文章编号:1671-251X(2018)07-0091-05　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018040029

矿井动力灾害实时在线监测系统设计

李祥和[1,2]

(1.瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室,重庆　400037;
2.中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆　400039)

摘要:针对目前煤矿深部动力灾害的监测主要依赖于在线采集装置,无法实现数据的并行和快速采样的缺点,设计了一套动力灾害实时在线监测系统。该系统利用声发射、瓦斯、应力等传感器实时监测矿井动力灾害发生过程中煤岩释放的应变能及瓦斯浓度、煤岩应力参数,利用监测站实时采集、处理各种传感器信号,通过上位机数据管理软件对特征参数指标变化规律进行有效分析、结果预警等,从而实现了对动力灾害的连续动态监测。实际应用结果证明了该系统的可靠性。

关键词:煤炭开采;煤矿深部动力灾害;声发射;在线监测

中图分类号:TD76　　文献标志码:A

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180625.1804.004.html

Design of real-time and on-line monitoring system for mine dynamic disaster

LI Xianghe[1,2]

(1.State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China; 2.CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: In view of shortcomings that current monitoring of deep dynamic disaster in coal mine mainly depends on the on-line collector, which cannot realize data parallel and rapid sampling, a set of real-time and on-line monitoring system for mine dynamic disaster was designed. In the system, acoustic emission sensors, gas sensors and stress sensors are used to real-timely monitor parameters of strain energy, gas concentration and stress of coal and rock during occurrence of mine dynamic disaster; monitoring station is used to real-timely collect and process various sensor signals; PC data management software is used to realize effective analysis and results early warning of characteristic parameters change rule, so as to realize continuous dynamic monitoring of the dynamic disaster. Actual application results prove reliability of the system.

Key words: coal mining; deep dynamic disaster in coal mine; acoustic emission; on-line monitoring

0　引言

随着我国煤矿开采深度及规模的不断加大,以冲击矿压[1-3]为代表的深部动力灾害以其突发性及巨大的破坏性成为研究的重点及难点,利用声发射、微震现象[4]对岩体破坏过程进行监测,从而推测岩体破坏位置及破坏强度,实现对矿井动力灾害的超前预测是预防动力灾害的有效手段。近年来,随着对声发射技术研究的不断深入,其技术成果广泛应用于无损检测[5]、地压监测[6]、工程土体监测[7]和煤岩动力灾害监测[8]等。但由于受井下复杂条件的影响,造成了相对成熟的声发射[9]技术及装备在矿井

收稿日期:2018-04-08;**修回日期**:2018-05-22;**责任编辑**:张强。

基金项目:"十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAK04B01)。

作者简介:李祥和(1968—),男,安徽太湖人,高级工程师,研究方向为矿业安全、自动化控制与仪表技术,E-mail:652061091@qq.com。

引用格式:李祥和.矿井动力灾害实时在线监测系统设计[J].工矿自动化,2018,44(7):91-95.

LI Xianghe. Design of real-time and on-line monitoring system for mine dynamic disaster[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(7):91-95.

动力灾害监测中的应用存在诸多局限性，主要有以下 2 个方面原因：一方面由于井下干扰因素多，滤噪技术不成熟，在线监测装置难以识别有效的声发射信号，而噪声处理技术是研究声发射监测动力灾害的前提、关键和难点。另一方面，大量声音信号需要多通道并行采样才能保证数据的实时性及连贯性。目前使用成熟的装备主要是参数性设备，不具备全波形信号采集及数据处理和通信功能，遗漏了太多的有用信号和主要信息，难以捕捉到灾害发生的全过程，无法有效处理灾害前兆特征和进一步进行灾害判识。

为此，针对目前煤矿深部动力灾害的监测主要依赖于便携式在线采集装置，无法实现数据的并行、快速采样及难以有效识别声发射信号的缺点，设计了一套适合井下环境使用的动力灾害实时在线监测系统[10-11]，该系统根据声发射监测原理，利用各种传感器技术、嵌入式系统控制技术、FPGA 可编程模块技术及矿井工业以太网平台技术，实现了煤(岩)体内部声发射信号的多通道并行高速采集、特征参数指标变化规律的有效分析，具有数据通信、存储、实时分析预警、数据维护等功能，可对煤岩瓦斯动力灾害[12]进行连续监测与预警[13-14]。

