



煤炭学报  
Journal of China Coal Society  
ISSN 0253-9993, CN 11-2190/TD

## 《煤炭学报》网络首发论文

题目: 基于 ESKF 与改进 IMM 算法的煤矿无人驾驶车辆井上-井下无缝定位  
作者: 王凯, 鲍久圣, 吕玉寒, 袁晓明, 阴妍, 王茂森, 张可琨, 葛世荣  
DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0676  
网络首发日期: 2024-11-08  
引用格式: 王凯, 鲍久圣, 吕玉寒, 袁晓明, 阴妍, 王茂森, 张可琨, 葛世荣. 基于 ESKF 与改进 IMM 算法的煤矿无人驾驶车辆井上-井下无缝定位[J/OL]. 煤炭学报. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0676>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.13225/j.cnki.jccs.2024.0676

# 基于 ESKF 与改进 IMM 算法的煤矿无人驾驶车辆井上-井下无缝定位

王凯<sup>1</sup>, 鲍久圣<sup>1\*</sup>, 吕玉寒<sup>1</sup>, 袁晓明<sup>2</sup>, 阴妍<sup>1</sup>, 王茂森<sup>1</sup>, 张可琨<sup>1</sup>, 葛世荣<sup>3</sup>

(1.中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2.中国煤炭科工集团太原研究院有限公司, 山西 太原 030006; 3.中国矿业大学(北京) 机械与电气工程学院 北京 100083)

**摘要：**随着我国煤矿智能化建设的不断推进，矿井辅助运输车辆向无人驾驶的方向发展已成为必然趋势。定位系统作为无人驾驶车辆的核心单元，单一定位方式及传统定位算法均难以满足煤矿辅运车辆从地面料场-斜井巷道-井下巷道-采掘工作面的全流程、高精度、低时延定位要求。首先，根据煤矿辅运车辆的运行工况及巷道环境，设计了一种基于 GNSS/UWB 融合 IMU 的井上-井下无缝定位系统，提出采用模型切换延时 (MSD) 作为无缝定位系统的性能评价指标；其次，针对 UWB 定位过程中的非视距 (NLOS) 误差问题，设计了 UWB/IMU 紧组合井下定位算法，并使用误差状态卡尔曼滤波 (ESKF) 对其进行滤波优化，仿真结果表明：ESKF 优化算法平均定位误差为 0.19 m，精度相较于单一 UWB 定位提高了 56%；再次，分析了交互式多模型的影响因素，针对模型概率矩阵误差大影响无缝定位精度的问题，设计了一种基于 ESKF 与模糊自适应改进交互式多模型 (FAIMM-ESKF) 的矿井无缝定位算法，仿真结果表明：FAIMM-ESKF 算法的定位精度比改进前提高了 29%；最后，在实验室搭建模拟斜井巷道，利用无人驾驶试验车开展了无缝定位系统的定位与评估试验，结果表明：无缝定位系统在井上-井下交互区域的平均误差为 0.131 m、最大误差为 0.452 m，相较于传统算法分别降低了 17.6% 与 14.8%；在整个试验过程中，FAIMM-ESKF 算法的最大误差为 0.498 m，平均误差为 0.25 m，模型切换延时均值为 35 ms，可满足煤矿辅运车辆全流程无人驾驶的定位精度与时延要求。研究结果可为推动建立煤矿井上-井下无缝衔接、精确高效的定位系统及定位算法提供理论参考，对于加快实现煤矿辅运车辆常态化无人驾驶、加速推进煤矿智能化建设具有重要意义和实用价值。

**关键词：**井下无人驾驶；无缝定位；超宽带定位；ESKF 滤波；交互式多模型

## Seamless Aboveground-Underground Positioning for Coal Mine Driverless Vehicles Based on ESKF and Improved IMM Algorithm

WANG Kai<sup>1</sup> BAO Jiu-sheng<sup>1\*</sup> LYU Yu-han<sup>1</sup> YUAN Xiao-ming<sup>2</sup> YIN Yan<sup>1</sup> WANG Mao-sen<sup>1</sup>  
ZHANG Ke-kun<sup>1</sup> GE Shi-rong<sup>3</sup>

(1.School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Taiyuan Institute of China Coal Technology & Engineering Group Co. Ltd, Taiyuan 030006, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the continuous promotion of intelligent construction in coal mines in China, the development of mine auxiliary transportation vehicles towards unmanned driving has become an inevitable trend. As the core unit of unmanned vehicles, the positioning system cannot meet the full process, high-precision, and low time delay positioning requirements of coal mine auxiliary transportation vehicles from the ground fabric field, inclined shaft roadway, underground roadway, to mining face with a single positioning method and traditional positioning algo-

项目基金：煤矿采掘机械装备国家工程实验室开放课题资助(编号：GCZX-2023-01)；江苏省研究生科研与实践创新计划项目(编号：KYCX24\_2727)；江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介：王凯 (2000—)，男，山西长治人，硕士研究生。E-mail: 2015043124@qq.com

通讯作者：鲍久圣 (1979—)，男，安徽桐城人，博士，教授，博士生导师。E-mail: cumtbs@cumt.edu.cn

gorithms. Firstly, based on the operating conditions of coal mine auxiliary transportation vehicles and the tunnel environment, a seamless positioning system for underground and above mines based on GNSS/UWB fusion IMU was designed, and a model switching delay (MSD) was proposed as the performance evaluation index for the seamless positioning system; Secondly, to address the issue of non line of sight (NLOS) errors in UWB positioning, a UWB/IMU tight combination downhole positioning algorithm was designed, and Error State Kalman Filter (ESKF) was used to filter and optimize it. Simulation results showed that the ESKF optimization algorithm had an average positioning error of 0.19 m, with an accuracy improvement of 56% compared to single UWB positioning; Once again, the influencing factors of interactive multiple models were analyzed. In response to the problem of large model probability matrix errors affecting seamless positioning accuracy, a mine seamless positioning algorithm based on ESKF and fuzzy adaptive improved interactive multiple models (FAIMM-ESKF) was designed. Simulation results showed that the positioning accuracy of the FAIMM-ESKF algorithm was improved by 29% compared to before improvement; Finally, a simulated inclined shaft tunnel was constructed in the laboratory, and a seamless positioning system positioning and evaluation experiment was conducted using an unmanned test vehicle. The results showed that the average error of the seamless positioning system in the interaction area between the well and the underground was 0.131 m, and the maximum error was 0.452 m, which was reduced by 17.6% and 14.8% compared to traditional algorithms, respectively; Throughout the entire experimental process, the maximum error of the FAIMM-ESKF algorithm was 0.498 m, the average error was 0.25 m, and the average model switching delay was 35 ms, which can meet the positioning accuracy and delay requirements of unmanned driving in the entire process of coal mine auxiliary transportation vehicles. The research results can provide theoretical reference for promoting the establishment of a seamless connection, precise and efficient positioning system and positioning algorithm for coal mines, and have important theoretical significance and practical value for accelerating the normalization of unmanned driving of auxiliary transportation vehicles in coal mines and accelerating the intelligent construction of coal mines.

**Key words:** unmanned mine vehicles; UWB positioning; seamless positioning; ESKF filtering; interactive multiple model

近年来,随着数字化经济与智能化技术的快速发展,我国煤炭行业逐步兴起了智能化建设高潮<sup>[1]</sup>。2023年1月工信部、应急管理部等17部门联合发布《“机器人+”应用行动实施方案》,明确提出要加快推进机器人在智能采掘、无人化运输等矿山场景中的应用。2024年4月国家矿山安监局、应急管理部等印发了《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》,要求到2030年建立完备的矿山智能化技术、装备、管理体系,实现矿山开采作业少人化、无人化。由此可见,矿井运输系统向智能化乃至无人化发展是必然趋势,发展矿井辅运车辆的无人驾驶具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。

无人驾驶架构按功能分为四个模块:定位、感知、规划和控制,其中定位模块被普遍认为是无人驾驶的基础,建设精准定位系统是实现矿井安全运输的必要保障。井上设备常见的定位方式为全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS),但由于其信号强度的限制无法

直接应用到井下;井下设备的定位以无线定位技术为主<sup>[4]</sup>,常见的有超宽带(Ultra Wide Band, UWB)、射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、无线局域网(Wireless fidelity, WiFi)等,针对井下巷道环境定位误差过大通常引入惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)等辅助传感器进行定位补偿<sup>[5]</sup>。

无缝定位技术是指使用不同定位技术来满足连续的、无死角的定位计算<sup>[6]</sup>。由于技术的限制,目前还无法做到使用单一的定位技术来满足所有场景下的定位服务,只能依靠多种定位技术通过一定的算法进行定位的衔接。现阶段为实现无缝定位一般采用两种方式:第一种是开发独立的无缝定位系统,第二种是融合多种定位方案来实现无缝定位<sup>[7]</sup>。开发独立无缝系统的典型案例为Locata组网<sup>[8]</sup>,但开发该类系统需要提前进行大规模布设地基卫星基站,使其便捷程度受限<sup>[9]</sup>。针对第二种无缝定位方法,国内外学者针对不同的定位设备进行了研究。王坚<sup>[10]</sup>基于应急连续运



行参考站和 UWB 网络技术, 构建了针对多种灾害的通用应急无缝定位解决方案, 并克服了应急定位终端制造的低功耗、同步信息获取和嵌入式固件的高效计算等关键技术, 开发了 GNSS/UWB 基站等无缝定位硬件设备。王思远<sup>[11]</sup>针对 GNSS 技术无法解决城市建筑群复杂遮挡环境及密集楼宇下的高精度无缝定位问题, 通过引入 UWB 技术弥补上述缺点, 并解决了组合架构基准不统一、双系统观测值难融合、时间体系不同步等问题。Rui<sup>[12]</sup>针对封闭走廊中接收到的北斗卫星导航信号(BDS)变弱导致的定位精度差或定位失败的问题, 建立了 BDS/UWB 组合定位系统, 并提出了一种基于自适应误差协方差矩阵的 LS-KF 融合定位算法, 提高了定位精度, 增强了系统抗干扰能力。但是, 目前对于煤矿辅运车辆的全流程一体化无缝定位系统的研究尚鲜有涉及。

