

基于经验模态分解及小波变换的炸药 NQR 信号处理

郝凤龙, 徐更光, 黄学义

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为解决炸药 NQR 信号去噪问题, 针对 NQR 信号非线性与非平稳性特点, 提出基于经验模态分解及小波变换联合的信号去噪方法。据实验测试的黑索金 NQR 信号对所提方法进行去噪性能分析。结果表明该方法在保留信号有用信息的前提下可有效去除噪声, 从而提高信噪比、克服小波阈值去噪与直接 EMD 去噪缺陷, 自适应性良好, 为有效的炸药 NQR 信号去噪方法。

关键词: 炸药探测; 核四极矩共振; 经验模态分解; 小波阈值; 信号去噪

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.16.033

Processing of explosive nuclear quadrupole resonance signals based on empirical mode decomposition and wavelet transform

HAO Feng-long, XU Geng-guang, HUANG Xue-yi

(State Key Laboratory of Explosion of Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Explosive nuclear quadrupole resonance (NQR) signals have nonlinear and non-stationary characteristics. In order to solve the NQR signal de-noising problem, a de-noising method based on empirical mode decomposition (EMD) and wavelet transform was proposed. The original NQR signals of RDX detected by experiment were used to analyze the de-noising performance. The results indicate that the proposed method can eliminate the noise effectively and well preserve the effective information of original signals. Meanwhile, the method can overcome the shortcomings of wavelet threshold de-noising and direct EMD de-noising, and improve the signal-to-noise ratio. The method has excellent adaptability, and was proved to be an effective de-noising way for NQR signals.

Key words: explosive detection; nuclear quadrupole resonance; empirical mode decomposition; wavelet threshold; signal de-noising

针对恐怖爆炸袭击, 及时有效查出隐藏的爆炸物已成当务之急。核电四极矩共振 (Nuclear Quadrupole Resonance, NQR) 探测技术以准确率高、误报率低、无磁污染等优点深受青睐^[1-3]。然而, 炸药的 NQR 频率较低 (0.5 ~ 6 MHz), 信号强度极弱, 并易受背景噪声干扰, 信噪比较低, 探测识别较困难。如何有效提高 NQR 信号的信噪比, 已成为基于 NQR 技术的炸药探测系统研制重点。原子核四极矩共振为原子核物理现象, 指原子核非球对称部分因与核外电场梯度相互作用引起能级分裂, 在外加射频场作用下, 产生能级跃迁过程^[4]。炸药中普遍含自旋量子数 I 为 1 的 ^{14}N , 其原子核具备产生核电四极矩共振的内在因素, 可将 ^{14}N 作为炸药探测的一种特征成分^[5]; 而不同原子核、同种原子

核在不同物质中或同种物质在不同晶型下, NQR 频率不同, 一旦检测到 ^{14}N 原子核的 NQR 信号, 便可据其特征频率谱线唯一确定炸药类型, 实现对炸药的探测与识别。

炸药产生的 NQR 信号非常微弱, 仅为纳伏量级, 极易被淹没在背景噪声中, 极低的信噪比制约了 NQR 技术在炸药探测中的应用; 因此, 须采取有效信号处理方法提高信噪比, 进而提高炸药探测准确率。文献[6]利用加权傅里叶频谱分析方法对 NQR 信号进行处理。该方法充分利用有限信号能量, 能降低噪声能量影响, 因而信噪比较高。然而, 该方法需信号满足平稳性假设条件, 无法描述信号局部特征。文献[7]提出自适应滤波算法, 利用干扰信号间相关性, 有效抑制振铃拖尾, 提取出干扰中的 NQR 信号, 从而提高 NQR 信号的信噪比。文献[8]用小波变换方法提高信噪比, 利用 Mallat 算法对 NQR 信号进行分解及重构, 并通过多个阈值函数对小波系数作门限阈值处理, 使噪声得到有

