

# 北斗/惯导融合在铁路作业安全中的应用综述

董小玉, 黄 帅, 刘静超, 闻丽芬

西京学院计算机学院, 陕西 西安

收稿日期: 2026年6月4日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月14日

## 摘 要

随着铁路运输规模不断扩大, 站场、隧道、山区及调车作业等复杂场景下的作业安全问题日益突出。受卫星信号遮挡、多路径反射和定位连续性不足等因素影响, 单一北斗定位方式难以满足人员防护、车辆定位、轨迹追溯和风险预警需求。为梳理北斗/惯导融合技术在铁路作业安全中的应用进展, 本文围绕北斗高精度定位、MEMS惯性导航、组合导航、轨道约束与地图匹配、融合算法性能比较以及交通安全预警等方面, 对相关研究和典型场景进行归纳分析。归纳结果表明, 北斗/惯导融合能够结合北斗绝对定位与惯导短时推算优势, 在信号遮挡、RTK状态退化或短时失锁时实现轨迹补偿, 提高复杂铁路环境下的位置感知可靠性。该技术可应用于作业人员定位、调车车辆定位、人车距离预警、线路巡检和隧道山区弱信号定位等场景。未来应加强多源融合定位、场景化预警、轻量化终端和数字铁路平台协同研究, 为铁路作业安全防护和交通安全管理提供支撑。

## 关键词

北斗定位, 惯性导航, 组合导航, 铁路作业安全, 交通安全预警

# Review of the Application of BeiDou/INS Integration in Railway Operation Safety

Xiaoyu Dong, Shuai Huang, Jingchao Liu, Lifan Wen

School of Computer Science, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: June 4, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 14, 2026

## Abstract

With the continuous expansion of railway transportation, operation safety in complex scenarios such as railway stations, tunnels, mountainous areas and shunting operations has become increasingly

文章引用: 董小玉, 黄帅, 刘静超, 闻丽芬. 北斗/惯导融合在铁路作业安全中的应用综述[J]. 交通技术, 2026, 15(4): 501-511. DOI: 10.12677/ojtt.2026.154044

important. Affected by satellite signal obstruction, multipath reflection and insufficient positioning continuity, single BeiDou positioning is difficult to meet the requirements of worker protection, vehicle positioning, trajectory tracing and risk warning. To summarize the application progress of BeiDou/Inertial Navigation System (INS) integration in railway operation safety, this paper reviews related studies and typical scenarios from the aspects of BeiDou high-precision positioning, inertial navigation, integrated navigation, railway track constraints and map matching, fusion algorithm performance comparison, electronic fencing and traffic safety warning. The results show that BeiDou/INS integration can combine the absolute positioning capability of BeiDou with the short-term reckoning capability of inertial navigation. When satellite signals are blocked, RTK status degrades or short-term signal loss occurs, the integrated system can provide trajectory compensation and improve the reliability of position perception in complex railway environments. This technology can be applied to worker positioning, shunting vehicle positioning, worker-vehicle distance warning, line inspection, and weak-signal positioning in tunnels and mountainous areas. In the future, further research should focus on multi-source integrated positioning, scenario-based warning, lightweight terminals and coordination with digital railway platforms, so as to provide support for railway operation safety protection and traffic safety management.

## Keywords

BeiDou Positioning, Inertial Navigation, Integrated Navigation, Railway Operation Safety, Traffic Safety Warning

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

铁路运输是我国综合交通运输体系的重要组成部分，现场作业安全直接关系到人员生命安全、运输效率和基础设施稳定。随着高速铁路、重载铁路、铁路站场和山区线路不断发展，调车作业、线路巡检、车辆检查和设备维护等现场作业环节对人员位置感知、车辆状态识别和风险实时预警提出了更高要求。全球卫星导航系统能够为列车运行监测、车辆定位和作业安全防护提供重要时空信息支撑，相关研究已将 GNSS 视为铁路交通控制、列车定位和运行安全管理中的重要基础技术[1]。

铁路作业环境具有空间结构复杂、人员流动频繁、车辆运行状态变化快等特点。作业人员在轨道区、站场区、车辆停放区和设备维护区之间移动时，容易出现人员越界、人车距离过近、车辆侵限等风险。同时，站场钢结构、车厢、接触网、隧道和山区地形会造成卫星信号遮挡、反射和多路径效应，导致定位漂移、轨迹跳变、连续性下降甚至短时失锁。因此，单一北斗定位方式虽然能够提供基础坐标信息，但在复杂铁路环境下仍难以完全满足连续、稳定、可靠的安全防护需求，铁路定位系统通常需要结合惯性导航、里程计、地图匹配或其他传感器信息提高定位鲁棒性[2]。

惯性导航系统具有自主性强、数据更新频率高和短时连续性好等特点，能够在卫星信号短时异常时进行轨迹推算；但低成本 MEMS 惯导受零偏、噪声和积分误差影响，长时间独立运行会出现误差累积。北斗/惯导融合能够结合北斗高精度定位与惯性导航短时自主推算优势，在复杂环境下提高位置感知连续性和风险预警可靠性。近年来，相关研究已从单一定位精度提升逐渐转向多源感知融合、电子围栏预警、边缘端实时计算和作业风险闭环管理，为铁路作业安全防护提供了新的技术路径[3]。

