

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.03.011

爆破振动危害智能监测系统研究进展^{*}

钟明寿^① 谢全民^② 刘 影^① 潘鲁萍^② 谢兴博^①

①解放军理工大学(江苏南京,210007)

②武汉军械士官学校(湖北武汉,430075)

[摘 要] 随着互联网的发展,国内外在爆破振动监测技术研究领域取得了突破性的发展。近年来,数字爆破测振已成为了工程爆破领域内的研究热点。对国内外工程爆破振动危害远程监测系统的研究进展进行了综述;在分析讨论该领域阶段性研究成果的基础上,提出下一步爆破振动远程智能监测系统研究的合理化建议,为促进数字爆破的发展提供参考。

[关键词] 数字爆破;爆破振动;数字爆破测振

[分类号] TD235.1⁺4

Research Progress of Intelligent Monitoring System for Blasting Vibration Damage

ZHONG Mingshou^①, XIE Quanmin^②, LIU Ying^①, PAN Luping^②, XIE Xingbo^①

①University of Science & Technology of PLA (Jiangsu Nanjing, 210007)

②Wuhan Ordnance N. C. O. Academy of PLA (Hubei Wuhan, 430075)

[ABSTRACT] With the development of internet, a breakthrough of research progress can be observed in digital blasting vibration measurement. In recent years, the research on digital blasting vibration measurement has become a hotspot in the field of engineering blasting. Research progress in hazard remote monitoring technology and platform of domestic engineering vibration was summarized. Based on the analysis of current digital blasting vibration measurement, reasonable suggestions for the research of remote intelligent monitoring system for blasting vibration were proposed. These results could provide references for promoting the development of digital blasting.

[KEYWORDS] digital blasting; blasting vibration; digital blasting vibration measurement

引言

工程爆破中,减小和控制爆破振动对爆破安全具有重要意义。爆破测振技术和手段研究是控制爆破振动危害的基础和前提^[1-13]。

目前,国内爆破企业采用的测振设备种类、型号繁多,且部分设备出厂后未进行定期校准,工程爆破领域中缺乏统一的测振标准和规范,各企业中从事爆破振动测试及数据分析的技术人员水平参差不齐。上述问题的客观存在,造成了爆破测振数据的可比性、共享性差^[14],也制约了工程爆破向数字化、精细化方向的发展。

近年来,随着计算机、互联网、通信及传感器技术的快速发展,现代测试系统逐渐以计算机和信息处理技术为核心,向智能化方向发展^[15-17]。因此,在当前数字爆破的热点研究领域中,将爆破安全与信息技术研究进行有效融合,构建爆破振动危害效应的远程监测系统成为可能^[18]。许多科研工作者及爆破技术人员在爆破振动智能监测及数据分析方面已做了大量有意义的探索和尝试^[19-20]。

1 国外爆破振动危害智能监测系统

随着数字技术、互联网技术、大数据、云计算、物联网等技术的发展,现在测振仪向数字化、网络化、

^{*} 收稿日期:2016-11-03
基金项目:国家自然科学基金项目(51304218);国家自然科学基金项目(51508569);江苏省自然科学基金面上项目(BK20151449)
作者简介:钟明寿(1983-),男,博士,讲师,从事爆破器材理论及应用研究。E-mail:zhongmingshou@sina.com
通信作者:谢全民(1983-),男,博士,讲师,从事弹药工程及工程爆破研究。E-mail:13797006996@139.com

便携式、多功能等方向发展,如加拿大 Instantel 公司生产的 Blastmate III 型振动检测仪。在该型测振仪基础上,加拿大又研制了 Minimate 型振动和过压监测仪。Minimate PR04 可以连接 1 个 ISEE 标准或 DIN 标准三向检波器和 1 个 ISEE 标准线性麦克风。在美国,EG & G 公司研制了 Strataview TM 型高分辨率振动仪;怀特地震工业公司生产了 Mini-Seis 测振仪^[14]。Mini-Seis 测振仪具有 1 个声通道和 3 个爆破振动信号通道,最多可储存 341 个记录,可测得最低振动速度值为 0.3 mm/s。

2 国内爆破振动危害智能监测系统

2.1 长科院的基于物联网的爆破振动无线监测系统

长江科学院 2012 年基于物联网及无线网络技术研制的无线爆破振动监测系统^[21-22],如图 1 所示。该系统主要由检波器、爆破记录仪、中央服务器和终端监测管理系统组成。其中,爆破记录仪包含了无线传输、无线射频识别(RFID)、全球定位系统(GPS)等功能,能够对检波器采集得到的多路信号进行并行收集和数据分析处理。

