

# A Study of Time-varying Seismic Wavelet and Reflection Coefficient Separation Method Based on EMD and Smooth Filtering

Lu Zi-hao<sup>\*</sup>, Dai Yong-shou, Gao Xu, Zhang Peng, Tan Yong-cheng, Zhang Hong-qian

College of Information and Control Engineering, China university of Petroleum, Qingdao, China

## Email address:

upc\_zihaolu@sina.com (Lu Zi-hao), daiys@upc.edu.cn (Dai Yong-shou), gaoxu12321@163.com (Gao Xu),

upczhangpeng@163.com (Zhang Peng), tangyongcheng1229@126.com (Tan Yong-cheng), 1169482941@qq.com (Zhang Hong-qian)

<sup>\*</sup>Corresponding author

## To cite this article:

Lu Zi-hao, Dai Yong-shou, Gao Xu, Zhang Peng, Tan Yong-cheng, Zhang Hong-qian. A Study of Time-varying Seismic Wavelet and Reflection Coefficient Separation Method Based on EMD and Smooth Filtering. *Science Discovery*. Vol. 5, No. 2, 2017, pp. 118-128.

doi: 10.11648/j.sd.20170502.16

Received: March 30, 2017; Accepted: April 19, 2017; Published: April 20, 2017

**Abstract:** The accuracy of seismic wavelet extraction influences the accuracy of analysis and dealing for seismic data directly. In fact, the wavelet in seismic data has the characteristics of time-varying. There are many methods for wavelet extraction, but the results using existing methods are not satisfying. This paper studies a new method for the separation of seismic wavelet and reflection coefficient from seismic data using Empirical Mode Decomposition (EMD) which have the superiorities of adaptive decomposition and multi-scale analysis. Firstly, we cut the seismic data into different segmentations and regard each segmentation as stationary signals while combining the characteristics of wavelet and reflection coefficient based on the hypothesis of stationarity. Then, we do preprocessing which is an important step. After preprocessing, Mirror extension inhibit the endpoint effect. Finally, using EMD decomposes the logarithmic amplitude spectrum of each segmentation and selecting different Intrinsic Mode Functions (IMF) which are smooth and continuous restructures the wavelet. The simulation results show that this method can implement the separation of seismic wavelet and reflection coefficient precisely. This paper lay a foundation for later high-precision extraction of seismic wavelet.

**Keywords:** Time-Varying Wavelet Extraction, Non-stationary Signal, Preprocessing, Mirror Extension, EMD

## 基于EMD和平滑滤波的时变子波和反射系数分离方法的研究

卢自豪<sup>\*</sup>, 戴永寿, 高旭, 张鹏, 谭永成, 张红倩

信息与控制工程学院, 中国石油大学(华东), 青岛, 中国

## 邮箱

upc\_zihaolu@sina.com (卢自豪), daiys@upc.edu.cn (戴永寿), gaoxu12321@163.com (高旭), upczhangpeng@163.com (张鹏), tangyongcheng1229@126.com (谭永成), 1169482941@qq.com (张红倩)

**摘要:** 地震子波提取的准确性直接影响地震资料处理质量和解释精度。实际地震资料中的子波具有时变特征, 针对现有时变子波提取方法提取精度欠缺的问题, 本文利用经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 具有自适应分解和多尺度分析等优势, 提出了一种基于EMD和平滑滤波的时变子波和反射系数分离方法。首先将非平稳地震记录进行分段, 结合地震记录分段平稳假设下子波与反射系数的特性, 对每段信号进行预处理, 再经镜像延拓抑制端点效应, 对每段信号的对数振幅谱进行EMD分解, 选取光滑连续的本征模函数分量重构子波对数振幅谱。仿真实验结果表明, 该方法能准确地分离地震子波与反射系数, 验证了方法的有效性和可行性, 为后续高精度提取地震子波奠定基础。

**关键词:** 时变子波提取, 非平稳信号, 预处理, 镜像延拓, EMD

## 1. 引言

子波提取的准确程度决定了地震记录处理和解释的准确性, 准确的地震子波估计对于高分辨率、高信噪比、高保真度的油气勘探数据处理有极为重要的意义。由于地下介质对地震波能量的吸收衰减作用, 实际地震资料中的地震子波具有时变特征。目前, 研究人员针对非平稳地震记录处理和时变子波提取提出了很多方法。胡启宇[1]和Liang[2]等使用同态理论和高阶统计量估算时变和空变地震子波; Baan[3]提出了基于峰值最大化的时变子波估算方法; 高静怀等[4]基于反射地震记录变子波模型提取地震子波进而提高地震记录分辨率; 刘浩杰等人[5]提出的多尺度联合分析方法即利用井间地震资料、地面地震资料、VSP等联合反演以补偿高频损失; 此种方法在一定程度上拓宽了频谱, 有效地补偿了子波的高频衰减, 但此方法需要测井资料, 难以对整个区域有效补偿。目前有两种有效的子波提取方法: 对非平稳地震记录分段, 视每段为平稳信号, 然后分段提取子波; 对非平稳地震记录进行时频分析提取子波。针对分段提取方法已存在许多研究, 如冯晖[6]等提出分时窗提取地震子波的方法利用地震和测井资料精确提取井旁地震子波; 高国民等[7]给出另一种在不同时窗内通过改变带通子波频率范围的时变子波提取法, 但该方法使用过程中对于不同时段需要设计不同的滤波参数很难得到一个合理的时变子波。由于人为选取时窗个数难以根据地震记录的平稳特性恰当进行分段, 使子波估计精度受到一定限制。戴永寿等[8]提出了一种自适应分段的子波估计方法, 该方法不受地震记录数据长度和非平稳程度的限制, 可将非平稳地震记录自适应地划分为若干近似平稳的记录片段, 充分利用地震记录的统计信息, 提高地震子波估计精度。亦有研究人员将时频分析与衰减补偿结合进行时变子波提取, 如白桦等人[9]提出了基于短时傅里叶变换STFT的高频补偿方法, Stockwell等人[10]提出了基于S变换的地层吸收补偿方法, 不同的时频变换各有优缺点, 其时频分辨率和适应性也各不相同, 这就导致了基于时频分析补偿方法的各异性。王蓉蓉等[11]结合分段与时频分析的优点提出一种时频分析与自适应分段相结合的时变子波提取方法, 提高了子波提取的精度。谱模拟技术在子波提取领域具有重要作用, 是目前最常用的子波振幅谱提取方法, Rosa[12]等人经大量实验研究发现子波的振幅谱是一个接近光滑的单峰值曲线, 用数学手段可以将地震子波振幅谱从地震记录振幅谱中拟合出来; 赵波等[13]使用谱模拟方法估算地震子波; 孙成禹[14]进行了改进, 利用谱模拟提取子波振幅谱, 并在频率域实现地震记录的零相位反褶积; 李振春等[15]先对地震记录做S变换获得时频谱, 然后利用谱模拟获得子波振幅谱, 但其假设子波零相位; 戴永寿等[16]提出基于子波混合相位假设的时频谱模拟提取技术。

