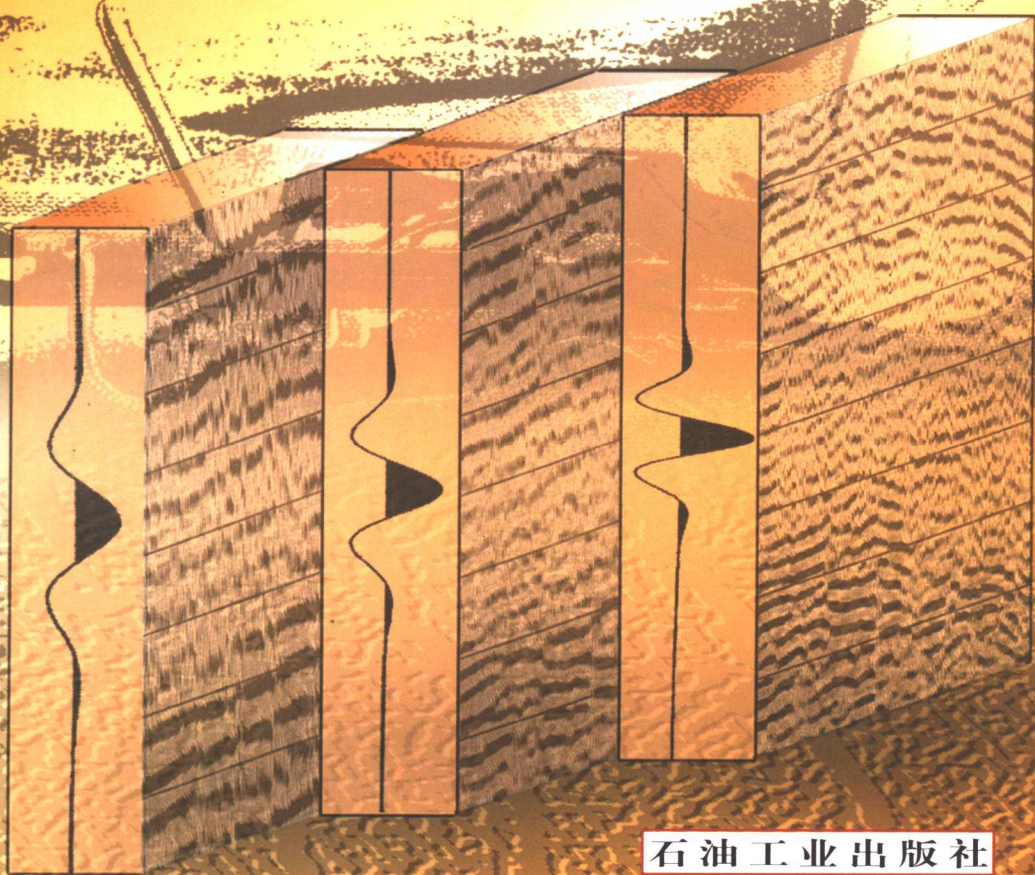


王西文 著

# 地震资料处理和解释中的 小波分析方法



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

# 地震资料处理和解释中的 小波分析方法

王西文 著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

书中介绍了用导数小波函数作为基本小波,对地震资料进行高分辨分频处理和瞬时特征提取;用小波变换与SVD以及能量均衡和空间场的变换有机地结合起来的小波域SVD去噪方法;地震资料在小波域分频处理与重构和最佳重构系数确定的方法;在小波域中的时间域和频率域构造类似于反褶积算子的方法;用瞬时特征参数计算吸收系数,直接预测油气藏的方法;用瞬时特征参数的相干体分析方法;小波域的波阻抗分频反演与重构方法;小波变换的时频分析方法和小波域多属性分频成像方法。在我国一些油田的应用效果证实书中所给出的方法具有理论意义和实际应用价值。

本书对从事地震资料处理和解释的人员来说是一本重要的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

地震资料处理和解释中的小波分析方法/王西文著.  
北京:石油工业出版社,2004.9  
ISBN 7-5021-4742-X

I. 地…

II. 王…

III. 小波分析-应用-地震数据-数据处理

IV. P315.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第077543号

地震资料处理和解释中的小波分析方法

王西文 著

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心排版

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

---

2004年9月第1版 2004年9月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:9

字数:230千字 印数:1-1000册

---

定价:28.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

# 前 言

随着我国石油勘探的不断深入,勘探的难度越来越大,为了增储上产,陆相薄互层的勘探成为主要方向。陆相薄互层地质现象存在于我国绝大多数油田,多少年来一直是科研攻关的方向。“八五”国家重大项目“陆相薄互层油储地球物理学理论与方法研究”和“九五”国家重大项目“陆相油储地球物理理论及三维地质图成图方法研究”充分体现了国家和科学界对这一问题的关注。然而,作为勘探主要手段的地震勘探,更需要研究一套针对陆相薄互层的地震资料处理和解释方法。作者以小波变换作为基本工具,提出若干针对陆相薄互层地震处理和解释的方法。

