

Key technologies for train approach remote warning based on Beidou satellite positioning and short message communication

Peng Chen¹ Bin Zhang² Guolin Cheng² Baozhen Yan² Xudong Ji²

1. China Railway Information Technology Group Co., Ltd., Beijing, 100038, China

2. China Railway Information Engineering Group Co., Ltd., Beijing, 100044, China

Abstract

This paper investigates critical technologies for remote train warning systems in railway construction projects without public network coverage, utilizing BeiDou satellite positioning and short message communication. By analyzing the limitations of traditional safety protection methods in railway engineering, we developed a remote early-warning network for construction sites through the BeiDou-3 system's high-precision positioning and reliable communication capabilities in non-networked areas. The system employs BeiDou positioning technology to capture real-time coordinates of both trains and workers, transmitting location data and warning

Keywords

Beidou satellite positioning; Beidou short message communication; LoRa self-organizing network; No public network coverage; Railway construction safety; Train approach warning; GIS geographic information system

基于北斗卫星定位及短报文通信的列车接近远程预警关键技术

陈朋¹ 张斌² 程国林² 闫保振² 纪旭东²

1. 中国铁路信息科技集团有限公司, 中国·北京 100038

2. 中铁信息工程集团有限公司, 中国·北京 100044

摘要

本文针对无公网覆盖的铁路营业线施工工程, 研究基于北斗卫星定位及短报文通信的列车接近远程预警关键技术。通过分析传统铁路施工安全防护技术的局限性, 结合北斗三号系统在无公网区域的高精度定位和可靠通信能力, 构建了一套覆盖施工现场的列车远程预警信息网络。系统利用北斗卫星定位技术获取列车和施工人员的实时位置信息, 经由北斗短报文通信传输方式实时交互位置和预警信息; 通过GIS地理信息系统对列车运行轨迹进行精确分析, 预测列车接近施工区域的安全距离; 在施工现场配备级联组网的告警装置, 确保施工安全管控人员能够及时获取预警信息。本文详细介绍了系统架构设计、关键技术实现、调度中心远程监控技术以及实际应用效果, 为提升施工现场的技术防护能力, 保障营业线施工安全提供了有效解决方案。

关键词

北斗卫星定位; 北斗短报文通信; LoRa自组网; 无公网覆盖; 铁路施工安全; 列车接近预警; GIS地理信息系统

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着我国铁路建设行业的快速发展, 铁路营业线施工安全问题日益凸显。铁路施工过程中, 列车接近施工区域是造成施工安全事故的主要原因之一。特别是在无公网覆盖的复杂地形区域, 如山区、隧道、峡谷等, 传统的铁路施工安全防护技术面临诸多挑战。传统的铁路施工安全防护主要依赖人工防护, 存在信息传递滞后、定位精度低、无法实时监控等问题。在无公网覆盖区域, 现有智能预警系统因依赖移动通信网络而无法正常工作, 导致施工安全风险增加。

近年来, 北斗卫星导航系统的建设与应用取得了重大突破。北斗三号系统不仅具备高精度定位能力, 还具有独特

【基金项目】中国铁路信息科技集团有限公司科技研究开发计划合同《北斗短报文系列终端设计及研制》研究成果(项目编号: WJZG-CKY-2024038〔2024Y07〕); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划合同《铁路行业北斗短报文应用场景及实施关键技术研》研究成果(项目编号: N2024X024)。

【作者简介】陈朋(1972-), 女, 中国北京人, 硕士, 正高级工程师, 从事铁路网信新技术应用研究。

的短报文通信功能，可在无公网覆盖区域实现信息传输。将北斗卫星定位及短报文通信技术应用于无公网覆盖施工区域的列车接近远程预警，可有效解决传统防护方法的不足，提升铁路施工安全水平。

国内外学者对铁路施工安全预警技术进行了大量研究。在定位技术方面，GPS、GLONASS等卫星导航系统被广泛应用于铁路施工安全监测，但这些系统在无公网区域存在信号覆盖不足、定位精度不稳定、定位信息无法回传等问题。在通信技术方面，4G、5G等公网通信技术在铁路安全预警中得到应用，但在无公网覆盖区域无法使用。

