

基于微波与量子传感融合技术的智能边坡监测方案研究

孔泽军 费冉希 郭宏宇 李牧航 邢文欣

南京铁道职业技术学院, 江苏 南京 210031

摘要: 随着铁路网的快速扩张, 边坡稳定性已成为确保运输安全的核心问题。传统的监测技术依靠接触式单点监测, 准确性不足, 且依靠经验人工判读, 导致滑坡预警误判率高, 难以满足铁路运营的安全要求。特别是在山区和地质脆弱地区, 滑坡风险尤为突出, 对智能系统的需求十分迫切。本文深入探讨了铁路边坡智能监测技术, 提出了基于非接触式微波扫描、NV 色心微波天线阵列和 KalNet-RBF 算法三大核心技术的创新型智能监测方法。目的在于解决传统监测技术的不足。

关键词: 微波、量子传感、边坡监测

引言

本方案融合非接触式微波扫描生成边坡三维变形热图, 精准定位毫米级裂缝与沉降; 首创 NV 色心微波天线阵列技术, 实现全维度高精度监测, 位移精度 0.1-1mm、灵敏度 1pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 漏检率降低 80%。结合 KalNET-RBF 神经网络算法, 滑坡预警准确率达 98%, 动态输出应急与修复策略, 构建“监测-预警-处置”闭环。方案以非接触传感、多物理场融合及智能决策为核心创新, 提升监测覆盖、预警精度与响应时效, 为铁路边坡防护提供系统方案。经现场验证, 装置在监测覆盖、精度及报警时效上突破, 运维效率与安全指标优化, 验证其复杂地质条件下的普适性与可靠性。

预期研究将在学术、工程、经济领域贡献显著: 学术上开创“数据-算法-应用”的地质灾害监测研究范式; 工程上推动铁路运维从“被动救援”升级为“主动防控”; 经济上助力国产设备五年内市占率从 40%提至 70%, 节省采购成本超 20 亿元。该研究首创多物理场融合监测、全数据驱动决策及闭环管理, 兼具工程应用与学术创新价值。

未来, 铁路边坡智能监测项目将朝“全域

感知、自主决策、零碳运行”发展, 与国家“交通强国”“双碳”战略深度融合。通过多维协同, 项目实现从“被动抢险”到“主动防控”的模式转变。随着技术成熟与“监测即服务”模式推广, 铁路安全体系将迈向更高智能化与可持续发展水平, 为全球铁路安全贡献中国方案。

研究背景: 随着铁路网络扩张, 边坡稳定性成为运输安全的核心问题。传统监测技术存在覆盖范围有限、精度低、预警滞后等缺陷, 导致滑坡预警误判率高, 直接威胁铁路运营安全。特别是在山区和地质脆弱地区, 传统设备难以应对复杂环境。本研究旨在破解行业技术瓶颈, 服务国家战略需求。随着高速铁路框架完善, 传统监测技术已无法满足社会需求, 存在三大致命缺陷: 覆盖范围有限、精度低、预警滞后。这些问题导致滑坡预警误报率高达 16%, 甚至导致区域交通瘫痪和经济损失。特别是在地质脆弱地区, 传统设备难以应对复杂环境, 迫切需要智能系统。

铁路边坡在中国发展中发挥重要作用: 防止滑坡和塌方, 稳定铁路沿线土壤, 确保路基稳定; 减少水土流失, 保护路基和环境; 增加

排水能力，防止路基冲刷；保护铁路设施，延长使用寿命；提高运行安全性，防止泥沙滑落到铁轨上；降低维护成本，减少山体滑坡和塌方造成的维护需求。

研究意义：该研究将通过分析新型边坡监测设备的三大创新技术（非接触式微波扫描、NV 色心微波天线阵列和 KalNET-RBF 算法），检验该项目解决传统监测覆盖面不足、准确率低和预警延迟等问题的能力。其目的是促进铁路边坡监测的智能化和精准化，降低灾害风险，提高应急响应效率，为行业标准的制定和技术迭代提供实证支持，助力基础设施安全管理的数字化转型。该研究的独特价值在于其双重意义，即首次实现了多物理场融合监测（变形+磁信号）和全维度数据驱动决策（实时+历史模型），形成了“监测-预警-处置”的闭环管理，具有重要的工程应用和学术创新意义。

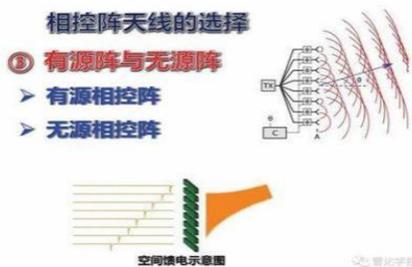
国内和国际研究情况：：雷达监测技术主要通过电磁波的发射和反射信号的接收，利用反演目标位移的相位差和振幅变化信息，实现非接触式、高精度的变形监测。

