

# 基于物联网的公路边坡监测管理与决策支持系统构建与应用

邬凯, 梁苗, 杨雪莲

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**山区公路边坡具有沿线点状分布、数量较多、长期稳定性易劣化等特征,传统公路养护管理和监测方法难以适应大规模山区公路运营安全管理需要。该文开发的系统基于物联网技术框架,实现公路边坡工程建库、感知、传输、分析、应用的无缝对接。首先通过大量公路沿线边坡现场调查、基础数据标准化和稳定性评价,建立公路边坡信息数据库和长期稳定性动态评价体系;然后集成应用磁感触发式位移计、智能测斜绳等新型监测设备及FSK射频、LoRa、GPRS等混合组网无线通信技术,建立了公路边坡远程监测系统;最终集成开发了融边坡工程健康信息管理、边坡远程监测信息管理、边坡地质灾害应急决策管理为一体的信息管理与决策支持系统。该系统在山区公路边坡工程健康管理和防灾减灾领域中得到成功应用,可为山区公路安全运营提供新的技术支撑。

**关键词:**物联网;公路边坡;信息管理;位移监测;无线传感;决策支持;防灾减灾

物联网技术是通过智能传感器与无线通信网络、因特网的互连互通,实现物与物、人与物之间智能化传感、高效存储和信息处理,是传感网与无线通信网、互联网“三网”融合的产物。物联网为公路边坡工程的科学管理提供了全方位、全天候的信息采集、传输、处理、管理、决策和信息发布的平台,在公路防灾减灾领域中具有十分广阔的应用前景。

乔辉、周平根等提出了基于物联网技术的地质灾害监测预警系统的架构和功能设计,指出了系统的关键技术和研究方向;杜金星等基于物联网技术建立了白龙江流域地质灾害监测预警系统,系统监测变量主要为降雨量;黄河等开发了基于物联网的地质灾害群测群防系统,主要实现了变形监测数据的实时监测与智能报警;孙光林等针对矿山领域倾斜顺层岩质边坡监测预警难题,提出了基于物联网的恒阻大变形锚索监测系统;撒文奇等开发了大型地下洞室群施工期安全实时评价与动态预警系统,实现了地下工程施工过程的动态安全预警及指挥调度。以上研究推动了物联网技术在地质灾害监测预警领域的应用和发展。但通过总结可以发现,现有物联网技术研究多集中在重大地质灾害点、矿山边坡、水电地下洞室群等大型单体工

程的监测预警上,对点状分布、数量众多的公路边坡开展基于物联网的全过程评价、监测、管理及决策方面的应用极少。该文基于物联网技术框架,通过公路沿线边坡现场调查,对基础数据进行标准化和稳定性量化评价,建立公路边坡信息数据库和长期健康动态评价体系;然后集成应用多种新型监测设备及混合组网无线通信技术,建立公路边坡地质灾害远程监测系统;最终集成开发融边坡工程健康信息管理、边坡远程监测信息管理、边坡地质灾害应急决策管理为一体的信息管理与决策支持系统,实现公路边坡工程建库、感知、传输、分析、应用的无缝对接,为公路边坡地质灾害防灾减灾提供了新的技术支持。

## 1 物联网系统架构

物联网是一个通过信息技术将各种物体连接形成网络以帮助人们获取这些物体信息的载体。传统的物联网系统架构可分为感知层、网络层和应用层3个层次。基于物联网技术的公路边坡监测管理与决策支持系统,从架构上可划分为“建、感、传、知、用”5个层次,如图1所示。“建”为基础层,即通过现场调查,数据标

收稿日期:2021-01-07(修改稿)

基金项目:四川省交通科技项目(编号:2012C14-2,2016B2-2)

作者简介:邬凯,男,博士,高级工程师, E-mail: wukaicu@sina.com

准化等建立边坡工程基础信息数据库,对边坡进行稳定性评价,形成公路边坡健康档案,为监测点的布设和应急决策提供基础数据支持;“感”为感知层,即监测数据信息采集,主要通过公路边坡地质灾害远程监测系统,通过各种智能传感器等设备对边坡变形发展信息进行感知;“传”为传输层,即对传感器取得的边坡监测数据进行传输,包括 GPRS 网络和无线传感网等通讯手段;“知”为数据处理层即地质灾害在线监测平台,对智能采集的监测数据进行存储、挖掘和分析;“用”为应用层即预警决策支持系统,该层是物联网系统和用户的接口,实现各种数据分析结果的应用。数据处理层和应用层也是整个公路边坡监测管理与决策支持系统的核心部分。

