

基于现阶段铁路边坡监测技术的研究

孔泽军

南京铁道职业技术学院, 江苏 南京 210031

摘要: 铁路边坡的稳定性直接关系到铁路运输的安全与畅通。随着科学技术的不断进步, 铁路边坡监测技术也在不断发展。本文基于现阶段常用的监测技术, 如全球导航卫星系统、合成孔径雷达干涉测量技术、地基雷达技术和分布式光纤传感技术等, 介绍了铁路边坡监测的主要内容和目标, 并在此基础上探讨了多源数据融合技术, 最后对铁路边坡监测技术的发展趋势进行了展望, 旨在为铁路边坡监测工作提供参考。旨在为边坡监测工作提供参考, 确保铁路运输安全。

关键词: 铁路边坡监测; 多源数据融合监测; 实时动态监测; 智能决策变换; 相控阵雷达技术

引言

铁路作为国家重要的交通基础设施, 其安全运行至关重要。铁路沿线边坡的稳定性受到地质条件和气候因素的影响, 一旦边坡失稳, 就会发生滑坡、崩塌等地质灾害, 对铁路运输造成严重破坏, 造成巨大经济损失, 甚至危及人民生命安全。因此, 及时有效地监测铁路边坡及其变形和稳定状况, 对保障铁路运输安全非常重要。

研究背景。

截至 2025 年, 中国铁路运营里程将超过 16.2 万公里, 其中山区铁路比例将达到 42%。边坡失稳平均每年造成几百起事故报警, 直接经济损失达 726.962 亿元人民币, 间接经济损失达 1.2 亿元人民币。传统监测方法在技术上主要存在以下三个局限性

1. 监测范围窄: 无法实现实时监测, 接触监测范围窄;
2. 深度检测难: 无法预测深层滑动, 传统技术精度有限; 以及
3. 算法效率低: 80%的监测站依靠人工判读, 响应延迟超过 12 小时。

铁路边坡监测的主要内容和目标

铁路边坡监测是保障铁路安全运行的一

项重要工作, 其监测内容丰富多样, 主要包括边坡位移、变形和地质环境等重要方面。位移监测分为水平位移监测和垂直位移监测, 准确测量边坡上特定点的位置, 科学评估整个边坡的稳定性。变形监测主要关注斜坡形态的变化, 如裂缝的产生和扩展。地质环境监测主要关注斜坡周围岩石和土壤的性质, 以及地下水位和降雨量等环境因素, 深入了解这些因素对斜坡稳定性的影响^[1]。

目的: 通过对铁路边坡的全面监测, 提供实时的边坡状况信息, 及时发现潜在的安全隐患, 为铁路部门采取有效的防治措施提供科学依据, 确保边坡地质灾害的发生, 减少列车脱轨和运营中断, 从而保证铁路边坡的稳定性和铁路运输的安全可靠^[2]。

现阶段普遍采用的铁路边坡监测技术

1. 全球导航卫星系统 (GNSS)

原理: 卫星信号接收机接收多颗导航卫星发射的信号, 测量信号传播时间等, 计算接收天线在三维空间的位置坐标, 并确定监测点在边坡上的位移变化^[3]。

优点: 具有精度高、全天候、全天时、实时性强等特点, 可在复杂环境下稳定工作, 可为铁路边坡监测提供高精度位移数据, 监测范围广, 可覆盖边坡区域面积大, 同时维护成本