效抑制。此方法缺陷为小波基与阈值函数选取较困难,需繁琐调试才能达到好效果,缺乏自适应能力。文献[9]提出基于改进阈值函数小波变换的NQR信号处理方法,将软硬阈值函数结合,动态调节阈值大小,既兼具软硬阈值法优点又能避免其缺陷,可有效滤除背景噪声,提高信噪比。

本文通过分析当前炸药NQR信号处理方法优缺点,提出基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)与小波变换联合的NQR信号去噪方法。该方法不受傅里叶变换及小波函数选择限制,自适应能力强,并通过对实测炸药NQR信号去噪处理,验证该方法的可行性及有效性。

1 经验模态分解去噪原理

经验模态分解方法^[10]为针对非线性及非平稳信号的时频域信号处理方法,为Hilbert-Huang变换(HHT)的核心部分。该方法由信号本身时间尺度特征出发,将含噪声的原始信号分解成一系列保留局部特征信息的数据序列,即固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),再对该序列进行处理、信号重构,可有效去除信号中混杂噪声。固有模态函数须满足两条件:①在整个数据序列中极值点数量与过零点数量须相等或最多相差一个;②在任意时间点由数据序列局部极大值点确定的上包络线与局部极小值点确定的下包络线均值为零,即信号关于时间轴局部对称^[11]。EMD方法将信号分解处理过程描述为筛选过程,对给定的时间序列信号 $x(t)$ 其分解步骤如下:

(1) 确定 $x(t)$ 所有极大值点、极小值点;

(2) 在极值点间利用三次样条函数进行插值,获得 $x(t)$ 上包络线 $u_0(t)$ 与下包络线 $v_0(t)$,并计算两包络线均值 $m_0(t)$,即

$$m_0(t) = \frac{1}{2} [u_0(t) + v_0(t)] \quad (1)$$

(3) 用 $x(t)$ 减去平均曲线 $m_0(t)$,得差值 $h_1(t)$ 为

$$h_1(t) = x(t) - m_0(t) \quad (2)$$

判断差值 $h_1(t)$ 是否满足IMF的两条件,若满足则令 $h_1(t)$ 为 $x(t)$ 的第一阶IMF分量 $c_1(t)$,即 $c_1(t) = h_1(t)$;若不满足则用 $h_1(t)$ 代替 $x(t)$,重复以上步骤,直到满足IMF条件为止,求得第一阶IMF分量 $c_1(t)$;

(4) 求出原信号与第一阶IMF分量差值,即

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (3)$$

将剩余部分 $r_1(t)$ 作为新信号 $x(t)$ 处理,重复步骤(1)~(4),可依次获得 $c_2(t), c_3(t), \dots, c_n(t)$,直到剩余部分 $r_n(t)$ 为单调函数时分解完成。

通过EMD方法筛选处理,原始信号 $x(t)$ 可表示为所有IMF分量及残余量之和,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

式中: n 为IMF分量个数; $r_n(t)$ 为信号 $x(t)$ 平均趋势。

频域上分量IMF已含原始信号中多个频率段成分,且据计算次序所得各阶IMF分量所含频率成分由高到低分布,即阶数小的IMF代表信号高频成分,阶数大的IMF代表信号低频成分。基于EMD的去噪方法主要思路为:大多数被噪声干扰的目标信号主要能量集中在低频段,频段越高所含信号能量越少,而噪声主要集中在高频段,因此可舍弃部分阶数小的IMF,利用剩余IMF重构信号,达到去噪目的。由分析可知,EMD过程实为频带筛分过程,完全自适应于被分解信号,无需预先提供分解的基函数,自适应性更好、灵活性更高。该方法也存在不足,如较难确定舍弃的IMF数目,舍弃部分阶数小IMF的同时也会丢失信号部分能量。

