

一种应用无线传感器网络观测泥石流的方法^①

卜方玲, 袁子晴, 陈 祠, 吴瑶锋, 孔 林

(武汉大学 电子信息学院, 430079)

摘 要: 介绍了泥石流的形成机理, 对现阶段的泥石流监测方法进行了分析和比较, 给出了基于无线传感器网络的泥石流关键因子的小尺度观测方法, 阐述了传感器节点的硬件构造方法、节点部署方法和节能通信协议。传感器网络不仅为泥石流机理的深入研究提供了数据源, 也为泥石流灾害预报和预警机制的建立奠定了基础, 有助于降低泥石流地质灾害的损失。

关键词: 泥石流; 降雨量; 孔隙水压力; 抗剪强度; 无线传感网络

Method of Debris Flow Monitoring Based on Wireless Sensor Network

PU Fang-Ling, YUAN Zi-Qing, CHEN Ci, WU Yao-Feng, KONG Lin

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, the mechanism of Debris Flow is summarized. The existing methods for Debris Flow monitoring are analyzed and evaluated. A method is presented for monitoring the key factors of Debris Flow based on wireless sensor networks (WSNs). The construction of nodes of WSN, as well as deployment of nodes and energy efficient protocol is introduced as well. WSNs does not only provide the data source for the mechanism exploration of Debris Flow, but also can be established as an infrastructure for Debris Flow forecasting and early warning. Application of WSNs in key factors surveying is conducive to reduction of loss caused by Debris Flow.

Key words: debris flow; rainfall; void water pressure; shear strength; wireless sensor networks

1 泥石流形成机理

泥石流普遍产生于沟谷中或坡地上, 是一种饱含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体。我国是受泥石流危害最为严重的国家之一, 在全国 2800 多个县级行政单位中有 1600 多个都属于有可能发生泥石流灾害的山区丘陵地区^[1]。泥石流具有分布广、数量多、爆发频率高、致灾能力强、危害严重的特点, 因此其相关研究引起了国内外众多学者的关注。

泥石流形成需要三个必要条件: 足够的岩石破坏产物为泥石流的形成提供松散固体物质, 数量充足的水体是泥石流的水动力来源, 切割强烈的山地地形为泥石流提供了通道。在具备了以上三点必要条件的基础上, 泥石流在暴雨等气象因素或地震、火山等地质因素的激发下最终暴发。

以 2010 年 8 月 8 日甘肃省舟曲县特大山洪泥石流灾害为例, 当地具有符合泥石流多发区的典型地质地貌特点。舟曲县是受 2008 年“5.12”汶川地震严重影响的重灾区之一, 地震导致本区域山体松动、岩层破碎。此外, 2009 年 8 月至 2010 年 8 月舟曲降水总体偏少, 持续干旱造成舟曲县城周边山体岩石裂缝扩大、暴露, 雨水更容易渗入岩土体, 进一步增大了泥石流爆发的可能。而在泥石流暴发当天, 舟曲局部地区过程降水量达 96.77 mm, 半小时降雨强度达 77.3 mm, 超过了引发山洪泥石流的每小时降水强度的临界值, 最终激发大规模泥石流的暴发^[2]。

在我国, 降雨尤其是暴雨, 是泥石流最主要的诱发因素。在总结国内外研究成果的基础上, 我们把降雨诱发下泥石流的形成机理概括为两个阶段。第一个

① 收稿时间:2011-05-21;收到修改稿时间:2011-06-29

阶段,非饱和固体松散物质由于含水量持续增加,达到饱和状态,基质吸力引起抗剪强度丧失,土体孔隙水压力升高形成超孔隙水压力;第二个阶段,饱和的固体松散物质由于含水量持续增加,孔隙水压增大^[3],剪切破坏区扩展连通形成剪切面,沿剪切面发生渗流,产生渗透力,致使土体强度进一步降低,剪切破坏面的剪应力低于抗剪强度,斜坡岩土体启动下滑。在滑动过程中,滑动土体碰撞、剥离解体,下泻造浆形成泥石流^[4]。泥石流启动过程的机理是泥石流预报方法研究的基础。

