

激光与光电子学进展

基于空天地内一体化的滑坡监测技术研究

徐靓¹, 程刚^{1,2*}, 朱鸿鹤¹

¹南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

²华北科技学院(中国煤矿安全技术培训中心)计算机学院 北京 101601

摘要 滑坡灾害在我国易发频发,常造成严重的财产损失和人员伤亡。因此,进行科学有效的滑坡监测对防灾减灾具有重要的意义。近几十年来,随着监测技术的不断发展,滑坡监测水平得到了显著的提高和完善,已逐渐从过去的低精度、点式、人工监测过渡到高精度、分布式、自动化监测,有力支撑了从国家到地方各级政府应对滑坡灾害的能力。为此,本文从空(太空卫星遥感)、天(低空无人机遥感)、地(地表)、内(滑坡体内部)四个方面对当前滑坡监测技术进行了总结和评价,重点对分布式光纤感测技术在滑坡监测中的应用方法及效果进行了叙述。研究结果表明:对滑坡体内部进行多源多场监测可获取滑坡多场信息,进一步分析可建立多场信息的关联模型,为滑坡稳定性评价与治理提供可靠的数据支撑,具有良好的研究潜力和应用前景。最后,对实现滑坡变形的精准可靠监测和预测预警的新思路进行了展望。

关键词 光通信; 滑坡监测方法; 分布式光纤感测技术; 多源多场; 空天地内一体化

中图分类号 TU42

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0900006

Research Review of Landslide Monitoring Methods Based on Integration of Space-Air-Ground-Interior

Xu Liang¹, Cheng Gang^{1,2*}, Zhu Honghu¹

¹School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

²School of Computer Science, North China Institute of Science and Technology (National Safety Training Center of Coal Mines), Beijing 101601, China

Abstract Landslides occur frequently in China, often causing serious property losses and casualties. Therefore, scientific and effective landslide monitoring is of great significance for disaster prevention and mitigation. In recent decades, with the continuous development of monitoring technology, the level of landslide monitoring has been observably developed and improved in recent decades. It has gradually transferred from the past low-precision, point-type and manual monitoring to high-precision, distributed, and automated monitoring, which strongly supports the ability of governments at all levels from the national to the local level to cope with landslide disasters. In this paper, the current landslide monitoring methods and techniques are summarized and evaluated from four aspects: space (space satellite remote sensing), air (low altitude unmanned aerial vehicle remote sensing), ground (surface), and interior (inside the landslide body). The application method and effect of distributed optical fiber sensing technology in landslide monitoring are described, emphatically. The results show that the multi-source and multi-field

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-10-03; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505104)、国家自然科学基金(41702347)、河北省自然科学基金(D2018508107)、河北省物联网监控工程技术研究中心项目(3142018055)、河北省高等学校科学技术研究项目(Z2017043)、中央高校基本科研业务费专项(3142017003)

*E-mail: chenggang@nju.edu.cn

monitoring inside the landslide body can obtain the multi-field information of the landslide, and the correlation model of the multi-field information can be established through further analysis, which can provide reliable data support for the evaluation and management of the landslide stability and has good research potential and application prospect. Finally, a new thinking of accurate and reliable monitoring, prediction and early warning of landslide deformation is proposed in this paper.

Key words optical communications; landslide monitoring method; distributed optical fiber sensing technology; multi-source and multi-field; integration of space-air-ground-interior

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3510

1 引言

由于我国疆域辽阔、地形复杂、气候多样、地质特殊,地质灾害分布十分广泛,每年地质灾害频发,据 2019 年全国地质灾害通报^[1],2019 年全国共发生地质灾害 6181 起,其中滑坡灾害最为严重,发生 4220 起,占了地质灾害总数的 68.27%。

滑坡是具有一定倾斜面的岩土体失稳的一种表现,即一部分岩土体相对另一部分岩土体发生滑动的现象^[2]。滑坡是一种全球性的地质灾害,给工农业生产以及人民生命财产造成巨大损失,有时甚至带来毁灭性的灾难。例如,2010 年 6 月贵州省关岭县发生滑坡,造成 107 人被掩埋^[3]。2015 年 12 月,深圳光明新区滑坡,造成 73 人死亡,4 人失踪和 33 栋房屋被毁^[4]。此外,由于滑坡发育地区地质条件复杂,在此区域内进行工程建设应当妥善处理,如果施工不当,已治理的滑坡也可能再次引发灾害^[5]。因此,实施滑坡监测预警对防灾减灾及保障人民生命财产安全具有重要意义。

2 滑坡变形监测方法的研究现状

自 20 世纪中叶,人类就开始对滑坡的监测技术开展了研究^[6]。随着科技的不断进步,监测技术已由过去的人工手动操作发展至无人值守式自动化监测。时至今日,监测技术涉及了空(太空,合成孔径雷达干涉技术等)、天(低空无人机遥感),地[地表,三维(3D)激光扫描技术等]、内(岩土体内部,分布式光纤监测技术等)等多个方面。多源立体监测和高精度、自动化的远程监测将是未来滑坡监测的主要研究方向^[7]。

2.1 基于太空卫星遥感技术的滑坡变形监测

2.1.1 GNSS 监测技术

目前,在滑坡变形监测方面,全球导航卫星系统(GNSS)监测技术是应用最为广泛的方法之一。

GNSS 是由全球定位系统(GPS)、格洛纳斯卫星导航系统(GLONASS)、北斗导航卫星系统(BDS)、伽利略卫星导航系统(Galileo)四个子系统组成,其大多数子系统均由卫星星座、地面监控系统及用户接收机三部分组成^[8]。该方法通过接收卫星向地面发射的电磁波信号,获取监测点的三维坐标,利用坐标差来反算监测点的位移。根据定位方式的不同,GNSS 定位可分为绝对定位和相对定位^[9],如图 1 所示。绝对定位是接收机同时接收至少 4 颗卫星的信号,确定其空间坐标^[8]。相对定位是用处于不同位置的接收机同步观测相同的卫星信号,以确定多台接收机间相对位置的定位方式,一旦获知其中一点的位置,则另一点的位置即可求出^[10]。

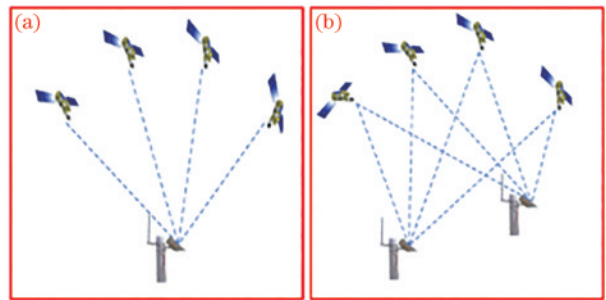


图 1 GNSS 监测技术定位方式。(a)绝对定位;(b)相对定位
Fig. 1 Positioning mode of GNSS monitoring technology.
(a) Absolute positioning; (b) relative positioning