1 系统组成及功能实现

矿井动力灾害实时在线监测系统主要由声发射、瓦斯、应力(应变)等传感器、监测站(监测主站和监测从站)、矿用本安型网络交换机、矿用隔爆兼本质安全型电源箱、上位机等组成，如图 1 所示。

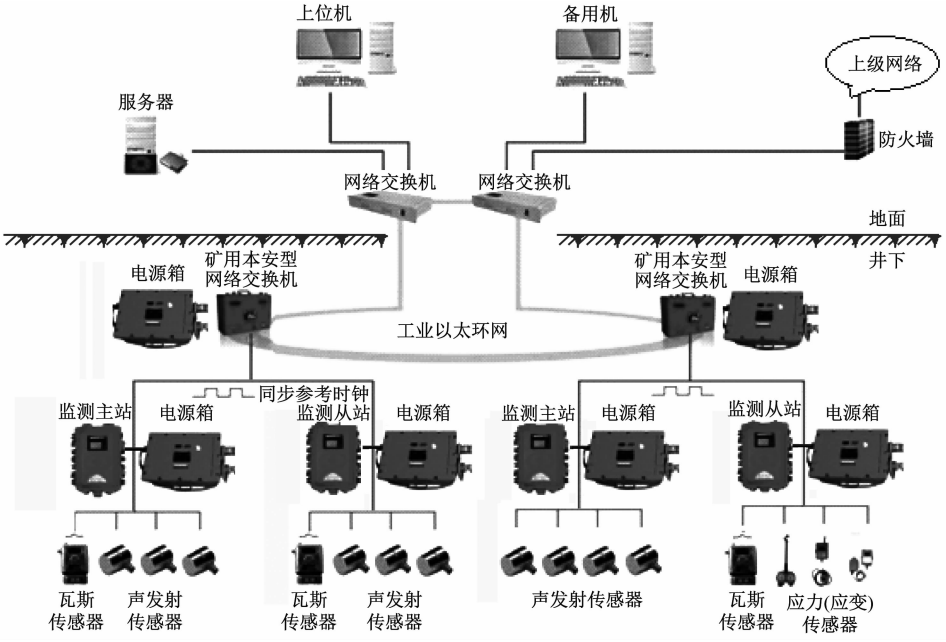

图 1 矿井动力灾害实时在线监测系统组成

Fig. 1 Composition of real-time and on-line monitoring system for mine dynamic disaster

系统应用声发射、瓦斯、应力(应变)等传感器，实时监测矿井动力灾害发生过程中煤岩释放的应变能及瓦斯浓度、煤岩应力参数，监测站实时采集、有效识别和处理各种传感器参数信号，并通过矿用本安型网络交换机搭建的工业以太环网平台实现和上位机的信息传输和通信，上位机通过运行数据管理软件程序，实现远程监控、数据分析、结果预警以及数据查询、报表打印等功能，对矿井动力灾害全过程进行连续动态监测和预警。

系统采用分布式布点采集各种参数，在采掘工作面安装一定数量的压电式加速度声发射传感器，用于检测煤岩在内部损伤、破坏过程中释放的应变能(弹性波的形式)。瓦斯传感器用于采集现场瓦斯浓度参数，为瓦斯突出预警、瓦斯浓度超前预测提供基础数据。应力(应变)传感器主要用于煤岩顶板及围岩内部离层传感检测和应力监测。

监测站通过信号采集模块、信号同步模块实现同步信号采集，信号经模数转换和实时嵌入式控制器、FPGA 模块进行数据分析，并通过工业以太环网与上位机进行数据传输和通信。监测站与传感器之间采用专用信号电缆连接，实现传感器信号并行、快速、实时采集及分析处理。监测站可灵活定义为主站或从站，设计时引入了多机箱同步机制，主站除兼顾从站功能外，还负责发出同步参考时钟，所有数据