2 小波阈值去噪原理

小波变换因具有良好的时频局部化特性及多分辨率分析特性得以广泛应用。Donoho等^[12]在小波变换基础上提出基于小波阈值的信号去噪方法,基本原理即据信号、噪声在各层小波空间分别具有的不同特性实现信噪分离。信号主要特征由分布在较大尺度上少数幅值较大系数表征;而噪声主要特征由分布在各层小波空间多个小幅值小波系数表征。将信号据所选小波基函数进行分解,获得小波域上小波系数。利用阈值函数将各尺度上由噪声产生的小波分量滤除,重构原始信号完成去噪。

设含噪信号 $y(t) = s(t) + n(t)$ 。其中 $s(t)$ 为原始信号; $n(t)$ 为高斯白噪声,服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布。对 $y(t)$ 作离散小波变换为

$$w_y(j, k) = w_s(j, k) + w_n(j, k) \quad (5)$$

式中: $j=0, 1, 2, \dots, J, J$ 为小波变换最大分解层数; $k=0, 1, 2, \dots, N, N$ 为信号长度; $w_y(j, k), w_s(j, k), w_n(j, k)$ 为含噪信号、原始信号及噪声信号在小波空间第 j 层的小波系数。 $w_y(j, k)$ 小于某一阈值时, $w_y(j, k)$ 主要由噪声引起,可将其舍去; $w_y(j, k)$ 大于阈值时,小波系数主要由信号引起,需保留。

传统上对小波系数作门限阈值处理有硬阈值函数法与软阈值函数法两种^[13],分别定义为

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} (w_{j,k}), & (|w_{j,k}| \geq \lambda) \\ 0, & (|w_{j,k}| < \lambda) \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(w_{j,k} - \lambda), & (|w_{j,k}| \geq \lambda) \\ 0, & (|w_{j,k}| < \lambda) \end{cases} \quad (7)$$

式(6)为硬阈值法,式(7)为软阈值法。阈值确定规则包括无偏风险规则(Rigrsure)、固定阈值规则(Sqtwolog)、启发式阈值规则(Heursure)及极大极小

值规则 (Minimaxi)。阈值方法本身存在一定缺陷,其中硬阈值法去噪函数在 λ 与 $-\lambda$ 两点处存在间断点,所得小波系数值连续性较差,会导致重构信号振荡。软阈值函数虽在小波域连续,但软阈值对大于阈值的小波系数采取恒定值压缩,小波系数较大时会给重构信号带来误差;因此,阈值估计及阈值函数选取成为阈值去噪方法的关键与难点。

3 经验模态分解与小波变换联合去噪原理

在分析 EMD 去噪与小波阈值去噪优缺点基础上,本文提出将二者联合的 NQR 信号去噪方法,以充分发挥其各自优点。经 EMD 筛选的 IMF 分量恰好满足由高频到低频的系列分布,低频段 IMF 分量由信号主导,高频段 IMF 分量由噪声主导;因此,必存在某个 IMF_{*j_s*} 分量,其后的 IMF 分量由信号起主导作用,而之前 *j_s* 个 IMF 分量由噪声起主导作用。此处通过连续均方误差准则确定分界点 *j_s*。定义重构信号为

$$\tilde{x}_k(t) = \sum_{j=k}^n \text{IMF}_j(t) + r_n(t) \quad (8)$$

式中:IMF_{*j*}(*t*)为 EMD 分解所得第 *j* 个 IMF 分量;*r_n*(*t*)为残余量;*n* 为原始信号分解后所得 IMF 分量个数。信号的连续均方误差^[14]定义为

$$\sigma_{\text{CMSE}}(\tilde{x}_k, \tilde{x}_{k+1}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\tilde{x}_k(t_i) - \tilde{x}_{k+1}(t_i)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\text{IMF}_k(t_i)]^2 \quad (9)$$

其中:*N* 为信号长度;IMF_{*k*}(*t_i*)为信号分解所得第 *k* 个分量。基于以上分析,信号能量分界点可确定为

$$j_s = \underset{1 \leq k \leq n-1}{\text{argmin}} [\sigma_{\text{CMSE}}(\tilde{x}_k, \tilde{x}_{k+1})] \quad (10)$$

