



基于北斗定位技术的铁路基础设施监测系统设计与应用

马昆, 周子健, 朱攀峰

Railway infrastructure monitoring system based on Beidou positioning technology

MA Kun, ZHOU Zijian, and ZHU Panfeng

引用本文:

马昆, 周子健, 朱攀峰. 基于北斗定位技术的铁路基础设施监测系统设计与应用[J]. 铁路计算机应用, 2023, 32(1): 40–45.

MA Kun, ZHOU Zijian, ZHU Panfeng. Railway infrastructure monitoring system based on Beidou positioning technology[J]. [Railway Computer Application](#), 2023, 32(1): 40–45.

在线阅读 View online: <http://tljsjyy.xml-journal.net/2023/I1/40>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于文本挖掘的铁路基础设施设备风险隐患识别模型

Text mining based identification model for railway infrastructure risk

铁路计算机应用. 2018, 27(2): 1–4

基于北斗卫星导航的铁路货物追踪系统研究与设计

Railway freight tracking system based on Beidou navigation satellite system

铁路计算机应用. 2018, 27(7): 45–48

基于元数据的铁路设计成果数字化交付方案研究

Digital delivery scheme of railway design results based on Metadata

铁路计算机应用. 2020, 29(7): 36–39,44

基于BIM的铁路基础设施运维管理平台总体方案及关键技术研究

Overall scheme and key technology of railway infrastructure operation and maintenance management platform based on BIM

铁路计算机应用. 2019, 28(4): 45–48,52

便携式采集装置及铁路基础设施三维空间数据管理系统设计

Portable acquisition device and 3D spatial data management system for railway infrastructure

铁路计算机应用. 2021, 30(10): 24–29

基于北斗卫星与惯性传感器组合导航技术的现代有轨电车定位终端设计

Modern tram positioning terminal based on integrated navigation technology of Beidou satellite and inertial sensor

铁路计算机应用. 2019, 28(10): 60–62



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1005-8451 (2023) 01-0040-06

基于北斗定位技术的铁路基础设施监测系统 设计与应用

马 昆¹, 周子健², 朱攀峰²

(1. 中国铁路北京局集团有限公司 衡水车务段, 衡水 053000;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所, 北京 100081)

摘要: 近年来, 为保障铁路运输安全, 利用北斗高精度定位技术的铁路基础设施位移监测方法得到了广泛研究。文章介绍了北斗高精度监测的原理, 详细阐述了基于北斗定位技术的铁路基础设施监测系统的架构、功能和接口设计, 并通过现场监测数据对该系统的功能进行了验证, 验证结果表明, 该系统能够实现毫米级的监测精度, 可为铁路基础设施位移监测提供技术支撑。

关键词: 运输安全; 铁路基础设施; 北斗卫星导航系统; 位移监测; 巡检意见

中图分类号: U2 : TP39 **文献标识码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1005-8451.2023.01.07

Railway infrastructure monitoring system based on Beidou positioning technology

MA Kun¹, ZHOU Zijian², ZHU Panfeng²

(1. Hengshui Train Operation Depot, China Railway Beijing Group Co. Ltd., Hengshui 053000, China; 2. Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, in order to ensure the safety of railway transportation, the displacement monitoring method of railway infrastructure using Beidou high-precision positioning technology has been widely studied. This paper introduced the principle of Beidou high-precision monitoring, expounded in detail the architecture, function and interface design of the railway infrastructure monitoring system based on Beidou positioning technology, and verified the function of the system through on-site monitoring data. The results show that the system can achieve millimeter level monitoring accuracy, and can provide technical support for railway infrastructure displacement monitoring.

Keywords: transportation safety; railway infrastructure; BeiDou Satellite Navigation System(BDS); displacement monitoring; patrol inspection comments

我国幅员辽阔、自然条件复杂, 造就了铁路运输跨度广、线路长、运行环境复杂等固有特点, 使得路基、边坡、桥隧、铁塔等铁路基础设施在保障列车安全运营的同时, 也成为影响行车安全的潜在因素。近年来, 受到连续强降雨等极端天气和塌方、泥石流等自然灾害的影响, 我国多条铁路干线基础设施受到不同程度的破坏, 造成行车中断、车厢脱轨等险情^[1,2]。因此, 针对铁路基础设施进行精准位移监测和预警具有重要意义。

收稿日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(62027809); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(P2018G051); 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所研发项目(DZYF21-22)

