

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.020

高边坡传感器网络协同监测及信息融合系统模式

肖贤建¹, 徐立中¹, 樊棠怀^{1,2}, 王慧斌¹, 严锡君¹

(1. 河海大学计算机及信息工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南昌工程学院计算机科学与技术系, 江西 南昌 330099)

摘要:从充分挖掘监测信息内涵和外延入手,引入无线传感器网络和多源信息融合技术,分析了高边坡监测系统的信息采集、传递和加工处理的过程,定义了各个子系统的域界,基于将物理构成和逻辑构成分开原则,建立了高边坡自动监测系统的体系结构。以多传感器采集层为例,介绍了光纤传感器技术、无线传感器网络技术和多源信息融合技术等高边坡传感器网络协同监测及信息融合系统的关键技术。

关键词:边坡自动监测; 4S 技术; 光纤传感器; 无线传感器网络; 多源信息融合

中图分类号:TV698.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2009)02-0222-06

工程高边坡、水工建筑和水库库区边坡的失稳破坏不仅会直接摧毁工程本身,而且也会通过环境灾难对人居环境带来影响。因此,有必要对这些边坡性状进行自动监测并获取大量信息,从而对边坡变形机理进行研究,掌握边坡变形规律,科学预测预报边坡变形破坏状态,为防灾减灾提供依据^[1-2]。

目前,国外的边坡监测系统研究重点放在如何对已建系统更加有效地进行管理,以及如何通过提高采样频率、改进处理模型方法来提高边坡监测精度^[3];国内大多已建或者在建的边坡监测系统,研究重点更多的是放在监测系统硬件建设以及软件功能的实现上^[4]。区域范围边坡自动监测系统以计算机通信网络、数据库为基础,采用先进的边坡实时监测设备,结合 4S(RS, GPS, GIS, ES)技术^[5],实现边坡要素的实时、多维、高效在线监测,并对监测信息进行处理、存储、分析管理、表达评估和决策支持。

首先,在边坡监测的信息获取方面,监测信息的不确定性和非精确性是边坡自动监测系统亟待解决的问题之一。换言之,解决边坡监测信息残缺仍然是边坡自动监测系统的主要问题^[6]。边坡的变形失稳机理复杂,涉及多要素以及要素之间的相互作用和相互依赖^[2],导致了边坡信息获取的不确定性;各种监测手段和测量固有的误差,导致了边坡信息获取的不精确性^[7]。从信息获取与处理学角度看,边坡信息是一种多源信息,具有同类、异类、异步等特征,因而需要监测网的自主、智能整体协同监测。其次,在数据采集方式上,有线集中式采集仍然是主要方式,即便是有无线传输方式,也仅仅是利用无线传输,其实质依然是集中式数据采集,进而导致信息处理是一种集中式处理方式。第三,部署有线监测节点是现有边坡监测系统一个难以解决的问题,特别是在监测区域分散且人迹罕至的环境下,该问题尤为突出。因而利用现有的地面传感器并赋予其无线、网络且智能化是提升边坡自动监测系统性能的有效途径之一,即将无线传感器网络^[8]作为一种新兴的信息获取平台引入边坡自动监测系统中,由此带来基于该平台的边坡自动监测系统模式的革新。

但是,在目前国内外基于 4S 的边坡自动监测系统研究中,边坡监测和隐患探测的精确性、准确性和实时性还有待提高,且地面与地面传感器之间、地面与空中传感器之间,点-点、点-面的信息协作性和互补性考虑不足。发达国家是通过构建高精度、高密度地面监测网和辅以高分辨率 RS 来实现实时动态监测;国内受经济技术条件的限制,难以构建高精度、高密度监测网。为此,本文进行了以多传感器网络为信息获取平台的边坡自动监测信息互补和信息集成与融合的研究。

1 系统的域界

对于“多传感器网络监测系统 + RS + GPS + GIS + ES”这样的复杂系统,多源信息获取系统、多传感器系

统、边坡信息管理系统、表达与评估及辅助决策支持系统与信息融合系统之间的层次不明确,它们之间存在耦合和反馈。为了清晰界定研究的范围,有必要将各个子系统之间的域界进行科学划分。

借鉴现有的信息系统^[9-10],本文将边坡自动监测系统划分为 2 个层次(图 1):第 1 层,边坡信息采集、融合处理层次;第 2 层,边坡信息的管理、表达、状态评估和辅助决策支持层次。第 1 层实现监测数据的采集和融合处理,为第 2 层提供全面、实时、准确的信息;第 2 层是第 1 层信息的进一步升华,为用户提供知识表达。