煤矿辅运车辆行驶线路长、作业范围广, 涵盖井上和井下区域。现阶段, 对于往返于井上和井下进行运输的矿井车辆, 其无人驾驶定位系统主要存在以下问题: (1) 定位精度问题: 单一 UWB 定位的系统精度不足, 使得煤矿无人驾驶车辆在狭长巷道内运行极易发生刮碰事故; (2) 定位衔接问题: 煤矿无人驾驶车辆在井上和井下采用不同定位方法, 缺乏成熟的定位衔接技术, 极易造成定位延时和信号丢失等问题。

综上所述, 针对煤矿无人车辆尚未出现精准的全流程定位方案, 开展煤矿无人车辆无缝定位技术显得尤为迫切。本文针对矿井辅运车辆的全流程运输工况, 设计了一种基于 GNSS/UWB 融合 IMU 的井上-井下无缝定位系统; 针对 UWB 定位过程中的非视距误差问题, 设计了 UWB/IMU 紧组合井下定位算法, 并使用误差状态卡尔曼 (ESKF) 对其进行滤波优化; 针对模型概率矩阵误差大影响无缝定位精度的问题, 设计了基于 ESKF 与模糊自适应改进交互式多模型 (FAIMM-ESKF) 的矿井无缝定位算法, 大大提高了定位精度。

## 1 煤矿无人驾驶车辆井上-井下无缝定位系统设计

煤矿辅运车辆在井上和井下分别采用不同的定位方式, 其在精度、时延方面无法满足无人驾驶车辆需求, 本文在现有井上与井下定位技术的基础上, 提出了一种针对煤矿无人驾驶车辆全流

程运输的井上-井下无缝定位系统, 并建立相应的评价指标。

### 1.1 无缝定位系统搭建

矿井辅运车辆在工作过程中将循环行经地面、斜巷、大巷、支巷、工作面等区域, 这些工作区域可依照 GNSS 信号的强度划分为井上区域、井下区域和井上-井下交互区域, 如图 1 所示。

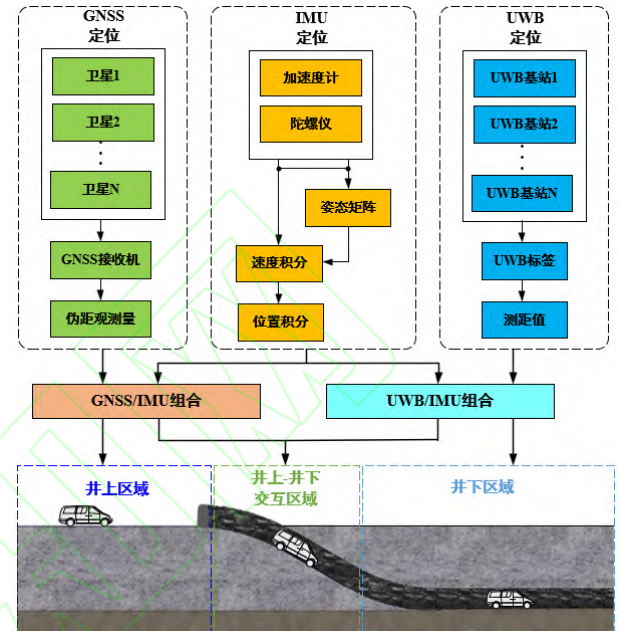


图 1 矿井辅运车辆工作区域划分及无缝定位系统结构  
Fig.1 Division of working areas for auxiliary transportation vehicles in mines and structure of seamless positioning system

程运输的井上-井下无缝定位系统, 并建立相应的评价指标。

矿井辅运车辆在煤矿的不同区域, 分别适合使用不同的定位方式。在开阔、遮挡物较少的井上行驶区域, 辅运车辆上运用成熟的 GNSS 定位技术将有效降低定位系统成本; 井下区域通常由巷道、煤层工作面等部分组成, 这些区域具有独立性、封闭性和复杂性, 电磁波的传输受井下巷道截面、岩层、支架等设备影响较大, 使其衰减严重, 因此在井下行驶区域需要为辅运车辆提供抗干扰能力强、穿透能力强、时间分辨率高的定位方式, UWB 是目前主流的井下定位方式, 但其精度难以满足矿井无人车辆的需求, 可融合 IMU 定位信息以增强其定位精度; 在井上-井下交互区域, 同时具备井上定位信号与井下定位信号, 采用井上和井下定位相融合的技术可有效提高定位精度, 实现矿井辅助运输全流程的无缝定位。

因此, 本文采用基于 GNSS/UWB 融合 IMU 的方式来实现矿井辅运车辆的全流程无缝定位, 系统结构如图 1 所示。本系统由 GNSS 和 UWB 设备提供观测信息, 包括 GNSS 伪距观测量与 UWB 测距值, 实现信号覆盖区域的精准定位; 由

IMU 提供矿井辅运车辆运动状态的连续数据, 包括加速度和角速度, 可以在短时间内输出可靠的位置信息, 有效地改善 GNSS 或 UWB 定位频率低、障碍物遮挡所带来的定位精度降低问题。在井上区域, 采用基于 GNSS 融合 IMU 的定位方式; 在井下区域, 采用基于 UWB 融合 IMU 的定位方式; 在井上-井下交互区域, 通过分析 GNSS、UWB 原始数据解算出各模型概率, 使用无缝定位算法融合 GNSS/IMU 与 UWB/IMU 的定位信息。本文所设计井上-井下无缝定位系统在矿井辅运车辆作业的全部区域均存在观测信息, 使用 IMU 数据对观测信息进行优化, 矿井辅运车辆根据所接受信号强度实时切换定位信息, 可实现矿井辅运车辆的全流程、高精度、强实时定位。

## 1.2 评价指标建立

目前对定位精度的评价指标最常用的为均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF), 这些指标可以对定位结果进行评价, 但不能对定位系统的运行过程有效评价。因此, 针对前文所提及第二种无缝定位的评价体系, 引入模型切换延时 (Model switching delay, MSD) 作为运行过程评价指标。

MSD 定义为系统从某定位模型切换至另一定位模型的时间间隔, 计算方式为:

$$MSD = T_2 - T_1 \quad (1)$$

式中,  $T_2$  为稳定运行新模型的时刻,  $T_1$  为开始切换新模型的时刻。在矿井无缝定位系统中, MSD 反映了无缝定位系统适应环境变化的能力和速度, MSD 越小, 表明无缝定位系统响应性越好, 对于动态变化的矿井环境适应性越强。

无轨胶轮车为矿井中使用最为广泛的辅运车辆, 以无轨胶轮车的行驶速度为例, 在安全使用规范中, 规定无轨胶轮车运输物料时的最高速度为 40 km/h<sup>[13]</sup>, 即 11.1 m/s, 为确保无轨胶轮车在矿井全流程运输过程中保持至少 0.5m 的定位精度, 则应保证其定位延时不超过 45ms, 以此数值作为衡量矿井无缝定位系统 MSD 的指标, 若系统 MSD 在 45ms 以内, 则可以认为其实现无缝定位。

## 2 基于 ESKF 与模糊自适应改进

### IMM 算法的定位算法

在矿井无人车辆往返于井上和井下的运输过程中, 需要根据车辆所接收信号强度自动选择定

位模型, 从而实现矿井全流程一体化精准无缝定位。为保证系统的完整性与井下定位技术的顺利开展, 本章将首先开展井下组合定位算法设计, 然后着重设计适用于矿井的精准无缝定位算法, 并完成仿真验证。

### 2.1 基于 ESKF 的井下紧组合定位算法设计

本文选择紧组合<sup>[14]</sup>作为 UWB/IMU 组合定位的数据融合方式, 车辆的位置信息可经过 IMU 内部的加速度计、陀螺仪积分运算获得, 同时使用 UWB 测距值与 IMU 解算出的位置代入 ESKF 滤波算法进行滤波处理, 实现对定位信息的修正, 并设计仿真试验验证其定位精度。

#### 2.1.1 滤波算法性能对比

引入滤波的目的是减小 UWB/IMU 组合定位系统中的误差, 增强有效的信号成分以提高定位精度。根据不同应用场景的要求, 选择合适的滤波器类型至关重要。因此, 本节将对几种常用的滤波算法进行对比分析, 选择出适合井下组合定位算法的滤波器。

目前较为常用的滤波算法有卡尔曼滤波 (Kalman Filter, KF)、EKF、无迹卡尔曼滤波 (Unscented Kalman Filter, UKF) 和误差状态卡尔曼滤波 (Error State Kalman Filter, ESKF) 等<sup>[15]</sup>, 其中 KF 直接利用前一时刻的状态和当前观测, 不需要存储整个观测序列, 就能提供最优的状态估计, 相对于其他非线性滤波器, 卡尔曼滤波的计算量较小, 但 KF 仅限于线性系统和误差高斯分布的系统。EKF 通过线性化非线性模型来处理轻微的非线性系统, 由于只采用泰勒级数的一阶近似, EKF 并不适用于高度非线性系统, 线性化过程引入的误差可能会导致滤波性能下降, 特别是在误差不是高斯分布时。UKF 通过取样点来近似非线性转换, 对高度非线性问题的处理更好, 相对于 EKF 和 KF, UKF 在计算上更加密集, 特别是在状态维数较高的情况下, 并且 UKF 的性能依赖于调节参数。ESKF 通常用于处理同时具有非线性状态和观测模型的系统, 适合紧组合定位系统, 在保证系统模型精度的前提下, 可以提供更为精确的估计结果。四种滤波的具体对比如表 1 所示。