作者简介: 马 昆, 工程师; 周子健, 研究实习员。

北斗卫星导航系统(BDS, BeiDou Navigation Satellite System)能够为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务^[3]。近年来, 北斗定位技术被逐步应用于铁路建设及运营中。王剑等人^[4]将北斗定位技术应用于高速铁路列车实时定位中, 在卫星信号连续状态下能够满足列车定位要求; 秦健^[5]提出一种基于北斗定位技术的铁路作业人员和车辆安全预警防护系统构建方案。在铁路监测领域, 北斗定位技术也得到了越来越多的应用, 刘洋^[6]将北斗定位技术应用于桥梁形变监测, 并将经验模态分解法用于解决北斗监测噪声, 进一步提高了北斗观测的精度; 路志远等人^[7]研究了铁路数据预测模型, 对比了长短期记忆模型与传统时间序列模型, 验证

了长短序列模型具有更好的性能。现存的文献主要针对铁路基础设施监测方法的准确度进行研究, 对基础设施监测系统设计和实际运行的研究较少, 本文详细描述了基于北斗定位技术的铁路基础设施检测系统(简称: 本文系统)的设计方案, 并利用铁路现场数据, 分析本文系统运行情况和监测精度。

1 北斗高精度监测原理

1.1 空间定位原理

空间定位起源于二维平面定位, 如图1(a)所示, 对于船只的位置坐标(x, y), 需要A和B两个已知点同时对船只进行测距, 可得到船只的准确位置。将这一原理推广到空间, 需要至少3个已知点同时测距才能够获得空间中未知点的位置(x, y, z), 如图1(b)所示。

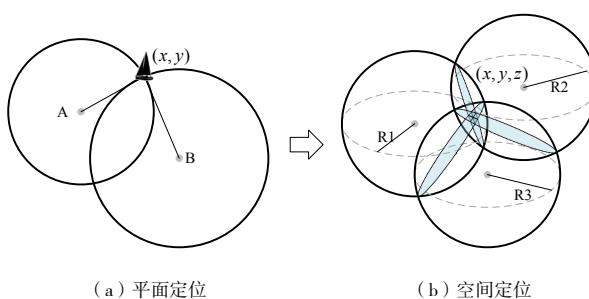


图1 平面定位与空间定位

1.2 北斗定位技术

由空间定位原理可知, 在满足可见卫星数量的情况下, 为确定监测对象的空间位置, 需要具备2个条件: (1) 明确卫星的空间坐标; (2) 获得卫星的测距信息。

1.2.1 卫星位置确定

卫星空间坐标获取方式主要包括基于广播星历轨道参数实时计算和利用精密星历直接获取。(1) 广播星历由卫星直接播发, 通常用于实时定位, 计算方法可见文献[8]; (2) 精密星历通常由测绘中心经过处理后发布, 虽精度较高, 但经过处理会有部分延迟, 因此, 常用于实时性需求不高的高精度定位^[9]。

1.2.2 北斗卫星量测

BDS能够面向全球用户, 播发包括伪距

(Pseudo Range)、载波相位(Carrier phase)等测距信息, 这些测距信息都属于卫星量测信息。

(1) 伪距直接反应卫星信号从被播发到被接收过程的全部距离, 由于信号传播路径并非真空, 因此伪距中包含固定的测量误差, 通常情况下, 卫星伪距模型为

$$\rho = r + C \cdot (\delta t_u - \delta t^s) + I_{iono} + T_{trop} + \varepsilon_\rho \quad (1)$$

其中, ρ 是卫星伪距量测信息; r 是卫星到接收机的几何距离; C 是真空中光速; δt_u 是卫星信号接收时刻; δt^s 是卫星信号发射时刻; I_{iono} 是电离层延时距离; T_{trop} 是对流层延时距离; ε_ρ 是伪距测量噪声。

(2) 载波相位以波长为单位, 一个波长约为19 cm, 因此, 载波相位常用于高精度定位。与伪距不同的是, 载波相位存在固有的整周模糊度, 载波相位模型为

$$\phi = \lambda^{-1} \cdot (r + C \cdot (\delta t_u - \delta t^s)) - I_{iono} + T_{trop} + N + \varepsilon_\phi \quad (2)$$