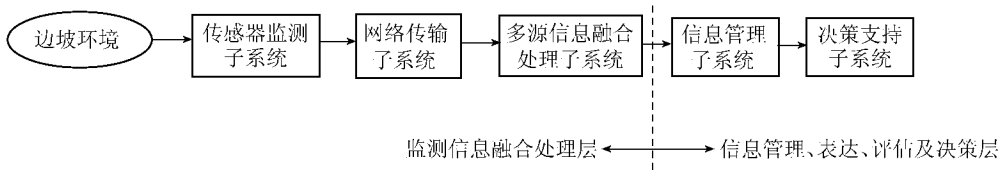


图 1 系统划分

Fig. 1 Division of automatic monitoring system

上述划分是将系统看成在一定准则下,自动分析、综合,按时序获得的若干空中和地面多类别、同(或异)质传感器观测的信息,以完成为第 2 层次提供全面、实时、准确的信息而进行信息处理的系统。信息融合的硬件基础是广义的同、异质传感器和广域网络环境系统;多源信息是信息融合的加工对象,其核心是协调和综合处理。

各个子系统的域界及其关联如图 2 所示。图 2 中多源信息融合跨越多传感器监测、网络传输、边坡环境信息管理与表达 3 个子系统,也就是说多源信息融合与这 3 个子系统存在耦合与反馈。辅助决策支持的信息则来自于边坡环境信息管理与表达及状态评估 2 个子系统。多传感器监测是手段,实现边坡环境信息管理和表达是边坡自动监测系统的基本目的,边坡状态评估是该系统的第 2 个目的,辅助决策支持是该系统的最高目的。

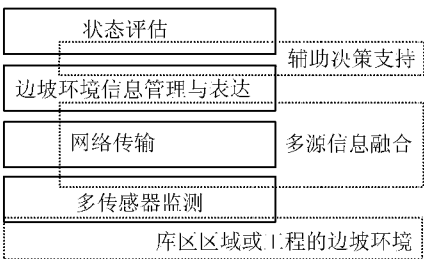


图 2 各个子系统的域界和关联

Fig. 2 Domains of sub-systems and their correlation

2 系统模式

根据物理构成和逻辑成分开的原则,提出了高边坡传感器网络协同监测及信息融合系统的逻辑构成系统模式。该模式是对系统逻辑结构的描述,即着重从系统完成的任务来描述系统的构成。

如图 3 所示,高边坡传感器网络协同监测及信息融合系统的逻辑构成系统模式自底向上分为 7 层,各层功能分述如下:

a. 库区区域或工程的边坡环境层,是系统的最底层,包括区域内影响边坡稳定的因素,主要有结构面组合条件及其强度、地层岩性、地形地貌、地质构造、水文地质条件,以及边坡的设计措施和施工因素。

b. 多传感器采集层,是系统的基础功能层,通过各种地面边坡传感器、人工观测数据录入、RS 及接收设备、GPS 定位设备等建立所属监测站范围内的监测数据文件、传感器及监测站特征参数数据文件等,也包括在全局中心站接收以联机方式送来的气象信息等。

c. 计算机网络通信层,也是系统的基础功能层。它包括 4 个方面:(a)支持各种 WAN 连接及交换;(b)支持监测站与传感器之间的信息交互;(c)支持监测站与分中心或全局中心站的遥测信息传输;(d)支持分中心、全局中心站内 LAN。

d. 多源信息融合层,融合处理系统从各种信息源获取的数据,其功能由全局融合中心站的计算机系统(即用以完成融合处理任务的应用软件和支持它运行的硬件的总称)完成,或由全局融合中心、各个分中心以多 Agent 的方式完成。

e. 信息存储与管理层,包括边坡管理信息系统和边坡数据库。边坡管理信息系统是系统运行管理级别的信息,完成边坡信息的表达、维护、管理分析。边坡数据库包括边坡实时监测得到的数据、法规标准数据等。

