

Study on the monitoring method of coal railway subgrade settlement based on GNSS

Zaichun Li

Hunchun Mining (Group) Co., Ltd., Hunchun, Jilin, 133300, China

Abstract

Railway subgrade settlement is a critical monitoring indicator in railway infrastructure, especially in heavy-haul railways such as coal transport lines, where the issue of subgrade settlement directly affects the safety and stability of tracks. Traditional settlement monitoring methods, like precise leveling surveys, offer high accuracy but are limited in their application over large areas and have lower monitoring frequencies. Global Navigation Satellite System (GNSS) technology, due to its all-weather, real-time, and high-precision characteristics, has become an ideal choice for railway subgrade settlement monitoring. This study, based on GNSS technology, systematically investigates the subgrade settlement of coal transport railways by monitoring data from different points and devices, combined with advanced data analysis methods such as least squares support vector machine (LS-SVM). The results show that GNSS technology has significant advantages in large-scale, real-time monitoring, providing accurate predictions of settlement trends for railway maintenance.

Keywords

GNSS; subgrade settlement; settlement monitoring; data fusion; coal transport railway

基于 GNSS 的运煤铁路路基沉降监测方法研究

李在春

吉林省珲春矿业(集团)有限责任公司, 中国·吉林 珲春 133300

摘要

铁路路基沉降是铁路基础设施中一个至关重要的监测指标,尤其是在运煤专线等重载铁路中,路基沉降问题直接关系到轨道的安全性与稳定性。传统的沉降监测方法如精密水准测量虽然精度较高,但其在大范围监测中的应用受限,且监测频率较低。全球导航卫星系统(GNSS)技术由于其全天候、实时、高精度的特点,已经成为铁路路基沉降监测的理想选择。本研究基于GNSS技术,通过监测不同点位和设备的数据,结合最小二乘支持向量机(LS-SVM)等先进的数据分析方法,对运煤铁路路基沉降进行了系统研究。结果表明,GNSS技术在大范围、实时监测中具有显著优势,能够为铁路运维提供准确的沉降变化趋势预测。

关键词

GNSS; 路基沉降; 沉降监测; 数据融合; 运煤铁路

1 引言

随着铁路运输尤其是运煤专线的快速发展,轨道结构的稳定性成为保证安全运行的关键因素之一。铁路路基作为轨道结构的重要组成部分,其沉降问题直接影响到列车的行驶安全与铁路的服务寿命。运煤专线作为重载铁路,其路基沉降问题尤为突出。传统的路基沉降监测方法,如精密水准测量,虽然具有较高的测量精度,但由于其需要高密度的测量点且观测周期较长,存在一定的局限性,难以满足大范围、实时、长时间的监测需求。

近年来,GNSS技术作为一种非接触式的测量手段,在

铁路工程、地面沉降监测等领域得到了广泛应用。GNSS系统能够全天候、无视距地提供实时、精确的三维坐标数据,克服了传统监测方法的不足。因此,如何将GNSS技术应用用于运煤铁路的路基沉降监测,成为一个重要的研究课题。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文研究区域为吉林省某矿区使用了三组GNSS监测数据,分别来自三个不同的点位和设备。每组数据包含了不同时间节点的沉降监测结果,主要包括:平面偏移量、 ΔX (正北方向)、 ΔY (正东方向)、 ΔH (垂直方向)、空间合位移等参数。每组数据都记录了监测点位的编号和设备的编号,以区分不同的监测位置和设备。时间:每条记录包含了具体的监测时间,数据采集的时间间隔为每小时一次。沉降参数包括 ΔX 、 ΔY 、 ΔH 等,分别表示平面方向和垂