其中, ϕ 表示载波相位量测信息; λ 是载波相位波长; N 是未知的整周模糊度; ε_ϕ 是载波相位量测噪声。

(3) 由式(1)和式(2)可知, 卫星到接收机的几何距离 r 包含在卫星测距中, 因此, 可根据式(3), 结合最小二乘法或卡尔曼滤波算法解算接收机三维坐标。

$$r = \sqrt{(X^s - x^r)^2 + (Y^s - y^r)^2 + (Z^s - z^r)^2} \quad (3)$$

其中, X^s 、 Y^s 、 Z^s 表示卫星的空间三维坐标, x^r 、 y^r 、 z^r 表示接收机的三维坐标, 即待求解的3个未知参数。

1.3 北斗高精度监测

在高精度监测领域, 载波相位是主要的卫星量测信息, 影响其直接解算的因素包括整周模糊度和固有的测距误差, 因此高精度监测方法需要对这些因素进行削弱, 以提高卫星测量精度。

1.3.1 整周模糊度固定方法

由式(2)可知, 不同卫星的载波相位量测信息对应不同的整周模糊度 N , 会造成方程未知数增加、解算模型复杂化, 为此, 采用整周模糊度固定方法。常用的整周模糊度固定方法包括置信区间法、快速模糊度解算法及LAMBDA法等^[10-11]。

1.3.2 双差载波相位模型

为了获得毫米级的监测结果，通常需要借助静态基线解算技术消除载波相位中的各类误差，静态基线解算基本流程如图2所示。

假设在某时刻，有卫星*i*和卫星*j*同时被北斗基准站*A*和北斗监测站*B*捕获跟踪，对于卫星*i*，载波相位模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_A^i = \lambda^{-1} \cdot (r_A^i + C \cdot (\delta A t_u - \delta^i t^s)) - I_{A,iono}^i + T_{A,trop}^i + N_A^i + \varepsilon_{A,\phi}^i \\ \phi_B^i = \lambda^{-1} \cdot (r_B^i + C \cdot (\delta B t_u - \delta^i t^s)) - I_{B,iono}^i + T_{B,trop}^i + N_B^i + \varepsilon_{B,\phi}^i \end{array} \right. \quad (4)$$

其中，下标*A*、*B*分别表示基准站接收机*A*和监测站接收机*B*相关变量，上标*i*表示与卫星*i*相关的变量。

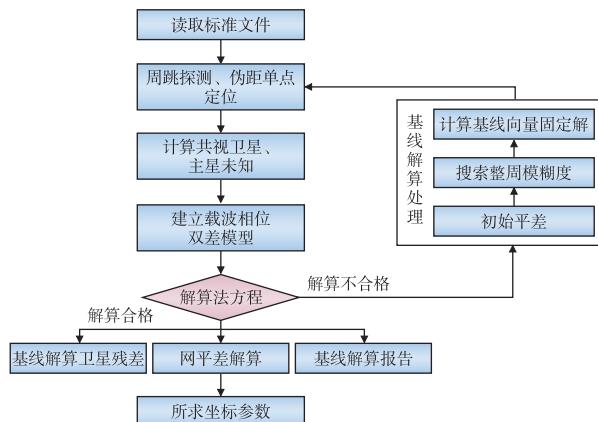


图2 基于双差载波相位的基线解算流程

对于卫星*i*，单差载波相位模型能够有效消除卫星钟差、削弱电离层和对流层延迟。单差载波相位模型为

$$\Delta\phi_{AB}^i = \lambda^{-1} \cdot (\Delta r_{AB}^i + C \cdot \Delta \delta_{AB} t_u) + \Delta N_{AB}^i + \Delta \varepsilon_{AB,\phi}^i \quad (5)$$

双差则是在单差模型的基础上，利用卫星*i*和卫星*j*的单差观测再次做星间差分，进一步消除了接收机钟差，则双差载波相位模型为

$$\nabla \Delta \phi_{AB}^{ij} = \lambda^{-1} \cdot \nabla \Delta r_{AB}^{ij} + \nabla \Delta N_{AB}^{ij} + \nabla \Delta \varepsilon_{AB,\phi}^{ij} \quad (6)$$

其中， $\nabla \Delta \phi_{AB}^{ij} = \Delta \phi_{AB}^i - \Delta \phi_{AB}^j$ 是双差观测； $\nabla \Delta r_{AB}^{ij} = \Delta r_{AB}^i - \Delta r_{AB}^j$ ； $\nabla \Delta N_{AB}^{ij} = \Delta N_{AB}^i - \Delta N_{AB}^j$ ， $\nabla \Delta \varepsilon_{AB,\phi}^{ij} = \Delta \varepsilon_{AB,\phi}^i - \Delta \varepsilon_{AB,\phi}^j$ 。