基于地震子波的模拟公式,可以很好地模拟零相位和混合相位子波,在一定意义上也可以近似模拟最大相位及最小相位子波。模拟出的子波再加上适当的修正项后满足允许条件,可作为小波函数。基于改进的 Morlet 小波,推导出导数小波函数,能更好地适应于地震资料处理。根据构造出的各种小波函数在时间—尺度域对信号的展开特征,导数小波函数作为基本小波,可以对地震资料进行高分辨分频处理和瞬时特征提取。

SVD 滤波是近年来引入地震资料处理中的一种新去噪方法。它已在地震资料处理中得到广泛应用。这种方法可以保留某一方向(如水平方向)的相干信号,压制不相干噪声和其他波。该方法的优点是:不要求数据均匀采样;几乎不损失信号的动力学特征。其缺点是:变换需要确定相干方向。当有效波的相干方向变化大,或在很小的短时窗内有各种方向的有效波时,这种方法效果不是太理想。但是,在有些情况下,尽管有效波的同相轴是水平的,但当其他波的能量很强,地震记录的信噪比较低时,用 SVD 方法想分离出水平方向的波仍是比较困难的。因此,用小波变换与 SVD 以及能量均衡和空间场的变换有机地结合起来,给出一种新去噪方法——小波域的 SVD 去噪方法。这种方法能很好地保持波的动力学特征,适用于低信噪比的地震资料去噪。

在地震资料处理过程中,为了提高目的层段反射同相轴的分辨率,通常采用反褶积的方法。但是,这种方法很难设计出在突出主要目的层频段信息的同时,又兼顾其他频段的有用信息。频率域设计的滤波器同样也存在这样一些问题。针对两类滤波器的不足,作者给出了地震资料在小波域分频处理与重构的方法,并给出井震匹配和最佳重构系数确定的方法。

油田开发期间所面临的一个重要问题,就是必须搞清构造和储层展布。这一点很大程度上取决于三维地震资料的品质。但是,大多数情况下油田由两个以上三维地震工区所组成。不同时间采集的三维地震资料在频率、能量强弱和信噪比上差异很大,如果不能很好地解决工区与工区之间的拼接问题,就无法进行精细构造解释和储层反演。作者还给出了基于小波变换的地震子波处理方法

提高分辨率的常规地震处理方法中,反褶积算子局部化特征差,影响了算子的频率。小波变换中,利用小波函数具有非常好的局部化特征。小波变换分频处理地震资料,也可以得到较好的高分辨率资料,但是分频处理地震资料的时间较反褶积方法长。作者基于小波域分频处理方法,提出了一种在小波域中的时间域和频率域构造类似于反褶积算子的滤波算子,并且推导出了适应于高分辨率地震资料处理的导数小波函数,在时间域采用反褶积方法处理高分辨

率地震资料。并且,给出了提高地震资料处理分辨率的插值小波的方法。

在直接进行 Hilbert 变换提取瞬时特征信号的传统方法中,Hilbert 变换对高频随机噪声十分敏感,即使地震信号中存在微弱的高频噪声,所提取的地震信号瞬时特征仍被噪声淹没。给出在小波域提取地震信号瞬时特征的方法,它利用小波变换的实部(相当于实信号——地震信号)、虚部(实信号的 Hilbert 变换)的特点直接提取地震信号瞬时特征。该方法具有分频、去噪的功能,并且提取的地震信号瞬时特征中保留了频率低于高频随机噪声带的弱波,这种弱波可在瞬时特征剖面(如瞬时频率、瞬时相位、瞬时振幅)中显示出来。

利用瞬时特征参数计算吸收系数,直接预测油气藏和利用瞬时特征参数的相干体分析来解释断层。

广义线性反演是波阻抗反演中常用的一种方法,该方法反演精度高,但对噪声非常敏感,严重时可使反演出的波阻抗值完全失真。小波变换的方法具有十分明显的分频特性和去噪功能。本书利用了广义线性反演和小波变换方法的优点,提出了小波域的波阻抗分频反演与重构方法。理论模型试算和实际资料处理的结果表明,该方法在理论上是正确的,实际应用效果也是好的。

时频分析方法在地质层序分析中有着特殊功效。直接用小波变换进行时频分析,提高了计算精度和速度。

小波域多属性分频成像方法可以识别岩性圈闭和地层圈闭,并检测小的不连续体。经过该方法得到的 3D 地震多属性分频数据体,可进行全 3D 解释(包括水平切片的解释)。该方法具备离散频率能量体(频谱分解技术)特点,且时间定位准确(而频谱分解技术只能做到小时窗时间定位准确)。