2 现阶段泥石流监测方法

泥石流监测方法按目的不同主要分为灾害预报和灾害预警两类,两者区别在于灾害预报是根据泥石流形成关键因子的监测数据预报可能发生的泥石流,灾害预警是根据泥石流爆发后的地声、流速等特征对泥石流尚未抵达地区进行报警。目前的灾害预报绝大部分是根据降雨量的预测和监测数值,预测可能发生的泥石流。灾害预警主要方法有:地声监测、超声波检测、接触型报警、泥位线报警等。本文对现有的泥石流监测技术进行研究,分析比较了各个技术的特点。

2.1 基于降雨量灾害预报方法

降雨量监测主要应用于灾害预报,也用于灾害预警。泥石流形成过程研究需要观测的降水量包括前期降雨量、激发雨量、降雨强度、当日降水量等,不同类型的降雨量有不同的观测精度要求。现阶段降雨量的监测手段有:数值天气预报模式、静止气象卫星云图、多普勒雷达回波、遥测雨量计(主要用于观测站)等,这些监测手段的监测范围、时长和精度各不相同。其中,数值天气预报模式应用于大区域的中短期预报,水平分辨率和垂直分辨率为 25~50 km 和 30~90 层,一般用来预测泥石流的前期降雨量,可提供 12~132 小时时长不等的降水预报。卫星云图的优点在于反演和估算大区域的地面降水^[5],可外推未来 1~3 小时的强降水量级和落区预报,一般用来预测和实时监测降雨量。遥测雨量传感器的特点是能通过无线电传送降水资料,实时性且观测精确度都比较高,可在第一时间获取降雨资料,如 10 分钟雨强、1 小时雨强等。雷达回波则擅长连续监测小范围内的强对流天气^[6],是监测降水的最为有效的手段之一。当雷达天线作水平搜索时可显示出测站周围的云雨分布区域、雨区移动情况、雨势的兴衰、降雨量和降雨强度,

反演和外推 0~3 小时雷达覆盖区内的降水情况,测雨雷达的实时性和反演精度都比较高。目前测雨雷达监测范围半径可达到 450 公里,在半径 200 公里以内的测量值更为精准。

经过分析和比较,我们认为卫星云图、雨量传感器和雷达是实用性好、观测精度满足泥石流研究的降雨量监测方法。

2.2 遥测地声法

泥石流次声信号是一个卓越频率为 5~15 Hz 范围内的信号(其中泥石流越粘稠,含石块越多,卓越频率越靠近低端部分),在泥石流形成和运动过程中,该信号以空气为介质,以约 344 m/s 的速度传播。

遥测地声法属于灾害预警类方法,它的优点是:(1)整个装置可以置于远离泥石流源地的室内,这是由于泥石流次声信号可以较长距离传播不衰减或很少衰减(至 10 千米以上),并可以穿透极小的缝隙,这个特点决定了该装置在泥石流发生时不被破坏,并能多次使用。(2)可通过全过程的地声信号强度推算出规模与流量的时程变化关系。

遥测地声法的主要缺点是:次声信号容易受到地震及其他非泥石流噪声的干扰,测量精度差,容易发生误报。

2.3 超声波泥位计法

考虑到泥石流流深能直观地反映泥石流规模大小和可能危害的程度,故可利用回声测距的原理测得传感器断面的泥石流流深。

超声波泥位计法属于灾害预警类方法。它的优点是超声波泥位计法的报警设定值容易改变,泥石流通过时不会被破坏,可多次使用,且灵活、耐用。但由于泥石流大冲大淤的特点,泥位计测到的泥位变化并不能完全反映实地泥石流来临与否的信息,而且为了得到相当的提前量,也必须将包括传感器的泥位计部分置于远离山口的流通区,不仅增加了设备成本,而且造成了设备的复杂性、易损性;同时,设备功耗大,需温度补偿。

