

GNSS 监测系统与徕卡 TM60 测量机器人在露天矿山边坡监测中的比较应用研究

陆森才 李良文

云南华联锌铟股份有限公司 云南 文山 663701

【摘要】：露天矿山边坡失稳是矿山安全生产的重大隐患，高精度、实时化的监测技术是预防边坡灾害的关键。本文以 GNSS（全球导航卫星系统）和徕卡 TM60 测量机器人为研究对象，系统阐述两者的监测原理，从精度、环境适应性、效率、成本及适用场景等维度进行对比分析，并结合实际露天矿山案例验证两种技术的应用效果。研究表明：GNSS 适合大范围、多点实时监测，徕卡 TM60 适合小范围、高精度重点区域监测，两者协同使用可实现边坡监测的“全域覆盖+局部精细”，为矿山边坡安全管理提供可靠技术支撑。

【关键词】：GNSS 监测系统；徕卡 TM60 测量机器人；露天矿山边坡监测；协同监测

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.082

1 引言

矿山生产工业场地、尾矿库坝体、露天矿山边坡等因生产活动导致地形失稳，地质条件变化等因素易发生滑坡、坍塌等灾害，据统计，全球每年因边坡失稳滑坡造成的经济损失超百亿元。传统人工监测（如全站仪人工测量）效率低、精度差，难以满足现代矿山的安全需求。近年来，GNSS 监测技术与测量机器人的快速发展为边坡监测提供了新方案：GNSS 监测技术实现了多点实时监测，测量机器人则凭借自动化高精度测量成为重点区域监测的核心设备。本文通过对比 GNSS 监测技术（华测 H3）与徕卡 TM60 测量机器人两种监测系统组成与原理、工作条件、数据采集流程与应用场景分析，为矿山边坡监测方案的选择提供参考。

2 GNSS 监测系统与徕卡 TM60 测量机器人

2.1 GNSS 监测系统组成及原理

2.1.1 GNSS 监测系统组成

GNSS 监测系统主要有三部分组成，分别是空间部分、地面控制部分、用户部分。空间部分主要是全球卫星星座或区域卫星星座，如美国 GPS（31 颗在轨）、中国北斗三号（3 颗 GEO+3 颗 IGSO+24 颗 MEO）、俄罗斯 GLONASS、欧盟 Galileo 等系统的卫星集群，功能主要是持续向地面发送包含卫星位置、时间、状态的导航信号，为监测提供基础数据；地面控制部分属于系统运行管理层，核心包含主控站、监测站、上传站，功能主要是确保卫星信号的准确性与可靠性，维护星座健康运行，校准系统时间与 UTC（国际协调时间）同步；用户部分属于终端监测应用层，组成主要是若干台 GNSS 接收机和数据解算、分析软件，功能主要是接收卫星信号并解算位置，结合监测需求完成数据采集、传输、分析与预警闭环。

从监测系统现场布设形式上，用户部分又分为基准站、监测站。基准站应建在位移监测区域以外稳定处，附近不应有大

面积水域或强烈干扰卫星信号接收的物体，避免多路径效应。并尽量靠近数据传输网络，以提供准确的位置参考和时间信号，支持全球定位系统的运行和准确性。它通过接收卫星信号，计算自身的准确位置，并将这些位置信息用作参考点，帮助提高其他 GNSS 接收设备的位置精度（见图 1）。监测站监测站建在被监测区域内，应布设在灾害体变形量较大、稳定性状态差处，主要职责是实时监测边坡位移、地面塌陷等地质灾害的发生和地面位移，且监测位置要保证搜星条件好、测点位置空旷、在 $\pm 15^\circ$ 高度截止角上空不能有成片障碍物，以便连续、自动、实时地采集被监测体的监测数据（见图 2）。



图 1 基准站



图 2 监测站

2.1.2 GNSS 监测系统原理

GNSS 监测原理是 GNSS 是基于卫星信号的三维定位系统，其核心是相对定位技术，通过基准站与监测站的协同观测消除公共误差（如卫星钟差、电离层延迟），获得高精度坐标。GNSS 监测主要有静态相对定位和 RTK 实时动态定位 2 种模式，静态相对定位是 GNSS 高精度监测的基础，基准站需布设在稳定区域，监测站布设在边坡关键位置；两者同时接收 ≥ 4 颗卫星信号，观测时间通常为 1-24 小时；数据后处理通过差分算法计算监测站坐标，精度可达毫米级，适用于周期性高精度

监测；RTK 实时动态定位则是基准站将观测数据通过无线通信发送至监测站；监测站结合卫星信号与基准站数据，实时解算坐标，更新频率为 1-10Hz，精度为厘米级，适用于边坡位移的实时预警，可快速捕捉突发变形。

