

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.038

地下工程远程在线遥测技术及其在大狮子隧道的应用

冉曙光¹, 江 权¹, 宋磊博¹, 王百林², 陈 涛², 刘 挺², 吕勇刚³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 宁波市高等级公路建设指挥部, 浙江 宁波 315100, 3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100082)

摘 要: 近年来, 国内山岭隧道塌方事故频发, 造成了惨重的人员伤亡和巨大的设备损失, 如何通过现场监测实时掌控围岩稳定性并进行安全预警已成为当前山岭隧道修建的关键难题之一。依托围岩塌方风险较高的大狮子隧道(宁波地区最长的公路隧道), 阐明了隧道内围岩远程在线遥测技术的信号采集、传输与后台处理原理, 基于现场监测组网的总线理论(FCS)和分组无线传输技术(GPRS), 提出了一种新型隧道远程在线遥测系统构架方式。该系统构架采用洞内有线+无线的组网方案, 包括监测数据的采集传输、管理分析、远程接收子系统 3 个部分。运用该系统对大狮子隧道围岩变形、锚杆应力、围岩与钢拱架之间喷层压应力开展了全天候实时高频监测, 并采用服务器+客户端模式, 实现了采集数据远程同步高速传输与多单位实时监控。通过分析高频采集数据后获得的监测量时程曲线(变形、应力、压力), 发现大狮子隧道的围岩变形在整体变化趋势上呈现出一种台阶式的波动增长变化规律, 受爆破开挖影响后变形值产生突变; 同时围岩变形与喷层压力值受后续隧道开挖扰动的波动影响较大, 但总体变化趋势上基本经历了前期快速变化-中期缓慢变化-后期逐步稳定 3 个阶段。通过对隧道近一年的远程在线监测表明, 其技术可完全实现地下工程围岩稳定性的远程遥测和无人值守预警, 具有良好的应用前景。

关键词: 隧道; 远程监测; 智能传感器; 现场总线系统; 实时预警

中图分类号: U 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-2137-13

Remote online monitoring technology for underground engineering and its application to Dashizi tunnel

RAN Shu-guang¹, JIANG Quan¹, SONG Lei-bo¹, WANG Bai-lin²,
CHEN Tao², LIU Ting², LÜ Yong-gang³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Ningbo Highway Construction Headquarters, Ningbo, Zhejiang 315100, China;
3. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: In recent years, the mountain tunnel collapse accidents occur frequently in China, which results in heavy casualties and huge property damage. Hence, the real-time field monitoring of surrounding rock stability and the early safety warning have become one of the key issues in current mountain tunnel constructions. Firstly, this paper clarified all the relating concepts of the remote online monitoring technology, including its signal collection, transmission and background processing principle, focus control system (FCS) and general packet radio service (GPRS). Then, a new type of tunnel remote telemetry system was proposed. The system adopted the wired and wireless networking schemes in the tunnels, including the signal collection and transmission subsystem, the management analysis subsystem and the remote receiving subsystem. Finally, the system was applied to Dashizi tunnel with the high-risk collapse, the longest road tunnel in Ningbo. All-weather real-time high-frequency monitoring was recorded, including the deformation of surrounding rock, the stress of bolts, and the shotcrete stress between surrounding rock and steel arch. In addition, server + client mode was employed to achieve a high-speed transmission of remote data and multi-unit real-time monitoring. The obtained time-history curves (i.e., deformation, stress and pressure) were analyzed. It indicates that the deformation of surrounding rock of Dashizi tunnel shows a change of the step-like fluctuation and exhibits a mutation after blasting excavation. Meanwhile, it is

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 十三五国家重点研发计划(No. 2016YFC0600707); 国家自然科学基金项目(No. 51379202); 中科院创新促进会项目(No. 2013215)。

This work was supported by State Key Research Development Program of China (2016YFC0600707), National Natural Science Foundation of China (51379202) and the Fund of Youth Innovation Promotion Association CAS (20113215).

第一作者简介: 冉曙光, 男, 1990 年生, 硕士, 主要从事隧道远程监测及地下工程围岩稳定性分析等方面的研究工作。E-mail: ranshuguang@126.com

通讯作者: 江权, 男, 1978 年生, 博士, 研究员, 主要从事地下工程数值模拟、大型洞室群稳定性分析、工程地质灾害治理等方面的研究工作。

E-mail: qjiang@whrsm.ac.cn

found that the deformation of surrounding rock and the pressure of the shotcrete layer are greatly affected by the tunnel excavation disturbance. However, the overall trend of change basically undergoes rapid change at the early stage, a slow change at the middle stage and the gradual stability at the late stage. Through the remote online monitoring of the tunnel for nearly one year, it shows that the technology can realize the long-range telemetry and unattended warning of the stability of underground engineering surrounding rock, which has great application prospect.

Keywords: tunnel; remote monitoring; smart sensor; fieldbus control system; real-time warning

1 引言

近年我国山岭隧道围岩失稳事故频发(如塌方、大变形、突泥/水),导致了大量人员伤亡和设备损失,如何通过现场监测实时掌控围岩稳定性并进行安全预警已成为当前山岭隧道修建的关键难题之一^[1-3]。目前,山岭隧道安全监测(如围岩收敛变形监测、锚杆应力监测等)通常采用人工现场读取数据,其自动化程度不高,采集频率较低,难以获得现场围岩变形与稳定性演变全过程的监测数据。而且人工读取现场原始测量数据后通常还需进行二次处理,工作量大且时间滞后严重,不利于现场一线人员和后方管理人员及时掌控工程围岩稳定性,从而无法进行实时安全预警,规避和减小围岩失稳灾害导致的损失。与此同时,当隧道出现塌方或岩爆事故等危险征兆时,出于人员人身安全考虑,无法再继续实行人工测量,这会造成破坏前相关重要数据丢失,导致工程的动态反馈分析与设计优化无法继续开展。

近10年来,光学、电学、计算机技术和无线网络技术的跃进极大地推动岩土工程无线遥测方面的研究与应用。在边坡工程安全预警方面,由于较好地开阔传输环境,无线传感和遥测技术在边坡长期变形监测实践方面已经日趋成熟。目前王劲松等^[4]依据一机多天线思想,建立了GPS一机多天线公路高边坡监测系统。吴浩等^[5]基于GNSS/GIS集成技术,研发出一套高精度、智能化的露天矿边坡变形监测系统,并采用模糊评价方法对边坡的稳定性进行了综合评价。许利凯等^[6]利用KLA-1型地表位移遥测系统和GSM网络对三峡库区奉节天池坡实现了实时遥测。陶志刚等^[7]基于北斗和GPRS双通讯系统平台,通过zigbee技术构建多跳自组织无线传感器网络,对南芬露天铁矿进行监测,提出了边坡4级预警准则。高杰等^[8]利用CCD微变形监测仪光电信号转化的特性实现了边坡的稳定性信息获取,提高了监测数据的精度和稳定性。邬凯等^[9]通过监测信息的自动采集和无线传输,实现边坡变形数据的远程实时存储;Ohbayashi等^[10]采用一种具有自动控制、恢复和高效传输功能的分布式节点网络系