采集基于同步参考时钟工作。

系统地面上位机通过实时分析处理软件进行信号处理及特征参数分析、结果预警、报警、信息反馈，通过工业以太环网发送工作指令给监测站。

2　监测站硬件设计

监测站由信号采集模块、调理模块、AD 转换模块、FPGA 模块、实时处理器等组成。各部件协调工作，完成高速信号采集、处理、分析、存储、通信及显示等功能。每台监测站可同时采集 8 路声发射信号，2 路电流信号，2 路频率信号，可挂接瓦斯、应力(应变)等模拟量信号，作为判识危险的辅助指标。监测站原理如图 2 所示。从传感器采集到的信号经过调理、模数转换后送到 FPGA 芯片，FPGA 芯片根据 FPGA 编程逻辑进行高速数字信号处理，并将处理结果通过 PCI 总线传给实时处理器，实时处理器将采样的全波形数据和分析结果等传送给存储、显示、报警及数据传输模块，供本地预警和上位机数据管理平台进行后续处理。

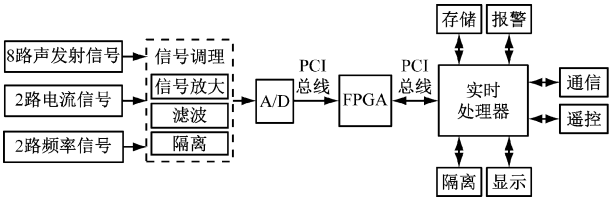

图 2　监测站原理

Fig. 2　Principle of monitoring station

3　硬件滤噪设计

有效的噪声处理技术是研究声发射监测动力灾害的关键技术。本文设计了一套有效的综合滤噪方法[15]，从噪声的源头、噪声进入系统过程、进入系统后的滤除和有效信号的识别及提取等方面实现噪声滤除和声发射信号识别。

3.1　工艺技术阻噪

利用部分干扰信号和有效声发射信号来源的差异，合理布局声发射传感器安装位置，可最大限度地降低噪声干扰信号水平，提高信号采集的可靠性。利用软性材料的隔音保护，使传感器接收到的噪声信号得到抑制，在一定程度上可以阻止噪声的进入和抑制噪声的幅度。

3.2　硬件的低噪声设计

低噪声设计主要采取以下措施：选用低噪声电子元件和芯片；数字电路和模拟电路分开，尽量避免相互干扰；采取多层布线，电源、地线和总线分开，减少互感振荡；设计选用抗干扰性能优良的矿用隔爆兼本质安全型电源，抑制电网引入的干扰。经过优化电路设计可大大降低系统的背景电气噪声。

3.3　传输电缆的屏蔽

为了降低矿井动力设备和动力电缆的电磁场干扰，专门设计了具有高屏蔽效果的专用矿用电缆。同时，为了减少屏蔽层内电源线对信号线的影响，把信号线和电源线分开，电源线单独使用一根带屏蔽的铜芯电缆。这样，有效降低了信号在传输过程中的外来电气噪声影响。

3.4　滤波器设置

井下声发射信号的频率范围主要集中在 300～3 000 Hz，主频一般在 1 000 Hz 左右，在此范围以外的有效信号较少。根据这一特点，硬件上设计带通滤波器滤掉这些频率范围以外的大部分信号。

4　系统软件架构及功能

系统软件采用 LabVIEW 进行开发，包括上位机和监测站的软件设计。上位机软件主要是对接收的井下数据进行分析处理，并进行预警，同时建立相应的数据库进行存储管理。监测站软件主要是信号采集、计算和控制的软件设计。系统软件采用模块化设计，每个功能模块都具有相对的独立性和特定的功能。主要功能模块包括：① 数据采集模块，实现数据的采集、波形的存储与回放等功能。② 信号处理模块，主要用于信号的预处理、时域分析、频谱分析、参数分析及小波分析等。③ 预测模块，主要用于模式识别及预测预报等。④ 数据库管理模块，主要包括信息的查询和服务功能模块群。几个模块相互联系，数据采集模块是基础，信号处理模块是重点，预测模块是结果。系统软件构架[16]分为主机(HOST)层、实时系统层 RT(Real-Time)、可编程控制层(FPGA)3 个层级，软件框架如图 3 所示。

最上层是主机层，运行数据管理软件程序，可实现远程监控及数据管理、系统整体运行状态监测、系统健康诊断、软件滤波参数设置、信号实时处理分析、结果预警、全波形、触发信号实时存储及显示、多通道多特征参数对比显示等，还可提供离线分析功能，进行信号波形回放，采用快速傅里叶变换、小波分析等波形处理分析方法进行信号特征提取及数据查询、报表打印、远程监控等。