2.2 徕卡 TM60 测量机器人组成及工作原理

2.2.1 徕卡 TM60 测量机器人组成

徕卡 TM60 是集自动化、高精度于一体的光学测量设备，核心技术为自动目标识别（ATR）与自动跟踪。徕卡 TM60 测量机器人的组成部分可分为核心测量单元、驱动与自动化单元、操作交互单元、数据处理存储单元、辅助功能单元及配套软件六大类。核心测量单元是负责高精度数据采集的核心模块，含角度测量系统、距离测量系统、望远镜模块；驱动与自动化单元负责实现自动瞄准与跟踪，包含压电陶瓷驱动系统、ATR 自动目标识别系统；操作交互单元负责用户控制与信息展示的界面，包含双面彩色触摸屏、物理操作部件；数据处理与存储单元负责数据处理、存储与传输，包含内置存储、扩展存储、通讯接口；辅助功能单元属于提升实用性与环境适应性的组件，包含激光对中、防护结构、电源系统；配套软件则是增强系统功能的外部支持。目的是在补全监测设备功能，实现多传感器数据兼容，数据分析与实时预警。以上组成部分共同支

撑了徕卡 TM60 的高精度、自动化、全天候监测能力，适用于桥梁、大坝、滑坡等工程结构的长期安全监测。

2.2.1 徕卡 TM60 测量机器人工作原理

在位移监测中，徕卡 TM60 测量机器人工作原理主要是自动化数据采集，又称为自动目标识别（ATR），利用内置数码相机拍摄监测区域，通过影像处理技术识别棱镜的形状和光斑，自动调整望远镜瞄准并锁定目标（3000m 内定位精度±1mm），解决高陡边坡人工瞄准困难的问题。通过自动目标识别（ATR）获取高精度的角度测量、距离测量数据，通过站点与后视点坐标解算出高精度三维坐标成果。通过时间设定，可实现连续监测，配合数据传输协议与位移分析方法可实现以下三个目标。一是可对比监测点的初始基准坐标与实时坐标，计算出水平位移（X/Y 方向）、垂直位移（Z 方向）的累积量和变化速率；二是对连续采集的数据进行统计建模，识别位移变化趋势（如匀速变形、加速变形），区分正常变形与异常变形，实现趋势分析；三是用户预设位移速率（如日变形>5mm）或累积位移阈值（如总变形>50mm），当监测值超过阈值时，软件自动发出声光/短信预警，提醒管理人员采取应急措施。

3 设备性能对比分析

3.1 设备优缺点与适用场景

表 1 设备性能对比表

对比维度	GNSS 接收机（华测 H3）	徕卡 TM60 测量机器人
优点	1.自动化程度高，支持连续/定期监测； 2.覆盖范围广，适合大面积边坡； 3.无需通视，地形适应性强（如复杂沟壑、植被覆盖区）； 4.全天候作业（除极端雷电天气）； 5.多星系统兼容（北斗、GPS、GLONASS 等）。	1.测量精度极高（角度 0.5"，测距 1mm+1ppm），适合毫米级变形监测； 2.自动跟踪目标，支持远程控制与无人值守； 3.数据可靠性强，适合重点危险区域； 4.可同时监测角度、距离、高程等多维度数据。
缺点	1.受遮挡影响大（高大树木/建筑遮挡时精度下降）； 2.单点相对精度略低于测量机器人； 3.静态观测需多台同步，动态 RTK 精度受基准站距离限制。	1.需严格通视，地形复杂/遮挡区域受限； 2.覆盖范围小（单台有效测程约 1-2km）； 3.受天气影响大（大雾、暴雨无法观测）； 4.设备价格昂贵。
适用场景	1.大面积边坡（监测面积>1km ² ）； 2.地形复杂/通视差的边坡（如深沟、密林边坡）； 3.二级/三级监测等级（依据《金属非金属露天矿山高陡边坡安全监测技术规范》）； 4.长期连续监测（如尾矿库、露天矿山边坡）；5.开阔无遮挡区域（如平原型边坡）。	1.小面积高精度监测（监测面积<1km ² ）； 2.一级监测等级（如滑坡体、危岩体、坝体等重点区域）； 3.毫米级变形监测（如高陡岩质边坡、隧道洞口）； 4.通视条件良好的边坡（如缓坡、平台型边坡）； 5.临时/应急监测（如爆破后边坡稳定性核查）。
投入成本	约 220 万元/km ²	通视条件良好时，1 台设备可覆盖 1-2km ² ，甚至更多。综合测算，1km ² 投入的监测费用小于 60 万元（每台设备约 50 万元，1km ² 监测点埋设费用有 10 万元，）。
维护成本	25 万元/年	5 万元/台/年
环境要求	天空条件：开阔无遮挡，遮挡物高度角≤15°（符合《GNSS 测量	通视条件：监测点与仪器间无遮挡（遮挡物高度角≤5°）；

	规范》)； 温度范围：-40℃~+60℃； 湿度范围：≤95%（无冷凝）； 电磁环境：距离高压输电线≥50m，距离无线电发射源≥200m。	温度范围：-20℃~+50℃；-湿度范围：≤85%（无冷凝）； 天气条件：无大雾（能见度>500m）、暴雨、大风（风速≤10m/s）； 振动环境：距离爆破区≥500m。
--	--	--