GNSS 监测方法不受气候条件的影响,可以全天候、全时段地进行监测^[11],测站间无需通视,从而使得测量人员可以更为自由地布设变形监测网。与常规监测方法相比可省去许多过渡点,节省了大量的人力物力。此外,GNSS 监测方法可得到监测点的三维坐标,实现空间的精准定位;监测的数据精度可以达到毫米级^[12]。但是,GNSS 监测方法也存在一定的不足,如站点选择自由度低,测站周围的房屋、光滑面等反射性较强的物体容易产生多效应路径^[12](图 2)。同时,GNSS 对获取

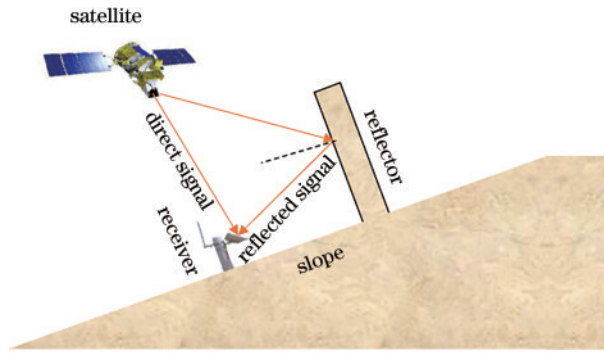


图 2 多效应路径示意

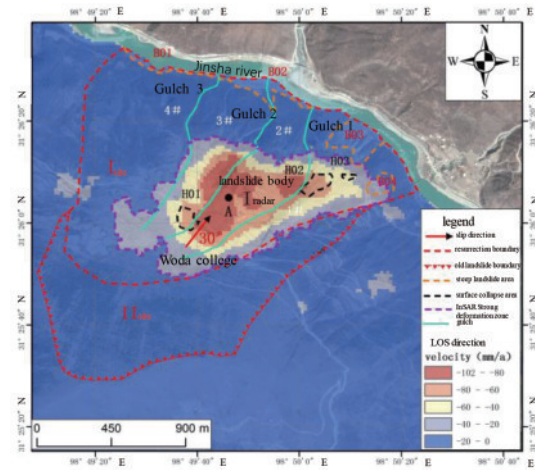
Fig. 2 Multi-effect path schematic

的数据进行解算通常需要 10~30 min, 这表明 GNSS 在某一时刻获得的数据是滑坡 10~30 min 前的变形结果^[13]。

2.1.2 InSAR 技术

合成孔径雷达干涉 (InSAR) 技术是滑坡监测的一种新方法, 星载 SAR 系统包括发射设备和雷达接收机组成。该方法通过两个天线在同一时间, 对同一目标, 发射相干雷达波, 且两者频率相等, 该条件下两波即可产生干涉现象。电磁波在定向传送过程中碰到物体反射回来, 这时雷达天线的接收装置可接收到这个反射波, 并将其传送到接收设备, 将得到的影像进行一系列处理, 进而提取出与该物体有关的三维地形信息^[14]。对形变前后的影像做干涉处理后, 即可获得相对准确的地表形变信息。

InSAR 技术能够提取地表发生的微小形变, 理论上精度能达到厘米级甚至是毫米级, 其获取的数据具有高精度、高分辨率、覆盖范围广等特点^[15]。但是, 空间失相关和大气延迟对传统合成孔径雷达差分干涉 (D-InSAR) 技术形变测量的精度和可靠性有着严重影响^[15]。在传统的 D-InSAR 技术的基础上, 研究人员发展了时序 InSAR 技术来降低各种干扰的影响, 包括永久散射体干涉 (PS-InSAR) 技术和短基线子集干涉测量 (SBAS-InSAR 技术)^[16-17]。冯文凯等^[18]利用 SBAS-InSAR 技术对金沙江流域滑坡进行变形监测, 获取了该滑坡 2 年内的变形结果, 同时实地进行了工程地质调查和复核, 研究结果显示 SBAS-InSAR 技术监测结果与工程地质调查结果有着较好的一致性 (图 3)。但是, SBAS-InSAR 技术计算得到的滑坡变形量中依然包含大气延迟相位, 且该相位具有较强的空间相关性^[19]。

图 3 SBAS-InSAR 技术获得的形变速率图^[18]Fig. 3 Deformation rate map obtained by SBAS-InSAR technique^[18]

2.2 基于航空观测技术的滑坡变形监测

无人机 (UAV) 遥感将无人机和先进的无人驾驶飞行器技术、遥感传感器技术、遥测遥控技术、通信技术、GPS 差分定位技术和遥感应用技术结合, 是一种具有高精度、智能化、自动化等特点的应用技术^[20]。无人机遥感系统由空中部分、地面部分和数据后处理三部分组成, 空中部分包括无人机平台、无人机控制系统及遥感传感器系统; 地面部分包括航迹规划子系统、无人机地面控制子系统以及数据接收显示子系统; 数据后处理部分包括影像数据预览子系统、影像数据后处理子系统^[21]。无人机遥感技术监测滑坡一般分为监测区域资料收集、定点勘察、航线规划、无人机航拍和影像数据处理 5 个步骤。航线规划是影响该方法测量精度的一个重要因素, 航线规划主要指设置航线参数, 包括飞行高度、飞行速度、旁向重叠率、航线框类型等^[22]。相比于传统的垂直航空摄影测量技术, 无人机航拍技术应用的倾斜航空摄影测量技术能从多个角度拍摄地物, 从而获取更为精确的地面信息; 影像数据处理中先提取每张照片包含的 GPS 坐标数据和相机姿态, 再按运动恢复结构算法生成目标区域的稀疏点云, 采用多视立体视觉算法通过特征点的匹配、重建以及空间点的扩散、过滤, 得到精度相对较高的稠密点云^[23]。该技术对于监测面积较小、人员无法到达的地区具有突出的优势。相比于 GNSS、InSAR 等技术, 该技术是在低空飞行的同时进行拍摄, 可以避免云层对监测结果的影响。但是, 受限于无人机的续航能力, 该方法无法实时监测; 恶劣天气也会对无人机监测效果产生一定的影响。表 1 为空、天监测方法对比。

表 1 空、天监测方法
Table 1 Space and air monitoring methods

Monitoring method	Principle	Advantage	Disadvantage
GNSS	Location of the monitoring station is obtained in real time by satellite	All-weather and whole-time monitoring	Monitoring station selection freedom is low and data processing is complex
InSAR	Image of landslide is obtained by using SAR satellite, and then the 3D terrain information of landslide is obtained by processing the image	All-weather and whole-time monitoring; high precision	Monitoring point selection is difficult and affected by space loss correlation and atmospheric delay
UAV	Unmanned aerial vehicle is equipped with a camera, flies and takes pictures according to the designed route, and gets the 3D model of the slope through image data processing	High precision; automation; intelligent; not affected by the clouds	Affected by weather and not all-weather monitoring

2.3 基于地表测量方法的滑坡变形监测

2.3.1 机器人监测技术

机器人监测法又称自动全站仪监测法,利用能够自动识辨、照准和跟踪目标的一种全站仪进行监测,其内部除拥有一般电子全站仪所具有的电子电路、软件系统和光学系统以外,还拥有伺服马达驱动照准部和可转动定位的望远镜^[24]。其工作原理是:全站仪向目标发射激光束,经反射棱镜返回,并被安装在仪器中的 CCD 相机接收和内部微处理器分析,得到水平的角度和天顶距,最后通过启动马达,驱动全站仪自动转向棱镜,精确地瞄准监测目标^[25](图 4)。