监测站针对实时处理器和 FPGA 进行编程，构成了实时系统层和可编程控制层，运行监测站的嵌

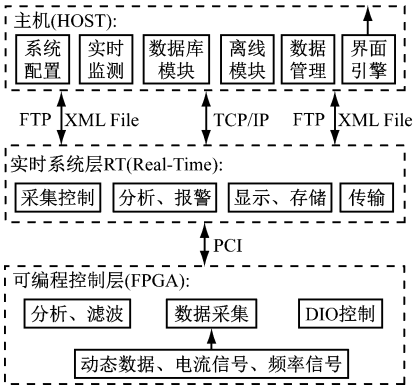

图 3 系统软件构架

Fig. 3 Framework of system software

入式软件。实时处理器主要完成大量数据的采集控制、存储及数据的传输任务。FPGA 主要实现数据采集、计算和控制。FPGA 读取配置信息，按既定逻辑调整数据采集和处理规则。全波形信号及提取的特征参数均将写入实时处理器。由于 FPGA 通过专属硬件来处理逻辑，实现了真正意义上的并行多线程任务处理，相比将采集到的数据在 PC 上编写程序进行软处理，大大提高了处理速度和运行的稳定性，同时，也让实时处理器从繁重的处理任务中释放出来，更高效地去完成数据控制、存储及传输任务，保证了整个系统的稳定性。

系统软件实现的功能如下：

(1) 数据存储功能：包括触发波形数据存储、有效声发射信号特征参数分析结果存储、缓变量数据存储、报警记录存储。

(2) 特征参数分析及预警：提取事件计数、振铃计数、能量、幅值、信号上升时间、信号持续时间、平均信号电平、有效值电压、振铃率、能量率以及声发射波形信号强度等特征参数，用于对动力灾害进行监测与预警。不同的声发射特征参数存在一定的相关性，能量与信号持续时间、信号上升时间的相关性较强，能量和振铃计数指标的变化可准确反映出工作面顶板和煤体的活动性，且能捕捉到煤岩体活动过程中的能量释放。因此，可采用能量和振铃计数这 2 个主要的声发射指标来预测或判识灾前异常信息[17]。声发射特征参数如图 4 所示。

(3) 软件滤噪功能：软件滤噪主要是根据噪声特点，通过滤噪软件滤除噪声，包括通过设置浮动幅值门槛的方法进行噪声的处理和利用噪声的时间特征有效识别噪声。传感器接收的信号经过硬件滤噪后，再通过组合滤噪软件进行处理，剩余的信号属于有效声发射信号，即可进行统计分析。

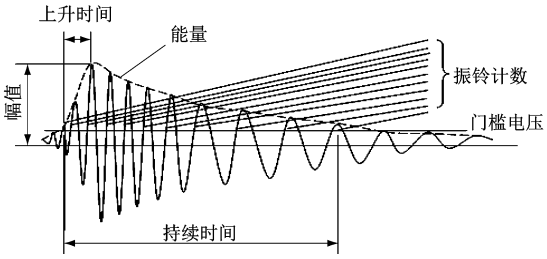

图 4 声发射特征参数

Fig. 4 Schematic diagram of acoustic emission characteristic parameters

5 结语

矿井动力灾害实时在线监测系统基于岩体声发射监测机理，利用传感器技术、嵌入式系统控制技术、FPGA 可编程模块技术，实现了数据的多通道并行高速实时采集，具有数据存储、特征参数同时提取、报警、分析等功能。目前，该系统已在重庆、贵州、河南、安徽等省市的多个煤矿应用。应用结果表明，该系统能够实现对矿井动力灾害全过程的连续动态监测和预警。

参考文献(References)：

[1] 贺虎，窦林名，巩思园，等. 冲击地压的声发射监测研究[J]. 岩土力学，2011，32(4)：1262-1264.
HE Hu，DOU Linming，GONG Siyuan，et al. Study of acoustic emission monitoring technology for rockburst [J]. Rock and Soil Mechanics，2011，32(4)：1262-1264.