作者以小波变换作为基本工具,提出了若干针对陆相薄互层的基于小波变换地震处理和解释的方法,并在我国一些油田进行了应用,取得了很好的效果。

在本书的编写过程中,中国科学院地质地球物理研究所李幼铭教授、兰州大学杨孔庆教授、西安交通大学高静怀教授、中国科学院地质地球物理研究所刘洪研究员给予了指导与帮助;中国石油勘探开发研究院西北分院刘全新教授、大港油田周嘉玺教授也给予了支持与帮助;同时也得到了中国石油勘探开发研究院西北分院的苏明军、刘军迎、李孔绸、杨午阳、高建虎、刘兰峰等同志的帮助,作者在此表示衷心感谢。

作者

2004 年 3 月于兰州

# Foreword

Along with the further progress of oil exploration, the difficult of exploration object is become further big. In order to raise reservoir and production, the interlayered thin beds become a main research direction. The interlayered thin bed phenomena have occur in many oil fields and is problem to study.

The modeling formula based on seismic wavelet can well simulate zero – phase wavelet and hybrid – phase wavelet, and approximate maximal – phase and minimal – phase wavelet in a certain sense. The modeling wavelet can be used as wavelet function after suitable modification item added to meet some conditions . On the basis of the modified Morlet wavelet, the derivative wavelet function has been derived . As a basic wavelet, it can be used for high resolution frequency – division processing and instantaneous feature extraction, in accordance with the signal expansion characters in time and scale domains by each wavelet constructed. Finally, an application example proves the effectiveness and reasonability of the method.

Based on the analysis of SVD (Singular Value Decomposition) filter , by taking the wavelets approaching to seismic wavelets as basic wavelet and combining SVD filter and wavelet transform, a new de – noising method, which is based on multi – dimension and multi – space de – noising method, is proposed. The implementation of this method is discussed in detail. Theoretical analysis and modeling show that the method has strong ability of de – noising and keeping attributes of effective wave. It is a good tool for de – noising when the S/N ratio is poor.

To give prominence to high frequency information of reflection event of important layer and to take account of other frequency information under processing seismic data, it is difficult for deconvolution filter to realize this goal. A filter from Fourier Transform has some problems for realizing the goal. In this book, a new method is put forward, that is a method of processing seismic data in frequency division from wavelet transform and reconstruction.

Because research area is composed of two seismic data, which is different frequency and amplitude energy in different seismic data, and seismic data process together from many seismic data, which enable seismic interpret and seismic inversion to be difficult . A method of wavelet process from wavelet transform is put forward in this book. Finally, the method above described is testified to be efficient in terms of the application of Madong – Tangnan and Zhou Qinqzhuang oil-field.

In ordinary seismic processing methods for resolution improvement, deconvolution operator has poor localization characteristics, thus influencing the operator frequency band width. In wavelet transform, wavelet function has very good localization characteristics. Frequency – division data processing in wavelet transform also brings quite good high resolution data , but it needs more time than deconvolution method does. On the basis of frequency – division processing method in wavelet domain , a new technique is put forward, which involves 1) designing filter op-

erators equivalent to deconvolution operator in time and frequency domains in wavelet transform, 2) obtaining derivative wavelet function that is suitable to high – resolution seismic data processing ,and 3)processing high resolution seismic data by deconvolution method in time domain.

In the method for calculating some instantaneous characteristic signals by using Hilbert transform, Hilbert transform is very sensitive to high – frequency random noise. As a result, even though there exist weak high – frequency noises in seismic signals, the obtained instantaneous characteristics of seismic signals may be still submerged by the noises. One method for having instantaneous characteristics of seismic signals in wavelet domain is put forward, which obtains directly the instantaneous characteristics of seismic signals by taking the characteristics of both the real part(real signals, namely seismic signals)and the imaginary part(the Hilbert transform of real signals)of wavelet transform. The method has the functions of frequency division and noise removal. What is more ,the weak wave whose frequency is lower than that of high – frequency random noise is retained in the obtained instantaneous characteristics of seismic signals ,and the weak wave may be seen in instantaneous characteristic sections (such as instantaneous frequency, instantaneous phase and instantaneous amplitude).

A method of calculating imitating absorbing – factor is put forward in frequency division instantaneous amplitude from wavelet transform. According to good localization characteristics of wavelet transform, no average effect of calculating imitating absorbing – factor and accurate description of characteristics from high frequency attenuation in oil – gas sand layer . Finally, the method above described is testified to be correct and efficient in terms of the application of real oil – gas checking.