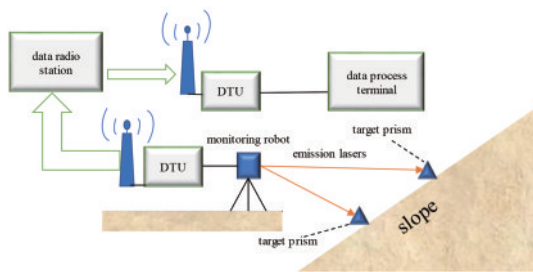


图 4 监测机器人监测原理及数据远程传输示意图

Fig. 4 Schematic diagram of monitoring principle and data remote transmission of monitoring robot

该方法具有高精度、高速度、全自动化、稳定性好、低消耗等优点,可实现全天候无人值守式的不间断监测,即使目标点发生了微小的变形,也可被及时观测捕获。然而,受自动识别目标的限制,使用范围会大大缩小;受采样频率的限制,单独使用一台高频率的自动全站仪对滑坡体进行监测,往往达不到全面的监测效果,使用多台则又大大增加了监测的成本。

2.3.2 三维激光扫描技术

近年来,地面三维激光测量技术因其能够快速高效获取高精度、高密度的监测点云数据,极大地提高了作业效率,发展迅速,已在相关领域得到广泛应用^[26]。地面三维激光扫描系统主要包括:激光扫描仪、计算机、外接电源和专用三角架。其工作原理为:由激光脉冲发射器发射一束激光脉冲信号,信号到达待测体表面时发生漫反射,反射信号被激光接收器接收即可得到往返所用时间差,进而求得扫描测站点到待测物体表面的任一目标点的距离,通过扫描仪内部扫描控制模块控制和测量每个脉冲激光的水平角和天顶距,最后按空间极坐标原理计算出扫描的激光点在被测物体上的三维坐标(图 5)。

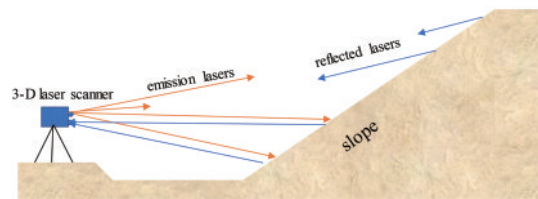


图 5 三维激光扫描技术监测滑坡示意图

Fig. 5 Schematic diagram of landslide monitoring by three-dimensional laser scanning technique

通过对三维扫描仪获取的数据进行优化处理,获得了滑坡变形分布云图,图 6 清晰地展示出滑坡各区域的变形程度和速率^[27]。

相比于传统的滑坡变形监测技术,三维激光扫描技术具有如下优点:无需接触变形体即可直接获取其三维坐标,数据获取速度快,可实现实时、动态、主动性测量,穿透性好、采样密度高、测量精度



图 6 三维激光扫描技术滑坡变形监测结果^[27]

Fig. 6 Monitoring results of landslide deformation by 3D laser scanning technology^[27]

高,数字化、自动化程度高。但是,该方法也存在测量范围和距离受激光功率局限、海量数据处理速度较慢、易受目标表面有关因素影响(如植被覆盖等)而引起误差及设备昂贵等问题。

2.3.3 地基干涉合成孔径雷达技术

地基干涉合成孔径雷达(GB-InSAR)是一种基于雷达的地面遥感成像系统,在形变监测方面具有

突出优势^[28]。GB-InSAR监测滑坡变形的原理为:地基雷达传感器沿滑轨滑动获取形变前后目标区的雷达影像,两幅单视复数影像共轭相乘可估计目标物的形变量,通过一系列数据处理消除大气延迟相位和相位噪声,获取精准的变形量^[29]。按照合成孔径的实现方式,可以将地基SAR划分为以下三种类型:直线扫描地基SAR、弧线扫描地基SAR和多输入多输出(MIMO)地基SAR。直线扫描和弧线扫描均需要伺服系统控制收发天线进行特定的机械扫描,图像获取的时间为几分钟至十几分钟,而地基MIMO雷达工作时,各个发射天线分时发射,各个接收天线则同时接收,一次完整的扫描时间为几毫秒到几秒^[30]。GB-InSAR可以全天候、实时监测滑坡区域的变形,监测精度可达到亚毫米级,且不受天气的影响。但是,GB-InSAR所处环境对监测结果会产生影响;频繁移动图像无法实现成像效果较好的实时监测^[31]。表2为地表监测主要方法分析。

表 2 地表监测主要方法分析

Table 2 Analysis of main surface monitoring methods

Monitoring method	Principle	Advantage	Disadvantage
Robot monitoring	Automatic total station monitors the prisms placed on the landslide in real time	Automatic and whole-time monitoring; high precision	Measuring range of single robot is small, but the cost of multiple measurements is high
3D laser scanning	3D coordinates of the measured object are obtained by measuring the time difference of transmitting and receiving laser and the horizontal angle and zenith distance of each pulse laser	Whole-time, dynamic and initiative monitoring; high precision	Data processing is complex and measuring accuracy is easily affected by surface objects
GB-InSAR	Ground-based radar sensor moves on the slide track, transmits and receives microwave signals. The synthetic aperture radar technology is used to realize imaging	High precision, all-weather and whole-time monitoring, not affected by weather	Lack of data processing; environment of monitoring can have an impact on results

2.4 基于滑坡变形的岩土体内部监测技术

2.4.1 TDR 技术

时域反射技术(TDR)是滑坡内部监测的一种新方法。该监测系统通常由脉冲信号发生器、同轴电缆、回波处理器、数据采集系统和数据处理终端构成^[32](图7),其测量原理为:将同轴电缆埋入钻孔中,并回填钻孔,通过信号发生器放射窄脉冲信号,使其在同轴电缆中传播,如果同轴电缆发生变形,则变形处会有回波信号反射回来,采集回波信号并分析波形,即可得到变形的位臵和大小。

由于同轴电缆对集中剪切应变敏感,TDR技术可以准确定位滑动面的位臵,如图8所示,深度90 m

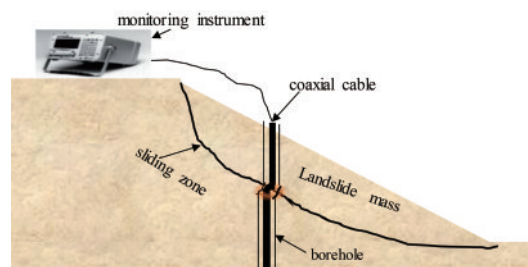


图 7 TDR 监测系统

Fig. 7 TDR monitoring system

处的波形出现显著异常,表明该深度处同轴电缆变形最大,判断为滑动带位臵。通过对滑动带不同时刻数据进行进一步分析,得到滑动带滑动速度随时

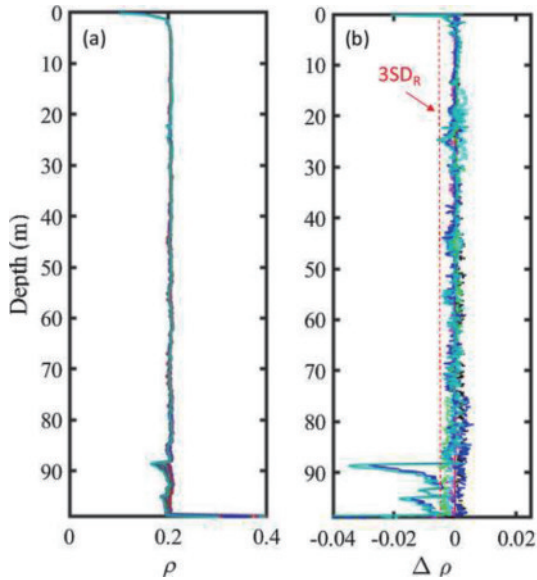


图 8 TDR 监测结果^[33]。(a)原始数据;(b)差分波形
Fig. 8 TDR monitoring results^[33]. (a) Original data;
(b) difference waveforms