相对较低。

缺点：高度依赖卫星信号质量，在受信号影响的环境中定位误差较大，在没有卫星信号的情况下，无法输出位置，速度测量输出不平稳^[4]。

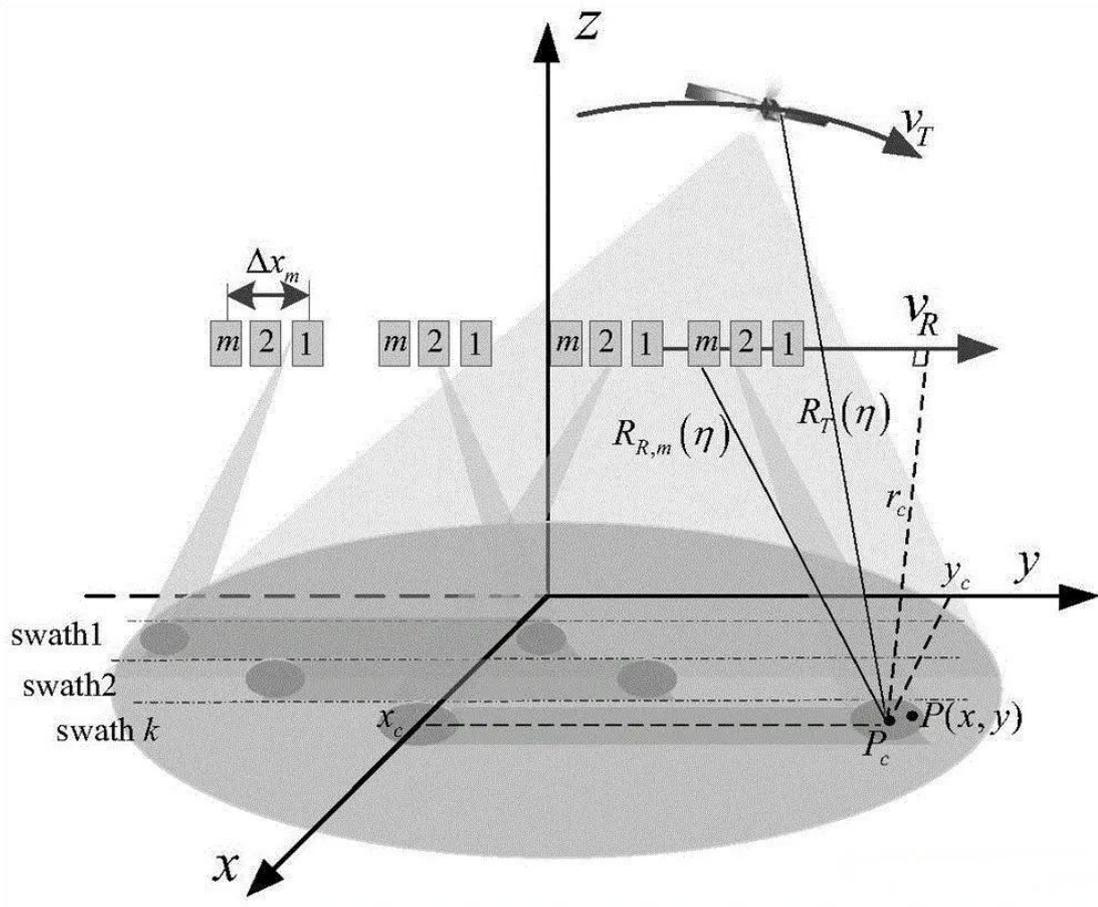
2. 合成孔径雷达干涉测量法 (InSAR)

原理：比较不同时间相位的合成孔径雷达图像，根据雷达波的相位差计算地表的微变形。如果斜坡发生变形，雷达图像的相位就会发生相应的变化，通过对这种相位变化进行精

确测量和分析，就可以获得斜坡变形的信息。

优点：该系统具有大面积高精度变形监测、空间分辨率高、监测面积大、不受天气和光照条件等限制等优点。它能获得毫米级精度的地面变形信息，适用于对大型铁路边坡进行快速、高效的普查和监测，能及时发现边坡上潜在的变形区域^[5]。

缺点：可进行合成孔径雷达时间序列差分干涉测量变形普查，但由于变形精度有限，无法仔细刻画变形在时间序列上的变化。



图一

3. 地面雷达技术

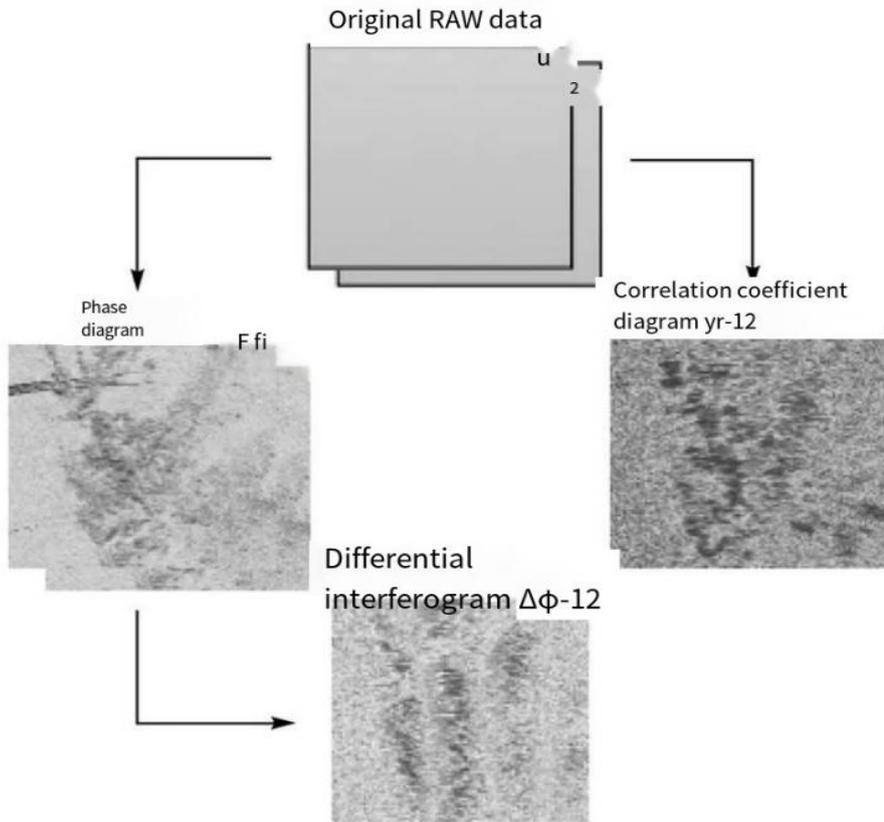
原理：地面雷达发射微波信号，接收反射信号，通过信号的传播时间和振幅确定物体的位置和距离，实时监测坡面的位移。