表 1 常用卡尔曼滤波算法对比

Table 1 Comparison of commonly used Kalman filtering

指标	algorithms			
	KF	EKF	UKF	ESKF
适用性	线性模型	弱非线性模型	强非线性模型	强非线性模型
计算量	低	中	高	中或高 (取决

杂度	于误差状态的 维度)			
用于组 合导航 精度	低	中	较高	高

因此，本文选择系统状态由确定性和随机误差组成的 ESKF 处理 UWB/IMU 组合定位，根据各自的协方差矩阵大小生成对应的 UWB/IMU 融合权重，从而提高井下组合定位精度。

### 2.1.2 系统状态模型建立

在使用 ESKF 的 UWB/IMU 的组合导航系统中，标准状态值由 IMU 提供，误差状态由  $\delta X$  表示，包含位置误差、速度误差、角速度误差、加速度误差等，使用 ESKF 对此误差进行估计。状态向量  $X$ 、误差状态向量  $\delta X$  可表示为：

$$\begin{cases} X = [p & v & q & a_b & \omega_b]^T \\ \delta X = [\delta p & \delta v & \delta \theta & \delta a_b & \delta \omega_b]^T \end{cases} \quad (2)$$

$$\delta X_{t+1} = \begin{bmatrix} \delta p_{t+1} \\ \delta v_{t+1} \\ \delta q_{t+1} \\ \delta a_{b(t+1)} \\ \delta \omega_{b(t+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta p_t + \delta v_t \Delta t \\ \delta v_t + \left( -R[a_m - a_{b(t)}]_x \delta \theta_t - R \delta a_{b(t)} \right) \Delta t + V_i \\ R^T \left( (w_m - w_{b(t)}) \Delta t \right) \delta \theta_t - \delta w_{b(t)} \Delta t + \Theta_i \\ \delta a_{b(t)} + A_i \\ \delta \omega_{b(t)} + \Omega_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} V_i = \sigma_{a_m}^2 \Delta t^2 I \\ \Theta_i = \sigma_{\theta_m}^2 \Delta t^2 I \\ A_i = \sigma_{a_w}^2 \Delta t I \\ \Omega_i = \sigma_{\omega_w}^2 \Delta t I \end{cases}.$$

雅可比矩阵可以由前述误差状态方程求导获得，为了简化方程表示，使用标准状态向量  $X$ 、误差状态向量  $\delta X$ 、输入向量  $u_m$  和扰动向量  $I$  来表述：

$$\begin{cases} X = [p & v & q & a_b & \omega_b]^T \\ \delta X = [\delta p & \delta v & \delta \theta & \delta a_b & \delta \omega_b]^T \\ u_m = [a_m & w_m]^T \\ I = [V_i & \Theta_i & A_i & \Omega_i]^T \end{cases} \quad (5)$$

误差状态系统为：

$$\begin{cases} \hat{\delta x} \leftarrow F_x(x, u_m) \cdot \hat{\delta x} \\ P \leftarrow F_x P F_x^T + F_i Q_i F_i^T \end{cases} \quad (6)$$

$\delta x \sim N(\hat{\delta x}, P)$  误差项满足高斯分布， $F_x$  和  $F_i$  是函数  $F$  关于误差和扰动向量的雅可比矩阵， $Q_i$  为扰动矩阵的协方差矩阵。雅可比矩阵  $F_x$ 、 $F_i$

式中， $p$ 、 $v$ 、 $q$ 、 $a_b$ 、 $\omega_b$  分别表示位置、速度、姿态四元数、加速度以及角速度， $\delta p$ 、 $\delta v$ 、 $\delta \theta$ 、 $\delta a_b$ 、 $\delta \omega_b$  分别表示对应的误差。将 IMU 的标准运动学状态方程表示为矩阵的形式：

$$X_{t+1} = \begin{bmatrix} p_{t+1} \\ v_{t+1} \\ q_{t+1} \\ a_{b(t+1)} \\ w_{b(t+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_t + v_t \Delta t + \frac{1}{2} (R(a_m - a_{b(t)}) + g) \Delta t^2 \\ v_t + (R(a_m - a_{b(t)}) + g) \Delta t \\ q_t \otimes q((w_m - w_{b(t)}) \Delta t) \\ a_{b(t)} \\ w_{b(t)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过一般状态运动学方程可以得到状态误差运动学方程的矩阵形式为：

$$\text{和协方差矩阵 } Q_i \text{ 可表示为:}$$

$$F_x = \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x, u_m} = \begin{bmatrix} I & I \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & -R[a_m - a_b]_x \Delta t & -R \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & R^T((w_m - w_b) \Delta t) & 0 & -I \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F_i = \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{x, u_m} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} V_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Omega_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 2.1.3 系统观测模型建立

ESKF 的观测方程可表示为：

$$y = h(x_t) + v \quad (10)$$

式中， $v$  表示高斯噪声，服从分布  $v \sim N(0, V)$ ， $h(x)$  表示非线性系统的方程。滤波校正方程为：

$$\begin{cases} K = PH^T (HPH^T + V)^{-1} \\ \hat{\delta x} = K(y - h(x_t)) + V \\ P = (I - KH)P(I - KH)^T + KVK^T \end{cases} \quad (11)$$

雅可比矩阵  $H$  和误差状态  $\delta x$  相关，系统的真实状态估计值  $\hat{x}_t = x \oplus \delta x$ 。将误差代入标称状态量，可以得到当前时刻的状态估计。由于当前阶段的误差状态均值为 0，因此认为  $\hat{x}_t = x$ ，并且采用标称误差作为评估的点，则有：

$$H = \left. \frac{\partial h}{\partial \delta x} \right|_x \quad (12)$$

雅可比矩阵在滤波器修正中可以采用多种方法解算，最常用的是链式法则，表示如下：

$$x_{\delta x} \sim \left. \frac{\partial x_t}{\partial \delta x} \right|_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial(p + \delta p)}{\partial \delta p} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial(v + \delta v)}{\partial \delta v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial(q + \delta q)}{\partial \delta q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial(a_b + \delta a_b)}{\partial \delta a_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial(w_b + \delta w_b)}{\partial \delta w_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_6 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{\delta \theta} & 0 \\ 0 & 0 & I_6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$Q_{\delta \theta}$  可以表示为：

$$Q_{\delta \theta} \sim \left. \frac{\partial(q \otimes \delta q)}{\partial \delta \theta} \right|_q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_x & -q_y & -q_z \\ q_w & -q_z & q_y \\ q_z & q_w & -q_x \\ -q_y & q_x & q_w \end{bmatrix} \quad (15)$$

将误差状态带入标准方程中可得：

$$\begin{bmatrix} p_{t+1} \\ v_{t+1} \\ q_{t+1} \\ a_{b(t+1)} \\ w_{b(t+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_t + \delta p \\ v_t + \hat{\delta v} \\ q_t \otimes q(\delta \theta) \\ a_{b(t)} + \delta a_b \\ w_{b(t)} + \delta w_b \end{bmatrix} \quad (16)$$

误差的协方差矩阵按照以下方式进行更新：

$$\begin{cases} \hat{\delta x} \leftarrow 0 \\ P \leftarrow GPG^T \end{cases} \quad (17)$$

雅可比矩阵  $G$  可表示为：

$$H \sim \left. \frac{\partial h}{\partial \delta x} \right|_x = \left. \frac{\partial h}{\partial x_t} \right|_x \left. \frac{\partial x_t}{\partial \delta x} \right|_x = H_x X_{\delta x} \quad (13)$$

$H_x \sim \left. \frac{\partial h}{\partial x_t} \right|_x$  是关于函数  $h$  的标准比，取决于

观测方程， $x_{\delta x} \sim \left. \frac{\partial x_t}{\partial \delta x} \right|_x$  表示的是真实状态与误差状态之间的雅可比矩阵，取决于 ESKF 的状态变量的组成。

$$G \triangleq \left. \frac{\partial g}{\partial \delta x} \right|_{\delta x} = \begin{bmatrix} I_6 & 0 & 0 \\ 0 & I - \left( \frac{1}{2} \hat{\delta \theta} \right)_\times & 0 \\ 0 & 0 & I_6 \end{bmatrix} \quad (18)$$

#### 2.1.4 UWB/IMU 紧组合定位仿真试验

本节在 MATLAB 软件中模拟 UWB 和 IMU 传感器的测量数据进行三维动态仿真验证。仿真路线按照圆心为 (20,20,0)，半径为 20m 的圆形轨迹移动，基站布设与真实轨迹如图 2 所示。

此次仿真先按照 2m/s 速度向前直线运动，10s 后进行半径为 20m 的匀速圆周运动，总仿真时间为 72.83s，采样频率为 100Hz，滤波初始值均设置为真实值 (0,0,0)。



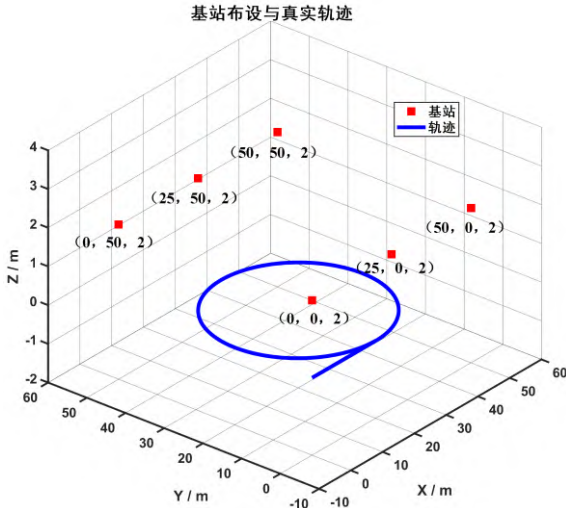


图2 UWB/IMU 仿真试验的基站布设与真实轨迹  
Fig.2 Base station deployment and real trajectory in UWB/IMU simulation experiments