间的变化,为科学有效地开展滑坡预警提供数据支撑。同时,该技术也具有监测时间短、监测成本低、可实现自动化监测等优点^[34]。然而,受限于空间方向精准定位,该方法存在无法确定滑坡滑动方向的局限;同时,电缆和土体的耦合性能往往对监测精度产生十分显著的影响;此外,同轴电缆在有腐蚀性物质的地区,易受到损伤而无法获取准确的数据。

2.4.2 钻孔测斜仪技术

该方法是将安装有测斜仪探头的电缆放入钻孔中,然后进行回填钻孔,当岩土体产生变形时,测斜仪探头与垂直面之间会产生一个角度(该夹角可由传感器测得),通过三角函数即可算出该深度处的水平位移(图 9),且位移的方向也可由传感器测

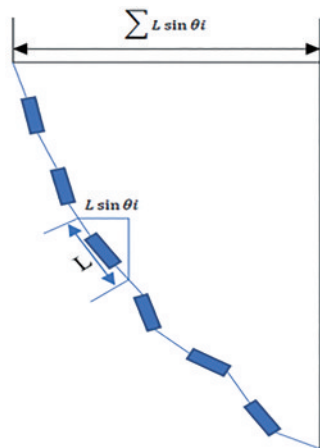


图 9 测斜仪原理
Fig. 9 Principle of inclinometer

出^[35]。常规的测斜仪主要有滑动式和固定式两种,前者成本较低,但不易实现自动化监测;后者与通信设备结合可实现自动化监测,但需埋设大量探头,成本相对较高。

该方法可以测定滑坡滑动的方向,目前有导轮-导槽定向、电子罗盘定向和陀螺仪定向等。其中,滑轮-导槽定向由于滑坡体滑动时,会引起导槽产生扭转,从而导致误差较大;电子罗盘定向会一定程度上受到地磁场以外的磁场干扰;陀螺仪定向受外界的影响较小,且具有较高的精度,因此应用相对较广。

近年来,同步监测滑坡体内多参数成为该方法的一个发展趋势,该技术通过在探头中安装温度、应力、渗流、渗压等传感器,从而实现多参数监测的目的^[36]。国内学者裴华富等^[37]将光纤技术与测斜仪相结合,提出了光纤光栅原位测斜仪监测法,并在攀田高速公路工程监测中取得了较好的应用。微机电系统(MEMS)与测斜仪结合是该技术的一个研究热点,该方法是在微机电系统发展的基础上,利用半导体 Si 的压阻效应等原理,将监测点的压力、位移、加速度等参数的变化转化为电路中电压参数的变化,从而对微型电路输出电压进行分析得出监测点的位移、加速度等变化^[38](图 10)。相比于传统的测斜仪,该方法具有造价低、体积小、测量精度更高、安装简单、数据无线传输等优势,同时,侧斜管之间用可伸缩的柔性材料连接,对土体的变形具有更高的敏感性^[39]。

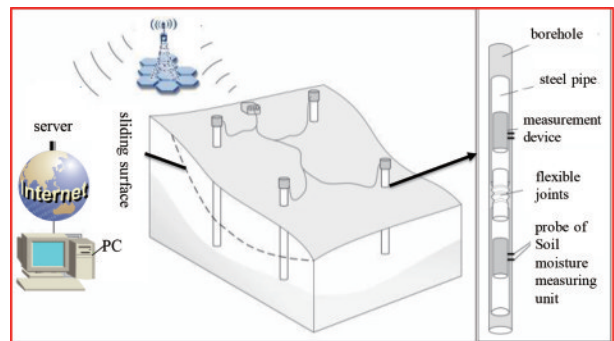


图 10 MEMS 测量系统
Fig. 10 Measuring system of MEMS

2.4.3 分布式光纤感测技术

分布式光纤感测技术是一种以光为载体,光纤为媒介,感知和传输外界信号的新型传感技术,相比于欧美、日本等,其在国内起步相对较晚,但是发展十分迅速。目前,该技术已在滑坡监测领域取得

了一大批创新性成果^[40-43]。分布式光纤感测技术应用于滑坡变形监测主要有布里渊光时域分析技术(BOTDA)、布里渊光时域反射技术(BOTDR)和布里渊光频域分析技术(BOFDA)等。其原理为:由激光器产生的激光脉冲在光纤中传播时,会发生布里渊散射,光纤某处的应变和温度发生变化时会引起此处反向散射光频率发生漂移,通过解调仪接收散射光,得到其频率的偏移量,从而可以算出变形处的应变值,根据发射激光脉冲信号到接收散射光的时间,可以算出变形处的位置(图 11)。

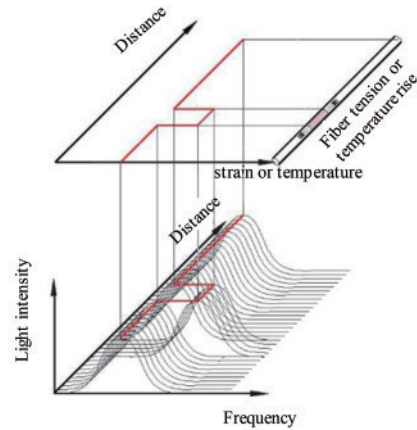


图 11 分布式光纤感测原理图^[41]

分布式光纤感测技术具有测量精度高、抗电磁干扰、电绝缘性好、频带宽、易于实现长距离和长期组网监测等诸多优点^[42]。但是该方法在确定滑坡滑动方向和滑坡大变形监测方面存在一定的不足。同时,滑坡岩土体与光纤的耦合性关系模型的建立

Fig. 11 Schematic of distributed optical fiber sensing^[41]

也是监测应用中的一个重要环节。表 3 为滑坡内部监测技术对比。

表 3 滑坡内部监测技术对比

Table 3 Comparison of landslide internal monitoring techniques

Monitoring method	Principle	Advantage	Disadvantage
TDR	When the coaxial cable is deformed, the echo signal will be reflected back from the deformation. The position and displacement of the deformation can be obtained by collecting the echo signal and analyzing the waveform	Short monitoring time and low cost; accurate sliding surface positioning	Unable to determine the sliding direction; poor sensitivity to uniform deformation; point-type monitoring
Borehole inclinometer	The probe of inclinometer has a certain angle with the deformation of rock and soil mass, and then horizontal displacement of the inclinometer probe can be calculated using the angle	Monitoring accurately direction of sliding	Point-type monitoring and orientation are susceptible to interference
Distributed fiber optic sensing	By receiving and analyzing the scattered light, the changes of strain and temperature along the fiber are obtained	High precision; distributed monitoring; high survival rate; corrosion resistance; anti-interference	Unable to determine the sliding direction