式(6)中，仅包含双差几何距离、双差整周模糊度和残余的双差观测噪声，在获得足够数量的量测信息后，采用最小二乘法或卡尔曼滤波算法构建解算方程，即可求解监测对象的位置。

2 系统设计

2.1 系统架构

本文系统采用分布式架构。系统总体架构可分为监测层、传输层、汇聚层、处理层和应用层。监测层利用相关传感器实时捕捉铁路基础设施的原始观测数据，结合传输层上传至汇聚层，汇聚层汇集了各类监测设备的时空数据，提供存储和转发服务，处理层接收来自汇聚层的时空数据，经过预处理、解码、解算等环节，生成直观的应用数据，提供给应用层的各类系统应用，系统架构如图3所示。



图3 基于北斗的铁路基础设施监测系统架构

(1) 监测层包括现场的监测设备及软件，实现原始数据采集和处理等功能。现场监测设备主要包括北斗基准站、北斗监测站和辅助监测设备，其中，北斗基准站能够全天候、全天时连续实时采集多频多星座信号，是整个监测系统的位置基准；北斗监测站主要安装于路基、边坡、桥梁、铁塔等铁路基础设施重点位置，通过实时接收卫星信号，获得被监测对象长期、连续的原始监测数据；辅助监测设备监测现场对象，获得更为可靠的监测结果。

(2) 传输层为基于北斗的基础设施监测系统提供数据传输通道。通常包括4G无线通信网络(移动公网)、铁路专用无线网络和铁路数据通信网络。

(3) 汇聚层汇集了各类监测设备的时空数据，包含数据接口服务器、数据转发服务器和数据存储服务器，为数据应用、分析和共享创造条件。

(4) 处理层用于处理各类时空数据，包括数据解码、质量检查、数据计算和预警分析模块等，结合数据处理、数据集成和数据封装等技术，为数据应用提供支撑。

(5) 应用层综合汇聚各类封装后的数据服务，

为维护人员、管理人员提供北斗监测应用服务。

2.2 接口设计

为实现对铁路基础设施全天候监测、解析、展示等功能,本文系统与多个外部系统建立数据接口,交互数据。

(1) 全球卫星导航系统:布设于现场的北斗监测站能够全天时、全天候接收来自多个卫星导航系统的测距信息、导航电文、气象数据,并将这些数据按照标准格式进行存储与转发。

(2) 铁路北斗应用服务平台:北斗监测站将监测数据传输到铁路北斗应用服务平台,由平台中的高精度解算模块实现原始数据的校验、处理和解算,接口采用 TCP/IP 协议,支持 2G/3G/4G 移动公网接口或铁路移动通信网网络接口。

(3) 铁路地理信息平台:铁路地理信息平台向本文系统提供高精度地理地图服务,实现可视化展示功能,接口采用安全令牌传输协议(STTP, Secure Token Transfer Protocol)。

2.3 系统功能

本文系统可对各项监测数据进行分析统计管理,为铁路的安全运营和信息化建设提供基础数据监测及灾害预警服务,其主要功能包括以下几方面。

2.3.1 首页展示

首页综合展示了本文系统各项核心功能、统计信息及监测数据,利用电子地图可实现对各工点监测设备的矢量展示和影像展示。在本文系统中可查看某工点的详细信息,包括站段、天气、设备分布等信息,点击站点位置图,可查看该工点所有设备的平面分布等。

2.3.2 设备管理

根据工程类型查看到用户权限下能获取的所有工点的设备数据,并可进行增加、编辑、修改和设置基准值等操作。

2.3.3 预警管理

本文系统通过前端监测设备采集监测站和基准站的时空数据,在经过数据处理层的解码、计算等操作后得到监测点位的沉降位移(路基沉降)、形变位移、速率、加速度等多个形变因子。基于预警

模型对形变量、位移量进行回归拟合,对现阶段沉降和形变发育阶段做出判定,同时,对未来一段时间内的形变做出预测预警,并利用位移图进行展示。当被监测的基础设施处于危险阶段时,则会进一步触发自动预警机制,将预警信息和巡检建议发送给相关人员。