确定信号能量分界点后,对含噪的高频分量用小波阈值去噪处理,将去噪数据与不含噪声的低频 IMF 分量及残余量重构原始信号,不损失存于高频 IMF 分量中的有用信息,且小波阈值去噪仅作用于高频 IMF 分量非直接作用于整个信号,较大程度上能克服小波阈值去噪缺陷。基于 EMD 与小波阈值联合的 NQR 信号去噪处理流程见图 1。

4 炸药 NQR 信号去噪分析

4.1 NQR 信号模型

NQR 信号有两种类型:① 自由感应衰减 (Free Induction Decay, FID) 信号,在射频脉冲结束后立刻呈指数形式衰减;② 自旋回波 (Spin - Echo, SE) 信号,为 FID 信号再重聚结果。实测中 NQR 信号强度较弱,易受线圈内热噪声、发射机射频及外部电磁波等干扰;通过接收探头检测的 NQR 信号可视为原始 FID 信号即指数衰减正弦信号、噪声信号及随机干扰信号之和,表

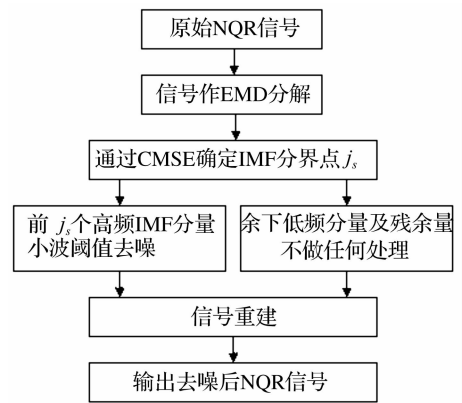


图 1 基于 EMD 与小波阈值的信号去噪流程
Fig. 1 Signal de-noising flow chart based on EMD and wavelet threshold

示成复值时间序列^[15]为

$$y(n) = \sum_{k=1}^d \alpha_k e^{-\beta_k n + i\omega_k(\tau)n} + \omega(n) \quad (11)$$

式中:*n* = 0, 1, ..., *N* - 1; α_k, β_k 分别为第 *k* 条正弦曲线振幅及衰减常数,炸药不同衰减常数亦不同;*d* 为衰减正弦曲线分量个数; $\omega_k(\tau)$ 为第 *k* 条正弦曲线频率漂移函数,为炸药样品温度 τ 的线性函数; $\omega(n)$ 为加性噪声,可设为零均值复高斯白噪声。

4.2 黑索金 NQR 信号去噪实验

为验证本文方法对炸药 NQR 信号的去噪效果,由实验测试获得黑索金炸药 NQR 信号,对实测信号分别进行直接小波阈值去噪、直接 EMD 去噪及 EMD 与小波联合去噪处理,分析比较各种方法的去噪性能。

在室温条件下将 20 g 黑索金粉末样品密封于螺口玻璃瓶中置于封闭射频线圈内,用 PSL 组合脉冲序列,激励频率 3.41 MHz,采样点数 1 000,接收增益 40 dB,累加次数 100。探测的时域 NQR 信号见图 2,可以看出 NQR 信号极微弱,几乎被淹没在背景噪声中。

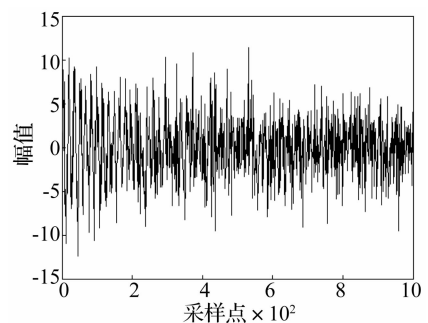


图 2 原始黑索金 NQR 信号
Fig. 2 Original NQR signal of RDX

选 db3 小波对原始 NQR 信号进行分解,分解层数为 3,采用软阈值去噪方法,阈值据自适应无偏风险规则确定,处理后 NQR 信号见图 3, NQR 信号已从背景噪声中分离,较光滑,但在整个时域上有较多毛刺。

