换,该过程可以利用旋转矩阵来描述,一般用  $C_n^b$  表示。将导航坐标系  $n$  依次绕  $z$  轴、 $x_1$  轴(即  $n$  绕  $z$  轴旋转后的  $x$  轴)、 $y_2$  轴(即  $n$  绕  $x_1$  轴旋转后的  $y$  轴)转动  $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\gamma$  角度,即可将导航坐标系转换成载体坐标系,其中  $\phi$  为方位角, $\gamma$  为倾角, $\theta$  为横滚角。

## 2 惯性传感组件的数据融合模型建立

### 2.1 惯性传感组件的空间阵列式布局方法

通过查阅相关文献可知,用于移动机器人的惯性传感组件大多采用平面三角式布局或平面四角式(差分

式)布局。上述方式所布局的 IMU 测量轴均相互平行,且与载体振动的 3 个轴线平行。由于 IMU 在其测量轴方向上最为灵敏,能够感知微小的振动,因此平面式布局方式容易受到振动的干扰,采集的比力加速和角速度信号包含一定的振动噪声,导致钻具姿态解算精度较低。为了抑制确定性误差的积累与降低非确定性误差的干扰,本文设计了一种基于空间阵列式 IMU 的误差补偿方法,将 5 个 IMU 按照特定的空间结构进行布局,并对获取的数据进行融合与解算,进而对累积误差进行补偿,得到精确的钻具姿态信息。具体布局方式如图 3 所示。

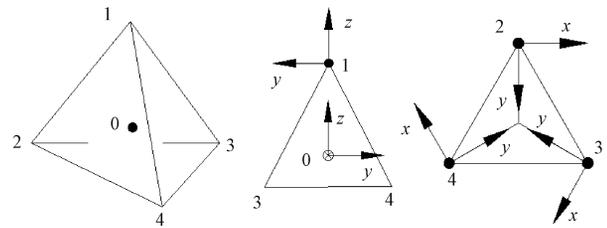


图 3 空间阵列式 IMU 布局方式

Fig. 3 Component layout of space array IMU

从图 3 中可以看出,空间阵列结构是对 5 个 IMU 分别布置在正四面体中心与 4 个顶点上。在对钻具姿态测量时,将惯性传感组件固定在防冲钻孔机器人钻具上,并对 5 个 IMU 的测量数据同步采集处理。空间阵列式布局下,不同 IMU 的坐标轴相互之间成一定角度,对 5 个 IMU 的输出信息转换到载体坐标系中进行融合。理论上,5 个 IMU 经过空间阵列式布局后可以基本消除确定性误差,同时将非确定性误差进行极大程度地抑制。

### 2.2 数据融合方程

#### 1) 角速度融合方程

惯性测量单元进行角速度测量时,其输出的角速度  $\omega$  由基本的真实角速度  $\omega_r$  和比重较小的角速度确定性误差  $\omega_c$  和角速度非确定性误差  $\omega_u$ ,计算公式为:

$$\omega = \omega_r + \omega_c + \omega_u \quad (1)$$

角速度确定性误差产生时矢量属性相同,故在数据融合时通过反向进行抵消;角速度非确定性误差的矢量属性一般无法获取,但可以通过取多个惯性测量单元测量均值的方式来减小。由图 3 可知,3 号与 4 号 IMU 的坐标轴与载体坐标系的坐标轴并不平行,以 3 号 IMU 为例,将 3 号 IMU 绕  $z$  轴顺时针旋转  $150^\circ$  即可获得载体坐标系下的输出信息。

$$\begin{bmatrix} \omega_{3bx} \\ \omega_{3by} \\ \omega_{3bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{3x} \\ \omega_{3y} \\ \omega_{3z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $\omega_{3bx}$  为3号惯性测量单元坐标系变换到载体坐标系绕  $x$  旋转的角速度;  $\omega_{3x}$  为3号惯性测量单元测量的  $x$  轴旋转角速度。

由此,可以得到载体坐标系下各个 IMU 的角速度信息,将转换后的角速度进行融合即可得到消除非确定性误差后的角速度信息,如下:

$$\omega_s = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} \omega_{0x} - \omega_{1x} - \omega_{2y} + \omega_{3bx} + \omega_{4bx} \\ \omega_{0y} - \omega_{1y} + \omega_{2x} + \omega_{3by} + \omega_{4by} \\ \omega_{0z} + \omega_{1z} + \omega_{2z} + \omega_{3bz} + \omega_{4bz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\omega_s$  为5个 IMU 经过融合后的角速度矢量;  $\omega_{0x}$  表示0号惯性测量单元输出的角速度参数在其测量坐标系下  $x$  轴上的分量。

通过对式(3)分析可知,当解算过程中所用 IMU 的属性完全相同时,  $x$  轴和  $y$  轴角速度的确定性误差通过均值方式融合可以减小为原来误差的  $1/5$ ,  $z$  轴方向保持不变。在实际工作时,5个 IMU 的属性很难完全相同,故空间阵列式 IMU 解算算法可以最大程度的消除确定性误差。而非确定性误差无法获取大小与方向,但经过融合后可以保持在较低的水平,特殊时刻甚至完全消除,从而提高钻具姿态的解算精度。