北斗卫星导航系统在铁路安全领域的应用研究逐渐增多。研究表明，北斗三号系统在亚太地区定位精度优于5米，短报文通信容量提高10倍，单次通信能力达1000个汉字，且具有全球覆盖、高可靠性等优势。此外，北斗短报文通信时延约为0.5秒，点对点通信时延为1-5秒，适合在无公网覆盖区域进行安全预警信息传输。

1.2 研究内容与创新点

本研究首先分析了当前铁路施工安全防护技术的现状，对比了传统人工防护方式信息滞后、可靠性差与现有智能预警系统过度依赖公网覆盖的局限性，阐明了在无公网区域构建新型预警系统的必要性。在此基础上，论文深入研究了北斗卫星定位及短报文通信技术的原理，论证了其全球覆盖、不受公网限制的独特优势，为系统提供了核心的技术支撑。进而，我们设计了一套完整的基于北斗的列车远程预警系统架构，详细阐述了地面监测点、车载终端、调度中心平台及级联式告警装置等关键组件的功能与交互机制。其中，调度中心远程监控技术实现了对列车运行状态的实时可视化监控与预警决策；通过融合北斗短报文与LoRa等技术的多模式通信方案，有效解决了无公网区域信息传输的难题；而创新的铁路里程-坐标转换算法与列车接近趋势辅助测算模型，则显著提升了预警的精确性与及时性。最后，通过对系统应用效果的测试分析，验证了其可靠性与有效性，并针对当前不足提出了未来的优化方向，为提升铁路施工安全防护水平提供了行之有效的解决方案。

本研究的核心创新在于针对无公网覆盖区铁路施工安全这一行业痛点，提出了一个多技术深度融合的系统性解决方案。其创新性主要体现在三个方面：首先，在通信架构上，提出了“北斗短报文+LoRa”的协同异构传输模式，兼具北斗的全球覆盖性与LoRa的本地低功耗大容量优势，成功解决了铁路无公网环境下数据可靠传输的难题；其次，在算法层面，研发了基于铁路里程-坐标转换的动态预警模型，实现了从抽象地理信息到铁路业务逻辑的精准映射，大大提高预警准确率；最后，在工程应用上，自主研发了支持级联组网的低功耗告警装置，并通过实际业务环境中的长期稳定运行，实现了该技术在复杂铁路业务场景从“实验室验证”到“工程化应用”的重大突破，为行业应用提供了可复制、

可推广的完整解决方案。

2 基于北斗的列车远程预警系统总体架构

2.1 系统需求分析

本系统的设计源于对铁路营业线施工，特别是在无公网覆盖区域施工中安全痛点的深刻洞察。传统人工防护方式存在信息传递滞后、定位精度低、无法实时监控等问题，而依赖公网的智能预警系统在山区、隧道、峡谷等复杂地形中可能失效，致使施工安全风险陡增。因此，构建一套不依赖公网、能够实现高精度定位与可靠通信的远程预警系统，是保障铁路施工安全的迫切需求。

2.1.1 功能性需求

本系统的功能性需求核心在于构建一个闭环的“感知-通信-决策-执行”远程预警体系。首先，系统需具备高精度的时空信息感知能力，能够实时获取列车与施工人员在无网区域的精确位置信息（厘米级至米级），为后续分析提供数据基础。其次，系统必须拥有完全不依赖公网的双向可靠通信能力，确保前端监测数据与中心预警指令的稳定、及时传输，彻底打破信息孤岛。再次，系统需集成远程分析与实时预警功能，通过融合GIS与铁路里程标信息，对列车运行轨迹进行精确分析，动态计算安全距离，并实现临近临界点的自动、多级预警触发。

