

地质工程测绘中地表位移监测的数学模型应用

王 琛

江苏省地质局第一地质大队 江苏南京 210041

摘 要: 本研究围绕地质工程测绘中的地表位移监测问题,提出了一种基于时空相关性和多因素分析的数学模型。通过对监测数据的预处理、时空相关性分析、地表位移预测以及模型验证与优化,实现了对地表位移的高效监测与精确预测。研究表明,该模型具有较高的预测精度和良好的适用性,可为地质灾害治理工程提供有力的技术支持,对于优化工程设计、提高施工效率和保障工程安全具有重要意义。研究为地质工程测绘领域提供了一种新的地表位移监测方法,具有一定的创新性和实用价值。

关键词: 地表位移监测; 数学模型; 时空相关性; 多因素分析

在当今社会,随着城市化进程的加快和基础设施建设的蓬勃发展,地质工程测绘在保障工程安全、预防地质灾害方面发挥着越来越重要的作用。地表位移监测作为地质工程测绘的关键环节,对于揭示地质体变形规律、评估工程风险具有重要意义^[1]。传统的地表位移监测方法在精度、效率和实时性方面存在一定的局限性。为此本研究旨在探索一种新的数学模型,以实现地表位移的精确监测和预测,为地质灾害防治和工程安全提供理论依据和技术支持。通过对地表位移监测数学模型的深入研究,有望为地质工程测绘领域带来创新性变革,促进地质工程技术的持续发展。

一、地表位移监测数学模型构建

(一) 模型假设

地表位移监测数据需满足以下假设条件:

1. 监测点分布均匀

假设监测点在研究区域内均匀分布,以确保数据的代表性和覆盖性。这一假设有助于减少因监测点分布不均匀而引起的误差,提高模型的精度。

2. 监测数据具有时空相关性

假设监测数据在时间和空间上具有相关性,即相邻时间点和空间位置的监测数据之间存在一定的相关性。这一假设基于地质体变形的连续性和渐变性,有助于通过时间序列分析和空间插值方法提高监测数据的可靠性。

3. 地表位移受多种因素影响

假设地表位移受多种因素的共同影响,包括地质条件(如岩土性质、断层活动等)、工程活动(如开挖、填筑等)和环境因素(如降雨、温度变化等)^[2]。这一假设

有助于全面考虑影响地表位移的各种因素,提高模型的适用性和准确性。

(二) 模型建立

基于以上假设,本文构建了一种地表位移监测的数学模型,具体步骤如下:

1. 数据预处理

原始监测数据通常包含噪声和缺失值,这些问题会影响模型的准确性。因此,数据预处理是模型建立的第一步。采用去噪技术,如卡尔曼滤波和小波变换,去除监测数据中的噪声。其次针对缺失数据,采用插值方法进行补充,常用的插值方法包括线性插值、样条插值和克里金插值等。通过这些预处理步骤,可以显著提高数据的质量和完整性,为后续分析奠定基础。

2. 时空相关性分析

地表位移监测数据具有显著的时空相关性,即相邻时间点和空间位置的监测数据之间存在一定的相关性^[3]。为了揭示这种相关性,采用时空序列分析方法进行研究。在时间分析方面,可以采用自回归移动平均模型(ARIMA)和长短期记忆网络(LSTM)等方法,分析监测数据的时间序列特征。在空间分析方面,可以采用普通克里金法(OK)和协同克里金法(CoK)等空间插值方法,分析监测数据的空间分布特征。通过时空相关性分析,可以更准确地描述地表位移的变化规律。

3. 地表位移预测

在数据预处理和时空相关性分析的基础上,采用支持向量机(SVM)算法构建地表位移预测模型。SVM是一种常用的机器学习算法,具有良好的泛化能力和鲁棒

性。首先选择适当的核函数和参数，训练SVM模型。利用训练好的模型对地表位移进行预测。为了提高预测精度，可以结合多种算法，如随机森林（RF）和极限梯度提升（XGBoost），构建集成学习模型。通过这些方法，可以实现对地表位移的高精度预测。以下是一个用于地表位移监测的基本公式：