## 2) 比力加速度融合方程

惯性测量单元进行比力加速度测量时,其输出的比力加速度  $f$  由基本的真实比力加速度  $f_r$  和比重较小的比力加速度确定性误差  $f_c$  与比力加速度非确定性误差  $f_u$ , 计算公式为:

$$f = f_r + f_c + f_u \quad (4)$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时,防冲钻孔机器人钻具姿态变换矩阵的微分方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{nbx}^b & -\omega_{nby}^b & -\omega_{nbz}^b \\ \omega_{nbx}^b & 0 & \omega_{nbz}^b & -\omega_{nby}^b \\ \omega_{nby}^b & -\omega_{nbz}^b & 0 & \omega_{nbx}^b \\ \omega_{nbz}^b & \omega_{nby}^b & -\omega_{nbx}^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\omega_{nb}^b$  为载体坐标系相对导航坐标系的角速度在载体坐标系的投影;  $\omega_{nbx}^b$ 、 $\omega_{nby}^b$ 、 $\omega_{nbz}^b$  分别表示  $\omega_{nb}^b$  在载体坐标系  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴上的投影分量。四元数的初值由惯性传感组件的初始位置确定,并由式(7)可以求出四元数  $q_0$ 、 $q_1$ 、 $q_2$  和  $q_3$  的实时值。

由此可以求出防冲钻孔机器人钻具的姿态角,表达式如式(8)所示。

比力加速度具有大小和方向,在解算过程中可以将 IMU 的输出投影到载体系的坐标轴上,因此空间阵列式 IMU 的比力加速度融合方程为:

$$f_s = \begin{bmatrix} f_{x0} - f_{x1} - f_{y2} + \left(\frac{1}{2}f_{y3} - \frac{\sqrt{3}}{2}f_{x3}\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}f_{x4} - \frac{1}{2}f_{y4}\right) \\ f_{y0} - f_{y1} + f_{x2} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}f_{y3} - \frac{1}{2}f_{x3}\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}f_{y4} - \frac{1}{2}f_{x4}\right) \\ f_{z0} + f_{z1} + f_{z2} + f_{z3} + f_{z4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $f_s$  为5个 IMU 融合后的比力加速度矢量;  $f_{x0}$  是第0号惯性测量单元输出比力加速度在测量坐标系下  $x$  轴比力加速度。可以看出,本文融合方式较好地消除了加速度解算过程中的确定性误差,同时由于轴线角度阵列降低了工作过程中振动等外界因素带来的非确定性误差,进而提高钻具姿态的解算精度。

## 3 钻具姿态的空间阵列式 IMU 解算过程

### 3.1 姿态解算过程

为了实时获得防冲钻孔机器人钻具的姿态参数,需要实时更新姿态变换矩阵,进而对空间阵列式 IMU 融合的姿态参数进行实时解算。四元数法对钻具姿态进行解算时,计算量较小,且不会出现奇点与退化,可以较好的对钻具姿态信息进行实时监测。

姿态变换矩阵的四元数形式如下:

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left[ \frac{2(q_2q_3 + q_0q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right] \\ \arcsin \left[ 2(q_0q_2 - q_1q_3) \right] \\ \arctan \left[ \frac{2(q_1q_2 + q_0q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \right] \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 3.2 仿真对比分析

#### 1) 钻具运动工况模拟

为了验证所提空间阵列式 IMU 解算算法可以在不同工况下对钻具姿态进行有效监测,本文通过数值仿真对不同工况下钻具姿态进行模拟。为了便于分析防冲钻孔机器人钻具姿态变化情况,定义了钻具姿态计算导航坐标系  $m$  (如图2所示),钻具姿态变化时的模拟角速度  $\omega(t)$  的定义均在此坐标系内。由于防冲钻孔机器人钻具的高度值直接由激光测距仪输出,所以本文不再对钻

具的高度监测进行描述。钻具实际工作过程中上位机通过控制角速度  $\omega(t)$  变化改变钻具姿态,不同运动状态下,角速度按照如下顺序变化:

第1阶段,改变钻具的方位角使得钻具达到指定位置,方位角角速度由 0 变为  $\omega_1$ ,钻具旋转到指定位置方位角角速度变为 0,然后倾角以角速度  $\omega_2$  变化,钻具到达指定位置,防冲钻孔机器人开始钻进作业;第2阶段,钻孔完成后钻具回到初始位置,倾角以角速度  $-\omega_2$  回到水平位置,然后方位角以角速度  $-\omega_1$  回到初始位置。在  $0 \sim t$  时刻,  $\omega(t) = [0 \ 0 \ \omega_1]^T$ ; 在  $t \sim 2t$  时刻,  $\omega(t) = [0 \ \omega_2 \ 0]^T$ ; 在  $2t \sim 3t$  时刻,  $\omega(t) = [0 \ -\omega_2 \ 0]^T$ ; 在  $3t \sim 4t$  时刻,  $\omega(t) = [0 \ 0 \ -\omega_1]^T$ 。

