

高边坡GNSS自动化监测技术应用

庞靖鹏

四川伟程勘测服务有限公司 四川达州 635000

摘要: 城市化建设加快, 常见开挖对高边坡工程变形行为的影响, 本文整合卫星导航定位、云解算和可视化等前沿技术, 打造了基于GNSS的高边坡自动化监测系统。运用该系统对某工程建设项目边坡位移变形进行实时动态监测, 并借助全站仪对监测成果进行检校。结果显示, 该系统在平面位移监测精度较高, 垂直方向虽稍逊一筹, 但仍能满足边坡长期监测要求。相较于传统人工监测, 这套自动化监测系统优势明显。它可实现全天候实时监测, 高频次采集数据, 直观呈现边坡位移变形特征, 还能精准预测变形趋势, 为边坡稳定性分析提供可靠数据。

关键词: GNSS; 位移变形; 自动化监测系统; 高边坡

引言

近年来, 北斗导航卫星定位技术得到了跨越式的进步发展, 在各个领域中的应用普及愈加成熟, 尤其是在国土地灾、高风险边坡安全监测领域, 得到了较为广泛的应用^[1]。随着北斗导航卫星定位技术、物联网传感技术以及无线通信技术的发展, 以GNSS为基础的自动化监测系统逐渐应用到变形监测中去^[2], 与传统人工手持全站仪、水准仪、RTK等监测方法相比, 以GNSS为基础的监测系统具有较高的便捷性, 监测数据实时性高, 通过现场踏勘, 在变形风险较高区域布设安装GNSS监测站, 获取边坡原始监测数据, 利用无线通讯技术将监测数据进行远端发送, 由云网关对原始数据进行解析^[3], 经数据平差计算处理后, 生成高精度边坡变形监测成果, 并通过自动化监测管理云平台将监测数据进行可视化呈现。GNSS边坡自动化监测系统监测频率较高, 数据时效性较强^[4], 能够在第一时间获取到边坡变形情况, 当变形超限时, 自动化监测系统能够以短信、邮件等多种方式将超限预警信息推送给相应负责人, 力求将边坡风险降至最低的程度。

本次研究以某工程建设项目边坡位移变形为对象, 运用GNSS自动化监测系统实施实时动态监测。研究分析了边坡自动化监测技术原理和该系统架构, 还采用传统人工监测方法复核数据, 对比验证GNSS自动化监测系统在边坡安全监测中的可靠性, 为边坡监测提供参考。

一、GNSS自动化监测系统

1. 技术原理

高边坡位移自动化监测系统是以卫星导航定位系统为基础, 在边坡预先设定的位移监测点上安装高精度GNSS接收机, 获取边坡监测点变形数据, 并对其进行可

视化展示。边坡自动化监测系统集数据采集、传输、解析、展示于一体, 兼具数据超限预警功能, 全过程自动化运行, 无须人工干预, 从而实现对边坡位移变形的全天候、高频次、高精度自动化安全监测。

2. 系统架构

基于GNSS的边坡自动化监测系统是一个集硬件、软件于一体的复杂系统, 主要由硬件板块和软件板块构成。

硬件板块又包括传感器感知、数据采集、解析传输等子系统, 其主要功能是利用GNSS接收机进行边坡变形监测数据采集与传输^[5]。软件板块包括数据采集工作站软件、数据处理服务器软件、数据库服务器软件, 其主要功能是对现场采集的边坡监测原始数据进行专业数据处理、数据存储以及可视化数据展示^[6]。

3. 设计要求

(1) 高精度实时监测

边坡位移监测对于预防地质灾害具有举足轻重的意义。自动化监测系统必须具备实时监测边坡微小位移变化的能力, 这依赖于高精度传感器和先进的数据处理算法。高精度传感器能够捕捉到极其细微的位移变化, 而数据处理算法则对采集到的原始数据进行优化处理, 提高数据精度。系统还应支持监测数据的实时传输和展示, 使监测人员能够迅速获取边坡的最新状态信息, 及时发现潜在的安全隐患。

(2) 智能化和自动化

借助先进的机器学习和人工智能技术, 边坡位移自动化监测系统能够实现对监测数据的自动分析、处理和预警。通过预设的阈值和模型, 系统可以自动判断边坡位移是否超出安全范围, 并及时触发预警机制, 提醒监测人员采取相应措施。系统还应具备自动校准和自适应

能力，能够根据不同的边坡环境和监测需求进行自动调整，确保监测结果的准确性和可靠性。

(3) 易用性和可维护性

考虑到监测人员的专业背景差异，边坡位移自动化监测系统应设计简洁明了的操作界面，降低操作难度和学习成本，提供友好的用户体验。在系统维护和管理方面，应提供便捷的远程管理和故障排查功能，减少现场维护的频次和难度，提高系统的运行效率和稳定性。