综合分析国内外研究现状可以看出, 以谱模拟为代表的时变子波提取方法对子波振幅谱的假设过于严格, 影响

了子波提取精度。由于时变子波的振幅谱具有光滑连续的特点, 反射系数序列的振幅谱是剧烈振荡的, 而EMD通过对信号的自适应分解恰好能够实现光滑连续分量和振荡剧烈分量的分解和分离, 因此本文探索一种基于EMD的时变子波与反射系数分离的新方法, 为更深入时变子波提取研究奠定了基础。

## 2. 利用EMD分离时变子波与反射系数的方法原理

经验模态分解(EMD)[17]是一种非常好的非平稳信号处理方法, 该方法可以在不需要知道任何先验知识的情况下, 依据输入信号自身的特点, 自适应地将信号分解成若干个本征模态函数, 不同于小波变换等需要基函数的变换工具, EMD算法将分解后得到的本征模函数作为基函数, 因此它具有自适应的特性, 另外, 利用本征模函数的平稳特性可以对信号做进一步分析。小波变换利用不同尺度的小波组合逼近待处理信号, 选取不同的小波提取子波, 结果不一。EMD结合信号本身进行分解和重构, 克服不同基函数带来的结果各异性, 从信号本身出发更加符合信号特性。

### 2.1. EMD的基本原理

EMD的基本思想是将一个信号分解为多个本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和的形式即:

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

式中:  $x(t)$  为目标信号;  $c_i$  为第*i*个IMF分量;  $r_n$  为余波。

获取IMF的流程为:

- 1) 找到目标信号  $x(t)$  的所有局部极大值和局部极小值。
- 2) 将所有极大值与极小值利用三次样条插值拟合成信号的上包络与下包络, 然后求得上下包络的均值  $m_1$ 。
- 3) 判断原信号减去均值后的剩余部分  $n_1 = x(t) - m_1$  是否满足IMF分量的特征, 若满足, IMF1:  $c_1 = n_1$ , 若不满足, 将  $n_1$  当作目标信号返回第1)步。
- 4) 将原始目标信号  $x(t)$  减去IMF的剩余部分重新当作目标信号, 返回第1)步。

判断是否满足IMF分量的两个条件为:

- 1) 在整个数据序列中, 极值点的数量(包括极大值点和极小值点) 与过零点的数量必须相等, 或最多相差不多于一个。
- 2) 在任一时间点上, 信号局部极大值确定的上包络线和局部极小值确定的下包络线的均值为零。

利用EMD分解信号的过程中先得到的分量频率高, 后得到的分量频率低, 即:

对于  $IMFn$ ,  $n$  越大, 分量的频率  $f$  越低

将各分量相加能够得到原信号, 选择不同的分量进行重构可以获得不同频率段的信号。

## 2.2. 时变子波与反射系数序列分离

Margrave等(2011)提出的非平稳褶积模型描述了非平稳地震记录、时变子波与反射系数之间的关系:

$$s(t) = \int \hat{\omega}(f) a_Q(u, f) r(u) \exp[2\pi i f(t-u)] df du \quad (2)$$

式中,  $s(t)$  表示地震记录;  $\hat{\omega}(f)$  为地震子波的傅里叶变换;  $r(u)$  为随机生成的非高斯、独立同分布的反射系数序列;  $Q$  为大地滤波系数, 与岩层特性有关;  $a_Q(u, f)$  为表征地层吸收衰减的传递函数。

本文采用分段的方法从非平稳地震记录中分离时变子波与反射系数, 在对地震记录分段之后, 将每段信号视为平稳, 在平稳的假设下, 地震记录、子波与反射系数具有如下关系:

$$x_t^i = r_t^i * b_t^i \quad (3)$$

式中:  $x_t^i$  为第  $i$  段地震记录;  $r_t^i$  第  $i$  段中的反射系数;  $b_t^i$  为第  $i$  段中的地震子波。

本文所研究的子波与反射系数分离方法建立在分段之后平稳的假设下, 所以式(3)是本文理论推导与实验仿真的基础, 并且下文所出现的信号均是整段非平稳地震记录中的一段。对式(3)做如下变换

1) 利用傅里叶变换得到地震记录的振幅谱

$$X = R \cdot B \quad (4)$$

2) 对式(4)两端取对数

$$\log X = \log R + \log B \quad (5)$$

可以看出地震记录的对数振幅谱是子波对数振幅谱与反射系数对数振幅谱的和。子波的对数振幅谱具有光滑连续的特性, 反射系数的对数振幅谱是剧烈振荡的。

而EMD恰好能够将信号分解成频率从高到低的IMF分量, 即子波对数振幅谱和反射系数对数振幅谱的关系与EMD的自适应分解特性相契合, 因此可以利用EMD方法提取地震子波, 方法步骤如下:

- 1) 获得地震记录的对数振幅谱;
- 2) 对1) 中对数振幅谱使用EMD分解成若干IMF分量;
- 3) 从2) 中的IMF分量中选取低频分量重构子波对数振幅谱;
- 4) 将重构的子波对数振幅谱变换回时域完成子波提取。

进一步分析发现, 根据上述步骤提取子波的准确性仍然有待提高, 分析主要有以下两个方面的原因:

1) 原信号中的高频成分幅值较大, 反射系数的高频成分对子波中的高频分量影响较大, 分解之后不利于选择合

适的分量进行合成, 合成时容易造成子波中高频成分的丢失或过量包含。

2) 由于端点效应的存在, EMD分解之后会在端点处存在较大误差。EMD的分解过程是一个迭代的过程, 端点处的误差会不断积累, 并且向数据内部传递, 影响提取精度。

## 3. 方法的改进

### 3.1. 预处理

地震记录对数振幅谱是在地震子波平缓的对数振幅谱上叠加了剧烈振荡的反射系数对数振幅谱, 并且振荡部分的幅值较大, 较大程度地干扰了平滑成分的变化趋势, 如果直接进行EMD分解, 不利于从得到的分量中选择合适的分量重构子波。

