

Integrated application status and prospect of tunnel radar and automatic early warning technology in surrounding rock monitoring

Haoyang Li Weijian Liu Zhenxia Yuan Zhongkai Peng Biqi Yuan Lijuan Jiao

School of Intelligent Construction and Architectural Engineering, Zhongyuan Institute of Technology, Zhengzhou, Henan, 450007, China

Abstract

This paper discusses the integrated application of tunnel radar and automatic early warning technology in the field of surrounding rock monitoring. Firstly, the principles and characteristics of tunnel radar and automatic early warning technology are expounded, and the current situation of surrounding rock monitoring is analyzed in detail, including application examples, data processing and analysis methods and monitoring results under different geological conditions. At the same time, the technical problems and challenges in the process of integration application, such as the complexity of data fusion, system compatibility and so on. Finally, the future development trend of the integrated application, predicted the direction of technical improvement and in the tunnel engineering security may play a bigger role, aims to provide comprehensive for professionals in the field of tunnel engineering technical references, promote the surrounding rock monitoring technology in the further development and improvement.

Keywords

surrounding rock monitoring; tunnel radar; automatic early warning technology

围岩监测中隧道雷达与自动化预警技术的整合应用现状与展望

李昊阳 刘伟建 袁振霞 彭仲凯 袁碧琦 焦利娟

中原工学院智能建造与建筑工程学院, 中国·河南 郑州 450007

摘 要

本文深入探讨了在围岩监测领域中隧道雷达与自动化预警技术整合应用的情况。首先阐述了隧道雷达和自动化预警技术的原理与特点, 详细分析了二者整合应用于围岩监测的现状, 包括在不同地质条件下的应用实例、数据处理与分析方法以及所取得的监测效果等方面。同时探讨了整合应用过程中面临的技术难题与挑战, 如数据融合的复杂性、系统兼容性问题等。最后对该整合应用的未来发展趋势进行了展望, 预测了技术改进方向以及在隧道工程安全保障方面可能发挥的更大作用, 旨在为隧道工程领域的专业人士提供全面的技术参考资料, 促进相关技术在围岩监测工作中的进一步发展完善。

关键词

围岩监测; 隧道雷达; 自动化预警技术

1 引言

在隧道工程建设历程中, 围岩稳定性监测技术不断演进。早期的监测技术如全站仪, 其在应用过程中存在诸多局

限性。全站仪需要人工操作, 这不仅依赖于操作人员的专业技能和经验, 而且人为操作误差难以避免, 容易导致监测数据的偏差。此外, 全站仪监测数据的进一步处理需要人工计算, 这一过程繁琐且时效性差, 无法满足现代隧道工程快速、高效的监测需求。

众多学者在相关领域开展了深入研究并取得了一定成果。例如, 冯盘园、许立本提出了基于某种传统监测技术改进的算法, 旨在提高数据处理的精度, 但由于基础监测手段的固有缺陷, 其效果提升有限^[1]。古世煌、张静华、宁进研究了多传感器融合的监测方法, 虽在一定程度上提高了监测的可靠性, 但因传感器布置与协调的复杂性, 在实际应用

【基金项目】国家级大学生创新训练计划支持项目(重点支持领域项目: 202410465001); 河南省“专创融合”特色示范课程(教办高〔2024〕2号); 河南省本科高校智慧教学专项研究项目(教高〔2023〕334号)。

【作者简介】李昊阳(2003-), 男, 中国新疆人, 在读本科生, 从事岩土工程及创新创业研究。

中面临诸多挑战^[2]。

相比之下，隧道雷达技术展现出独特的优势。隧道雷达作为一种高效的无损探测技术，基于合成孔径雷达（SAR）成像原理与干涉测量技术的融合应用，具备诸多卓越特性。其覆盖范围大，能够对隧道较大区域进行有效监测，全面掌握隧道整体的形变状况；拥有高空间分辨率，精确地分辨出隧道拱顶、周边等部位微小的形变细节，如毫米级别的沉降与收敛变化都可精准探测。

隧道雷达的这些技术特点使其在围岩监测领域脱颖而出，为与自动化预警技术的整合应用奠定了坚实基础，二者的协同整合有望为隧道围岩监测提供更为全面、精准且高效的解决方案，在隧道工程安全保障方面具有极为重要的研究与应用价值。

2 隧道雷达技术原理与特点

2.1 技术原理

隧道雷达技术基于雷达的基本原理，即通过发射电磁波并接收反射波来探测目标物体的特性与位置信息。在隧道监测应用中，其具有独特的创新性，采用大规模全固态高分辨率成像方案替代传统机械导轨式干涉 SAR 方案^[3]。

