

基于EEMD的爆破振动能量安全分析

饶运章^{1,2}, 王柳¹, 邵亚建¹

1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 赣州 341000

2. 江西理工大学江西省矿业工程重点实验室, 赣州 341000

摘要 针对爆破振动安全标准的缺陷和小波折合能量法存在基函数、分解尺度选择的问题, 基于集成经验模式分解(EEMD)技术, 提出爆破振动折合能量安全评判新方法。对爆破振动波进行EEMD分解, 识别造成破坏的优势IMF分量, 求取其能量和频率, 并结合构筑物固有频率进行折合能量计算, 以此进行安全评判。基于某矿实测爆破振动数据, 计算各信号的折合能量, 综合现场破坏情况, 得出该矿爆破振动波折合能量安全阈值为 1.0×10^{-7} J。

关键词 爆破振动; 集成经验模式分解; 折合能量; 优势分量; 安全阈值

中图分类号 TD235.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.010

Safety analysis of EEMD-based blasting vibration energy

RAO Yunzhang^{1,2}, WANG Liu¹, SHAO Yajian¹

1. School of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

Abstract A new appraisal method for safety of blasting vibration equivalent energy based on EEMD technology is proposed to deal with the safety criterion defects for blasting vibration and choice-making dilemma of mother wavelet and decomposition scales of wavelet packets equivalent energy. To begin with, the blasting vibration wave is EEMD-decomposed and the principal IMF components causing damage is identified. Then, the energy and frequency of principal IMF components are calculated, as well as equivalent energy computation considering the natural frequency of compounds for safety appraisal is conducted. It is deduced that the safety threshold of blasting vibration equivalent energy in the mine is 1.0×10^{-7} J, based on collected blasting vibration field data, calculated equivalent energy of signals, and situation of on-site destruction.

Keywords blasting vibration; ensemble empirical mode decomposition; equivalent energy; advantage components; safety threshold

振动是地下矿山爆破的主要危害之一, 不仅影响采矿正常作业, 严重时还会造成采空区塌陷、顶板冒落, 给生命和财产带来极大危害。因此, 爆破振动安全评判和预测是矿山爆破的重要研究内容^[1]。

目前, 相关研究主要是在监测数据的基础上结合中国现阶段爆破振动安全标准《GB 6722—2003 爆破安全规程》, 以质点最大振速进行安全评判, 或对数据进行处理获取经验公式和构建预测波形进行安全预测^[2-4]。但此类方法仅涉及振速和频率, 没有综合考虑振动位移、持续时间和受震物体动

态响应等信息, 被工程实践证明适用性和准确性受限^[5]。

中国生^[6]、李鹏^[7]和刘敦文等^[8]借助小波包分解的多尺度多分辨特性, 将各频带地震波的能量值和频率相结合形成折合能量作为评判依据, 为爆破振动安全评判提供了新方法。但小波包分解存在基函数和分解尺度的选择问题, 折合能量也非固定值。

集成经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)是Wu等^[9]针对EMD(empirical mode decomposition, EMD)分解易受异常事件干扰产生模态混叠和

收稿日期: 2014-07-13; 修回日期: 2014-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51364010)

作者简介: 饶运章, 教授, 研究方向为采矿工程、爆破工程和环境岩土, 电子信箱: raoyunzhang@sohu.com; 王柳(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为采矿工程和爆破工程, 电子信箱: 798380943@qq.com

引用格式: 饶运章, 王柳, 邵亚建. 基于EEMD的爆破振动能量安全分析[J]. 科技导报, 2015, 33(4): 61-65.