在预警信息的发布与呈现层面，系统需支持现场多模态与远程多途径的信息发布机制，即通过级联组网的声光电报警装置确保现场施工人员全员感知，同时通过短报文、平台弹窗等方式通知远端管控人员。为实现全局指挥与控制，调度中心需具备全景可视与决策支持能力，依托BIM+GIS数字孪生平台直观展示列车、人员、电子围栏等全要素动态，赋能调度员进行精准决策。最后，系统应提供完备的数据追溯与效能评估功能，完整记录历史数据以支持事后回放、查询与分析，为安全事故溯源与安全管理优化提供核心数据依据。

2.1.2 非功能性需求

在非功能性需求方面，系统需满足一系列严苛的性能与质量指标，以确保其在复杂铁路施工环境中的实用性与可靠性。首先，系统必须具备高精度与高可靠性，在结合地基增强服务后，开阔区域定位精度需优于0.5米，复杂环境下亦需稳定在米级以内，同时系统整体可用性应高于99.9%，确保关键预警功能持续有效。其次，预警信息的端到端传输延迟需严格控制在秒级（依托北斗短报文约0.5秒及点对点1-5秒的通信能力），以满足对高速列车接近的实时预警要求。然后，所有野外部署设备需具备一定的环境适应性与耐久性，工作温度范围应覆盖-20℃~60℃，防护等级至少达到IP67的工业级或军工级标准，以抵御沿线恶劣自然环境的侵蚀。此外，为降低运维成本，无人值守的现场传感与告警设备需采用超低功耗设计，单次供电续航时间不低于3个

月。最后，系统必须采用多级加密通信链路、数据传输校验及平台防火墙等多重安全措施，构筑坚固的防御体系，确保数据与运行安全。

2.2 系统总体架构设计

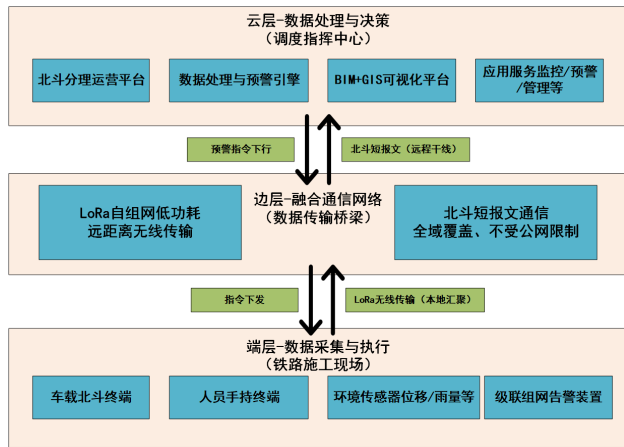


图 1-1 总体架构图

为实现无公网覆盖区域列车接近远程预警的核心功能，本文设计了一套基于“云 - 边 - 端”协同理念的三层系统总体架构，如图 1-1 所示。该架构自上而下由数据处理与决策层、融合通信网络层和数据采集与执行层组成，通过数据流的双向交互，构建了一个从信息感知、融合传输到决策与执行的完整闭环。

2.2.1 数据采集与执行层（终端层）

数据采集与执行层是系统的神经末梢，部署于铁路施工沿线现场，负责前端数据的采集与最终预警指令的执行。该层主要包括：

车载北斗终端：安装于运营列车机车内部，集成高精度北斗定位 + 北斗短报文通信模块，用于实时获取列车的位置、速度与运行方向等关键信息。

人员手持终端：配备给现场施工人员，具备定位和紧急报警功能，实现人员位置的实时追踪与管理。

地面监测传感器：包括位移计、雨量计等各类传感器，用于采集施工区域的环境状态数据。

级联组网告警装置：布设在施工区域关键节点，是预警信息的最终执行单元。它集成了北斗短报文接收、LoRa 通信模块及声光报警器，能够接收指令并发出多模态（声、光、语音）报警，提醒人员避险。

2.2.2 融合通信网络层（边层）

融合通信网络层是连接前端与后台的桥梁，是解决无公网覆盖区域通信难题的核心。本系统创新性地采用了“北斗短报文 + LoRa 自组网”的融合通信模式：

LoRa 地面自组网：在铁路沿线部署多个 LoRa 节点，形成星型或网状拓扑的本地无线网络，负责将终端层采集的数据在本地进行大面积、低功耗的汇聚与传输，其无障碍通信距离可达 20 公里，有效覆盖施工区域。