绘制前文基于 ESKF 的 UWB/IMU 紧组合井下定位算法与常用滤波方式的定位轨迹，并绘制各滤波方式的 X、Y 轴误差，如图 3 与图 4 所示，由于本文紧组合定位算法引入滤波来融合 IMU 和 UWB 的数据，滤波器需要一段时间来收敛到真实状态，所以该算法在初始滤波阶段精度较低，随着滤波的持续，其与真实轨迹更加契合。总的来说，本文所使用 ESKF 算法的定位精度要优于 EKF 滤波，明显优于 UKF 滤波与单一 UWB 定位。

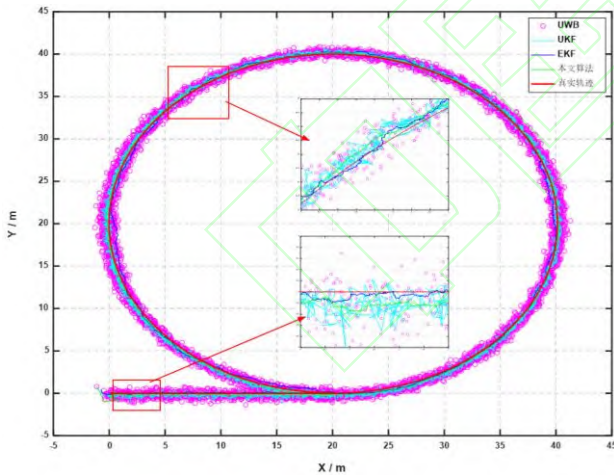
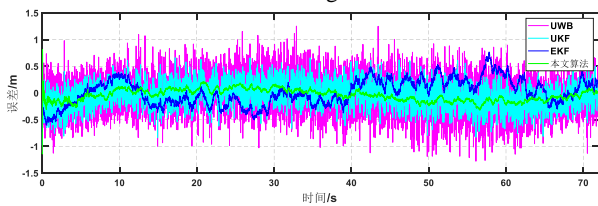
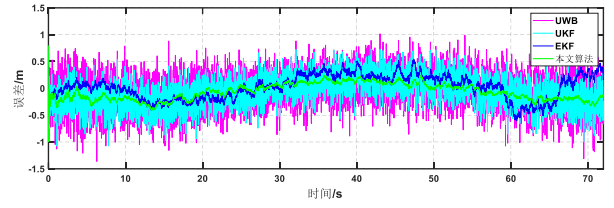


图3 不同滤波方式定位轨迹对比图

Fig 3 Comparison diagram of positioning trajectories using different filtering methods



(a) X 方向误差



(b) Y 方向误差

图4 UWB/IMU 仿真试验不同滤波方式定位误差对比

Fig 4 Comparison of positioning errors of different filtering methods in UWB/IMU simulation experiments

进一步分析仿真结果，得出不同滤波方式的定位 RMSE 误差如表 2 所示。单一的 UWB 定位受到非视距和多径效应的影响，导致部分点抖动剧烈，误差较大，最大 RMSE 达到了 1.41 m，而三种组合导航技术的最大 RMSE 仅为 1.17 m，这说明 IMU 作为预测部分，可以有效消除单一 UWB 定位系统在非视距和多径效应环境中短时间内产生的大幅度误差。引入 ESKF 可以减小 UWB/IMU 组合定位系统中的误差，增强有效的信号成分以提高定位精度。对几种滤波方式的 RMSE 对比可知，本文所设计算法，其平均定位误差优于 UWB 定位、EKF 算法和 UKF 算法，分别降低了 56%、39%、41%，且最大误差优于单一 UWB 定位和 UKF 算法。因此，本文算法在处理 NLOS 误差及 IMU 的累计误差时更加有效。

表2 UWB/IMU 仿真试验不同滤波方式 RMSE 对比

Table 2 Comparison of RMSE for different filtering methods

in UWB/IMU simulation experiments		
算法	平均 RMSE/ m	最大 RMSE/ m
UWB	0.43	1.41
EKF	0.31	0.85
UKF	0.32	1.17
本文算法	0.19	0.85

## 2.2 基于模糊控制的无缝定位系统优化

前文已对井下组合定位算法进行设计，本节将基于模糊控制对 IMM 算法加以优化以提高状态估计精度，并提出适用于矿井辅运车辆的无缝定位算法。

### 2.2.1 IMM 算法原理

在第一代多模型估计算法的基础上，1984 年学者 Blom 提出了第二代多模型估计算法<sup>[16]</sup>，又称为交互式多模型算法（Interacting Multiple Model, IMM）。IMM 的各个子模型之间可以进行信息交互，共享数据或信息，并且子模型之间的切换更加动态灵活，有效地减小了第一代算法中的跳变误差，提高了估计的精度，在处理系统变化和不确定性方面更具适应性和鲁棒性。IMM 算法子模型的转移均服从 Markov 过程<sup>[17]</sup>，其结构



框图如图 5 所示。

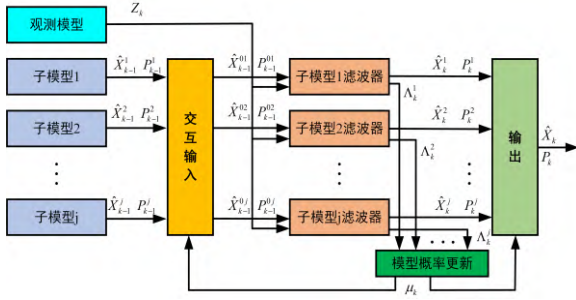


图 5 IMM 算法结构框图

Fig 5 IMM algorithm structure block diagram

### 2.2.2 模型概率的模糊自适应控制器设计

虽然 IMM 算法在模型切换、状态估计等方面已经达到较高的精度，但在模型快速切换的过程中还存在着诸多问题<sup>[18]</sup>，尤其是该算法计算模型概率矩阵误差大，面对强机动性与误差干扰大的状况，例如矿井辅运车辆往返于井上和井下的过程中出现定位信息的剧变，会对其精度造成较大影响。因此，本文引入模糊控制器对概率进行模糊自适应更新，将模型概率的变化连续化，并加快模型概率的调整速度，缓解滞后性，从而提高定位精度。模糊控制器包括数据处理、模糊化、模糊推理和解模糊四个过程，最后输出精确量，图 6 为本文所使用模糊控制器的结构图。

本文设计的模糊控制器的主要流程为：

#### (1) 数据输入

将 GNSS/IMU 或 UWB/IMU 两个子滤波器  $k$  时刻的概率密度函数  $\Lambda_k^j$  与  $k-1$  时刻模型概率预测

$\mu_{k-1}^j$  输入至模糊控制器。

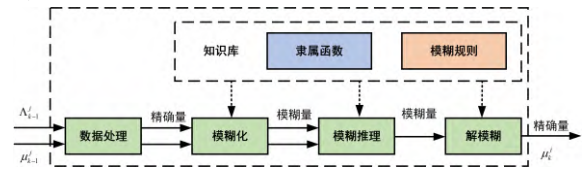


图 6 IMM 自适应模糊控制器结构图

Fig 6 Structure diagram of IMM adaptive fuzzy controller

#### (2) 数据处理

以其中任意一个子滤波器为例，将模糊控制器的输入定义为任意一个子滤波器的  $k-1$  时刻的模型概率  $I_1$  以及  $k$  时刻的初步预测概率与  $k-1$  时刻的模型概率的差值  $\Delta I$ ，即：

$$\begin{cases} I_1 = \mu_{k-1}^j \\ \Delta I = \hat{\mu}_k^j - \mu_{k-1}^j \end{cases} \quad (19)$$

将模糊控制的输出定义为  $k$  时刻的模型概率

$I_2$ ：

$$I_2 = \mu_k^j \quad (20)$$

#### (3) 输入输出变量模糊化

根据各变量所代表含义的不同，输入变量  $I_1$  的取值范围为  $[0,1]$ 、 $\Delta I$  的取值范围为  $[-1,1]$ 、输出变量  $I_2$  的取值范围  $[0,1]$ ，在取值范围内将其转化为模糊语言集合： $[VS, S, M, L, VL]$ ，将高斯函数与三角形函数组合作为  $I_1$ 、 $\Delta I$  与  $I_2$  的隶属度曲线<sup>[19]</sup>，如图 7 所示。

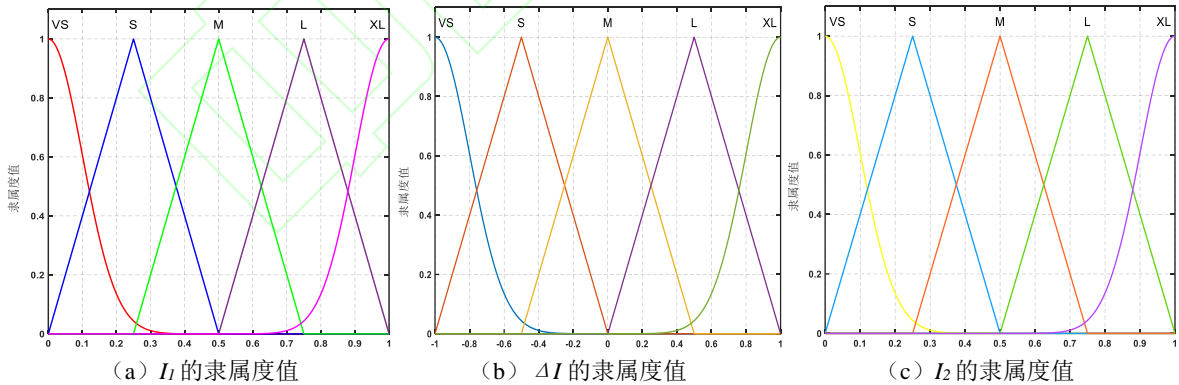


图 7 IMM 自适应模糊控制器输入值和输出值的隶属度曲线

Fig 7 Membership curve of input and output values of IMM adaptive fuzzy controller