统,对滑坡体变形进行监测。赵丽等^[11]提出了由自组多跳的多无线传感器节点构成数据采集传输簇群,通过GPRS模块将数据传输至远程监控中心辅助决策的高速公路边坡稳定性实时监测系统。何满潮^[12]开发了一种新型远程监测预报系统,具有智能传感、采集、发射系统和自动分析接收的功能,并在罗山矿区滑坡监测中得到成功应用。这些监测实践已表明,露天边坡工程中采用远程监控技术具有明显的优势。

但由于地下工程自身的隐蔽性、无GPRS信号、施工干扰突出、作业环境复杂、仪器安装困难等原因,远程无线遥测与预警技术的推广应用受到了很大限制,虽进行了一些创新的尝试,但相较于边坡中的成熟应用还有明显不足。嵇中^[13]通过室内管片加载试验,验证了新型位移监测方法的可行性和无线传感网络的稳定性;Li等^[14]对隧道工程中无线传感器网络测量精度和性能的可行性进行了研究,林仕雄^[15]在彩虹岭公路隧道建立总线型拓扑结构的微机远程系统,并采用4芯光纤实现远程实时预警;徐祥其^[16]开展了电水平尺沉降自动遥测系统在地铁监护中的应用研究;肖瀚^[17]建立电力隧道环境监控系统,实现工程电缆环境安全的远程集中遥测、联动和报警功能;高文学等^[18]探讨了隧道施工过程中综合信息的自动采集、无线传输、预警系统的方法。这些技术开发和应用尝试初步显示出了远程无线遥测在地下工程具有可行性,但其地下工程特殊环境下的多传感器兼容的组网模式、后台数据处理与分析的软件系统还未成熟。

为此,本文依托围岩塌方风险较高的大狮子隧道,首先阐明了山岭隧道内远程在线遥测技术的信号采集、传输与后台处理原理,基于现场监测组网的总线理论(FCS)和分组无线服务技术(GPRS),实现了特大型隧道围岩变形、锚杆应力、喷层压力等多变量智能传感器兼容的全天候实时高频监测和监测数据的远程无线传输,以及监测数据自动处理与预警。大狮子隧道工程实践表明,该技术可完全实现地下工程围岩稳定性的远程遥测和无人值守预警,应用前景良好。

2 远程监测组网原理

依据监测数据信息的传播路径和地下隧道工程特点，采用洞内有线+无线的组网方案，提出了一种新型远程在线遥测系统构架方式，主要包括监测数据的信息采集传输、管理分析、远程接收子系统 3 个部分（见图 1）。信息采集传输子系统围绕现场动态变化的数据采集问题，借助智能传感器强大的信号测量能力、数据处理与存储能力，完成对目标对象的现场原始数据信息实时采集，包括围岩深部位移、应力、喷层压力等；管理分析子系统通过发布指令，管理所有现场设备，主要承担数据信息的采集、汇总和转发职能；远程接收子系统利用 GPRS 网络技术、动态域名解析技术和端口映射技术，实现非公网 IP 之间数据信息的远程发送、传输和接收，搭建现场监控中心所需要用到的一些主要设备包括：监控主机、供电设备、无线发送模块等，如图 2 所示。

2.1 信号采集原理

依据 IEEE 协会定义，智能传感器是将受控量或待感知量大小典型简化并应用于网络环境的集成传感器，主要具备信号感知与调理、信号处理和通信 3 大功能^[19]。相较于传统传感器，其在功能处理上具备了显著优势，可实现测量值全数字化输出，其基本原理如图 3 所示。



图 2 现场设备图

Fig.2 Image of the developed on-site equipment

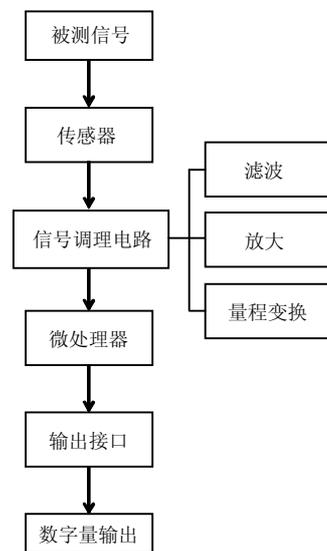


图 3 智能传感器基本原理图

Fig.3 Basic principle of smart sensors

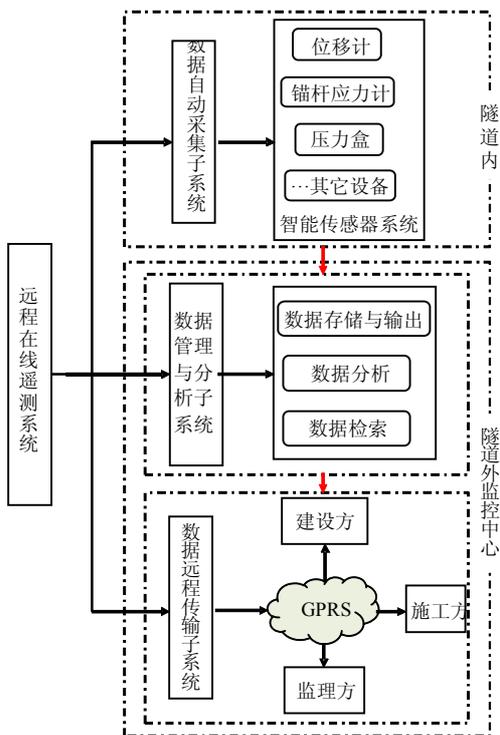


图 1 远程自动监测系统构成

Fig.1 Configuration of the remote automatic monitoring system

本文使用的终端采集器包含位移计、锚杆应力计、压力盒 3 类智能传感器。每个智能传感器自带唯一的仪器编号，采集系统即隧道外现场监控主机，通过发送带有仪器编号信息的特殊指令读取每个传感器数据，当发送指令中包含的编号信息与仪器自带编号一致时，仪器开始直接传输采集数据。限于篇幅，本文取位移计为例，简要介绍其工作原理并给出其构造剖面图，如图 4 所示。位移计主要由本体、锚固头、加长杆 3 部分构成，基于物理学中 LC 振荡电路原理：

$$f = 1 / 2\pi\sqrt{LC} \tag{1}$$

式中： f 为振荡频率； L 和 C 分别为电感和电容。

从图 4 可看出，螺旋线圈、软磁铁芯、集成电路与谐振电容组合构成一个 LC 振荡电路。磁芯在螺旋线圈中移动，引起线圈电感 L 变化，同时改变振荡电路输出信号频率 f 。当在材料性质，工艺技