端点震荡等现象,提出利用白噪声频率均匀分布的统计特性,将其混入原始信号中,平滑异常事件,使信号具备均匀分解尺度的方法。爆破振动信号是非平稳信号,易受监测环境和地质条件干扰影响而携带噪声^[10]。而EEMD技术可实现信号拆分和信噪分离,且提取的分量是唯一、独立的,具备真实信号的局部特征意义,使信号分析灵活化和多样化。基于此,本文将EEMD技术与物理学共振原理相结合,提出新的爆破振动能量安全评判方法。

1 EEMD与折合能量

1.1 EEMD原理

与EMD原理相似,EEMD不存在先验基底的选择问题,具有自适应特性,能随信号的变化分解成若干个从高频到低频、彼此之间没有模态混叠的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)^[11,12],即

$$S_i(t) = \sum_{j=1}^n IMF_{j,i}(t) + R_{j,i}(t)$$

式中, $i(i=1, 2, \dots, n)$ 为加入噪声的次数; $t(t=1, 2, \dots, n)$ 为时间采样点; $j(j=1, 2, \dots, n)$ 为IMF分量的次序; $S_i(t)$ 为原始信号 $S(t)$ 加入 i 次噪声后的信号; $R_{j,i}(t)$ 为EEMD分解余量。

由于加入的 i 次噪声是不相关随机序列,其统计均值为零,将各 $IMF_{j,i}(t)$ 分量进行整体平均后,加入的 i 次噪声将相互抵消。那么,真实信号的EEMD分解结果 $IMF_j(t)$ 为

$$IMF_j(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n IMF_{j,i}(t)$$

则原始信号 $S(t)$ 分解为

$$S(t) = IMF_1(t) + IMF_2(t) + \dots + IMF_f(t) + R_f(t)$$

1.2 EEMD折合能量算法

EEMD分解结果为一系列按频率高低排列的IMF分量,而物理学相关理论表明,爆破振动波主震频率越接近构筑物的固有频率,越容易产生共振效应,加大爆破振动危害^[13,14]。因此,类似小波包折合能量原理,在求得各IMF分量的能量 $E(j)$ 和频率 $f(j)$ 后,结合受震构筑物的固有频率 f ,定义 $\Delta f(j) = |f(j) - f|$,则 $\frac{1}{\Delta f(j)}$ 可视为受震物体的动力响应系数 $\omega(j)$,将 $\omega(j)$ 归一化便是各IMF分量对应的折合权重 $\varepsilon(j)$,EEMD折合能量 E_s 可表示为 $E_s = \sum_{j=1}^n \varepsilon(j)E(j)$ 。EEMD折合能量综合考虑了爆破振动持续时间、频率、质点速度幅值和受震构筑物的动力响应等信息,更适合作为安全评判标准。

2 基于Matlab的信号分析

2.1 信号分解

图1是某矿地表4栋民房实测爆破振动波形图,以民房1的信号 S_1 为例,进行EEMD分解。信号经EEMD分解后,获得11个IMF分量和余量 R (图2),各IMF分量不存在端点震荡和模态混叠现象。

2.2 折合能量

依据巴什瓦(Parseval)定理^[15],各IMF分量携带的能量 $E(j) = \sum_{j=1}^n |IMF_j(t)|^2$,即采样点速度幅值的平方在时间采样坐标轴积分;依据Fourier变换原理^[16],各IMF分量可由时域转化成频域,求取主震频率(图3);如果假定构筑物的固有频率为5 Hz,便可求得爆破振动波的折合能量(表1),折合总能量为 5.53×10^{-8} J。