本文以北斗定位、惯性导航、组合导航、GNSS/INS 融合、铁路作业安全、电子围栏和交通安全预警

等为主要关键词,对近年来国内外关于铁路定位、组合导航和交通安全预警的相关研究进行归纳整理。综述过程中,重点围绕技术基础、典型应用、工程挑战和发展趋势展开分析,并结合铁路站场、调车作业、线路巡检、隧道和山区等典型交通场景,讨论北斗/惯导融合技术在铁路作业安全中的应用价值。全文首先梳理北斗高精度定位、MEMS 惯性导航和组合导航融合方法;随后从作业人员定位、调车车辆定位、人车距离预警、巡检维护和弱信号环境定位等方面分析其典型应用;最后总结当前面临的定位可靠性、预警规则适配、铁路场景数据和平台协同应用等问题,并对多源融合定位、场景化安全预警、轻量化终端和数字铁路平台融合等方向进行展望。

此外,铁路定位与安全预警技术的发展不仅依赖学术研究,也受到行业标准、工程应用案例和数字铁路建设需求的共同推动。近年来,北斗系统在交通运输、铁路巡检、应急保障和智能运维等领域的应用不断拓展,相关技术路线逐渐从“单点定位精度提升”转向“连续可靠定位、风险实时预警和平台协同管理”。因此,本文在梳理学术文献的基础上,进一步结合铁路作业安全需求,从技术演进、典型场景和工程部署三个层面分析北斗/惯导融合技术的应用价值。

## 2. 北斗/惯导融合技术基础

### 2.1. 北斗高精度定位及铁路适用性

在铁路作业安全场景中,定位技术不仅需要提供人员或车辆的坐标信息,还需要满足连续性、实时性、可靠性和工程部署可行性等要求。对于站场调车、线路巡检、隧道作业和山区抢修等任务,定位结果会直接影响电子围栏判断、人车距离预警、轨迹追溯和异常事件定位。因此,北斗高精度定位技术在铁路交通安全管理中具有重要应用价值。

北斗卫星导航系统是我国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统,可为交通运输、应急救援、公共安全和铁路现场作业等领域提供定位、导航、授时和短报文通信等服务。在铁路作业安全场景中,北斗系统可为作业人员定位、车辆定位、轨迹记录、电子围栏判断和风险预警提供统一时空基准,是铁路现场安全防护系统的重要位置感知基础[4] [5]。

常用高精度定位方式主要包括 RTK、PPP 和增强定位等。其中,RTK 技术通过基准站向移动站发送差分改正信息,可在较理想环境下实现厘米级定位精度,适合站场、车辆定位和固定作业区域安全防护;PPP 技术依靠精密卫星轨道、精密钟差和误差模型进行高精度单点定位,不依赖本地基准站,适合长距离线路监测和跨区域轨迹管理[6] [7]。

然而,铁路站场、隧道、山区、桥梁下方和车辆遮挡区域容易造成卫星信号遮挡、反射和多路径效应,导致定位漂移、轨迹跳变、RTK 固定解退化甚至短时失锁。若系统直接依据异常定位结果进行电子围栏判断或人车距离计算,可能造成误报警、漏报警和风险判断延迟。因此,北斗高精度定位虽能提供基础位置支撑,但在复杂铁路环境下仍需与惯性导航、电子地图、通信网络 and 智能预警算法结合,以提高定位连续性和安全预警可靠性。

### 2.2. MEMS 惯导与短时轨迹补偿

惯性导航系统是一种基于惯性测量单元获取载体运动信息,并通过姿态解算、速度积分和位置推算实现自主导航的技术体系。惯性测量单元通常由陀螺仪和加速度计组成,可连续测量角速度和线加速度,从而获得载体姿态、速度和位置信息。与卫星导航相比,惯性导航不依赖外部无线电信号,具有自主性强、数据更新频率高、短时连续性好和抗干扰能力强等特点,适合用于卫星信号遮挡、短时失锁和弱信号环境下的轨迹补偿[8] [9]。

随着微机电系统技术发展,MEMS 惯导逐渐向小型化、低成本、低功耗和集成化方向发展,适合嵌

入手持终端、安全帽终端、巡检设备和车辆监测设备中。在铁路站场、隧道口、桥梁下方、山区线路和车辆遮挡区域,北斗信号容易出现质量下降或短时中断,此时 MEMS 惯导可根据人员或车辆的运动状态进行短时轨迹推算,减少定位中断造成的轨迹缺失。已有研究将 MEMS INS/GNSS 系统用于铁路车辆导航定位精度测试,说明低成本惯导设备在铁路定位应用中具有一定工程价值[10]。

但 MEMS 惯导并不能独立承担长期绝对定位任务。由于惯导解算依赖对传感器数据的连续积分,陀螺仪零偏、加速度计零偏、随机噪声、温度漂移和安装误差等都会随时间放大,造成姿态、速度和位置偏差。因此,在铁路作业安全场景中, MEMS 惯导更适合作为北斗定位的短时补偿和动态辅助定位手段,需要结合北斗周期性校正、铁路电子地图、轨道几何约束、速度约束和其他传感器信息共同使用。

