

基于北斗的高精度监测系统在内蒙古高速铁路中的应用实例

乔枫¹, 马玮良², 李冲^{3*}, 张学龙³

¹内蒙古铁路投资集团有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特

²内蒙古交通运输综合行政执法总队, 内蒙古 呼和浩特

³内蒙古大学交通学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2024年10月29日; 录用日期: 2025年1月1日; 发布日期: 2025年1月10日

摘要

随着我国高速铁路的迅速发展, 对高精度智能监测与检测技术的需求日益增长, 尤其是复杂环境下的铁路结构安全性保障成为亟需解决的重要课题。本研究旨在开发一套高速铁路北斗基准动态维持及监测服务云平台, 可适应内蒙古冻土、高寒、干旱、风沙、高海拔等复杂环境。该平台集成了动态维持、控制测量和精密监测技术, 可有效确保基准网稳定, 应对遮挡和干扰, 实现高精度的变形监测与检测。本次应用选取集大原高速铁路乌兰察布段布设测点, 完成了6座监测站及4座基准站的安装, 现已开始数据采集; 并采用北斗+惯性导航模式, 开展了轨道几何状态快速测量实验。经与全站仪结果对比, 该系统检测效率较传统方法提升了三倍以上, 结果可靠且达到国内领先水平。该技术体系在该线路上的显著成效, 为内蒙古地区复杂环境的铁路监测技术提供了新思路, 为全国范围内的高速铁路监测推广应用奠定了基础, 也标志着高精度智能监测技术在铁路行业的应用进入了新发展阶段。

关键词

智能检测, 北斗技术, 内蒙古高速铁路, 复杂环境监测

Application Example of High Precision Monitoring System Based on Beidou in Inner Mongolia High-Speed Railway

Feng Qiao¹, Weiliang Ma², Chong Li^{3*}, Xuelong Zhang³

¹Inner Mongolia Railway Investment Group Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia

²Department of Comprehensive Administrative Law Enforcement, Inner Mongolia Transportation Group, Hohhot Inner Mongolia

*通讯作者。

文章引用: 乔枫, 马玮良, 李冲, 张学龙. 基于北斗的高精度监测系统在内蒙古高速铁路中的应用实例[J]. 交通技术, 2025, 14(1): 1-8. DOI: 10.12677/ojtt.2025.141001

Abstract

With the rapid development of China's high-speed railways, the demand for high-precision intelligent monitoring and detection technology is growing. Ensuring the safety of railway structures in complex environments has become an important issue that needs to be resolved urgently. This study aims to develop a Beidou benchmark dynamic maintenance and monitoring service cloud platform for high-speed railways, which can adapt to the complex environments of Inner Mongolia, such as permafrost, cold, drought, sand, and high altitude. The platform integrates dynamic maintenance, control measurement, and precision monitoring technologies to effectively ensure the stability of the benchmark network, deal with occlusion and interference, and achieve high-precision deformation monitoring and detection. The application selected for this project is the Ulanqab section of the Jidaoyuan High-Speed Railway, where 6 monitoring stations and 4 benchmark stations have been installed, and data collection has begun. A Beidou + inertial navigation mode has been used to carry out rapid measurement experiments on the geometric state of the track. Compared with the results of the total station instrument, the detection efficiency of this system has increased by more than three times compared to traditional methods, and the results are reliable and at the leading level in China. The significant effectiveness of this technical system on this line has provided new ideas for railway monitoring technology in the complex environment of Inner Mongolia, laid the foundation for the promotion and application of high-speed railway monitoring across the country, and also marked that the application of high-precision intelligent monitoring technology in the railway industry has entered a new stage of development.

Keywords

Intelligent Detection, Beidou Technology, Inner Mongolia High-Speed Railway, Complex Environment Monitoring

Copyright © 2025 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

高速铁路作为现代交通系统的重要组成部分，显著提升了运输效率，促进了经济发展与区域连通。中国高速铁路网在过去十几年里快速发展，即将实现从“四纵四横”到“八纵八横”的跨越[1][2]。内蒙古作为全国铁路总里程排名第一的省份，其铁路网络建设尤为突出。截至2023年底，内蒙古铁路营业里程达到1.48万公里，其中高速铁路达到548公里。目前，内蒙古正加速推进高速铁路建设，预计到2025年，高速铁路里程将增至1000公里，实现所有盟市的全面覆盖。