2) 仿真结果

为了更真实地模拟防冲钻孔机器人钻具的运动工况,本文对钻具的方位角和倾角均发生变化的运动工况进行模拟,此时钻具的横滚角设定不变。设定防冲钻孔机器人钻具的初始姿态角  $A_0 = [0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ]^T$ ,设置钻具方位角转动到  $+90^\circ$ ,即姿态角  $A_1 = [0^\circ \ 0^\circ \ 90^\circ]^T$ ,再将钻具倾角转动到  $+27^\circ$  时到达钻孔位置,即姿态角  $A_2 = [0^\circ \ 27^\circ \ 90^\circ]^T$ 。同时,将空间阵列式 IMU 的采样频率设定为 100 Hz。根据上述设定的参数,结合钻具姿态工况模拟方法,给出姿态角仿真过程中的参数信息:仿真时间为 800 s;  $0 \sim 90$  s, 钻具静止;  $90 \sim 100$  s, 钻具方位角以角速度为  $\frac{\pi}{20}$  (rad/s) 匀速转动;  $100 \sim 102$  s, 钻具静止;  $102 \sim 105$  s,

钻具倾角以角速度为  $\frac{\pi}{20}$  rad/s 匀速转动;  $105 \sim 505$  s, 钻具达到指定位置,防冲钻孔机器人开始进行钻孔卸压;  $505 \sim 507$  s, 钻具倾角以角速度为  $-\frac{\pi}{20}$  rad/s 匀速转动;  $507 \sim 510$  s, 钻具静止;  $510 \sim 520$  s, 钻具方位角以角速度为  $-\frac{\pi}{20}$  rad/s 匀速转动,回到初始位置;  $520 \sim 800$  s, 钻具静止。钻具姿态具体变化情况如图 4 所示。

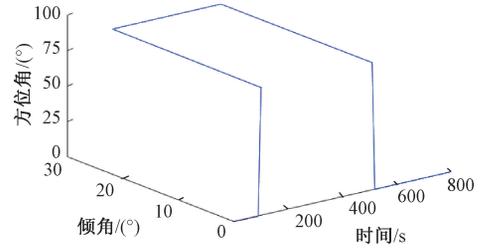


图4 钻具姿态的仿真轨迹

Fig. 4 Simulation trajectory of drilling tool attitude

为了验证提出的空间阵列式 IMU 姿态解算方法的可行性与优越性,将空间阵列式 IMU 分别与文献[20]中单 IMU 解算算法和文献[12]中差分式 IMU 解算算法对钻具姿态解算结果进行对比分析,并给出了解算误差对比曲线,具体结果如图 5 所示。

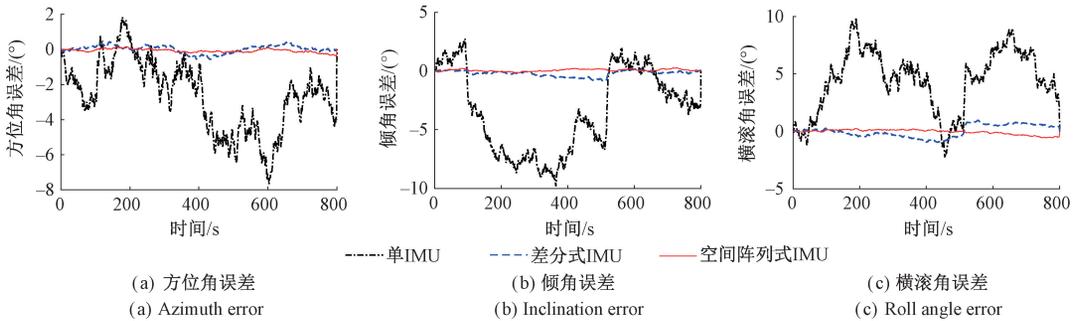


图5 钻具模拟运动的姿态解算误差对比结果

Fig. 5 Comparison of attitude calculation error results of drilling tool simulation movement

分析图 5 可知,单 IMU 解算方法输出的姿态误差最大且波动范围较大,具有很大的随机误差;差分式 IMU 解算方法输出的姿态误差较小,能够在一定程度上抑制误差的积累,但其误差波动范围仍然不够理想;而本文提出的空间阵列式 IMU 解算方法在抑制误差积累方面具有更好的表现,其姿态角误差曲线非常贴近横轴且波动范围最小,方位角、倾角和横滚角的最大误差分别为  $0.363^\circ$ 、 $0.273^\circ$  和  $0.572^\circ$ ,平均误差分别为  $0.097^\circ$ 、 $0.095^\circ$  和  $0.157^\circ$ 。由此说明,在方位角和倾角均发生突

变的运动工况下,空间阵列式 IMU 能够更好地抑制惯性测量单元的漂移误差,减少误差的积累,从而获得更高的姿态解算精度,仿真结果验证了空间阵列式 IMU 姿态解算方法的可行性和优越性。

4 基于 BP 神经网络的姿态解算误差补偿

虽然空间阵列式布局方法能有效消除惯性测量单元自身带来的确定性误差,且在一定程度上能降低非确定

性误差,但是精度还是受限于数学模型与实际惯性系统物理模型的逼近程度。另外,在实际运用中发现,非确定性误差变化规律不明显且随时间累积不断增大,因此无论采取什么样的补偿措施,都会因使用的误差补偿模型存在一定偏差而降低补偿精度。针对以上问题,本文提出了基于BP神经网络的姿态解算误差补偿方法:在对钻具姿态进行测量前期,采集每个采样周期下空间阵列式IMU的三轴比力加速度、三轴角速度信息及相应时间作为神经网络的输入,钻具姿态解算误差作为神经网络的输出,对构建的神经网络模型进行在线训练,将训练好的神经网络作为误差补偿模型。这种在线训练、在线使用的方法,只需关注惯性测量单元测量数据与解算误差之间的关系,不再对其具体的物理模型进行研究,可以有效降低时间累积对姿态解算误差的影响。