#### (4) 建立模糊规则和逻辑推理

模糊规则是模糊控制器的重要组成部分，它决定了当前模糊控制系统能否满足实际需求。本文基于参考文献[20]、预实验与  $I_1$ 、 $\Delta I$  与  $I_2$  的取值范围确定以下模糊规则，建立的模糊控制决策表如表 3 所示：

①若  $\Delta I < 0$ ，即  $\Delta I$  为 VS 或 S 时，更新后的

概率小于更新前的概率，即  $I_2 < I_1$ ；

②若  $\Delta I = 0$ ，即  $\Delta I$  为 M 时，更新后的概率等于更新前的概率，即  $I_2 = I_1$ ；

③若  $\Delta I > 0$ ，即  $\Delta I$  为 VS 或 S 时，更新后的概率大于更新前的概率，即  $I_2 > I_1$ ；

④概率切换为连续的过程，无论  $\Delta I$  如何变化，输出的隶属度应始终保持平滑的过渡，例如

当  $I_1$  为 M 时,  $I_2$  的取值可能性为 S、M、L。

表 3  $I_2$  的模糊控制决策表

Table 3 Fuzzy control decision table of  $I_2$

$I_2$	$AI$				
	VS	S	M	L	VL
VS	VS	VS	VS	S	M
S	VS	VS	S	M	M
M	S	S	M	L	L
L	M	M	L	VL	VL
VL	L	L	VL	VL	VL

#### (5) 解模糊化

解模糊化是将输出的模糊语言转化为精确量的过程, 当前常用的解模糊化方法有多种, 而最大隶属度平均法因其直观性强、运算效率高、稳定性强等优点在实际中得到了广泛的应用<sup>[21]</sup>。因此, 本文调用函数库中的最大隶属度平均法进行解模糊化。

#### (6) 数据输出

将解模糊过程得到的精确概率输入至无缝定位系统。

#### 2.2.3 FAIMM-ESKF 无缝定位算法

本文引入模糊自适应控制器对模型概率调整进行速度和精度上的优化, 同时使用 ESKF 保证各定位子模型的定位精度。由此, 本文提出可满足矿井辅运车辆全流程一体化无缝定位需求的基于 ESKF 与模糊自适应改进交互式多模型 (FAIMM-ESKF) 的矿井无缝算法, 结构框图如图 8 所示。

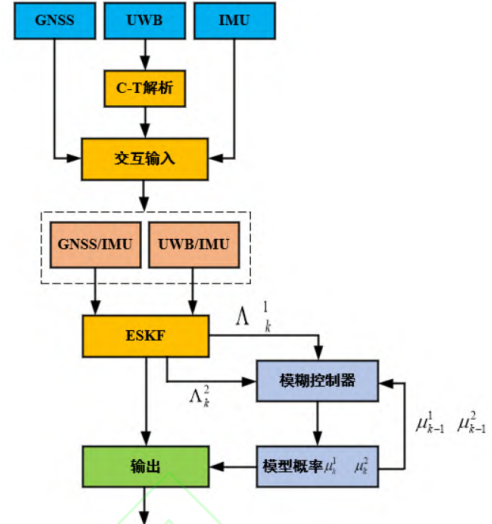


图 8 FAIMM-ESKF 算法结构框图

Fig 8 FAIMM-ESKF algorithm structure block diagram

#### 2.3 无缝定位系统仿真验证

为验证基于 FAIMM-ESKF 的矿井无缝定位算法精度, 本节模拟矿井辅运车辆在山西斜沟煤矿从井上至井下的全流程运输行为 (如图 9), 仿真生成的车辆运动轨迹如图 10 所示。经咨询相关专家后所设置的传感器梯度误差如表 3 所示, 车辆初始位置误差设置为 40 cm。



图 9 山西斜沟煤矿现场实拍图

Fig 9 Field photo of Xiegou coal mine in Shanxi province

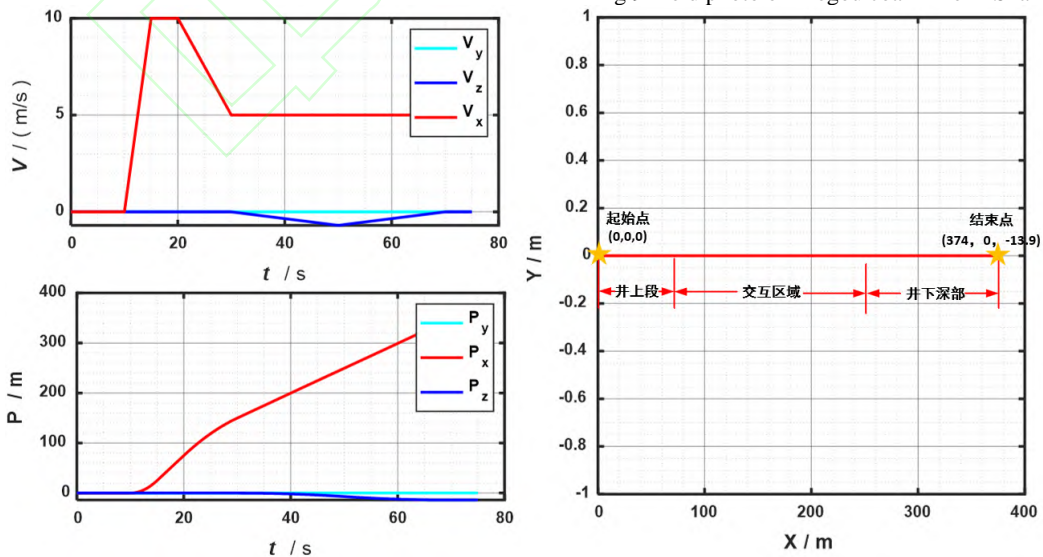


图 10 仿真矿井环境移动速度、位置、轨迹示意图

Fig 10 Schematic diagram of simulated mine environment movement speed, position, and trajectory

以未采用模糊控制器的传统 IMM-ESKF 算法

与本文提出的 FAIMM-ESKF 算法为研究对象, 进

行表 4 所示的车辆定位仿真试验，将两种算法的转移概率矩阵均设置为：

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} 0.95 & 0.05 \\ 0.05 & 0.95 \end{bmatrix} \quad (21)$$

通过仿真试验得出的车辆三轴定位误差对比

表 4 仿真矿井环境车辆运动特征及所传感器误差

Table 4 Simulation of vehicle motion characteristics and sensor errors in mine environment

阶段	起始时间/s	终止时间/s	运动类型	运动特征	GNSS 精度/cm	UWB 精度/cm
井上段 (75 m)	0	10	静止	位置为 (0, 0, 0)	±2	—
	10	15	匀加速	加速度为 2 m/s <sup>2</sup>		
	15	20	匀速直线	速度为 10 m/s		
井上-井下交互区 域 (175 m)	20	30	匀减速	加速度为-0.5 m/s <sup>2</sup>	±100	±50
	30	50	下坡	角加速度-0.4 %s		
井下深部 (125 m)	50	70	下坡	角加速度+0.4 %s	—	±20
	70	75	匀速直线	速度为 5 m/s		

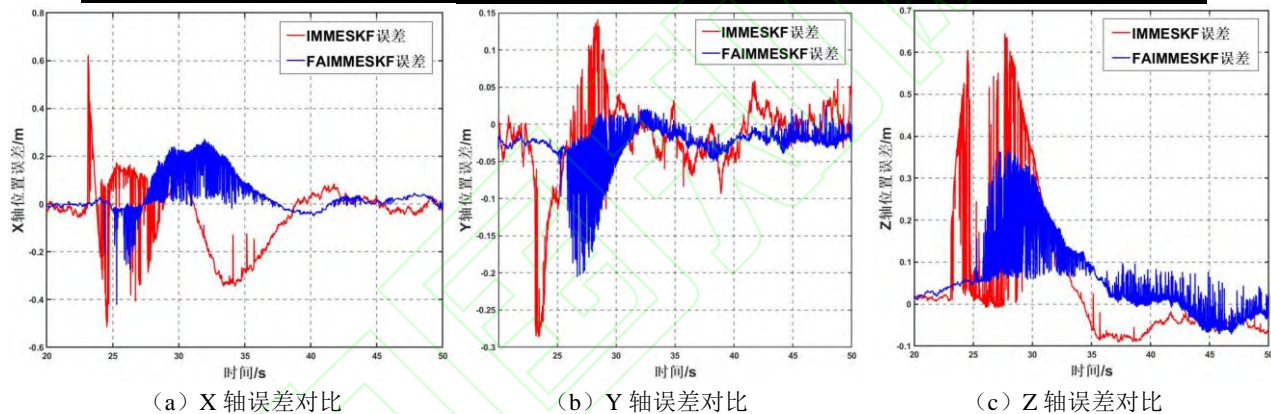


图 11 仿真矿井环境井上-井下交互区域三轴误差对比

Fig 11 Comparison of three-axis errors in the interaction area between the upper and lower parts of a simulated mine environment

20~50s 车辆处于井上-井下交互区域，此时车辆的定位模型由 GNSS/IMU 转换为 GNSS/IMU 与 UWB/IMU，定位模型的切换导致车辆定位误差增大，但由于模糊控制器的使用，FAIMM-ESKF 算法在三轴的误差均能保持在较小范围，随着系统逐渐趋于稳定，两算法的误差显著减小。