2.4 接触型泥石流警报传感器

接触型泥石流警报传感器的工作原理是通过量测传感器(安装在泥石流断面侧壁的盆型凹槽里)被泥石流流体淹没之前的高电位,和传感器被泥石流流体淹没后沟通的电流从变压器流经限流电阻、传感器、泥石流流体、接地极又回到变压器的回路电压来判断传感器

是否被淹没,从而确定和发报泥石流是否发生及其发生的规模^[7]。

接触型泥石流警报传感器属于灾害预警方法,它的优点是不易被破坏,缺点是易发生误报,预报提前时间较短。

2.5 龙头高度泥位检知线、接触式泥位检知传感器

检知线是一条放在保护管内横跨河沟的钢绳,其一端固定河堤上,另一端与传感器接触电路相联,当泥石流发生时可能会拉紧或冲断钢绳,这两种情况都能启动接触装置,从而控制发射机发出相应规模的泥石流信号至接收调度站。

泥位检知型属于灾害预警方法,它的优点是装置简单,人畜通过无干扰,直观偏流时不产生漏报。但大规模泥石流通过时该类型易破坏,事后需重新拉线,且只对灾害泥石流报警。

通过对现阶段泥石流的主要监测方法的分析可知,地声监测、超声波检测、接触型报警、泥位线报警等灾害预警技术发展较为成熟,但这些方法是建立在泥石流已发生的基础之上,预警能力有限。灾害预报主要分为两类:基于降雨量模式和基于启动机理模式(成因预报),前者已被广泛应用,后者的研究尚处于起步阶段。成因预报不局限于降雨量的观测,它把孔隙水压、液位等因素考虑在内,同单一依据降雨量进行灾害预报模式相比,提高了泥石流区域性预报能力,是今后泥石流灾害预报研究的主要研究方向,泥石流形成因子观测技术的发展有助于泥石流启动机理的深入研究。

3 基于无线传感器网络的泥石流观测方法

无线传感器网络(WSN: wireless sensor network)将传感器技术、自动控制技术、数据网络传输、数据存储处理与分析技术集成的现代信息技术^[8]。将无线传感器网络应用于泥石流监测,通过在泥石流多发区域部署传感器节点,监测泥石流关键因子的变化,为泥石流预报和预警提供所需的观测数据,有助于泥石流形成机理的研究。无线传感网具有部署简单、维护方便、低成本低功耗等优势,传感器的精确度灵活可调,是今后泥石流预报技术的主要发展方向之一。

本文提出一种基于无线传感器网络的泥石流关键因子监测方法,旨在为泥石流形成机理的研究提供必要的实地观测数据。

3.1 传感器网络监测参数和传感器部署方法

降雨量、地下液位、孔隙水压力、地下应力、地表径流被认为是泥石流形成关键因子,本文分析了这些因子与泥石流的关系,研究了相关传感器现场部署方法。

降雨量:降雨是泥石流形成最主要的诱发因素,在世界范围内,泥石流发生的临界雨量阈值是公认的泥石流预报指标,也是目前技术条件下最有效的预报方法。按照时间顺序,降水因子分为泥石流前期降雨量、激发雨量、暴雨强度和当日降水量等。目前的泥石流预报模式中,短历时雨强和前期降雨是主要参考数据,而且多以短历时雨强作为预报泥石流的主要指标,重点关注10分钟雨量、30分钟雨量、1小时雨量和24小时雨量。

地下液位:泥石流启动阶段中,固体松散物质的含水量持续增加达到过饱和,从而形成剪切破坏面,最终导致泥石流的爆发。因此,地下液位作为固体松散物质含水量的间接体现,被大多数学者认为是泥石流研究的辅助因子。