优点：实现了高频率、高精度的边坡监测，能快速捕捉边坡表面微小的位移变化，具有很强的实时性、高精度和高分辨率特点，能在短

时间内提供大量的监测数据，实现实时监测和预警。

缺点：该技术受视线传播特性限制，在复杂地形中，会因山体遮挡，从而形成监测盲区，需要增加额外设备和调整观测角度，来增加工程成本。其次，海外的数据处理依赖于高性能的计算资源，相位的离散误差和耗时的图像处

理造成了形变反演的延迟,难以满足滑坡预警 的秒级响应需求。



图二

4. 色散光纤传感技术

原理: 基于光的反射、折射和干涉等物理现象, 在边坡内部或表面埋设光纤传感器。每当边坡发生形变、应变或温度变化时, 光纤中的光信号随之发生变化, 通过对该光信号的检测和分析, 获得边坡内部物理状态的信息 通过对该光信号的检测和分析, 可获得边坡内部物理状态的信息。

优点: 具有防电磁干扰、耐腐蚀、体积小、重量轻、分布式测量等优点, 可长期稳定地监测边坡内部的应力、应变、温度等多个参数, 并可将光纤传感器放置在边坡的不同深度和位置, 形成分布式监测网络, 全面感知边坡力学状态的变化。

缺点: 检测微弱信号时对波长检测精度要求较高, 轮询和扫描周期相对较长, 解调方法成本较高。

5. 多源数据融合技术在铁路边坡监测中

的应用

为了提高铁路边坡监测的准确性和可靠性, 多源数据融合技术得到了广泛的研究和应用。通过对上述不同监测技术获得的数据进行融合, 可以充分发挥每种监测技术的优势, 弥补单一技术的劣势, 从而实现铁路边坡的全方位、多阶段监测。

在铁路边坡监测中, 不同类型的传感器都有各自的专长: 位移传感器记录点的移动, 雨量计监测降水量, 地下水位计跟踪地下水位的变化等等。然而, 它们的数据格式、频率和精度都不尽相同, 因此需要采用数据融合技术来全面了解边坡状况。

数据融合的优势: 例如, 通过将 InSAR 技术获得的大范围变形数据与 GNSS 的高精度位移数据以及地基雷达的局部高分辨率监测数据进行融合, 可以实现对边坡从宏观到微观、从整体到局部的全面监测, 提高对边坡变形特

征的识别能力和监测精度。同时结合分布式光纤传感技术获取边坡内部应力和应变信息,可进一步提高边坡稳定性评估能力,为铁路边坡灾害预警和防治提供更有力的支撑。

数据融合的应用: 在实际的铁路边坡监测项目中,多源数据融合技术的应用可有效提高监测系统的可靠性和稳定性,降低误报和漏报的风险,使监测结果更具科学性和可信度,为铁路部门的决策提供更加准确的依据。

应用场景和典型案例

滑坡预警案例研究: 在对意大利北部埃尔蒙托山脉托克滑坡点的长期监测中,GB-SAR 系统成功的捕捉到了毫米级位移信号,为应急规划提供了数据支持。

在中国雅砻江水电边坡上,GB-InSAR 被用于提供 24 小时连续监测,预警精度为±0.1 毫米/小时。

露天矿边坡稳定性评估案例研究: 智利的一个铜矿监测了由多个 GB-InSAR 设备组成的网络,并将它们与机器学习算法相结合,预测潜在的滑坡面。澳大利亚的一个铁矿正在使用 InSAR 数据对历史变形进行回溯分析,并优化边坡设计参数。