在工程爆破振动测试中,由检波器将采集到的质点振动信号转换为电信号,并经数据线传输至爆破记录仪。实测数据经爆破记录仪中的无线模块传输至中央服务器后进行统一管理和存储。用户通过互联网登录终端监测管理系统,即可获取到爆破现

场的振动实测数据^[22]。

2.2 中科测控的爆破振动测振仪

2011 年 6 月,中科测控研制了 TC-4850 低频宽带爆破测振仪。在数千千米的井下、矿山、隧道等无人值守的恶劣现场,该型测振仪能够自动将测试数据经 WiFi 或直接搭载手机信号登录互联网,实现对仪器远程遥感、遥测、遥控和高速网络数据的可靠传输^[14]。

2.3 铁科院的爆破振动远程监测系统

铁科院 2012 年提出了基于 TC-4850N 无线网络测振仪的远程爆破振动监测系统^[23]。该系统由速度传感器、TC-4850N 无线网络测振仪及专用数据服务器等组成,通过内置的 3G 网络设备可将采集到的实测数据上传至专用的大型服务器内。对于井下或隧道深处等无手机信号的地方,先经内置的 WiFi 模块将数据上传至有 3G 信号的地方,再通过专用的 VPN 通道传输,确保数据的安全性。用户通过开发的配套软件,可读取现场测试数据^[24]。该设备还可以远程控制仪器进行远程开关机、参数设置等,可用于井下或地铁开挖工程等爆破振动监测项目。

系统示意图如图 2 所示。

2.4 华南理工大学的爆破测振信息管理系统

2011 年,华南理工大学研究开发了爆破振动信号特征捕捉性采集技术,将现有的爆破测振机理、测振数据资源和各种测振仪器与计算机领域的网格技术、并行计算技术有效融合,研发了远程智能化监测系统^[15-19]。该系统包含测振数据中心、测振网格及

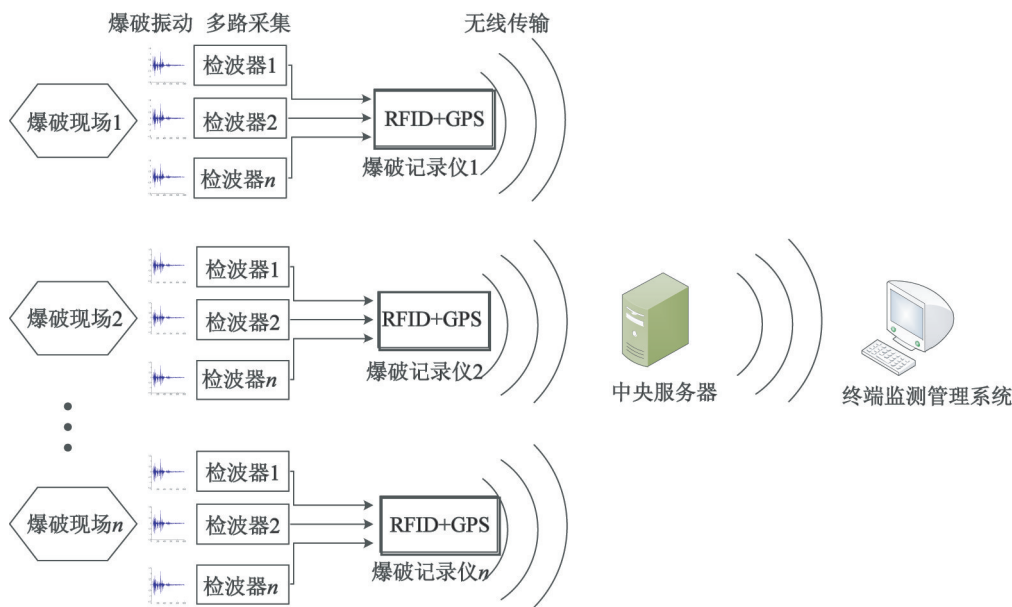


图 1 无线监测系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wireless monitoring system