术和结构形式选择得当时，输出信号频率与电感呈现良好的线性关系^[20-21]。通过测定线圈电感变化，

就能实现非电量电测，其有效量程为 200 mm，分辨率为 0.1 mm。

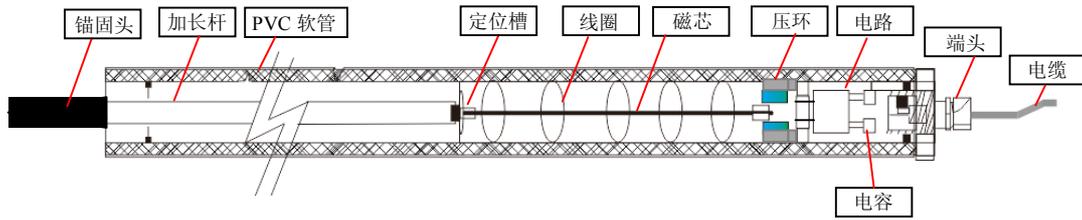


图 4 位移计结构剖面示意图
Fig.4 Structural cross-section of the displacement meter

2.2 信号传输原理

信号传输在内容上包含现场传输及信号远程发送两个部分，前者采用 RS-485 总线构架，是业界应用最广泛的工业总线之一，具有最高传输速率 10 MB/s，最远距离 1.2 km 不失真传输的优点，可实现现场智能设备和自动化系统的数字式、双向传输和多分支结构的实时通信^[22-23]。在通信传输结构上采用主从结构，由隧道外监控室主机控制隧道内从机（采集模块），每个从机具有惟一的地址信息，当主机需要读取隧道洞内采集或存储数据时，主机发送读取命令，当命令中的地址信息与从机地址信息一致，主机接收数据。在传输过程中，从机不能

主动发送命令给主机，且从机之间不相互发送命令，避免数据读取过程中，从机相互干扰响应。同时，将从机与主机串行口设置一致，确保传输数据格式、通信波特率一致。施工现场传输为有线传输，信号首先通过传感器以数字信号形式在电缆中传输，经 4 通道采集仪后由电缆进入中继器，受中继器补偿信号衰减的特性，被放大并由总线传输至监控室信息采集模块，最终通过 usb 转 485 数据线连接到监控中心服务器，完成整个现场采集传输工作，洞内数据传输示意图见图 5。由于采用统一的通信协议和网络结构，该组网模式可完全兼容不同类型的传感器，而且对接入传感器的数量和位置均没有限制。

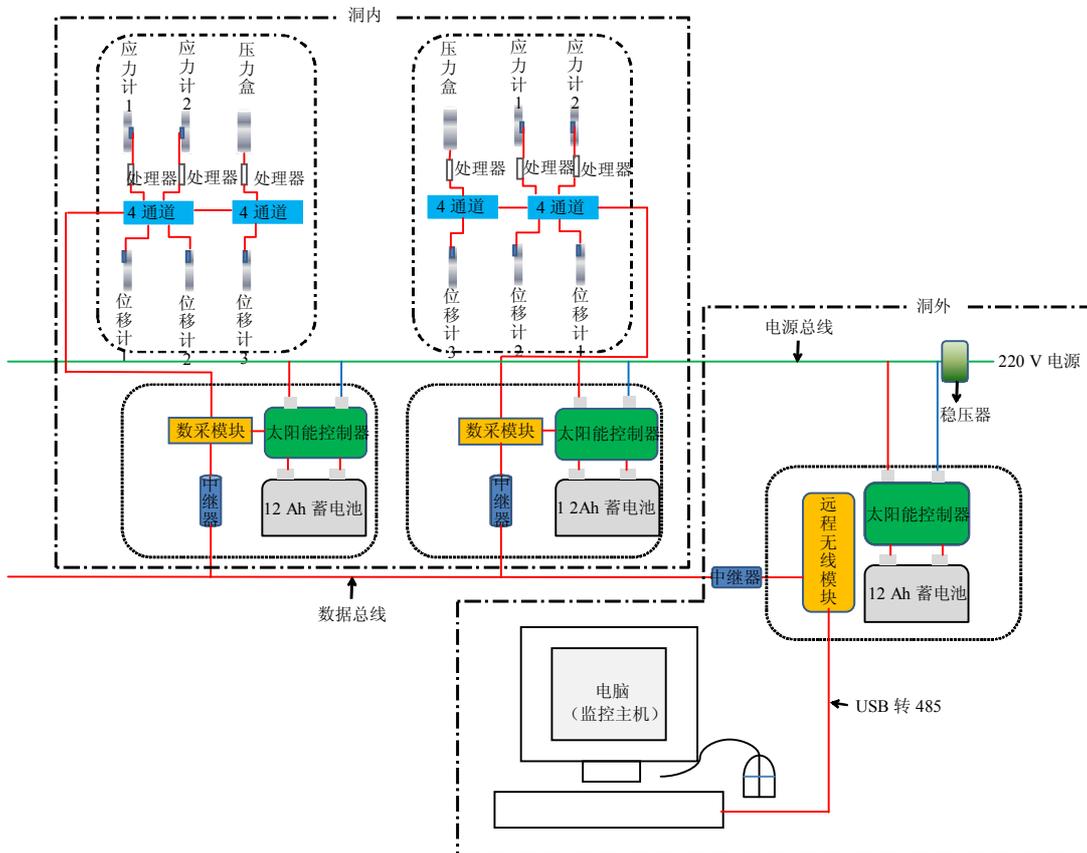


图 5 现场洞内有有线+无线的组网方案与数据传输示意图
Fig.5 Schematic of wired network inside tunnel+ wireless network and data transmission

信号发送利用网络通信，由施工现场监控中心电脑、无线采集模块、远程上位 PC 机（服务器）和远程 PC 机（客户端）共同组建一个新通信网络，基于分组无线服务技术（GPRS）、域名解析和端口映射技术，实现现场采集数据一对一、一对多任意终端远程发送、传输和接收任务。具体工作原理是：

(1) 在遵循现有网络通信协议，即 TCP/IP 协议组的基础上，利用现场监控电脑完成监控室 GPRS 采集模块串口设置，包括 DNS 服务器地址、通信端口和网络域名（由动态域名解析软件获取）。

(2) 将上位 PC 机（服务器）DNS 服务器地址、通信端口和网络域名与 GPRS 发送模块设置同步，同时借用动态域名解析(DNSR)和端口映射技术，完成 IP 固定和端口号分配；

(3) 将下位机（客户端）通信参数与上位机（服务器）设置同步；

(4) 激活现场无线采集模块内置的 Sim 卡，通过 TCP/IP 拨号进入 Internet 网络，建立与上位机（服务器）网络通信，进入数据传输阶段，在通信阶段上位机与下位机波特率始终保持一致。这里使用域名解析和端口映射技术主要目的在于固定 IP 地址和解决非公网 IP 不能相互通讯的难题。

2.3 远程处理软件系统

管理分析系统借用软件系统对现场设备实现指令管理。该软件平台操作界面主要包含传感器-数据记录、信息设置、参数设置、通信数据监测 4 个部分。具有远程数据自动采集和可视化分析、数据管理与输出、客户端远程接入、预警值设定及信号定向发布等功能，实际操作流程见图 6。

(1) 数据自动采集和可视化：可自由设定采集箱的自动采集和读取时间，最高采集频率达每次 4 min。同时，软件自动对选定的传感器数据进行分析，生成时间-位移、时间-应力等单、双和多曲线形式，利于分析，见图 7。

(2) 数据管理与输出：传感器采集数据由系统分类储存，提供依据日期或仪器编号为条件的两种查询方式，用户可据此获取任意时间段任意仪器的采集数据记录，同时提供 txt 文本文件和 excel 两类文件输出格式。

(3) 服务器-客户端设定：对选定的电脑主机（服务器）进行通信参数设置后，可根据工程实际需要添加相应数目的客服端，用于接收查看现场监测信息，完美实现一对一、一对多机实时共享。