孔隙水压力:连续降雨导致下渗到土体中的水不能及时排出,孔隙水压力迅速增大形成超孔隙水压力,从而使斜坡土体有效应力急剧降低甚至为零,斜坡局部地段残积土呈悬浮状态,此时,一旦遇到触发因素,坡体土将会发生下滑。因此,孔隙水压力反映了泥石流处于启动过程的具体阶段,是泥石流观测中一项重要的观测指标。相关事例证明,将孔隙水压力考虑在内的库伦模型,在Iverson列出的观测到的11种泥石流物理现象中,可以解释其中的9种现象^[9],库伦模型在泥石流的众多模型中位居前列。

地下应力:泥石流发生的动力条件主要是斜坡岩土体基质吸力剪应力增高,局部土体剪应力超过其抗剪强度,导致坡体失稳、变形、甚至破坏。地下应力在泥石流爆发过程中变化显著,是泥石流机理研究中重要的观测参数。

地表径流:泥石流形成过程中,地表径流流量越大,水土流失进展越快。地表径流裹挟土沙石砾达到超饱和状态,进而促发泥石流。地表径流作为辅助因子,反映泥石流的形成过程及规模变化。

本文将降雨量、地下液位、孔隙水压力和地下应力和地表径流作为观测对象,相应的传感器部署方法如图1所示,其中,降雨量、地下液位、孔隙水压力和地下应力传感器,分层部署在现场的现场钻孔内,

最底层放置液位传感器，以上各个层次分别放置应力传感器和孔隙水压力计，钻孔靠近地表位置放置雨量传感器和单片机控制模块。沿着山体边坡设置地表径流传感器。打孔之后的土需回填，尽量保持土壤原有条件。通过钻孔内不同层面的应力和孔隙水压反演岩土体的抗剪强度。根据实时监测的降雨量，并以泥石流启动阈值为参考，计算前期降雨量、激发雨量、暴雨强度和当日降水量。地表径流和降雨量不仅作为灾害预报因子，也可以作为灾害预警因子。

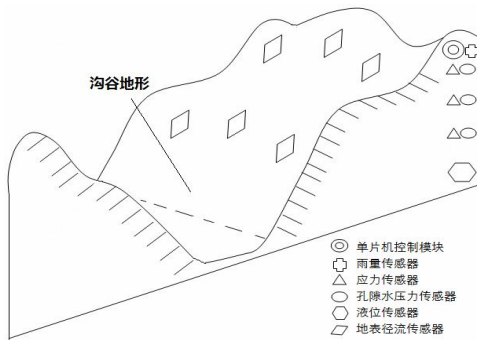


图 1 传感器布点示意图

3.2 传感器网络的构建方法

为了支撑泥石流形成机理的研究，无线传感器网络应对降雨量、液位、土壤应力等泥石流形成因子做长期监测，观测数据能及时地传递到远程数据和管理中心，为数学分析、揭示泥石流机理奠定基础。

无线传感器网络架构如图 2 所示，传感器网络由传感器节点、簇头节点和网关组成，每个节点可挂接多个泥石流传感器，传感器监测的数据经网关，通过 GPRS 连接接入 IP 网络，再传输到远程数据与管理中心进行储存和处理，管理员则通过反向链路对传感器网络进行配置，发布监测任务，收集监测数据。