一、边坡监测主要采用以下雷达技术：

（一）地基合成孔径雷达

基于合成孔径技术，通过移动天线形成虚拟孔径来提高空间分辨率。适合对小区域进行连续监测，精度高，可覆盖整个斜坡表面。

（二）地基微震颤监测雷达



2 优点

非接触式监测避免了单点监测的局限性。电子扫描无需机械旋转，从而提高了检测效率。

结合地基雷达和干涉测量技术，在一个固定点连续扫描边坡的表面变形。其实时性强，适用于滑坡预警和施工期监测，监测距离可达数公里。它主要应用于露天矿山边坡和水电站大坝水库边坡^[1]。

二、技术优势和局限性

（一）优势

非接触式监测：避免了传统传感器的工程风险。时空分辨率高：每次扫描覆盖数千个监测点，数据密度远远超过 GNSS 或全站仪。

（二）局限性

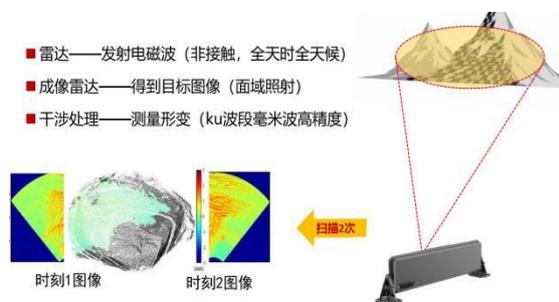
环境干扰：暴雨、植被可能造成的信号衰减和误判；成本高：高端雷达设备单价超过 1000 万元人民币；运行维护复杂；数据处理难题：海量数据需要结合 InSAR 解算算法和人工智能降噪处理，监测盲区：陡坡和雷达波束受阻区域可能无法覆盖^[2]。

三、核心技术研究

（一）非接触式微波扫描

1 原理

多波束扫描和阵列信号处理技术与压控振荡器相结合，产生 24GHz/77GHz 频带的频率调制连续波信号。相位差干扰技术用于计算反射回波中的位移变化，并生成三维变形热图，以准确定位边坡上的裂缝扩展和沉降区域。



频率调整精度可达 MHz 级，适合毫米级变形监测。

指标	传统相控阵雷达 结合微波扫描阵列后	
扫描速率	10Hz	24Hz
测距精度	±1mm	±0.3mm
功耗	50W	15W
多目标能力	单目标跟踪	目标并行跟踪

3 应用场景

铁路边坡、露天矿和其他大面积区域的全向动态监控。

4 实际应用

非接触式微波扫描雷达：

(1) 频率调制连续波信号的发射和接收
信号产生：雷达发射频率随时间线性变化的微波信号，信号形式为锯齿波或三角波频率调制。

(2) 差分频率信号处理和距离测量

差分频率提取：发射信号通过混频器与返回信号混合，产生频率与目标距离成正比的中频信号，与目标距离成正比^[3]。

(3) 相位差分干涉测量法

相位差来源：相邻两个时间点的同一目标，回波信号因微小位移而产生相位差。

(4) 动态变形监测

高频采样：以 24 赫兹的速率连续扫描，获取位移时间序列数据。

动态分析：结合速度-加速度曲线，判断边坡是否处于加速滑动阶段。

(5) 相控阵技术

电子扫描：通过调整天线阵各个单元之间的相位差，快速切换波束指向。

多目标监测：同时跟踪边坡不同区域的变形，适用于复杂地形。

效果：与传统传感器相比，监测范围增加到 500 米，成本降低 70%。

(二) NV 色心微波天线

1 原理

基于金刚石中氮-空位的量子传感特性，

优势

探测边坡内部微磁变化；集成芯片与阵列设计，实现边坡表面 0.1-1mm 级位移监测。

2 优势

高灵敏度和高精度，能够捕捉滑坡的初始信号；覆盖范围广，适用于复杂的地质环境。

3 用途

深层岩石稳定性监测，地质灾害早期预警。

4 NV 色心微波天线阵列

(1) 原理：当微波电场作用于 NV 色心时，NV 色心吸收微波能量，引起基态三重态能级之间的跃迁，导致荧光信号强度的变化。通过检测荧光信号的变化，可以获得有关 NV 颜色中心所处环境的物理信息^[4]。

(2) 作用：在 NV 色心传感技术中，微波天线阵列用于发射特定的微波来操纵 NV 颜色中心的量子自旋状态。这样，就可以实现对 NV 颜色中心荧光信号的调制，并用于测量磁场、电场、温度和压力等物理量。

(三) KalNET-RBF 神经网络综合智能决策算法：

1 数据融合

利用卡尔曼滤波法实时收集多源监测数据（如雷达、传感器）；

2 建立模型

利用径向基函数（RBF）神经网络进行数据调配，结合历史模型来匹配滑坡趋势。

3 优势

预测准确率提高到 98%；准确预警滑坡发生时间、地点、强度和影响范围。可为应急行动计划和灾后生态恢复提供建议。

适用场景

优势

适用场景

- 1. 处理非线性动态系统 无人机导航（复杂气流干扰）
- 2. 抗噪声能力强 工业机器人控制（传感器噪声大）
- 3. 实时适应性好 金融时间序列预测（市场突变）