(4) 预警值设定及信号定向发布：此功能依据后期计算的预警参数值设定，根据参数值可设置相

应仪器的预警阈值，当现场监测数据达到仪器设定阈值时，与现场监测电脑相连的报警灯会自动发出轰鸣声并对应闪烁前期设定的红、橙两色。同时以手机短信形式将预警信息发送给相关负责人。

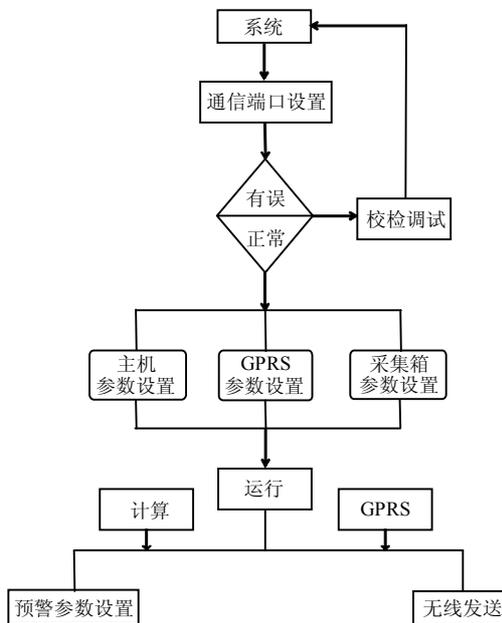
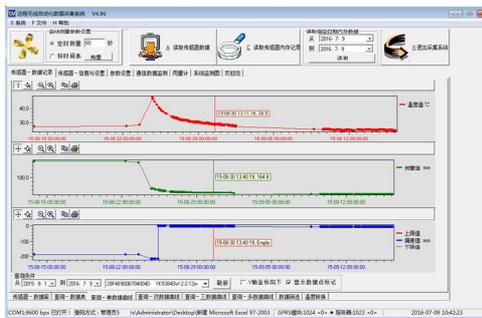


图 6 程序操作示意图
Fig.6 Schematic of the program operation



(a)传感器-数据库工作栏



(b)查询-数据表工作栏

图 7 主机及远程客户端软件界面
Fig.7 Processing software interface of the host and remote client

2.4 监测组网特点

采用洞内有有线+远程 GPRS 的线性组网模式, 基于 FCS 理论, 实现了监测系统的开放性和结构功能的彻底分散, 数字化的数据信号传输, 显著提高了信号精度, 具有如下特点:

(1) 仪器编号惟一: 现场所有监测仪器编号, 均由传感器内置芯片自动生成, 且该编号作为仪器数据读取与设置的惟一识别标识, 从而可杜绝人为编号混乱或信息丢失等现象发生。

(2) 开放性和可操作性好: 运用全球第 5 代控制系统 FCS (现场总线控制系统), 采用统一的通信协议和网络结构, 有效地解决了传统监测体系中不同品牌仪器不能低成本组合使用的难题, 并在此基础上, 对不同品牌仪器实现集成, 统一组态。当某个仪器发生故障时, 工程现场可立即采用其他品牌的仪器进行替换, 极大地提高了现场设备系统的兼容性和扩展性。

(3) 功能分散模式: 放弃原 DCS 输入/输出单元和控制站模式, 采用“工作站-现场智能仪表”二级组织结构, 将原有的控制站功能分散给现场智能仪表, 构成虚拟控制站。这样的好处在于, 当工作站由于断电和仪器出现故障瘫痪时, 虚拟控制站依然能够独立运行, 继续完成监测工作, 极大地提高了系统安全性。

(4) 远距离全数字化传输: 监测现场的所有智能传感器均内置有计算芯片, 当其在采集数据的同时会自动对测量数据进行换算, 直接输出数字化物理量, 且输出信号精度较目前 4~20 mA 的直流模拟信号提高了近 10 倍, 在不添加额外中继器的基础上, 最远可实现 1.2 km 传输不失真。

(5) 数据 GPRS 发送: 采用通用分组无线服务技术 (GPRS)、域名解析和端口映射技术, 实现采集数据一对一、一对多任意终端远程发送、传输和接收任务。

(6) 数据远端采集、自动分析及实时预警的定向发布: 通过隧道外监控中心电脑发出指令, 实现围岩变形、锚杆应力、喷层压力值远端采集, 系统自动对采集数据进行分析, 达到预警阀设定值自动预警, 并定向发布预警信息至责任人手机。

(7) 仪器自检功能: 当传感器在采集过程中由于意外情况出现异常, 其会自动向远程监测主机发送对应代码, 并显示在界面错误传感器列表中 (见图 8), 工作人员在查看代码后, 可知道仪器出现故障的原因, 从而及时安排人员维修更换。

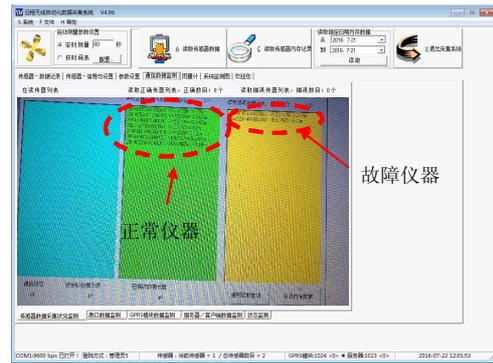


图 8 仪器状态显示栏

Fig.8 Display column of instrument status

3 大狮子隧道实例分析

3.1 工程简介

浙江省三门湾大桥及接线工程 (以下简称本项目) 起自宁波象山戴港, 顺接象山港大桥南接线终点, 沿线共有 7 座隧道, 其中大狮子隧道全长为 3 882.5 m, 为本工程最长隧道, 双洞 4 车道布置, 将是宁波市最长的公路隧道。

隧道工程穿越低山丘陵区, 山势较陡。在桩号 ZK50+032、YK50+028 两处跨越龙溪庵-仓岙水库引水隧洞, 两者高差较小, 基岩节理裂隙发育, 完整性一般。同时根据地质调查显示, 整个隧道有 4 个碎裂带, 总长度达到约为 260 m, 且隧道两端洞口段岩石风化严重, 节理裂隙发育, 局部可见节理密集带, 岩性接触面附近完整性差, 自稳性能弱, 施工时易发生局部坍塌失稳。隧道沿线 III 类围岩占总长度的 60.7%, IV、V 类围岩约 1 165 m, 占总长 40% 左右。由于浙江东南地区夏季雨水充沛, 隧道穿越的凝灰岩遇水软化特征明显, 非 III 类围岩节理裂隙发育, 隧道全断面开挖形成的卸荷临空面大, 因而, 其开挖过程中围岩大变形与塌方风险高, 系统地开展围岩安全性的远程监测十分必要, 见图 9。

3.2 监测断面仪器埋设方法

在隧道围岩稳定性监测中, 现场智能传感器埋设断面位置选择、初值校核和正确安装与否, 直接关系到整体监测工作的成败。

3.2.1 监测仪器埋设设计

根据塌方发生的外在变形敏感性特征, 考虑了监测指标为变形、锚杆应力、喷层压力 3 个相互配合, 具体如下: 每个系统监测断面原则上埋设 3 支快速安装型位移计、2 支锚杆应力计、1 个喷层压力计 (见图 10); 每个随机监测点埋设 1 支快速安装型位移计。