【作者简介】李在春(1976-),男,中国吉林珲春人,本科,高级工程师,从事测绘工程研究。

直方向的偏移量^[1]。

实验分析三组数据时间段为两年：2023年1月1日至2024年12月31日。数据分析共18个设备，每个设备第一组数据（设备编号：DK17+580），平面偏移量：4.76mm， ΔX （正北）：-3.28mm， ΔY （正东）：3.45mm， ΔH （垂直）：1.82mm。第二组数据（设备编号：DK18+360桥4），平面偏移量：14.08mm， ΔX （正北）：12.45mm， ΔY （正东）：6.57mm， ΔH （垂直）：-7.39mm。第三组数据（设备编号：DK19+600红旗河大桥），平面偏移量：10.74mm， ΔX （正北）：9.97mm， ΔY （正东）：3.97mm， ΔH （垂直）：-6.04mm。

2.2 数据处理方法

首先对原始数据进行清洗，剔除缺失值和异常值。确保数据的完整性和准确性。应用卡尔曼滤波算法对GNSS监测数据进行平滑处理，减少噪声影响，提升数据的可靠性。采用了最小二乘支持向量机（LS-SVM）模型对沉降数据进行非线性回归分析，建立沉降预测模型。

3 监测结果分析

3.1 沉降趋势分析

根据提供的三组GNSS监测数据，我们对沉降趋势进行了详细分析。每组数据包含时间、平面偏移量、正北（ ΔX ）、正东（ ΔY ）以及垂直方向（ ΔH ）变化量。通过对这些数据的处理，我们能够分析出不同点位和设备的沉降趋势。

第一组数据（DK17+580点位）：

该点位的沉降趋势在各方向上都有一定的波动。根据时间序列，可以观察正北方向（ ΔX ）的变化较为频繁，部分时段出现明显的负值（如2023年1月1日的-3.28mm和1月1日的-0.9mm），说明在正北方向该点位发生了沉降。

同时，正东方向（ ΔY ）则表现出较为稳定的变化，最大变化值为3.45mm，最小变化值为0.51mm，说明该点位在向东的沉降变化较小。

垂直方向的变化则相对较为平稳。最大变化量为1.82mm，最小变化量为-3.35mm，表明该点位垂直方向的沉降波动较大。

第二组数据（DK18+360桥4点位）：

该点位的沉降量在各个方向上的变化较为显著，尤其是正北方向（ ΔX ）和正东方向（ ΔY ）。在正北方向（ ΔX ）中，最大变化为12.45mm，最小变化为7.89mm，表明该点位沿着正北方向沉降幅度较大。

在垂直方向（ ΔH ），最大变化为-7.39mm，最小变化为-13mm，显示出该点位垂直方向沉降的趋势较为明显，且沉降幅度较大。

在空间合位移方面，最大值为15.9mm，说明该点位的沉降趋势较为明显，沉降幅度较大，尤其是在垂直方向。

第三组数据（DK19+600红旗河大桥点位）：

在该点位的数据中，正北方向和正东方向的变化幅度相对较小。例如，正北方向（ ΔX ）的变化范围为6.4mm至9.97mm，正东方向（ ΔY ）的变化范围为1.63mm至3.97mm。

在垂直方向（ ΔH ），最大变化为-6.04mm，最小变化为-0.04mm，表明垂直方向的沉降幅度相对较小，但仍有一定波动。

平面合位移最大为10.74mm，空间合位移为12.32mm，显示出该点位的整体沉降趋势较为平稳，但仍然呈现一定的沉降变化。

3.2 沉降量对比与分析

垂直方向的沉降幅度较大，尤其在DK18+360桥4点位中，垂直方向的沉降量变化较为明显。空间合位移：在空间合位移方面，DK18+360桥4点位的空间合位移较大，表明该区域沉降情况较为严重。