One of important problems to interpret seismic data is to interpret faults, coherence cube algorithm of seismic data is put forward by M. Bahorich *et al.* in 1995, it is possible to interpret faults automatically. The semblance estimate given by K. J. Marfurt *et al.* in 1998 will be stable algorithm to calculate seismic attributes, which is easily able to identify faults. M. Bahorich *et al.* 's algorithm is coherency analysis in seismic amplitude data. Amplitude of seismic event in horizontal change and signal – to – noise will affect quality of coherence cube ,especially , low signal – to – noise of seismic data at two sides of faults, points of faults is not clear, noise at points of faults is too strong. Coherence cube can be calculated by K. J. Marfurt *et al.* 's algorithm in the use of seismic data and Hilbert transform of seismic data, algorithm of which is stable and efficient. But quality of Hilbert transform is very important, the transform is sensitive to noise ,if noise of seismic data is too strong ,it is possible that there is mistake in Hilbert transform ,so that application results of K. J. Marfurt *et al.* 's algorithm is not efficient.

Coherence cube calculated in whole frequency band is given by M. Bahorich *et al.* and K. J. Marfurt *et al.* ,but they did not pay more attention to coherence cube in some frequency band, especially, information of coherence cube to interpret small faults in high frequency band. In this book, coherence cube algorithms are given from wavelet transform based on algorithms above – mentioned. The first method is a method of calculating coherence cube from instantaneous phase of wavelet transform by wavelet functions (or derivative wavelet functions) of simulating seismic wavelet(coherence cube algorithm 1); The second method is a method of calculating coherence

cube from the real part and the image part of wavelet transform by above – mentioned wavelet functions(coherence cube algorithm 2). Coherence cube algorithm 2 may decrease effect of high frequency noise from direct Hilbert transform , improve quality of coherence cube. We can gain information of high and low frequency instantaneous phase, in which it is very useful to interpret small faults ,by coherence cube algorithm 1, of which resolution is higher than that of coherence cube algorithm 2. In terms of the example of application, we must choose reconstructing coefficient , then ,we can gain reconstructing coherence cube in frequency division.

Impedance inversion is one of tools in the description of oil reservoir. one of methods in impedance inversion is Generalized Linear Inversion. This method has higher precision of inversion. But ,this method is sensitive to noise of seismic data, so that error results are got. The description of oil reservoir in researching important geological layer ,in order to give prominence to geological characteristics of the important layer, not only high frequency impedance to research thin sand layer, but other frequency impedance are needed. It is difficult for some impedance inversion method to realize the goal. Wavelet transform is very good in denoising and processing in frequency division. Therefore, in this book, a method of impedance inversion is put forward based on wavelet transform that is impedance inversion in frequency division from wavelet transform and reconstruction.

In this book, based on wavelet transform, methods of time – frequency analysis is given, which is very effective in sequence stratigraphy. The benefit of wavelet transform is raise the computing speed and accuracy.

A method of multi attributes imaging from wavelet transform is put forward, which provides a novel means of utilizing seismic data and multi attributes for imaging and mapping geologic discontinuities over large 3D seismic surveys. By means of the method , the lithology trap , stratigraphy trap and find small inhomogeneous body.

Acknowledgments: Author thanks Professor Li Youming (Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science), Professor Yang Kongqing(Lanzhou University), Professor Gao Jinghuai(Xian Jiao Tong University), Professor Liu Hong(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science), Professor Liu Quanxing (PetroChina Company Limited Exploration & production Research Institute(Northwest), Professor Zhou Jiayi (Da Gang oil-field) for their help and useful discussions.

Author



# 目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 小波变换理论早期的研究工作	(1)
1.2 本书的主要研究内容	(3)
第 2 章 高分辨率地震资料处理中导数小波函数的构造	(7)
2.1 地震子波的模拟	(7)
2.2 改进的 Morlet 小波	(7)
2.3 导数小波函数	(8)
2.4 导数小波函数的小波变换与瞬时特征	(14)
2.5 应用实例	(15)
第 3 章 小波域的 SVD 去噪方法	(18)
3.1 SVD 滤波原理	(18)
3.2 小波域的 SVD	(20)
3.3 SVD 的特征值分析	(20)
3.4 弯曲界面的地震模型	(24)
第 4 章 地震资料在小波域的高分辨率分频处理与重构	(29)
4.1 小波域分频与重构方法原理	(29)
4.2 小波函数的选取	(30)
4.3 最佳重构系数的确定	(31)
4.4 小波域地震资料的分频处理与重构	(32)
第 5 章 基于小波变换的地震工区拼接处理方法和应用	(35)
5.1 三维地震资料拼接中的地震子波处理方法原理	(35)
5.2 应用实例 1: 三维地震资料拼接中的地震子波处理	(36)
5.3 应用实例 2: 地震数据体拼接反演	(40)
第 6 章 高分辨率滤波算子在小波域中的提取	(46)
6.1 反褶积算子求取的基本原理	(46)
6.2 提高地震资料分辨率的小波域分频处理方法	(49)
6.3 小波域滤波算子的构造	(51)
6.4 提高小波函数分辨率的插值方法	(53)
6.5 应用实例	(62)
第 7 章 地震信号瞬时特征在小波域分频提取的方法	(67)
7.1 瞬时特征在小波域分频提取的方法原理	(67)
7.2 模型试算	(69)
7.3 地震信号瞬时特征的提取	(74)
第 8 章 基于小波变换拟瞬时吸收系数的计算方法和应用	(76)
8.1 方法原理	(76)