为了减轻振荡成分对在信号中的影响程度, 对信号进行预处理, 先对信号做窗口中值滤波, 消除信号中的奇异点, 为后续的均值滤波做准备, 然后对中值滤波后的信号做窗口均值滤波, 使信号变得平滑, 这样就可以减轻振荡成分在信号中的影响, 有利于选择合适的分量重构子波。进行预处理之后, 信号中的高频成分尤其指反射系数序列所带来的高频成分会主要集中在前面的IMF中。

### 3.2. 镜像延拓抑制端点效应

在经验模态分解过程中, 求包络平均是通过原数据中的上极值点与下极值点分别进行三次样条插值拟合然后求均值。在三次样条插值过程中, 如果数据的两个端点不是极值点, 这样端点处的极值点就无法确定, 拟合时就会出现误差。由于EMD获得分量是重复的几个过程, 上一次分解所造成的误差会发生积累, 在下一分解时造成更大的误差, 这种现象称为端点效应。

抑制端点效应通常有两种方法, 一种是对数据进行延拓在端点处增加极值点, 另一种是换用其他的插值方法, 但是后者虽能在一定程度上抑制端点效应, 性能却比不上三次样条插值。常用的延拓方法有:

- 1) 镜像延拓法: 该方法是将信号对称的延拓成一个环形信号, 拟合出的上下包络没有端点从而避免了端点效应。
- 2) 多项式拟合法: 该方法是利用多项式拟合法算出端点处的函数值, 将该值作为端点处的极值, 但是该方法对于周期性信号效果较好, 对于随机信号, 拟合出的端点值具有很大的随机性。

这里我们采用镜像延拓的方法来抑制端点效应, 并取得了良好的效果。

### 3.3. 重构子波

根据上述思路, 选取EMD产生的低频分量重构子波对数振幅谱, 需要找到处于分界处的IMF。分界处IMF之前的分量可以认为全部是反射系数对数振幅谱的成分, 之后的可以认为全部是子波的, 分界处的IMF中, 所含的子波对数振幅谱成分与反射系数对数振幅谱成分比重相当, 必须单独处理。

确定分界IMF本文采用统计极大值点个数法, 1000点序列中极大值点个数为12~18时可以判定为分界点。然后将分界处IMF中第一个极大值点与其后第一个极小值之间的零点作为分割点, 分割点之前部分归为子波对数振幅谱的成分, 之后为反射系数对数振幅谱的成分。

另外经过镜像延拓之后数据序列的长度会变化, 经过分解并合成的子波对数振幅谱会发生偏移, 因此必须对序列进行对齐, 否则将会产生较大误差影响子波提取的精度。本文采用波形中心点对齐法, 这里的中心点不是长度的中点而是波形变化上的中心点。由于子波的对数振幅谱是对称的而且是有限长序列, 通过寻找数据中点两侧的最大值索引来求取序列的中心点  $X_{center}$ 。

$$X_{center} = (index_{left\_max} + index_{right\_max}) / 2 \quad (6)$$

$index_{left\_max}$  为左侧 (将数据在中点处一分为二) 的最大值的位置索引。

$index_{right\_max}$  为右侧最大值的位置索引。

获得地震子波的对数振幅谱之后, 利用原始子波的相位谱进行傅里叶逆变换获得子波。本文没有涉及子波相位谱的提取, 假设相位已知并且为原始子波的相位谱。

## 4. 仿真分析

### 4.1. 子波与反射系数的时间序列与对数振幅谱

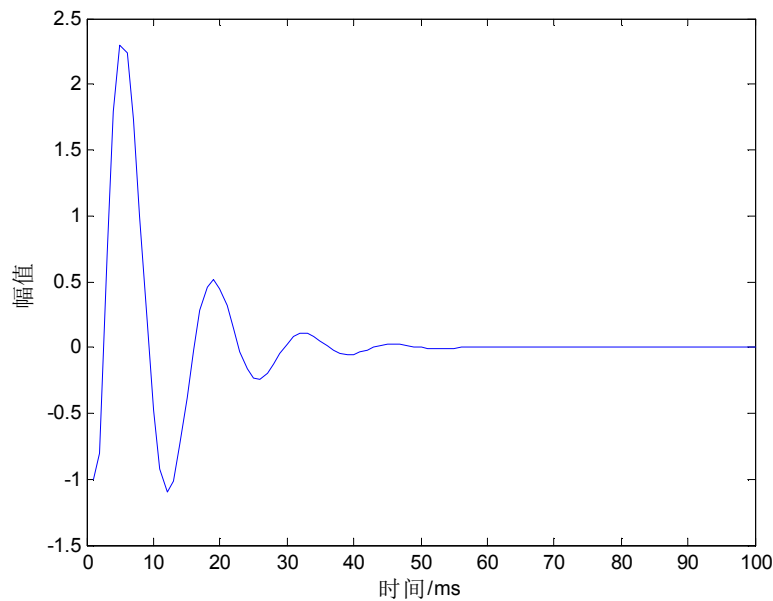


图1 原始的地震子波。

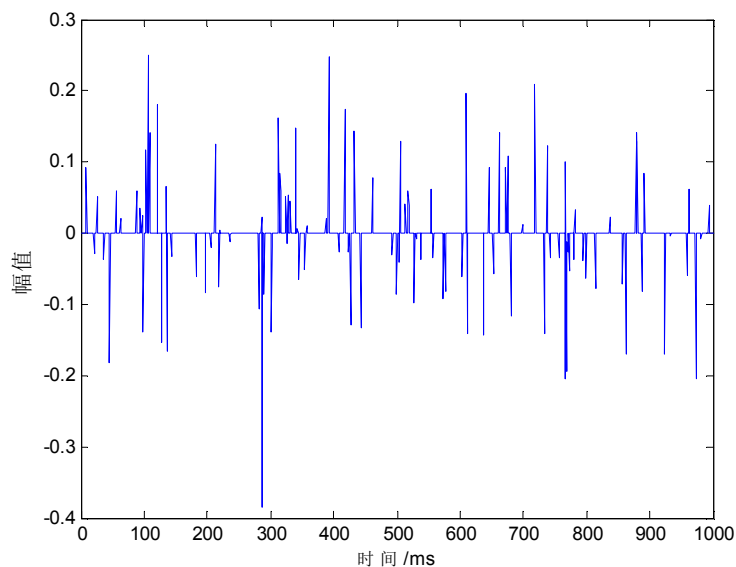


图2 反射系数序列。

用于仿真的子波  $b_i^j$  与反射系数序列  $r_i^j$  长度为1000，根据式 (3) 得到地震记录数据。利用本文提出的算法从合成的地震记录数据中提取地震子波与原始的地震子波进行对比来判断子波提取的准确程度。