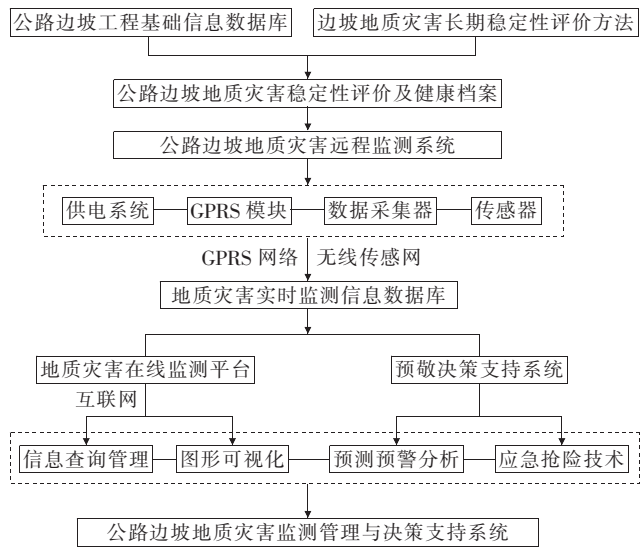


图1 基于物联网的公路边坡监测管理与决策支持系统具体实现方案

基于物联网的公路边坡监测管理与决策支持系统以边坡工程基础信息数据库和边坡监测信息数据库为基础,主要由边坡长期稳定性评价模块、边坡远程监测系统、边坡在线监测分析与管理模块、边坡地质灾害应急处治决策模块组成,利用先进的物联网技术将各模块无缝衔接,使系统各模块之间高效、协同工作。

2 公路边坡工程信息数据库

针对山区公路边坡沿线点状分布,基础信息数据量大的特点,为便于公路边坡长期健康管理,需利用互联网和数据库技术,对大量公路沿线边坡基础信息数据进行标准化,并选取量化评价模型开展边坡稳定性动态评价,由此形成边坡工程基础信息数据库。

传统公路边坡稳定性评价影响因素主要包含 3 类,即边坡地形地貌、坡体结构特征、边坡环境条件。以上 3 类因素基本属于静态因素,一般不随时间发生变化。由于公路边坡长期稳定性具有逐步劣化特征,因此还需将边坡动态变形特征作为长期稳定性评价的重要特征因素。以四川典型山区公路为例,将边坡分为岩土二元结构和岩质边坡两类。针对岩土二元结构边坡,采用边坡坡高、坡比、坡面形态、变形特征、土体地质成因、土体厚度、岩土分界面倾角、人类工程活动、地下水特征、降雨量、地震烈度等特征因素作为量化评价基础指标。岩质边坡量化评价基础指标包括坡高、坡比、变形特征、岩性组合关系、岩层产状与路线关系、岩石风化程度、节理发育程度、地下水特征、降雨量、地震烈度等因素。在现场调查获取边坡特征信息后,即可录入平台数据库,形成边坡工程地质基础信息库。然后对每个基础指标分 4 个量级进行打分,指标权重系数及分值根据公路边坡变形失稳调查结果和专家经验取得,每项分类指标得分合计为该边坡的量化评价总分。根据量化评价得分,可将公路边坡动态稳定性分为稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定 4 个等级。

针对边坡稳定性不同的量化评价等级,管理部门可采用日常巡查、专项监测和应急处治等分级管理应对措施。在初次评估的基础上,公路建成 3 年内每年进行一次复查,之后每两年进行一次复查,通过日常养护巡查和变形监测,不断更新边坡变形状态,由此形成公路边坡长期健康档案。

3 新型智能变形监测技术

在公路边坡稳定性评价分级的基础上,可以选择重点边坡监测其变形发展情况,长期动态掌握其稳定状态。边坡变形的演化发展是边坡岩土体失稳破坏前兆的最直观体现,也是监测预警的主要指标和依据。通过地表位移监测可以掌握坡体裂缝的发展情况和位移方向、位移速率等宏观变形指标,深部位移监测可以掌握边坡深部不同位置的岩土体深部位移量及速率,可确定潜在滑面位置及滑动方向。对于点状分布、数量较多的公路边坡,两者均是重要的监测变量,可选择经济、节能的新型智能仪器进行监测。