继续深入分析定位数据，得到表 5 所示的详细定位误差，可以看出 FAIMM-ESKF 算法能够保证高精度的估计效果，同时对子模型动态切换具有更好的适应能力，三轴平均 RMSE 误差均在 0.047m 以内，最大 RMSE 误差均在 0.422m 以内，相比 IMM-ESKF 算法，三轴平均和最大 RMSE 误差分别降低了 29%与 35%。

在仿真试验的进行过程中，共有两次模型切换过程，分别为从井上移动至交互区域以及从交互区域移动至井下，对比两次的 MSD 如表 6 所示。

如图 11 所示，两种算法在井上段和井下深部的传感器使用一致，并未体现 GNSS 与 UWB 信息的融合过程，所以其精度区别主要在井上-井下交互区域，仅对比 20~50 s 的位置误差。

两种算法的 MSD 均在允许的范围内，可以满足矿井无人车辆需求。因此，本文改进的 FAIMM-ESKF 算法在保障动态环境实时性的前提下仍保持较高的定位精度。

表 5 仿真矿井环境井上-井下交互区域误差对比

Table 5 Comparison of errors in the interaction area between the simulated mine environment and the underground environment

误差/ m	IMM-ESKF 算法	FAIMM-ESKF 算法
X 轴	平均 RMSE	0.060
	最大 RMSE	0.624
	平均 RMSE	0.035
Y 轴	平均 RMSE	0.035
	最大 RMSE	0.286
	平均 RMSE	0.066
Z 轴	平均 RMSE	0.047
	最大 RMSE	0.645
	平均 RMSE	0.366



表 6 仿真矿井环境 MSD 对比

Table 6 Comparison of MSD in simulated mine environment

算法	MSD/ ms		
	第一次	第二次	均值
IMM-ESKF	25	19	22
FAIMM-ESKF	23	20	21.5

### 3 基于 GNSS/UWB 融合 IMU 的井上-井下无缝定位试验

结合前文提出的基于 ESKF 的 UWB/IMU 紧组合井下定位算法与针对模型概率矩阵误差提出的矿井辅运车辆无缝定位算法 FAIMM-ESKF，本节首先进行试验平台硬件选型，然后设计矿井无缝定位系统的人机交互界面保证算法运行结果的可视化，最后搭建试验平台与模拟斜井煤矿完成无缝定位系统的试验验证。

#### 3.1 矿井无人车辆无缝定位系统设备选型

##### 3.1.1 UWB 设备选型

为模拟井下 UWB 定位系统，本文选用基于 DWM1000 芯片开发的久凌 UWB-T-GW01 及 UWB-S1-PRO 作为矿井无缝定位系统中的 UWB 定位基站与标签，该套设备具备测距精度高、抗多径衰落能力强、成本低等优点，UWB-T-GW01 基站和 UWB-S1-PRO 标签的性能参数如表 7 和表 8 所示。

表 7 UWB-T-GW01 定位基站参数

Table 7 UWB-T-GW01 positioning base station parameters

型号	UWB-T-GW01
供电方式	USB/ POE
工作频率	3.2 ~ 4.6 GHz
通讯距离	空旷视距大于 200 米
输出接口	WiFi/ 以太网
工作温度	-20 ~ 60℃
定位方式	支持 TOF/ TDOA

表 8 UWB-S1-PRO 定位标签参数

Table 8 UWB-S1-PRO positioning label parameters

型号	UWB-S1-PRO
供电方式	USB
工作频率	3.5 ~ 6.5 GHz
通讯距离	空旷视距大于 300 米
通讯接口	USB/ 串口
工作温度	-20 ~ 80℃

##### 3.1.2 GNSS/IMU 设备选型

本文的 GNSS/IMU 数据收集模块为导远电子科技公司的 INS570L 车载组合导航模块。本文仅使用 INS570L 作为 IMU 和 GNSS 的收集设备，收集的信息包括车辆的加速度信息、陀螺仪信息、经纬度等信息。INS570L 组合导航包含 IMU 与 GNSS 两部分，其性能参数如表 9 所示。

表 9 INS570L 组合导航参数

Table 9 INS570L integrated navigation parameters

指标	IMU		指标	GNSS
	加速度计	陀螺仪		
维度	3 维	3 维	位置精度/m	1.5
量程	4 g	250 °s	RTK 精度/m	0.02
频率/Hz	10~200	10~200	频率/Hz	1-20

#### 3.2 人机交互界面设计

人机交互界面是定位系统中不可缺少的关键部分，结合矿井无人车辆定位系统的可视化需求，本文设计一款无缝定位系统的人机交互显示界面。该界面使用 Qt 软件开发，主要有以下几个功能：连接状态显示、数据保存功能、显示无缝定位结果及历史行驶轨迹、显示 UWB 基站布设位置、插入矿井平面地图等，其运行流程如图 12 所示。

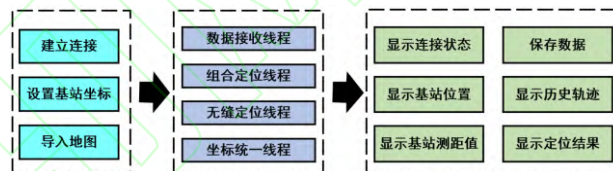


图 12 矿井无缝定位系统人机交互界面运行流程

Fig 12 Operation process of human-machine interaction interface for seamless positioning system in mines



图 13 矿井无缝定位系统人机交互界面运行界面

Fig 13 Operation interface of human-machine interaction for seamless positioning system in mines

该界面在运行时如图 13 所示。右侧为连接状态显示，此线程实时监控所接收到的传感器信息，数据异常时将会提示使用人员；通过预先设置好的基站坐标、主基站经纬度，实现车辆接收 GNSS/IMU 与 UWB/IMU 信息统一到同一个坐标系，然后与插入地图进行匹配，将定位信息实时显示至地图；存储一定长度的定位信息，在地图上以历史轨迹的方式显示。



### 3.3 模拟斜井煤矿实验

#### 3.3.1 无人驾驶试验平台搭建

本文将无缝定位系统搭载至课题组现有的基于机器人操作系统（Robot Operating System, ROS）的“智矿 I 号”无人驾驶无轨胶轮车试验平台，开展无缝定位系统的验证工作，其具体参数如表 10 所示，搭载方式如图 14 所示。该试验平台集成了包含激光雷达、轮速计、工控机等在内的无人车辆所必需的传感器，搭建了常用的激光 SLAM 算法，包括 Gmapping、Cartographer，用于实时地图构建；适配了适用于矿井环境的路径规划和运动控制算法，以确保车辆能够安全、高效地在巷道中移动。

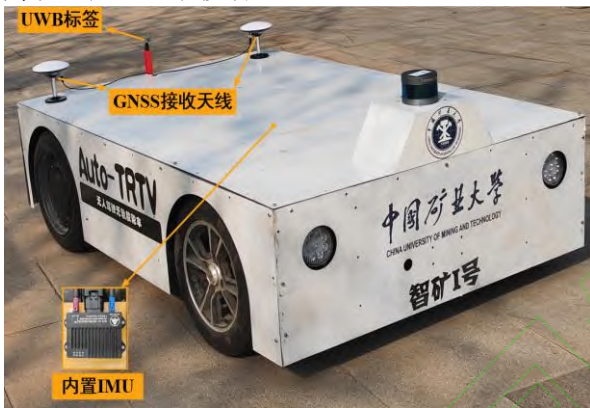


图 14 搭载无缝定位系统的“智矿 I 号”无人驾驶试验平台

Fig 14 "Intelligent Mine I" unmanned driving test platform equipped with seamless positioning system

表 10 “智矿 I 号”无人驾驶试验平台主要技术参数

Table 10 Main technical parameters of the "Intelligent Mine I" unmanned driving test platform

性能	参数
尺寸	1860 mm × 1245 mm × 500 mm
轴距	1200 mm
轮距	前轮距 1136 mm/ 后轮距 1130 mm
驱动形式	前转阿克曼；后轮毂电机驱动
最大运行速度	40 km/h
激光雷达	RS-LiDAR-16
工控机	ARK-3530L
通信方式	WiFi

#### 3.3.2 模拟斜井煤矿设计

参照郑州煤电股份有限公司某煤矿的巷道形状（图 15），本文的模拟巷道也设计为半圆拱形结构。根据《煤矿安全规程》中巷道断面尺寸的要求<sup>[22]</sup>（图 16），计算得到巷道的宽度，其中：

双车道的巷道宽度为：

$$B = a + A_1 + A_2 + C + t \quad (22)$$

单车道的巷道宽度为：

$$B = a + A_1 + C + t \quad (23)$$

式中， $B$  为巷道宽度， $a$  为非人行侧宽度， $a$  应不小于 0.3 m， $t$  为会车最小间距，不小于 0.2 m， $A_1$ 、 $A_2$  为车辆宽度， $C$  为人行道宽度，不小于 0.8 m。