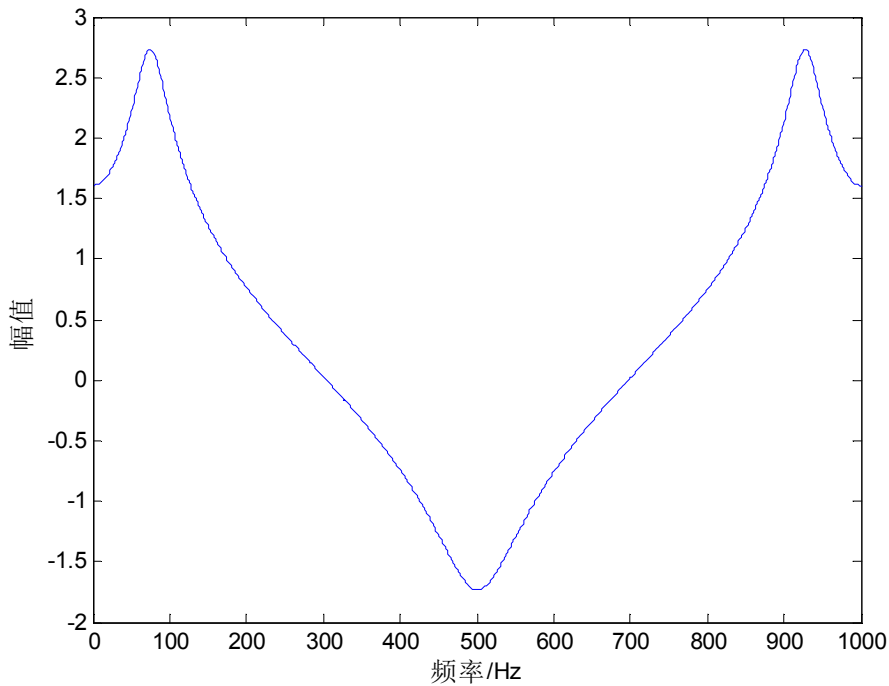


图3 地震子波对数振幅谱。

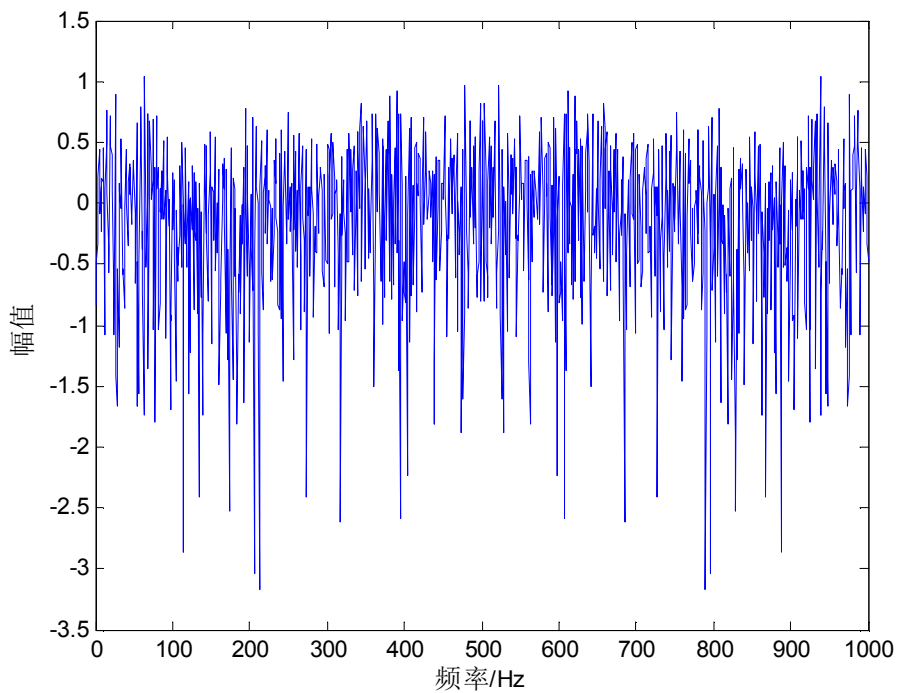


图4 反射系数序列对数振幅谱。

对比图3与图4子波与反射系数的对数振幅谱可以发现，两者的变化趋势明显不同，一个平滑连续，一个剧烈振荡，如前所述，基于两者这点差异，利用EMD将两种不同特征的信号提取出来。

