

基于 GNSS 的自动化监测技术在滑坡上的应用

Application of Automatic Monitoring Technology Based on GNSS in Landslide

张振威

Zhenwei Zhang

中国铁路设计集团测绘地理信息研究院 中国·天津 300000

Institute of Surveying and Mapping and Geographic Information of China Railway Design Group, Tianjin, 300000, China

摘要: 近年来,随着实时通讯技术的迅猛发展,滑坡监测也正在由非自动化向自动化方向转变。利用 GNSS 监测技术,结合实时通讯技术,对滑坡进行实时监测预警已经成为滑坡灾害防治的一个新方向。论文首先对 GNSS 相对定位技术原理进行了概述,然后通过具体工程实例,介绍滑坡自动化监测系统的监测内容和方法,并展示了自动化监测成果,最后将 GNSS 自动化监测数据与人工监测数据进行对比,证明了基于 GNSS 的自动化监测技术在滑坡监测领域实用性及可靠性。

Abstract: In recent years, with the rapid development of real-time communication technology, landslide monitoring is also changing from non-automation to automation. Using GNSS monitoring technology combined with real-time communication technology, the real-time monitoring and early warning of landslide has become a new direction of landslide disaster prevention. This paper first summarizes the principle of GNSS relative positioning technology, and then through concrete engineering examples, introduces the monitoring content and methods of landslide automation monitoring system, and shows the automatic monitoring results, finally the GNSS automatic monitoring data and manual monitoring data, proved the practicability and reliability based on GNSS automation monitoring technology in the field of landslide monitoring.

关键词: GNSS 技术; 滑坡; 自动化监测; 相对定位技术

Keywords: GNSS technology; landslide; automatic monitoring; relative positioning technology

DOI: 10.12346/se.v5i3.9238

1 引言

中国是一个多地貌国家,每年地质灾害频频出现,地质灾害对人民财产及生命安全造成了巨大的损害,其中山体滑坡最为严重,如何科学有效且及时地掌握滑坡体的细微变化,以达到提前准确预警,在滑坡灾害防治领域有着十分突出的现实意义^[1]。传统的监测方法是利用全站仪等仪器,测量人员到现场采集数据,对数据进行后处理,来判断滑坡体的状态,这不仅对测量人员人身安全存在一定的风险,而且存在一定的数据滞后性,不利于实时掌握滑坡体的动态。如今,监测自动化已成为趋势。论文将数据无线传输技术与 GNSS 监测技术相结合,对滑坡的自动化监测领域进行探讨。

2 GNSS 相对定位技术概述

利用 GNSS 进行滑坡监测是近几年才被普遍采用的,

GNSS 这一概念,它是由 GPS, BDS, GLONASS 和伽利略定位系统组成的统称,目前尚无统一确定类别。目前已有近 140 颗卫星参与 GNSS 系统的构成,其中中国新近建成的北斗导航系统已有 55 颗卫星在 GNSS 系统中工作^[2]。

2.1 GNSS 定位技术原理

按地面上有无多个基站可分为单点定位(又称绝对定位,如图 1 所示)与差分定位(也称相对定位,如图 2 所示)。单点定位技术以地球质点为核心,由至少四颗卫星来计算用户接收机与地球质点之间的绝对距离,它具有只需一台接收机即可工作的优点,从而可在交通领域进行大范围的定位和导航^[3,4]。差分定位技术是采用多个接收机同时接收卫星信号并由卫星信号推算两接收机间相对距离的技术,它通常由一个不动基站与多个可动接收机两部分组成。差分定位技术是一种高效的卫星定位方法,它是通过多个接收机和卫星来