4 创新点

动态优化报警阈值，降低误报率，全面支持灾害生命周期管理（预警→应急响应→修复）。

5KatNe-RBF 神经网络系统

构成：包括前端和后端，前端为卡尔曼滤波，后端为 RBF 神经网络系统

卡尔曼滤波的短板	传统卡尔曼滤波假设系统是线性的且噪声服从高斯分布，但现实中的系统往往是非线性的
RBF 的优势	RBF 神经网络可以逼近任意非线性函数，弥补卡尔曼滤波在非线建模上的不足。
协同目标	用 RBF 神经网络建模非线性部分，卡尔曼滤波负责动态状态的最优估计。

6 RBF 辅助卡尔曼滤波

系统具有非线性动力学特性，不能直接用线性卡尔曼滤波；RBF 的主要任务是训练 RBF 神经网络学习系统的非线性动力学特性并进行替换。卡尔曼滤波会替换原有的线性状态转换或观测模型。卡尔曼滤波的任务是根据 RBF 提供的非线性模型更新预测和测量结果，不断优化状态估计。这相当于将卡尔曼滤波器“升

级”为非线性版本。

卡尔曼滤波器需要优化 RBF 参数，应用于 RBF 神经网络的中点并动态调整 RBF 神经网络的中心点和权重。卡尔曼滤波的任务是将 RBF 参数视为“状态变量”。通过卡尔曼滤波的预测-更新流程，动态调整这些参数。RBF 的任务是用优化后的参数处理输入数据。让 RBF 网络能实时适应系统变化^[5]。

四、关键技术突破

卡尔曼滤波的短板	传统卡尔曼滤波假设系统是线性的且噪声服从高斯分布，但现实中的系统往往是非线性的
RBF 的优势	RBF 神经网络可以逼近任意非线性函数，弥补卡尔曼滤波在非线建模上的不足。
协同目标	用 RBF 神经网络建模非线性部分，卡尔曼滤波负责动态状态的最优估计。

五、核心技术优势

接触式微波阵列传感器	通过微波信号实现远距离、非接触式监测，克服了传统接触式传感器易受环境干扰、安装维护复杂等问题，可实时获取边坡表面位移、形变等关键数据，具备高灵敏度和抗干扰能力。
NV 色心微波阵列传感器	基于氮-空位量子传感技术，实现对边坡内部应力、磁场变化的纳米级精度探测，尤其在

	复杂地质条件下仍能稳定工作，填补了传统传感器在微观力学监测领域的空白。
KalNet-RBF 算法	结合卡尔曼滤波与径向基函数神经网络，显著提升了数据处理效率与预测准确性。该算法可动态修正环境噪声干扰，实现边坡稳定性多维度评估，误报率降低至 1% 以下。

六、技术升级方向

传感器融合	探索微波阵列与光纤传感、卫星 InSAR 数据的多源信息融合，构建“空-天-地”一体化监测体系，提升复杂地形下的全局感知能力。
量子传感深化	进一步挖掘 NV 色心传感器在三维应力场重建、地下水渗透监测等场景的应用潜力，推动设备从“形变监测”向“机理分析”升级。
算法优化	开发轻量化边缘计算模型，适配低算力终端设备，同时引入强化学习机制，实现风险预测的自适应迭代。

结语

通过量子传感与智能算法的精细融合，该设备将提高铁路边坡的监控水平。未来，团队将继续推动技术创新和落地，努力将交通基础设施的安全管控推向“高精度、智能化、全天候”的新阶段。

铁路边坡监测项目不仅是科技创新的引领者，也是国家战略的重要组成部分。通过技

术、政策、资本、社会的协同作用，该项目实现了从“被动抢险”到“主动防控”的转变。未来，随着量子传感、自主修复材料等颠覆性技术的成熟，以及“监控即服务”模式的普及，铁路安全系统将朝着更加智能化和可持续发展的方向发展。在此过程中，需要继续加强政策保障，深化国际合作，激发市场活力，最终为全球铁路安全贡献中国智慧和方案。

参考文献

- [1] 赵勇, 张锐, 邢学敏, 凌时光, 郑冠峰. 基于 SBAS-InSAR 技术的膨胀土边坡变形失稳特征[J]. 公路交通科技, 2024, 41(8): 22-30.
- [2] 曾涛, 邓云开, 胡程, 田卫明. 地基差分干涉雷达发展现状及应用实例[J]. 雷达学报(中英文), 2019, 8(1): 154-170.
- [3] 阳方平. 一种非线性卡尔曼滤波测量车辆状态和预测轨迹方法[J]. 科技视界, 2024, 14(28): 35-37.
- [4] 夏长亮, 王娟, 史婷娜, 陈炜, 徐绍辉, 杨荣. 基于自适应径向基函数神经网络的无刷直流电机直接电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 123-127.
- [5] 郭睿昂. 金刚石氮-空位缺陷电荷态的光致发光研究[D]. 太原科技大学, 2021.