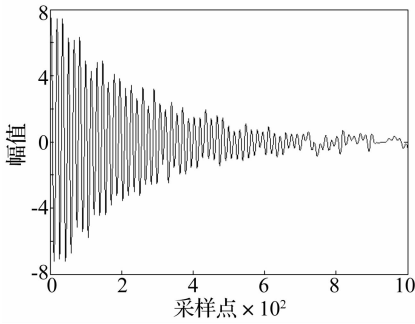


图3 直接用小波软阈值法所得去噪效果
Fig. 3 De-noising result by wavelet soft threshold method directly

对图2 NQR 信号进行 EMD 分解,所得分量见图4,含 $IMF_1 \sim IMF_9$ 个固有模态函数与残余分量 RES。由图4看出,噪声主要分布在 IMF_1, IMF_2 分量中,用直接 EMD 去噪方法,将 IMF_1, IMF_2 分量舍弃,所得 NQR 信号见图5,因两高频分量中有用信号被删除,致信号强度下降;因此该去噪方法较粗糙。

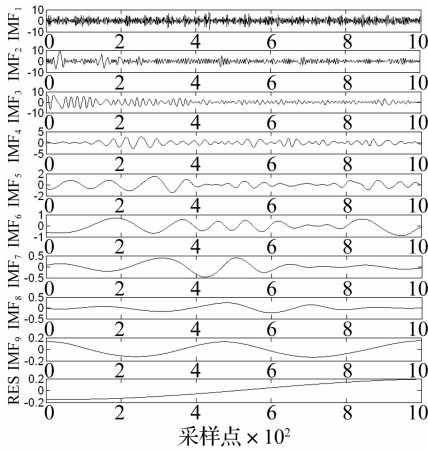


图4 固有模态函数分量及残余量
Fig. 4 IMF components and a residue component

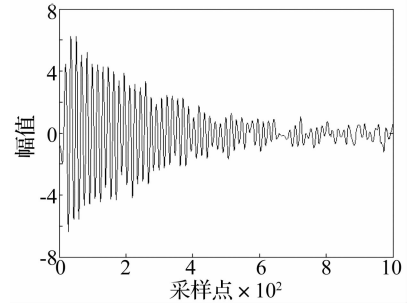


图5 舍弃 IMF_1, IMF_2 分量所得去噪效果
Fig. 5 De-noising result by excluding IMF_1 and IMF_2 components

用 db3 小波分别对 IMF_1, IMF_2 分量进行软阈值去噪处理,所得剩余信号见图6、图7。由两图看出,两高频分量中确实含有有用信号特征信息。将去噪后 IMF_1, IMF_2 分量与低频分量重构信号,所得 NQR 信号见图8,可见信号较光滑,几乎无毛刺。

对三种去噪方法得到的时域 NQR 信号进行时频域转换,得到的频域信号如图9、10、11所示,通过分析对比发现,图9的噪声强度最大,图10的噪声强度有所下降,但 NQR 信号强度最小,而图11的噪声基本可以忽略,且 NQR 信号幅值最大,在频域中较好地保留了有用信号的特征信息,克服了单独小波软阈值去噪和 EMD 去噪的缺陷。

采用信噪比评估各种方法的去噪性能,计算结果见表1。由表1看出,本文方法抑制噪声更有效,炸药 NQR 信号信噪比得以提高,去噪效果较好,从而验证本文方法的有效性及其可行性。

表1 小波、EMD 及本文方法去噪性能比较
Tab. 1 Denoising performance of wavelet, EMD and proposed de-noising method