随着铁路建设的逐渐完成，确保列车运行安全、提高乘坐舒适度及延长轨道结构服役寿命成为现阶段的主要挑战[3]。高速列车在长期运营中，受到高频冲击荷载及环境复杂性的影响，容易出现结构损伤或变形、沉降等病害，这不仅会降低运行效率，还可能引发安全隐患，造成严重事故[4]。特别是内蒙古地区存在的冻土、高寒、干旱、风沙侵蚀以及高海拔等严酷气候条件，对铁路的建设、维护与运营均提

出了更高的技术要求。因而，实时、准确、高效的监测技术对于提升铁路运营效率和安全性显得尤为重要。

目前，轨道精测网技术如 CPO、CPI、CPII 和 CPIII 已广泛应用于轨道监测[5]-[7]。CPO 建立框架控制网，CPI 提供高精度坐标基准，CPII 用于线路控制，CPIII 提供运营维护的基准。虽然这些技术各具优势，但也存在明显的局限性。如对设备和技术要求高增加实施成本，测量工作量大且耗时且易受环境的干扰，数据处理复杂需依赖高性能计算和专业软件。因此，亟需寻找一种不易受外部环境影响、成本低效益高且具备优异精度的监测技术。在此背景下，北斗卫星技术因其高精度、实时性、广泛覆盖等多重优势，逐渐被引入铁路监测领域。北斗系统的高铁变形监测技术已经在京沪高铁、沪昆高铁、商合杭高铁等多条线路上得到了成功应用。孙澳等[8]采用 GNSS 与加速度计融合监测方法通过直接在状态域进行故障检测，解决传统方法的局限性，提高了变形监测的准确性和效率，能有效区分正常变形与突变故障；李广宇、张云龙等[9]为克服传统监测技术的局限，利用北斗-InSAR 融合技术对 332 km 铁路的沉降进行监测，揭示了沉降不均匀性和季节性变化规律，提出高时空分辨率监测方案，有效提升铁路运维的监测精度。北斗技术通过实时捕捉轨道变形信息，可为高速铁路的安全运行提供强有力的数据支持[10]-[12]。此外，北斗技术的整合推动了成本效益的提升和技术革新，并助力铁路监测系统的智能化与自主化，为铁路行业的长期稳定运行与可持续发展奠定了坚实基础。

在内蒙古冻土、高寒、高海拔等复杂环境下，高速铁路的变形监测面临着严峻挑战。为了得到实时、准确、高效的监测数据。本项目以集大原铁路作为内蒙古示范区，沿线建设北斗基准站与监测站，应用“北斗 + 惯导”技术进行测量实验，通过相关设备得到监测数据，经过对数据处理和分析，评估其监测效率及精度。以实现铁路基础设施的实时变形和沉降监测。为复杂环境地区的铁路监测技术发展提供参考。

2. “北斗+”高精度智能监测系统技术集成

本研究由北斗基准站系统、北斗卫星监测站系统、数据处理中心和分析发布中心构成，主要用于集大原轨道交通基础设施的平面和高程高精度形变监测，如下图 1 所示。各北斗监测点与参考点接收机通过北斗天线实时接收北斗信号，并通过数据通讯网络实时发送到控制中心，控制中心服务器北斗高精度数据处理软件 BDProcessing V1.0 解算出各监测点三维坐标，数据分析软件获取各监测点三维坐标，并与初始坐标进行对比而获得该监测点变化量，同时分析软件根据事先设定的预警值而进行报警。拟采用云服务器部署方式，数据存储、北斗长基线解算、北斗工作基点稳定性分析应用、北斗高精度基线解算网平差等分别部署在相应服务器内。

(1) 北斗卫星基准站系统：北斗卫星基准站系统由基准站网子系统、数据通讯子系统、数据存储管理子系统、北斗基准站及工作基点稳定性分析子系统及北斗高精度基线解算网平差子系统组成。通过该北斗基准站控制网，开展北斗中长基线毫米级基准框架动态维持技术研究。选取北斗卫星基准站系统其中的一个基准站作为监测系统的起算基点。

(2) 北斗卫星监测站系统：每个变形监测子网由北斗高精度监测站、供电系统、通信系统和防雷系统组成。在线路沿线布设北斗高精度监测站，实现对全路段及重点设施的实时数据采集，对线路基础设施的变形、倾斜、沉降状况变化等进行实时监测。北斗高精度监测站、北斗基准站的原始观测数据以 GPRS 等通讯手段发送至监测系统数据处理中心，由数据处理中心对原始数据进行实时解算处理，评估预测监测对象的位移变形量，适时进行预警和灾情告警。

(3) 数据处理中心：数据处理中心是沿线基础设施及地质灾害监测系统的核心，主要实现变形监测子网传回的数据收集和变形数据处理相关功能，实现北斗卫星原始观测数据的接收与存储、数据解码、预