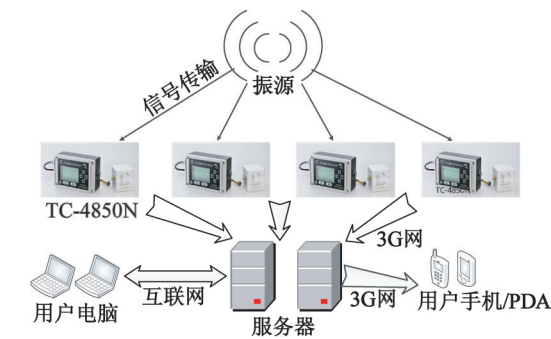


图2 爆破振动远程监测系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of remote monitoring system for blasting vibration

数字爆破档案馆等。其中,测振数据中心接收并储存传感器采集到的现场振动测试数据及测振网格的数据处理结果;测振网格负责并行地处理测振得到的海量数据;数字爆破档案馆主要用于储存现场测振信息及企业的数字设备信息。该测振平台还提供了数字档案馆的门户网站、端口软件系统及专家软件系统。

管理系统的操作界面和体系架构分别如图3、图4所示。

2.5 解放军理工大学的爆破振动预报与控制平台

2010年,解放军理工大学工程兵工程学院建立了一种爆破振动预报与控制平台。该平台包含工程信息采集功能、重要度分析功能、预报模型功能、信号分析功能、模态分析功能等5个模块,可用于军事工程、交通(铁路、地铁、隧道)、水利、核电、矿山等工程爆破施工的振动安全控制^[25]。

该平台中大量采用了数字信号分析领域中的新算法。如,在重要度分析模块中采用了灰色关联法及粗糙集改进算法,分析主要的爆源参数对爆破振动参量的重要度;预报模型模块中采用了基于萨道夫斯基公式的拟合算法及支持向量机改进算法,实

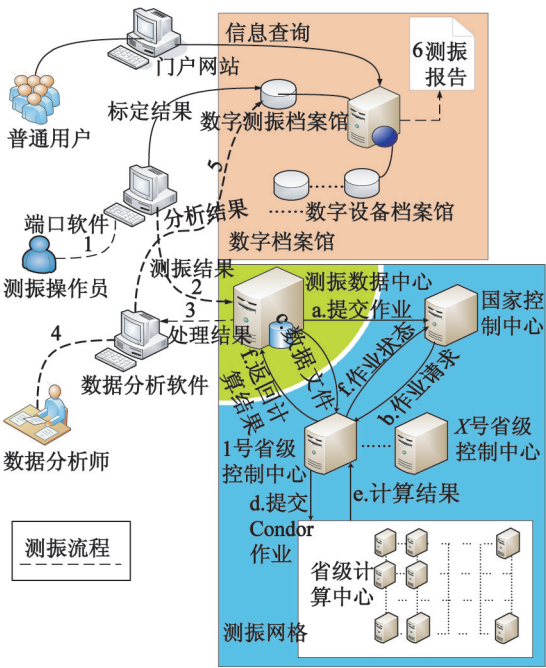


图4 爆破测振信息管理系统体系架构

Fig.4 Architecture of information management system for blasting vibration

现对爆破振动强度、主频和持续时间的预报;信号分析模块中采用了HHT^[26]、FFT等实现对爆破振动测试信号的时频特征的全面分析。该平台中所引入的丰富多样的数字信号分析算法^[27-28],有助于更加精确、完整地提取爆破振动测试信号中蕴含的丰富的细节特征信息,同时为爆破振动智能监测系统的构建提供了核心技术支撑。平台的电脑操作界面如图5。



图5 爆破振动预报与控制平台操作界面

Fig.5 Operation interface of prediction and control platform for blasting vibration

2.6 中爆数字的工程爆破振动远程测振系统

广州中爆数字信息科技股份有限公司依托中国爆破网构建了工程爆破远程测振系统^[29-30]。该系统包含了工程爆破企业信息和测振仪器设备备案管



图3 爆破测振信息管理系统界面

Fig.3 Operation interface of information management system for blasting vibration

理、测振任务信息管理、测振数据分析、振速预测、安全评估预测、测振报告管理和编写、各种信息查询等多个功能模块。

图 6 为该系统的网络拓扑图。远程测振系统采用经典的傅里叶算法对测振数据进行幅频特性分析、功率谱分析、时频能量特征分析及矢量合成。在数据分析功能选择界面(图 7),用户可根据需要选择对应功能模块进行相应数据的自动分析。该系统可读取上传至测振中心的当前国内外主要测振仪的测试数据,并将不同企业测振数据格式转换为统一的数据格式^[14]。