### 2.3. 北斗/惯导融合方法与滤波算法

北斗/惯导融合技术是将北斗卫星导航系统的长期高精度绝对定位能力与惯性导航系统的短时自主推算能力相结合,通过信息融合算法获得更加连续、稳定的位置、速度与姿态信息。当北斗信号质量较好时,系统利用北斗定位结果修正惯导误差;当北斗信号受到遮挡、短时失锁或定位质量下降时,系统利用惯导数据进行短时轨迹推算,从而降低复杂铁路环境中的定位跳变、轨迹中断和预警不稳定问题。

根据融合层级不同,北斗/惯导融合方式通常可分为松组合、紧组合和深组合。松组合主要利用北斗接收机输出的位置和速度结果修正惯导系统,结构简单、工程实现难度较低,适合普通巡检、作业人员定位和开放线路场景;但其依赖完整定位结果,在卫星可见数量不足或 RTK 状态退化时效果受限。紧组合直接利用卫星伪距、载波相位、多普勒频移等原始观测量与惯导信息联合解算,在部分卫星受遮挡时仍可利用残余观测信息,因而更适合站场遮挡、山区线路和桥梁下方等复杂交通环境[11]。深组合可进一步提高弱信号和干扰条件下的跟踪能力,但系统实现复杂度较高,工程部署难度较大。

卡尔曼滤波是组合导航系统中应用较广泛的状态估计算法。该方法通常根据人员或车辆运动模型进行状态预测,再利用北斗观测信息修正预测结果,从而估计位置误差、速度误差、姿态误差以及惯性器件零偏等状态量。对于铁路作业场景,卡尔曼滤波可用于平滑定位轨迹、抑制短时跳变,并提高人员或车辆位置输出的连续性。已有研究将 SINS/GNSS 与轮速信息结合用于列车组合导航,也有研究将 GNSS、惯导和里程计融合用于高速铁路轨道检测,表明多源融合可提高弱信号环境下的定位连续性和轨迹稳定性[12][13]。

除传统滤波方法外,因子图优化、鲁棒滤波、自适应滤波和深度学习误差补偿等方法也逐渐用于组合导航研究。因子图优化适合统一建模多时刻状态量、传感器观测量和轨道约束信息;鲁棒滤波和自适应滤波可根据观测质量变化调整融合权重,降低异常定位数据对结果的影响;人工智能方法则可从历史轨迹、惯导数据和定位质量信息中学习非线性误差特征,为 GNSS 短时失锁条件下的轨迹预测和误差补偿提供思路[14]-[16]。

总体来看,北斗/惯导融合算法的选择需要结合铁路作业场景、定位精度需求、终端算力、通信条件和部署成本综合确定。普通巡检和人员定位场景可优先采用松组合架构,并结合扩展卡尔曼滤波等方法进行状态估计;站场遮挡、山区线路、桥梁下方和复杂车辆运行场景,则可结合紧组合、多传感器融合和地图约束方法提高定位鲁棒性。未来相关算法应更加关注定位连续性、异常识别、报警延迟和终端侧实时部署能力。

为更直观地说明北斗定位、惯性导航与铁路作业安全防护之间的关系,本文构建了北斗/惯导融合铁路作业安全总体架构,如图 1 所示。该架构以北斗定位和 MEMS 惯导为基础,通过 GNSS/INS 融合算法获得连续稳定的位置感知结果,并进一步支撑人员定位、车辆定位、轨迹追踪和电子围栏等应用功能,最终服务于铁路安全预警与风险管理。

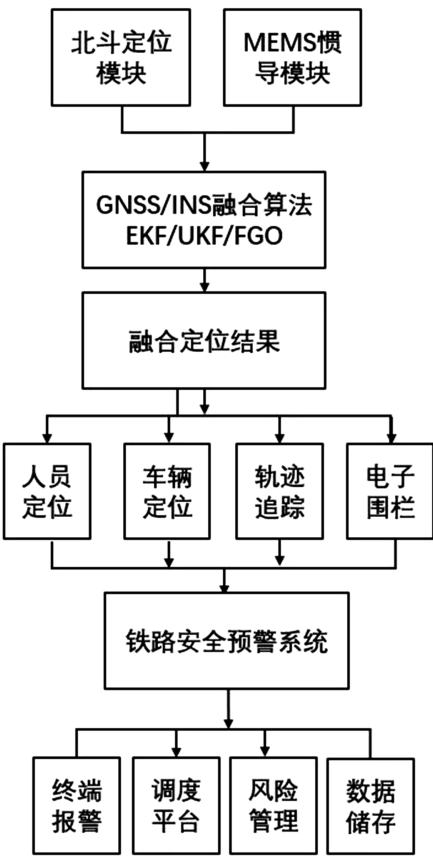


Figure 1. Overall architecture of BeiDou/INS integrated railway operation safety system  
图 1. 北斗/惯导融合铁路作业安全总体架构图