#### 4.1 BP神经网络模型

BP神经网络的非线性映射能力强且结构简单,本文选择构建以 $(\omega, \mathbf{f}, t)$ 为输入、以(方位角误差 $\phi_e$ , 倾角误差 $\gamma_e$ , 横滚角误差 $\theta_e$ )为输出的BP神经网络结构。根据模型复杂度需求,选择含有1个隐含层的网络进行训练,并将隐含层设置为8个节点,选用sigmoid函数为隐含层的激活函数,选用purelin函数为输出层的激活函数。神经网络结构模型如图6所示。

为了确定最优的BP神经网络模型以提高预测精度,本文利用遗传算法进行参数优化。设定遗传算法种

群规模为10,进化次数为50,交叉变异概率为0.3,变异概率为0.2。

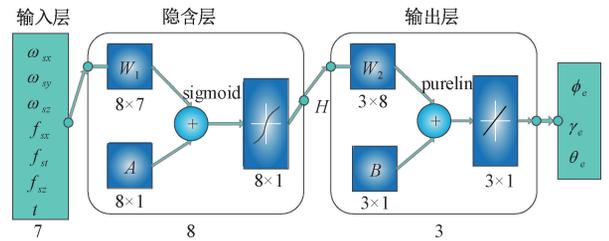


图6 BP神经网络结构模型

Fig. 6 Structure model of BP neural network

#### 4.2 仿真结果分析

为了使BP神经网络能更准确地拟合出惯性传感组件的姿态解算误差,先将神经网络的样本数据进行离群点剔除、缺失数据处理、归一化处理等操作,再将样本数据集导入到神经网络模型中进行训练。

为了验证基于BP神经网络的空间阵列式IMU解算误差补偿方法的可行性,将3.2节中的钻具姿态模拟仿真产生的三轴比力加速度、三轴角速度和对应时间数据作为网络模型的输入训练集,将相应的姿态解算误差作为输出训练集。利用训练好的神经网络模型对方位角误差 $\phi_e$ 、倾角误差 $\gamma_e$ 和横滚角误差 $\theta_e$ 进行预测,结果如图7所示。

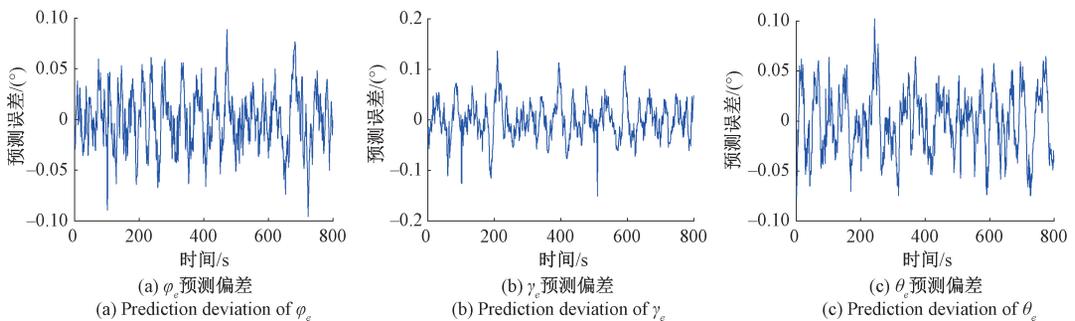


图7 钻具模拟运动的姿态解算误差预测结果

Fig. 7 Attitude calculation error prediction results of drilling tool simulation movement

由图7可以看出,基于BP神经网络的钻具姿态角预测误差曲线与真实姿态角误差曲线的变化趋势基本吻合,预测误差几乎都在 $-0.1^\circ \sim 0.1^\circ$ 范围内,具有较好的预测效果。为了进一步降低防冲钻孔机器人钻具姿态解算误差,利用神经网络模型的误差预测值对惯性传感组件的姿态解算结果进行补偿,结果如图8所示。

进一步分析图8可以得到,在利用神经网络预测结果进行误差补偿后,空间阵列式IMU解算出的方位角最大误差为 $0.088^\circ$ 、平均误差为 $0.022^\circ$ ,倾角的最大误差为 $0.102^\circ$ ,平均误差为 $0.025^\circ$ ,横滚角的最大误差

为 $0.151^\circ$ 、平均误差为 $0.028^\circ$ ,补偿后的解算误差明显比补偿前低的多,姿态角解算的平均误差均在 $0.03^\circ$ 以内,验证了该方法的有效性。

## 5 实验验证

为了验证本文所提钻具姿态解算方法可以适应钻机运动的真实工况,设计并搭建了防冲钻孔机器人钻具姿态监测实验平台,如图9所示。由空间阵列式IMU的融合与解算过程可知,正四面体棱长对钻具姿态解算结