北斗短报文通信：作为远程干线通信通道，负责在无公网环境下实现数据的跨地域、超远距离传输。部署于现场的汇聚终端（网关）接收来自 LoRa 网络的数据，经压缩与协议封装后，通过北斗短报文系统将数据上传至调度中心；同时，接收并解析下行指令，再通过 LoRa 网络分发至各执行终端。这种融合模式兼具了 LoRa 的低成本、大容量和北斗的全球覆盖、不受公网限制的双重优势。

2.2.3 数据处理与决策层

数据处理与决策层是系统的“智慧大脑”，部署于铁路局调度中心，负责数据的处理、分析、可视化与决策指挥。其核心是北斗分理级运营服务平台，主要包含以下模块：

数据接收与处理模块：负责接收通过北斗短报文回传的各类数据，进行解密、解压缩和数据清洗，为上层应用提供高质量的数据源。

预警分析引擎：是系统的核心算法模块。它基于 GIS 地理信息系统，融合铁路里程标与坐标转换算法，实现对列车运行轨迹的精确分析；通过列车接近预警模型，动态计算安全距离，远程判定预警等级，并自动生成预警指令。

可视化监控与决策支持模块：采用 BIM+GIS 技术构建铁路线路与施工场景的数字孪生模型，将列车位置、人员分布、实时轨迹、预警信息、电子围栏等要素进行一体化、全景式可视化展示，为调度员提供直观的全局态势感知和决策支持。

系统管理模块：负责用户权限、终端设备、历史数据、日志等的综合管理，支持预警信息的追溯回放与统计分析。

系统数据传输路径：数据采集与执行层的数据经由 LoRa 自组网汇聚至汇聚终端，终端对数据进行压缩与打包后，通过北斗短报文上行传输至数据处理与决策层；平台层的预警指令则通过相反的路径（北斗→汇聚终端→LoRa）下行分发至现场的告警装置执行。这一双向闭环流程，确保了在无公网环境下预警信息传递的及时性与可靠性，有效保障了铁路营业线的施工安全。

2.3 硬件组成

2.3.1 终端层硬件

终端层硬件部署于铁路施工一线，直接负责数据采集与指令执行，主要包括：

车载北斗终端：内置高精度北斗定位模块（支持 B2b-PPP 服务）和北斗 RDSS 通信模块，安装于机车驾驶室内，实时获取并上报列车的位置、速度、方向等状态信息。

人员手持终端：为现场作业人员配备，集成北斗定位模块、LoRa 通信模块及紧急报警按钮，具备人员位置实时上报、接收文本预警信息和一键求救功能。

环境监测传感器：包括边坡位移计、雨量计、振动传感器等，负责采集施工区域的环境安全数据，并通过内置的 LoRa 模块进行无线传输。

级联组网告警装置：是本系统的特色硬件。集成了北

斗 RDSS 通信模块、LoRa 自组网模块、高性能蓄电池、超亮 LED 灯珠、高音贝蜂鸣器及语音合成模块。其设计满足工业级标准,防护等级达 IP67,工作温度范围 -20℃ ~ 60℃,在低功耗模式下续航能力可达 3 个月以上,确保在恶劣环境下稳定工作。

2.3.2 网络层硬件

汇聚终端(网关):作为通信网络的核心枢纽,是连接 LoRa 自组网与北斗卫星网络的关键设备。其采用户外型机箱设计,内置 LoRa 网关模块和北斗 RDSS 通信模块,并具备一定的边缘计算能力,负责对 LoRa 网络内采集的数据进行汇聚、预处理、压缩和协议封装,然后通过北斗短报文上传至中心平台;同时,接收并解析下行指令,分发至目标终端。