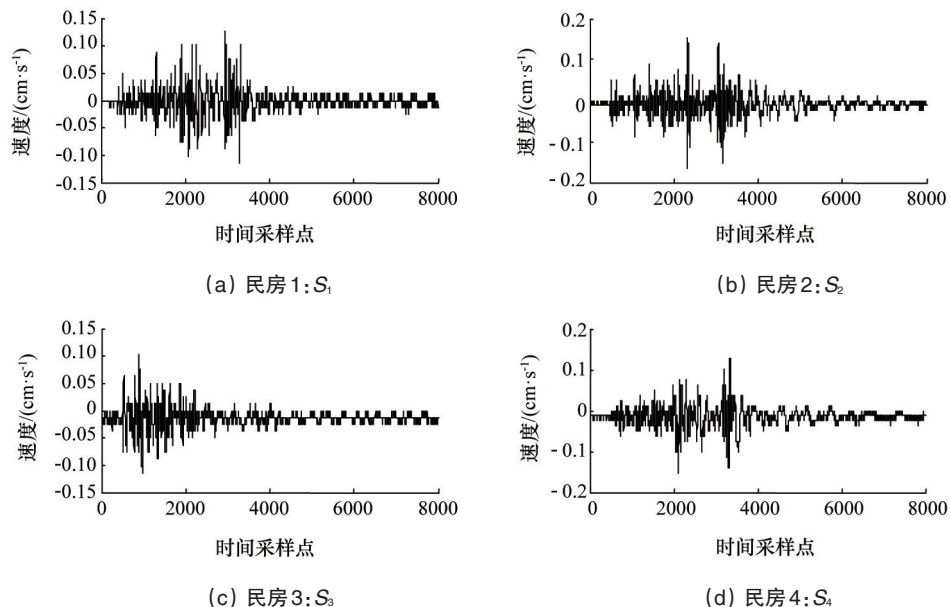
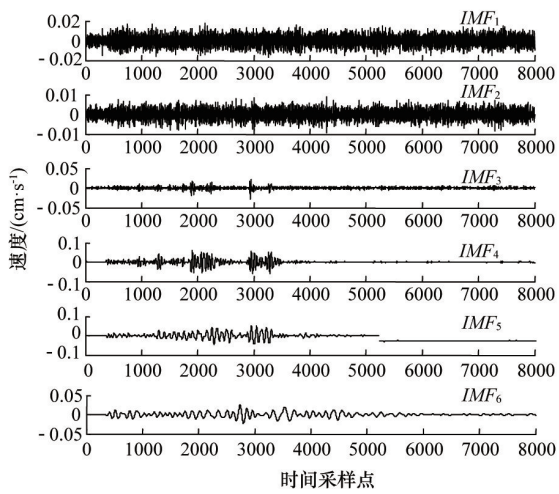
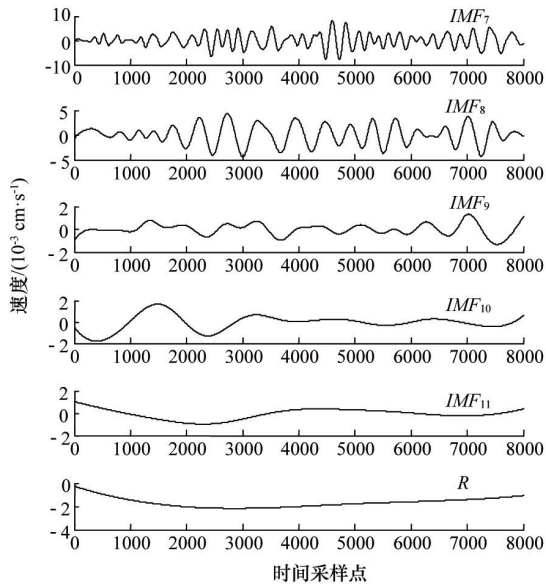