处理及高精度定位解算，实时提供监测对象的瞬变和徐变情况，对其位移变形量进行评估和预测，并将定位解算和变形分析的结果发送至分析发布中心。

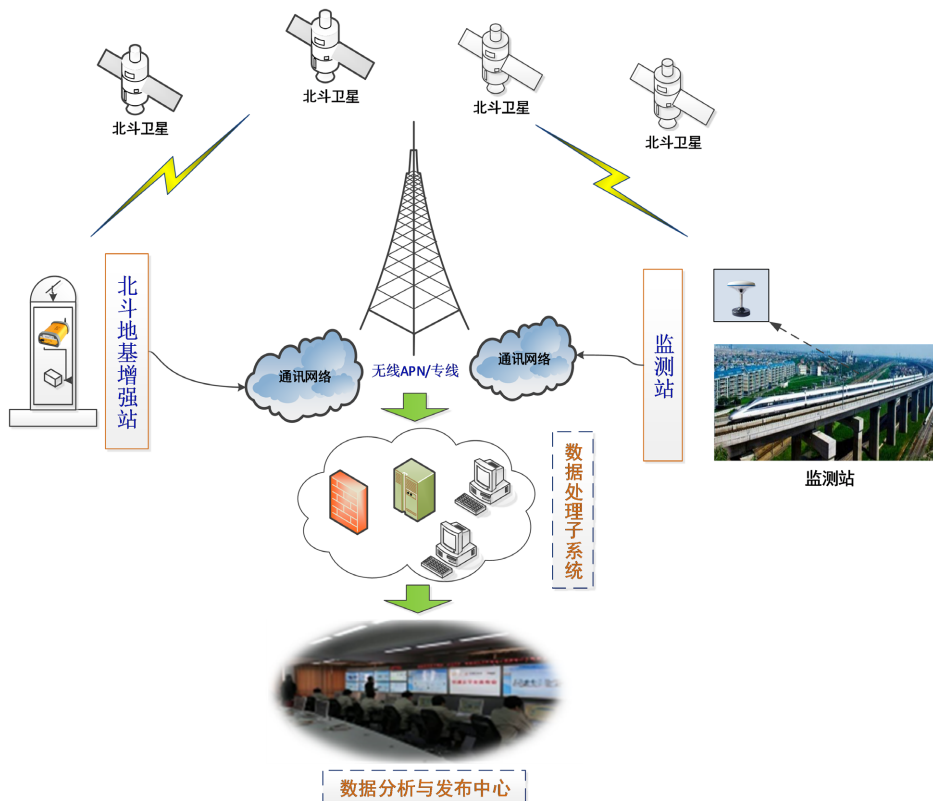


Figure 1. Diagram of the technology roadmap
图 1. 技术路线图

(4) 分析发布中心：对数据处理中心的检测结果进行统计分析，以 Web 平台可视化的形式展示，发布实时预警、报警功能，同时支持报表的自动生成等功能。检查沉降区与线路关系，未来沉降趋势预判，辅助变形原因分析，根据处理结果划定沉降漏斗范围、漏斗中心沉降等指标。

3. “北斗+”高精度智能监测系统的安装与搭建

3.1. 北斗基准站与监测站的布设

本研究在集大原沿线建设四座北斗基准站和六座北斗监测站，如图 2 所示。北斗基准站长期连续跟踪观测卫星信号，通过数据通讯网络实时传输北斗/GNSS 原始观测数据到控制中心。一号基准站位于里程 DK7 + 500 附近，二号基准站布设在 DK37 + 600 附近，三号基准站布设在 DK52 + 780 附近，四号基准站布设在 DK68 + 120 附近。北斗监测站长期连续跟踪观测卫星信号，通过数据通讯网络实时传输北斗/GNSS 原始观测数据到控制中心。一号监测站安装于 DK36+649 的隧道出口右侧路基旁，二、三号监测站安装于 DK36 + 649 的隧道出口上方边坡处，四号监测站安装于 DK37 + 587 的隧道入口右侧路基旁，五、六号监测站安装于 DK37 + 587 的隧道出口上方边坡处，6 处监测站距离二号基准点最远不超过 1200 m，现场安装位置为铁路防护栅栏与红线之间的空地。建成后将用于集大原铁路建设、运营期的智能化基准控制网构建及基准动态维持，路基、桥梁、边坡的实时变形监测。



Figure 2. Diagram of the reference stations and monitoring stations
图 2. 基准站与监测站示意图