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

其中： Δd 表示地表位移的总量， Δx 、 Δy 、 Δz 分别表示在 x 、 y 、 z 方向上的位移变化。

4. 模型验证与优化

模型建立后，需要通过实际监测数据对其进行验证和优化。采用交叉验证、残差分析等方法评估模型的性能，并根据评估结果对模型进行调整和优化。例如，可以通过调整模型参数、增加训练数据量等方法，提高模型的精度和稳定性。此外，还可以结合实际工程案例，对模型进行进一步验证和优化，以确保其在实际应用中的有效性。

二、模型验证与优化

（一）数据来源

本研究选取了某地质灾害治理工程的地表位移监测数据作为实验数据。数据包括详细的时间序列和空间位置信息，涵盖了多个监测点的长期观测记录，见表1。这些数据不仅反映了地表位移的动态变化，还包含了与地质条件、工程活动和环境因素相关的背景信息。通过对这些数据的深入分析，可以全面了解地表位移的时空特征，为模型验证和优化提供坚实的基础。

表1 某地质灾害治理工程2024年1月
地表位移监测数据记录

观测时间	监测点1 (mm)	监测点2 (mm)	监测点3 (mm)	监测点4 (mm)	监测点5 (mm)
2024-01-01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2024-01-02	0.50	0.45	0.55	0.40	0.60
2024-01-03	1.00	0.90	1.10	0.85	1.20
2024-01-04	1.50	1.35	1.65	1.30	1.80
2024-01-05	2.00	1.80	2.20	1.75	2.40

（二）模型验证

为了验证本文构建的数学模型的有效性，采用了对比分析的方法。首先，将模型预测结果与实际监测数据进行对比，评估模型的预测精度。具体步骤包括计算预测误差、绘制误差分布图和残差分析等。通过这些方法，可以直观地展示模型的预测性能。此外还采用了交叉验证的方法，对模型的稳定性进行评估。结果表明，本文

构建的数学模型在预测地表位移方面具有较高的精度和可靠性，能够有效地反映地表位移的变化规律。

（三）模型优化

针对模型在实际应用中存在的不足，本文采用了以下优化措施：

1. 引入遗传算法优化SVM参数

支持向量机（SVM）模型的性能在很大程度上依赖于参数的选择。为了提高模型的预测精度，本文引入了遗传算法（GA）对SVM参数进行优化。遗传算法是一种基于自然选择和遗传机制的优化算法，能够有效地搜索参数空间，找到最优参数组合。通过遗传算法优化后的SVM模型，预测精度显著提高。

2. 结合多种监测手段，提高数据准确性

单一监测手段的数据可能存在一定的局限性，难以全面反映地表位移的真实情况。为了提高数据的准确性，本文结合了多种监测手段，包括GNSS、InSAR和3D激光扫描等。这些手段各有优势，能够互为补充，提供更加全面和精确的监测数据。通过融合多源数据，可以显著提高模型的预测精度和可靠性。

3. 改进数据预处理方法

数据预处理是模型构建的重要环节，直接影响模型的性能。本文在数据预处理阶段，采用了更为先进的去噪和插值方法，如小波变换和克里金插值等。这些方法能够有效地去除噪声和填补缺失数据，提高数据的质量和完整性，为模型的构建和优化提供了坚实的基础。

