

一种基于改进时窗法的爆炸冲击波检测方法

艾斯煜¹, 杜博军², 王 军^{1,3}

(1. 苏州科技大学, 江苏 苏州 215009; 2. 中国人民解放军 63850 部队, 吉林 白城 137001;
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为解决爆炸冲击波的信号采样系统对高频低信噪比部分采样时传统时窗法会使有效信号丢失问题, 基于变窗长峰值滤波的信号增强特性以及非线性变量的互信息特性, 提出一种基于改进时窗法的爆炸冲击波检测方法。该方法针对信号频段调整了采样窗长, 从而解决了信号中高频低信噪比部分的失真问题。测试结果表明, 改进法所得冲击波当量的效果偏差皆小于 10%, 与基于传统时窗法的冲击波检测方法效果偏差相比, 检测精度明显提升。研究结果可为爆炸冲击波检测领域提供参考。

关键词: 时窗能量比法; 高频信号; 低信噪比; 效果偏差

本文引用格式: 艾斯煜, 杜博军, 王军. 一种基于改进时窗法的爆炸冲击波检测方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(04): 213–217.

Citation format: AI Siyu, DU Bojun, WANG Jun. Test Method of Blast Vibration Wave Based on Improved Time Window Method [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(04): 213–217.

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 2096–2304(2021)04–0213–05

Test Method of Blast Vibration Wave Based on Improved Time Window Method

AI Siyu¹, DU Bojun², WANG Jun^{1,3}

(1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. The 63850th Troop of PLA, Baicheng 137001, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional time window method will lose the effective signal when sampling the high frequency and low signal-to-noise ratio parts of the explosion shock wave signal sampling system, based on the signal enhancement characteristics of variable window length peak filtering and the mutual information characteristics of nonlinear variables, this paper proposed an explosion shock wave detection method based on improved time window method. This method adjusted the sampling window length for the signal frequency band, thereby solving the distortion problem of the high frequency and low signal-to-noise ratio of the signal. The experimental test results show that the effect deviation of the shock wave equivalent obtained by the improved method is less than 10%. Compared with the effect deviation of the shock wave detection method based on the traditional time window method, the detection accuracy is significantly improved. The research results can provide a certain reference for the field of explosive shock wave testing.

Key words: time-window energy ratio; high frequency signal; low signal-to-noise ratio; effect deviation

收稿日期: 2020–03–29; 修回日期: 2020–06–17

基金项目: 江苏省研究生工作站项目; 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX17_2060); “十三五”江苏省重点学科项目(20168765)

作者简介: 艾斯煜(1995—), 男, 硕士生, 主要从事光通信和信息处理方面的研究, E-mail: aisiyu5200@163.com。

通信作者: 王军(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电测控技术与仪器方面研究, E-mail: wjyhl@126.com。

一般在靶场测试系统中,爆炸冲击波的检测对象主要是空气超压。而气压检测系统易受爆炸所产生的光辐射和热辐射影响。就本文中仅涉及的地面爆炸冲击波检测系统^[1-2]而言,可以通过地下浅埋加速度传感器检测冲击波的加速度值实现。

在爆炸冲击波检测领域,研究重点多为传感器数据采样,尤其是结合了前端数据处理的高精度采样问题。冲击波中有效信号拾取是研究的关键,其方法主要有滑动窗口法和相关耦合法。滑动窗口法是指在每个滑动产生的窗口中计算窗内时域波形的特征函数,根据函数的变化特征情况来标示冲击波的存在,并通过分析起突变情况以拾取冲击波初至。而相关耦合法主要基于相邻信道之间的波形相似性,对冲击波波形信号上的部分或者整体波形截取并将其时间延迟,最终与待测冲击波信道上的记录对比以获得冲击波信号的存在性并确定波峰到达时间。

滑动窗口法的最新应用有学者时伟等^[3]提出的双约束变换时窗能量比法,该方法计算步骤简单,初至拾取效率高;左国平等^[4]提出的滚动能量比法,提高了计算精度和准确度;郑江龙等^[5]提出的能量差法,将计算能量和比值转换为能量差比值,提高了时窗检测灵敏度。该类方法虽然对多路信号独立处理,无需考虑信号关联性问题,运算简单、数据处理效率高,但对高频低信噪比信号获取效果较耦合法不明显。