从技术特点与场景适用性来看，单一北斗定位、MEMS 惯性导航与北斗/惯导融合方式各具优势与局限，具体对比如表 1 所示。

Table 1. Comparison of BeiDou positioning, inertial navigation and BeiDou/INS integration  
表 1. 北斗定位、惯性导航与北斗/惯导融合方式对比

| 技术方式      | 主要优势                | 主要局限                 | 铁路作业安全适用场景                 |
|-----------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| 单一北斗定位    | 可提供绝对坐标，开放环境下定位精度较高 | 易受遮挡、多路径和 RTK 状态退化影响 | 开放线路、站场开阔区域、一般轨迹记录         |
| MEMS 惯性导航 | 短时连续性好，不依赖外部卫星信号    | 长时间运行存在误差累积          | 隧道口、桥梁下方、山区短时弱信号区域         |
| 北斗/惯导融合   | 兼顾绝对定位和短时轨迹补偿，连续性较好 | 算法、终端和工程部署复杂度较高      | 调车作业、巡检维护、人车距离预警、隧道山区弱信号场景 |

基于上述技术特征，北斗/惯导融合在铁路作业安全中的应用主要体现在人员定位、车辆定位、人车距离预警、巡检维护和弱信号场景定位等方面。

2.4. 轨道约束与地图匹配辅助定位

铁路运输具有明显的轨道约束特征，列车及轨道作业车辆通常沿既定线路运行，其运动自由度远低于普通道路交通工具。因此，轨道几何信息、线路拓扑结构和电子地图能够作为重要先验信息参与

GNSS/INS 融合定位过程。通过引入轨道约束,可有效抑制惯导误差累积,提高弱信号环境下的定位稳定性和股道识别能力。

目前常见地图匹配方法主要包括点对点匹配(Point-to-Point Matching)、点对曲线匹配(Point-to-Curve Matching)以及基于航迹推算的地图匹配(Dead Reckoning Map Matching)等。点对点方法计算简单,但在站场多股道区域容易产生误匹配;点对曲线方法能够充分利用轨道中心线几何特征,在铁路定位中应用更广;航迹推算匹配则结合惯导连续轨迹信息,可在短时 GNSS 失锁条件下维持定位连续性。

在铁路站场和道岔区域,由于股道密集且相邻线路间距较小,仅依靠 GNSS 定位结果往往难以准确判断列车或作业人员所在股道。将电子地图、轨道几何约束与 GNSS/INS 融合,有助于提升复杂站场环境下的定位稳定性和股道识别能力,并降低多路径效应引起的定位跳变风险。特别是在隧道口、桥梁下方及山区线路等复杂环境中,轨道约束已逐渐成为提高铁路组合导航可靠性的重要技术手段。为进一步比较不同轨道约束与地图匹配方法在铁路场景中的适用特点,相关方法对比如表 2 所示。

**Table 2.** Comparison of railway map matching methods  
**表 2.** 铁路地图匹配方法比较

| 方法              | 基本原理          | 优势        | 局限性       | 股道识别支撑          | 适用场景      |
|-----------------|---------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|
| 点对点匹配           | 定位点匹配最近轨道节点   | 实现简单、计算量小 | 易受定位误差影响  | 受定位误差影响较大       | 开阔线路      |
| 点对曲线匹配          | 匹配轨道中心线       | 精度较高      | 需要高质量轨道地图 | 可辅助股道判断         | 站场、线路巡检   |
| 航迹推算匹配          | 结合 INS 连续轨迹匹配 | 连续性好      | 长时间存在累积误差 | 可提升短时连续识别能力     | 隧道、弱信号环境  |
| GNSS/INS + 地图约束 | 融合卫星、惯导和轨道约束  | 精度高、鲁棒性强  | 实现复杂      | 可提高复杂站场股道识别稳定性  | 调车作业、高速铁路 |
| FGO + 轨道约束      | 因子图统一优化多源数据   | 全局一致性最好   | 计算开销较大    | 有利于多源约束下的全局一致识别 | 高精度铁路定位   |

2.5. 融合算法性能比较

不同 GNSS/INS 融合算法在铁路场景中的性能表现存在明显差异。扩展卡尔曼滤波(EKF)由于计算复杂度较低、工程实现成熟,目前仍是铁路组合导航系统应用最广泛的方法。其能够满足一般站场巡检、人员定位及车辆监测需求,但在强非线性环境和复杂遮挡条件下性能会有所下降。

无迹卡尔曼滤波(UKF)通过无迹变换处理非线性状态传播问题,在较强非线性条件下具有一定优势,但计算量相对增加。

粒子滤波(PF)能够处理非高斯噪声和复杂运动模型,在严重遮挡和多路径环境中具有较好的鲁棒性,但粒子数量增加会带来较大的计算开销,对终端硬件资源要求较高。

近年来,因子图优化(Factor Graph Optimization, FGO)逐渐应用于铁路组合导航领域。该方法能够统一融合 GNSS、惯导、里程计和轨道约束信息,有利于提升长时间运行和复杂场景下的全局一致性和定位精度。