3.1 地表位移监测

该系统选用的地表位移监测设备主要为磁感触发式位移计,该位移计经济节能、精度较高。磁感触发式位移计在边坡周边的相对稳定点与边坡监测点之间通

过拉索布线,当两点相对位置发生变化,即钢索每拉开 1 mm 时,可主动触发信号,从而得到监测点的相对变形量。位移计采用低耗能的磁感式触发电路,在边坡位移没有发生变化时,位移计呈休眠状态,基本不耗电。位移计和无线传讯器均由锂电池供电,可以使用 2 年,无需外接电源,后期维护更换较方便且经济节能,适用于运营期长期监测。该设备适用于地形条件较好,有明显变形及裂缝特征的边坡变形监测。

### 3.2 深部位移监测

传统的深部位移监测设备主要为活动式测斜仪和固定式测斜仪,但两种测斜设备都存在一定的弊端。活动式测斜仪主要靠人工监测,存在工作效率较低、数据连续差等问题。固定式测斜仪为传统深部位移自动监测设备,其在每个钻孔内可安装传感器数量有限,最多为 7~8 个,设备安装后可能捕捉不到潜在滑面等关键信息,且难以无线组网。两种设备监测量程相对较小,随着深部变形的不断增大,活动测斜仪难以放入监测管,固定式测斜仪可能超出监测量程。

## 4 无线传感网络及传输技术

在诸多新兴自动化监测体系中,基于物联网技术的无线传感器网络在近年来应用最为广泛。公路边坡远程监测系统是在现场安装智能传感器的基础上,通过建立无线传感网与外部远程无线传输网络的连接,对多源采集的信息以集中方式进行批量传输。无线传感网中常使用的技术包括 WiFi、433 MHz 射频、ZigBee 等方式,它们都属于短距离无线通信技术。射频是指可以辐射到空间的电磁频率,433 MHz 射频的特点是组网简单、传输速率较低等,适合传感器网络拓扑结构简单、数据传输量不大的无线传感器组网。该系统中的磁感触发式位移计和智能测斜绳无线组网选用的均是 433 MHz 通信技术,但根据传感器类型的差异所采用的模块不同,地表位移计采用的是结构较为简单、传输数据量较低的 FSK 射频模块。智能测斜绳由于传感器较多,数据量较大采用的是 LoRa 模块。两个模块均采用太阳能供电,后期维护管理成本较低,适用于运营期长期监测。

### 4.1 基于 FSK 射频模块的磁感触发式位移计无线组网

FSK(Frequency-Shift Keying)是无线通信中常用的一种调制方式,主要优势是信号传输抗噪声与抗衰减的能力较好,在中低速数据传输中应用广泛。磁

感触发式位移计采用的是基于 433 MHz 的 FSK 射频模块。磁感触发式位移计配接了基于 FSK 射频的无线通信模块,由发射器和接收器组成。发射器与接收器之间可以在 500 m 内进行短距离无线数据通信。接收器可以同时接收 8 组磁感触发式位移计的发射信号,收到数据后再以 RS-232 标准通信格式传给数据采集设备。

### 4.2 基于 LoRa 模块的智能测斜绳无线组网

LoRa 是一种新型的物联网无线传输技术,属于低功耗广域网技术中的一种。LoRa 技术除具有 LP-WAN 技术的远距离、低功耗、低带宽、低成本、覆盖容量大等特点外,还包含搭建网络灵活、易于建设和部署速度快等特点。与传统的 WiFi、ZigBee、蓝牙等无线通信技术相比,LoRa 技术在无线通信距离方面具有明显的优势,具有长距离、低功耗、广域覆盖等优点,已在物联网领域得到广泛应用。

智能测斜绳安装在钻孔的刚性套管内,通过数据采集模块采集每段的数据,采集模块外接 LoRa 天线,通过 LoRa 技术将数据传输到场区指定的远程传输终端,远程传输终端接有 LoRa 接收天线,接收数据后再通过 GPRS/4G 等方式传输到远程监控中心,从而形成新型深部位移远程自动监测系统。