相关耦合法的最新研究成果有北京大学喻志超等^[6]提出的利用波形相似性进行初至时刻拾取的时窗选择法,解决了冲击波的微变化数据提取问题;魏梦祯等^[7]学者提出了一种结合 STA/LTA 方法的基于波形互相关的冲击波初至拾取方法,联合多路数据为一个整体处理,实现初至获取结果全局优化;Akram 等^[8]国外学者基于迭代的互相关算法并在初至时刻获取方面应用,有效识别了地震冲击波的微变化。但该类方法普遍存在对高频非线性、关联性较弱的信号拾取效果不明显等问题。

本文提出了一种结合了变窗长峰值滤波和耦合量互信息特性的改进时窗法。以建模仿真、实验测量相结合的方式,完成了对爆炸冲击波等实验数据的采集和效果偏差等后端数据处理。通过与传统时窗法^[9]对比,验证了该爆炸冲击波检测方法的可行性。

1 方法原理

1.1 时窗能量对比法拾取冲击波信号

在三轴加速度传感器组成的冲击波检测系统中^[10-11],冲击波初至时刻是一个非常特殊的时刻,即此刻之前所记录只有噪声,而后所记录则是噪声与冲击波的迭加信号。由于初至前后两时窗积分能量有较大差异,故利用该特性来判断初至时刻的发生点。时窗能量比 $E(i)$ 反映了峰值时窗与前一时窗的变化程度,其表达式为:

$$E(i) = \left[\frac{\sum_{k=i}^{i+M-1} c_k^2 \times \varepsilon}{\sum_{k=i-N}^{i-1} c_k^2 \times \varepsilon} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, c_k 表示加速度传感器测量值 (m/s^2); M 表示下一个时窗大小 (s); N 表示当前时窗大小 (s); ε 表示测试环境中的背景噪声系数; i 表示当前时刻相邻最大整数值。

传统时窗能量对比法受固定窗长制约,信号的高、低信噪比部分均采用同窗长采样,致使结果中高信噪比部分混叠较多噪声信号,故而感知能力不佳,拾取精度不高。

1.2 互信息量概念

将随机变量考虑成通信系统,两信道即为 2 个相关变量。互信息量 $I(x, y)$ 表示两个相关变量之间的统计学依存度,取值范围为 0~1。其中 x_i 表示该系统的输入量, y_i 表示系统的输出量,通过互信息量这一概念建立两路采集信号相关性。

互信息量表达式为:

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^o \sum_{j=1}^s p(x_i, y_j) \log_2 \left(\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i) p(y_j)} \right) \quad (2)$$

式中: $p(x_i, y_j)$ 为 2 个变量的联合分布; $p(x_i)$ 、 $p(y_j)$ 为边缘概率分布; o 和 s 分别是 X 和 Y 的发生数量。

1.3 改进后的时窗法拾取冲击波信号

由于传统时窗法中窗长固定且对信号的高频低信噪比部分感知效果差,进而导致采样精度低。本文结合变窗长峰值滤波和互信息量概念对传统时窗法进行了改进。

变窗长峰值滤波是一种信号增强方法,操作步骤如下:

步骤 1: 加速度传感器所直接采集输入时域信号 $x(t)$ 通过频率调制得到解析信号 $z(t)$:

$$z(t) = \exp(j2\pi I(x, y)) \int_0^t x(t) dt \quad (3)$$

在实际研究中原信号 $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = s(t) + v_1(t) \quad (4)$$

其中: $s(t)$ 是 A 通道加速度有效值; $v_1(t)$ 是该通道的任意噪声。

步骤 2: 对 $z(t)$ 进行 Wigner-Ville 转换,获得的时频域信号 $W_z(t, f)$ 为:

$$W_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) z(t + \frac{\tau}{2}) * z(t - \frac{\tau}{2}) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (5)$$