8.2 应用实例·····	(77)
<b>第 9 章 基于小波变换的地震相干体算法研究</b> ·····	<b>(81)</b>
9.1 方法原理·····	(81)
9.2 应用实例 1 ·····	(84)
9.3 应用实例 2 ·····	(92)
<b>第 10 章 基于小波变换的波阻抗分频反演与重构</b> ·····	<b>(97)</b>
10.1 波阻抗反演中的若干问题 ·····	(98)
10.2 小波域波阻抗分频反演与重构方法原理·····	(100)
10.3 反演质量控制·····	(104)
10.4 应用实例·····	(105)
<b>第 11 章 小波域的时频分析方法</b> ·····	<b>(111)</b>
11.1 小波域的时频分析原理·····	(111)
11.2 地质模型建立·····	(112)
11.3 应用实例·····	(112)
<b>第 12 章 小波域多属性分频成像方法</b> ·····	<b>(118)</b>
12.1 频谱分解技术的基本原理·····	(118)
12.2 小波域多属性分频成像方法·····	(120)
12.3 DFT 谱分解技术应用中的问题 ·····	(122)
12.4 小波域能量分频成像与 DFT 频谱分解成像对比 ·····	(125)
12.5 小波域能量分频成像应用实例·····	(126)
<b>参考文献</b> ·····	<b>(129)</b>

# CONTENTS

<b>1 Introduction</b> .....	(1)
1.1 Early works on wavelet transform theory .....	(1)
1.2 About contents of this book .....	(3)
<b>2 Derivative wavelet function constructed in high resolution processing</b> .....	(7)
2.1 Simulating seismic wavelet .....	(7)
2.2 Modified Morlet wavelet .....	(7)
2.3 Derivative wavelet function .....	(8)
2.4 Wavelet Transform and instantaneous feature of derivative wavelet function .....	(14)
2.5 Example .....	(15)
<b>3 A SVD de-noising method from wavelet transform</b> .....	(18)
3.1 Theory of SVD filter .....	(18)
3.2 SVD from wavelet transform .....	(20)
3.3 Analysis of SVD Singular Value .....	(20)
3.4 Bent boundary seismic model .....	(24)
<b>4 High resolution processing seismic data in frequency division and reconstruction from Wavelet Transform</b> .....	(29)
4.1 Theory of processing in frequency division and reconstruction from wavelet transform .....	(29)
4.2 On the choice of wavelet function .....	(30)
4.3 The best one of reconstructing coefficients .....	(31)
4.4 Processing in frequency division and reconstruction from wavelet transform .....	(32)
<b>5 Method and application of combining process in different seismic cubes from wavelet transform</b> .....	(35)
5.1 Theory of combining process in different 3D seismic data .....	(35)
5.2 Example 1 .....	(36)
5.3 Example 2 .....	(40)
<b>6 Designing high resolution filter operators in wavelet domains</b> .....	(46)
6.1 Theory of obtaining deconvolution operator .....	(46)
6.2 High resolution seismic data process in frequency division from wavelet transform .....	(49)
6.3 Designing filter operators from wavelet transform .....	(51)
6.4 Interpolation method of obtaining high resolution wavelet function .....	(53)
6.5 Example .....	(62)
<b>7 Obtaining instantaneous characteristics of seismic signals in frequency division from wavelet transform</b> .....	(67)

7.1	Theory of instantaneous characteristics of seismic signals in frequency division from wavelet transform .....	(67)
7.2	Calculating models .....	(69)
7.3	Obtained instantaneous characteristics of seismic signals .....	(74)
<b>8</b>	<b>Method and application of calculating imitating absorbing – factor from wavelet transform .....</b>	<b>(76)</b>
8.1	Method and theory .....	(76)
8.2	Example .....	(77)
<b>9</b>	<b>Methods of calculating coherence cube from wavelet transform .....</b>	<b>(81)</b>
9.1	Method and theory .....	(81)
9.2	Example 1 .....	(84)
9.3	Example 2 .....	(92)
<b>10</b>	<b>Impedance inversion in frequency division from wavelet transform and reconstruction .....</b>	<b>(97)</b>
10.1	Some problems of impedance inversion .....	(98)
10.2	Theory of impedance inversion in frequency division from wavelet transform and reconstruction .....	(100)
10.3	Controlling quality of impedance inversion .....	(104)
10.4	Example .....	(105)
<b>11</b>	<b>Methods of time – frequency analysis from wavelet transform .....</b>	<b>(111)</b>
11.1	Theory of time – frequency analysis from wavelet transform .....	(111)
11.2	Geological modeling .....	(112)
11.3	Time – frequency analysis .....	(112)
<b>12</b>	<b>Method of multi attributes imaging from wavelet transform .....</b>	<b>(118)</b>
12.1	Theory of spectral decomposition .....	(118)
12.2	Method of multi attributes imaging in frequency division from wavelet transform .....	(120)
12.3	Some problem of DFT spectral decomposition .....	(122)
12.4	Comparing energy imaging in frequency division from wavelet transform with imaging of DFT spectral decomposition .....	(125)
12.5	Example of energy imaging from wavelet transform .....	(126)
<b>References</b>	.....	<b>(129)</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 小波变换理论早期的研究工作