【作者简介】张振威(1995-),男,中国河南开封人,硕士,助理工程师,从事铁路测量、工程测量及自动化监测研究。

实现定位，这样可以提高定位的准确性。目前差分定位技术已经广泛应用到地球动力学、大地测量、精密测量以及变形监测等方面。

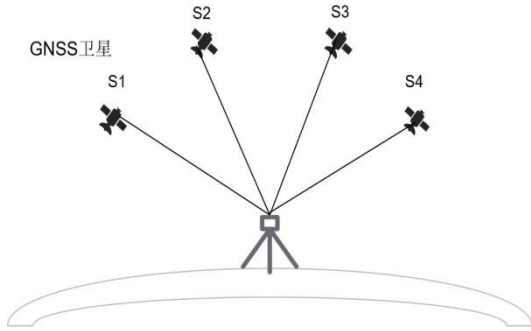


图 1 单点定位技术

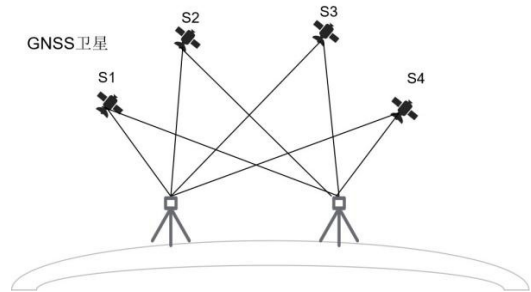


图 2 差分定位技术

2.2 GNSS 在滑坡中应用原理

单点定位技术进行滑坡监测时无法达到精度要求，因此滑坡监测时往往采用差分定位技术进行监测^[5]。布置方式为：在距滑坡不远一稳定区域内放置 1 台 GNSS 接收机为基站，滑坡区域内设置多台 GNSS 接收机为滑坡位移监测点，在监测期间可以得到任意时刻滑坡监测点到 GNSS 基站之间的距离，从而可以计算出滑坡在监测期间产生的位移，GNSS 基站与 GNSS 监测点布置示意图如图 3 所示。

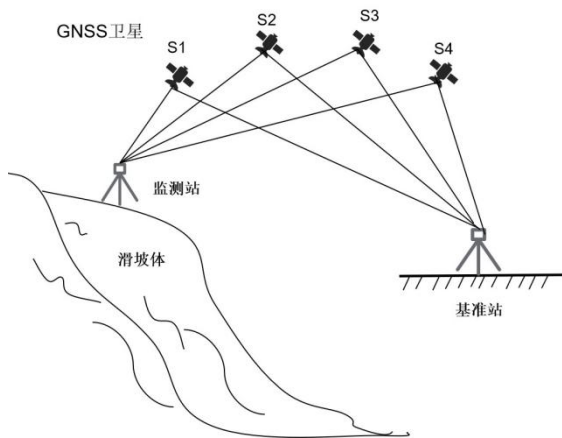


图 3 滑坡差分定位示意图

3 滑坡监测技术分类

对于滑坡体的监测，分为两个方面，一方面是对灾害体

区域表面的监测，一种是对灾害体内部变形情况的监测^[6]。对于滑坡变形，最明显的特征是地表滑动变形，所以在滑坡体表面安装监测设备，监测地表滑动即可判断滑坡体当前的稳定状态。所以，研究将 GNSS 相对定位技术与发达的通讯设备一起运用，构建自动化地表监测系统，并应用到滑坡监测中具有重要意义。

传统的高精度滑坡监测技术如经纬仪，水准仪和全站仪等，尽管监测手段都能保证很高的精度，但是都有明显缺陷：一方面这类监测方法都需要花费昂贵的人力成本，且易受天气和地形等条件制约；另一方面，要求测量人员在野外收集数据后对其进行后期处理，这既增加测量人员的内业工作量又具有数据滞后性，无法实时地反映滑坡体形变特征，而当前新出现的合成孔径雷达技术（InSAR）也存在此问题。表 1 根据监测周期，精度，滞后性，自动化程度和成本等因素对各种监测技术方法进行比较，可得 GNSS 较其他变形监测技术有不需通视和全天候监测等优点。在 GNSS 接收机不断革新和现代无线通信技术不断推广的背景下，GNSS 自动化监测技术逐步被运用于各监测领域。

表 1 不同形变监测方法特点对比

技术方法	周期	精度	滞后性	自动化程度	成本
InSAR	8 天以上	毫米~厘米级	数天	高度自动化	数十万级
GNSS	全天候	毫米~厘米级	无	全自动化	数万级
全站仪	依外业计划	毫米级	小时以内	依赖人工	数万级
激光扫描	依外业计划	毫米~厘米级	小时以内	依赖人工	数十万级

所以，开展面向连续，实时和动态情况下 GNSS 高精度定位方法的研究，具有重要的社会经济和学术应用价值。

4 实例分析

4.1 测区概况

某滑坡为已有地灾点，滑坡勘察结果为：该滑坡为土质滑坡，其后缘高程约 640m，前缘高程约 395 m，相对高差达 56m，滑坡纵长 310m，横宽 540m，滑体平均厚 21m，体积约 452 万 m³。滑坡为天然工况稳定、暴雨工况欠稳定。

4.2 滑坡自动化监测系统组成

自动化边坡监测系统的组成可分为：数据的采集和发送部分，数据处理部分和监控中心。其中数据采集部分有：降水量监测，视频监控，地表位移监测，应力应变监测，深部位监测，地下水位动态监测^[7,8]。针对工程特点和设计方案的要求，此次监测主要工作包括地表裂缝的监测，地表位移的监测，降水量的监测和地下水位的动态监测。