其中: $h(\tau)$ 为时窗调节函数,表示时窗长度且会随所测数据做出调整; τ 为时间变量 (s); f 为自变量频率 (Hz)。

步骤 3: 求取 $s(t)$ 期望值,求取过程为:

$$\hat{s}(t) = \frac{\arg \max_f [W_z(t, f)]}{\mu} \quad (6)$$

其中: μ 表示缩放比,由实际测试信号的强度设置。式 (6) 表示在对应频率 f 取值能让 $W_z(t, f)$ 最大时,所对应时域函数按一定比例缩放。

步骤 4: 选取时窗。考虑到震动模型与 Ricker 小波信号模型 (如图 1 所示) 相似,时窗长 WL 的选取参照 Ricker 小波

信号模型常用式(7), α 为时窗选择比,默认 0.707。针对冲击波不同频段, f_s 为波峰对应频率(Hz); f_d 为有效信号带宽(Hz); 对应时段为 T_s, T_d , 单位都为 s。

$$WL \leq \alpha \frac{f_s}{f_d} I(x, y) = \alpha \frac{T_d}{T_s} I(x, y) \quad (7)$$

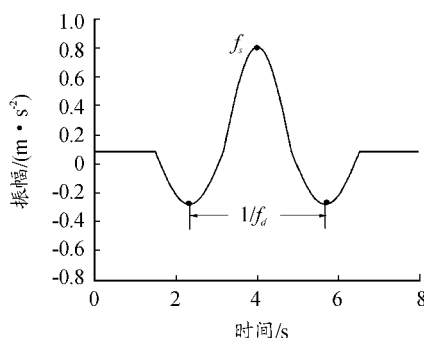


图1 Ricker 小波信号模型

令 2 个地震信道记录 A 和 B 采样信号为 $x(t)$ 和 $y(t)$, 根据冲击波一般观测方法和传播特性, 信号满足以下模型:

$$x(t) = s(t) + v_1(t) \quad (8)$$

$$y(t) = Q[s(t - D)] + v_2(t)$$

B 通道中 $Q[s(t - D)]$ 是非线性时不变函数, 它主要描述了传播过程中冲击波的波形变化程度。 D 是一个延迟参数, $v_2(t)$ 为 B 通道观测噪声。通过检测 $y(t)$ 中不同延迟点 D 处的冲击波形, 并综合通道 A 观测信号 $x(t)$ 进而对冲击波估计分析。

互信息量反映随机变量间的统计关联度, 且不依赖于线性关系, 可以有效避免非线性函数带来的不利影响。在测量模型中 $x(t)$ 为冲击波信号, $x(L)$ 是波峰附近选择的一段时窗, 由于传播通道间存在时延, 可以将通道 B 看成 A 的输出关联量 $y(L + d)$, 即输出量为输入时窗长加一段函数延迟 d 。在时窗大小不断改变和移动的情况下, 求取对应互信息量 $I(x, y)$, $I(x, y)$ 最大值时关联性达到最强, 即此窗口时刻为该通道的初至时刻。

获取 A、B 通道数据步骤如下:

1) 通过 A、B 通道加速度传感器测量得到冲击波数据 $x(t)$, $y(t + d)$, 计算得到其互信息量 $I(x, y)$ 。

2) 对于通道 A、B, 采用相同长时窗 WL 进行滑动, 计算对应原信号的期望值 $\hat{s}(t)$ 。

3) 在 1) 互信息量最大值对应时窗内, 结合(6)中得到 $\hat{s}(t)$, 认定为有效原信号。

图 2 给出了改进算法的流程。

1.4 爆炸冲击波超压等效换算

在 1.3 节中, 利用改进时窗法, 得到加速度有效值 $\hat{s}(t)$ 。在效果评估中, 加速度值作为衡量爆炸冲击波效果的标准既不直观也不利于存储^[12-13]。结合加速度—压强转换公式与萨道夫斯基公式进行等式转换得到 W_{TNT} , 即 TNT 当量^[14], 单

位为 kg。

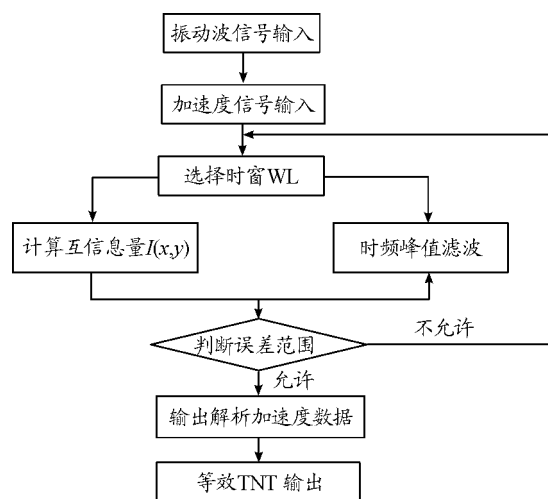


图2 改进算法流程框图

1.4.1 加速度数据压强转换公式

通过实际测量和查阅相关资料^[15-16], 压电式加速度传感器测量值与施加于其上压强可以通过工程公式进行转换, 公式如下:

$$a_{\max} = \frac{A_1}{d} \times \Delta p_{\max}^{\alpha_1} \left(\frac{R}{d} \right)^{\alpha_2} \quad (9)$$