#### 4.2. 利用EMD分离子波与反射系数的仿真测试

反射系数与子波褶积获得地震记录数据，求得地震记录的对数振幅谱之后，进行EMD分解。

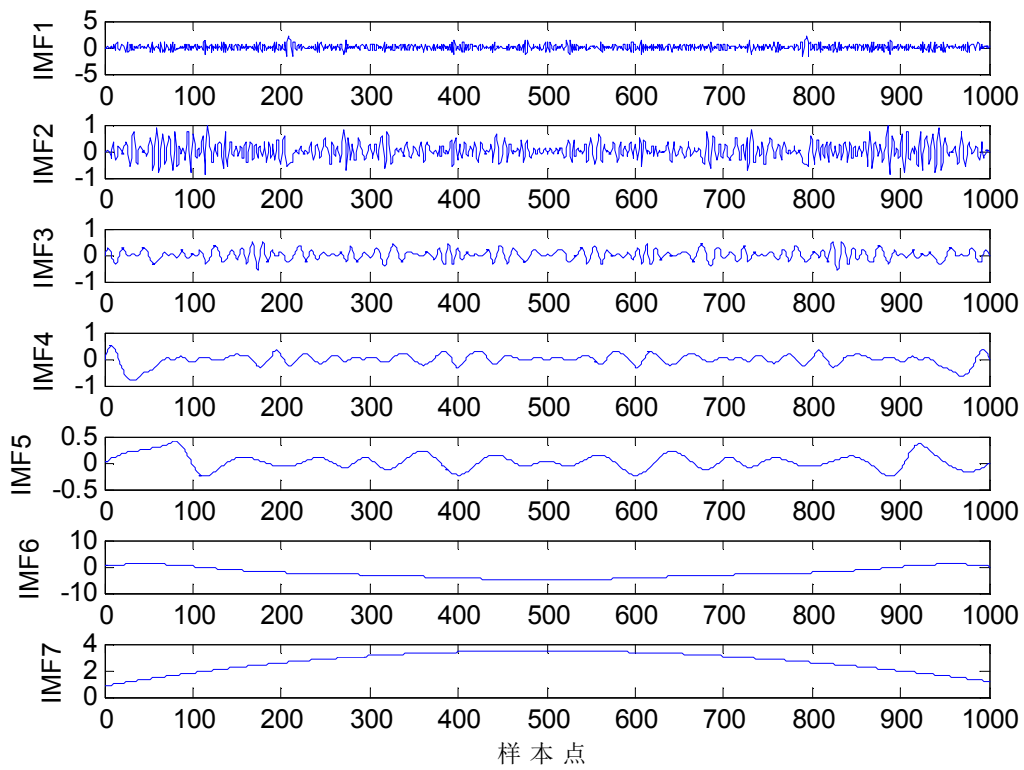


图5 地震记录对数振幅谱EMD分解后的各个IMF分量。

从图中可以看出各个IMF分量的频率是在逐渐降低，EMD成功地将信号分解成不同频率段的分量。如前文所述，选取不同的IMF重构子波，对比不同重构方案的效果：

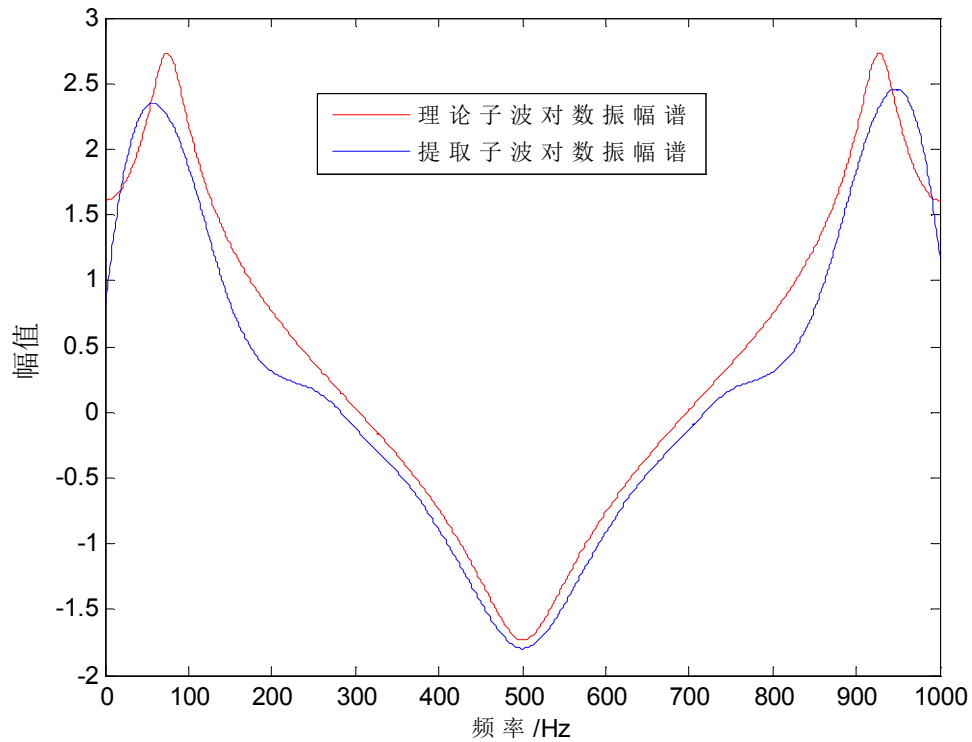


图6 利用后两个IMF分量进行重构的结果。

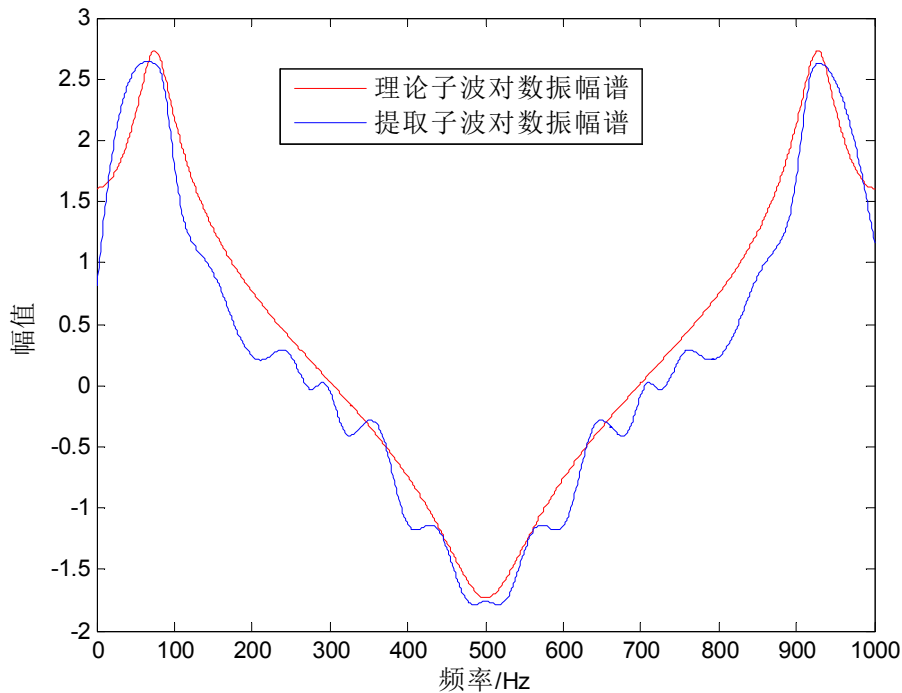


图7 利用后三个IMF分量进行重构的结果。

从图6中看出利用后两个IMF进行重构时局部效果好，两端以及中部效果很差，因为这两个分量中的局部高频成分导致局部振荡，两端的拟合效果不理想。利用前文所述的判断分界IMF的方法（1000点序列中极大值点个数为12~18），图7中选取后三个分量重构子波，加入更多的高频成分后，局部振荡更剧烈，IMF5两端的高频成分使两端的重构效果趋好，中部的高频成分反而使效果变差，另外，

由于端点效应的存在，端点处的变化趋势差异很大，一个快速下降一个趋平。

上述重构子波对数振幅谱的方法仍存在很多问题，反射系数对数振幅谱中的高频成分对子波提取影响较大，端点效应的存在使得端点处的变化趋势差异巨大，在此基础上利用本文提出的新方法进行改善。