图1 爆破振动波形

Fig. 1 Blasting vibration waveform



(a) $IMF_1 \sim IMF_6$



(b) $IMF_7 \sim IMF_{11}, R$

图2 EEMD分解

Fig. 2 EEMD decomposition

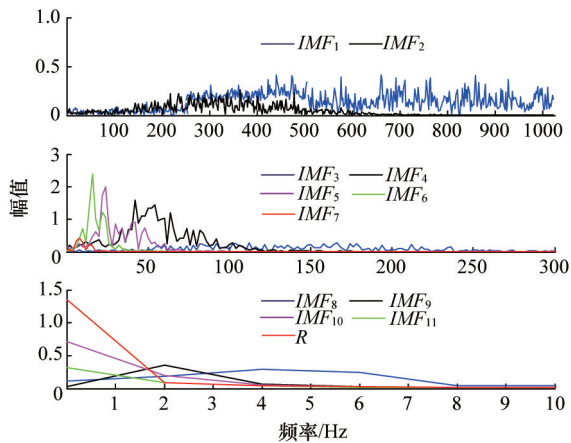


图3 频谱

Fig. 3 Frequency spectrum

表1 折合能量 S_i

Table 1 Equivalent energy of S_i

分量	速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	能量/ 10^{-6}J	主震频 率/Hz	频率 差/Hz	响应系 数 ω	权重 ε	折合分能 量/ 10^{-6}J
IMF_1	0.0188	0.1829	704	699	0.0014	0.0006	0.0001
IMF_2	0.0097	0.0455	340	335	0.003	0.0012	0.0001
IMF_3	0.0284	0.0639	92	87	0.0115	0.0047	0.0003
IMF_4	0.0636	0.9672	54	49	0.0204	0.0084	0.0081
IMF_5	0.0515	0.8603	24	19	0.0526	0.0216	0.0186
IMF_6	0.0226	0.2440	16	11	0.0909	0.0373	0.0091
IMF_7	0.0087	0.0647	10	5	0.2	0.0821	0.0053
IMF_8	0.0040	0.0257	4	1	1	0.4106	0.0106
IMF_9	0.0015	0.0021	2	3	0.3333	0.1369	0.0003
IMF_{10}	0.0012	0.0023	1	4	0.25	0.1027	0.0002
IMF_{11}	0.0009	0.0021	1	4	0.25	0.1027	0.0002
R	0.0021	0.0269	0.5	4.5	0.2222	0.0912	0.0025

2.3 分析

IMF_1 、 IMF_2 分量波形均匀,分散于整个时间采样坐标轴,是高频噪声部分,与监测环境复杂程度和地质传播条件有关,环境越复杂、地质条件越差,其值越大,因频率高、折合能量小,对建筑物危害可以忽略; IMF_3 分量的波形开始出现衰减,幅值开始增大,是信号的高频部分,折合分能量小,对建筑物危害小; $IMF_4 \sim IMF_6$ 分量的速度幅值大,折合能量大,是造成爆破危害的主体,与传播距离、爆破药量等参数相关; IMF_7 和 IMF_8 虽然速度幅值较小,携带能量较少,但其频率与构筑物固有频率极为接近,造成折合分能量变大,加大爆破振动波危害; $IMF_9 \sim IMF_{11}$ 分量、余量 R 分别是信号的低频分量和信号趋势余量,其幅值小,携带能量小,对建筑物危害可以忽略。

3 工程应用

由民房 S_1 的分析可知,造成建筑物破坏的优势分量为 $IMF_4 \sim IMF_8$;其余分量折合能量小,可不分析,但其存在会影响权重 ε 和最终总折合能量值 E_s 的计算。因此,只对信号 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的 $IMF_4 \sim IMF_8$ 分量进行折合能量计算(表2)。

分析表2可知:

1) 信号 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 对应的速度分别为0.127、0.165、0.114、0.152 cm/s,均远小于中国现阶段爆破振动安全标准值,爆破振动的瞬时加载不会造成破坏。

2) 4个信号振速的极差仅为0.051 cm/s,但信号 S_2 和 S_4 的折合能量值 E_s 较信号 S_1 和 S_3 的大,经矿山多次爆破后,对应的民房2和民房4出现破坏现象,证明频繁的爆破振动加载会造成构(建)筑物累计损伤,且损伤程度随能量增大而增加,直至破坏。

3) 信号 S_2 和 S_4 的爆破振动波速相近, 但折合能量 E_e 却相差很大, 原因是信号 S_4 的 IMF_7 和 IMF_8 分量频率小, 接近假定的构(建)筑物固有频率, 对应的响应系数 ω 大, 放大了低频部分的折合分能量。因此, 硐室爆破等大型爆破, 频率小于 10 Hz, 接近构(建)筑物固有频率, 极易造成爆破振动危害。

4) S_1 和 S_2 的折合能量值分别为 9.22×10^{-8} 、 1.012×10^{-7} J, 数值极为接近, 民房 2 出现破坏, 民房 1 却没有, 因此粗略得出爆破振动波安全阈值为 1.0×10^{-7} J。