反向推导得:

$$\Delta p_{\max} = \left[\frac{d}{A_1} \times a_{\max} \left(\frac{R}{d} \right)^{-\alpha_2} \right]^{-\alpha_1} \quad (10)$$

式中: R 为检测装置与炸点中心间距(m); d 为传感器探头部分厚度(m); $a_{\max}$ 为加速度测量最大值(m/s²); $\Delta p_{\max}$ 为接触表面压强最大变化量(MPa); A_1 为常数, 由剪切模量、材料密度等性能决定; α_1, α_2 为加速度传感器经验参数(m/s²), 需要厂商进行提供。

1.4.2 萨道夫斯基公式

在 1.4.1 中, 通过实际测量值换算得到冲击波超压, 进而通过萨道夫斯基算法, 可以对其与 TNT 当量进行换算, 萨道夫斯基公式如下:

$$\Delta p_m = 10^5 \left[0.75 \left(\frac{\sqrt[3]{W_{TNT}}}{R} \right)^3 + 2.55 \left(\frac{\sqrt[3]{W_{TNT}}}{R} \right)^3 + 6.5 \left(\frac{\sqrt[3]{W_{TNT}}}{R} \right)^3 \right] \quad (11)$$

其中, Δp_m 表示传感器接触表面^[17] 冲击压强最大变化量 1.4.1 节中已经提及, W_{TNT} 为 TNT 等效值, 单位为 kg; 根据资料^[18], 在比例距离 $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{W_{TNT}}}$, 即检测装置与炸点中心间距

和装药量比值满足 $1 < \bar{R} < 15$ 时满足萨道夫斯基公式时。通过 MATLAB 建立公式, 可以解出对应 TNT 当量 W_{TNT} 。

2 系统搭建与测试结果

2.1 测试设备埋设布局

图 3 所示为测试时炸点区及传感器埋设布局示意图, 中

心爆炸区为红色半径 10 m 圆形围成的区域,三角形所示为布置的加速度传感器,同心圆间隔 2 m 半径,夹角约 120° 。图 4 是测试系统框图。

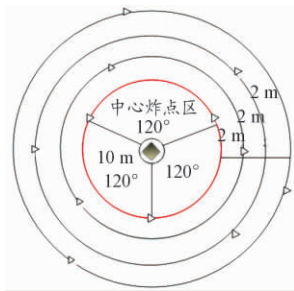


图3 测试设备埋设布局示意图

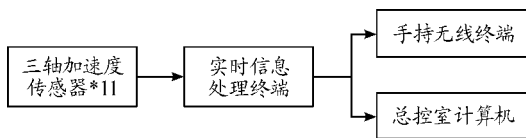


图4 测试系统框图

2.2 测试数据与分析

2.2.1 仿真测试结果对比

通过 3 组 Ricker 小波信号进行爆炸冲击波信号仿真,包括主频 35 Hz、25 Hz 和 20 Hz 三组反射信号和仿真频率衰减^[19],其中增加了 0.3 W 高斯白噪声。生成仿真波形如图 5 所示。