3.2. 北斗基准站与监测站的安装

北斗基准站安装于空旷地面，占地面积为 2 m 长 × 2 m 宽，先挖取 0.5 m 长 × 0.5 m 宽 × 1.7 m 深的基坑，预埋钢筋笼，并浇筑混凝土，并在其上再次浇筑 2 m 长 × 2 m 宽 × 0.3 m 高的混凝土地面，待混凝土凝固后，将北斗支架与钢筋笼预埋件露出的安装螺丝进行连接安装。基准站采用太阳能供电，接收机和太阳能控制器等安装于采集箱内，每座基准站安装一台视频监控，北斗安装支架与视频监控支架高度为 3 m。采用 2.0 m 高的栅栏围护。地面基准站如图 3 所示。



Figure 3. Diagram of the ground-based reference stations
图 3. 地面基准站示意图

监测站核心部件包括监测站的天线、接收机和天线罩。北斗接收机、太阳能控制器、北斗天线集成

于天线保护罩内，天线通过馈线与天线保护罩内的接收机连接，传输北斗天线接收到的卫星信号，接收机通过电源线与太阳能控制器连接，太阳能控制器、太阳能板和蓄电池组成供电组合。

3.3. 北斗基准站与监测站的供电系统

采用太阳能供电系统满足监测设备的供电需求，它由太阳能电池阵列、太阳能充电控制器和蓄电池组三个关键组件构成，为设备提供 12 V 的稳定电源。太阳能电池阵列作为系统的核心，负责将太阳光能转换为电能，采用高效率的单晶硅太阳能电池板，其标准输出电压为 17.4 V。太阳能充电控制器负责监控系统运行状态，并对蓄电池进行过充和过放保护。蓄电池组用于在光照条件下存储电能，并在光照不足时释放能量以供系统使用，本系统设计的锂电池组容量为 100 Ah，确保设备在连续阴雨天气下至少 15 天的正常运行。将太阳能电池板安装在观测墩支架上，倾斜角度控制在 30 至 45 度，朝向正南方向偏西约 15 度，通过定制的三角形支架固定于支柱上。锂电池、太阳能控制器、天线以及北斗接收机等敏感组件被集成于天线保护罩内，以保护它们免受环境因素和人为因素的伤害。

4. “北斗+”高精度智能监测技术应用分析

4.1. 数据采集与传输

本研究采用中国铁路设计集团有限公司自研的北斗监测接收机 CRDCA01 在集大原监测点进行数据采集。该接收机融合了国内外 GNSS 行业的先进技术，采用最先进的 GNSS 主板，具有模块化设计。CRDCA01 能够接收全星全频信号，可实时监控作业过程，详细显示卫星状态、数据记录、电源及无线电的工作状况。

监测数据通过北斗 GNSS 接收机采集后，通过当地移动通信网络进行传输。通过 4G 传输模块传输到监测服务中心，并进行实时处理。数据处理结果通过数据库及发布服务器进行数据发布，用户通过网页就可以查看结构体实时状态。北斗接收机提前配置好数据传输的 IP 地址和端口，太阳能供电系统安装完毕后，将北斗接收机接入太阳能供电系统，即可自动将 GNSS 原始数据传输至公网服务器，在服务器中部署的解算软件对 GNSS 原始数据进行解算处理，并将解算结果发布至监测平台系统。

4.2. 数据处理与分析

为了提升北斗/GNSS 监测数据的处理效率和分析能力，数据处理与分析系统在内蒙古示范区的应用由数据中心系统和数据智能评估分析系统两部分构成。

数据处理中心系统即基线解算和网平差过程，采用自主研发专业北斗/GNSS 监测软件 BDMonitor V1.0 进行控制与数据处理。在内蒙古地区复杂环境下，该系统利用 BDS-3B1C 和 B2a 频率信号的精密观测模型，实现了 BDS-3 单历元模糊度有效固定算法和高精度实时定位算法，结合先进的大气误差改正模型、支持多基准站解算及实时独立基线网平差等功能，最高精度可达 1 mm。并且实现双基站或多基站处理功能。

数据智能评估分析系统采用 B/S 架构的网页 WEB 发布系统，实现对监测数据的高效分析及图形化展示，该系统在数据传输过程中，实时将解算结果传输至分析模块。通过将监测数据在各方向生成时间轴曲线，设置预警限值，系统能够及时启动报警功能并依据不同条件设定报警级别。同时，系统可生成日常报表，周期可设为一天、一周或一个月。用户可通过 Web 浏览器查询各监测点测值、监测基本情况、统计分析 & 报表预警信息。

