

智能锚杆在边坡安全监测中的技术优势与应用前景

米 红, 杨芯妮, 覃廖林, 蒋亚琪

广西民族大学建筑工程学院, 广西 南宁

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月21日; 发布日期: 2026年7月31日

摘 要

传统边坡支护与锚固质量检测技术存在经验化静态设计、运维反馈不及时、复杂地质条件适配性差等问题。为解决以上问题, 本文以智能锚杆为中心进行研究, 系统解析其工作机制与核心技术特点, 在与传统监测技术对比分析的基础上, 探讨其工程应用瓶颈, 以及内在制约, 并展望未来发展路径与改进方向。

关键词

边坡监测, 锚杆, 物联网, 岩土体 - 锚杆界面相互作用

Technical Advantages and Application Prospects of Smart Anchor Bolts in Slope Safety Monitoring

Hong Mi, Xinni Yang, Liaolin Qin, Yaqi Jiang

School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi Minzu University, Nanning Guangxi

Received: June 29, 2026; accepted: July 21, 2026; published: July 31, 2026

Abstract

Traditional slope support and anchorage quality detection technologies suffer from problems such as empirical and static design, untimely operation and maintenance feedback, and poor adaptability to complex geological conditions. To address these issues, this paper focuses on the intelligent anchor bolt, systematically analyzes its working mechanism and core technical characteristics. On the basis of comparative analysis with traditional monitoring technologies, this paper discusses the engineering application bottlenecks and internal constraints of intelligent anchor bolts, and prospects their future development paths and improvement directions.

文章引用: 米红, 杨芯妮, 覃廖林, 蒋亚琪. 智能锚杆在边坡安全监测中的技术优势与应用前景[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 195-201. DOI: 10.12677/hjce.2026.157192

Keywords

Slope Monitoring, Anchor Bolt, Internet of Things (IoT), Rock Soil Mass-Anchor Bolt Interface Interaction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受制于传统技术与经济效益的限制,传统监测方式无法全面且及时地监测各类边坡,但随着传感器、材料等基础部件和技术的发展进步,有人研发出结构支护与实时监测一体化的智能锚杆,相较于传统锚杆,此类智能锚杆内置高灵敏度的压力传感器,可以捕捉锚杆实时受力数据,如监测时间长久可根据数据分析出锚杆形变与边坡形变之间的关联,即基于锚杆与岩土体之间的力学关系推导出边坡整体稳定性,如有必要还可增设温度传感器等,实现多维监测,突破传统监测静态滞后等问题。

2. 边坡监测技术现状分析

2.1. 传统监测技术的现状及局限性

传统的边坡监测技术主要通过现场的一个勘察和布设监控仪器,并针对不同的监测对象进行一个数据收集,并通过数据分析处理和决策这一流程,实现对边坡稳定性的一个状态评价。监测手段主要包括有:

- 1) 人工监测。人工勘察主要依靠实地目视观察结合监测仪器设备辨别边坡地表变形痕迹。
- 2) 大地监测。在需要监测的边坡表面安装各类监测设备如:全站仪、经纬仪,通过周期性的方式获取位移信息,以此实现对边坡规律进行定量分析与趋势研判。具体监测流程如图 1 所示。

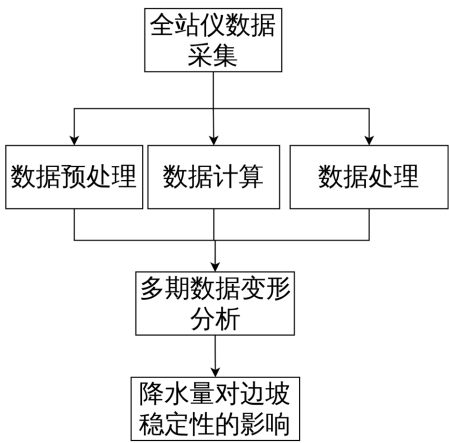


Figure 1. Total station monitoring mechanism
图 1. 全站仪监测机制

但其弊端与局限性亦较为明显,主要包括:

- 1) 工作量较大,耗时耗力,依赖人员经验。需要监测人员到现场进行数据采集,且多数边坡位置偏

远、地形陡峭复杂,存在显著的人员安全风险。

2) 监测不连续,受技术限制,现场多数监测设备无法长久续航坚持,易受环境条件与卫星的干扰,进而导致测量的连续性与数据准确性受到严重影响。

总体而言,传统边坡监测技术仍存在许多有待解决的问题[1]。

2.2. 现有智能化监测技术的现状及局限性

近年来,随着数据采集的方式以及通信技术、人工智能的迅速发展,边坡监测领域迎来了跨越式进步。图2系统梳理了现有智能化监测技术的流程,覆盖数据采集、处理与变形分析等环节。

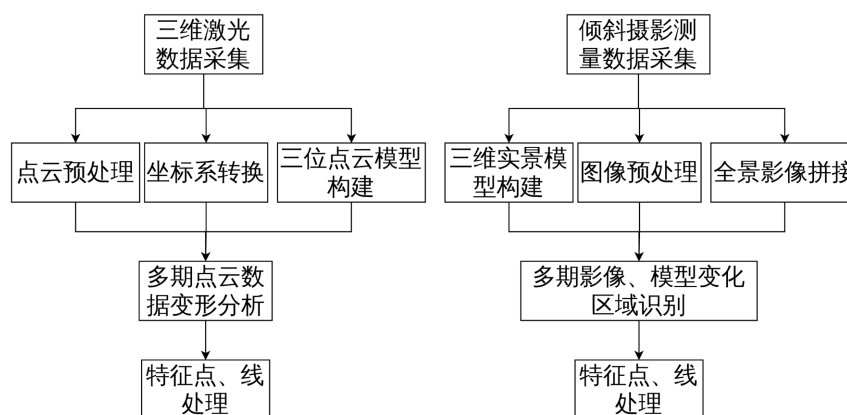


Figure 2. Existing smart monitoring
图2. 现有智能化监测

雷达监测具有远距离遥测、覆盖范围广、受气象环境影响较小、监测精度高等特点。地基合成孔径雷达技术则是将星载、机载合成孔径雷达地面化的产物。其基本原理是小孔径天线沿着一定轨迹运行,以达到虚拟增大天线孔径,获取角度向分辨能力的目的[2]。

无人机测量技术主要利用无人机搭载高分辨率相机对边坡区域进行空中航拍,结合空中三角测量等技术实现三维重建。无人机可利用空中优势进行测量,该技术能够快速覆盖大范围区域,尤其适用于人工难以到达的危险区域[3]。

尽管上述新型监测技术可有效提升监测效率,但从技术验证到大规模的工程落地,仍需要跨越诸多技术与实践难关,主要包括以下几方面:

1) 上述新型技术都侧重于表面或浅层的边坡信息获取,难以深入到内部检测边坡的应力形变状态,以及细微裂缝萌生的瞬间。边坡破坏往往始于内部深层的剪切带或软弱夹层,而上述技术存在明显的滞后。如果仅凭表面数据,难以在灾害发生前作出精确的早期预警[4]。

2) 边坡灾害常发生在极端天气,激光与无人机在此刻难以有效发挥作用,而边坡含水量又是导致边坡滑坡的主要因素之一,难以确保关键时刻监测系统有效监测与数据有效采集。

2.3. 传统锚杆锚固质量检测技术现状与局限性

在边坡防护中,锚杆支护是最为常见的一种支护形式,其锚固质量直接关系到边坡的整体稳定性。由于锚杆主要安装在岩石内部,其自身的变形以及受力状态难以判断,在锚杆失效之前难以作出准确的判断,故需要定时检测[5]。现有方式有:

1) 传统人工观测。人工观测主要依靠人工观察锚杆外部端是否出现锈蚀、断裂,并通过敲击声判断

锚杆及其锚固状态。

2) 有损检测。常见的有损检测除拉拔实验检测外, 以及抽芯取样检测, 但破坏性极强, 且只能抽取少量的锚杆作为试样。

3) 无损检测。传统锚杆检测以拉拔法、钻孔法为主, 属于破坏性试验, 操作繁琐, 仅适用于抽查, 存在工作量大、成本高、周期长、问题发现滞后、补救不及时等缺陷。

综上, 传统边坡监测技术、现有智能化监测手段及锚杆质量检测方法均存在共性局限: 表面化、离散化、滞后性。传统锚杆作为被动支护构件, 其内部状态与支护效能难以有效感知评估。