3 基于分布式光纤感测技术的滑坡多源多场监测

滑坡作为地质体结构场,大多处于一定的地质环境中,必然与应力场、渗流场、温度场、污染场、化学场等作用场存在联系^[43](图 12)。尤其是特大滑坡,其触发机理复杂,影响因素多,需要实时获取地下应力、渗流等多场信息,如何获得精准有效的地下多源多场信息对判定特大滑坡的发展阶段有着重要的理论与现实意义。常规点式电测技术难以满足低漂移、多参量、全覆盖、快速响应的监测需求,从而无法综合滑坡表面形变和地下多场监测信息对滑坡孕灾机理进行判定。分布式光纤感测技

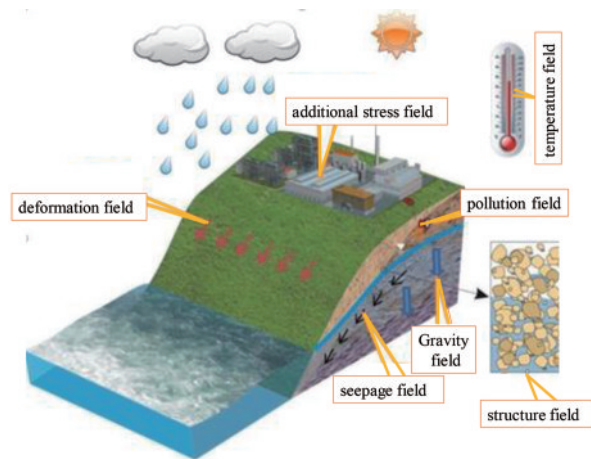


图 12 滑坡多场作用示意图^[43]

Fig. 12 Diagram of multi-field action of landslide^[43]

术能对滑坡变形场、温度场、渗流场等作用场进行实时监测,通过分析滑坡体变形场、温度场与渗流场等作用场的变化过程及其之间的相互作用关系,来分析滑坡孕育机理,从而为滑坡预警与治理提供科学判据。

3.1 变形场

在滑坡多场监测中,变形场的监测是最直观、最有效的方式。目前,大部分滑坡监测系统都是以变形场监测为主。分布式光纤感测技术可以监测滑坡内部变形,其应变测试精度可达几个微应变^[45]。当前,应用于滑坡变形监测的分布式光纤感测技术主要有 BOTDR 和 BOTDA 等(图 13)。该技术的原理是通过解调仪接收光纤沿线各点的背向布里渊散射光,得到对应点的布里渊频移,再根据布里渊频移漂移量与温度和应变的关系求得对应点的温度和应变变化。相比于 BOTDR 技术, BOTDA 技术利用脉冲光和连续光相互作用,使布里渊频谱受激放大,从而有着更高的空间分辨率和精度^[46]。相关研究者通过室内模型实验研究发现,相比于垂直布设,将光纤水平布设在滑坡内监测变形的效果更好^[47]。对于垂直布设的光纤,如何将光纤的线应变转化为滑坡的位移是一个研究难点和热点, Zhang 等^[48]提出了一种基于分布式光纤应变测量计算滑坡剪切位移的运动学方法。

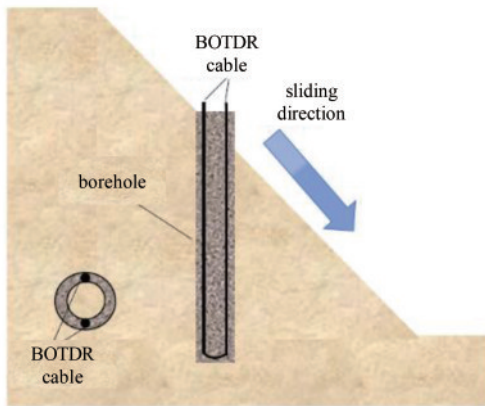


图 13 BOTDA 技术监测滑坡变形示意图

Fig. 13 Schematic diagram of monitoring landslide deformation by BOTDA technique

3.2 渗流场

地下水是影响滑坡稳定性最为活跃的因素,滑坡稳定性往往受控于坡体中地下水渗流场的变化,地下水渗流作用是引起滑坡失稳破坏的重要因素,因此科学地分析地下水渗流场对于滑坡防治具有重要的意义。

目前,利用分布式光纤感测技术对滑坡渗流场进行监测,主要使用的是主动加热光纤法(AHFO),该方法基于光纤测温原理,通过稳定功率对加热光缆进行加热(图 14),随着加热时间的增加,光纤的温度先增加,然后会逐渐趋于稳定,不同的渗流速度和含水率具有不同的稳定温度,通过对其进行标定可获得测定区域的渗流速度,从而获得滑坡内渗流场和水分场的时空分布及演化过程。

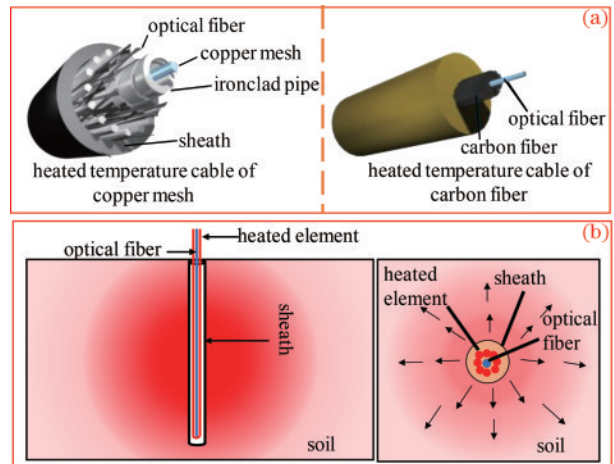


图 14 内加热光缆及监测原理。(a) 光缆结构示意图;

(b) 主动加热光纤法原理图

Fig. 14 Internal heating cable and monitoring principle.