2.3.3 中心层硬件

服务器集群:部署于铁路局调度中心,包括应用服务器(承载业务逻辑与预警算法)、数据库服务器(存储时空数据与业务数据)、通信前置服务器(负责与北斗运营服务中心接口对接)等,为平台软件提供高性能、高可用的计算与存储环境。

监控工作站:为调度员提供人机交互界面,通常配备多块大屏幕,用于显示 BIM+GIS 可视化地图、预警信息、设备状态等。

2.4 软件组成

2.4.1 终端嵌入式软件

运行于各终端设备(车载、手持、传感、告警装置)中,基于轻量级实时操作系统(RTOS)开发。主要完成北斗定位数据的采集与初步解算、LoRa/北斗通信协议栈的封包与解包、低功耗策略控制(如休眠唤醒机制)、以及声光报警信号的驱动控制等功能。其核心特点是高实时性、高稳定性和低资源占用。

2.4.2 平台后端服务软件

平台后端采用微服务架构,包含以下核心服务模块:

数据接收与处理服务:负责接收通过北斗短报文回传的加密数据流,进行解密、解压缩、校验和数据清洗,生成标准化数据包供后续服务使用。

预警分析引擎服务:是系统的算法核心。内置铁路里程-坐标转换算法、列车接近趋势预测模型和动态安全距离计算模型,实时处理列车与人员位置信息,智能判定预警等级并生成预警指令。

地理信息服务:基于 GIS 平台(如 ArcGIS 或开源引擎)进行开发,提供电子地图服务、空间分析(如点线距离计算、电子围栏判断)、路径规划等能力。

设备管理服务:对所有在线终端进行全生命周期管理,包括设备注册、状态监控(在线/离线)、远程参数配置、故障诊断与日志记录。

数据存储与管理服务:使用关系型数据库存储业务数

据,用时序数据库存储海量的位置轨迹与传感器数据,并提供高效的历史数据查询与回溯功能。

2.4.3 平台前端应用软件

采用 Web 技术开发,为调度员提供可视化的监控门户。其核心是基于 BIM+GIS 的数字孪生可视化模块,将铁路线路模型、实时列车与人员位置、预警信息、视频监控画面等要素融合在一张图中进行全景展示,支持地图缩放、平移、轨迹回放、设备筛选等交互操作。同时,提供预警信息发布、应急指挥调度、报表统计等功能界面。

2.4.4 通信协议与接口

系统采用北斗 2.1 版本接收机协议进行扩展,数据包结构包含帧头、命令字、目的地址、加密后的应用数据体和校验码等字段,确保了数据传输的可靠性与安全性。

3 系统关键技术与实现

3.1 北斗定位与短报文通信关键技术

3.1.1 高精度定位技术

系统采用北斗三号系统提供的 PPP-B2b 服务(精密单点定位服务),通过 L 波段北斗 GEO 卫星播发精密轨道和钟差改正数,使用户终端在无需互联网支持的情况下,实现静态厘米级、动态分米级的高精度定位。在无公网开阔区域,其定位精度均值可达 0.12 米(标准差 0.10 米)。针对复杂环境(如峡谷、林区),采用多频相位模糊度固定(MCAR)理论算法,有效提升窄巷模糊度的固定率约 20%,缩短固定时间,确保在多数恶劣环境下定位精度仍能稳定在米级以内,满足铁路安全预警对定位精度的苛刻要求。

3.1.2 短报文通信技术

系统利用北斗系统独有的 RDSS(无线电测定业务)功能进行短报文通信。其通信流程为:用户终端将包含接收方 ID 和加密通信内容的询问信号经卫星中继至地面控制中心;地面中心解密后再加密,并入站广播电文经卫星转发给接收方。北斗三号短报文通信能力实现跨越式提升,区域通信能力每次可达 14000 比特(约 1000 汉字),全球通信能力达 560 比特(约 40 汉字),通信时延约为 0.5 秒,点对点通信时延为 1-5 秒。这种全天候、全域覆盖、抗干扰强、安全加密的通信能力,成为无公网条件下数据传输的“生命线”。