上述缺陷催生兼具支护与原位实时感知功能的新技术需求, 智能锚杆技术成为解决该问题的关键技术路径。该技术通过将传感器植入支护结构, 实现边坡深层力学状态与支护体系性能的直接连续监测, 构建“锚杆状态-边坡状态”监测链路。

3. 智能锚杆的基本结构与工作原理

3.1. 智能锚杆的基本结构

智能锚杆是一种以支护边坡岩土体为基本功能, 以实时监测结构与环境状态为核心特征的新型边坡安全监测技术。其基本结构可归纳为以下四个核心组成部分: 锚杆本体、传感器系统、数据采集与传输模块及远程监控平台。

要实现对锚杆的应力监测, 判断出锚杆各个截面的应力应变。需要本体在采取高强度钢材或复合材料的基础上, 嵌入或布设传感系统与杆体同步监测杆体受力形变及温湿度等环境参数, 采集到的数据利用 LoRa、5G 等无线传输技术等将数据从采集模块传至监控中心, 从而实现从感知到预警的监测, 如图 3 所示[6]。

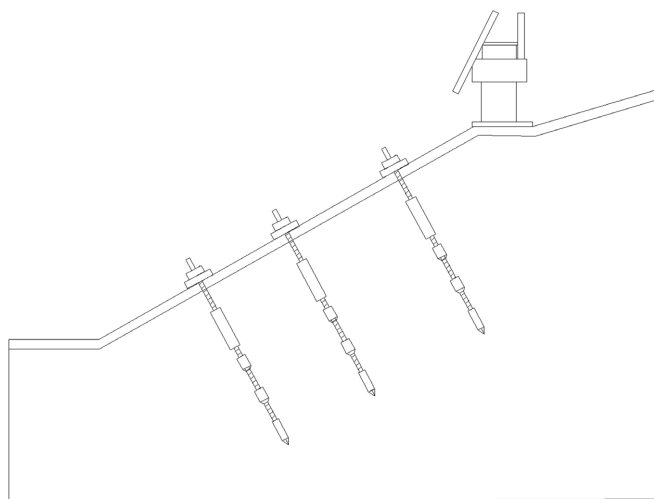


Figure 3. Smart anchor bolt implanted into the roil soil
图 3. 智能锚杆植入岩土中

3.2. 智能锚杆的工作原理

智能锚杆的原理在于将压应力传感技术与锚杆结合, 设计出基于压应力传感的锚杆, 实现对锚杆轴力的监测, 从而了解锚杆所处承载环境。贴在锚杆上的压应力传感器, 记录锚杆工作后产生拉伸形变与弯曲形变等数据, 建立模型, 绘制弯矩曲线与剪应力曲线, 通过计算得到锚杆轴向拉力、弯矩、剪切应力等一系列锚杆参数, 进而了解当前边坡的状态。其中数学原理为其原始信号为电阻变化率 $\Delta R/R$, 根据

应变效应公式 $\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$ (K 为应变片灵敏系数), 即可直接求得测点应变 ε 。

通过深入研究边坡滑坡机制, 建立边坡有限元模型, 可揭示锚杆应变与边坡失稳过程的关联性[7]。王桂萱等[8]在其研究中, 基于《建筑边坡工程技术规范》GB 50330-2013 相关原则建立了边坡预警机制, 对边坡预警分级标准给出的对应锚杆监测应变阈值分别为 195.12×10^{-6} 、 1212.15×10^{-6} 、 1236.92×10^{-6} 。

4. 智能锚杆在边坡领域的技术优势

4.1. 智能锚杆监测的技术优势

1) 高精度与实时反馈

智能锚杆借助光纤传感技术能够精准获取边坡应力的情况。FBG 智能锚杆测点的波长变化的量和受力大小存在明显的线性的关系, GNSS 技术的精度处在 1 到 5 厘米的范围, 而智能锚杆的监测精度比 GNSS 技术高十倍, 能够探测到细微的形变。