二、工程概况

1. 项目简介

某工程建设项目处于达州老城区，周围存在多处高边坡，其中一处边坡最大高度达30m，地质条件极为复杂，包含多种岩石类型和软弱夹层。该边坡虽已进行防护处理，但受降雨、地震等因素影响，仍存在较大安全隐患，对周围建筑物构成严重威胁。

2. 监测系统布设

根据边坡的地形地貌和地质特征，通过现场详细踏勘，在边坡关键位置共布设了3个GNSS自动化监测站。为确保监测系统在复杂环境下稳定运行，采用太阳能与蓄电池结合的供电方式，保证系统持续供电。监测站安装时，严格按照规范要求进行，确保GNSS接收机的安装精度和稳定性。监测站与测区稳定位置处的基准点同步接收多卫星系统信号，通过对原始数据的平差计算处理，获取监测点的三维空间坐标，进而计算出边坡的位移变化。

3. 边坡变形特征分析

对监测数据进行深入分析发现，在雨季期间，边坡位移变形明显加剧。其中，监测点A在2024年10月的一次强降雨过程中，平面位移变形速率最高达到12mm/d，垂直位移变形速率最高达到16mm/d。这表明降雨对边坡稳定性产生了显著影响，雨水的渗入导致岩土体强度降低，增加了边坡的下滑力。通过对监测数据的长期分析，还发现边坡位移变形呈现出季节性变化规律，雨季变形较大，旱季相对稳定。

4. 监测数据可靠性验证

为验证GNSS自动化监测数据的可靠性，采用全站仪定期对监测点进行测量。将全站仪测量数据与GNSS监测数据进行对比分析，结果显示在平面位移监测方面，两者数据基本一致，差值在1mm左右；在垂直位移监测方面，GNSS监测数据与全站仪数据差值在3-4mm之间。虽然垂直方向监测精度稍弱，但仍能有效监测边坡垂直方向的变形趋势，满足边坡工程长期监测的需求。

5. 系统应用效果评估

通过在某工程建设项目边坡监测中的应用，基于GNSS的自动化监测系统展现出了强大的优势。该系统实

现了对边坡位移的实时、动态监测，能够及时发现边坡的异常变形。与传统监测方法相比，大大提高了监测效率和数据准确性。系统的预警功能能够在边坡变形超过安全阈值时及时发出警报，为工程安全提供了有力保障。同时，监测数据的可视化展示也方便了管理人员对边坡状态的直观了解和分析。

三、GNSS自动化监测系统性能评估

1. 精度评估指标

(1) 平面位移精度

平面位移精度是衡量GNSS自动化监测系统性能的重要指标之一，通常用监测点在平面坐标系中的X、Y方向位移测量误差来表示。在实际应用中，通过与高精度测量仪器（如全站仪）测量结果进行对比，计算两者在相同监测点、相同监测时刻的平面位移差值的均方根误差来评估平面位移精度。误差值越小，说明系统的平面位移监测精度越高。

(2) 垂直位移精度

垂直位移精度反映了系统对边坡高程变化的监测能力，一般以监测点的高程测量误差来衡量。同样采用与全站仪等高精度测量设备测量结果对比的方法，计算垂直方向位移差值的误差。由于受到大气折射、多路径效应等因素的影响，GNSS在垂直方向的测量精度相对平面方向略低，但在边坡监测中，仍需满足一定的精度要求，以准确监测边坡的垂直变形情况。

(3) 定位精度稳定性

定位精度稳定性是指系统在不同时间、不同环境条件下测量同一监测点时，定位精度的波动程度。通过长期连续监测同一监测点，统计其位移测量误差的变化情况来评估定位精度稳定性。稳定的定位精度对于准确分析边坡变形趋势至关重要，如果定位精度波动较大，会给边坡变形分析带来误差和不确定性。

2. 影响精度的因素分析

(1) 卫星信号干扰

卫星信号在传播过程中会受到多种因素的干扰，如电离层延迟、对流层延迟、多路径效应等。电离层和对流层中的电子密度和大气参数会随时间、地点和气象条件发生变化，导致卫星信号传播速度和路径发生改变，从而产生测量误差。多路径效应是指卫星信号经周围物体反射后被接收机接收，与直接信号相互干涉，使测量结果产生偏差。在边坡监测现场，建筑物、山体等物体都可能引发多路径效应，严重影响监测精度。

(2) 监测环境因素

监测环境对GNSS监测精度也有显著影响。在山区等地形复杂的区域，信号容易受到山体遮挡，导致卫星

信号接收不良,甚至出现信号失锁的情况。恶劣的气象条件,如暴雨、浓雾、强风等,会影响卫星信号的传播质量,增加测量误差。此外,电磁干扰源,如高压线、通信基站等,也可能对GNSS信号产生干扰,降低监测精度。