与此同时,基于人工智能的方法开始用于 GNSS 失锁补偿与误差预测。通过深度学习历史轨迹特征和惯导误差规律,可在卫星信号短时中断期间提供轨迹预测能力,为铁路弱信号环境定位提供新的解决思路。为直观比较不同 GNSS/INS 融合算法在定位精度、鲁棒性、计算开销和场景适用性等方面的差异,相关算法性能对比如表 3 所示。

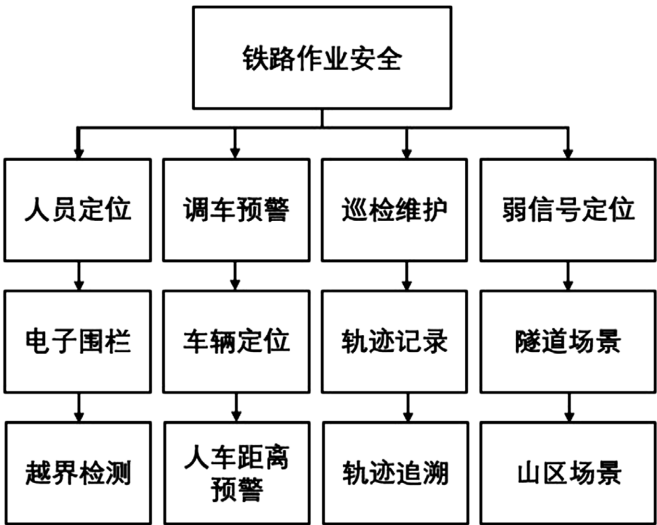
**Table 3.** Comparison of GNSS/INS fusion algorithms in railway scenarios  
**表 3.** 铁路场景下 GNSS/INS 融合算法性能比较

| 算法       | 定位精度 | 鲁棒性 | 计算开销 | 先验模型依赖 | 典型铁路场景    |
|----------|------|-----|------|--------|-----------|
| EKF      | 较高   | 中等  | 低    | 高      | 巡检、人员定位   |
| UKF      | 高    | 较高  | 中    | 高      | 山区线路、复杂站场 |
| PF       | 高    | 高   | 高    | 低      | 严重遮挡环境    |
| FGO      | 很高   | 很高  | 较高   | 中      | 轨道检测、高速铁路 |
| AI-based | 较高   | 高   | 较高   | 低      | GNSS 失锁补偿 |

由于不同研究场景、传感器等级和测试条件存在差异，表中性能评价以文献归纳和工程适用性分析为主。

3. 铁路作业安全中的典型应用

基于北斗高精度定位、MEMS 惯导和组合导航融合技术，北斗/惯导融合在铁路作业安全中的应用已逐步从单纯定位扩展到风险预警和安全管理。根据铁路现场作业特点，其典型应用场景主要包括人员定位、调车预警、巡检维护以及弱信号环境定位等方面，如图 2 所示。



**Figure 2.** Typical application scenarios of BeiDou/INS integrated technology in railway operation safety

**图 2.** 北斗/惯导融合技术在铁路作业安全中的典型应用场景

由图 2 可见，北斗/惯导融合技术贯穿铁路作业安全管理全过程。其中，人员定位和电子围栏主要服务于作业人员安全防护；调车预警侧重于人车协同安全管理；巡检维护强调轨迹记录与过程追溯；弱信号定位则重点解决隧道、山区等复杂环境下的位置连续感知问题。

3.1. 作业人员定位与电子围栏预警

铁路现场作业区域复杂，人员常在轨道区、站场区、车辆停放区和设备维护区之间移动，容易出现人员越界、人车距离过近和误入危险区域等风险。因此，连续可靠的人员定位是铁路作业安全防护和数化管理的重要基础[17]。

基于北斗/惯导融合定位技术,可通过手持终端、安全帽终端或便携式作业终端获取作业人员位置、运动方向和轨迹状态。北斗模块提供绝对坐标,惯导模块在卫星信号不稳定时进行短时补偿,融合算法对定位数据进行平滑修正。系统将融合位置信息与铁路电子地图、作业边界和安全规则匹配,可实现人员越界判断、危险区域接近提醒和轨迹异常识别。

电子围栏的核心作用不是简单划定虚拟边界,而是将作业区域、车辆运行范围和人员活动轨迹进行动态关联。当人员接近或进入危险区域时,终端可通过声音、振动、灯光或弹窗方式进行本地报警,并将异常信息上传后台。与单一北斗定位相比,北斗/惯导融合可在信号遮挡或短时失锁时保持轨迹连续性,降低定位漂移造成的误报警和漏报警风险。

### 3.2. 调车车辆定位与人车距离预警

调车作业是铁路站场安全管理中的高风险环节。站场内线路、道岔、车辆和作业人员分布密集,人员与车辆相对位置变化快,若缺少实时可靠的位置感知,容易出现车辆接近作业人员、人员误入车辆运行范围或车辆侵限等隐患。相关研究已围绕铁路车站调车作业综合安全防护技术开展分析,为调车场景下的人车协同防护提供了参考[18]。