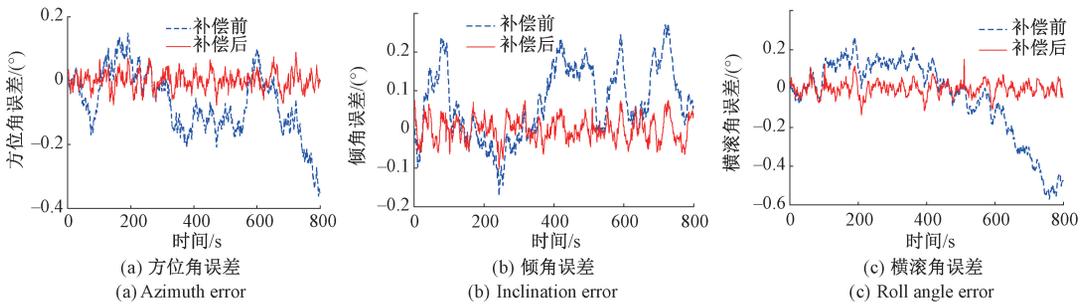


图 8 钻具模拟运动的姿态解算误差补偿结果

Fig. 8 Attitude calculation error compensation results of drilling tool simulation movement

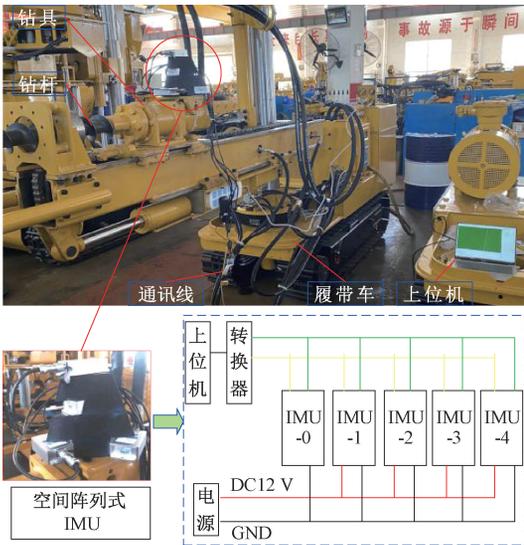


图 9 现场实验平台

Fig. 9 Field experimental platform

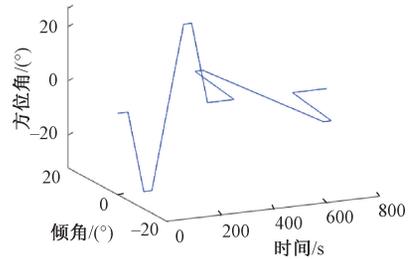


图 10 防冲钻孔机器人钻具姿态变化曲线

Fig. 10 The attitude change curve of drilling tool

果没有影响,因此本文根据现场实验安装尺寸要求,设定四面体棱长为 16 cm,5 个惯性测量单元被固定在该四面体上形成空间阵列式布局,并安装在防冲钻孔机器人钻具的合适位置。

防冲钻孔机器人钻具的方位角和倾角变化由相应的液压马达驱动。在进行钻具姿态监测实验时,将防冲钻孔机器人的履带车固定,先调节防冲钻孔机器人钻具的方位角变化,并回到初始位置;再调节钻具的倾角变化,并回到初始位置,横滚角保持不变。同时使用安装在回转轴上的 QKJSH 型磁编码器分别测量防冲钻孔机器人钻具方位角和倾角的变化情况,并作为后续对比分析的参考值,如图 10 所示。QKJSH 型磁编码器的分辨率为 0.001°,精度 ≤ 0.02°,能够满足防冲钻孔机器人钻具姿态监测的现场需求。

在对防冲钻孔机器人钻具姿态解算前,需要对空间阵列式 IMU 组件进行初始对准,一般包括粗对准和精对

准。实验场地经度为 117.18°,纬度为 34.27°,海拔为 54 m,当地重力加速度为 9.821 m/s<sup>2</sup>,地球旋转速度为 15.041°/h。将空间阵列式 IMU 组件固定在钻具上,将钻具姿态调至初始位置并静置 100 s,采集每个 IMU 输出的比力加速度和角速度,并将数据导入空间阵列式数据融合模型进行融合,使用融合后的数据进行粗对准得到初始姿态变换矩阵,再利用卡尔曼滤波算法对其进行修正,完成精对准,进而实现对空间阵列式 IMU 组件的初始对准,最终初始对准结果如下:方位角为 0.034°、倾角为 0.027°和横滚角为 -0.017°,初始对准过程如图 11 所示。

上位机接收 IMU 输出的数据信息,利用不同算法解算出钻具姿态角信息,并与 QKJSH 型磁编码器监测的高精度姿态角进行对比分析,结果如图 12 所示。可以看出,空间阵列式 IMU 解算方法在方位角、倾角和横滚角的解算精度均明显高于单 IMU 和差分式 IMU,3 个姿态角的平均误差分别为 0.575°、0.461°和 0.290°,详细对比结果见表 1。当防冲钻孔机器人钻具姿态进行突变调节时,惯性测量单元在钻具姿态监测系统中受到的干扰变大,利用空间阵列式 IMU 解算方法可以有效降低突变干扰的影响,减少漂移误差并抑制误差的积累,解算出的钻具姿态仍具有较好的跟随能力,体现出该方法的优越性。