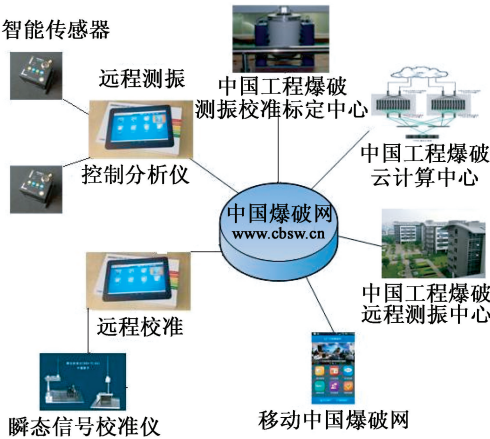


图 6 远程测振系统网络拓扑图

Fig. 6 Network topology of the remote vibrometer system

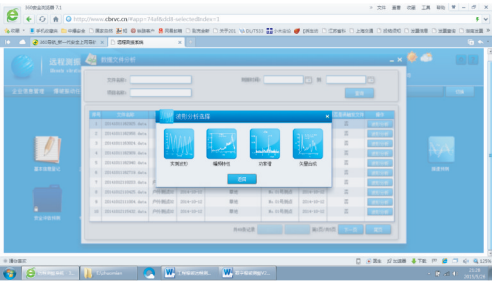


图 7 数据分析功能选择界面

Fig. 7 Selection interface of data analysis

2.7 托普测控的工程爆破 3G 遥测云系统

托普测控科技有限公司基于 3G、Internet 等现代通讯技术和数据传输网络,利用该公司近年来研发的新一代智能爆破测振仪 Nubox-6016、Nubox-8016,同工业级 3G 网关等一起构建了基于 3G 无线网络的工程爆破遥测系统,面向用户提供了一个城际或省际间较为全面的多点工程爆破振动 3G 遥测解决方案及云端数据管理基础服务。用户可足不出户,在办公室远程查看爆破现场的振动测试数据。

图 8 为该系统示意图。

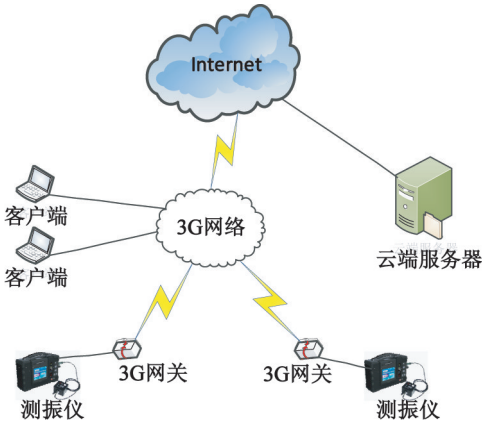


图 8 工程爆破遥测系统示意图

Fig. 8 Telemetry system for blasting engineering

2.8 成都泰测的 Blast-Net 型爆破测振仪

成都泰测科技有限公司自主研发了 Blast 系列爆破测振仪。目前,该产品拥有 S、Um、Net 3 种型号,可满足不同用户的测振需求。其中,Blast-Net 型爆破测振仪支持 LAN/WAN/ADSL 有线网络接入、GPRS/CDMA 无线网络接入和第三代移动通讯 TDSCDMA、WCDMA、CDMA2000、HSDPA 网络接入。用户可以通过计算机、ipad、手机等接入指定的云服务器,读取爆破振动测试结果。

图 9 为 Blast-Net 型爆破测振系统示意图。



图 9 Blast-Net 型爆破测振系统示意图

Fig. 9 Blast-Net blasting vibration measurement system

2.9 西南交通大学的 L20 型爆破测振仪

2008 年起,西南交通大学岩土创新团队在国内率先研发、生产了 L20 型全自动爆破测振仪(图 10)。L20 型爆破测振仪支持无线通讯功能,其内置的 WiFi 装置与计算机形成局域网,操作者在远离爆破现场处通过终端软件远程控制仪器和读取数据,实时监控系统的工作状态。可实现无人值守,连续、远程、实时监测振动,大幅降低了测试工作的难度和强度。