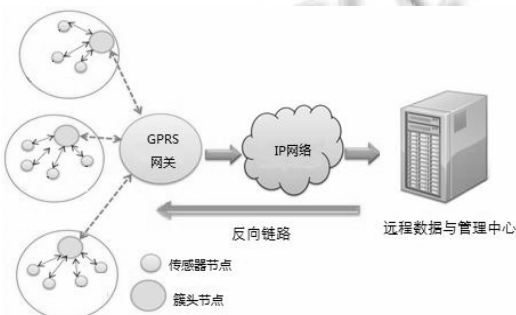


图 2 泥石流监测网络组成结构

3.3 传感器节点硬件设计

传感器节点负责收集传感器观测数据，并将数据

传递至网关。节点由传感器采集模块、信号前期处理模块、单片机控制模块、无线收发模块以及电源能量模块等部分组成，系统节点硬件结构如图 3 所示。

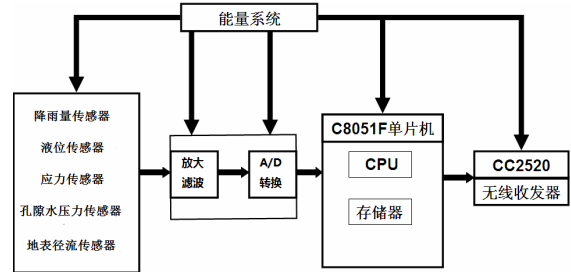


图 3 无线传感器节点硬件结构

传感器采集模块：传感器采集模块有 1 个或多个传感器组成，本文采用 RY-YLH02 翻斗式雨量计观测实时降雨量，光纤光栅应力传感器监测岩土应力，UFZ-52 型磁浮子液位计监测地下液位，SX-40 型振弦式孔隙水压力计测量孔隙水压，荷兰 RBC 型地表径流传感器监测地表径流。

信号前期处理模块：该模块主要对传感器采集的微弱模拟信号进行前期处理，经放大滤波，经 A/D 转化实现模拟量向数字量的转化，送至单片机以便其处理。

单片机控制模块：节点采用 C8051F 单片机控制整个传感器节点工作，CPU 负责收集并暂时存储传感器的观测数据，通过串口，将数据送给无线通信模块，经无线局域网发射传送至网关。

无线收发模块：采用低功耗 CC2520 芯片，负责与其他传感器节点和网关进行无线通信，交换控制信息和收发采集数据。

电源能量模块：以太阳光电板为基础，通过 LM2678 电压转换芯片将 15V 电压转化成 12V 为光栅光纤应力传感器提供工作电压，通过 AS1117-50CX 转化成 5V 电压为孔隙水压力计提供工作电压，通过升压芯片 ADP1111AR 升至 20V 为地表径流传感器提供工作电压，通过 ADP1111 转换成 24V 电压为液位传感器供电，而 RY-YLH02 翻斗式雨量计观测实时降雨量通过磁感应产生电流，不需要额外提供能量。

3.4 网络数据通信协议

应用传感器网络于环境监测的最大困难是节点能源供给无法满足监测任务的需求，如何在有限能量情况下延长无线传感器网络的生命周期是一个热门研究课题。在已提出的节能算法中，LEACH (Low Energy

Adaptive Clustering Hierarchy)协议的基本思想是以循环的方式随机选择簇头节点,将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中,从而达到降低网络能量消耗、提高网络整体寿命的目的。其优点是,采用分层次的簇型结构,节点不需要存储大量的路由信息;本地数据联合处理,在处理具有高度相关性的数据时,由于数据融合力度大,冗余数据大量被消除,因此在能耗方面性能较好。

本文基于 LEACH 协议思想用 NS2 仿真研究了泥石流观测传感器网络路由协议。首先采用画图工具 gnuplot 将 LEACH 路由协议场景文件 100nodes.txt 以图形方式直观表达,如图 4 所示,随机分布 100 个节点。无线传感器网络的结构如图 2 所示,分为 2 层,第 1 层网络由每个簇的顶层簇头节点和网关组成,第 2 层有簇和簇内节点组成。网络周期性地重新选择簇头节点和分簇,平衡 WSNs 网络的能量消耗,延长网络使用寿命。图 5 显示网络存活的节点的数目随时间的变化规律,由图可观察到 LEACH 协议出现死亡节点较晚,整个网络的生命周期较长。