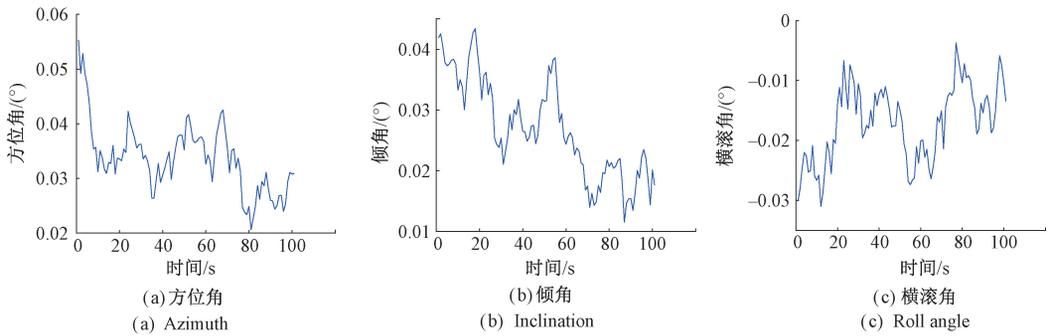


图 11 空间阵列式 IMU 的钻具姿态角初始对准

Fig. 11 Initial alignment of drilling tool attitude angle of space array IMU

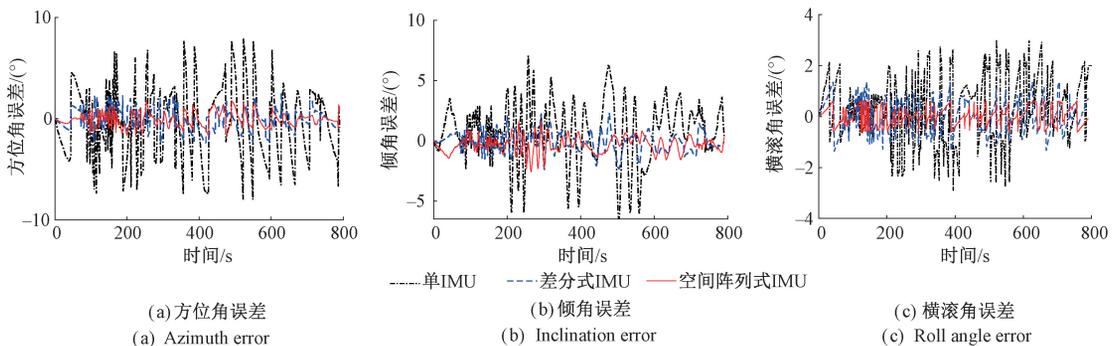


图 12 地面实验过程中钻具姿态解算误差对比结果

Fig. 12 Comparison of drilling tool attitude calculation error results in ground experiment

表 1 地面实验过程中钻具姿态解算误差对比

Table 1 Drill tool attitude calculation errors in the ground experiment (°)

解算方法	姿态角	最大误差	平均误差
单 IMU	方位角	7.966	2.864
	倾角	7.047	2.038
	横滚角	3.001	1.018
差分式 IMU	方位角	2.480	0.855
	倾角	2.402	0.643
	横滚角	1.372	0.521
空间阵列式 IMU	方位角	1.827	0.575
	倾角	2.058	0.461
	横滚角	0.612	0.290
本文所提方法	方位角	0.403	0.099
	倾角	0.446	0.079
	横滚角	0.142	0.045

为了进一步验证基于 BP 神经网络的空间阵列式 IMU 解算误差补偿方法的有效性,通过采集空间阵列式 IMU 监测的防冲钻孔机器人钻具三轴比力加速度、三轴角速度以及相应时间,对构建的 BP 神经网络模型进行训练,并对姿态角解算误差随时间的变化情况进行预测,将预测结果作为误差补偿来进一步提高钻具姿态参数的解算精度,补偿前后的姿态角解算误差对比结果如图 13 和表 1 所示。

从图 13 和表 1 可以得到,在 BP 神经网络进行解算误差补偿后,本文所提方法解算出的钻具姿态精度明显提高,方位角的最大误差为  $0.403^\circ$ 、平均误差为  $0.099^\circ$ ,倾角的最大误差为  $0.446^\circ$ 、平均误差  $0.079^\circ$ ,横滚角的最大误差为  $0.142^\circ$ 、平均误差为  $0.045^\circ$ 。实验结果表明,在防冲钻孔机器人钻具方位角和倾角均变化的情况下,本文提出方法能够有效抑制惯性测量单元的漂移,大幅降低误差积累,使钻具姿态角解算误差曲线没有出现发散现象。因此,该方法可以持续稳定地对防冲钻孔机器人钻具姿态进行可靠监测,具有较高的推广应用价值。