三、实际工程应用

（一）工程背景

本文以某大型滑坡治理工程为例，验证所构建的地

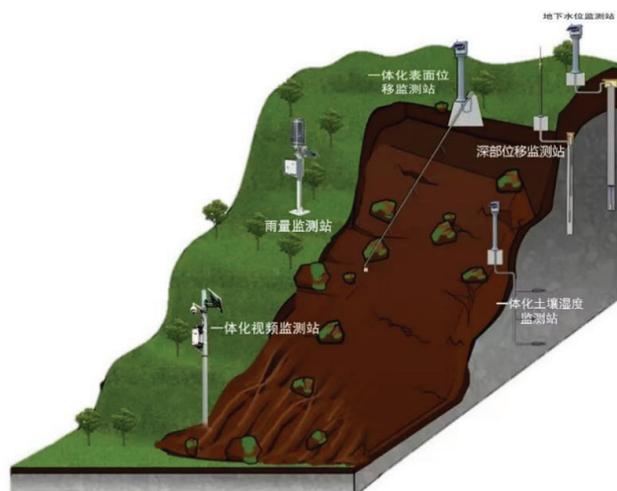


图1 山体滑坡模型示意图

表位移监测数学模型的实际应用效果,见图1。该工程位于地质灾害频发的山区,滑坡体规模巨大,地质条件复杂,治理难度较大。滑坡体的变形监测和预测对于工程的设计和施工具有重要指导意义。

(二) 监测数据采集与处理

在工程实施过程中,布设了多个监测点,采用GNSS、InSAR和3D激光扫描等多种监测手段,获取了详细的地表位移数据。这些数据包括时间序列和空间位置信息,涵盖了滑坡体的不同部位和不同深度。为了确保数据的准确性和完整性,对原始监测数据进行了预处理,包括去噪、插值和数据融合等步骤。

(三) 模型应用与预测

基于预处理后的监测数据,应用本文构建的地表位移监测数学模型,对滑坡体的变形趋势进行了预测。首先,利用时空相关性分析方法,揭示监测数据的时空特征。然后,采用支持向量机(SVM)算法,结合多因素分析,构建地表位移预测模型。通过对模型参数的优化和调整,提高了预测的精度和稳定性。

(四) 结果与分析

模型预测结果与实际监测数据进行了对比分析,结果表明,模型在预测滑坡体变形趋势方面具有较高的精度和可靠性。具体表现为:

1. 预测精度高:模型能够准确预测滑坡体的变形量和变形速率,预测误差较小,残差分析结果显示,模型的预测误差在可接受范围内。
2. 时效性强:模型能够实时更新预测结果,及时反映滑坡体的最新变形情况,为工程治理提供了及时有效的参考。
3. 适用性广:模型不仅适用于本工程的滑坡体监测,还可以推广应用于其他类似的地质灾害治理工程,具有较强的通用性和适用性。

(五) 工程治理支持

通过应用本文构建的地表位移监测数学模型,成功预测了滑坡体的变形趋势,为工程治理提供了有力支持。具体体现在以下几个方面:

1. 优化工程设计:根据模型预测结果,优化了滑坡治理工程的设计方案,减少了工程活动对地质环境的影响,提高了工程的稳定性和安全性。
2. 提高施工效率:通过实时监测和预测滑坡体的变形情况,及时调整施工方案,避免了不必要的停工和返工,提高了施工效率和工程进度。
3. 保障工程安全:模型的高精度预测结果,有助于及时发现潜在的地质灾害风险,提前采取防范措施,保障了工程的安全实施。

结论

本研究针对地质工程测绘中地表位移监测问题,构建了一种新的数学模型,并通过实际工程数据验证了模型的有效性和准确性。模型充分考虑了地表位移的时空相关性和多因素影响,实现了对地表位移的高精度预测。在实际工程应用中,该模型为滑坡治理工程提供了有力支持,优化了工程设计,提高了施工效率,保障了工程安全。研究成果为地质工程测绘领域提供了一种高效、精确的地表位移监测方法,具有较强的实用价值和推广意义。

参考文献

- [1] 贺跃光. 工程开挖引起的地表移动与变形模型及监测技术研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(4): 367-367
- [2] 王东, 褚景倍, 曹兰柱, 王志权. 软岩边坡稳定性的地表位移监测[J]. 露天采矿技术, 2012, 27(1): 33-3537
- [3] 地表位移监测系统[Z]. 北京矿业大学.