### 4.3 基于 GPRS 网络的远程无线传输技术

GPRS 是全球移动通信系统(GSM)支持的一种数据传输业务,具有网络接入方便、实时高效传输和费用较低等优点。如图 2 所示,针对山区公路边坡远程无线传输网络的建设,通常采用 GPRS 网络或 4G 服务,建立无线传感网终端与远程监测中心服务器的连接,实现海量边坡监测数据的远程无线传输功能。该系统的远程数据传输即采用 GPRS/4G 技术,磁感触发式位移计、智能测斜绳等通过无线传感组网进行短距离无线传输后,再通过数据采集传输系统进行远程无线传输。

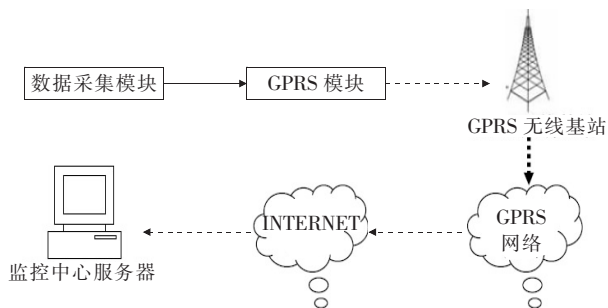


图 2 GPRS 远程数据采集实现原理



5 系统开发

5.1 系统平台开发关键技术

系统平台采用基于 Java 的 Spring MVC 框架进行设计,它是一种请求驱动类型的轻量级 Web 框架,该架构模式包含模型、视图和控制器 3 个组件。模型对象主要包含数据库,是系统的数据基础;视图对象通过图表等多种形式显示与用户交互的海量数据;控制器对象是介于模型与系统之间的桥梁,它可以分发和处理用户的请求,选择合适的视图将数据返回展示给用户。该系统不但能在监测中心本地进行开发管理,而且还可以进行远程登录查询,给管理部门的决策带来便利。

5.2 系统功能实现

如图 3 所示,系统首先以边坡工程信息、边坡监测信息和应急抢险决策信息为基础建立边坡地质灾害基础信息数据库,然后开发完成公路边坡信息管理与评价、边坡监测信息管理、防灾减灾决策支持管理三大功能模块。

公路边坡信息管理与评价模块包含高速公路项目管理、边坡工程地质信息管理、岩质边坡量化评价、岩土二元边坡量化评价功能。可以通过选择高速公路项目、工点名称、坡高、变形特征等条件,查询公路岩质边坡量化信息。在用户输入边坡量化信息后,系统可以自动对岩质边坡稳定性进行评价分级。

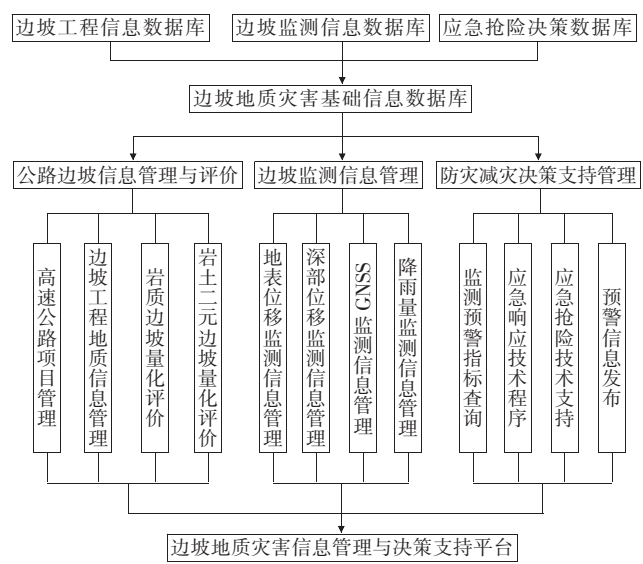


图 3 软件系统总体架构

边坡监测信息管理模块包含触发式地表位移监测

信息管理、深部位移监测信息管理、降雨量监测信息管理功能。可以通过选择高速公路名称,测点名称,起始时间和截止时间来查询监测位移值,查询结果以表格形式列出,可以对位移值数据进行编辑和删除。通过选择测点名称和日期来查询某天位移监测曲线和多天位移监测曲线。