地基合成孔径雷达（GBSAR）技术作为隧道雷达的关键技术手段，具备众多显著优势。其覆盖范围大，可全面掌握隧道整体形变状况，具备全天候工作能力，在各种环境下均能稳定运行获取可靠监测数据，高精度特性为隧道安全评估提供坚实数据基础，且无需人员实地测量，可远程操作与传输数据，降低人力成本与作业风险。

2.2 技术特点

无损探测：不会对围岩造成破坏，不影响隧道的正常施工与运营。

高分辨率：能够精确检测到围岩内部微小的结构变化和缺陷，如小尺寸的空洞或裂缝。

快速高效：可在短时间内对大面积的围岩进行扫描探测，提高监测效率。

局限性：在某些地质条件下，如高导电性地质体或强干扰环境中，电磁波信号衰减严重，会影响探测效果；同时，对复杂地质构造的解释需要专业的技术人员和丰富的经验。

3 自动化预警技术原理与特点

3.1 技术原理

自动化预警技术以传感器作为数据采集的前端触角，广泛分布于围岩关键部位的各类传感器，包括位移传感器、应力传感器等，实时捕捉围岩的物理参数信息，并将其传输至数据处理中心^[4]。在数据处理环节，依托计算机算法与数据分析模型展开深度挖掘。

3.2 技术特点

实时性强：能够即时获取和处理监测数据，快速响应围岩状态的变化，为及时决策提供依据。

客观性高：基于既定的数学模型和算法进行判断，减少了人为因素的干扰，提高了预警的准确性和可靠性。

可扩展性：能够方便地集成多种类型的传感器，适应不同的监测需求和复杂的工程环境。

对数据质量要求高：若传感器故障或数据传输出现问题，可能导致误判或漏判；同时，算法模型需要不断优化和更新以适应不同的地质条件和工程情况。

4 隧道雷达与自动化预警技术整合应用现状

4.1 应用实例分析

4.1.1 软岩隧道工程

在某软岩隧道施工中，隧道雷达成为围岩监测的核心利器。它运用先进的电磁波探测技术，对隧道周边围岩进行高频次扫描，凭借其高分辨率成像能力，精准捕捉软岩的结构变化、弱化区域以及潜在的坍塌风险部位^[5]。与此同时，自动化预警系统与隧道雷达协同工作，该系统依据隧道雷达的监测数据以及隧道围岩体灾害发生机理和相关理论，建立隧道微变形数据与隧道安全稳定性的关系，并编制地基微变形雷达的隧道监测安全稳定预警系统软件。当隧道雷达探测到围岩内部结构出现明显变化，且预警系统通过对位移数据与预先设定的安全阈值进行对比分析，一旦发现位移量超过阈值，立即按照分级预警功能发出相应等级的预警信号。施工方依据预警信息及时采取加固措施，如增加锚杆支护、喷射混凝土等，成功避免了隧道坍塌事故的发生，充分彰显了隧道雷达与自动化预警技术整合应用在软岩隧道施工安全保障方面的卓越效能^[6]。

4.1.2 岩溶发育地区隧道

于岩溶发育地区的隧道项目，隧道雷达展现出独特优势。它发射的电磁波能够穿透复杂的地质结构，清晰地探测到岩溶洞穴的位置、大小和形状等关键信息。自动化预警系统紧密结合隧道雷达数据，除了设置水位传感器、压力传感器监测岩溶洞穴内的水位变化以及围岩所受水压力外，还依据隧道雷达对围岩整体结构稳定性的监测结果^[7]。

4.2 数据处理与分析方法

4.2.1 数据融合技术

将隧道雷达探测到的围岩内部结构数据与自动化预警系统采集的围岩物理参数数据进行深度融合^[8]。例如，把雷达探测到的空洞位置信息与位移传感器监测到的空洞周边围岩位移数据相结合，通过建立空间坐标关联模型，使两种数据相互补充和验证，从而更精准地判断围岩的稳定性。

4.2.2 基于模型的数据分析

利用有限元分析模型等数值模型，将隧道雷达和自动化预警技术采集的数据作为输入参数，模拟围岩的力学行为和变形过程。通过对比模拟结果与实际监测数据，不断优化模型参数，提高模型的预测精度。如支持向量机算法，可对大量的隧道雷达与自动化预警数据进行学习与分析，挖掘出

数据背后隐藏的围岩变形规律,从而更精准地预测围岩稳定性;再如神经网络算法,能够自适应地调整模型参数,提高模型对复杂地质条件下隧道围岩变形的预测能力,进一步提升了基于模型的数据分析在隧道围岩监测中的有效性。

4.3 监测效果评估

通过整合应用隧道雷达与自动化预警技术,在多个隧道工程中收获了令人瞩目的监测成果。在围岩变形监测领域,借助先进的预警算法如斋藤算法、黄金分割法、切线角法被证明在早期围岩变形预测方面具有较高的灵敏度;黄金分割法展现出对变形阈值判断的准确性;切线角法体现出对围岩变形趋势判断的有效性,能够提前数小时甚至数天预测到围岩的异常变形,预警准确率达到较高水平,一般在80%以上。在灾害预防层面,有效降低了隧道坍塌、突水突泥等灾害事故的发生概率,极大地减少了工程损失和人员伤亡风险。