### 4.3. 改进方法分离子波与反射系数的仿真测试

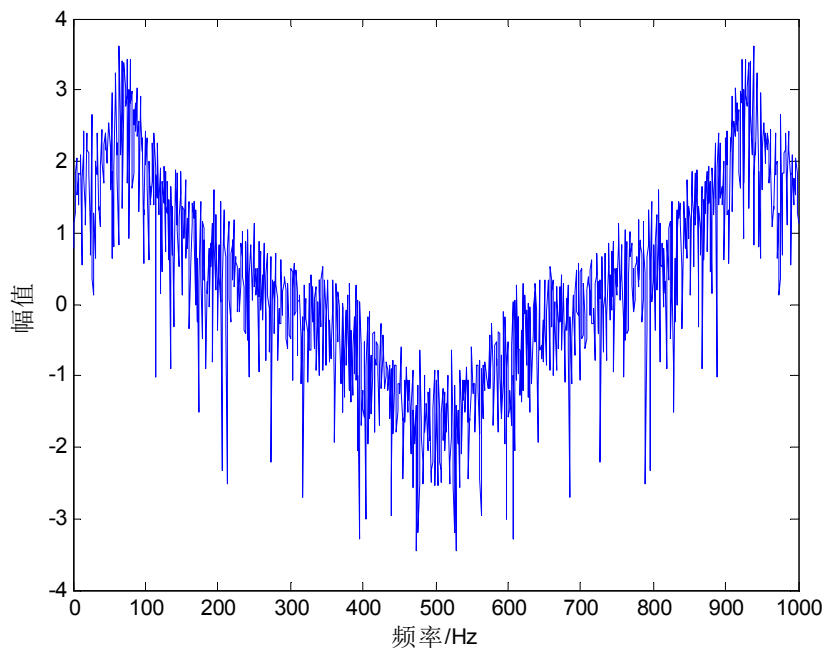


图8 地震记录数据的对数振幅谱。

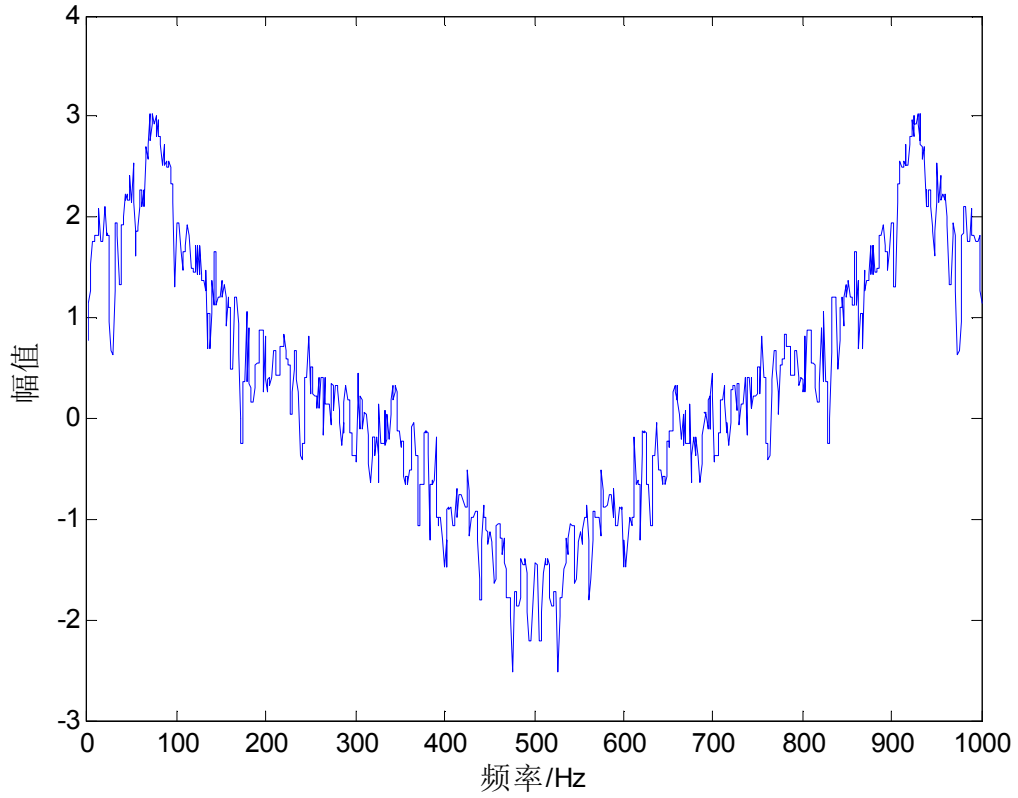


图9 中值滤波之后的地震记录对数振幅谱。

图9经过中值滤波之后与图8相比减少了很多奇异点，可以减少反射系数对数振幅谱高频成分的影响，图10进行均值滤波之后信号变得更加平滑。将图10中的信号经过镜像延拓后进行EMD分解。