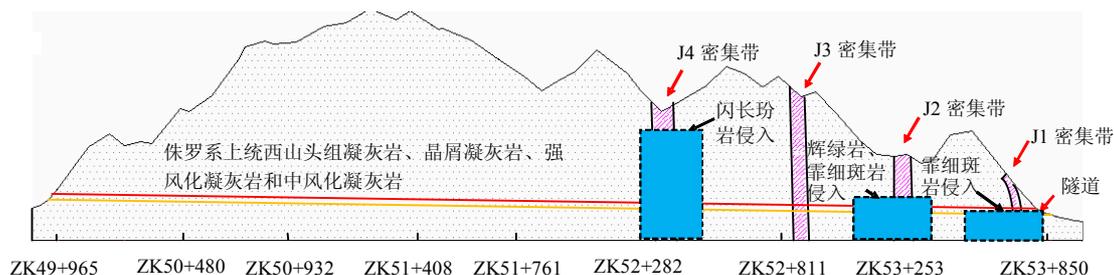


图 9 大狮子隧道地质纵断面及围岩分级碎裂带

Fig.9 Geological longitudinal section of Dashizi tunnel and classification of surrounding rock rupture zone

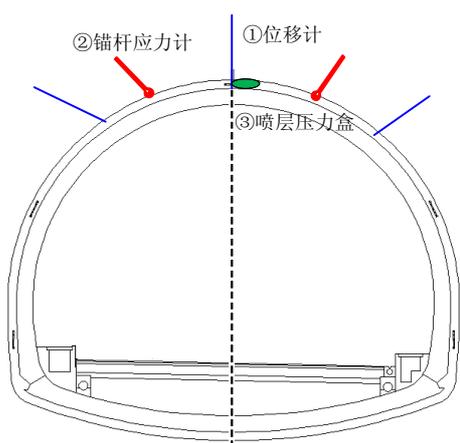


图 10 仪器断面布置图

Fig.10 Section of arrangement of instrument

设安装步骤与位移计相同，如图 12 所示。

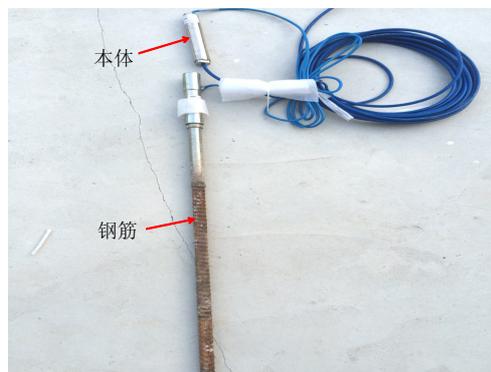


图 12 锚杆应力计现场拼装图

Fig.12 Image of on-site assembly of bolt stress meters

3.2.2 位移计的安装和埋设

为节省洞内工作时长，提前在场外进行位移计结构拼装。现场埋设时，将拼装好的位移计送入打好的孔洞内，孔洞外余下的位移计底部拼装托板，托盘与工字钢架焊接固定，最后注浆，至此位移计安装完毕，如图 11 所示。



图 11 位移计现场拼装图

Fig.11 Image of on-site assembly of displacement meters

3.2.4 压力盒的安装和埋设

由于拱顶表面凹凸起伏，压力盒难以完整贴合，均匀受力，为此，需提前准备沙袋一个，要求沙袋摊平后面积稍大于压力盒表面面积，现场埋设时将其置于压力盒顶与拱顶围岩表面接触，底部采用自制平衡钢板托盘顶起，托盘与工字钢架焊接固定，如图 13 所示。

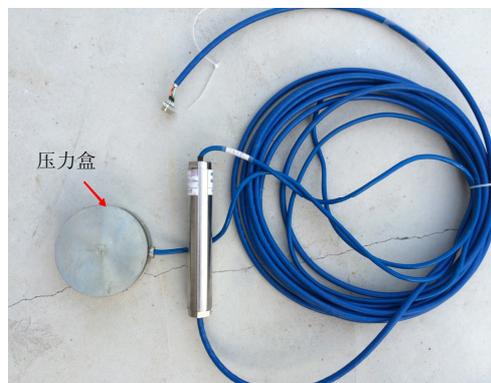


图 13 压力盒现场拼装图

Fig.13 Image of on-site assembly of pressure cells

3.2.3 锚杆应力计的安装和埋设

锚杆应力计两端的焊接部分与本体为螺纹连接，拼装前将其先行取出，拿至工地焊接。现场埋

3.3 现场组网布置实例

为了在外界无 WiFi 信号条件下，实现对隧道

部分围岩变形和支护结构受力状况全天候监测，采用了“有线+无线”的组网方案。洞内采用有线方式的信号采集和传输，在洞口集中后接入现场无线发射模块，继而通过 GPRS 传输进入 Internet 网络，最后借用远程数据处理软件进行数据读取和预警处理。

3.3.1 桩号布置设计

在实施监测工作前，重点考虑了《大狮子隧道安全风险分 析》报告中识别的高塌方风险洞段，并合理结合了工程地质勘察报告和隧道稳定性数值分析，对隧道理论上存在塌方高风险洞段设置多个系统监测断面、多个随机监测点，如洞口段监测断面、洞身段监测断面：主要位于 ZK52+840~ZK53+260 和 ZK53+638~ZK53+840 段。

3.3.2 无线信号组网传输

现场无线信号组网主要考虑数据传输的高效性和稳定性，突出体现在分布式接入、总线控制、洞口集中、GPRS 发送、远端采集、自动分析、定向发布等 7 个方面。在隧道清砟、二衬过程中，洞内光线差，视野受限，操作机械的工人在施工过程中易造成线路破坏，影响数据传输。随着隧道掘进深度增大，洞内无线信号强度逐渐减弱，信号自身强度也随着传递距离的增大而产生衰减，对此，确定现场为洞内到监控室段有线传输、远程 GPRS 无线发送，同时考虑隧道的狭长特性，弃用常规边坡中的网状组网模式，而选用线性组网，这样能增大有效传输距离同时更为经济。其次，减少洞内走线数目，由监控室引出电源和信号两根总线依消防洞室一侧布置，实行总线控制，以总线串接洞内采集箱，

而避免过多地使用仪器线，实现信息传输和电源供给，这样既利于传输又能节省电缆线长，本次布设在右侧，见图 14。最终确定现场无线信号的传输路径即：每个监测断面上所有监测仪器采用电缆集中连接到 4 通道采集仪，然后通过 4 通道采集仪分别传入洞内采集模块和中继器，中继器与总线相连，见图 15，最后经无线发射模块完成数据远程发送。