北斗/惯导融合技术可用于调车车辆定位与人车距离预警。车辆端安装组合定位设备,实时输出车辆位置、速度和运行方向;人员端通过便携式定位终端获取作业人员位置。系统根据人员与车辆实时坐标计算距离、相对速度和接近趋势,并结合轨道位置、车辆运行方向和作业边界进行风险判断。当人员进入车辆运行风险范围,或车辆接近作业区域时,系统可触发分级报警,为现场人员提供提前避险时间。

在站场遮挡和多路径环境下,单一北斗定位容易出现车辆位置跳变和风险判断不稳定。惯导系统可利用车辆运动状态进行短时推算,并结合轨道电子地图、道岔位置和车辆运行方向约束定位结果,从而提高调车场景下车辆识别和人车距离预警的可靠性。

### 3.3. 巡检维护与轨迹追溯

铁路线路巡检和设备维护是保障运输安全的重要环节。传统巡检方式主要依赖人工记录和事后汇总,容易出现轨迹记录不完整、异常位置不准确和作业过程难追溯等问题,影响运维管理效率和安全责任闭环。

北斗/惯导融合终端能够为铁路巡检提供连续轨迹记录和位置标注能力。巡检人员携带融合定位终端后,系统可实时记录巡检路径、停留点、异常事件位置和作业时间。当北斗信号良好时,系统利用北斗坐标定位;当进入桥下、隧道口、山区或其他遮挡区域时,惯导系统进行短时轨迹补偿,减少轨迹中断和数据缺失。已有研究将北斗高精度定位用于铁路巡检,也有研究将 GNSS、惯导和里程计融合用于高速铁路轨道检测,说明多源融合能够提高复杂环境下巡检轨迹记录的连续性和稳定性[19]。

在线路维护场景中,融合定位技术还可与移动巡检系统、铁路地理信息平台 and 智能终端结合。作业人员发现设备异常后,可通过终端记录异常位置,并上传图片、语音和文字说明。后台系统将异常事件与具体线路区段、设备编号和维护任务关联,从而提高故障定位、任务复核和责任追溯效率。

### 3.4. 隧道山区与弱信号场景定位

隧道和山区是铁路定位与安全预警中的典型复杂场景。隧道内部卫星信号通常无法直接接收,山区线路受山体遮挡、地形起伏和卫星可见数量变化影响,容易出现定位精度下降、轨迹跳变和连续性不足等问题。这类环境是单一北斗定位应用的主要难点,也是铁路 GNSS 定位安全性、完整性和连续性研究关注的重点[20]。

在隧道场景中,惯导技术可在北斗信号中断后,根据人员或车辆运动状态进行短时轨迹推算。若结合隧道电子地图、里程信息、轨道方向约束和出入口北斗定位校正,系统可在一定程度上维持隧道内轨迹连续性,为巡检管理、安全防护和应急救援提供位置参考。在山区铁路场景中,北斗/惯导融合系统能够缓解地形遮挡造成的定位不稳定问题,并在卫星信号恢复后利用北斗定位结果修正惯导误差。

此外,隧道和山区场景往往伴随通信条件不稳定,铁路作业安全终端不能完全依赖后台平台进行实时判断,而应具备边缘计算和本地报警能力。融合定位结果可在终端侧直接参与电子围栏判断和风险预警,即使通信短时中断,也能实现本地安全提醒;待通信恢复后,再将轨迹数据和报警记录上传后台,实现现场防护与数据追溯结合。

## 4. 讨论:当前挑战与未来发展趋势

### 4.1. 当前挑战

北斗/惯导融合技术在铁路作业安全中具有应用前景,但其工程推广仍面临定位可靠性、预警规则适配、场景数据支撑和平台协同部署等挑战。

第一,复杂铁路环境下的定位可靠性仍需提升。铁路站场、隧道、山区、桥梁下方和钢结构密集区域容易造成北斗信号遮挡、多路径反射、RTK 状态退化和短时失锁,进而影响电子围栏判断、人车距离计算和风险报警结果。因此,复杂环境下的定位质量评估、异常识别、轨迹修正和完整性监测机制仍需进一步完善[21]。

第二,安全预警规则与具体作业场景的适配性不足。调车作业、线路巡检、设备维护、隧道作业和山区抢修在安全边界、车辆速度、人员活动范围和风险等级方面存在差异。若电子围栏阈值、人车距离阈值和报警规则设置过于固定,容易造成误报警频繁或真实风险识别不足。因此,需要建立分场景、分等级、可动态调整的交通安全预警规则。

第三,铁路场景数据与评价体系仍不完善。铁路作业安全定位系统的评价不应只关注平均定位误差,还应综合考虑定位连续性、报警准确率、误报警率、漏报警率、系统延迟、终端稳定性和复杂环境适应性等指标[22]。真实作业场景数据和统一评价标准不足,会限制不同融合定位方法和预警系统之间的客观比较。

第四,系统平台协同与工程部署仍存在难度。铁路作业安全预警系统不仅涉及前端定位终端,还涉及通信网络、电子地图、作业计划、调度指挥、人员管理和设备运维平台。若定位数据无法与既有铁路信息系统融合,就难以形成完整的安全管理闭环。此外,终端还需满足低功耗、抗振动、稳定通信、易维护和批量部署等工程要求。