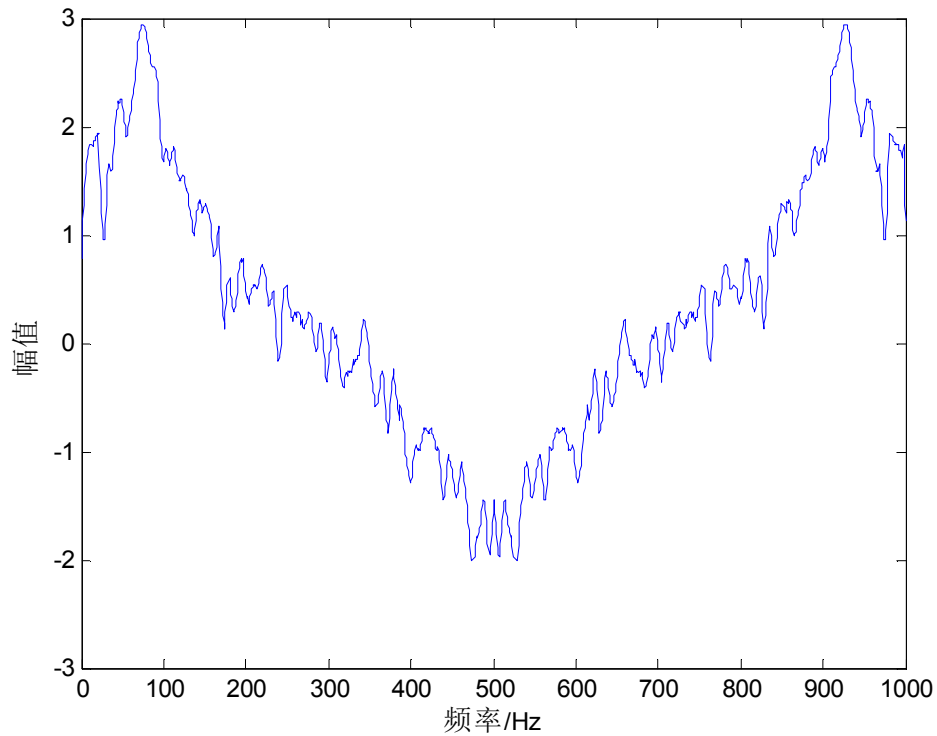


图10 均值滤波之后的地震记录对数振幅谱。



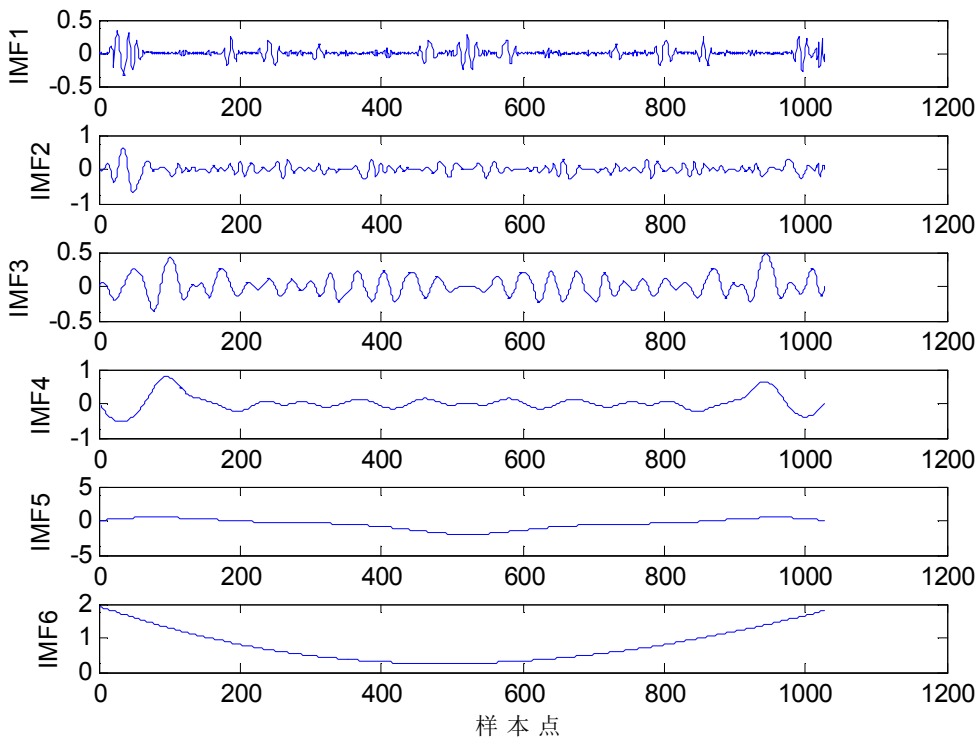


图11 预处理、镜像延拓后EMD分解获得IMF分量。

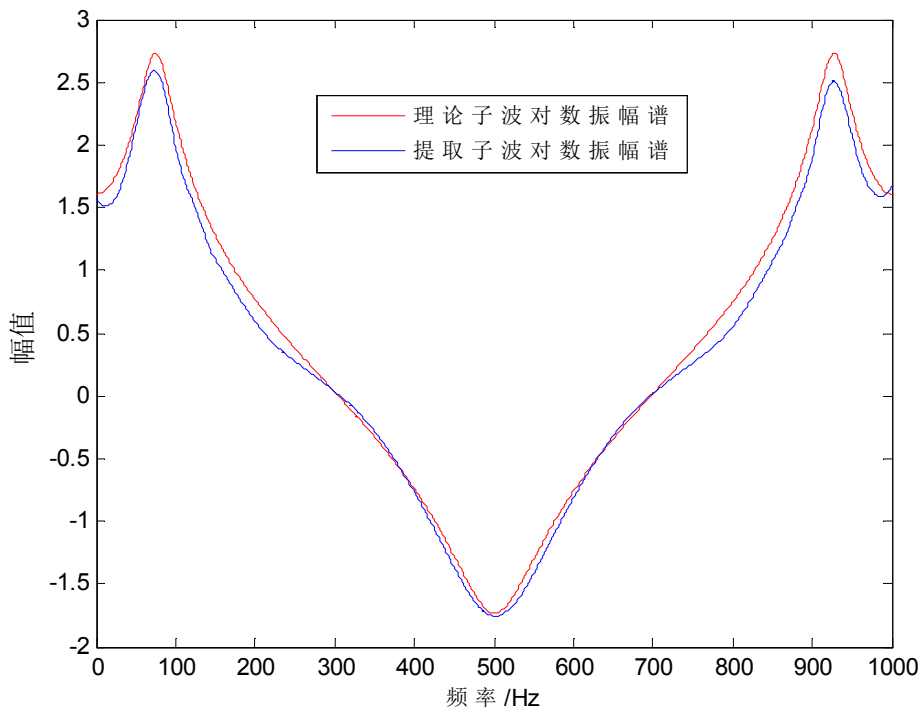


图12 子波对数振幅谱提取最终结果。

图11与图5相比，高频成分比重减少，对重构子波的影响会降低，不同分量之间的频率梯度变大，有利于选取分界点。

利用上述判断分界IMF的方法找到IMF4（将分界处中第一个极大值点与其后第一个极小值之间的零点作为分

割点，分割点之前部分归为子波对数振幅谱的成分，之后为反射系数对数振幅谱的成分），从IMF4中分割一部分与IMF5与IMF6一起重构子波。

由于镜像延拓改变了信号的长度与分布，信号没有进行对齐将会影响整段地震记录数据子波的提取，利用前文

所述的对齐方法进行信号的裁剪与对齐, 最终取得良好的结果, 如图12。

从图12可以看出, 改进后的方法提取子波对数振幅谱取得了良好的效果, 在信号中部和两端的拟合程度都非常

高。由于本文没有涉及子波相位谱提取, 利用理论子波的相位谱将提取的子波对数振幅谱变换回时域, 得到最终子波提取结果。从图13可以看出, 本文提出的方法取得了非常好的实验结果。