防灾减灾决策支持管理模块包含监测预警指标查询、应急响应技术程序查询、应急抢险技术支持和预警信息发布功能。用户可查看各监测预警指标及边坡地质灾害应急响应技术程序,按程序开展边坡地质灾害应急抢险工作。在应急抢险技术界面中,可查看边坡地质灾害应急抢险技术,包括设计施工要点、施工图片示意及通用图。在预警信息发布界面中,可设置每个高速公路监测项目的预警指标,通过短信息向预定的联系人发送预警信息。边坡地质灾害信息数据库和三大功能模块无缝衔接,共同构成了边坡地质灾害信息管理与决策支持平台。

6 工程应用

针对四川典型红层地区运营期高速公路边坡地质灾害防灾减灾需要,现场调查了某高速公路全线 10 m 高度以上的所有边坡,累计 398 个。对各个边坡特征因素和目前变形特征进行了详细的调查,建立了红层地区岩土二元结构边坡和岩质边坡稳定性量化评价体系。将该边坡特征要素和照片等作为边坡基础信息录入系统数据库,通过量化评价进行稳定性分级。在定期现场核查变形情况后,可对量化信息进行修正,以形成边坡稳定健康动态评价。系统根据目前的边坡特征信息进行了量化评价,结果如图 4、5 所示。

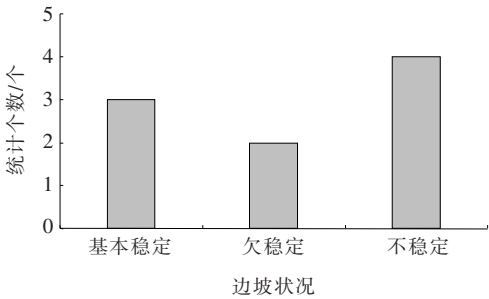


图 4 岩土二元结构边坡稳定性量化评价结果

由图 4、5 可知:全线共 9 处岩土二元结构边坡,其中不稳定边坡 4 处;全线岩质边坡稳定状况以基本稳定和稳定为主,其中不稳定边坡 11 处。根据边坡稳定性动态评价分级结果,近 2 年累计对 20 余处边坡进行

了处治加固,同时有针对性地对边坡开展日常巡查和常规监测,实现边坡长期稳定性的动态管理。

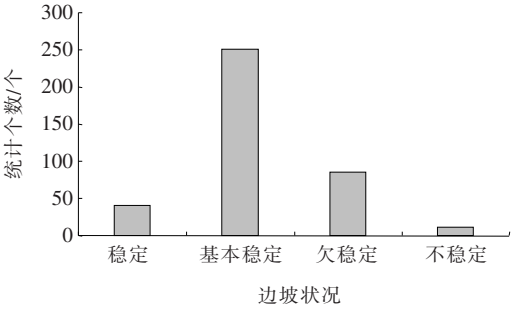


图 5 岩质边坡稳定性量化评价结果

根据公路边坡稳定性评价结果,对部分边坡安装了远程监测系统。某岩土二元结构高边坡地形条件较好,边坡周界范围小于 500 m,便于进行短距离的 FSK 射频模块组网。如图 6 所示,在该边坡安装了 6 台磁感触发式地表位移计和 1 台雨量计,位移计进行短距离无线组网后再采用 4G 进行远程无线传输。通过监测管理与决策支持系统对监测数据的管理和预警,由此实现了传感网、4G 网络、互联网的融合。如图 7 所示,以主断面 5# 位移计监测数据分析为例,结合现场调查情况,在整个监测周期内,监测点无明显的变形迹象,边坡在完善的排水系统和支挡结构作用下已经受住强降雨、2013 年芦山地震等不利工况的检验,坡体整体处于稳定状态。