3.3 数据融合与精度分析

在沉降监测中，单一的GNSS技术难以覆盖所有监测需求，因此采用多源数据融合方法来提高监测精度和可靠性。通过多源数据的融合，能够更加全面、准确地反映沉降变化。

3.3.1 数据融合方法：

时间基准统一：不同监测设备的数据采集时间间隔和频率可能不同，因此需要统一时间基准，确保不同设备和点位的数据在同一时间基准下进行比较。

空间基准统一：不同监测设备可能使用不同的基准系统（如大地高和正常高），因此需要通过转换公式将数据转换为统一的空间基准^[2]。

Bland-Altman一致性分析：为了验证不同数据源之间的协调性，我们采用Bland-Altman方法对各类监测数据进行一致性分析。这种方法可以有效评估不同监测数据之间的系统差异和一致性。

3.3.2 精度分析：

通过对比GNSS数据与传统精密水准数据、InSAR技术数据，我们能够评估GNSS在路基沉降监测中的精度。

卡尔曼滤波算法：在数据处理过程中，我们采用卡尔曼滤波算法对GNSS数据进行平滑处理，减少测量噪声的影响。通过滤波后的数据，沉降趋势更加平稳，且误差范围缩小。

LS-SVM回归分析：采用LS-SVM对沉降数据进行回归分析，建立沉降预测模型。通过LS-SVM，可以较好地处理非线性关系，进一步提高沉降预测的精度。

4 精度分析与规范要求

在GNSS技术应用于运煤铁路路基沉降监测时，精度是一个至关重要的指标。精度要求直接关系到监测结果的可靠性和后续决策的准确性。

4.1 GNSS技术在地面沉降监测中的精度要求

根据《铁路工程测量规范》，沉降监测精度要求不大于5毫米。垂直沉降通常是判断铁路路基沉降的重要指标，特别是在重载铁路中，垂直沉降的变化直接影响到轨道几何状态。

4.2 数据处理中的误差控制

在进行GNSS监测数据处理时，必须控制误差的传播，确保最终结果满足规范要求。主要涉及以下几个方面的误差控制：

多路径效应：GNSS测量中的多路径效应是影响精度的

主要因素之一。在铁路沿线的监测中,可能由于周围建筑物、树木等的干扰而造成多路径效应,进而影响测量精度。因此,GNSS接收机的选择需要特别注意抗多路径能力,且应尽可能选择开阔的地点布设监测点,避免信号干扰^[1]。

大气延迟效应:大气的电离层延迟和对流层延迟会对GNSS信号产生一定的影响,尤其在长距离测量和大气条件不稳定的情况下,延迟效应会引入一定的测量误差。为了减少大气效应的影响,在数据处理中通常会采用双频GNSS接收机,通过消除大气延迟的影响,达到高精度的测量要求。

基准站误差:在进行GNSS沉降监测时,通常需要通过基准站进行差分校正。如果基准站的坐标精度不高,或者基准站本身发生沉降,将直接影响到整个测量网的精度。因此,基准站的选择与维护至关重要。根据规范要求,基准站的坐标精度应达到毫米级,并定期进行监测和更新。

4.3 规范化的误差分析与修正方法

在数据处理过程中,采用卡尔曼滤波等误差修正方法,可以有效减少由于信号干扰或环境因素引起的测量误差。卡尔曼滤波方法能够在实时数据处理中,通过动态调整系统模型,抑制噪声并平滑数据,从而提高监测精度。

此外,最小二乘支持向量机(LS-SVM)方法能够处理数据中的非线性关系,并对沉降数据进行更精确的预测。LS-SVM能够通过学习数据中的模式,进一步优化测量结果,达到更高的精度要求。

4.4 精度评估与规范符合性

为了验证GNSS技术在运煤铁路路基沉降监测中的应用精度,本研究采用了Bland-Altman一致性分析对比了GNSS数据与传统精密水准测量数据的差异。根据分析结果,GNSS技术的沉降测量误差大多数控制在2~3毫米的范围内,符合铁路路基沉降监测的精度要求。结合规范要求,GNSS技术能够满足铁路路基沉降监测的精度要求。特别是在大范围监测和实时性要求较高的情况下,GNSS技术展现出显著的优势。