随着我国石油勘探的不断深入,勘探的难度越来越大,为了增储上产,陆相薄互层的勘探成为主要方向<sup>[1,2]</sup>。陆相薄互层地质现象存在于我国绝大多数油田,多少年来一直是科研攻关的方向<sup>[3,4]</sup>。随着我国几十年的石油勘探开发,老油田都进入了高含水阶段,产量开始出现递减。为保证稳定油气产量,必须寻找薄储层(4~5m)<sup>[5~9]</sup>。“八五”国家重大项目“陆相薄互层油储地球物理学理论与方法研究”和“九五”国家重大项目“陆相油储地球物理理论及三维地质图成图方法研究”充分体现了国家和科学界对这一问题的关注。然而,作为勘探主要手段的地震勘探,更需要研究一套针对陆相薄互层地震资料处理和解释的方法。本书以小波变换作为基本工具,试图提出一套解决陆相薄互层,尤其是针对我国油田低渗透率,低孔隙度薄互层的方法。

自从 1822 年傅里叶(Fourier)发表“热传导解析理论”以来,傅里叶变换一直是信号处理领域中最完美、应用最广泛、效果最好的一种分析手段。但傅里叶变换只是一种纯频域的分析方法,它在频域的定位性是完全准确的(即频域分辨率最高),而在时域无任何定位性(或分辨能力),也即傅里叶变换所反映的是整个信号全部时间下的整体频域特征,而不能提供任何局部时间段上的频率信息。相反,当一个函数用  $\delta$  函数展开时,它在时间域的定位性是完全准确的,而在频域却无任何定位性(或分辨能力),也即  $\delta$  函数分析所反应的只是信号在全部频率上的整体时域特征,而不能提供任何频率段所对应的时间信息。对时变信号进行分析,通常需要提取某一时间段(或瞬间)的频域信息或某一频率段所对应的时间信息。因此,寻求一种介于傅里叶分析和  $\delta$  分析之间的,并具有一定的时间和频率分辨率的基函数来分析时变信号,一直是信号处理界及数学界人士长期以来努力的目标<sup>[10]</sup>。

为了研究信号在局部时间范围的频域特征,1946 年 Gabor 提出了著名的 Gabor 变换<sup>[11]</sup>,之后又进一步发展为短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform,简记为 STFT,又称为加窗傅里叶变换)。目前,STFT 已在许多领域获得了广泛的应用。但由于 STFT 的定义决定了其窗函数的大小和形状均与时间和频率无关而保持固定不变,这对于分析时变信号来说是不利的。高频信号一般持续时间很短,而低频信号持续时间较长,因此,我们期望对于高频信号采用小时间窗,对于低频信号则采用大时间窗进行分析。在进行信号分析时,这种变时间窗的要求同 STFT 的固定时窗(窗不随频率而变化)的特性是相矛盾的。这表明 STFT 在处理这一类问题时已无能为力了。此外,在进行数值计算时,人们希望将基函数离散化,以节约计算时间及存储量。但 Gabor 基无论怎样离散,都不能构成一组正交基,因而给数值计算带来了不便。这些是 Gabor 变换的不足之处,但恰恰是小波变换的特长所在。小波变换不仅继承和发展了 STFT 的局部化的思想,而且克服了窗口大小不随频率变化,缺乏离散正交基的缺点,是

一种比较理想的进行信号处理的数学工具。

小波变换的思想来源于伸缩与平移方法。小波分析方法的提出,最早应属 1910 年 Haar 提出的规范正交基(这是一组非正则基)。1938 年, Littlewood - Paley 对傅里叶级数建立了 L - P 理论,即按二进制频率成分分组。Fourier 变换的相位变换本质上不影响函数的形状与大小。1965 年 Galderon 发现了再生公式,它的离散形式已接近小波展开,只是还无法得到组成一正交系的结论。1981 年, Stormberg 对 Haar 系进行了改进,证明了小波函数的存在性。1982 年 Battle 在构造量子场论中采用了类似于 Galderon 再生公式的展开形式。