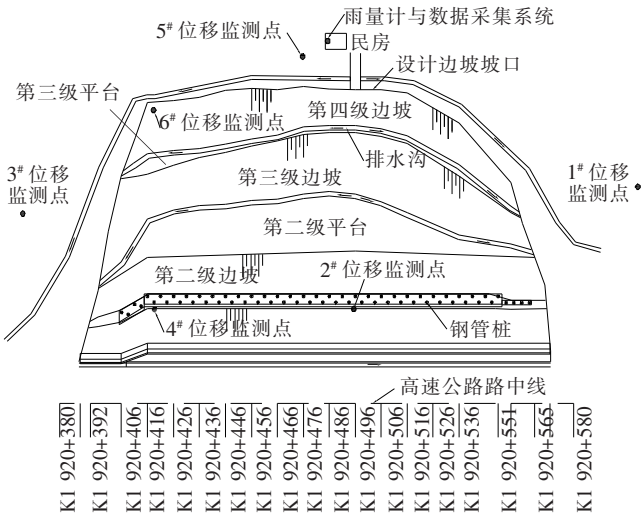


图 6 地表位移远程监测系统平面布置图

某公路边坡所处斜坡坡面陡峻,坡表植被茂密。自然斜坡顺南东方向呈顺层坡体结构,区内地质构造活动强烈,斜坡基岩出露处可见岩层倒转和断层破碎

带。受不利的地形地质条件影响,2018 年 2 月 28 日以来,该路段边坡山体和路基出现明显变形迹象,随后对该路段进行了应急抢险处治,边坡抢险处治工程于 7 月基本完工。为准确掌握场地变形情况,指导加固处治和管制通行工作,在场地内共布置了 8 个深部位移监测孔,通过 LoRa 技术将深部位移监测数据传输到远程传输终端,远程传输终端接有 LoRa 接收天线,接收数据后再通过 GPRS/4G 等方式传输到远程监控中心,通过互联网可以实时管理监测数据并进行决策支持分析,由此形成了基于物联网的深部位移监测系统。

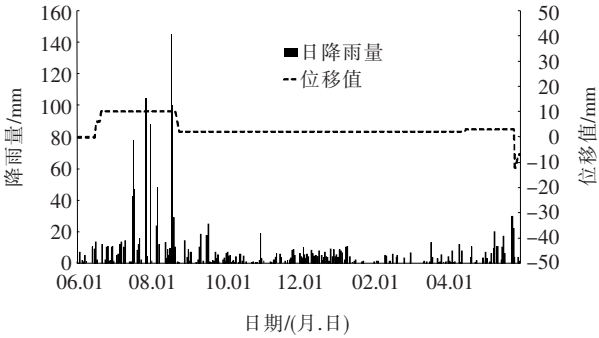


图 7 5# 位移计监测值与日降雨量关系曲线

以典型监测点深部位移数据分析为例,如图 8 所示,2018 年 3—8 月,山体深部变形速率较大,局部变形较剧烈,位移速率呈非线性变化,平均日变形速率为 3.0~7.0 mm/d。2018 年 8—12 月,应急抢险处治工程实施完成后,变形速率逐步减缓,以蠕动变形为主,局部变形面未发生持续性累加变形,平均日位移速率为 0~0.5 mm/d。应急处治工程的实施对山体变形有一定约束作用。

7 结论

针对公路边坡动态稳定性评价、长期监测及应急决策,选择数据库技术与自动监测方法、现代远程传输技术、互联网技术相结合,建立了基于物联网的公路边坡监测管理与决策支持系统,得到如下结论:

- (1) 根据山区公路边坡稳定性长期劣化的特点,建立了公路边坡动态稳定性量化评价方法。以典型山区运营期高速公路为例,详细调查收集了 398 个边坡基础信息,开展了边坡稳定性评价。基于互联网技术,建立了边坡工程量化评价信息数据库,为公路边坡长期健康评估提供了在线平台。