图 14 现场总线走线图
Fig.14 Layout of fieldbus

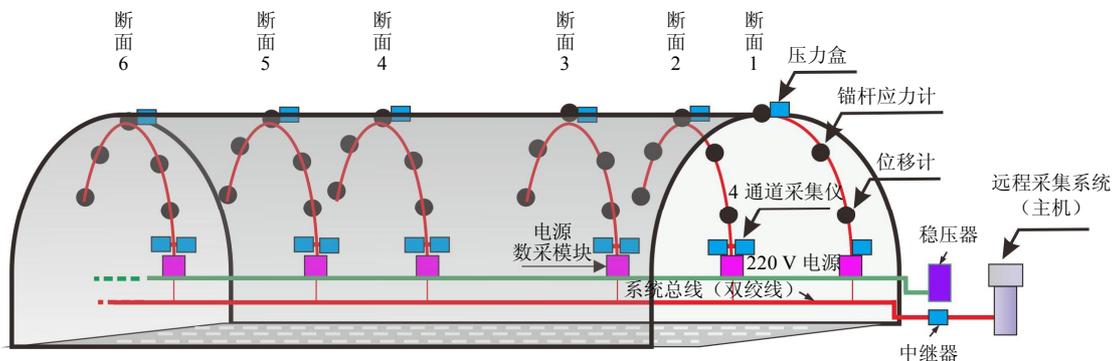


图 15 洞内组网传输线路图
Fig.15 Network transmission route inside the tunnel

3.4 预警参数设置

目前，国内关于围岩安全系数判定主要基于洞周位移或塑性区经验值大小 2 个重要判据，但存在

较大争议。至于隧道预警参数，国内规范并没有给出直观通用的定量规定，而关于设计大多采用安全系数，重视对极限位移的计算，同时，极限位移也

在一定程度上被认为是理论和实践结合的时代产物，能一定程度反映实际情况。李晓红等^[24]以隧道及地下工程围岩变形位移为判据提出了隧道及地下工程围岩极限位移的确定方法和分析方法。张传庆等^[25]以 Hoek 经验公式的通式为基础，介绍了损失位移的求解步骤及在锦屏 II 级水电站辅洞的应用。江权等^[26]提出了基于强度折减技术的地下洞室群整体安全系数求解方法。朱永全等^[27]基于计算模拟与现场统计对比提出了铁路隧道围岩极限位移判据。郑颖人等^[28]则提出将基于有限元强度折减法计算出的安全系数作为稳定分析的定量判据；而关于现场，吴秋军等^[29]提出了以现场位移监测数据的统计分析作为围岩稳定性的判据基准。本文依靠监测数据统计分析，结合式 (2)、(3) 和《锚杆喷射混凝土技术规范》，将大狮子隧道左洞监测预警等级划分为橙、红二级，分别表示为预警、警报，详细划分指标见表 1。同时，在预警软件系统中进行发送对象和等级设置，定向发布预警信息。

$$U_a = D_{\text{测量}} / L_{\text{跨度}} \quad (2)$$

$$V = D_{\text{测量}} / t \quad (3)$$

式中： U_a 为洞周允许位移相对值； $D_{\text{测量}}$ 为洞周围岩上两测点间的实测位移累计值； $L_{\text{跨度}}$ 为洞周围岩上两测点之间的距离，即本次仪器实际埋设深度，为固定值 3.6 m，统计得出 t 为 26 d。通过强度折减法算出本工程隧道 U_a 为 0.5%，将 $L_{\text{跨度}}$ 和 U_a 代入式 (2) 计算得出警报值为 18 mm，预警值则通过实测数据统计得出为 10 mm。最后，分别将警报值和预警值代入式 (2)，得出变形速率分别为 0.38 mm/d 和 0.69 mm/d。

表 1 预警参数表

Table 1 Pre-warning parameters

颜色等级	安全等级	变形增量/mm	变形速率/(mm/d)
橙色	预警	10.0	0.38
红色	警报	18.0	0.69

3.5 结果分析

隧道远程监测组从 2015 年 7 月进驻现场开展监测工作以来，采集了大量监测数据。限于篇幅和结合上节预警值设定，文章重点取部分断面的典型监测数据，简要对其进行分析。

(1) 位移分析

通过对比图 16、17 可看出，围岩变形及稳定时间与地质条件存在一定的关系，基本上表现为地质条件越差，围岩拱顶下沉越大，稳定所需时间越长。

其中 ZK53+782 断面，处于 V 级围岩段，节理裂隙发育，完整性差，在开挖初期拱顶变形速率快速增长，喷锚支护后 20 d 左右，变形减小，增长缓慢，26 d 后趋于稳定。ZK52+888 属 IV 级围岩，喷锚支护后 12 d 左右，下沉速率减缓，18 d 后趋于稳定。同时，后期的爆破开挖作业对前期断面的围岩稳定性存在影响，从曲线看，自爆破后前 5~7 d 埋设断面位移波动明显，同时图内小曲线图显示，部分仪器数值受震动影响会发生突变。经统计当监测断面距工作面距离增大至 30 m 左右时，开挖扰动效应出现明显减小，监测位移曲线在整体变化趋势上呈现出一种台阶式的波动增长变化规律，基本经历了“前期快速变化-中期缓慢变化-后期逐步稳定”3 个阶段，这与国内类似隧道监测工作后期分析得出的结论基本一致^[30]。

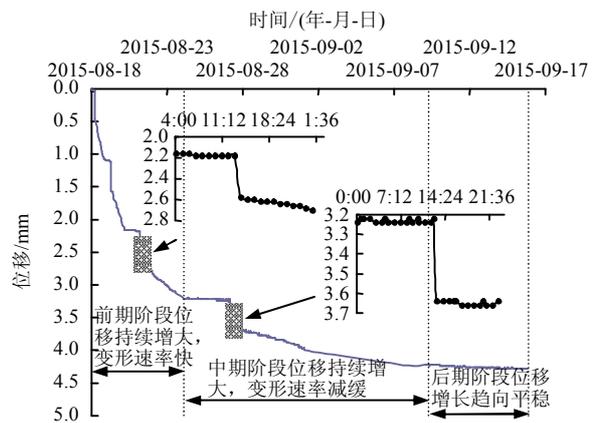


图 16 ZK53+782 位移-时间曲线

Fig.16 Displacement-time curves of surrounding rock at the cross-section of ZK53+782

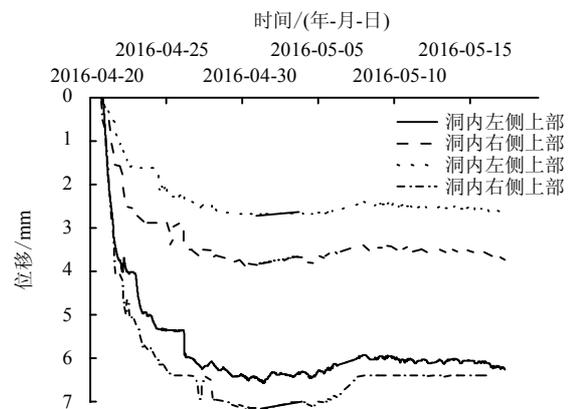


图 17 ZK52+888 位移-时间曲线

Fig.17 Displacement-time curves of surrounding rock at the cross-section of ZK52+888

(2) 应力分析

锚杆应力计埋设在隧洞两侧拱墙上部，深度为

3.6 m。除承受钢拱架和喷射混凝土抵抗围岩向内变形外,锚杆还要承受围岩本身后期变形产生的拉力。通过图 18 看出,应力发展的总体趋势与上述位移变化规律是类似的,在测量前期应力值呈现快速增大,一个月左右出现回落,同时相应的应力增长速率逐步减缓,随后趋于平稳。对比国内相关隧道应力监测结果,本次应力测量峰值水平不高,从侧面反映出锚杆对围岩变形主要起到了协同与辅助的支撑作用,钢拱架和围岩自承起主要支撑作用^[31]。