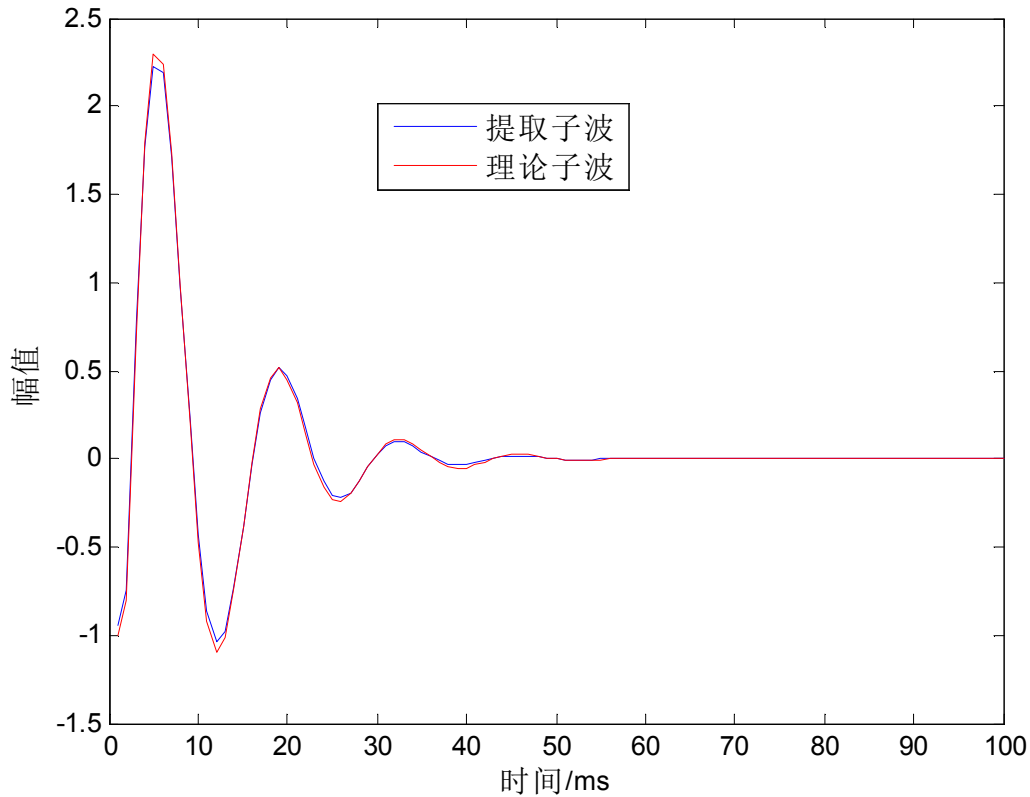


图13 子波提取结果。

## 5. 结论

本文探索了一种时变子波提取新方法, 并取得了良好的效果。首先将地震记录分段, 对每段地震记录的对数振幅谱进行中值滤波、均值滤波预处理, 利用镜像延拓方法抑制EMD的端点效应, 对延拓之后的信号进行EMD分解, 找出分界处的IMF并对其进行分割, 然后与分界IMF以下分量重构子波对数振幅谱, 最后经过信号的裁剪与对齐提取子波对数振幅谱, 进一步利用已经提取得到的子波相位谱经过傅里叶逆变换获得时域子波, 实现时变子波与反射系数的分离。但是本文的研究工作仍有待完善, 对于寻找并分割分界处IMF的算法有待进一步的改进; 子波相位谱的提取是子波提取中的重要一环, 本文没有对子波相位谱的提取进行表述, 相关工作仍在进行中, 本文的研究工作将对时变子波提取新方法和新技术的发展起到积极的促进作用。

## 致谢

本文由中国石油大学(华东)大学生创新创业训练项目(20151182)资助。

## 参考文献

- [1] 胡启宇, 同态反褶积的一种可能途径[J], 石油物探, 1984, 23(2):109-111。
- [2] Liang GH, Cai XP, Li QY, Using high-order cumulants to extrapolate spatially variant seismic wavelet [J]. Geophysics, 2002, 67(6):1869-1876.
- [3] Mirko van der B. Time-varying wavelet estimation and deconvolution by kurtosis maximization[J]. Geophysics, 2008, 73(2): 11-18.
- [4] 高静怀, 汪玲玲, 赵伟. 基于反射地震记录变子波模型提高地震记录分辨率[J]. 地球物理学报, 2009(5):1289-1300.
- [5] 刘浩杰, 王延光, 韩文功. 基于系统辨识提高地震资料分辨率研究[J]. 地球物理学进展, 2010(3):994-999.
- [6] 冯晖, 刘财, 杨宝俊, 等. 分时窗提取地震子波及在合成地震记录中的应用[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1):71-77.
- [7] 高国民, 胡望水, 黄玉欣, 等. 合成地震记录子波提取方法[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 1:130-132.

- [8] 戴永寿, 王晓波, 丁进杰, 王蓉蓉, 张鹏. 自适应分段的时变子波估计方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(4):607-612.
- [9] 白桦, 李鲲鹏. 基于时频分析的地层吸收补偿 [J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(6):642-648.
- [10] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 1996, 44(4): 998-1001.
- [11] 王蓉蓉, 戴永寿, 李闯, 张鹏, 谭永成. 时频分析与自适应分段相结合的时变子波提取方法. 石油地球物理勘探 [J], 2016, 51(5): 850-862.
- [12] Rosa A L R, Ulrych T J. Processing via spectral modeling [J]. Geophysics, 1991, 56(8): 1244-1251.
- [13] 赵波, 俞寿朋, 聂勋碧. 谱模拟反褶积方法及应用 [J]. 石油物理勘探, 1996. 56(8): 1244~1251.
- [14] 孙成禹. 谱模拟方法及其在提高地震资料分辨率中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(1):27-35.
- [15] 李振春, 赵义平, 徐文才. 2015. 基于S域谱模拟技术的时变子波提取方法研究. 地球物理学进展 [J], 30(6):2706-2713, doi:10.6038/pg20150631.
- [16] 戴永寿, 张漫漫, 张亚南, 丁进杰, 王蓉蓉, 张鹏. 基于时频谱模拟的时变混合相位子波提取. 石油地球物理勘探, 2015, 50(5):830-838, 853.
- [17] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proc. Royal Society. London, 1998, 454(12): 903-995.