4.3 地表裂缝监测及数据分析

该工程利用自动化拉线式位移计监测滑坡主控裂缝，共

布置了 6 台仪器，命名为 LF01~LF06，其中 2 台布于强变形区的后缘，3 台布于中等变形区的后缘和 1 台布于前缘。

①技术原理：仪器里面有一个传感器，这个传感器将位移量转换成电信号，这个电信号是可计量的。这就完成机械物理量向电信号的转变。被测物体移动，就拉动了连接传感器的钢绳，传感元件随之被拉动；同理，当位移方向相反时，绳索会收回，张力恒定，输出与绳索移动量成正比的电信号，现场自动采集数据后通过 GSM/GPRS 通讯网络无线发送到监测中心服务站。

②技术特点：地表裂缝监测技术具有技术成熟、自动化程度高、数据实时采集、监测精度高的优点。

③监测目的：地表裂缝监测是以滑坡整体和局部变形剧烈区作为研究对象，布设于滑坡区地表裂缝两端以获得监测期内地表裂缝相对变形数据，从而对滑坡整体的变形情况的判断提供数据支持。

自动化拉线式位移计监测周期为：2021-6-9 至 2021-6-30，每个监测点的地表裂缝累积变化值与雨量的关系如图 4 所示，由图可见 2021-6-21 以后裂缝变形速率显著减小并保持稳定，可见降雨是裂缝变形最重要的因素。

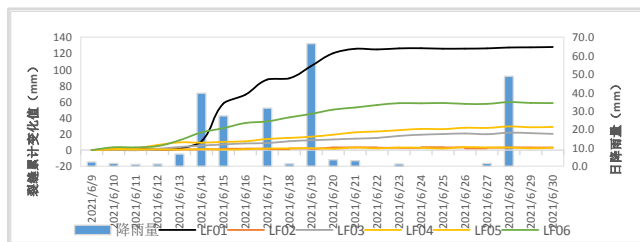


图 4 地表裂缝累计变化量—降雨量—时间曲线图

4.4 GNSS 裂缝监测及数据分析

GNSS 基准点布设在距离滑坡体 1.8km 左右的稳定区域。自动化 GNSS 位移监测点共 5 处，强变形区 3 处，GNSS 监测点 2 处，GNSS 中等变形区 1 处。分别在 1# 点位 4# 点位设置人工监测点 JC01 和 JC04，分别对应自动化监测设备 ZDJC01，ZDJC04。

①技术原理：GNSS 定位的基本原理是通过测量四颗及以上已知位置的卫星与 GNSS 接收机的距离，采用距离交会的方式来确定接收机的位置。GNSS 地表位移监测是将 GNSS 基准站设置在非变形区，GNSS 监测站设置在监测变形区内，通过数据传输系统将同一时刻的 GNSS 基准站及 GNSS 监测站的原始观测数据发送至数据中心，数据中心专业数据处理软件自动解算和处理原始数据，可实时获取 GNSS 监测站点的坐标值。

②技术特点：GNSS 地表位移监测技术具有技术成熟、数据精度高（毫米级）、数据实时采集的优点。

③监测目的：GNSS 地表位移监测针对滑坡整体及局部变形强烈区域，布设的地表位移监测点用于获取整个滑坡在监测期的变形数据，为滑坡整体变形判断提供数据支撑。

以 2021-6-9 作为初始日期，计算至 2021-6-30。首先，对此期间基准点的稳定性进行判断，如图 5 所示，在此期间内，基准点三个方向坐标变化较小，通过计算基准点水平方向中误差约为 0.5mm，垂直方向中误差约为 1.5mm，满足 GB 50026—2020《工程测量标准》，因此，可判定基准点稳定。

根据本次监测期间的各监测点水平方向及垂直方向累积位移量及相应降雨量，绘制累计位移-降雨量-时间曲线图，如图 6、图 7 所示。

在此监测初期，由于降雨量影响，滑坡在 2021-6-9 至 2021-6-23，GNSS 滑坡监测点变化较快，如表 2 所示，其中 ZDJC03 监测点水平位移最大，为 185.15mm，变形速率为 12.34mm/d，ZDJC01 监测点垂直位移最大，为 -131.76mm，变形速率为 -8.78mm/d。在 2021-6-24 至 2021-6-29，由于降雨量减少，GNSS 滑坡监测点变化整体减缓，具体变形量如表 3 所示。