此外, 由于高频随距离衰减快, 剩余爆破振动波为低频波, 一些远距离构筑物的爆破振动波速虽未超过现行标准, 但应注意防护低频危害。

表2 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 折合能量分析对比

Table 2 Equivalent energy of signal 1 and signal 2 and signal 3 and signal 4

民房	分量	速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	分速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	能量/ 10^{-6} J	主震频率/ Hz	频率差/ Hz	响应 系数	权重	折合分能 量/ 10^{-6} J	折合总能 量/ 10^{-6} J	备注
S_1	IMF_4		0.0636	0.9672	54	49	0.0204	0.0150	0.0145	0.0922	
	IMF_5		0.0515	0.8603	24	19	0.0526	0.0386	0.0332		
	IMF_6	0.127	0.0226	0.2440	16	11	0.0909	0.0666	0.0163		
	IMF_7		0.0087	0.0647	10	5	0.2000	0.1466	0.0095		
	IMF_8		0.004	0.0257	4	1	1	0.7332	0.0188		
S_2	IMF_4		0.0767	1.1433	68	63	0.0159	0.0126	0.0144	0.1012	围墙 开裂
	IMF_5		0.0310	0.4194	38	33	0.0303	0.0239	0.0100		
	IMF_6	0.165	0.0298	0.4164	18	13	0.0769	0.0607	0.0253		
	IMF_7		0.0135	0.1516	12	7	0.1429	0.1129	0.0171		
	IMF_8		0.0073	0.0436	4	1	1	0.7899	0.0344		
S_3	IMF_4		0.0475	0.4823	40	35	0.0286	0.0270	0.0130	0.0884	
	IMF_5		0.0466	0.3597	22	17	0.0558	0.0526	0.0189		
	IMF_6	0.114	0.0182	0.1877	12	7	0.1429	0.1347	0.0253		
	IMF_7		0.0074	0.0718	8	3	0.3333	0.3143	0.0226		
	IMF_8		0.0041	0.0183	3	2	0.5000	0.4714	0.0087		
S_4	IMF_4		0.0914	1.3436	46	41	0.0244	0.0167	0.0224	0.1012	房子 和地 基开 裂、微 沉降
	IMF_5		0.0348	0.4481	30	25	0.0400	0.0273	0.0122		
	IMF_6	0.152	0.0450	0.7072	20	15	0.0667	0.0455	0.0322		
	IMF_7		0.0186	0.2202	8	3	0.3333	0.2276	0.0501		
	IMF_8		0.0089	0.1263	4	1	1	0.6829	0.0863		

4 结论

基于EEMD技术, 在求取IMF分量能量和频率的基础上, 结合构筑物的固有频率, 初步建立一种爆破振动能量安全评判新方法, 并通过实例论证, 得出以下结论:

1) 信号经EEMD分解, 低频IMF分量携带能量小, 但响应系数 ω 和权重 ε 大, 造成折合能量变大。因此, 爆破工程中, 硐室爆破等大型爆破危害大, 远距离构筑物应注意低频危害防护。

2) 在信号 $S_1 \sim S_4$ 的优势破坏IMF分量折合能量计算和分析的基础上, 结合现场破坏情况, 粗略得出该矿的爆破振动折合能量安全阈值为 1.0×10^{-7} J。

EEMD爆破振动折合能量安全评判法综合考虑了爆破三要素和受震物体动态响应等信息, 相比于爆破振动安全标准有理论优势, 但由于建(构)筑物的结构类型复杂、地基基础各异, EEMD爆破振动折合能量法尚需通过大量实验论证并完善。此外, EEMD分解效果取决于加入噪声的次数, 次数过少, 无法平滑异常事件, 次数过多, 则影响分解和计算速度。

参考文献(References)

- [1] 谢全民, 龙源, 钟明寿, 等. 小波与分形组合分析技术在爆破震动信号分析中的应用[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 120-124.
Xie Quanming, Long Yuan, Zhong Mingshou, et al. Blasting vibration signal analysis with wavelet and fractal portfolio analysis technique[J].

- Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12): 120-124.
- [2] 宗琦, 汪海波, 周胜兵. 爆破地震效应的监测和控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 938-945.
Zong Qi, Wang Haibo, Zhou Shengbing. Research on monitoring and controlling techniques considering effects of seismic shock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 938-945.
- [3] 罗忆, 卢文波, 陈明, 等. 爆破振动安全判据研究综述[J]. 爆破, 2010, 27(1): 14-22.
Luo Yi, Lu Wenbo, Chen Ming, et al. View of research on safety criterion of blasting vibration[J]. Blasting, 2010, 27(1): 14-22.
- [4] 吕涛, 石永强, 黄诚, 等. 非线性回归法求解爆破振动速度衰减公式参数[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1871-1878.
Lü Tao, Shi Yongqiang, Huang Cheng, et al. Study on attenuation parameters of blasting vibration by nonlinear regression analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1871-1878.
- [5] 李鹏, 卢文波, 陈明. 爆破振动全历程预测及主动控制研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(5): 537-545.
Li Peng, Lu Wenbo, Chen Ming. Advances in full time-history prediction and active control of blasting vibration[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5): 537-545.
- [6] 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 Guosheng, Xiong Zhengming. Safety assessment of structure by blasting seism based on wavelet packet energy spectra[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1522-1528.
- [7] 李鹏, 卢文波, 陈明. 爆破振动全历程预测及主动控制研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(5): 537-545.
Li Peng, Lu Wenbo, Chen Ming. Advances in full time-history prediction and active control of blasting vibration[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5): 537-545.
- [8] 刘敦文, 栗闯, 龚运高. 一种基于爆破振动信号小波分析的爆破危害评判新方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(4): 1574-1577.
Liu Dunwen, Su Chuang, Gong Yungao. New method for blasting hazards evaluation based on wavelet analysis of blasting vibration signals[J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2010, 41(4): 1574-1577.
- [9] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [10] 赵明生, 梁开水, 罗元方, 等. EEMD在爆破振动信号去噪中的应用[J]. 爆破, 2011, 28(2): 17-20.
Zhao Mingsheng, Liang Kaishui, Luo Yuanfang, et al. Application of EEMD in blasting vibration signal de-noising[J]. Blasting, 2011, 28(2): 17-20.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998, 454: 903-995.
- [12] 张义平. 爆破震动信号的HHT分析与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
Zhang Yiping. HHT analysis of blasting vibration and its application[D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [13] 刘治峰, 张戈平, 王炳恒. 深孔爆破振动测试分析与降振措施[J]. 爆破, 2010, 27(1): 107-110.
Liu Zhifeng, Zhang Geping, Wang Bingheng. Deep-hole blasting vibration and drop shock test and analysis of measures[J]. Blasting, 2010, 27(1): 107-110.
- [14] 罗正. 城市浅埋大跨隧道爆破振动监测与控制技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Luo Zheng. The study of monitoring and control technologies of blasting vibration in urban shallow large-span tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [15] 周德廉, 邵国友. 现代测试技术与信号处理[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
Zhou Delian, Shao Guoyou. The modern test technology and signal processing[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005.
- [16] 张义平, 李夕兵, 赵国彦. 基于HHT方法的爆破地震信号分析[J]. 工程爆破, 2005, 11(1): 1-6.
Zhang Yiping, Li Xibing, Zhao Guoyan. Analysis of blasting vibration signal based on HHT method[J]. Engineering Blasting, 2005, 11(1): 1-6.

(编辑 陈华斌)

· 学术动态 ·



中国科协预防与控制生物灾害分析研讨会在北京召开

2015年1月28—29日,由中国科协调研宣传部主办、中国植物保护学会承办的2015年中国科协预防与控制生物灾害分析研讨会在北京召开。中国植物保护学会、中国林学会、中国畜牧兽医学会、中国水产学会、中国气象学会负责人和专家共51人出席会议。

与会专家分作物、林业、畜牧兽医、水产等4个组进行了研讨,认为2014年农作物病虫害发生总体为中等至偏重。由于病菌毒性变异、病虫害发生基数、栽培制度和种植结构和气候条件等有利于生物灾害发生,预计2015年中国生物灾害防控形势依然严峻,与会专家提出了2015年防控对策建议,形成了《2014年生物灾害状况和2015年预防与控制生物灾害的报告》。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38620/16214788.html>。