去噪方法	小波	EMD	EMD 与小波联合
信噪比/dB	16.3024	15.1887	20.2703

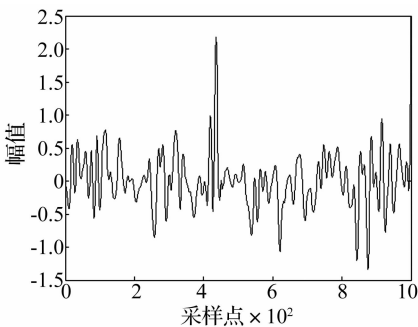


图6 IMF_1 小波软阈值去噪效果
Fig. 6 IMF_1 de-noising result by wavelet soft threshold

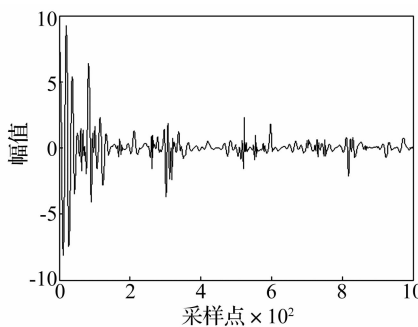


图7 IMF_2 小波软阈值去噪效果
Fig. 7 IMF_2 de-noising result by wavelet soft threshold

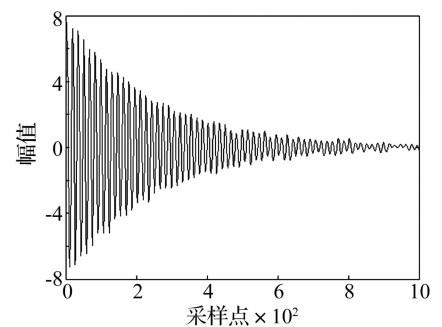


图8 EMD 与小波软阈值联合去噪效果
Fig. 8 De-noising result by EMD and wavelet soft threshold

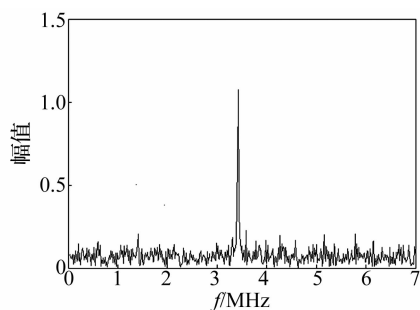


图 9 小波软阈值去噪后 NQR 信号频谱
Fig. 9 Frequency spectrogram of denoised NQR signal by wavelet soft threshold

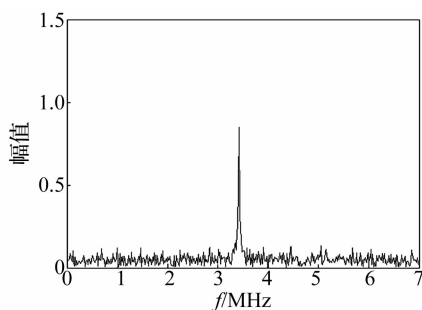


图 10 EMD 去噪后 NQR 信号频谱
Fig. 10 Frequency spectrogram of denoised NQR signal by EMD

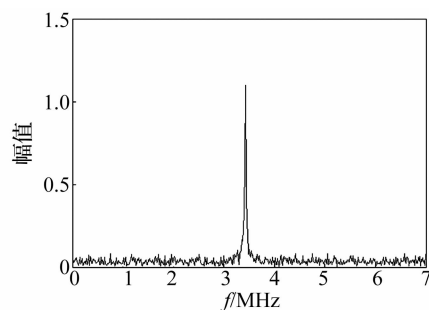


图 11 联合去噪后 NQR 信号频谱
Fig. 11 Frequency spectrogram of denoised NQR signal by EMD and wavelet soft threshold

5 结 论

本文基于 NQR 信号非线性与非平稳性特点, 提出基于经验模态分解 (EMD) 与小波变换联合的炸药 NQR 信号去噪方法。通过对探测的黑索金 NQR 信号进行经验模态分解, 分析各阶 IMF 分量特征信息, 对噪声起主导作用的高频 IMF 分量进行小波软阈值去噪, 将去噪后高频 IMF 分量与低频 IMF 分量重构信号, 既可保留有用信号特征信息又能有效抑制噪声、提高信噪比, 很大程度上克服小波阈值去噪及直接 EMD 去噪的缺陷。该方法在炸药 NQR 信号去噪中的良好性能, 可为 NQR 信号处理奠定理论、技术基础。