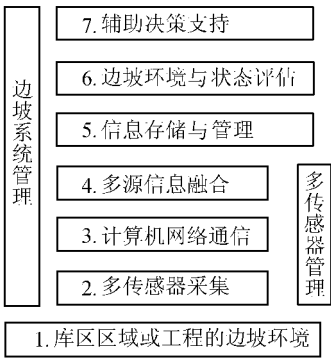


图 3 系统模式

Fig. 3 System architecture

属性数据库和边坡区域图等图形数据库。在这一层中, GIS 是支持空间化监测信息的综合加工和信息的形象化表达的有力工具。

f. 边坡环境与状态评估层, 对边坡环境与边坡状态做出评价、预报及其状态评估。

g. 辅助决策支持层, 实现辅助决策支持功能是建立自动监测系统的终极目标所在。

多传感器管理层是大范围边坡自动监测系统的重要组成部分。多传感器管理包括优化分配有限的传感器资源、协调传感器数据采集、动态确定传感器的工作和参数, 甚至还包括远程动态工作组态和维护等, 是优化和提高系统功能和性能的技术手段之一。

多传感器管理层跨越第2至第4层, 除技术管理外也包括行政管理。系统体系结构中的每一个层次的各种功能, 并非每一个“物理的”系统都必须具备。此外, 各层中每一项功能的强弱也不同, 这些差异正说明了系统功能的综合化程度。

3 高边坡传感器网络协同监测及信息融合系统的关键技术

高边坡传感器网络协同监测及信息融合系统的关键技术在每一层都有相应学科关键技术支撑。如数据的获取和分析技术、先进的数值分析方法和技术、控制技术和决策支持、标准软件的开发, 以及遗传算法、神经网络、模糊逻辑、随机集理论等新理论应用等。限于篇幅, 本文讨论多传感器采集层的新型光纤传感器技术、无线传感器网络技术和多源信息融合层的功能模型及算法。

3.1 新型的光纤传感器技术

目前, 国内外应用于边坡安全监测的设备和方法很多, 从传统的测斜管、压力计、雨量计和位移计, 到新型的 GPS、TDR 和光纤传感器, 都被大量运用于实际工程监测中, 而且很多是以多种技术集成的形式出现的。传统监测技术虽然在数字化、自动化方面比较落后, 但在长期的工程实践中, 这些技术积累了大量的成功经验, 相关的分析手段也比较完备和成熟; 而一些新型的监测技术, 运用了新的测试原理, 显示出更优异的性能。如光纤传感器技术^[1]就是 20 世纪 70 年代末发展起来的一门新技术, 是传感器技术的新成就。

光纤传感器一般由光源、入射光纤、出射光纤、光调制器、光探测器及信号处理部分组成。若按被调制光波参数的不同, 光纤传感器可分为相位调制光纤传感器、偏振调制光纤传感器、频率调制光纤传感器、强度调制光纤传感器和波长(颜色)调制光纤传感器。

在光纤中传输的光波可用如下方程描述:

$$E = E_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

式中: E_0 ——光波的振幅; ω ——频率; φ ——初相角。其中, 相位($\omega t + \varphi$)调制光纤传感器因其灵敏度高、便于实现全光纤传感器等优点而被深入研究。其基本原理是利用被测对象对敏感元件的作用, 使敏感元件的折射率或传播常数发生变化, 从而导致光的相位变化, 使两束单色光所产生的干涉条纹发生变化, 通过检测干涉条纹的变化量来确定光的相位变化量, 从而得到被测对象的信息。

当前, 已经商业化或即将商业化的光纤传感器有: 基于光纤弯曲损耗原理的光纤微弯应变传感器; 基于光栅反射原理的布拉格光栅光纤传感器(可以测量应变和温度); 基于 Fabry-Perot 干涉原理的应变传感器; 基于 Raman 和 Brillouin 散射原理的分布式温度传感器和基于水凝胶导致光纤微弯损耗原理的适度传感器; 基于 Michelson 干涉原理的位移传感器。

光纤传感器相比传统的高边坡监测传感器来说, 具有体积小、重量轻、柔软易布置、抗干扰强(电磁场、湿度、化学腐蚀、灵敏度)、寿命长、能够实时在线测量、测量范围广、稳定性好、容易实现高边坡监测传感网络等优点。当然, 用于高边坡监测的光纤传感器输出信号会受到光源波动、光纤传输损耗变化、探测器老化等因素的影响, 这些因素需要在无线传感器网络系统结构设计和信息融合处理时给予充分考虑。