交通基础设施边坡监测案例研究: GB-InSAR 系统已部署在成昆铁路段的一个高风险边坡上,并通过实时数据传输与铁路调度系统相连。

利用激光雷达定期扫描挪威峡湾公路边坡,并结合 BIM 模型评估基岩裂缝增长情况。

地震和降雨滑坡监测案例研究: 熊本地震后,九州的几个不稳定斜坡通过 PS-InSAR 技术被迅速识别。

云南省红河县降雨诱发的滑坡监测: GB-SAR 系统捕捉到了加速变形阶段,并发布了疏散公告。

铁路边坡监测技术的发展趋势

智能监测预警: 随着人工智能、大数据和机器学习技术的不断发展,铁路边坡监测也不

断向智能化方向发展。通过对大量监测数据的挖掘和分析,建立智能监测模型和预警系统,自动识别边坡变形规律和潜在风险,实现边坡稳定性的实时评估和预警,提高监测效率和预警精度,为铁路运输安全提供更有力的保障。

一、技术发展趋势

(一) 多源数据融合监测

目前,铁路等级监测技术正朝着“空-天-地”一体化的方向升级。过去依靠单一传感器的监测模式逐渐被各种手段组成的协调监测网络所取代。例如,InSAR 卫星可以从高空俯瞰,监测广阔边坡的宏观变形趋势。地面雷达可以高精度扫描重点区域,及时发现毫米级的位移。地下光纤传感器可以准确捕捉岩石和土壤中的应变变化。这三种监测仪器各有侧重点,可以相互配合,使斜坡监测更加全面和准确。

(二) 实时动态监测

在基础设施安全监测领域,监测周期已从传统的每天频率采集到分钟级高频采集,实现了质的飞跃。通过 5G 通信技术的低时延特性,系统端到端的传输时延被严格控制在 800 毫秒以内,有效的保证了监测数据的时间有效性。

(三) 智能决策转型

我国铁路边坡监测系统正在经历从传统人工检测到智能感知系统的飞跃技术。在监测能力层面,基于 5G 通信的分钟级动态采集系统实现了 0.1 毫米级位移监测精度的突破,大西高铁示范工程部署的 10 赫兹高频监测设备,可准确捕捉边坡微变形特征。在决策机制方面,郑万高铁采用的时空卷积神经网络(TCN)算法,将地质灾害误判率降低至 8.5%,并结合了 BIM+GIS 数字孪生平台构建的三维地质模型,形成包含 17 种典型工况的智能方案库。可用于多源数据融合和虚拟现实交互技术,该系统成功的将灾害预警响应时限从 1 小时缩

短至 1 秒，应急处置工单生成效率提高 40%以上，实现了铁路边坡安全管理的数字化主动防控，标志着铁路边坡安全管理正式进入管控新阶段。

二、雷达技术类型及原理

(一) 微波光子雷达技术

原理和优势：微波光子雷达通过先进的光子集成材料和工艺，可以突破传统电子雷达的频率和带宽限制，实现更高的频率、更宽的带宽和更小的体积。例如，南开大学开发的铌酸锂薄膜光子毫米波雷达已达到厘米级分辨率。

(二) 相控阵雷达技术

原理和优点：相控阵雷达通过控制雷达天线阵中每个辐射单元的相位，实现快速波束扫描和指向控制。优点是角度测量精度高，可跟踪多个目标，抗干扰能力强。它可以实时监测大面积斜坡，快速捕捉斜坡的动态变化。

(三) 分布式阵列雷达技术

原理及优势：该技术是将多部小型雷达分

布在不同位置组成雷达阵列，通过对每部雷达回波信号的协调处理，实现对目标的高精度监测。其特点是灵活性高、可扩展性强、抗干扰能力强，可适应铁路边坡复杂的地形和环境条件。