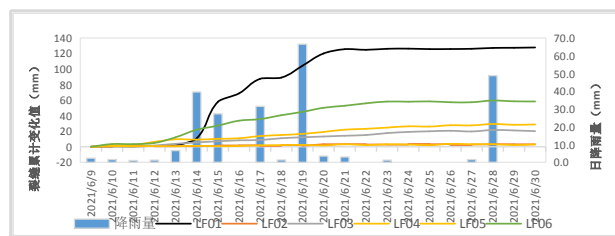


图 5 基准点坐标变形量 - 时间变化曲线

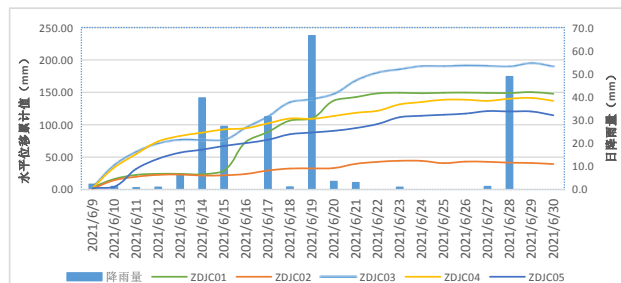


图 6 ZDJC 水平位移 - 降雨量 - 时间曲线图

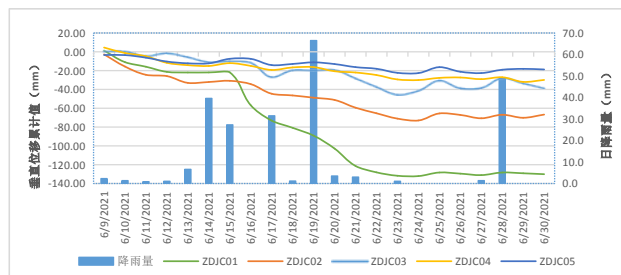


图 7 ZDJC 垂直位移 - 降雨量 - 时间曲线图

4.5 GNSS 监测与人工监测精度对比

结合该滑坡实测数据，把自动化监测数据与人工监测数据进行对比，充分说明 GNSS 自动位移监测在滑坡中的可行性，评价 GNSS 自动监测的精度是否满足要求，同一监测位置的 GNSS 监测数据与人工监测数据进行对比。根据前

期布置的人工监测点 JC01 (人工监测) 所测数据和 ZDJC01 (GNSS 自动化监测) 监测数据, 以及人工监测点 JC04 (人工监测) 所测数据和 ZDJC04 (GNSS 自动化监测) 监测数据, 进行对比。ZJDC04 (GNSS 自动监测) 与 JC04 (人工监测) 都位于滑坡中等变形区域, ZJDC01 (GNSS 自动监测) 与 JC01 (人工监测) 都位于滑坡强变形区域, 可以确定这两对监测点反映了滑坡同一位置的位移情况, 故选用这两个监测点的监测数据进行比较。

表 2 2021-6-9 至 2021-6-23 自动化监测点统计表

监测点号	水平位移		垂直位移		备注
	累计变形量 (mm)	变形速率 (mm/d)	累计变形量 (mm)	变形速率 (mm/d)	
ZDJC01	149.39	9.96	-131.76	-8.78	强变形区
ZDJC02	44.38	2.96	-71.02	-4.73	强变形区
ZDJC03	185.15	12.34	-44.92	-2.99	强变形区
ZDJC04	131.43	8.76	-29.38	-1.96	中等变形区
ZDJC05	111.61	7.44	-22.35	-1.49	中等变形区

表 3 2021-6-23 至 2021-6-30 自动化监测点统计表

监测点号	水平位移		垂直位移		备注
	累计变形量 (mm)	变形速率 (mm/d)	累计变形量 (mm)	变形速率 (mm/d)	
ZDJC01	-1.62	-0.23	1.66	0.24	强变形区
ZDJC02	-5.08	-0.73	4.29	0.61	强变形区
ZDJC03	4.09	0.58	6.50	0.93	强变形区
ZDJC04	5.47	0.78	-0.52	-0.07	中等变形区
ZDJC05	2.97	0.42	3.57	0.51	中等变形区

表 4 人工监测和自动化监测数据对比表

	ZDJC01	JC01	差值 (mm)	ZDJC04	JC04	差值 (mm)
2021-6-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2021-6-10	16.27	19.20	-2.93	34.03	31.89	2.14
2021-6-11	22.64	26.25	-3.61	54.77	55.65	-0.88
2021-6-12	24.24	22.43	1.81	74.31	74.96	-0.65
2021-6-13	24.18	26.08	-1.90	82.75	85.86	-3.11
2021-6-14	23.49	25.78	-2.29	87.77	90.97	-3.20
2021-6-15	29.21	30.43	-1.22	92.80	93.11	-0.31
2021-6-16	73.77	75.24	-1.47	94.67	96.18	-1.51
2021-6-17	88.90	87.37	1.53	102.14	100.02	2.12
2021-6-18	106.47	108.93	-2.46	109.58	110.44	-0.86
2021-6-19	109.67	111.44	-1.77	109.19	110.96	-1.77