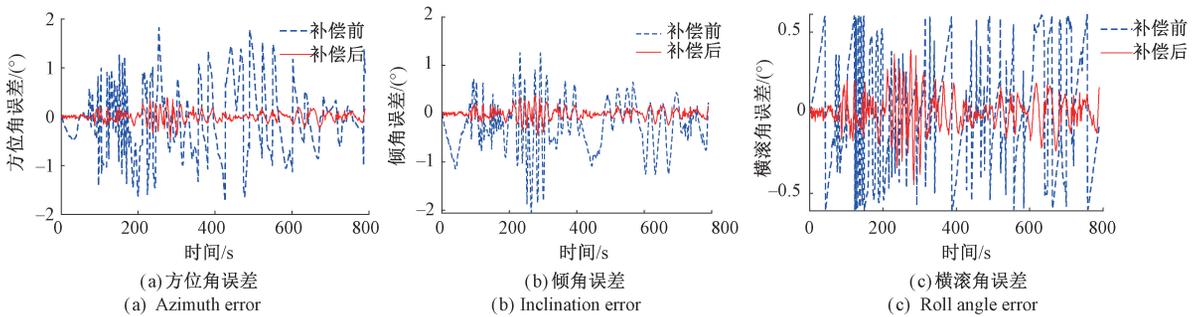


图 13 地面实验过程中钻具姿态解算误差补偿结果

Fig. 13 Attitude calculation error compensation results of drill tool in the ground experiment

## 6 结 论

为了精确监测防冲钻孔机器人钻具的姿态信息,减少钻具姿态误差的累积,本文设计了惯性传感组件的空间阵列式布局方式,并根据实际工况进行了钻具姿态变化的解算仿真分析,结果表明,空间阵列式 IMU 解算方法能够更好地抑制惯性测量单元的漂移误差,减少误差的积累,方位角、倾角和横滚角的解算精度均优于单 IMU 和差分式 IMU 姿态解算方法,验证了所提方法的可行性和优越性。为了进一步降低惯性测量单元的随机误差,构建了基于 BP 神经网络的姿态解算误差补偿模型,实现了钻具姿态角解算误差的可靠预测和精准补偿,仿真结果表明:基于 BP 神经网络误差补偿模型的空间阵列式 IMU 解算得到的方位角、倾角和横滚角平均误差分别为  $0.022^\circ$ 、 $0.025^\circ$  和  $0.028^\circ$ ,验证了该补偿方法的有效性。搭建了防冲钻孔机器人钻具姿态监测实验平台,进行了钻具姿态调节实验数据采集与分析,实验结果表明:空间阵列式 IMU 解算出的钻具姿态角平均误差由 BP 神经网络补偿前的  $0.575^\circ$ 、 $0.461^\circ$  和  $0.290^\circ$  减小至补偿后的  $0.099^\circ$ 、 $0.079^\circ$  和  $0.045^\circ$ ,误差补偿效果明显,验证了防冲钻孔机器人钻具姿态解算方法的实用性。上述钻具姿态解算精度满足了国家重点研发计划项目指南要求及现场需求,具有较高的推广应用价值。

### 参考文献

[1] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1-40.  
 QI Q X, LI Y ZH, ZHAO SH K, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: Establishment and consideration of theory and technology system [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.

[2] 陈岩峰,李学军,吴宏斌,等. 冲击地压机理及防控现状与发展态势分析[J]. 煤炭科技, 2021, 42(5): 70-75.  
 CHEN Y F, LI X J, WU H B, et al. Control status and development trend of rockburst mechanism and prevention in China [J]. Coal Science and Technology Magazine, 2021, 42(5): 70-75.

[3] 王国法,庞义辉,任怀伟. 煤矿智能化开采模式与技术路径[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 013501.  
 WANG G F, PANG Y H, REN H W. Intelligent coal mining pattern and technological path [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 013501.

[4] 李利平,贾超,孙子正,等. 深部重大工程灾害监测与防控技术研究现状及发展趋势[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2539-2556.  
 LI L P, JIA CH, SUN Z ZH, et al. Research status and development trend of major engineering disaster prevention and control technology in deep underground [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2539-2556.

[5] 孙伟,李亚丹,黄恒,等. 基于级联滤波的建筑结构信息/惯导室内定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 10-16.  
 SUN W, LI Y D, HUANG H, et al. A location method of building structure information/inertial navigation combination based on the cascade filtering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 10-16.

[6] 王开瑞,张永德,刘云辉. 基于惯性导航与电磁导航融合的靶器官运动跟踪方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 177-187.  
 WANG K R, ZHANG Y D, LIU Y H. Research on target