(3) 仪器设备误差

GNSS接收机本身的精度和性能直接影响监测结果的准确性。不同型号的接收机在测量精度、信号处理能力等方面存在差异。接收机的时钟误差、天线相位中心偏差等仪器设备误差也会导致测量误差的产生。在选择GNSS接收机时,需综合考虑监测精度要求、监测环境等因素,选择合适的设备,并定期对仪器进行校准和维护,以减小仪器设备误差对监测精度的影响。

3. 提高精度的方法与策略

(1) 多卫星系统融合

为了提高卫星信号的接收质量和数量,增强系统的定位精度和可靠性,可采用多卫星系统融合技术。目前,全球主要的卫星导航系统有北斗、GPS、GLONASS、Galileo等,不同卫星系统的卫星分布和信号特性有所不同。通过同时接收多个卫星系统的信号,增加可见卫星数量,改善卫星几何分布,从而提高定位精度。

(2) 差分定位技术应用

差分定位技术是提高GNSS定位精度的有效手段。其基本原理是利用基准站和监测站之间的相对位置关系,通过差分计算消除或减弱卫星信号传播过程中的公共误差。常用的差分定位技术有实时动态差分(RTK)和网络实时动态差分(NTRIP)等。RTK技术通过在基准站和监测站之间建立数据链路,实时传输差分改正数,可实现厘米级的定位精度;NTRIP技术则利用互联网将基准站的差分数据传输给多个监测站,扩大了差分定位的覆盖范围,适用于大面积边坡监测。

(3) 数据处理算法优化

在数据处理过程中,采用先进的数据处理算法可以有效提高监测数据的精度。例如,卡尔曼滤波算法能够对监测数据进行最优估计,通过对测量噪声和系统噪声的建模和滤波处理,去除数据中的噪声干扰,提高数据的稳定性和准确性。小波分析算法则可以对监测数据进行多尺度分解,提取数据中的特征信息,更好地反映边坡的变形趋势。通过优化数据处理算法,能够在一定程度上弥补因卫星信号干扰和监测环境因素导致的精度损失。

四、结论与展望

1. 研究成果总结

本文对基于GNSS的边坡自动化监测系统进行了全面而深入的研究。从技术原理上看,GNSS通过卫星信号实现对边坡监测点的高精度定位,为位移监测提供了核心支

持。系统架构方面,硬件和软件板块相互协作,硬件负责数据采集与传输,软件实现数据处理、存储和展示以及预警功能,整体架构设计合理,满足边坡监测的实际需求。在工程项目应用中,通过实际案例的分析,验证了该监测系统在不同地质条件和工程环境下的有效性和可靠性。在精度评估方面,明确了精度评估指标,深入分析了影响精度的因素,并提出了有效的提高精度的方法和策略。

2. 未来发展趋势展望

基于GNSS的边坡自动化监测系统在保障边坡安全方面发挥着重要作用,随着技术的不断发展和创新,其在边坡监测领域的应用前景将更加广阔,为基础设施建设和地质灾害防治提供强有力的技术支持。

随着北斗导航卫星定位技术取得显著进展,空间位置获取精度大幅提升。本研究基于该技术,融合物联网传感、无线通信以及云解算等多种先进技术,紧密围绕高边坡监测的实际需求,构建了高边坡GNSS自动化监测系统。这一系统有效增强了边坡监测的准确性与实时性。

借助集成的北斗导航卫星定位技术,该系统能够精准测量边坡的位移、形变等关键参数,为科学评估边坡稳定性提供坚实的数据基础。研究中,利用高精度全站仪对系统监测数据进行校验,结果显示两者差异较小,有力证实了GNSS自动化监测系统在高边坡安全监测方面的可靠性。

展望未来,随着北斗导航卫星定位技术持续发展,GNSS自动化监测系统也将不断优化升级。这不仅会为边坡监测带来更精准、高效的解决方案,还能拓展应用至其他类似工程领域,为各类工程安全监测提供全方位的技术保障。

参考文献

- [1] 邵沛涵,高成发,金俭俭.北斗三号高边坡实时监测系统应用研究[J].测绘科学,2021,46(1):7-14,23.
- [2] 庞健.自动化监测系统在高危边坡监测工程中的应用[J].经纬天地,2019(2):70-73.
- [3] 崔春晓,朱自强,杨光轩,等.基于GNSS技术的排土场边坡监测及稳定性研究[J].中国矿业,2020,29(3):94-99.
- [4] 王豪威.基于GNSS的边坡自动化监测系统应用研究[J].地理空间信息,2022,20(4):172-174.
- [5] 孙威,朱成峰,张玉婷.基于GNSS的露天采场边坡监测系统构建[J].现代矿业,2022,38(6):213-215,219.
- [6] 钟小宇,衣瑛,亢建民,等.北斗GNSS技术在露天采场边坡监测中的应用[J].中国矿山工程,2022,51(1):56-60.