2) 复杂工况下的稳定表现

相比于传统的电子机械为主, 甚至是靠人工观测的一个边坡监测, 基于光纤光栅原理制造的传感器, 通过测量光波的长度, 判断外界的物理量。面对恶劣环境具备适应强、抗电磁干扰能力强、精度高等优点, 且具备应力自动监测功能, 可实时进行数据采集。

3) 支护 - 感知一体化

对于智能锚杆而言, 多源数据感知融合在其中起非常重要的作用, 可以用来构建立体的边坡稳定分析网络。具备多元监测型号的智能锚杆, 可以监测锚杆应变、温度、轴力等, 并在此基础上结合岩土力学构建预警系统[9]。

4.2. 智能锚杆在边坡支护领域的技术优势

1) 支护与监测一体化设计的核心价值

智能锚杆在其整个生命运行周期中, 凭借其多参量监测能力, 能够提供全面的数据, 帮助监测人员了解支护质量。这种综合性监测更有助于判断锚杆植入的健康状况(见表 1), 及时采取预防措施, 为边坡防护提供有力支持。

Table 1. Comparison of traditional testing and smart monitoring
表 1. 传统检测与智能监测比对

检测指标	传统检测方法(应力波/拉拔试验)	智能锚杆技术(FBG/FRP)
检测覆盖率	抽样检测(5%~10%)	全数检测(100%)
检测参数	长度误差±5%、密实度定性分级	轴力分布(±2%精度)、剪应力梯度(0.1 kN/m)
数据连续性	单次离散数据点	全长连续应变场
环境干扰抗性	受温度/湿度影响大(误差 > 10%)	内置温度补偿

2) 支护体系长期性能的动态评估

智能锚杆在其整个生命运行周期中, 凭借其多参量监测能力, 能够提供全面的数据, 帮助监测人员了解支护质量。利用机器学习算法创建模型, 该系统能够准确识别锚杆断裂、界面滑移等失效类型, 设计分层报警(详见表 2) [8]。

Table 2. Slope warning levels based on anchor bolt monitoring
表 2. 锚杆监测的边坡预警分级

边坡稳定系数 F_s	锚杆轴向应变 ε_s	边坡稳定性状态	预警分级
$F_s < 1.05$	$\varepsilon_s > \varepsilon_{1.05}$	不稳定	红色危险
$1.05 \leq F_s < 1.10$	$\varepsilon_{1.05} \geq \varepsilon_s > \varepsilon_{1.10}$	欠稳定	橙色警告
$1.10 \leq F_s < F_{st}$	$\varepsilon_{1.10} \geq \varepsilon_s > \varepsilon_{st}$	基本稳定	黄色异常
$F_s > F_{st}$	$\varepsilon_s \leq \varepsilon_{st}$	稳定	绿色安全

4.3. 智能锚杆的综合优势

综上所述，智能锚杆在边坡工程当中具有非常明显的优势之处。

- 1) 智能联动运用 AI 算法进行动态的锚固状态评估，一旦出现异常状况便自动启动分级的预警机制。
- 2) 深部方面的感知情况，对于锚固段和深部部分岩土体之间的相互作用来进行直接的监测，从而填补了地表监测所存在的盲区情况[10]。
- 3) 功能上的整合就是把支护和检测结合，这样不仅可以精简施工的复杂度和成本，还可以保证在全天候、长时间的恶劣环境之下数据是连续可靠的[11]。

5. 挑战与未来发展方向

5.1. 传感器长期稳定性问题

传感器在整体设计过程中需要长期稳定，但实际使用中需面临更为复杂的环境，比如气温骤变等特殊情况，叠加长年累月的数据偏移，最终导致传感器出现差错。此外，在施工期间导致的设备震动或者撞击也会降低传感器使用寿命，影响数据采集的连续性与稳定性。而 FBG 光纤光栅传感器由于材料结构稳定不易损坏且结构简单，所以寿命长且不会容易受到外部环境的影响，是解决传感器长期稳定性的主流方向之一[6]。