JC01 人工监测在 2021 年 6 月 3 日开始监测, ZJC01 自动监测在 6 月 9 日开始监测。两者之间由于监测时间的不同, JC01 的累计位移会大于 ZDJC01 的累计位移, 为了消除这样的影响, 将 JC01 监测点 6 月 2 日到 6 月 8 日的数据进行归零处理, 即减去 JC01 前面已经产生的位移, 统一监测时间与起始位移值。统计 2021-6-9 至 2021-6-19 得到 GNSS 自动化监测与人工监测的水平位移数据如表 4 所示。

由数据可见, 在 2021 年 6 月 9 日到 2021 年 6 月 19 日期间, GNSS 监测和人工监测水平位移的误差基本保持 -3.61mm 到 2.14mm 这个区间, ZDJC01 与 JC01 数据以及 ZDJC04 与 JC04 数据对比差别不大都在毫米级, 其中 ZDJC01 与 JC01 最大误差为 -3.61mm, 发生在 2021 年 6 月 11 日, ZDJC04 与 JC04 之间最大误差为 -3.20mm, 发生在 2021 年 6 月 14 日, ZDJC04 与 JC04 之间误差整体比 ZDJC01 与 JC01 之间误差小, 因为 ZDJC04 与 JC04 设备处于中等变形区变形速率较慢, 而 ZDJC01 与 JC01 处于强变形区, 变形速率较快, 对观测数据有影响。通过对比可看出: GNSS 自动化监测技术采集的数据与人工监测数据差别很小, 误差满足滑坡监测要求。因此, GNSS 自动化监测技术可应用到滑坡监测领域。

5 结语

论文依托于现有滑坡监测项目, 将 GNSS 技术与实时通讯技术结合, 对滑坡进行自动化监测, GNSS 技术具有精度高, 实时接收数据的优点, 现场采集的数据可通过 GSM/GPRS 通讯网络无线发送到监测中心服务站, 即可完成对滑坡的自动化监测。相对于传统滑坡监测技术, 该技术具有实时传输、自动化程度高、精度高等特点, 在滑坡监测领域具有一定的实用性及先进性。

基于 GNSS 技术自动化监测技术在滑坡监测领域也存在一定的缺点: ①部分滑坡体在信号较差的山区, 数据无线传输会出现断线的现象; ② GNSS 技术更适合对滑坡体的局部观测, 对于滑坡体较大的滑坡群, GNSS 监测技术无法直观地展示滑坡群的变化状态。

对于上述问题：①将寻找更合适的数据传输方法，可将有线传输和无线传输相结合，通过有线的方式将现场数据传输的信号较好的地方，然后通过无线传输方式将数据传输到监测服务中心；②研究利用如今火热的 InSAR 技术、无人机监测、遥感影像监测技术对滑坡体进行大范围宏观观测，并结合 GNSS 技术对滑坡的局部观测，更加详细地掌握滑坡体的变化情况，有利于对滑坡体的稳定状态做出正确的判断。

参考文献

- [1] 乐旭东,刘纪峰,曾武华,等.自动化监测系统在滑坡变形监测的应用研究[J].公路,2021,66(10):90-93.
- [2] 金蕾,徐卫国.GNSS在工程测量中的应用[J].建筑科学,2021,37(9):182.
- [3] 付晨,郭润志,王建西.GNSS技术在地质灾害安全监测预警系统中的应用研究[J].测绘与空间地理信息,2021,44(6):151-154.
- [4] 赵忠海.滑坡灾害监测预警技术探析与应用——以北京延庆黄峪口滑坡为例[J].城市地质,2020,15(4):351-356.
- [5] 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.
- [6] 范涛,寇正卫,王宝红.滑坡自动化专业监测及预警研究——以嵩县黄庄乡黄庄村滑坡为例[J].环境与发展,2020,32(6):174-175.
- [7] 周密.GNSS技术在地质灾害监测与预警系统中的应用[J].测绘标准化,2019,35(3):58-60.
- [8] 张振威,刘滋源,张帅.自动化监测预警系统在滑坡监测中的应用[J].地理空间信息,2022,20(9):110-112.