内蒙古示范区的北斗/GNSS 数据发布系统包括数据入库、实时显示、查询和报警信息发送功能，为相关人员提供了一个高效的 B/S 架构平台，全面支持监测数据的管理与分析。如图 4 所示，通过整合这

些功能，数据处理与分析系统有效提升了内蒙古示范区内北斗/GNSS 监测的实用性与工作效率。



Figure 4. Diagram of the monitoring system

图 4. 监测系统图

5. “北斗+”高精度智能监测技术应用实例

选用集大原铁路的特定区段进行了基于北斗卫星导航和惯性导航技术的轨道几何状态快速测量实验，并将这一新模式与常规的“全站仪 + 惯导”测量模式进行了对比验证。惯导小车实验如图 5 所示，实验结果表明，新测量模式的检测速度超过传统模式的三倍，有效解决了传统测量模式中存在的周期长、效率低和自动化程度不足的问题，达到了国内领先水平，对确保高速铁路的运营安全具有重大意义。



Figure 5. Diagram of the inertial navigation cart experiment

图 5. 惯导小车实验照片

“北斗 + 惯导”模式下高铁智能化基准网技术在内蒙古自治区的成功应用，极大提升了测点处轨道检测的效率和精度，还为区内铁路提供了高精度控制测量和精密监测的技术保障。后续该技术可以广泛应用于各种复杂环境下高速铁路项目的全生命周期，包括勘察设计、工程监测、轨道铺设、精调以及日常运营和养护作业等阶段，可有效推动行业的技术进步和产业升级。

6. 结论

本文提出了一种高效且精准的“北斗 + 惯导”轨道测量技术，并在内蒙古自治区集大原高速铁路成功应用，验证了此技术的可行性和有效性并具备全路、全线推广应用条件。得出结论如下：

(1) “北斗 + 惯导”在内蒙古示范区监测的高速铁路轨道精度高达 1 mm，符合精度要求，满足高速铁路列车行驶的平稳性和舒适性。证明在复杂环境下，该技术能精确地监测轨道变形。

(2) 数据智能评估分析系统实现了对监测数据的实时分析，也可以调用数据库的历史数据实现历史统计分析，这极大地提高了数据评估分析的时效性。

(3) 经与传统的全站仪轨道测量技术对比，“北斗 + 惯导”轨道测量技术检测效率提升了三倍以上，达到工务维护养修要求，结果可靠且达到国内领先水平。

接下来，将进一步深化北斗技术在内蒙古铁路线路上的应用，以提升铁路监测效率。此外，该技术的潜在价值远不止于铁路行业，其卓越的兼容性为交通基础设施、地质勘探、工程监测、电力、农业等多个领域带来了创新应用的可能性。随着持续的努力和技术创新，将这一先进的监测技术应用领域进一步扩展，以推动各类基础设施在管理与维护方面达到更高的效率。

基金项目

内蒙古自治区科技计划项目(2023KJHZ0034)；内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2024MS05035)。

参考文献

- [1] 陈麓阳, 祝继常, 周进, 等. 高普平行通道列车开行结构调整优化模型研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(9): 33-40.
- [2] Wenjia, W. (2024) The Application of Bei Dou Navigation Satellite System in Slope Displacement Monitoring.
- [3] 郭宇. 高速铁路路基不均匀沉降及其演化对车辆-轨道耦合系统力学性能的影响[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [4] 刘伟. 基于车辆响应与机器学习的无砟轨道路基沉降识别方法[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [5] 赵洪洋. 城市轨道交通预制道岔板整体道床高精度施工关键技术研究[J]. 工程技术研究, 2022, 7(16): 77-79.
- [6] 张登科, 赵磊, 何远鹏, 等. 基于 CPIII 测量控制网的轨道精调技术及在城市轨道交通环保升级中的应用研究[J]. 测绘通报, 2021(S1): 226-232.
- [7] 孙海富. 中国高速铁路安全保障体系[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(6): 93-97.
- [8] 孙澳, 张秋昭, 张云龙, 等. 基于状态域的 GNSS/加速度计变形监测突变故障检测方法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(5): 79-86.
- [9] 李广宇, 张云龙. 北斗-InSAR 融合的铁路沉降监测[J]. 测绘通报, 2022(S2): 1-7.
- [10] 张云龙. 严寒地区铁路运营期路基 BDS 远程变形监测[J]. 铁道勘察, 2020, 46(6): 7-11.
- [11] 彭松, 刘建坤, 张云龙, 等. 基于北斗三号远程监测系统的公路岩质边坡开挖变形分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(33): 14898-14906.
- [12] 程春. 北斗卫星导航系统的精密轨道确定及其完好性监测技术研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.