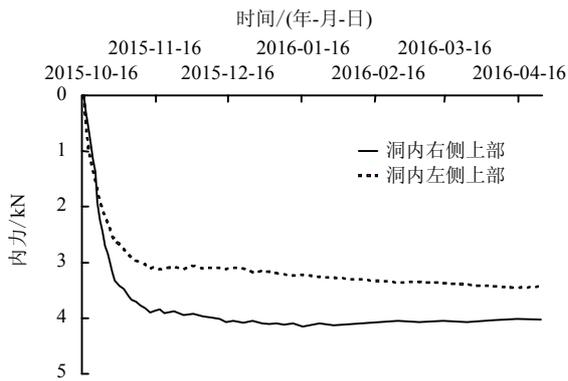


图 18 ZK52+560 内应力-时间曲线

Fig.18 Internal stress-time curves of surrounding rock at the cross-section of ZK52+560

(3) 围岩与初期支护压力

压力盒置于初期钢拱架与围岩之间,图 19 为围岩初期支护压力-时间曲线,从图中可以看出压应力值的变化较为敏感,快速增长期主要集中在前 5 d 左右,后续随着掌子面不断掘进,逐步趋于稳定。

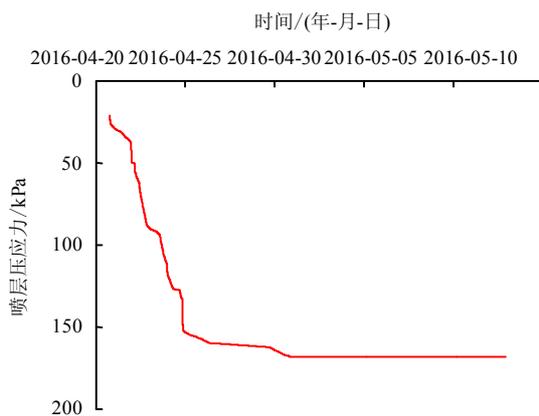


图 19 ZK52+560 喷层压应力-时间曲线

Fig.19 Spray pressure stress-time curve of surrounding rock at the cross-section of ZK52+560

4 现场应用讨论

4.1 线路保护

隧道内部的复杂环境及施工机械开挖易对洞内

传输线路造成极大破坏,导致信号传输中断,因此,需人工对线路进行严格保护:①在施工现场,洞内线路每隔 1~2 m 打入一个带钩膨胀螺丝,同时将线路分段用胶带束成一团,最后利用 4 cm 的角钢架立在膨胀螺丝上将线路包住固定;②洞外至监控室段线路采用 PVC 管保护。通过后期的跟踪观察,采用这种方案是可行的,能够很好地对线路进行保护,确保监测工作正常运行。

4.2 数据传输

在对线路进行保护的基础上,扩容相关采集模块内存、优化信息传输路径可对数据传输过程形成多重保护。本文中每个智能传感器数据存储条数为 1 600 条,如果设置每天的采集频率为 1 次/h,则一天采集仪器的存储总条数则为 24 条,当外部线路出现意外即断掉的情况下,仪器自身可以自行保存至少 2 个月的采集记录数据,这可为人工及时修复提供充裕的时间。此外,对线路传输路径进行优化,在洞内采集箱增添存储模块,每一个埋设断面一个,负责临时存储该断面所有仪器数据。当总线和仪器线路均被破坏,可以通过人工携带电脑,读取破坏前所有仪器采集信息,避免数据丢失,形成双重保障。

4.3 供电系统

供电系统是整个监测工作正常运转的动力之源。施工现场由于场地限制和多种条件干扰,极易发生突发性断电和节日期间小区域长时间断电,造成现场监测工作中断,同时对仪器设备造成破坏。因此,适时增添贮备电能供给和改进电流传输路径,会对解决以上问题大有裨益:①在施工现场洞外监控室,添置 usp 延时电源和稳压器,对洞内采集箱则增加储备蓄电池。②由太阳能控制器将电能输送至蓄电池和采集模块,完成箱内供电,替代外部电源直接对箱内仪器供电。这里通过太阳能控制器的主要的目的在于利用其调节功率和保护电压的特性,避免安装和修复过程中,仪器由于线路破坏和人为操作失当,导致电路反接、短路、过流影响造成不利损坏,同时显示电量,便于监测调控安排。现场具体组织结构见前文示意图 2。

5 结 论

(1) 采取洞内有线+洞外无线的组网模式,基于 FCS 理论和 GPRS 分组无线传输技术,提出了一种新型隧道远程在线遥测系统构建方式。它有效地解决了目前现场不同品牌监测设备难以兼容使用的难题,同时实现了结构控制功能的彻底分散,提高了系统的鲁棒性。

(2) 该方法可对复杂环境下隧道围岩变形、锚杆应力、喷层压力等监测量的变化实现 24 h 全天候远程高频监测, 同时可自动对监测数据进行分析并第一时间预警, 为隧道连续作业开挖提供实时预警。

(3) 隧道内部的复杂环境及施工机械干扰易对监测系统造成破坏。实践表明: 加强外部线路硬件保护、优化采集数据传输路径、扩大采集设备存储和改进供电方式, 会极大地减轻监测工作对工程现场复杂条件的依赖, 保证现场监测系统稳定高效运转, 实现无人值守。

(4) 通过高频监测形成的应力-时间、位移-时间等曲线分析, 发现大狮子隧道的围岩变形在整体变化趋势上呈现出一种台阶式的波动增长变化规律, 同时受爆破开挖影响后变形值易产生突变, 其中变形、喷层压力值的变化受后续隧道开挖扰动的影响较大, 但 3 者基本经历了“前期快速变化-中期缓慢变化-后期逐步稳定”这 3 个阶段。同时经对所有监测数据进行统计分析发现, 当掌子面距离埋设断面 35 m 左右时, 即约 2.5 倍洞径时, 围岩力学响应趋于稳定。

地下工程安全监测的自动化与智能化是智慧交通的必然趋势, 硬件与软件技术的日益发展必然使得目前地下工程远程在线监测面临的全无线传输、仪器鲁棒性、监测高能耗、安装和维护工作量大、系统控制结构偏复杂、监测系统成本投入大等问题得到有效解决。可以预见, 地下工程远程在线监测技术与“互联网+”深层次结合, 融合人工智能(AI)、大数据(BD)、物联网(IOT), 将具备以成因分析、关联分析及决策支持为核心的深度自主分析和安全预警能力, 从而最终将现场监测提升到与试验、理论与数值仿真相同甚至是更为重要的地位。

致谢: 本文现场应用研究得到了宁波市高等级公路建设指挥部、中交公路规划设计院、中铁隧道集团的大力支持和协助, 得到了湘银河公司提供的技术支持, 这里一并表示感谢。