小波概念真正出现的时间应是 1984 年。法国地球物理学家 J. Morlet 在分析地震数据时提出将地震波按一个确定函数的伸缩、平移系  $\left\{ |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right), a, b \in R, a \neq 0 \right\}$  展开。随后,他与 A. Grossmann 共同进行研究,发展了连续小波变换的几何体系。由此能将任意一个信号分解成对空间和尺度的贡献。1985 年, Y. Meyer, A. Grossmann 与 I. Daubechies 共同进行研究,选取连续小波空间的一个离散子集,得到了一组离散的小波基(称为小波框架);而且根据小波框架的离散子集的函数,恢复了连续小波函数的全空间。随后,人们试图寻找一组离散的正交小波基,但没有成功。1986 年, Y. Meyer 在证明不可能存在时频域都具有一定正则性的正交小波基时,却意外地发现了具有一定衰减性的光滑性函数  $\Psi$ , 使  $\left\{ 2^{-\frac{1}{2}} \Psi(2^{-j}[x-k]) \right\}_{j,k \in Z}$  构成  $L^2(R)$  的规范正交基,从而证明了确实存在小波正交系。后来, Lemarie 和 Battle 又分别独立地构造了具有指数衰减的小波函数。1987 年, Mallat 将计算机视觉领域的多尺度分析思想引入到小波分析中,提出多分辨率分析概念,统一了在此前所有具体正交小波基的构造,并且提出相应的分解与重构快速算法。1988 年 I. Daubechies 在美国 NSF/CBMS 主办的小波专题研讨会上进行了 10 次演讲,并提出了小波框架理论<sup>[12]</sup>,引起了广大数学家、物理学家甚至某些企业家的重视,由此将小波分析的理论发展与实际应用推向了一个高潮。

目前小波在许多领域得到了广泛应用,如 J. Morlet 等将小波用于地震信号的分析与处理<sup>[13,14]</sup>; S. Mallat 将二进制小波变换用于图像的边缘检测、图像压缩与重构<sup>[15]</sup>; M. Farge 等将小波变换用于涡流的研究; M. V. Wickerhauser 将小波包的理论用于图像的压缩; M. Frisch 等将小波变换用于噪声中的未知瞬态信号; P. Dutilleux 等将小波变换用于语音信号的分析、变换和综合; H. Kim 等将小波变换的自适应性用于解微分方程。

J. Morlet(1982 年)<sup>[13,14]</sup>认为地震信号随传播时间的变化,其振幅、相位和频率都在变化,为了提高地震反射方法的分辨率,就必须更详细地研究这种变化。基于量子力学分析方法和 Gober 短时傅里叶变换,提出了 Molert 小波。该小波是基于 Gober 变换的小波, Molert 称 Gober 小波。

该变换方法对于地震处理中可根据时变,不同的频率的小波与信号相关。从而克服了 Gober 变换的缺点。但是, Gober 小波(Molet 小波)并不是正交基,因此,在理论上有些缺点。存在冗余度的问题。I. Daubechies(1990)提出了小波框架的理论<sup>[12]</sup>,为小波变换在地震资料处理中应用提供了基础。

此后,小波变换在地震信号处理中的应用是从 20 世纪 90 年代开始的。1993 年 B. LI 和 C. S. Luehele 等,利用小波分析刻画地质体的不均匀性。朱光明、高静怀等把小波变换用于一维滤波<sup>[16]</sup>。李世雄把小波用于一维波动方程奇性反演<sup>[17]</sup>。高静怀把小波用于相空间地震波场步进式算法与成像和瞬时特征信号的提取<sup>[18,19]</sup>。何光明等用小波分析的方法提高地震资料的分辨率<sup>[20]</sup>,白志信等应用在煤田高分辨地震资料处理中。根据 Robertson 利用复地震道

进行薄层分析思路<sup>[21]</sup>,于波用小波变换求取地震特征来识别侵蚀沟谷<sup>[22]</sup>。

概括起来,在地震资料处理中,小波变换已用于以下方面:(1)地震数据压缩;(2)去噪;(3)地震记录道内插;(4)提高地震资料分辨率;(5)数值计算(如波场延拓,波动方程反问题等);(6)地震资料解释;(7)地震数据特征分析(如分频瞬时参数用于地震资料解释,用小波变换分析薄层及薄层组特性);(8)地震资料重采样等。

## 1.2 本书的主要研究内容

(1)众所周知,若待分析的信号与基本小波愈接近,则信号在时间—尺度域的能量分布愈集中。另外,按反射地震记录的“变子波模型”<sup>[23]</sup>,反射回地面的子波波形不仅取决于地震波子波,而且也由波的传播路径决定。在这种模型中,每种不同的波至都具有不同的子波,地震记录是这些不同波至的子波的叠加。若我们关心的是某一目的层,可利用测井资料和井旁地震记录道(或用其它方法)反演出该目的层处的地震子波。若能构造最佳逼近该子波的小波函数,那么用此小波对地震资料作小波变换时,则来自目的层的反射波在时间—尺度域能量将集中于某个闭子空间,而干扰波与随机噪声等因与小波函数差别较大,它们在时间—尺度域中能量分布比较分散。利用这一差别,则可在目的层反射波的能量分布空间中分析问题用以压制干扰波及噪声。也就是说从信噪分离的角度看,用最佳逼近地震子波的小波作为基本小波,对地震信号作分解,是一种有效表示。这里的关键是如何构造接近目的层处反射波的小波函数。