3 比较与讨论

2009 年初,中国工程爆破协会在工程爆破行业

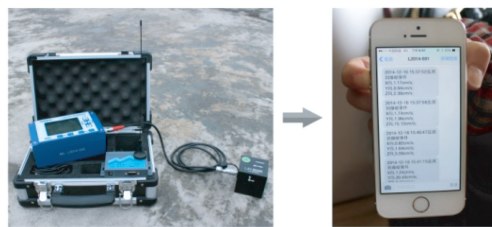


图 10 L20 型爆破测振仪

Fig. 10 L20 blasting vibration measuring instrument

“十二五”发展规划中提出了“数字爆破”发展理念^[31-32],对爆破测振研究工作提出了“数字测振”的新要求。在 GB6722—2014 爆破安全规程中也明确提出对 D 级以上爆破工程须进行爆破振动危害效应的测试,且测试结果需输入中国爆破网信息系统长期保存。因此,基于数字化、信息化技术条件下的工程爆破测振及数据分析处理面临许多新的亟待解决的关键技术问题^[30]。

至今,工程爆破行业尚未建立适用于爆破振动测试工作的技术规范。不同单位选用的测振系统可能不同,传感器现场设置方式不尽相同,测试数据的后期处理方法各异,最终得到的测振报告内容及格式也五花八门。为改善当前现状,工程爆破领域内涌现出上述多家具有代表性的单位,它们基于“数字爆破”、“数字测振”理念率先开展了工程爆破振动危害远程智能监测系统的研发工作,取得的研究成果正逐步在工程爆破行业内推广应用。

从一体化设计方面进行分析:长科院率先将 RFID、GPS 引入到爆破记录仪中^[22]。中爆公司的网络测振仪采用了传感器与记录仪一体化设计。

从测振数据传输方式分析:TC-4850N、长科院的爆破振动无线监测系统、铁科院的爆破振动远程监测系统、托普测控的工程爆破 3G 遥测云系统、西南交大的 L20 型爆破测振仪等爆破振动危害智能监测系统均基于内置的 3G 模块或 3G 网络设备,实现测振数据由数据采集仪上传至专用的服务器中。成都泰测的 Blast-Net 型爆破测振仪搭配了三网通的 4G 模块,实现了测试数据的更高速传输。

从测振系统数字化先进性方面分析:华南理工大学开发的爆破测振信息管理系统,将爆破记录仪采集到的爆破振动数据传输至专用服务器,并且充分考虑到面向工程爆破行业的数字测振系统需要解决的海量数据分析问题,引入的测振网格技术较好地解决了测振数据高速储存、并行计算和智能处理等关键技术问题,在数字化方面较其他单位的研究成果取得了明显的进步^[16]。广州中爆数字信息科

技股份有限公司开发了中爆网络测振仪;振动传感器在现场设置简单,无线组网,方便快捷;建立的工程爆破远程测振系统,能够实现对工程爆破振动的远程采集、数据存储、智能检索、数据特征深度挖掘等功能,且数据对外提供查询和下载服务,能够有力地促进工程爆破理论研究的进步,同时对工程爆破行业向数字化、精细化方向发展也奠定了良好的基础。比较而言,广州中爆数字信息科技股份有限公司开发的远程测振系统比华南理工大学开发的爆破测振信息管理系统在数据压缩算法和传输效率上具有更明显的优势。

从测振数据分析算法方面分析:解放军理工大学开发了爆破振动预报与控制平台,将近年来数字信号分析领域中的 HHT、FFT 等时频分析新算法引入到工程爆破振动信号特征分析中来,在爆破振动信号分析手段方面起到了引领示范作用。在爆破振动预报方面采用支持向量机改进算法^[28],可同时实现对爆破振动强度、主频和持续时间 3 要素的预报,且精度已满足工程应用要求。另外,其模态分析功能能够针对不同的建(构)筑物计算出固有频率及阻尼比。上述两项功能的开发,对爆破振动预报及控制起到重要的作用,具有工程推广应用价值。广州中爆数字信息科技股份有限公司开发的远程测振系统也将第二代提升小波算法引入到爆破振动测试数据分析中,提高了测试数据特征分析的精度。相比较而言,国内其他企业研制开发的测振系统在爆破振动预报方面仅停留在萨道夫斯基公式方面;在数据分析算法方面大多仍停留于快速傅里叶变换。

综上所述,随着传感器技术^[33-34]、计算机技术^[35-36]、互联网技术^[37-38]、数字信号分析技术^[39-50]等相关学科的飞速发展,数字爆破测振研究工作在近年来已取得了突飞猛进的进步。

4 结论与展望

下一步,数字爆破测振工作必将向着更为规范、精细、科学、智能的方向发展。为提高爆破振动危害远程智能监测系统的应用范围,增强实用性,建议今后爆破振动危害远程智能监测产品研发及系统升级等过程中关注:

1) 广泛融入数字信号分析新算法。传统算法的分析精度和功能,已不能满足爆破测振信号分析过程中精细化、数字化等要求。因此,建议在新研发的智能监测系统或现有测振产品升级过程中引入适合爆破振动信号预处理、特征提取、数据挖掘的数字

信号分析方法,丰富系统中爆破振动测试信号的信号分析功能,为爆破振动危害效应控制提供更有效、精确的数据基础。

2) 测振数据特征的深度挖掘。工程爆破振动现场测试信号中蕴含着关于爆源结构、传播场地介质特征、结构动态响应等丰富的特征信息,需要更多的科研工作者基于爆破振动智能监测系统获取到的海量测振数据,进一步深入研究数据特征的挖掘算法,从爆破测振数据中获取更多有效信息。

3) 数据采集仪、传感器等的精度将直接影响测试数据的精度,爆破振动监测设备的定期校核对测振数据的准确性具有重要意义,应尽快在全国工程爆破行业内建立定期标定或校核的相关机制和技术手段。

4) 测振数据共享性应进一步加强。工程爆破测振行业内的相关资料及数据应进一步加强数字化,充分发挥大数据技术优势,提高测振数据的共享性,更好地为工程爆破技术及相关科研工作服务。

参 考 文 献

- [1] 谢全民,龙源,钟明寿,等. 小波包与分形组合技术在爆破振动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2011,30(1):11-15.
XIE Q M, LONG Y, ZHONG M S, et al. Application of wavelet packet and fractal combination technology in blasting vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(1):11-15.
- [2] GHOSH A, DAEMEN J J K. A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws) [C]// 24th U. S. Symposium on Rock Mechanics. Texas, 1983.
- [3] 龙源,冯长根,徐全军,等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. 工程爆破, 2000, 6(3):1-7.
LONG Y, FENG C G, XU Q J, et al. Study on propagation characteristics of blasting seismic waves in a rock medium and numerical calculation [J]. Engineering Blasting, 2000,6(3):1-7.
- [4] 张雪亮,黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京:地震出版社, 1981.
- [5] 林大超,施惠基,白春华,等. 爆炸地震效应的时频分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1):31-36.
LIN D C, SHI H J, BAI C H, et al. Time-frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1):31-36.
- [6] 李洪涛,舒大强. 爆破震动衰减规律的影响因素[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(1):79-82.
- LI H T, SHU D Q. Influential factors analysis of blasting vibration attenuation law[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(1):79-82.
- [7] 徐全军,毛致远,吴腾芳. 爆破震动预报与控制综述[J]. 爆破器材, 1997, 26(1):29-31.
XU Q J, MAO Z Y, WU T F. A review of prediction and control of ground vibration from blasting[J]. Explosive Materials, 1997, 26(1):29-31.
- [8] 马建军,程良奎,蔡路军. 爆破应力波的传播及其远区破坏效应研究现状述评[J]. 爆破, 2005, 22(2):17-21,26.
MA J J, CHENG L K, CAI L J. Present situation of research on propagation of blasting stress wave and rock fragmentation on effect in remote area [J]. Blasting, 2005,22(2):17-21,26.
- [9] 张永哲. 爆破地震波传播特性研究[J]. 爆破, 2000, 17(增刊):6-10.
ZHANG Y Z. Study on propagation characteristics of explosive seismic wave[J]. Blasting, 2000, 17(Suppl. 1):6-10.
- [10] 中国生,徐国元,熊正明. 基于小波变换的爆破地震信号能量分析法的应用研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3):222-227.
ZHONG G S, XU G Y, XIONG Z M. Application research of the energy analysis method for blasting seismic signals based on wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(3):222-227.
- [11] 中国生,熊正明. 基于小波包能量谱的建(构)筑物爆破地震安全评估[J]. 岩土力学, 2010, 31(5):1522-1528.
ZHONG G S, XIONG Z M. Safety assessment of structure by blasting seismic based on wavelet packet energy spectra[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5):1522-1528.
- [12] 谢全民,龙源,钟明寿,等. SGWT 在爆破振动信号信噪分离中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1):24-28,43.
XIE Q M, LONG Y, ZHONG M S, et al. Application of SGWT in separation of noises from a blast vibration signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(1):24-28,43.
- [13] 谢全民,龙源,田作威,等. 爆破振动信号时频特征的三维分形特性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12):118-121,125,242.
XIE Q M, LONG Y, TIAN Z W, et al. Three-dimensional fractal study on time frequency characteristics of blast vibration signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(12):118-121,125,242.
- [14] 曲广建. 数字爆破测振[M]. 北京:兵器工业出版社,