3.2 多模态融合通信技术研究

3.2.1 协同工作机制

数据上行(现场→中心):部署于现场各类传感器(位移、雨量等)和人员终端,通过 LoRa 无线自组网(最佳通信距离 20 公里)将数据汇聚至汇聚终端(网关)。网关对数据进行打包、压缩后,通过北斗短报文上传至调度中心。

指令下行(中心→现场):调度中心的预警指令通过北斗短报文下发至现场的汇聚终端,终端再通过 LoRa 网络将指令分发至指定的告警装置或手持终端,触发声光报警。

3.2.2 数据压缩技术

为克服短报文长度限制,提高传输效率,采用基于固

定位长和 RLE（游程编码）算法的混合压缩编码技术。该算法将预警区域坐标点集队列进行 4 等分，以子队列中点为中心做差值得到增量点集，再找到最大增量并求出步长，最终将每个增量转换为整数形式的步数，从而大幅压缩数据量，压缩率通常控制在 30%-40%，且压缩误差（ $0.001^{\circ} \sim 0.01^{\circ}$ ）在预警应用中可完全忽略。这使得预警区域和内容信息可被封装在一个短报文包体内高效传输。

3.3 列车接近预警算法与模型研究

远程预警算法是系统的决策核心，其关键在于将抽象的经纬度坐标转化为铁路业务专用的里程标信息，并进行精准的趋势预测。

3.3.1 铁路里程 - 坐标转换算法

由于铁路线路具有强烈的“一维”线性特征，而北斗提供的是二维地理坐标，必须建立两者间的精确映射关系。算法首先建立包含铁路线路所有关键点公里标及其对应经纬度的电子地图数据库；然后，通过北斗获取列车实时坐标；最后，采用最近邻点匹配结合线性插值的算法，将该坐标匹配到电子地图上最接近的线路点，从而换算出精确的公里标位置，为后续计算提供基础。

3.3.2 列车接近趋势预测与多级预警模型

安全距离动态计算模型：预警阈值并非固定值，而是根据列车实时速度、轨道坡度、天气条件等因素动态调整的动态值。例如，列车速度为 120km/h 时，安全距离阈值设为 2000 米；速度提升至 200km/h 时，阈值相应增大至 3000 米。

多级预警机制：系统根据计算出的实时安全距离，实施分级预警：

一级预警（提醒）：列车进入预设的早期预警区域，系统向现场发出温和提醒。

二级预警（警告）：列车接近关键安全距离，系统触发高声级警报和闪光。

三级预警（紧急）：列车即将进入极度危险区域，系统触发最高级别报警，并可直接联动广播系统发布疏散指令。

3.4 级联组网告警装置设计

现场告警装置是预警信息的最终执行单元，其设计的可靠性直接关系到施工人员的生命安全。

3.4.1 级联组网架构

装置采用星型或网状拓扑进行级联组网。多个告警装置通过 LoRa 自组网与一个汇聚终端（网关）通信，网关则负责通过北斗短报文与中心交互。这种设计支持大规模部署，单网关可覆盖大量前端装置，且具备故障自愈能力：当单一节点故障时，网络可自动重构路由，确保报警信息可通过其他路径传输，极大提升了系统的鲁棒性。

3.4.2 硬件功能与性能指标

装置集成了北斗 RDSS 通信模块、LoRa 模块、高亮 LED 灯、高音喇叭和语音合成模块。其关键性能指标包括：

定位精度：结合地基增强，可达亚米级。

通信距离：LoRa 节点间最大距离 20 公里。

电池寿命：采用低功耗设计，在待机和在工作模式下，续航可达 3 个月以上。

环境适应性：工作温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，防护等级 IP67，满足户外恶劣环境使用需求。