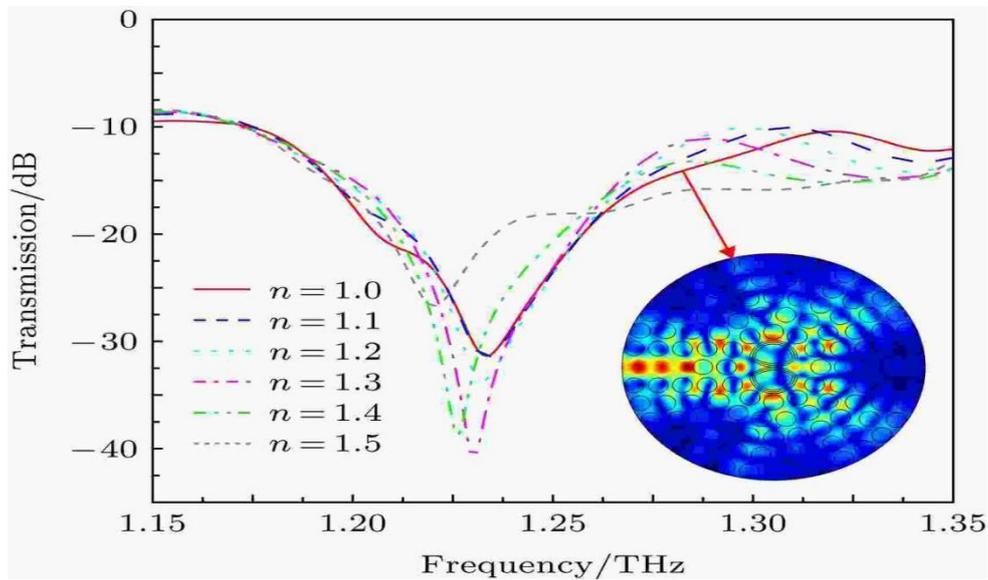
三、新传感技术

(一) 量子传感

量子传感技术在铁路边坡监测领域显示出巨大的应用潜力。其中，钻石 NV 彩色磁芯传感器因其出色的磁场检测灵敏度而备受关注。这相当于检测到 0.1 kPa 的应力变化。

(二) 光子晶体光纤

光子晶体光纤作为一种新型传感材料，它具有独特的光学特性和传感性能。并具有高灵敏度和高精确度的特点，能够精确测量温度、应变和多种物理量的测量。与传统的光纤相比，光子晶体光纤对温度和应变的变化更加敏感，可以探测到更小的变化，从而可以更准确地监测倾斜条件。



图三

结论

目前，铁路边坡监测领域正在经历一场技术革命，一系列先进的监测技术和手段不断涌现，为铁路边坡安全监测筑起了坚实的防线。

全球卫星导航系统凭借其精确的定位能力，能够实时捕捉边坡的位移动态。合成孔径雷达干涉测量技术具有高分辨率成像的优势，可以准确呈现边坡变形的细节。地基雷达技术利用其

高频监测特性,可对斜坡表面的微小位移做出快速反应。分布式光纤传感技术则凭借其抗干扰、耐腐蚀特质,长期稳定监测边坡内部应力与应变。这些技术各有所长,相互配合,而多源数据融合技术的引入,更是将监测精度与可靠性提升至新高度。

随着我国铁路建设规模持续扩张,以及安全运营标准的逐步提升,当前的边坡监测技术在覆盖范围、响应速度等方面的短板逐渐显现。例如复杂地形下的监测盲区、极端天气导致的数据缺失等问题,都对技术迭代提出了迫切需

求。

未来,多模态融合监测模式将成为重要突破口。通过整合空基遥感、地基雷达、地下传感等多维度数据,实现边坡状态的全方位感知。同时,新型传感器的研发也将聚焦于高精度、高稳定性和智能化方向,进一步提升数据采集效率与可靠性。这些技术革新将显著增强铁路边坡监测的整体效能,为铁路运输安全筑牢防线,有力保障线路稳定运行与列车安全通行。

参考文献

- [1]靳猛. 基于 BIM 技术的铁路路基设计应用研究[J]. 铁路技术创新, 2020, (04): 39-42.
- [2]刘晓奇, 赵军甫, 沈亮峰. 基于数据驱动的铁铁路信号 BIM 设计技术研究[J]. 自动化与仪器仪表. 2022, (9).
- [3]汪振众, 张国建, 高幸, 刘卫东, 石海龙. (2023). 铁路高边坡变形自动化监测新技术研究[D]. 现代信息科技, 2023 (24).
- [4]阙卫东, 师文斌, 陈虎林, 等. (2019). 兰渝铁路高精度边坡自动化监测系统应用探讨[J]. 数字技术与应用, 37(10), 119-121.
- [5]Zhang, L. (2021). Multi-sensor Data Fusion for Slope Stability Analysis.[J] Journal of Geotechnical Engineering.

作者简介: 孔泽军 2005, 男, 汉, 浙江省杭州市人, 大专, 研究方向: 风景园林设计