- 2015.
- QU G J. Digital blasting vibration [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2015.
- [15] GAO Y, LIU G Y, HUANG J C. A new method of file transfer in computational grid using P2P technique [C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Network Computing and Information Security, 2011, 1:332-336.
- [16] GAO Y, LIU G Y, MA Y L, et al. A design of remote calibration and vibration measurement platform based on the grid technology [J]. Procedia Engineering, 2011, 15:2912-2916.
- [17] GAO Y, LIU G Y, HUANG J C, et al. A research of critical technology of vibration measurement grid [J]. Procedia Engineering, 2011, 15:2917-2921.
- [18] 吴新霞,程西江,赵根,等. 爆破有害效应监测公共信息分级管理系统[J]. 爆破, 2013, 30(2):12-15.
- WU X X, CHENG X J, ZHAO G, et al. Public information classification management system of blasting harmful effects monitoring [J]. Blasting, 2013, 30(2):12-15.
- [19] 刘冠尧. 基于网格的远程测振系统的设计及其关键技术的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
- LIU G Y. A design of remote calibration and vibration measurement platform based on the grid technology and a research of related critical technology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [20] 周儒军. 基于Hadoop的分布式监控平台的研究与实现[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- ZHOU R J. The research and implementaion of distributed monitoring platform based on Hadoop [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [21] 张慧,黄跃文,罗熠. 工程爆破振动无线网络化记录仪设计[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3):72-75.
- ZHANG H, HUANG Y W, LUO Y. Design of engineering blasting vibration recorder based on wireless network technology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(3):72-75.
- [22] 黄跃文,吴新霞,张慧,等. 基于物联网的爆破振动无线监测系统[J]. 工程爆破, 2012, 18(1):67-70, 74.
- HUANG Y W, WU X X, ZHANG H, et al. Wireless net-work monitoring system of blasting vibration based on internet of things [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(1):67-70, 74.
- [23] 杨年华,薛里,林世雄. 爆破振动远程监测系统及应用[J]. 工程爆破, 2012, 18(1):71-74.
- YANG N H, XUE L, LIN S X. Blasting vibration remote monitoring system and its application [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(1):71-74.
- [24] 杨年华,林世雄. 爆破振动测试技术探讨[J]. 爆破, 2000, 17(3):90-92.
- YANG N H, LIN S X. Investigation on blasting vibration testing technique [J]. Blasting, 2000, 17(3):90-92.
- [25] 陆凡东. 爆破地震效应智能预报与监测技术的应用研究[D]. 南京:解放军理工大学, 2011.
- LU F D. Application research on intelligent prediction and monitoring technology of blasting seismic effect [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2011.
- [26] 陆凡东,陈勇,方向,等. 基于HHT方法的石方爆破噪声特性分析[J]. 爆破器材, 2007, 36(2):21-24.
- LU F D, CHEN Y, FANG X, et al. Analysis of rocky demolition noise characteristics based on HHT method [J]. Explosive Materials, 2007, 36(2):21-24.
- [27] 陆凡东,方向,沈蔚,等. 基于微粒优化支持向量机的爆破振动强度预报及应用研究[J]. 工程爆破, 2009, 15(3):22-24, 39.
- LU F D, FANG X, SHEN W, et al. Prediction and application of blasting vibration intensity based on support vector machine with particle swarm optimization algorithm [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(3):22-24, 39.
- [28] 丁凯,方向,陆凡东,等. 基于支持向量机的振动加速度峰值预测模型[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(4):38-41, 47.
- DING K, FANG X, LU F D, et al. Forecasting model of blasting vibration acceleration peak-value based on SVM [J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(4):38-41, 47.
- [29] 曲广建,谢全民,朱振海,等. 工程爆破远程测振系统[J]. 工程爆破, 2015, 21(5):58-62.
- QU G J, XIE Q M, ZHU Z H, et al. Remote vibration measuring system of engineering blasting [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(5):58-62.
- [30] 谢全民,曲广建,钟明寿,等. 提升小波包变换技术在工程爆破远程测振系统中的应用研究[J]. 爆破, 2015, 32(3):17-21, 30.
- XIE Q M, QU G J, ZHONG M S, et al. Research on application of lifting wavelet packet transformation in remote measurement system for blasting engineering [J]. Blasting, 2015, 32(3):17-21, 30.
- [31] 曲广建,黄新法,江滨,等. 数字爆破(I) [J]. 工程爆破, 2009, 15(2):23-28.
- QU G J, HUANG X F, JIANG B, et al. Digital blasting engineering (I) [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(2):23-28.
- [32] 曲广建,黄新法,江滨,等. 数字爆破(II) [J]. 工程爆破, 2009, 15(3):5-13.