### 4.2. 未来发展趋势

针对当前铁路作业安全定位系统存在的主要问题,后续研究需要从定位可靠性提升、预警规则优化、平台协同部署和工程成本控制等方面形成更加清晰的技术路径。在复杂环境下,应重点研究北斗/惯导/轨道地图/里程计等多源信息融合方法,并引入定位质量评估和异常观测剔除机制,以提高定位结果的连续性和可信度。在预警规则方面,可结合专家系统、风险等级模型或强化学习方法,构建能够随作业类型、车辆速度和人员位置动态调整的风险预警决策模型。在平台协同方面,可探索端、边、云协同架构,明确终端、边缘节点和云平台之间的功能分工。在工程部署方面,则应综合考虑终端成本、续航能力、通信条件、维护难度和批量推广效益,提升系统的技术经济性和可部署性。

未来,北斗/惯导融合技术在铁路作业安全中的应用不宜只停留在定位精度提升层面,而应面向不同作业场景形成差异化技术方案。对于开放线路巡检和一般站场定位,可优先采用北斗定位与松组合融合

方式,以降低终端成本和部署复杂度。对于站场遮挡、桥梁下方、隧道口和山区线路等复杂环境,则应结合紧组合、多源传感信息和轨道地图约束,提高定位连续性和风险判断可靠性。

多源融合定位将成为提升复杂环境适应性的重要方向。随着北斗系统规模化应用和产业生态不断完善,高精度时空服务已逐渐成为交通运输数字化建设的重要基础设施,为铁路安全防护和智能运维提供重要支撑[23]。除北斗和惯导外,系统可进一步融合视觉、超宽带定位、里程计、电子地图和通信基站等信息。对于人员巡检场景,电子地图和作业边界可用于判断人员是否越界;对于调车车辆定位场景,轨道几何、道岔位置和车辆运行方向可用于约束车辆轨迹,减少定位漂移对风险判断的影响[24]。

场景化交通安全预警将成为系统应用重点。铁路作业安全系统不应只输出定位结果,而应结合人员位置、车辆状态、作业计划和风险规则进行综合判断。调车作业应重点关注人车距离和车辆接近趋势,线路巡检应重点关注轨迹完整性和异常位置标注,隧道山区场景则应重点关注弱信号条件下的短时轨迹补偿和本地报警。

边缘智能终端将推动现场安全管理实时化。铁路作业现场可能存在通信不稳定、后台响应延迟等情况,安全预警不能完全依赖远程平台完成。因此,作业人员终端和车辆端设备应具备定位解算、轨迹补偿、电子围栏判断、本地报警和数据缓存能力,在网络异常时仍能完成基本风险提醒。

与数字铁路平台融合将提升交通安全管理智能化水平。《数字铁路规划》明确提出推进铁路数字基础设施建设和数字化转型,高精度定位与安全预警系统有望成为数字铁路的重要组成部分[25]。此外,铁路定位与预警系统建设还需符合铁路行业技术管理规范 and 安全管理要求,实现技术先进性与工程可实施性的统一[26]。北斗/惯导融合定位数据可与铁路电子地图、作业计划、调度系统、人员管理系统和设备运维平台结合,实现作业过程可视化、风险状态实时化和安全管理数据化。后续研究还应关注不同系统之间的数据接口、报警阈值设置和现场部署维护问题,使融合定位技术更好服务于铁路作业安全管理。

## 5. 结论

本文围绕北斗/惯导融合技术在铁路作业安全中的应用进行了综述,梳理了北斗高精度定位、MEMS 惯性导航和组合导航融合方法的基本特点,并结合铁路站场、调车作业、线路巡检、隧道和山区等场景分析了其应用价值。归纳结果表明,北斗/惯导融合能够在卫星信号遮挡、RTK 状态退化或短时失锁时提供轨迹补偿,从而提高复杂铁路环境下的位置感知连续性和可靠性。

从应用场景看,该技术可为作业人员定位、电子围栏预警、调车车辆定位、人车距离判断、巡检轨迹记录和弱信号环境定位提供支撑。与单一北斗定位相比,北斗/惯导融合更适合站场遮挡、车辆密集、桥梁下方、隧道口和山区线路等定位条件不稳定的场景,而在开阔线路和一般巡检场景中,可根据精度需求和部署成本选择相对简化的融合方案。

后续研究应更加关注复杂铁路环境下的定位质量评估、异常识别和预警规则适配,并加强终端设备、电子地图、作业计划和铁路管理平台之间的协同。通过进一步提升系统可靠性和工程部署能力,北斗/惯导融合技术有望在铁路现场作业安全防护、过程追溯和风险预警中发挥更稳定的应用价值。

## 基金项目

陕西省大学生创新训练计划国家级项目“面向铁路站场作业的北斗高精度定位手持安全终端设计”(项目编号:202612715006)。

## 参考文献

- [1] Steuer, M., Burdzik, R. and Piednoir, F. (2025) Implementation of Global Navigation Satellite Systems in Railway Traffic Control Systems: Overview of Navigation Systems, Application Areas, and Implementation Plans. *Applied Sciences*,