5 整合应用面临的挑战与问题

5.1 数据融合的复杂性

隧道雷达数据和自动化预警系统数据具有不同的物理意义、数据格式和时空分辨率。例如,隧道雷达数据是基于电磁波反射的图像数据,反映围岩内部结构的空间分布;而自动化预警系统数据多为时间序列的物理参数数据,如位移、应力随时间的变化^[9]。将这两种类型的数据进行融合需要克服数据格式转换、空间坐标匹配、数据权重分配等诸多难题,目前的融合算法还存在一定的局限性,在复杂地质条件或多源数据干扰情况下,融合效果有待进一步提高。

5.2 系统兼容性问题

隧道雷达设备和自动化预警系统往往由不同的厂家生产,其硬件接口、通信协议、软件平台等存在差异,导致系统集成时出现兼容性问题。例如,数据传输速率不匹配可能造成数据丢失或延迟;软件平台不兼容使得数据无法直接共享和交互处理,需要进行大量的二次开发工作。这不仅增加了系统整合的成本和难度,也影响了系统的稳定性和可靠性。

6 整合应用的未来展望

6.1 技术改进方向

6.1.1 新型传感器与雷达技术研发

开发更适应复杂地质环境的新型传感器,如具有更高灵敏度、抗干扰能力更强的位移传感器、应力传感器等,提高自动化预警系统的数据采集精度^[10]。同时,研究新型隧道雷达技术,如多频多极化雷达技术,能够在一次扫描中获取更多关于围岩的信息,提高雷达对不同地质体的识别能力和探测深度与分辨率的平衡性能。

6.1.2 智能化数据处理与分析算法

引入人工智能和深度学习算法,如神经网络、支持向量机等,对隧道雷达与自动化预警系统的数据进行智能化处

理和分析。这些算法能够自动学习数据特征和规律,提高数据融合的准确性和对围岩状态判断的可靠性。例如,利用深度学习算法对雷达图像数据和传感器时间序列数据进行联合分析,实现更精准的围岩稳定性预测和灾害预警。

6.2 在隧道工程安全保障中的作用展望

随着隧道雷达与自动化预警技术整合应用的不断完善,其在隧道工程安全保障方面将发挥更大的作用。在隧道设计阶段,能够为设计人员提供更详细准确的围岩信息,优化隧道支护结构设计,降低工程成本。在施工阶段,可实现对围岩的实时、全方位监测与预警,有效预防各类灾害事故的发生,保障施工人员安全和工程进度。在运营阶段,持续监测隧道围岩的长期稳定性,及时发现潜在安全隐患并进行维护处理,延长隧道使用寿命,确保隧道运营的安全与畅通。

7 结论

隧道雷达与自动化预警技术的整合应用在围岩监测领域已经取得了一定的成果,在不同地质条件下的隧道工程中发挥了重要作用,有效提高了围岩监测的准确性、实时性和预警能力,为隧道工程安全提供了有力保障。然而,目前仍面临数据融合复杂、系统兼容性问题和专业人才短缺等挑战。展望未来,通过新型传感器与雷达技术研发以及智能化数据处理与分析算法的应用,有望克服这些挑战,进一步提升整合应用的效果,使其在隧道工程安全保障中发挥更为关键的作用,推动隧道工程建设向更安全、高效、智能的方向发展。

参考文献

- [1] 冯盘园,许立本.隧道变形监测基准网稳定性分析研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(11):194-196+200.
- [2] 古世煌,张静华,宁进进.深中通道沉管隧道最终接头基槽回淤监测及分析[J].中国港湾建设,2024,44(11):31-37.
- [3] 李术才,张庆松,刘人太,等.隧道超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
- [4] 刘铁,张顶立,陈铁林,等.隧道围岩变形预警系统研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):350-357.
- [5] 宋显辉,李卓球.隧道围岩稳定性监测技术现状与发展趋势[J].土工基础,2018,32(1):39-42.
- [6] 王梦恕.中国隧道及地下工程修建技术[J].中国工程科学,2010,12(5):44-50.
- [7] 周黎明,肖国强,尹健民.岩土工程安全监测技术研究进展[J].岩土力学,2011,32(2):353-361.
- [8] 朱合华,闫治国,邓涛,等.智慧隧道发展现状与展望[J].地下空间与工程学报,2021,17(1):1-14.
- [9] 赵永辉,胡俊,彭苏萍.隧道地质雷达探测技术现状与进展[J].物探与化探,2017,41(1):1-10.
- [10] 中华人民共和国交通运输部.公路隧道施工技术规范(JTG/T 3660-2020)[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.