5.2. 多参数协同分析的复杂性

传统监测对应力、形变、温度等物理参数的监测相对割裂，无法形成统一的系统分析。搭配光纤光栅传感器智能锚杆可以实现持续性的监测边坡的形变、锚杆的内力、温度、边坡的土压力等数据，但如何将这些数据协同分析，避免传感器在数据格式、采样频率和精度上不一致，仍需进一步探索。其中神经网络是目前最具代表性的一种方法。该算法通过构建多层非线性映射，能够自动挖掘应力、温度、孔隙水压力等多参数之间的隐性关联。其潜力在于无需预设精确的物理力学模型，即可处理海量异构数据，实现复杂环境下的多参数融合与长期变形趋势预测；然而，其局限性在于需要庞大且高质量的历史标注数据(如真实的滑坡样本)进行训练，且模型存在“黑盒”特性，缺乏明确的物理力学解释，这在要求高可靠性和可解释性的工程安全预警中是一大挑战。

5.3. 成本控制与规模化应用

目前，智能锚杆在初期的投资较高，传感器及定制化数据处理系统，这在一定程度上限制了智能锚杆在市场上的大规模推广和应用。实际上从整体看系统可以远程传输和监测，无需人员亲临现场，实现远程监控、实时预警。减少了传统监测设备的密集布置和维护工作，降低了后期维护系统成本。未来需要通过标准化生产模块设计及简化系统集成，来降低整体成本。

6. 结论

本研究系统阐述了传统边坡监测技术与现代智能监测技术的现状以及局限性，并分析了智能锚杆的技术架构、应用范围，探讨了现存的问题和技术发展轨迹。伴随着传感器技术和人工智能技术的不断发展，该领域将朝着更精准、高效、智能的方向迈进，为智能装备制造业的高质量发展提供有力支撑。

回顾智能锚杆在边坡防护的应用研究，目前锚杆在实际实践中仍需解决一些问题，以提高其经济性与实用性，主要结论与展望如下：

- 1) 今后边坡监测将趋向于智能化、信息化、无损化，智能锚杆得益于其实时、连续的独特优势，应用将越来越广泛。
- 2) 随着深度学习算法的不断发展与边坡监测数据的不断积累，其适用性和识别精度的独特优势将逐步超越传统的边坡监测方式。

基金项目

广西民族大学自治区级大学生创新训练项目资助：数智锚杆－智能化锚杆领域开拓者(S202410608157)。

参考文献

- [1] 王东, 龚剑, 姜帆. 航道护岸边坡监测技术及设备研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(7): 47-49.
- [2] 陈涛, 郭浩宇, 伊孜哈尔, 等. 地基合成孔径雷达在露天矿边坡监测预警中的应用[J]. 露天采矿技术, 2024, 39(5): 5-8.
- [3] 边庆栋, 叶龙生. 测绘无人机在抽水蓄能电站建设领域的应用[J]. 人民黄河, 2026, 48(S1): 162-163.
- [4] 梁冠亭, 肖开乾, 张兵. 考虑土层剪切模量径向变化的锚杆受力变形特性分析[J]. 交通科技, 2018(4): 17-21.
- [5] Cerek, K., Dao, D.A., Hadjiloo, E. and Grabe, J. (2026) Development of Neural Network-Based Surrogate Models in Geotechnics: A State-of-the-Art Review. *Machine Learning and Data Science in Geotechnics*, 2, 135-152. <https://doi.org/10.1108/mlag-04-2025-0011>
- [6] 付宏伟. 基于光纤光栅原理的智能锚杆监测系统研发[J]. 机械管理开发, 2023, 38(11): 204-205.
- [7] 于英霞, 孙倩毅, 金春龙, 等. 降雨作用下铁路砂岩夹泥岩边坡稳定性分析与支护措施研究[J/OL]. 铁道标准设计: 1-11. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202512290003>, 2026-06-30.
- [8] 王桂萱, 黄平, 赵杰. 锚杆支护边坡预警阈值研究及智能监测系统开发[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(4): 668-675.
- [9] 刘琪. 边坡加固与监测中的智能 FRP 锚杆应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [10] 彭跃金, 李青锋, 邓弘哲, 等. 基于同步监测的锚杆受力监测系统的设计[J]. 工矿自动化, 2019, 45(5): 92-95.
- [11] Polo Salinas, J., Marquina Araujo, J.J. and Cotrina Teatino, M.A. (2024) Uncertainty in Underground Mining Operations: A Bibliometric and Systematic Literature Review Analysis. *World Journal of Engineering*, 22, 1328-1343. <https://doi.org/10.1108/wje-07-2024-0388>