(a) Structure diagram of cable; (b) schematic of AHFO

3.3 温度场

滑坡的地温、水温、气温等要素组成了滑坡温度场,是滑坡对外界环境变化和内部温度分布的表现形式^[44]。滑坡温度场的变化反映了滑坡体能量的变化,能量的变化伴随着滑坡体内应力的集中与释放,在宏观上表现为滑坡岩土体结构的破坏^[49]。温度的升高会导致边坡岩土体结构强度的降低,从而诱发滑坡失稳^[50-51]。研究者通过研究发现,高速滑坡的形成是滑动面处因高温形成了一层气垫,降低了摩擦力^[52]。通过对滑坡体特别是滑动面温度进行监测,可以定量分析滑坡的最大滑动速度,这对滑坡防治具有重要意义^[53]。通过分布式光纤感测技术对滑坡体内温度场进行监测,得到滑坡温度场的实时信息。基于拉曼散射光时域反射(ROTDR)技术仅对温度敏感的特点^[54],该技术可很好地应用于滑坡温度场监测。ROTDR 技术的基本原理是:通过分布式光纤测温系统(DTS)解调仪接收光纤各处背向拉曼散射光,并测得拉曼散射光中斯托克斯光强与反斯托克斯光强的比值,该比值与光纤所处环境温度呈一定关系,从而得到光纤各处的温度^[55]。

课题组利用基于 ROTDR 技术的分布式温度感测光缆 [图 15(a)] 对西南地区某地温场进行了现场监测 [图 15(b)], 得到了该处的地温曲线 [图 15(c)]. 将此方法获得的温度数据与埋设的光纤布拉格光

栅 (FBG) 温度计进行对比, 发现两者测得的温度吻合度在 90% 以上。因此, ROTDR 技术可实现对滑坡温度场进行高精度、实时、分布式、长距离监测。表 4 为分布式光纤监测系统多场监测总结。

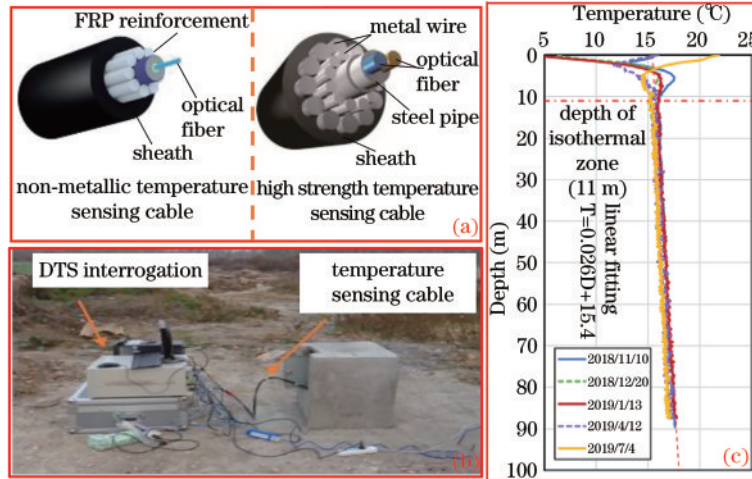


图 15 分布式光纤测温系统及监测结果。(a)测温光缆;(b)现场监测;(c)分布式测温结果

Fig. 15 Temperature measuring system of distributed optical fiber and monitoring result. (a) Temperature sensing cable; (b) site measuring; (c) distributed temperature measuring results

表 4 分布式光纤监测系统多场监测总结

Table 4 Summary of multi-field monitoring of distributed optical fiber monitoring system

Multi-field monitoring	Distributed optical fiber monitoring technology	Principle	Characteristic
Deformation field	BOTDR/BOTDA technology	By measuring the frequency shift of Brillouin scattering light, the strain and temperature changes of corresponding points are obtained according to the relationship between the Brillouin frequency shift drift amount and the temperature and strain	It is sensitive to temperature and strain, and the true strain can be obtained by temperature compensation
Temperature field	ROTDR technology	By measuring the ratio of Stokes light intensity and anti-Stokes light intensity in Raman scattered light, the temperature of each part of the optical fiber is obtained	Precision up to several microstrains and sensitive only to temperature
Seepage field	Actively heating technology based on distributed optical fiber temperature measuring system	Through heating optical cable and DTS measuring, the characteristic value of temperature is determined. Then, soil moisture and seepage rate can be obtained according to the characteristic value of temperature	An artificial temperature field is created near the cable, and then obtaining the seepage field

4 结论与展望

4.1 结论

滑坡在全球分布广泛, 危害严重, 对滑坡进行有效实时的监测具有重要意义。本文从空、天、地、内四个方面对现有的滑坡监测技术进行了概述性总结, 介绍了 GNSS 地表形变监测技术、InSAR 监测技术、无人机监测技术、机器人监测技术、三维激光扫描技术、地基 SAR 技术、TDR 监测技术、钻孔

测斜仪技术以及分布式光纤感测技术, 并对这些技术的原理以及优缺点进行阐述, 系统地分析了分布式光纤感测技术应用于滑坡体内部多源多场监测的优势和潜力, 得出以下结论:

1) GNSS 和 InSAR 监测技术可开展全天候、全时段实时监测, 测量精度理论上可以达到毫米级, 但是卫星发射的信号容易受大气和滑坡表面障碍物影响, 从而引起测量误差, 且后期数据处理较为复杂。

2) 无人机监测技术可以避免云层对监测结果的影响,适用于面积小、易滑动和人员无法到达区域的变形监测。但是,该方法无法实现实时监测且易受天气影响。

3) 地表监测技术可以进行全天候实时监测,测量精度高,但是单个监测设备监测范围有限,多台设备监测又会使监测成本大大提高,同时也易受到滑坡体上障碍物的影响。

4) 滑坡体内部监测技术可以获得滑坡体内部变形,这对了解滑坡演化过程和稳定性评价有着重要意义;该类技术可实现无人值守监测,但是埋地传感器与土体耦合性能在一定程度上会对测量精度产生影响。相比于钻孔测斜仪与 TDR 技术,分布式光纤感测技术可实现分布式、实时、高精度、大范围监测,可对滑坡多场信息进行实时连续性监测,通过综合分析多场相互作用对滑坡的影响,进而建立滑坡多场信息的关联模型,实现滑坡发生发展的全方位精准分析与稳定性综合评价。

5) 空基、地基、地基监测技术可对滑坡表面位移进行非接触监测,实现对滑坡从开始滑动到失稳阶段全过程监测,监测精度理论上可以达到毫米甚至亚毫米级。空基和地基监测技术的测量精度受滑坡表面植被影响,因此,该类技术更适用于植被覆盖较少的滑坡。天基监测技术易受天气的影响,强风、暴雨、大雾、冰雹等天气情况会对测量精度造成较大影响。分布式光纤感测技术的应变测试精度可达几个微应变,测试范围为 $-1\% \sim 1\%$ 。TDR 技术中同轴电缆的直径和材料对测试量程有着较大的影响,变形测试范围在百分之几到百分之几十之间变化。当滑坡发生大变形时,光缆和同轴电缆易被拉断或剪断,造成监测数据的丢失。钻孔测斜仪技术中,大部分探头角度的测量量程可达到 30° ,分辨率可达到 0.01° ,甚至更高。但是该方法易受到外界环境的影响,使测试精度降低。

6) 空基监测技术可实现对大型及特大型滑坡开展全区域全天候的实时监测。天基和地基监测技术可对滑坡表面变形进行直接测量,内部监测技术可实现滑坡体内部多场信息的实时监测。在滑坡实际监测中,通常首先利用空基监测技术对滑坡进行早期识别,确定出滑坡高危险区域;随后对这些区域实施天基、地基和内部联合监测。特别是在滑坡发生较大变形时,内部监测技术可能会存在数据缺失等情况,然而地基和天基监测技术的实施恰

巧弥补了这一缺陷。因此,综合多技术手段的监测数据可实现对滑坡的稳定性及孕灾机理进行更加全面精准的认识。

4.2 展望

为进一步实现对滑坡变形精准监测,本文对滑坡监测技术进行了如下展望:

1) 分布式光纤感测技术在滑坡大变形监测方面的研究。目前,大部分光缆在滑坡发生大变形时都易被拉断,造成了断点以下的滑坡深部变形数据缺失,因此,无法对滑坡大变形进行全面监测。国内外学者正在开展改进光缆的加工工艺和采用尼龙等材料护套,使其适应更大的变形监测,相关研究已取得初步成果,但仍需进一步的实验与改进。

2) 改进和完善滑坡区域变形场预测的数学模型。目前,大部分监测技术可以全天候实时地监测滑坡变形,然而如何从海量的监测数据中快速、智能、自动化地挖掘出其关联模式仍需进一步研究。同时,如何将实时监测数据与机器学习方法相结合,不断调整滑坡预测预警模型也是未来滑坡监测预警的一个重点研究方向。

3) 由于安装在滑坡表面及浅层的监测设备容易受到大风、冰雹、高温、暴雨等极端天气的影响,常造成仪器失灵、数据失真或传输中断,如何在极端恶劣环境下保障全域覆盖与可信的空天地内一体化数据传输,必须坚持创新监测模式的原则,研究更适合在极端恶劣条件下的可靠监测模型。

4) 通过基于物联网的监测系统可靠性研究,提高监测数据的可信性,实现空天地内一体化的立体可靠监测网,这将在未来的滑坡监测中发挥越来越重要的作用。同时,如何做好滑坡常规监测与应急监测的衔接与融合,特别是如何进一步加强监测技术在滑坡应急处置过程的关键作用也是未来研究的一个重点方向,这为实现滑坡监测-预警-响应-处置的无缝对接,从技术和应用层面筑牢防灾减灾救灾的防线提供支撑。

参 考 文 献

- [1] China Geological and Environmental Monitoring Institute. National notification of geological disasters (2019)[J]. National Notification of Geological Disasters, 2020, 1: 1-5.
中国地质环境监测院. 全国地质灾害通报(2019)[J]. 全国地质灾害通报, 2020, 1: 1-5.
- [2] Shi B, Yan C H. Engineering geology [M].

- Beijing: Science Press, 2017: 350-391.
施斌, 阎长虹. 工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 350-391.
- [3] Zhang J J, Yang S Y, Wang R. The revelation of "June 28" massive geological disaster in Guanling, Guizhou [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3): 137-139.
张建江, 杨胜元, 王瑞. 贵州关岭“6·28”特大地质灾害的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 137-139.
- [4] Liu C Z. Some cultural problems for geological disaster reduction[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 1-6.
刘传正. 论地质灾害防治文化培育问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 1-6.
- [5] Huang R Q, Xiang X Q, Ju N P. Assessment of China's regional geohazards: present situation and problems [J]. Regional Geology of China, 2004, 23(11): 1078-1082.
黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状及其问题[J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1078-1082.
- [6] Wen H J, Zhang Y X, Liu Y. A home and abroad investigative-tendency of landslide forecast [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 1-4, 16.
文海家, 张永兴, 柳源. 滑坡预报国内外研究动态及发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 1-4, 16.
- [7] Liu Y, Li Y S. Research status and development trend of monitoring landslide [J]. Surveying and Mapping, 2013, 36(5): 228-231.
刘悦, 李永树. 浅谈滑坡监测研究现状及发展趋势[J]. 测绘, 2013, 36(5): 228-231.
- [8] Liu T. The application research of GNSS technology in landslide stability monitoring [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 1-19.
刘韬. GNSS技术在滑坡稳定性监测中的应用研究与实例分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2015: 1-19.
- [9] Gili J A, Corominas J, Rius J. Using global positioning system techniques in landslide monitoring [J]. Engineering Geology, 2000, 55(3): 167-192.
- [10] Liu J. Study on landslide stability based on GPS monitoring technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 1-22.
刘君. 基于GPS监测技术的滑坡稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 1-22.
- [11] Yu D X, Zou S C. Application of GPS to coast deformation monitoring [J]. Geospatial Information, 2009, 7(1): 55-58.
俞得响, 邹双朝. GPS技术在滑坡变形监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2009, 7(1): 55-58.
- [12] Han J Q, Huang G W, Li Z. Multipath effect analysis and processing method of GNSS landslide monitoring under complicated environment [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(3): 355-362.
韩军强, 黄观文, 李哲. 复杂环境下GNSS滑坡监测多路径效应分析及处理方法[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(3): 355-362.
- [13] Xu Q. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360-374.
许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360-374.
- [14] Lundgren P, Samsonov S V, López Velez C M, et al. Deep source model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, constrained by interferometric synthetic aperture radar observations [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(12): 4816-4823.
- [15] Wasowski J, Bovenga F. Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal interferometry: current issues and future perspectives [J]. Engineering Geology, 2014, 174: 103-138.
- [16] Osmanoğlu B, Sunar F, Wdowinski S, et al. Time series analysis of InSAR data: methods and trends [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 90-102.
- [17] Babu A, Kumar S. SBAS interferometric analysis for volcanic eruption of Hawaii island [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2019, 370: 31-50.
- [18] Feng W K, Dun J W, Yi X Y, et al. Deformation analysis of woda village old landslide in Jinsha river basin using sbas-insar technology [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 384-393.
冯文凯, 顿佳伟, 易小宇, 等. 基于SBAS-InSAR技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 384-393.
- [19] Tizzani P, Berardino P, Casu F, et al. Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(3): 277-289.
- [20] Gao J J, Yan Y S, Sheng X P, et al. Application of UAV remote sensing in geologic hazards survey