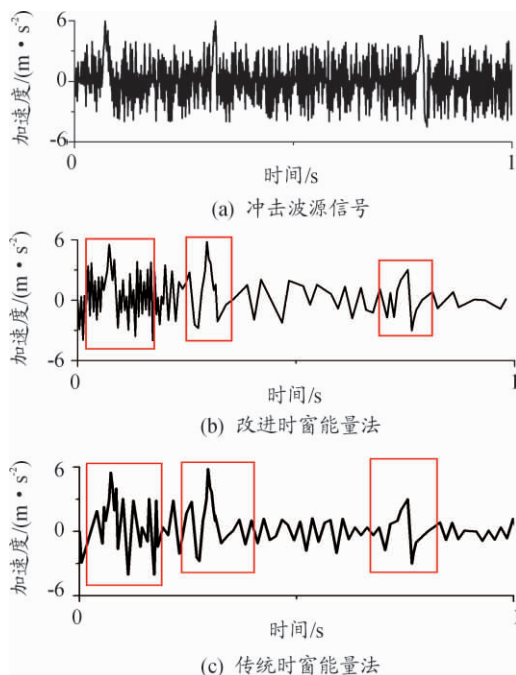


图5 源信号与不同方法提取的有效信号波形

图 5(a) 是添加了白噪声的源信号。图 5(b) 和图 5(c) 是滤波提取信号,三主频对应 3 个波峰。

图 5(b) 为改进时窗法提取的信号,采样时窗长为 0.05s

-0.1s。黑色线为信号波形,纵轴为传感器的路数,横轴为对应时刻,亮色为所选时窗。图 5(c) 是传统时窗法所处理信号并选取的时窗,该方法取定时窗 0.13 s。

对比图 5(b) 和(c) 可知,第二、三峰值附近波形相似,仅第一峰值差异较大。图 5(b) 信号在第一小波峰即高频部分保持效果较好。而图 5(c) 信号中进行了滤波去噪,对原信号高频有效部分有明显削弱。由此可知,相较于传统时窗法而言,改进时窗法不但能够对信号低信噪比部分有效数据进行获取,也对高频部分保留和增强。

2.2.2 冲击波实测效果对比

对 11 路冲击波信号采用两种方法采样,频率为 1 000 Hz,采样时长为 6 s。采样曲线如图 6、图 7 所示,图 6、图 7 分别为传统时窗法和改进时窗法的解析数据与时窗选择结果。根据互信息量特性选取 [2 2.5 3]、[3.5 4.5 5]、[5 5.5 6] 三个初至时段。在该时段内,图 5 为 1 s 固定采样时窗所取波形,图 6 为改进时窗法分别选取 0.7 s、1.5 s、0.8 s 窗长解析所得波形。

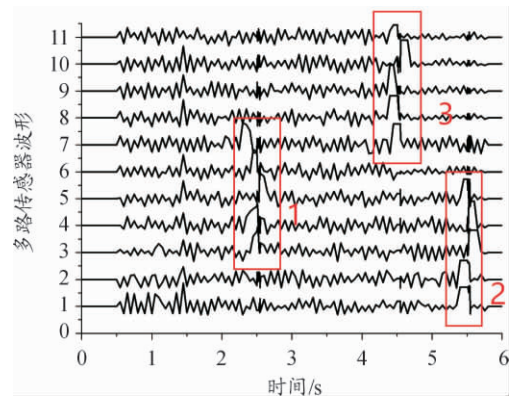


图6 传统时窗法采样曲线

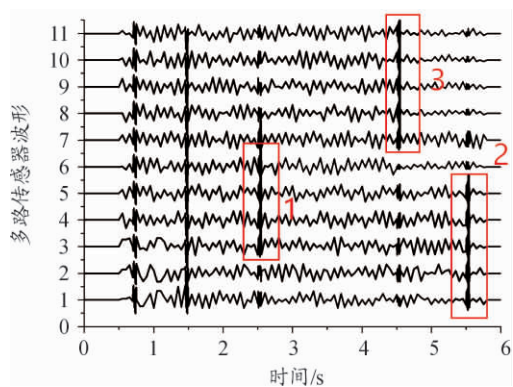


图7 改进时窗法采样曲线

图 6 中冲击波信号包括随机噪声,集中于框 1、2、3 中。噪声在整个图中分布使有效信号被抹去。从图 7 的数据中可得出结论,在 1.3 中利用改进时窗法去除高频噪声后,高频低信噪比有效信号得以保留,信号得到增强。

2.2.3 实际测试数据

如表 1 所示是采样、换算所得数据。

表1 测量数据

测试 弹装 药量/ kg	输出 电压 峰值/ V	距 离/ m	传统时窗法		改进时窗法	
			TNT 当量/ kg	效果 偏差/ %	TNT 当量/ kg	效果 偏差/ %
3	3.59	10	2.77	8	2.96	2.2
3	2.99	12	2.62	13	2.91	3.2
3	2.51	14	2.42	20	2.82	6.4
3	1.97	16	2.22	26	2.73	9.2
6	6.76	10	5.58	7	5.85	2.5
6	5.75	12	5.39	11	5.77	4.8
6	4.62	14	5.17	14	5.57	7.2
6	3.52	16	4.86	19	5.48	8.7