图 15 郑州煤电股份有限公司某煤矿

Fig 15 A coal mine of Zhengzhou Coal Power Co., Ltd

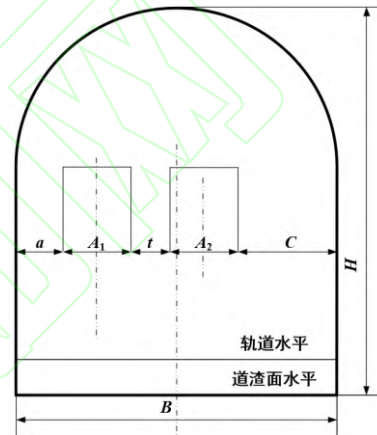


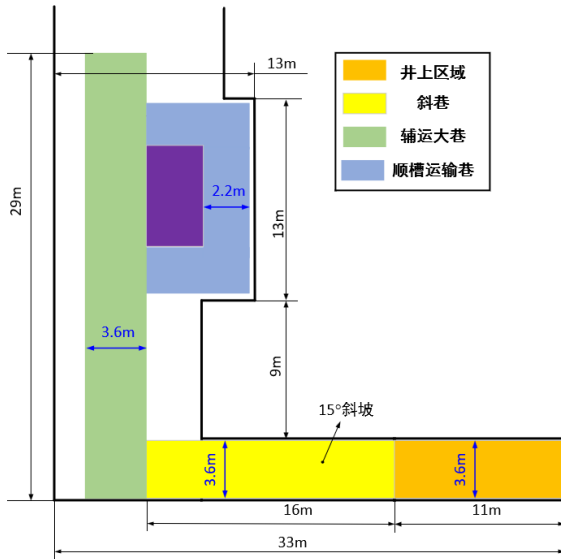
图 16 巷道断面尺寸计算图

Fig 16 Calculation of cross-sectional dimensions of tunnels

此外，无轨胶轮车运输巷道的顶部与巷道壁之间应至少有 0.5m 的间距，根据本文所设计无轨胶轮车的宽度与高度，将模拟巷道中的双行道巷道断面尺寸设置为 3.6m × 2.0m，单行道巷道断面尺寸设置为 2.2m × 2.0m。

模拟巷道包括辅运大巷与顺槽运输巷两部分组成，所搭建模拟斜井煤矿如图 17 所示，图 17（a）为模拟斜井煤矿平面图，图 17（b）（c）为模拟斜井煤矿实拍图。

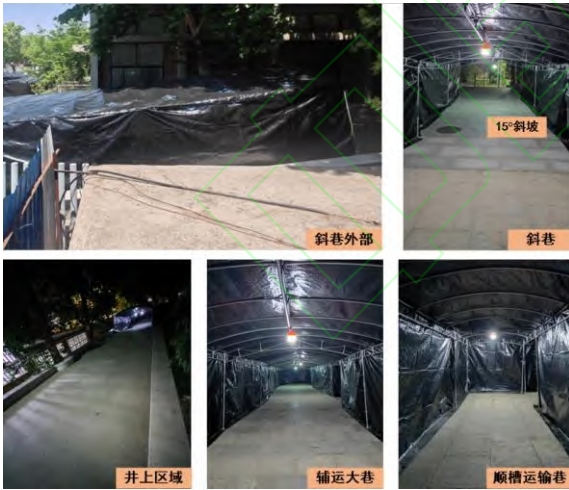
模拟斜井煤矿的井上区域的尺寸为 11.0m × 3.6m，该段由露天道路组成，较为开阔，GNSS 信号良好，可在此段实现高精度的 RTK 定位；斜巷为所模拟矿井的井上-井下交互区域，尺寸为 16.0m × 3.6m，包含一段约为 15° 的斜坡，可模拟矿井辅运车辆从井上行驶至井下的行为；沿斜巷前行至辅运大巷，辅运大巷整体尺寸为 29.0m × 3.6m；沿辅运大巷行至一半可拐至顺槽运输巷，顺槽运输巷为单行车道，宽度为 2.2m。



(a) 模拟斜井煤矿平面图



(b) 模拟斜井煤矿全局图



(c) 模拟斜井煤矿局部图

图 17 模拟斜井煤矿搭建图

Fig 17 Simulated mine construction diagram

### 3.3.3 模拟斜井煤矿试验结果分析

模拟斜井煤矿试验的开展过程如图 18 所示。首先，将车辆置于模拟斜井煤矿的井上区域；然后，车辆依次行至斜巷、辅运大巷，随后右转进入顺槽运输巷，绕顺槽运输巷行驶一周重新驶入辅运大巷，接着驶入斜巷，最后重回井上区域。UWB 基站沿巷道行驶路径均匀分布，斜巷布置一

个，斜巷与辅运大巷连接处布置一个，保证斜巷区域存在有 UWB 信号；在模拟斜井煤矿井下巷道回形区域的四个角落各布置一个，以保证在模拟井下巷道中存在较强的 UWB 定位信号。

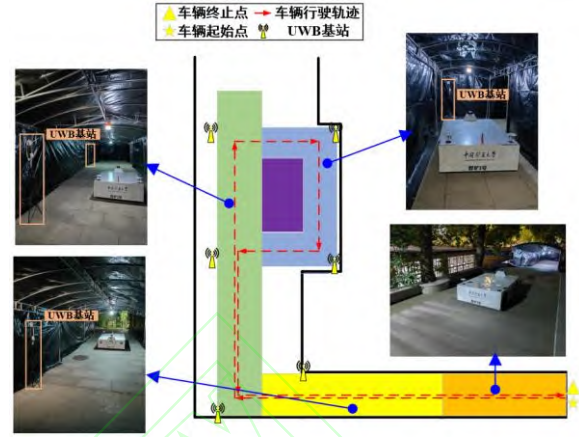


图 18 模拟斜井煤矿试验过程

Fig 18 Simulated inclined shaft coal mine test process

模拟斜井煤矿环境下的定位轨迹与定位 RMSE 误差如图 19 与 20 所示，运动总时长为 400s，其中，在井上区域的时间为 0~50s 与 361~400s，在斜巷（井上-井下交互区域）的时间为 51~100s 与 311~360s，在井下区域的时间为 101~310s。

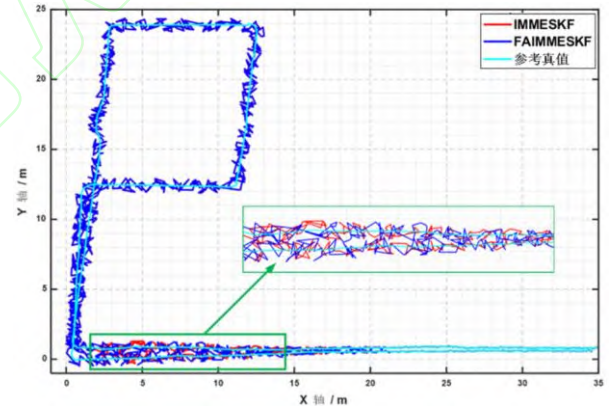


图 19 模拟斜井煤矿定位轨迹对比

Fig 19 Comparison of simulated mine positioning trajectories

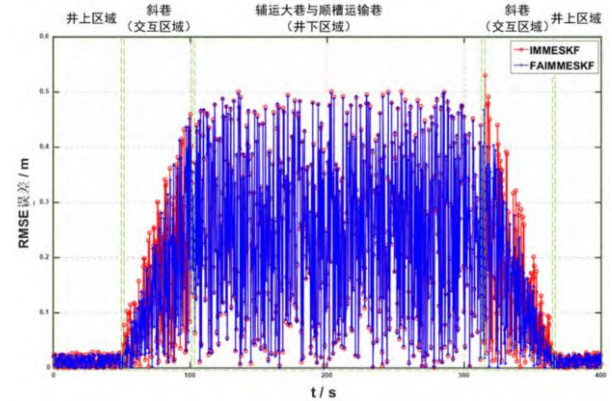


图 20 模拟斜井煤矿 RMSE 误差对比

Fig 20 Comparison of RMSE errors in simulated mines



井上区域的 GNSS 信号良好, 无缝定位系统能获取高精度 RTK 差分定位信息, 结合 IMU 输出的矿井车辆运动数据, 能得到连续高精度定位信息, 此时 UWB 标签无法收到有效的 UWB 基站信号, 不能解析出有效坐标, 所以此时的定位信息由 GNSS/IMU 提供, RTK 提供的定位精度较高, RMSE 误差均在 0.03 m 以内。

斜巷区域为模拟斜井煤矿的交互区域, 该区域的 GNSS 信号逐步减弱, 而 UWB 信号逐渐增强, 此时的定位信息由 GNSS/IMU 与 UWB/IMU 共同提供, UWB 信号的定位精度要差于 GNSS, 所以整体的定位精度降低, RMSE 呈增大的趋势。在此过程中, 本文使用的 FAIMM-ESKF 算法的平均 RMSE 误差为 0.131 m, 最大 RMSE 误差为 0.452 m, 相对于 IMM-ESKF 算法的 0.159m 与 0.530 m, 降低了 17.6% 与 14.8%。

辅运大巷与顺槽运输巷为模拟斜井煤矿的井下空间, 此处 UWB 基站布设密集, 存在有较强

的 UWB 定位信号, 但由于所搭建模拟环境无法完全屏蔽 GNSS 信号, 所以此处会残存有较差的 GNSS 定位信息, 本文的处理手段是当车辆驶入辅运大巷与顺槽运输巷时将 GNSS 信息手动屏蔽。此时的定位信息为 UWB/IMU, 误差主要源于 UWB 与 IMU, 平均 RMSE 误差为 0.25 m, 最大 RMSE 误差为 0.498 m。

图 21 为 FAIMM-ESKF 与 IMM-ESKF 的子模型概率曲线图, 由图可以看出, 在井上-井下交互区域, GNSS 信号减弱, UWB 信号增强时, 两种算法的 GNSS/IMU 模型概率均在减小、UWB/IMU 模型概率均在增大。面对由井上行驶至井下的强机动性环境, FAIMM-ESKF 算法因模糊控制器的引入使其子模型概率随时间发生较为均匀的变化, 模型概率调节较为准确, 而 IMM-ESKF 的子模型概率明显不适应强机动性环境, 不符合应用工况, 由此引入了较大的定位误差, 在 315 s 时出现了定位误差的剧增。