2.3.4 统计分析

统计分析模块能够将选定设备的监测数据进行可视化展示,同时该模块可记录各监测站的历史形变因子、预警级别,辅助判别监测点位的危险等级。

2.3.5 数据中心

数据中心包含了所有监测设备位移解算结果,能够展示全部解算数据和详细的预警数据,并对这些数据进行存储,同时该模块可提供位移结果验算和监测数据共享服务。

2.3.6 系统管理

管理组织机构、用户权限、菜单及日志。

3 系统应用与分析

本文系统已在京张(北京—张家口)高速铁路、京沪(北京—上海)高速铁路、浩吉(浩勒报吉—吉安)铁路成功应用。为验证本文系统的功能,提取某铁路沿线边坡、隧道、大桥和铁塔的长期监测数据,通过本文系统对其进行统计分析,分析结果表明,本文系统能够对监测对象的形变趋势进行预警,满足设计要求。

3.1 监测效果

3.1.1 铁路边坡位移监测

提取某铁路沿线高路堤边坡工点布设的 10 套监测设备和 1 套基准站设备的采集数据,利用本文系统的统计分析功能,可查看该边坡工点近一年来各监测点的位移量变化,如图 4 所示。

由图 4 可知,2021 年 8 月起,该边坡部分区域呈缓慢沉降趋势,到 2022 年 4 月,部分区域最大监测沉降达到了 12 mm。

3.1.2 隧道进口仰坡位移监测

提取某铁路沿线隧道仰坡工点布设的 10 套监测设备和 1 套基准站设备的采集数据,利用本文系统

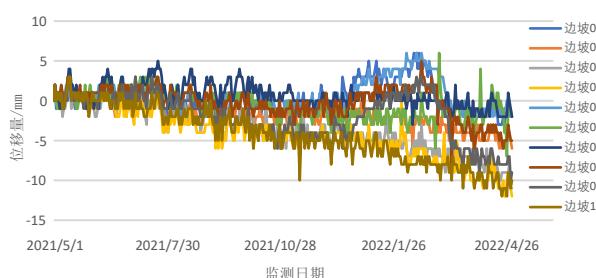


图4 铁路高路堤边坡各监测点位移量变化

中的统计分析功能，可查看该隧道进口仰坡工点近一年来各监测点的位移量变化情况及趋势，如图5所示。

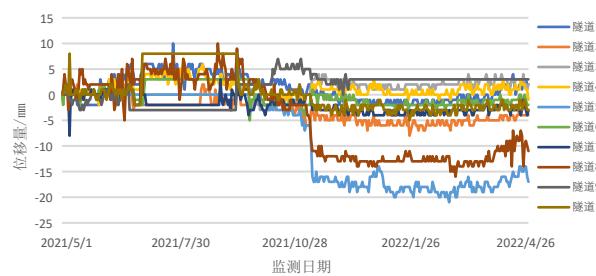


图5 铁路隧道仰坡各监测点位移量变化

由图5可知，该隧道仰坡平均沉降约3.4 mm，整体沉降不明显，但10处监测点中，5号和8号监测点分别发生了12 mm及17 mm的沉降，当沉降达到系统设置的阈值时将触发预警功能，系统会自动生成警告信息发送给工务专业人员，同时，还将提供巡检建议。

3.1.3 铁路桥梁形变监测

提取系统中某铁路大桥工点布设的5套监测设备和1套基准站设备的采集数据，利用本文系统中的统计分析功能，可查看到该桥梁工点近一年来各监测点的位移量变化，如图6所示。

由图6可知，该桥梁整体未监测到明显沉降趋势，平均形变约1.2 mm。

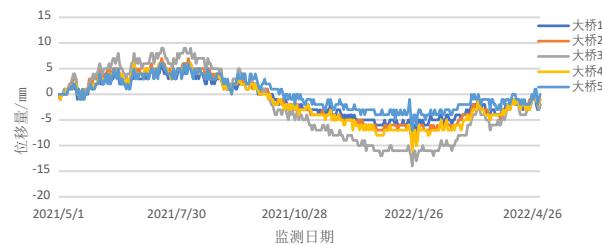


图6 铁路桥梁各监测点位移量变化

3.1.4 基站通信铁塔倾斜监测

铁塔倾斜监测可应用于铁路沿线基站内的铁塔。分别在塔顶和塔身布设2套监测设备和1套基准站设备，以一年的监测时间为跨度，利用本文系统中的统计分析功能，可直观展示该铁塔塔顶和塔身监测点的位移变化，如图7所示。