参考文献

- [1] 曹文贵, 翟友成, 王江营, 等. 山岭隧道塌方风险的集对分析方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 90—99.
CAO Wen-gui, ZHAI You-cheng, WANG Jiang-ying, et al. Method of set pair analysis for collapse risk during construction of mountain tunnel[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2012, 25(2): 90—99.
- [2] 陈洁金, 周峰, 阳军生, 等. 山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2365—2370.
CHEN Jie-jin, ZHOU Feng, YANG Jun-sheng, et al. Fuzzy analytic hierarchy process for risk evaluation of collapse during construction of mountain tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2365—2370.
- [3] 高文工, 王洪兴. 基于监控量测的山岭隧道塌方大变形预警研究[J]. 公路, 2015, (2): 248—251.
GAO Wen-gong, WANG Hong-xing. Research on large deformation pre-warning of collapse in mountain tunnel based on monitoring measurement[J]. **High Way**, 2015, (2): 248—251.
- [4] 王劲松, 陈正阳, 梁光华. GPS 一机多天线公路高边坡实时监测系统研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1532—1536.
WANG Jin-song, CHEN Zheng-yang, LIANG Guang-hua. Study of real time monitoring system of highway steep slopes based on GPS with multi-antenna[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1532—1536.
- [5] 吴浩, 黄创, 张建华, 等. GNSS/GIS 集成的露天矿高边坡变形监测系统研究与应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 40(5): 706—710.
WU Hao, HUANG Chuang, ZHANG Jian-hua, et al. Deformation monitoring system for high slope in open pit mine with the integration of GNSS and GIS[J]. **Geomatics and Information Science of Wuhan University**, 2015, 40(5): 706—710.
- [6] 许利凯, 李世海, 刘晓宇, 等. 三峡库区奉节天池滑坡实时遥测技术应用实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4477—4483.
XU Li-kai, LI Shi-hai, LIU Xiao-yu, et al. Application of real-time telemetry technology to landslide in Tianchi Fengjie of Three Gorges Reservoir Region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp. 2): 4477—4483.
- [7] 陶志刚, 李海鹏, 孙光林, 等. 基于恒阻大变形锚索的滑坡监测预警系统研发及应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 3032—3040.
TAO Zhi-gang, LI Hai-peng, SUN Guang-lin, et al. Development of monitoring and early warning system for landslides based on constant resistance and large deformation anchor cable and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 3032—3040.
- [8] 高杰, 尚岳全, 孙红月, 等. CCD 微变形监测技术在边坡远程监控中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1269—1272.
GAO Jie, SHANG Yue-quan, SUN Hong-yue, et al. Application of CCD micro-deformation monitoring technology to slope remote monitoring[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 1269—1272.
- [9] 郭凯, 盛谦, 张勇慧, 等. 山区公路路基边坡地质灾害

- 远程监测预报系统开发及应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3683—3688.
- WU Kai, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Development of real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters at subgrade slopes of mountainous highways and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3683—3688.
- [10] OHBAYASHI R, NAKAJIMA Y, NISHIKADO H, et al. Monitoring system for landslide disaster by wireless sensing node network[C]//SICE Annual Conference. Tokyo: IEEE International, 2008: 1704—1710.
- [11] 赵丽, 仲崇波, 伟赟, 等. 基于无线传感器网络技术的山区高速公路边坡监测方案[J]. 交通标准化, 2008, (11): 34—38.
- ZHAO Li, ZHONG Chong-bo, WEI Yun, et al. Based on wireless sensor network technology of mountain highway slope monitoring program traffic[J]. **Transportation Standardization**, 2008, (11): 34—38.
- [12] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081—1090.
- HE Man-chao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslide s and its engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(6): 1081—1090.
- [13] 嵇中. 无线传感网络技术在隧道变形与防灾监测中的应用研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(2): 134—139.
- JI Zhong. Application of wireless sensor network technology in the tunnel deformation and disaster monitoring[J]. **Tunnel Construction**, 2014, 34(2): 134—139.
- [14] LI X, JI Z, ZHU H, et al. A feasibility study of the measuring accuracy and capability of wireless sensor networks in tunnel monitoring[J]. **Frontiers of Structural & Civil Engineering**, 2012, 6(2): 111—120.
- [15] 林仕雄. 彩虹岭隧道监控系统设计[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2005, 4(1): 35—40.
- LIN Shi-xiong. Monitoring system design of Caihongling tunnel[J]. **Guangdong Vocational and Technical College Transportation Technology**, 2005, 4(1): 35—40.
- [16] 徐祥其. 开展了电水平尺沉降自动遥测系统在地铁监护中的应用研究[J]. 岩土工程界, 12(2): 71—74.
- XU Xiang-qi. The application of the automatic measurement system for measuring the level of the electrical system in the subway is studied. The research on the application of[J]. **Geotechnical Engineering World**, 12(2): 71—74.
- [17] 肖瀚. 隧道环境系统在电力隧道中的建设和应用[J]. 电气制造, 2013, 4: 64—67.
- XIAO Han. The tunnel environment system in electric power tunnel construction and its application[J]. **Electrical Manufacturing**, 2013, 4: 64—67.
- [18] 高文学, 邓洪亮, 孙西蒙, 等. 隧道掘进综合信息智能监控系统研究[J]. 公路隧道, 2012, 2: 5—10.
- GAO Wen-xue, DENG Hong-liang, SUN Xi-meng, et al. Research on the intelligent monitoring system of comprehensive information in tunnel excavation[J]. **Road Tunnel**, 2012, 2: 5—10.
- [19] IEEE 1451 committee. IEEE standard 1451. 2-1997. standard for a smart transducer interface for sensors and actuators-transducer to microprocessor communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) [S]. [S. l.]: [s. n.], 1997.
- [20] 王德盛. 电感调频式位移传感器与应用[J]. 微型机与应用, 1994, (12): 11—13.
- WANG de-sheng. Inductance frequency modulation displacement sensor and its application[J]. **Microcomputer & Its Applications**, 1994, (12): 11—13.
- [21] 刘卫玲, 姚世选, 段晋军, 等. 基于电磁谐振的电感式位移传感器的频率分析[J]. 电子测量技术, 2012, 35(8): 82—85.
- LIU Wei-ling, YAO Shi-xuan, DUAN Jin-jun, et al. Frequency analysis of the introduction sensor for distance measurement based on electromagnetic resonance[J]. **Electronic Measurement Technology**, 2012, 35(8): 82—85.
- [22] 王锦标. 现场总线控制系统[J]. 化工自动化及仪表, 1997, (2): 3—8.
- WANG Jin-biao. Fieldbus control system[J]. **Control and Instruments in Chemical Industry**, 1997, (2): 3—8.
- [23] 陈铁军, 谢春萍. PC机与RS 485总线多机串行通信的软硬件设计[J]. 现代电子技术, 2007, 30(5): 103—105.
- CHEN Tie-jun, XIE Chun-ping. Design of software and hardware in serial-communication between PC and multiple MCUs based on RS 485[J]. **Modern Electronics Technique**, 2007, 30(5): 103—105.
- [24] 李晓红, 王宏图, 贾剑青, 等. 隧道及地下工程围岩稳定性及可靠性分析的极限位移判别[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 850—854.
- LI Xiao-hong, WANG Hong-tu, JIA Jian-qing, et al. Ultimate displacement discrimination of stability and reliability analysis of surrounding rocks of tunnel and underground engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 850—854.