- along the project of west-east gas transmission [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(6): 126-129,133.
- 高姣姣, 颜宇森, 盛新蒲, 等. 无人机遥感在西气东输管道地质灾害调查中的应用[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(6): 126-129,133.
- [21] Ma J, Zhang M Z, Feng Z, et al. Design and implementation of a micro-UAV route control system for geological hazard investigation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 37-41,50.
- 马娟, 张鸣之, 冯振, 等. 适用于地质灾害调查的微型无人机航线控制系统设计与实现[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 37-41,50.
- [22] Huang H F, Yi W, Zhang G D, et al. Method of using micro-UAVRS in engineering geological investigation and design for emergency control of landslides [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(1): 99-104.
- 黄海峰, 易武, 张国栋, 等. 引入小型无人机遥感的滑坡应急治理勘查设计方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(1): 99-104.
- [23] Jia S G, Jin A B, Zhao Y Q. Application of UAV oblique photogrammetry in the field of geology survey at the high and steep slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 1130-1136.
- 贾曙光, 金爱兵, 赵怡晴. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用[J]. *岩土力学*, 2018, 39(3): 1130-1136.
- [24] Stiros S C, Psimoulis P A. Response of a historical short-span railway bridge to passing trains: 3-D deflections and dominant frequencies derived from Robotic Total Station (RTS) measurements [J]. *Engineering Structures*, 2012, 45: 362-371.
- [25] Endou K, Ikenoya T, Kurazume R. Development of 3D scanning system using automatic guiding total station [J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2012, 24(6): 992-999.
- [26] Ma J W, Tang H M, Hu X L, et al. Application of 3D laser scanning technology to landslide physical model test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35 (5) : 1495-1505.
- 马俊伟, 唐辉明, 胡新丽, 等. 三维激光扫描技术在滑坡物理模型试验中的应用[J]. *岩土力学*, 2014, 35(5): 1495-1505.
- [27] Gumilar I, Fattah A, Abidin H Z, et al. Landslide monitoring using terrestrial laser scanner and robotic total station in Rancabali [C]//Proceeding of 6 th International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation, Oct. 11-12, 2016, Bandung, Indonesia: AIP Publishing LLC, 2017, 1857(1) : 060001.
- [28] Hu C, Deng Y K, Tian W M, et al. Novel MIMO-SAR system applied for high-speed and high-accuracy deformation measurement [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(20): 6598-6602.
- [29] Liu B, Ge D Q, Li M, et al. Using ground-based InSAR to evaluate the stability of an open-pit slope under blasting operation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(S1): 139-145.
- 刘斌, 葛大庆, 李曼, 等. 地基 InSAR 评估爆破作业对露天采矿边坡的稳定性影响[J]. *遥感学报*, 2018, 22(S1): 139-145.
- [30] Zeng T, Deng Y K, Hu C, et al. Development state and application examples of ground-based differential interferometric radar [J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 154-170.
- 曾涛, 邓云开, 胡程, 等. 地基差分干涉雷达发展现状及应用实例[J]. *雷达学报*, 2019, 8(1): 154-170.
- [31] Monserrat H O. Deformation measurement and monitoring with ground-based SAR [D]. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya, 2012: 85-101.
- [32] Chen Y M, Chen Y, Chen R P, et al. Testing study on applications of time domain reflectometry to slope monitoring [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2748-2755.
- 陈云敏, 陈赞, 陈仁朋, 等. 滑坡监测 TDR 技术的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2748-2755.
- [33] Chung C C, Lin C P. A comprehensive framework of TDR landslide monitoring and early warning substantiated by field examples [J]. *Engineering Geology*, 2019, 262: 105330.
- [34] Tang R, Wang J L, Fan X M. Application of TDR technology to landslide monitoring [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2007, 18(1): 105-110.
- 唐然, 汪家林, 范宣梅. TDR 技术在滑坡监测中的应用[J]. *地质灾害与环境保护*, 2007, 18(1): 105-110.
- [35] Dong W W, Zhu H H, Sun Y J, et al. Current status and new progress on slope deformation monitoring technologies [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(6): 1088-1095.
- 董文文, 朱鸿鹄, 孙义杰, 等. 边坡变形监测技术现状及新进展[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(6): 1088-1095.

- [36] Tang H M, Cai Y, Zhang Y Q, et al. Current status and prospect for inclinometer application in monitoring of landslide deep displacement[J]. Journal of Engineering Geology, 24: 702-709.
唐辉明, 蔡毅, 张永权, 等. 测斜仪在滑坡深部位移监测中的应用现状及展望[J]. 工程地质学报, 24: 702-709.
- [37] Pei H F, Yin J H, Zhu H H, et al. *In-situ* monitoring of displacements and stability evaluation of slope based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1570-1576.
裴华富, 殷建华, 朱鸿鹄, 等. 基于光纤光栅传感技术的边坡原位测斜及稳定性评估方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1570-1576.
- [38] Gao Y, Li W L, Yuan Q. MEMS sensor-based study on slope sliding characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(10): 153-161.
高燕, 李文龙, 袁泉. 基于 MEMS 传感器的边坡滑动特征研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(10): 153-161.
- [39] Ćmielewski B, Kontny B, Ćmielewski K. Use of MEMS technology in mass wasting research [J]. Reports on Geodesy, 2011: 85-92.
- [40] Shi B. On the ground sensing system and ground sensing engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 582-591.
施斌. 论大地感知系统与大地感知工程[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 582-591.
- [41] Cheng G, Shi B, Zhu H H, et al. Experimental study on coupling performance of fiber and sand interface based on distributed sensing[J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(4): 487-494.
程刚, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 光纤和砂土界面耦合性能的分布式感测试验研究[J]. 高校地质学报, 2019, 25(4): 487-494.
- [42] Jie Q, Shi B, Luo W Q, et al. Analysis of DFOS-based association rules on multi-fields data monitoring of slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(6): 1146-1152.
揭奇, 施斌, 罗文强, 等. 基于 DFOS 的边坡多场信息关联规则分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(6): 1146-1152.
- [43] Shi B. On fields and their coupling in engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 673-680.
施斌. 论工程地质中的场及其多场耦合[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 673-680.
- [44] Sun Y J. Bank slope multi-fields monitoring based on fiber optic sensing technologies and stability evaluation study [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015: 12-21.
孙义杰. 库岸边坡多场光纤监测技术与稳定性评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2015: 12-21.
- [45] Zhu H H, Yin J H, Hong C Y, et al. Fiber optic based monitoring technologies of slope engineering [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(3): 6-10,14.
朱鸿鹄, 殷建华, 洪成雨, 等. 基于光纤传感的边坡工程监测技术[J]. 工程勘察, 2010, 38(3): 6-10,14.
- [46] Wang T, Tian F, Tang W Q, et al. Brillouin frequency shift extraction method for distributed optical fiber temperature sensing system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170631.
王婷, 田凤, 汤文青, 等. 分布式光纤温度传感系统的布里渊频移提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170631.
- [47] Zhu H H, Shi B, Yan J F, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 821-828.
朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821-828.
- [48] Zhang C C, Zhu H H, Liu S P, et al. A kinematic method for calculating shear displacements of landslides using distributed fiber optic strain measurements [J]. Engineering Geology, 2018, 234: 83-96.
- [49] Jin L, Hu X L, Tan F L, et al. Research on the temperature field variation in the process of landslides failure based on the infrared thermal imaging technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 77-84.
金林, 胡新丽, 谭福林, 等. 基于红外热成像技术的滑坡破坏过程温度场变化分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 77-84.
- [50] Gu K, Tang C S, Shi B, et al. A study of the effect of temperature on the structural strength of a clayey soil using a micropenetrator [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(3): 747-758.
- [51] Liu C, Shi B, Shao Y X, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of the urban heat

- island on slope stability [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2013, 72(3/4): 303-310.
- [52] Hu W, Huang R Q, McSaveney M, et al. Superheated steam, hot CO₂ and dynamic recrystallization from frictional heat jointly lubricated a giant landslide: field and experimental evidence [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 510: 85-93.
- [53] Wang X N. Study on-the landslide temperature field and its application to the Three Gorges project [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1993, 12(2): 126-137.
王效宁. 滑坡温度特性研究及其在三峡库岸稳定分析中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 1993, 12(2): 126-137.
- [54] Zhao Y, Wang Q, Ling Z W. Experimental analysis and leakage location detection of tap water pipe based on distributed optical fiber with selective average threshold [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(3): 030602.
赵亚, 王强, 凌张伟. 基于选择性平均阈值的分布式光纤自来水管泄漏检测定位及实验分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(3): 030602.
- [55] Wu T, Pang T, Tang Y Q, et al. Application of MOPA all-fiber pulsed laser in RDTS system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1101009.
吴涛, 庞涛, 汤玉泉, 等. 应用于RDTS系统的MOPA全光纤脉冲激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1101009.