3.2 无线传感器网络技术

随着现代微电子和机电系统(MEMS)嵌入式系统、片上系统(SoC)、无线通信、计算机网络以及互联网技术的飞速发展, 传感器信息获取技术从单一化向集成化、微型化进而向智能化、网络化方向发展, 成为信息获取最重要、最基本的技术之一, 并且发展了一种全新的信息获取技术——无线传感器网络技术。无线传感器网络技术既是多学科高度交叉的具有高度挑战性的前沿研究领域, 也是国内外公认的具有广阔发展前景的高新技术产业。2003 年美国《商业周刊》和《麻省理工学院(MIT)技术评论》在预测未来技术发展的报告中,

分别将其列为 21 世纪最具影响的 21 项技术和改变世界的 10 大新技术之一.美国和欧洲等对无线传感器网络技术非常重视,投入巨大人力和物力,广泛开展理论和应用平台的研究开发.无线传感器网络技术在我国的长期科技发展规划(2006~2020)中已被列为重要的发展方向之一.可以预见,无线传感器网络技术将会给人类生活相关的各个领域带来深远的影响.在未来的 15 年中,我国学术界和工业界必将掀起对无线传感器网络技术和应用的热潮.无线传感器网络技术具有极其广泛的应用前景,如感知战场状态(军事应用)、环境监控(如气候、地理、污染变化的监控)、物理安全(如建筑和结构)监控、城市道路交通监控、安全场所的视频监控等.

无线传感器网络是由大量静止或移动的传感器以自组织和多跳的通信方式构成的无线网络,其目的是协作感知、采集处理和传输网络覆盖地理区域内感知对象的监测信息,并把信息报告给用户^[12].无线传感器网络中的传感器节点除具有采集和处理功能外,还具有路由转发和网内处理功能.无线传感器网络通过汇聚节点收集传感器节点的数据,实现传感器网络与用户或互联网的连接.用于高边坡自动监测的无线传感器网络如图 4 所示.