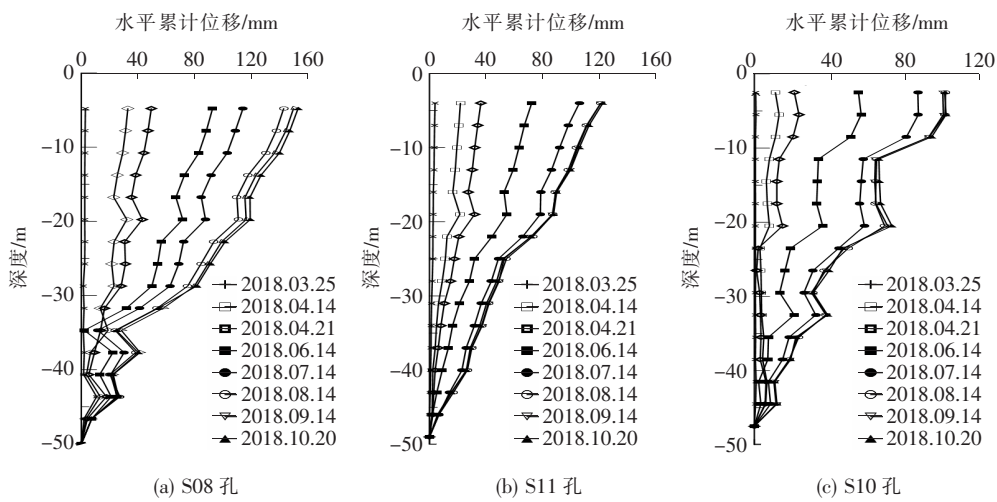


图8 深部位移监测孔位移—深度曲线

(2) 系统集成了触发式地表位移计、智能测斜绳等高智能传感器,地表位移和深部位移监测精度高且连续性好。基于FSK射频技术和LoRa技术,实现了地表位移监测和深部位移监测的无线传感混合组网即时通信技术,解决了传统监测系统在复杂山区布线困难的问题。通过GPRS网络建立了公路边坡地质灾害远程监测系统,监测系统成功安装运用在多条山区高速公路上。

(3) 开发了边坡地质灾害信息管理与决策支持平台,实现了公路边坡工程健康信息建库、监测感知、无线远程传输、数据分析、决策应用的无缝对接和功能集成,克服了传统监测管理系统功能单一的局限性,便于运营期高速公路边坡长期安全动态管理和监测预警,提高了山区公路边坡地质灾害防灾减灾信息化水平。

参考文献:

[1] 黄健,巨能攀,何朝阳,等.基于新一代信息技术的地质灾害监测预警系统建设[J].工程地质学报,2015(1).  
[2] 姚仰平,王俊博.北斗卫星定位在机场高填方远程变形监测中的应用[J].岩土力学,2018(S1).  
[3] 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(6).  
[4] 乔辉,汪滔,谢志远.物联网技术在地质灾害防治中的应用[J].物联网学报,2018(3).  
[5] 周平根,李昂,张艳玲,等.基于物联网技术的地质灾害监

测预警系统的结构和功能[J].工程地质学报,2012(S).  
[6] 杜金星,夏燕秋,马金辉.基于物联网技术的白龙江流域地质灾害监测预警系统的设计与实现[J].兰州大学学报(自然科学版),2014(5).  
[7] 黄河,罗斌,饶泉宇.基于物联网的地质灾害群测群防专业化远程监测系统开发[J].公路交通技术,2012(6).  
[8] 孙光林,陶志刚,宫伟力.边坡灾害监测预警物联网系统及工程应用[J].中国矿业大学学报,2017(2).  
[9] 撒文奇,张社荣,张连明.基于物联网的大型地下洞室群施工期动态安全评价与预警方法研究[J].岩石力学与工程学报,2014(11).  
[10] 王浩,豆红强,谢永宁,等.路堑边坡全寿命周期风险评估及管理的技术框架[J].岩土力学,2017(12).  
[11] 陈鹏,徐博侯.基于因素敏感性的边坡稳定可靠度分析[J].中国公路学报,2012(4).  
[12] 魏小楠.考虑岩土应变软化特性的开挖扰动诱发路堑边坡渐进性破坏机理分析[J].中外公路,2019(1).  
[13] 肖勃,朱禄宏,郭云开,等.山区高速公路顺向高边坡变形预测模型研究[J].中外公路,2018(5).  
[14] 鄔凯,杨雪莲,周永江.触发式位移计在山区公路边坡远程实时监测中的应用[J].路基工程,2016(3).  
[15] 陈贺,李亚军,房锐,等.滑坡深部位移监测新技术及预警预报研究[J].岩石力学与工程学报,2015(S2).  
[16] 赵静,苏光添.LoRa无线网络技术分析[J].移动通信,2016(21).  
[17] 肖勃,朱禄宏,郭云开,等.山区高速公路顺向高边坡变形预测模型研究[J].中外公路,2018(5).