3.2 设备精度指标对比

表 2 设备精度指标对比表

设备型号	GNSS 接收机（华测 H3）	徕卡 TM60 测量机器人
精度指标	静态解算精度 平面：±(2.5+0.5*10-6D)mm， 高程：±(5.0+0.5*10-6D)mm； 动态解算精度 平面：±(8+1*10-6D)mm 高程：±(15+1*10-6D)mm	测角精度：0.5"（0.15mgon）/1"（0.3mgon）； 测距精度：棱镜模式单次测量 0.6mm+1ppm；无棱镜模式单次测量 2mm+2ppm； 棱镜测程（长距离模式）最远可达 12000m； 自动照准距离：3000m 小视场角分辨率：9.4'。

注：D 为观测距离（km）。

4 露天矿山边坡监测应用案例

4.1 工程概况

XX 露天矿山主采区为高陡边坡，高度达 360m，平均坡度 48°，地质构造以砂岩与泥岩互层为主，岩层界面倾角大，存在潜在滑坡风险。为保障矿山生产安全，需开展长期表面位移监测，监测区域覆盖边坡表面约 0.3km²，按《金属非金属露天矿山高陡边坡安全监测技术规范》布设 53 个位移监测桩，采用了徕卡 TM60 测量机器人进行监测。监测对象为边坡表面水平（X、Y 方向）及垂直（Z 方向）位移。

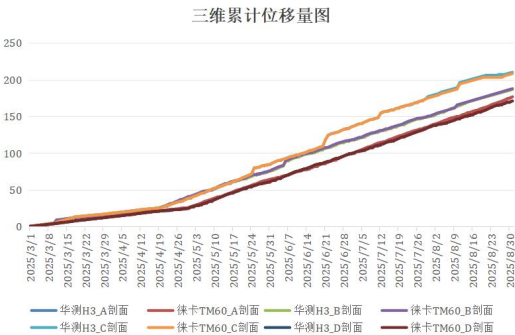
4.2 监测与分析目的

一是检验与持续跟踪位移桩三维位移，识别边坡变形趋势；二是对同一桩同步采用两种设备监测，分析数据差异及精度稳定性。

4.3 监测方案

为验证 GNSS 接收机（华测 H3）与徕卡 TM60 测量机器人的监测结果可靠性，在已有的监测桩的基础上从下到上选取了 4 个剖面的位移桩安装 GNSS 接收机进行监测对比分析，每个剖面 6 个位移监测桩。每个桩顶同步安装徕卡 TM60 配套棱镜、华测 H3 GNSS 天线，确保两种设备监测同一测点三维位移。监测方式采用在线监测，数据采集频率为每日采集一次，数据变化趋势分析主要通过坐标计算三维累计位移量，用三维累计位移量进行作图分析。

4.4 数据分析



通过对比分析，采用 GNSS 接收机(华测 H3)与徕卡 TM60 测量机器人监测边坡数据可达到毫米级监测，二者数据变化趋势较为统一，数据可靠性较高。针对该边坡的监测实验，主要可以得到以下几条结论：一是 C 剖面为高风险区域：位移量和增长速度均显著高于其他剖面，可能存在地质不稳定因素；二是监测设备一致性良好：华测 H3 和徕卡 TM60 在各剖面的监测结果趋势高度一致，数据可靠性高；三是该边坡位移增长呈线性趋势：所有剖面位移随时间基本呈线性增长，未发现明显的加速或减速异常；四是 B 剖面存在数据异常：3 月 11-12 日数据出现跳跃式增长（从 4.89 突增至 9.27），需要现场巡查边坡变化情况，确保边坡安全。

5 结论与展望

5.1 结论与展望

在高陡边坡监测工作中，边坡 GNSS 与徕卡 TM60 各有优劣：GNSS 擅长全域实时监测，自动化程度高，支持连续/定期监测，覆盖范围广，适合大面积边坡；且无需通视，地形适应性强（如复杂沟壑、植被覆盖区），接受卫星信号，具备全天

候作业（除极端雷电天气）；而 TM60 专注局高精度测量，适合毫米级变形监测，具备自动跟踪目标，支持远程控制与无人值守，数据可靠性强，适合重点危险区域，可同时监测角度、距离、高程等多维度数据，但使用时要求测站与监测点需要通视，在日常工作中，可能受地形条件、植被茂密程度、以及天气状况等自然因素的影响，导致监测数据不能有效采集，监测处于失控状态。因此，在工作中，需要结合现场环境、以及监

测区域的天气条件等因素，综合确定监测方案，必要时，可以考虑协同应用是最优方案：通过“GNSS 全域覆盖+TM30 局部精细”，可实现边坡监测的“广度+深度”结合。随着技术的发展，未来矿山边坡监测将向多技术融合方向发展，可结合 InSAR（合成孔径雷达干涉测量）、物联网、人工智能等技术，构建“天地一体化”监测系统，进一步提升灾害预警能力。

参考文献：

- [1] 《工程测量规范》（GB 50026-2020）.
- [2] 徕卡测量系统.徕卡 TM60 测量机器人技术手册[Z].2022.
- [3] 张正禄.工程测量学[M].武汉大学出版社,2019.