5 总结与展望

5.1 总结

本研究基于全球导航卫星系统(GNSS)技术,结合多个监测点位的数据,开展了运煤铁路路基沉降监测的研究。通过对不同设备和点位的沉降数据进行分析,我们发现GNSS技术在铁路路基沉降监测中具有显著优势,能够实现大范围、实时、精确的监测,满足铁路工程安全监测的需求。具体结论如下:

GNSS技术的应用优势:GNSS技术相较于传统的精密水准测量,在大范围沉降监测中展现了独特优势。尤其在重载铁路中,GNSS能够实时获取沉降数据,且不受天气、时间和基准点位置的限制,适应性强。监测精度在水平方向能够达到1~3毫米,垂直方向的沉降精度达到5毫米,满足了相关规范的精度要求。

精度分析与数据融合:在本研究中,通过对比GNSS技术与传统精密水准测量的数据,发现GNSS技术的精度

符合沉降监测的要求,尤其在垂直方向上,GNSS的误差最大为5毫米。同时,本研究采用了卡尔曼滤波和LS-SVM方法对GNSS数据进行了处理,进一步提高了数据的精度和稳定性。

监测点位的沉降趋势分析:通过对不同点位(DK17+580、DK18+360桥4、DK19+600红旗河大桥)的沉降数据分析,发现不同点位的沉降趋势在不同方向上存在差异。特别是垂直方向的沉降量在某些点位上较为显著,这与地基类型、矿区地表沉降以及轨道荷载等因素密切相关。

精度评估与规范符合性:通过Bland-Altman一致性分析,验证了GNSS与精密水准测量数据之间的高度一致性,进一步证明了GNSS在沉降监测中的可行性和精度。综合精密水准和GNSS技术的数据,可以得到更为精确的沉降监测结果。

5.2 展望

尽管GNSS技术在铁路路基沉降监测中已取得显著进展,但仍然存在一些挑战和发展空间。未来的研究可以从以下几个方面进行探索:

提高监测精度:当前GNSS技术的精度受到卫星信号的影响,特别是多路径效应和大气延迟的干扰。因此,未来可以采用更多频段的GNSS接收机,结合先进的多路径效应抑制技术,进一步提升沉降监测的精度,尤其是在复杂环境下的监测精度。

改进数据处理算法:尽管卡尔曼滤波和LS-SVM方法在本研究中有效地提高了数据精度,但仍有改进空间。未来可以探索更多高效的滤波方法,如粒子滤波和神经网络算法,以进一步优化GNSS数据的处理过程。

精度验证与长期监测:尽管本研究中的精度分析已验证GNSS在铁路路基沉降监测中的应用效果,但长期监测数据的积累和验证仍是未来工作的重点。通过建立长期的沉降监测网络,定期验证GNSS技术的精度,并与传统监测方法结合,能够进一步确保沉降监测系统的长期稳定性和可靠性。

标准化与规范化:随着GNSS技术在铁路沉降监测中的广泛应用,制定更加标准化和规范化的行业标准至关重要。未来应结合国内外的研究成果,制定针对不同类型铁路沉降监测的技术规范和标准,确保监测数据的统一性和可比性,提升工程管理的精细化水平。

GNSS技术在运煤铁路路基沉降监测中的应用为铁路建设和运营提供了全新的解决方案。通过实时、精确的监测数据,能够有效预防和应对沉降带来的风险,确保铁路运营的安全与稳定。随着技术的不断进步,GNSS技术及其与其他监测手段的融合将为未来铁路路基沉降监测领域带来更多创新和突破,推动铁路工程的智能化、精细化管理向前发展。

参考文献

- [1] 铁路路基施工技术及防护对策[J].姜焱.河南科技,2022(05).
- [2] 数据挖掘中的数据预处理[J].许辉.电脑知识与技术,2022(04).
- [3] 基于准分布式光纤光栅传感器的路基沉降监测技术[J].郭章辉.山西建筑,2021(23).