当装置接收到预警指令后，能同步触发爆闪灯、高分贝警笛和语音播报（如“上行列车接近，请立即下道！”），确保不同岗位、不同位置的施工人员都能清晰感知风险。

4 总结与展望

4.1 研究总结

本研究针对无公网覆盖区域铁路营业线施工安全防护的重大需求，系统性地研究并构建了一套基于北斗卫星定位及短报文通信的列车接近远程预警系统。主要研究成果与结论如下：

设计并实现了一套完整的预警系统解决方案：提出了“云 - 边 - 端”三层系统总体架构，成功将北斗三号高精度定位与短报文通信、LoRa 自组网、GIS/BIM 可视化、远程预警算法等多技术融合，攻克了无公网环境下“位置如何准、信息如何通、预警如何智”的核心难题，形成了覆盖信息感知、融合传输、决策与执行的闭环体系。

突破了多项关键技术：实现了基于北斗 PPP-B2b 服务的亚米级高精度定位；创新性地采用北斗短报文与 LoRa 的融合通信模式，构建了不受公网约束的可靠数据传输通道；研发了基于铁路里程 - 坐标转换算法和动态安全距离模型的远程预警算法；设计了支持级联组网的低功耗告警装置，提升了系统的可靠性与覆盖范围。

通过了充分的实践验证：通过在铁路局无公网试验段的实地部署与长达三个月的测试，验证了系统在隧道、山区、多车追踪及极端天气等复杂场景下的可靠性和实用性。

综上所述，本研究不仅理论上可行，更通过了工程实践的检验，为解决长期困扰铁路行业无公网地区施工安全防护的痛点，提供了技术自主、安全可靠、经济高效的完整解决方案，显著提升了铁路营业线施工的安全防护水平。

4.2 展望

尽管本研究取得了预期成果，但仍有持续优化和深入探索的空间。基于当前系统的局限性与技术发展趋势，未来工作可从以下几个方面展开：

增强复杂环境下的定位可靠性：针对隧道、峡谷等卫星信号连续遮挡区域，研究北斗与惯性导航（INS）、UWB（超宽带）、轨旁信标等技术的融合定位方案，实现全域、全时无缝覆盖，彻底消除定位盲区。

优化通信性能与成本：一方面，探索新一代北斗短报文协议的应用，以进一步降低通信时延、提升传输效率。另一方面，研究 5G-R（铁路 5G 专网）与北斗的互补融合机制，

在有公网覆盖区利用 5G-R 的大带宽、低时延特性传输高频数据，在无网区自动无缝切换至北斗，实现最优资源配置与成本控制。

提升系统智能化和主动预警能力：引入人工智能和机器学习算法，对历史运行数据、施工计划、环境数据进行深度挖掘与分析，实现从“列车接近后报警”到“施工风险提前预测”的转变，构建更主动、更前瞻的智能安全防护体系。

推动设备低成本化与标准化：目前高精度定位终端及伪卫星等设备成本仍较高。未来应致力于核心元器件的国产化替代和规模化生产，降低单点成本。同时，积极推动行业技术标准与设备规范的建立，促进系统的互联互通和大规模推广应用。

拓展应用场景：本系统架构与技术方案不仅适用于施工防护，亦可扩展应用于铁路沿线地质灾害监测、基础设施健康监测、应急抢险通信指挥等领域，具有广阔的应用前景和巨大的社会效益。

随着北斗系统的不断完善、“交通强国”战略的深入

推进以及物联网、人工智能技术的融合发展，基于北斗的铁路安全预警技术必将朝着更精准、更智能、更经济、更融合的方向演进，为构建现代化、智能化的中国铁路安全体系提供技术支撑。

参考文献

- [1] 袁永平.铁路营业线施工安全防护技术研究[J].运输经理世界,2023,(22):164-166.
- [2] 关达,白铭.铁路营业线施工智能安全防护管理系统研究[J].铁道标准设计,2020,64(12):25-30.DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.202009180001.
- [3] 祝启峰.列车接近报警系统在朔黄铁路的应用[J].神华科技,2011,9(05):79-82.
- [4] 张安安,郑萍,李晖,等.基于北斗卫星导航技术的列车定位和辅助行车安全系统设计[J].江西科学,2017,35(05):805-809. DOI:10.13990/j.issn1001-3679.2017.05.030.
- [5] 金耀,张贺,王泽林,等.北斗短报文发展与应用[J].邮电设计技术,2024,(03):53-57.