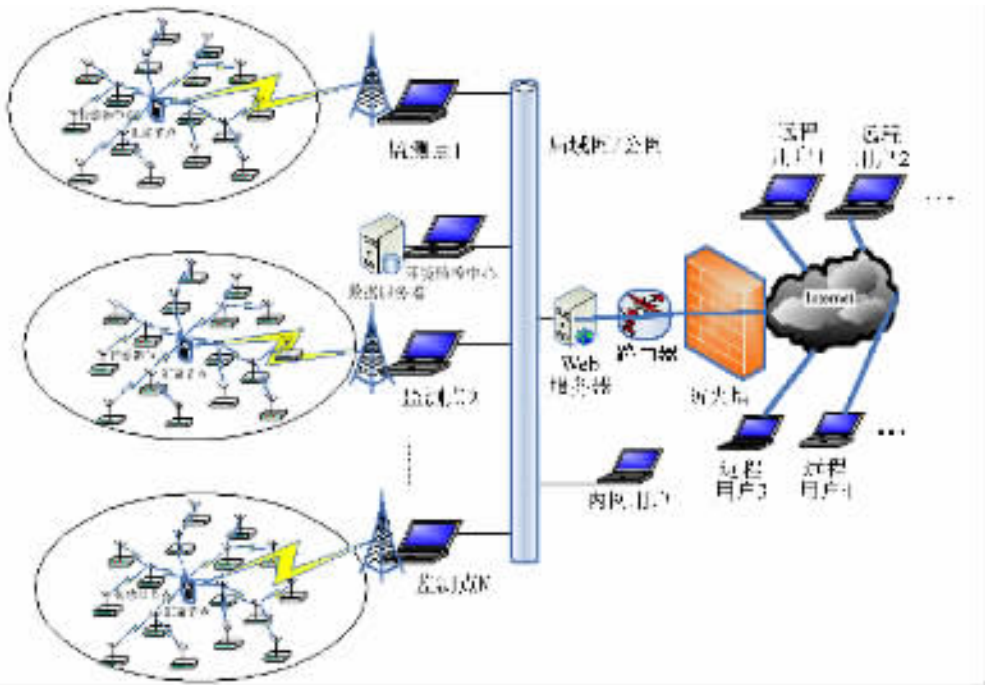


图 4 用于高边坡自动监测的无线传感器网络

Fig. 4 Wireless sensor networks for automatic slope monitoring system

- 用于高边坡自动监测的无线传感器网络技术具有一些独特的优势：
- a. 在大监测区域部署大量传感器,或在监测区域部署高密度的传感器节点,节点数量可能达到成百上千,甚至更多^[13].为协同获取信息,一个节点可以配置多个异质传感器,如温度、应力、土壤湿度等传感器.无线传感器网络通过不同空间和不同的参量获得的信息可能有更大的信噪比;分布式处理大量的采集信息能够提高监测的精度,降低单个节点传感器的精度;由于大量冗余节点的存在,使得系统具有强容错性能;大量节点能够增大覆盖的监测区域,减少洞穴或者盲区.
 - b. 在高边坡自动监测系统的应用中,通常传感器节点被放置在没有基础设施、环境恶劣的地方,如人不可到达区域或危险区域.无线传感器网络具有自组织特性,传感器节点能自动探测邻居节点,并自动进行配置和管理,通过拓扑控制机制和网络协议自动形成转发监测数据的多跳无线网络系统.
 - c. 自定位技术^[14]为高边坡地表变形监测提供了一种新手段.传感器节点定位是确定每个节点的相对位置或绝对位置.无线传感器网络节点的自定位一方面是自组织网络的需要,更重要的一方面是为了提供监测点的空间信息.
- 然而,目前无线传感器网络技术在高边坡的监测应用中还存在一些问题,制约了其在实际中的应用.

3.3 多源信息融合技术

随着信息科学技术的发展,在 20 世纪七八十年代产生了一个称为“数据融合”的全新概念,也就是说,把多种传感器获得的数据进行所谓“融合处理”,可以得到比任何单一传感器所获得数据更多的有用信息.后来,这一概念不断扩展,要处理的对象包括了图像、音频、符号等数据,于是形成了一种共识的概念,谓之“多源信息融合”.

近年来,多源信息融合的应用领域不断扩展,从其诞生的军事领域,逐渐向民用领域发展.多源信息融合是把分布在不同位置的多个同类或异类传感器所提供的局部不完整观察量加以综合,消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾,降低其不确定性,以形成对系统环境相对完整一致的感知描述,从而提高智能系统决策、规划、反应的快速性和正确性^[15-16].多源信息融合实质上是一种形式框架,其过程是用数学方法和技术工具综合多源信息,以达到信息补齐和信息去冗余的目的,即得到高品质的有用信息.多源数据融合之所以能得到高品质的有用信息,其根源是单信息源的非完整性,以及信息源之间的互补性.这里传感器这个术语是广义的,人工记录的信息也可以是传感器数据源.

图 5 所示是本文提出的一种高边坡多源信息融合的神经网络模型.在该模型中,将与边坡相关的知识数据、无线传感器网络监测数据、遥感图像数据和气象数据作为数据源.

(a)待融合的边坡状况不仅与无线传感器网络监测数据、遥感数据有关,而且还与监测的地理位置以及监测当时的气象条件有关;(b)依据无线传感器网络监测和遥感监测的数据根据目视解译知识对边坡状态进行判决,可以对边坡有总体上的了解;(c)尽管这些知识本身与边坡状态特性没有直接联系,但是如果能在建立的融合模型中考虑这些与边坡相关的知识,对边坡信息融合判决是一个有效的补充;(d)之所以采用神经网络方法,是因为神经网络是一种有效的非线性逼近方法,而这正与待融合的无线传感器网络监测数据、遥感图像数据和气象数据及边坡相关的知识数据之间具有的非线性关系相符合.

总之,对于边坡监测信息的采集域处理,引入多源信息融合技术,可以实现地面与地面传感器之间、空间与地面传感器之间时间、空间上监测信息的互补,能解决低密度、低分辨率监测网的信息不足和缺损的问题^[17].

4 结 语

边坡信息是一种多源信息,具有同类、异类、异步等特征,因而需要监测网的自主、智能整体协同监测.本文讨论和分析了高边坡传感器网络协同监测及信息融合系统模式中信息获取、信息处理、信息传输和信息利用的过程,及各个子系统的域界关系,并提出边坡系统中多源信息融合的层次结构以及分布分级式融合结构.根据物理构成和逻辑构成分开的原则,建立高边坡传感器网络协同监测及信息融合系统模式.这种逻辑构成的系统模式有利于系统在遵从统一体系模式下,采用不同的设计方案、技术、系统集成等物理实现方法,即系统中的软硬件设备的物理构成可以不同,求系统模式之同,而存软硬件技术之异,有利于边坡自动监测系统建设的开放性和规范性.