- 15, Article No. 356. <https://doi.org/10.3390/app15010356>
- [2] Spinsante, S., Stallo, C., Lladó, C.M. and Neri, A. (2020) Hybridized-GNSS Approaches to Train Positioning: Challenges and Open Issues on Uncertainty. *Sensors*, **20**, Article No. 1885. <https://doi.org/10.3390/s20071885>
- [3] Chrzan, M., Ciszewski, T. and Nowakowski, W. (2024) Selected Applications of Satellite Technologies in Rail Transport. *Archives of Transport*, **71**, 91-105. <https://doi.org/10.61089/aot2024.z1bfx011>
- [4] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821.
- [5] Yang, Y., Liu, L., Li, J., Yang, Y., Zhang, T., Mao, Y., *et al.* (2021) Featured Services and Performance of BDS-3. *Science Bulletin*, **66**, 2135-2143. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.06.013>
- [6] Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M. and Webb, F.H. (1997) Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **102**, 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96jb03860>
- [7] Yang, Y., Ding, Q., Gao, W., Li, J., Xu, Y. and Sun, B. (2022) Principle and Performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3. *Satellite Navigation*, **3**, Article No. 5. <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00066-2>
- [8] Titterton, D. and Weston, J.L. (2004) Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers.
- [9] El-Sheimy, N. and Youssef, A. (2020) Inertial Sensors Technologies for Navigation Applications: State of the Art and Future Trends. *Satellite Navigation*, **1**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/s43020-019-0001-5>
- [10] Specht, M., Specht, C., Dąbrowski, P., Czaplewski, K., Smolarek, L. and Lewicka, O. (2020) Road Tests of the Positioning Accuracy of INS/GNSS Systems Based on MEMS Technology for Navigating Railway Vehicles. *Energies*, **13**, Article No. 4463. <https://doi.org/10.3390/en13174463>
- [11] Falco, G., Pini, M. and Marucco, G. (2017) Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios. *Sensors*, **17**, Article No. 255. <https://doi.org/10.3390/s17020255>
- [12] 王可, 刘立刚, 周斌, 卜智勇. 基于 SINS/GNSS/轮速的列车组合导航算法研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(1): 189-195.
- [13] Zhang, X., Cui, X. and Huang, B. (2021) The Design and Implementation of an Inertial GNSS Odometer Integrated Navigation System Based on a Federated Kalman Filter for High-Speed Railway Track Inspection. *Applied Sciences*, **11**, Article No. 5244. <https://doi.org/10.3390/app11115244>
- [14] Wen, W., Pfeifer, T., Bai, X. and Hsu, L. (2021) Factor Graph Optimization for GNSS/INS Integration: A Comparison with the Extended Kalman Filter. *Navigation*, **68**, 315-331. <https://doi.org/10.1002/navi.421>
- [15] Zhao, S., Zhou, Y. and Huang, T. (2022) A Novel Method for AI-Assisted INS/GNSS Navigation System Based on CNN-GRU and CKF during GNSS Outage. *Remote Sensing*, **14**, Article No. 4494. <https://doi.org/10.3390/rs14184494>
- [16] Cohen, N. and Klein, I. (2024) Inertial Navigation Meets Deep Learning: A Survey of Current Trends and Future Directions. *Results in Engineering*, **24**, Article ID: 103565. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103565>
- [17] Beugin, J., Legrand, C., Marais, J., Berbineau, M. and El-Koursi, E. (2018) Safety Appraisal of GNSS-Based Localization Systems Used in Train Spacing Control. *IEEE Access*, **6**, 9898-9916. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2807127>
- [18] 黄圣文, 刘海东, 徐嫣, 等. 铁路车站调车作业综合安全防护关键技术研究[J]. 铁路计算机应用, 2025, 34(5): 90-93.
- [19] 王绍新, 翁艳彬. 基于北斗高精度定位的铁路巡检技术应用[J]. 全球定位系统, 2024, 49(1): 60-67.
- [20] Cai, B., Wu, B. and Lu, D. (2020) Survey of Performance Evaluation Standardization and Research Methods on GNSS-Based Localization for Railways. *Chinese Journal of Electronics*, **29**, 22-33. <https://doi.org/10.1049/cje.2019.09.003>
- [21] Legrand, C., Beugin, J., Marais, J., Conrard, B., El-Koursi, E.-M. and Berbineau, M. (2016) From Extended Integrity Monitoring to the Safety Evaluation of Satellite-Based Localisation System. *Reliability Engineering & System Safety*, **155**, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.04.011>
- [22] 余振国, 宁静, 关则彬. 铁路安全风险预警信息系统的研究与设计[J]. 铁路计算机应用, 2017, 26(2): 4-7.
- [23] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(2024) [R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2024.
- [24] Yin, H., Song, H., Wu, R., Zhou, M., Deng, Z. and Dong, H. (2025) Edge Computing-Enabled Train Fusion Positioning: Modeling and Analysis. *Mathematics*, **13**, Article No. 1015. <https://doi.org/10.3390/math13061015>
- [25] 中国国家铁路集团有限公司. 数字铁路规划[R]. 北京: 中国国家铁路集团有限公司, 2023.
- [26] 国家铁路局. 铁路技术管理规程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2022.