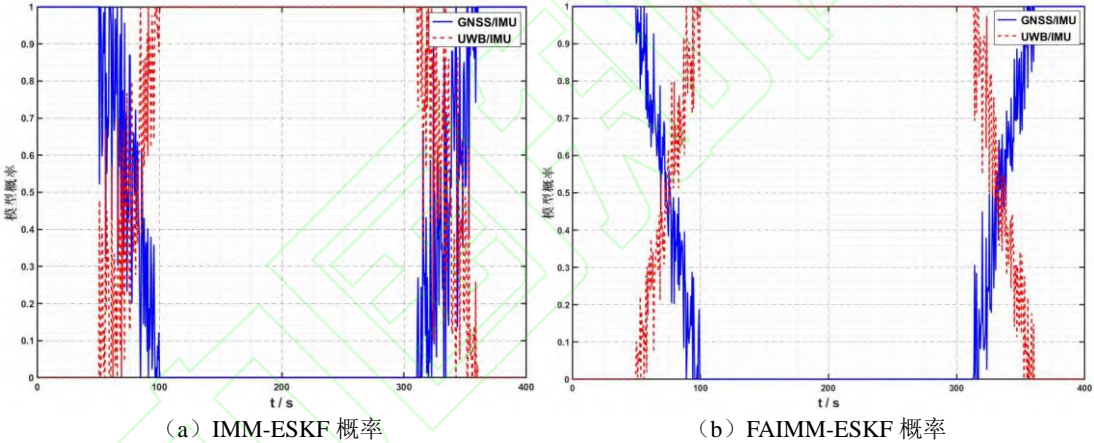


图 21 模拟斜井煤矿 GNSS/IMU 与 UWB/IMU 模型概率曲线

Fig 21 Simulate GNSS/IMU and UWB/IMU model probability curves for inclined shaft coal mines

在模拟斜井煤矿试验中, 矿井无人车辆往返于井下和井上的过程中共经历了四次模型切换, 计算四次 MSD 的均值并与前文所提无缝定位 MSD 指标, 如表 11 所示。本文 FAIMM-ESKF 算法 MSD 均值为 35 ms, 仅为最大允许值的 77.8%。因此, FAIMM-ESKF 算法在动态变化环境中的实时性满足无缝定位的要求。

表 11 模拟斜井煤矿试验算法 MSD

Table 11 Simulated mine test algorithm MSD

算法名称	MSD 均值/ ms	最大允许值/ ms
IMM-ESKF	39.5	45
FAIMM-ESKF	35	

## 4 结论

随着我国矿山智能化建设进程的不断推进, 矿井运输系统向无人化发展是未来的必然趋势,

建立矿井运输全流程一体化无缝定位系统是其重要前提。本文针对矿井无人车辆往返于井上和井下的全流程运输工况, 提出了一种基于 GNSS/UWB 融合 IMU 的矿井无人驾驶车辆井上-井下无缝定位方法, 并通过搭建仿真与模拟环境进行试验, 得到的结论如下:

(1) 设计了基于 ESKF 的 UWB/IMU 紧组合井下定位算法, 对其进行仿真试验验证其精度, 结果表明: 其平均误差相较于单一 UWB 定位分别降低了 56% 与 80%, 该定位精度可满足煤矿井下无人驾驶车辆的需求。

(2) 提出了一种基于模型概率的模糊自适应控制器, 并根据矿井辅运车辆全流程的行驶需求设计了基于 ESKF 与模糊自适应改进 IMM 的无缝定位算法 FAIMM-ESKF; 在仿真试验中,

FAIMM-ESKF算法的平均和最大RMSE误差分别降低了29%和35%，两次MSD均值为21.5 ms，验证了FAIMM-ESKF算法的动态环境实时性与定位精度。

(3)搭建模拟斜井煤矿进行无缝定位系统的评估和验证，结果表明：在井上-井下交互区域的平均和最大误差相较于传统IMM-ESKF算法分别降低了17.6%和14.8%，在整个试验过程中的最大误差为0.498 m，MSD均值为35 ms，验证FAIMM-ESKF算法在实际应用中的精度和可靠性可满足矿井无人车辆的需求。

#### 参考文献

- [1] 鲍久圣, 刘琴, 葛世荣, 等. 矿山运输装备智能化技术研究现状及发展趋势[J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 78-88.  
Bao Jiusheng, Liu Qin, Ge Shirong, et al. Research status and development trend of intelligent technology of mine transportation equipment[J]. Journal of Intelligent Mine, 2020, 1(1): 78-88.
- [2] 鲍久圣, 章全利, 葛世荣, 等. 煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础研究及应用实践[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 1085-1098.  
Bao Jiusheng, Zhang Quanli, Ge Shirong, et al. Key fundamental research and application practice of unmanned auxiliary transportation systems in underground coal mines[J]. Journal of Intelligent Mine, 2023, 48(2): 1085-1098.
- [3] 鲍久圣, 张可琨, 王茂森, 等. 矿山数字孪生 MiDT: 模型架构、关键技术及研究展望[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 166-177.  
BAO Jiusheng, ZHANG Kekun, WANG Maosen, et al. Mine Digital Twin: Model architecture, key technologies and research prospects[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 166-177.
- [4] 刘海峰. 露天煤矿智能化建设关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49 (S2): 107-111.  
Liu Haifeng. Research on key technologies for intelligent construction of Open-Pit coal mines[J]. Industry and Mine Automation. 2023, 49 (S2): 107-111.
- [5] 李明锋, 李堯, 刘用, 等. 基于 5G+UWB 和惯导技术的井下人员定位系统[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 25-34.  
Li Mingfeng, Li Gong, Liu Yong, et al. Underground personnel positioning system based on 5G+UWB and inertial navigation technology[J]. Industry and Mine Automation. 2024, 50(1): 25-34.
- [6] Mallik Manjarini, Panja Ayan Kumar, Chowdhury Chandreyee. Paving the way with machine learning for seamless indoor-outdoor positioning: a survey[J]. Information Fusion, 2023, 94 126-151.
- [7] Bai Yuntian Brian, Holden Lucas, Kealy Allison, et al. A hybrid indoor/outdoor detection approach for smartphone-based seamless positioning[J]. Journal of Navigation, 2022, 75 (4): 946-965.
- [8] 吴崧铭. 地基无线电导航基站发射端基带信号处理与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.  
Wu Songming. Ground based wireless navigation base station transmitter baseband signal processing and design[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [9] Grgac I, Paar R. Quality assessment of locata positioning system[J]. Journal of Applied Geodesy, 2020, 14(1): 95-112.
- [10] 王坚, 刘纪平, 韩厚增, 等. 应急救援无缝定位关键技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1126-1136.  
Wang Jian, Liu Jiping, Han Houzeng, et al. Research on key technologies for seamless positioning in emergency rescue[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition). 2020, 45(8): 1126-1136.
- [11] 王思远. 面向城市建筑群室内外过渡区域 GNSS/UWB 组合导航定位技术研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.  
Wang Siyuan. Research on GNSS/UWB integrated navigation and positioning technology for indoor-outdoor transition areas in urban building complexes[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.
- [12] Rui Xue, Zedong Liang. A simulated fusion localization algorithm with adaptive error covariance matrix for closed corridor seamless positioning[J]. Digital Signal Processing, 2024, 149 104495-.
- [13] AQ 1064-2008, 煤矿用防爆柴油机无轨胶轮车安全使用规范[S].  
AQ 1064-2008, Safety usage standards for explosion-proof diesel engines in rubber-tyred vehicles without rails for coal mines[S].
- [14] 李雪强, 李建胜, 王安成, 等. 视觉/惯性/UWB 组合导航技术综述[J]. 测绘科学, 2023, 48(6): 49-58.  
Li Xueqiang, Li Jiansheng, Wang Ancheng, et al. A review of vision/inertial/UWB integrated navigation technology [J]. Surveying and Mapping Science, 2023, 48(6): 49-58.
- [15] 刘慧, 施志翔, 沈亚运, 等. 基于改进 ESKF 的植保无人机时延位姿补偿算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(02): 315-324.  
Liu Hui, Shi Zhixiang, Shen Yayun, et al. Delay pose compensation algorithm for crop protection unmanned aerial vehicles based on improved ESKF[J]. Journal of Instrumentation and Instrumentation, 2024, 45(02): 315-324.
- [16] Blom Henk A. P., Bar-Shalom Yaakov. Interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(8): 780-783.
- [17] 王小敏, 雷筱, 张亚东. 基于改进自适应 IMM 算法的高速列车组合定位[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(03): 817-825.  
Wang Xiaomin, Lei Xiao, Zhang Yadong. High speed train combination positioning based on improved adaptive IMM algorithm[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2024, 46(03): 817-825.
- [18] 杨谊. 基于多传感器融合的室内外无缝定位技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.  
Yang Yi. Research on indoor-outdoor seamless positioning technology based on multi-sensor fusion [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [19] 郝建伟. 多永磁电机直驱带式输送机自抗扰协同控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
Hao Jianwei. Research on self-disturbance rejection cooperative control strategy for multi-permanent magnet motor direct-drive belt conveyor systems [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.



- [20] 任培文. 基于交互多模型的目标跟踪方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- Ren Peiwen. Research on target tracking methods based on interactive multiple models [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [21] 陈建国, 吕正鑫, 张凤南. 含可调积分的模糊控制在主汽温系统中的应用[J]. 计算机仿真, 2018, 35(5): 86-90.
- Chen Jianguo, Lv Zhengxin, Zhang Fengnan. Application of fuzzy control with adjustable integral in main steam temperature system [J]. Computer Simulation, 2018, 35(5): 86-90.
- [22] 《煤矿安全规程》目录[J]. 国家安全生产监督管理总局国家煤矿安全监察局公告, 2016(3): 15-19.
- "Safety Regulations for Coal Mines" Table of Contents [J]. Announcement by the state administration of work safety and the national coal mine safety administration, 2016(3): 15-19.