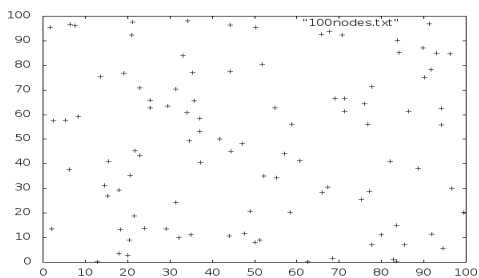


图 4 节点分布

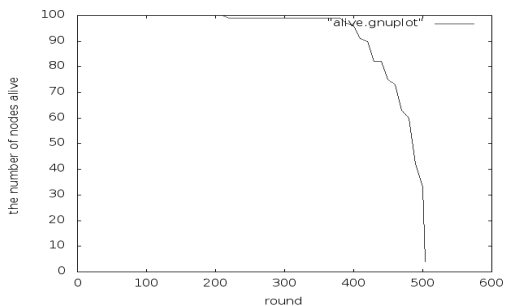


图 5 存活节点数量图

采用无线传感器网络技术对泥石流灾害进行监测,监测数据为泥石流机理的研究和泥石流灾害预报、预警方法的研究提供必须的数据源。由于 WSN 本身的冗余性、无线性和网络的自组织性,具有较强的抗破坏能力,适合泥石流监测的要求。美国的 ALERT (Automated Local Evaluation in Real Time) 计划中,研究人员开发了数种传感器,利用无线传感器网络技

术来监测降雨量、河水水位和土壤水分,依此预测爆发山洪的可能性。由此可见,无线传感网络技术能对泥石流关键因子进行有效地监测,有助于泥石流预报、预警机制的形成。

通过建立传感器网络物理实验模型和仿真模型,对数据传输的物理链路和路由协议分别进行了验证,实验结果表明图 2 所示数据通信链路是可行的,分簇路由协议能延长网络的生命周期。今后将选择泥石流观测试验场地,研究在实地部署传感器节点的方法,为泥石流预报和预警方法的研究打下基础。

4 结语

本文分析了泥石流形成机理,介绍了泥石流形成的必要条件和关键因子,对现阶段泥石流的监测方法进行了分析和比较。为了获取泥石流关键因子的实地、实时观测数据,本文提出了一种无线传感器网络架构,监测泥石流关键因子在泥石流形成前后的变化,并介绍了传感器网络节点的构造方法、节点间的通信链路和网络节能通信协议。同现有的泥石流观测技术相比,无线传感器网络通过多种传感器对泥石流关键因子进行直接监测,其数据的可靠性更高,将对泥石流机理的深入研究和泥石流预报、预警机制的研究起到支撑作用。

参考文献

- 1 陈训迪.中国地质环境检测院官员:大型泥石流来不及预警
http://news.china.com.cn/txt/2010-08/20/content_20754113.htm,2010-8-20/2011-3-30.
- 2 刘传正,苗天宝,陈红旗,董抗甲,黎志恒,李海军.甘肃舟曲 2010.8.8 日特大山洪泥石流灾害的基本特征及成因.地质通报,2011,30(1):141-150.
- 3 戚国庆,黄润秋.泥石流成因机理的非饱和土力学理论研究.中国地质灾害与防治学报,2003,14(3):12-15.
- 4 杨为民,吴树仁,张永双,石菊松,向灵芝.降雨诱发坡面型泥石流形成机理.地学前缘,2007,14(6):197-203.
- 5 杨引明,姚祖庆.中国东部地区卫星估计降水系统及其应用.气象科学,2006,25(2):149-157.
- 6 白卡娃,杨昌年,宋娟,黄文杰.南京周边地区夏季对流云降水的雷达回波特征与人工增雨.气象科学,2005,25(4):206-211.
- 7 高速,周平根,董颖,李媛,朱晓东.泥石流预测、预报技术方法的研究现状浅析.工程地质学报,2002,10(3):279-283.
- 8 曹小红,李颖,丰皇.无线传感器网络节点定位技术综述.信息技术,2009,(7):233-240.
- 9 Iverson RM. The physics of debris flow. Reviews of Geophysics,1997,35(3):245-296.