在有效半径范围内分别投放 3 kg 和 6 kg TNT 装药量测试弹,经过前端采集和上位机换算得出上表数据。通过以上数据表,可以看出在 10 m、12 m、14 m、16 m 位置使用传统时窗法的效果偏差均不小于 7%,小部分甚至大于 25%。

相较于传统时窗法,改进时窗法获取冲击波信号效果偏差降到 10% 以内,采样精度提升明显。

3 结论

1) 改进后时窗法通过在采集前端增加了峰值滤波,降低了信号失真水平。

2) 在时窗选择上,改进后时窗法结合 Ricker 小波信号实现变窗长选择时窗,实现有效信号保持和增强。

3) 系统将采样加速度有效值转换为 TNT 当量,满足监测数据直观性要求。

参考文献:

- [1] 徐韬祐,刘鹏祖,王明启等. 基于高速相机的近地炸点三维坐标测试方法[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(05): 203-206.
- [2] 范少波,王代华,赵志国,等. 一种多重触发式炮口冲击波存储测试系统设计[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(04): 46-51.
- [3] 时伟,林春华,王维红,等. 双约束变换时窗统计能量比地震波初至拾取方法[J]. 物探与化探,2019,43(05): 1064-1073.
- [4] 左国平,王彦春,隋荣亮. 利用能量比法拾取地震初至的一种改进方法[J]. 石油物探,2004(04): 345-347.
- [5] 郑江龙,许江. 能量差法拾取直达波初至的应用研究

[J]. 工程地球物理学报,2013,10(06): 834-839.

- [6] 喻志超,谭玉阳. 基于波形相似特征的微地震事件初至拾取及全局校正[J]. 地球物理学报,2019,62(12): 4782-4793.
- [7] 魏梦祯,谭玉阳,毛中华,等. 基于波形互相关的微地震事件自动识别及初至拾取[J]. 北京大学学报(自然科学版),2018,54(02): 361-372.
- [8] AKRAM J, EATON D W. Refinement of arrival-time picks using a cross-correlation based workflow[J]. Journal of Applied Geophysics,2016,135: 55-66.
- [9] 李辉,戴旭初,葛洪魁,等. 基于互信息量的地震信号检测和初至提取方法[J]. 地球物理学报,2007(04): 1190-1197.
- [10] 刘吉,苏凝钢,武锦辉,等. 光电弹着点坐标检测技术的发展现状[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(12): 224-230.
- [11] 潘昶. 一种改进的导弹落点预报算法[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(09): 30-46.
- [12] 李峰,石全,孙正. 目标毁伤效果评估技术研究综述[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(09): 69-72.
- [13] 韩阳阳,尹建平,王志军,等. 一种包覆式爆炸成型弹丸数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(12): 63-67.
- [14] 何宁,向聪,翟浩宇. 固体复合推进剂 TNT 当量计算及其可视化软件开发[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(04): 174-176.
- [15] 魏巍,苏健军. 基于量纲分析的冲击波测量加速度寄生效应[J]. 科学技术与工程,2017,17(14): 191-195.
- [16] 魏巍,苏健军,潘文. 瞬态高冲击加速度对冲击波压力测量的影响[J]. 科学技术与工程,2017,17(13): 187-191.
- [17] ZHUANG G, LI Y, LIU Y, et al. Varying-Window-Length TFPF in High-Resolution Radon Domain for Seismic Random Noise Attenuation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2015, 12(02): 404-408.
- [18] 李斌,王雨,周志强,等. 爆炸冲击波威力高速纹影测量方法[J]. 光学与光电技术,2018,16(02): 43-49.
- [19] LIU Y, LI Y, LIN H, et al. An Amplitude-Preserved Time-Frequency Peak Filtering Based on Empirical Mode Decomposition for Seismic Random Noise Reduction[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2014,11(5): 896-900.

科学编辑 毛亮博士(北京理工大学讲师)

责任编辑 唐定国