[2] 李晖，周澎，薛再君，等. 华亭煤矿冲击矿压综合防治技术研究与应用[J]. 煤矿开采，2009，14(3)：90-92.
LI Hui，ZHOU Peng，XUE Zaijun，et al. Comprehensive prevention technology for rock-burst and application in Huating Colliery[J]. Coal mining Technology，2009，14(3)：90-92.

[3] 张瑞玺. 开滦矿区深部煤层冲击地压监测与防治体系研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2015：4-84.

[4] 高保彬，李回贵，李化敏，等. 声发射/微震监测煤岩瓦斯复合动力灾害的研究现状[J]. 地球物理学进展，2014(2)：689-697.
GAO Baobin，LI Huigui，LI Huamin，et al. Current situation of the study on acoustic emission and microseismic monitoring of coupling dynamic catastrophe for gas-filled coal-rock[J]. Progress in Geophysics，2014(2)：689-697.

[5] 王小朋. 声发射技术在压力容器无损检测中的应用[J]. 现代制造技术与装备，2017(12)：164-165.

WANG Xiaopeng. Application of acoustic emission technology in nondestructive testing of pressure vessels[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment,2017(12):164-165.

[6] 张洋,李占金,李士波,等.声发射技术在地压监测中的应用[J].工矿自动化,2013,39(6):10-12.
ZHANG Yang, LI Zhanjin, LI Shibo, et al. Application of acoustic emission technology in monitoring of underground pressure[J]. Industry and Mine Automation ,2013,39(6):10-12.

[7] 孙振国,李明宝,陈冲,等.声发射技术在工程土体中的应用[J].科技创新与应用,2017(25):149-151.

[8] 文光才,李建功,邹银辉,等.矿井煤岩动力灾害声发射监测适用条件初探[J].煤炭学报,2011,36(2):278-282.
WEN Guangcai, LI Jiangong, ZOU Yinhui, et al. Preliminarily study on the application conditions of acoustic emission monitoring dynamic disaster in coal and rock[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2):278-282.

[9] 邹银辉.煤岩声发射机理初探[J].矿业安全与环保,2004,31(1):31-33.
ZOU Yinhui. Preliminary study on coal and rock acoustic emission mechanism and relevant experiments[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2004,31(1):31-33.

[10] 肖栋,贾慧霖,李忠辉,等.电磁辐射与声发射矿井综合信息采集系统设计[J].煤炭科学技术,2009,37(4):82-84.
XIAO Dong,JIA Huilin,LI Zhonghui,et al. Design on comprehensive information acquisition system of electromagnetic radiation and acoustic emission[J]. Coal Science and Technology,2009,37(4):82-84.

[11] 郑琪.基于 Hadoop 云平台的煤矿动力灾害监测系统的研究与实现[D].北京:中国矿业大学(北京),2016:47-59.

[12] 杨慧明.煤岩动力灾害声发射预警判识方法的研究现状及趋势[J].矿业安全与环保,2015,42(4):91-95.
YANG Huiming. Current research status and development trend of AE identification method for early warning of coal and rock dynamic disaster[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(4):91-95.

[13] 郭建伟.煤矿复合动力灾害危险性评价与监测预警技术[D].北京:中国矿业大学(北京),2013:9-95.

[14] 张永将.深部矿井煤岩瓦斯动力灾害鉴定[J].能源技术与管理,2014,39(4):1-3.

[15] 赵旭生.声发射监测井下动力灾害的噪声处理方法[J].煤炭科学技术,2005,33(3):51-55.
ZHAO Xusheng. Noise processing method for underground dynamic disaster with sound transmitting monitoring and measuring [J]. Coal Science and Technology,2005,33(3):51-55.

[16] 李柏均.CompactRIO 嵌入式产品井下高速信号采集处理应用[J].自动化与仪器仪表,2015(7):74-76.
LI Baijun. Application of high speed signal acquisition and processing in CompactRIO embedded products [J]. Automation & Instrumentation,2015(7):74-76.

[17] 胡杰,李建功,隆清明,等.基于 R 型聚类分析的声发射特征参数指标相关性研究[J].矿业安全与环保,2015,42(4):52-55.
HU Jie, LI Jiangong, LONG Qingming, et al. Research on relevance of acoustic emission characteristic parameters based on R-type clustering analysis [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2015,42(4):52-55.