参 考 文 献

- [1] Mozzhukhin G V. Three-frequency composite multipulse nuclear quadrupole resonance technique for explosive detection[J]. *Applied Magnetic Resonance*, 2012, 43(4): 547-556.
- [2] Rati R, Pink R H, Scheicher R H, et al. Nuclear quadrupole interactions in nuclear quadrupole resonance detection of energetic and controlled materials: theoretical study[J]. *Applied Magnetic Resonance*, 2012, 43(4): 591-617.
- [3] 李康宁, 俞硕, 李兴, 等. 核四极共振技术在黑火药探测中的研究[J]. *核科学与工程*, 2011, 31(3): 270-273.
LI Kang-ning, YU Shuo, LI Xing, et al. Research in the detection of black powder based on nuclear quadrupole resonance technology[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2011, 31(3): 270-273.
- [4] Peshkovsky A S, Cattena C J, Cerioni L M, et al. Noise-resilient multi-frequency surface sensor for nuclear quadrupole resonance [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2008, 194(2): 222-229.
- [5] Mozzhukhin G V, Rameev B Z, Dogan N, et al. Secondary signals in two-frequency nuclear quadrupole resonance on ^{14}N nuclei with $I=1$ [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2008, 193(1): 49-53.
- [6] 李志强, 金余桓. 基于核电四极矩共振技术的爆炸物检测系统的信号处理及信号识别算法[J]. *核电子学与探测技术*, 2004, 24(6): 587-590.
LI Zhi-qiang, JIN Yu-heng. The data processing of the

explosive detection system based on nuclear quadrupole resonance[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2004, 24(6): 587-590.

- [7] 赵振维, 娄扬, 金燕波, 等. 基于自适应滤波技术的 NQR 信号处理[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(3): 429-432.
ZHAO Zhen-wei, LOU Yang, JIN Yan-bo, et al. Signal processing for NQR based on adaptive filtering[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(3): 429-432.
- [8] Mozzhukhin G V, Molchanov S V. Application of the wavelet transform for detecting signals of nuclear quadrupole resonance[J]. *Russian Physics Journal*, 2005, 48(1): 53-56.
- [9] 杨振磊, 徐更光, 王振华, 等. 基于小波变换的炸药 NQR 信号处理[J]. *原子能科学技术*, 2010, 44(3): 354-357.
YANG Zhen-lei, XU Geng-guang, WANG Zhen-hua, et al. Processing method of ^{14}N nuclear quadrupole resonance signal in explosive[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44(3): 354-357.
- [10] 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]. *Proc R Soc London, Ser A*, 1998, 454: 903-995.
- [11] Huang N E, Wu M C, Long S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and the Hilbert spectral analysis[J]. *Proc R Soc London, Ser A*, 2003, 459: 2317-2345.
- [12] Donoho D L, Johnstone I M, Kerkyacharian G, et al. Wavelet shrinkage: asymptopia [J]. *Journal of the Royal Statistical Society, Ser B*, 1995, 57(2): 301-337.
- [13] 王宏强, 尚春阳, 高瑞鹏, 等. 基于小波系数变换的小波阈值去噪算法改进[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(10): 165-168.
WANG Hong-qiang, SHANG Chun-yang, GAO Rui-peng, et al. An improvement of wavelet shrinkage denoising via wavelet coefficient transformation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(10): 165-168.
- [14] Boudraa A O, Cexus J C. EMD-based signal filtering [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(6): 2196-2202.
- [15] Samuel D S, Andreas J, John A S, et al. Exploiting spin echo decay in the detection of nuclear quadrupole resonance signals [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(4): 925-933.