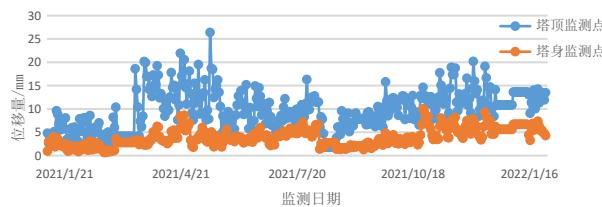


图7 基站通信铁塔各监测点位移量变化

由图7可看出塔顶波动幅度明显高于塔身，塔顶最大位移超过25 mm，若塔顶或塔身位移超过设定阈值或呈现倾斜趋势，将触发系统预警功能，系统将向电务专业人员发送警告信息。

3.2 趋势分析

根据上述4处典型铁路基础设施的监测效果，能够在“预警管理”中查看到本文系统对监测对象的趋势分析结果和巡检建议，如表1所示。

与目前铁路上常用的人工巡检监测、摄像机监测不同，本文系统不受时间、气候、环境的限制，能够全天候监测铁路边坡、路基、桥梁、铁塔等对象，监测精度能够达到毫米级，并及时给出预警和巡检意见，监测效果优于传统的监测方法，有效减

表1 监测对象形变/位移趋势及巡检建议

监测对象	形变/沉降趋势	巡检建议
高路堤边坡	存在明显沉降位移趋势，监测到最大沉降约10 mm，平均沉降约8 mm	按相关规定，对该工点进行检查，加固。
隧道仰坡	未监测到明显沉降趋势	按相关规定，定期巡检该工点，建议关注5号、8号监测点环境
桥梁	未监测到明显形变趋势	按相关规定，定期巡检该工点
基站通信铁塔	未监测到明显倾斜趋势	按相关规定，定期巡检该工点

少了人力、物力投入，提高了监测工作效率。

4 结束语

随着我国铁路基础设施的快速建设，铁路自动化监测与预警相关系统应用是辅助开展铁路安全保障工作的新举措。本文旨在将北斗定位技术及高精度监测方法应用于铁路基础设施监测应用中，从而提高基础设施监测系统的监测精度和服务能力。本文详细介绍了基于北斗定位技术的铁路基础设施监测系统的监测原理和系统设计，并用实际数据验证了系统毫米级的监测能力。利用本文系统，能够为铁路工务、电务专业的日常检修提供技术支持。

参考文献

- [1] 王文文, 李 勇, 韩 征, 等. 从T179次列车脱轨事故浅谈构建重大线性工程地质安全监测预警体系 [J]. *城市地质*, 2020, 15 (2): 137-140.
- [2] 段良伟. 京广高铁某路基变形成因与治理研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [3] 刘艳亮, 张海平, 徐彦田, 等. 全球卫星导航系统的现状与进展 [J]. *导航定位学报*, 2019, 7 (1): 18-21, 27.
- [4] 王 剑, 周子健, 姜 维, 等. GPS/BDS联合解算的列车高精度实时定位方法 [J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21 (5): 286-296.
- [5] 秦 健. 基于北斗的铁路施工作业人员和车辆安全预警防护系统方案研究 [J]. *铁路计算机应用*, 2017, 26 (9): 11-14.
- [6] 刘 洋. EMD在北斗桥梁变形监测数据中的应用研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, 45 (1): 189-191, 197.
- [7] 路志远, 潘佩芬, 白雪娇, 等. 铁路基础设施位移数据预测模型研究 [J]. *铁路计算机应用*, 2022, 31 (3): 12-18.
- [8] Peng X Q, Gao J X, Wang J. Research of the coordinate conversion between WGS84 and CGCS2000 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(2): 219-221.
- [9] Opronolla R, Russo F, Fasano G, et al. Safe trajectory design and pose estimation for target monitoring in GEO [J]. *Journal of Space Safety Engineering*, 2019, 6(3): 188-196.
- [10] 陈树新. GPS整周模糊度动态确定的算法及性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
- [11] 祝会忠, 李 军, 徐爱功, 等. 灾害应急环境下智能终端高精度北斗增强定位方法 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45 (8): 1155-1167.

责任编辑 李依诺