- organ motion tracking method based on the fusion of inertial navigation and electromagnetic navigation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 177-187.
- [7] 王忠宾, 司垒, 王浩, 等. 基于空间阵列式惯性单元的防冲钻孔机器人位姿解算方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 598-610.
- WANG ZH B, SI L, WANG H, et al. Position and attitude calculation method of anti-impact drilling robot based on spatial array inertial units [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 598-610.
- [8] 张共愿, 程咏梅, 程承, 等. 基于相对导航的多平台INS误差联合修正方法[J]. 航空学报, 2011(2): 271-280.
- ZHANG G Y, CHENG Y M, CHENG CH, et al. A joint correcting method of multi-platform INS error based on relative navigation[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2011(2): 271-280.
- [9] 李佳璇, 周广涛, 刘晓旭, 等. 基于等式约束卡尔曼的双MIMU行人导航方案[J]. 压电与声光, 2015, 37(2): 237-241.
- LI J X, ZHOU G T, LIU X X, et al. Dual MIMU pedestrian navigation scheme based on equality constraint Kalman filtering [J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2015, 37(2): 237-241.
- [10] 王彬, 申亮亮, 邵会兵, 等. 高精度多冗余捷联惯组配置优化设计与应用研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(6): 33-40.
- WANG B, SHEN L L, SHAO H B, et al. Research on high-precision RIMU configuration optimization design and application [J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(6): 33-40.
- [11] 李杨, 郭磊, 葛靖宇, 等. 一种基于输出误差观测的冗余MEMS-IMU标定技术研究[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(1): 133-138.
- LI Y, GUO L, GE J Y, et al. Research on redundant MEMS-IMU calibration technology based on output error observation [J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(1): 133-138.
- [12] 司垒, 王忠宾, 谭超, 等. 基于差分式惯性传感组件的采煤机位姿解算法[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(2): 220-227, 406.
- SI L, WANG ZH B, TAN CH, et al. Differential inertial sensing component based coal mining machine position attitude solution algorithm [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2021, 41(2): 220-227, 406.
- [13] 张羽飞, 马宏伟, 毛清华, 等. 视觉与惯导融合的煤矿移动机器人定位方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(3): 46-52.
- ZHANG Y F, MA H W, MAO Q H, et al. Coal mine mobile robot positioning method based on fusion of vision and inertial navigation [J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(3): 46-52.
- [14] 李猛钢. 面向井下钻孔机器人应用的精确定位与地图构建技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- LI M G. Research on technologies of accurate localization and mapping for underground drilling robot application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [15] 任元, 朱挺, 王丽芬, 等. 一种冗余配置惯性测量单元双轴旋转调制方法, CN202011079867.2 [P]. 2021-01-05.
- REN Y, ZHU T, WANG L F, et al. A two-axis rotational modulation method for redundantly configured inertial measurement units, CN202011079867.2 [P]. 2021-01-05.
- [16] 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.
- [17] 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 Y, CHENG W B, WANG Y L. Multi-source dynamic attitude combination measurement for near-bit drilling tool [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(2): 146-150.
- [18] 蔡振, 赖旭芝, 吴敏, 等. 定向钻具姿态的双线性补偿控制策略[J]. 控制与决策, 2020, 35(7): 1758-1764.
- CAI ZH, LAI X ZH, WU M, et al. Bilinear compensation control for attitude of directional drilling tools [J]. Control and Decision, 2020, 35(7): 1758-1764.
- [19] 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(6): 1168-1175.

YANG Q J, XU B CH, ZUO X, et al. An unscented Kalman filter method for attitude measurement of rotary steerable drilling assembly [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1168-1175.

[20] 郭卫, 张露, 赵栓峰. 基于捷联惯导的采煤机姿态解算算法研究[J]. 矿山机械, 2014(6): 15-20.

GUO W, ZHANG L, ZHAO SH F. Study on shearer posture algorithm based on strapdown inertial navigation[J]. Mining and Processing Equipment, 2014(6): 15-20.

## 作者简介



**司垒**, 2010 年于中国矿业大学获得学士学位, 2015 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学副教授, 主要研究方向为煤矿机电装备智能化、特种环境机器人。

E-mail: sileicool@163.com

**Si Lei** received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 2010 and 2015, respectively. He is currently an associate professor at China University of Mining and Technology. His main research interests include the intellectualization of coal mine electromechanical equipment and special environment robot.



**王忠宾** (通信作者), 1995 年于中国矿业大学获得学士学位, 1998 年于中国矿业大学获得硕士学位, 2002 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为中国矿业大学机电工程学院院长、教授, 主要研究方向为煤矿机电装备智能化、特种环境机器人。

E-mail: wangzbpaper@126.com

**Wang Zhongbin** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from China University of Mining and Technology in 1995 and 1998, respectively. He received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2002. He is currently the dean and professor of the School of Mechatronic Engineering at China University of Mining and Technology. His main research interests include the intellectualization of coal mine electromechanical equipment special environment robot.



**王浩**, 2019 年于合肥学院获得学士学位, 现为中国矿业大学硕士研究生, 主要研究方向为煤矿机器人。

E-mail: 2269590406@qq.com

**Wang Hao** received his B. Sc. degree from Hefei University in 2019. He is currently a master student at China University of Mining and Technology. His main research interest is the coal mine robot.



**魏东**, 2015 年于东北大学获得学士学位, 2021 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学讲师, 主要研究方向为煤矿复杂作业环境感知技术。

E-mail: weidongcmee@cumt.edu.cn

**Wei Dong** received his B. Sc. degree from Northeastern University in 2015, and his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2021. He is currently a lecturer at China University of Mining and Technology. His main research interest is the perception technology of complex working environment in coal mine.



**谭超**, 1986 年于成都科技大学 (现四川大学) 获得学士学位, 1997 年于中国矿业大学获得硕士学位, 2009 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学副教授, 主要研究方向为综采自动化与智能化关键技术。

E-mail: tccadcumt@126.com

**Tan Chao** received his B. Sc. degree from University of Science and Technology of Chengdu (now Sichuan University) in 1986, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 1997 and 2009, respectively. He is currently an associate professor at China University of Mining and Technology. His main research interest is the key technologies of fully mechanized mining automation and intellectualization.