参考文献:

[1] 顾冲时, 吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.
[2] 何习平. 复杂边坡监测技术与信息处理的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
[3] GILJOSEPE A, COROMINAS J, RIUS J. Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring[J]. Engineering Geology, 2000, 55(3): 167-192.

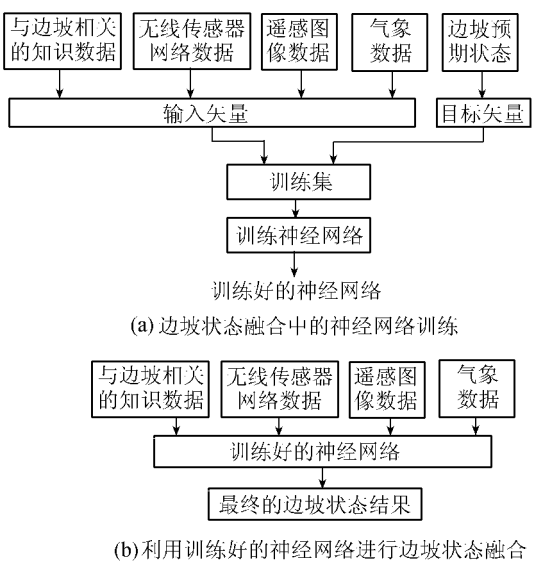


图 5 高边坡的多源信息融合模型
Fig. 5 Multi-source information fusion model
for high slopes

- [4] 吕永宁,王玉洁,沈海尧.水电站大坝安全监测自动化的现状和展望[J].大坝与安全,2007(5):24-29.
- [5] 吴中如,于龙.“4S”集成技术在大坝安全中的应用[J].水电能源科学,2001,19(3):16-18.
- [6] 顾冲时,苏怀智.综论水工程病变激励与安全保障分析理论和技术[G]//大坝安全监测与信息分析.芜湖:中国水力发电工程学会大坝安全监测专业委员会,2007:93-100.
- [7] 何秀凤,桑文刚,杨光.伪卫星增强GPS精密定位新方法[J].东南大学学报:自然科学版,2005,35(3):460-464.
- [8] EDUARDO F N,ANTONIO A F,LOUREIRO A C F. Information fusion for wireless sensor networks :methods ,models and classifications [J]. ACM Computing Surveys ,2007 ,39(3) :A9/1-A9/55.
- [9] 肖贤建,樊棠怀,严锡君,等.水信息获取与处理技术及发展[J].水利水电科技进展,2008,28(1):86-90.
- [10] 徐立中,林志贵,黄凤辰,等.基于信息融合的水质自动监测系统体系结构[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(6):694-697.
- [11] 吴洁,薛玲玲.光纤传感器的研究进展[J].激光杂志,2007,28(5):4-5.
- [12] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y ,et al. Wireless sensor networks :a survey[J]. Computer Networks ,2002 ,38(4) :393-422.
- [13] 宫鹏.环境监测中无线传感器网络地面遥感新技术[J].遥感学报,2007,11(4):545-551.
- [14] 王福豹,史龙,任丰原.无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J].软件学报,2005,16(5):857-868.
- [15] 潘泉,于昕,程咏梅,等.信息融合理论的基本方法与进展[J].自动化学报,2003,14(29):599-615.
- [16] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜.多源信息融合[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [17] 刘明贵,杨永波.信息融合技术在边坡监测与预报系统中的应用[J].岩土工程学报,2005,27(5):607-610.

Sensor networks-based monitoring and information fusion system for high slopes

XIAO Xian-jian¹, XU Li-zhong¹, FAN Tang-huai^{1,2}, WANG Hui-bin¹, YAN Xi-jun¹

(1. College of Computer and Information Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Department of Computer Science and Technology , Nanchang Institute of Technology , Nanchang 330099 , China)

Abstract : Based on the full mining of the intension and extension of monitoring information and the introduction of wireless sensor networks and information fusion techniques , the processes of information acquisition , transmission , and processing of the monitoring system for high slopes were analyzed. The domain of each sub-system was defined. A structure for the automatic slope monitoring system was established based on the principle of separation of physical components from logical ones. The key techniques in sensor networks-based monitoring and information fusion systems for high slopes are introduced : fiber-optic sensors , wireless sensor networks and multi-source information fusion.

Key words : automatic slope monitoring ; 4S technology ; fiber-optic sensor ; wireless sensor network ; multi-source information fusion