- QU G J, HUANG X F, JIANG B, et al. Digital blasting engineering (II) [J]. Engineering Blasting, 2009, 15 (3) : 5-13.
- [33] 刘昌勇, 米高扬, 胡南生. 无线传感器网络若干关键技术[J]. 通讯世界, 2016(8) : 23.
- [34] 刘建顺, 赵岚光, 郭全. 无线传感器网络关键技术浅析[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(28) : 56.
- [35] 魏学品. 计算机远程网络通讯技术探析[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(12) : 45-46.
- [36] 徐晓. 有关简析计算机远程网络通讯技术的具体应用初探[J]. 电脑知识与技术, 2014, 10(31) : 7295-7297.
- [37] 闵栋. 移动互联网产业进展与发展趋势[J]. 现代电信科技, 2013(1/2) : 22-26.
- [38] 龙兴国. 互联网技术发展现状与前景[J]. 通讯世界, 2015(19) : 7-8.
- [39] 刘明亮, 朱江淼. 数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10) : 1041-1046.
- LIU M L, ZHU J M. Investigation in influence of digital signal processing to electronic measurnment and instrument[J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2014, 28(10) : 1041-1046.
- [40] 邢文. 数字信号处理中的前沿技术分析[J]. 炼油与化工, 2015, 26(6) : 4-6.
- XING W. Analysis on cutting-edge technology in digital signal processing[J]. Refining and Chemical Industry, 2015, 26(6) : 4-6.
- [41] LI X H, LONG Y, JI C, et al. Study on the vibration effect on operation subway induced by blasting of an adjacent cross tunnel and the reducing vibration techniques[J]. Journal of Vibroengineering, 2013, 15(3) : 1454-1462.
- [42] 李兴华, 龙源, 纪冲, 等. 基于小波包变换的高程差对爆破震动信号影响分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(4) : 44-47, 65.
- LI X H, LONG Y, JI C, et al. Influence of height difference based on wavelet packets transformation on blasting vibration signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(4) : 44-47, 65.
- [43] 路亮, 龙源, 钟明寿, 等. Fast ICA 算法在低信噪比爆破振动信号信噪分离中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(17) : 33-37.
- LU L, LONG Y, ZHONG M S, et al. Separating noise from a blasting vibration signal based on fast ICA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(17) : 33-37.
- [44] 路亮, 龙源, 谢全民, 等. 提升小波包最优基分解算法在爆破振动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5) : 165-169, 186.
- LU L, LONG Y, XIE Q M, et al. Application of lifting wavelet packet decomposing algorithm based on optimal basis in blasting vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(5) : 165-169, 186.
- [45] 李夕兵, 张义平, 刘志祥, 等. 爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6) : 528-535.
- LI X B, ZHANG Y P, LIU Z X, et al. Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6) : 528-535.
- [46] 李洪涛, 卢文波, 舒大强. 小波分析在爆破振动加速度推求中的应用[J]. 爆破器材, 2006, 35(5) : 4-7.
- LI H T, LU W B, SHU D Q. Application of wavelet analysis in calculating blasting vibration acceleration [J]. Explosive Materials, 2006, 35(5) : 4-7.
- [47] 段晨东, 何正嘉. 第 2 代小波变换及其在机电设备状态监测中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7) : 695-698.
- DUAN C D, HE Z J. Second generation wavelet transform and its application to mechanical monitoring[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(7) : 695-698.
- [48] 谢全民, 龙源, 郭涛, 等. SGWP 算法在爆破振动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(18) : 40-45.
- XIE Q M, LONG Y, GUO T, et al. Application of sgwt algorithm in blasting vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(18) : 40-45.
- [49] 史秀志, 薛剑光, 陈寿如. 爆破振动信号双线性变换的二次型时频分析[J]. 振动与冲击, 2008, 27(12) : 131-134, 185.
- SHI X Z, XUE J G, CHEN S R. Quadratic time-frequency distribution analysis of blasting vibration signal based on bilinear transformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(12) : 131-134, 185.
- [50] DAUBECHIES I, SWENLDENS W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 1998, 4(3) : 247-269.