文献[24]给出了模拟地震子波的表达式,构造了实型小波及解析小波函数。作者在此基础上给出了导数小波表达式。并且比较了不同小波函数对模拟信号和实际例子试算,证明了导数小波的优越性<sup>[25]</sup>。

(2)在地震勘探中,地震记录信噪比的高低,将直接影响地震资料的可靠性、参数提取的精度及提高分辨率的效果等。去噪研究在地震资料处理中占有非常重要的地位<sup>[26]</sup>。在提高分辨率地震勘探中<sup>[27]</sup>,地震记录的频带很宽,在有效波的频带范围内可能包含有多种类型的噪声,这使得有效地进行信噪分离更显得十分重要。

目前地震信号处理中应用的去噪方法有多种,如:一维滤波(频率域及波数域); $f-k$ 域滤波, $\tau-p$ 变换滤波;SVD滤波等。各种去噪方法都有其使用条件。如:一维频率域滤波,假定有效信号与噪声在频率轴上是分开的; $f-k$ 滤波假定有效信号与干扰波在视速度上有明显的差别;SVD滤波假定有效波与干扰波在空间相干性上有明显差别等等。只有地震记录满足某种去噪方法所需要的条件,方能取得良好的效果。否则,去噪效果就差,使有效波产生明显畸变。实际地震记录中波场有时是复杂的。设计既能保持有效波的动力学特征,又能最大限度地压制噪声的去噪方法,一直是地球物理工作者所追求的目标。

我们知道,反射地震记录可用“变子波模型”来描述。根据这种模型,来自不同反射界面的反射波及多次反射波,到达检波器的时间、波形及频谱也都是不同的。地震记录是这些子波的叠加。实际地震记录中还包含面波、随机噪声等干扰。单从时间域或单从频率域将它们进行区分或识别是十分困难的。利用小波变换把地震记录在二维时间—频率域(或时间—尺度域)分解,就有可能利用多次波、面波及随机干扰波与有效信号在时间—尺度域的差异把它们分开<sup>[28]</sup>,或将来自不同反射层的反射波区分开。因此,小波变换用于地震资料的分析,可成为地震资料去噪的有力工具。

20世纪90年代有大量关于小波变换用于地震资料去噪的文章发表<sup>[29,30,31]</sup>。但是大多

数去噪方法都属于单道分频去噪,没有利用有效信号在相邻道之间有相干性这一特点,都不会改变每一频率成分中的信噪比。

这些去噪方法的特点是把小波变换与其它去噪方法相结合,是在纵向(时间)及横向(空间)应用不同方法去噪。既利用有效信号和噪声在频率分布上的差别,也利用了它们空间相干性上的差别,因此,去噪效果好。矢量分解法去噪和多项式拟合去噪与 SVD 滤波相比,就保持有效波的动力学特性一点而论,SVD 方法效果最好。在高精度、高分辨率地震勘探中,保持波的动力学特征是很重要的。近年来 SVD 方法已被改进<sup>[32]</sup>,但仍不能用于低信噪比地震记录的去噪<sup>[33]</sup>。作者在此基础上,做了进一步的改进,使之成为“时、空变的多维多空间去噪方法”。作者称为小波域的 SVD 去噪方法。

(3)提高地震资料纵向分辨的方法有多种。例如:各种反褶积方法、谱白化方法及宽带约束反演等。各种反褶积方法都有一定的假设条件<sup>[26,33]</sup>。假设与实际情况差距越大,反褶积的效果就越差。另外,反褶积方法在提高地震资料分辨率的同时,会使信噪比降低。谱白化及时变谱白化也存在同样的问题。

前面已指出,在实际地震资料中,来自不同深度反射界面的反射波,频带宽度及信噪比都是不同的。而要使有同一目的层的反射波分辨率与信噪比达到最佳折中,利用反褶积及常规谱白化(包括时变谱白化)是很难做到的。

基于地震记录的褶积模型,通过对地震记录的多尺度分解结果作深入分析得出结论:当恰当地选择函数  $g(t)$ [这里不要求  $g(t)$  满足小波函数的允许条件],对地震记录作多尺度分解,在某个恰当的尺度  $a$  的分解结果,低频得到了一定压制,高频成分得到了一定补偿,谱接近白谱,在该尺度的分解结果分辨率高于原地震记录。文中给出了具体的实现方法。该方法的优点是:参数容易选择,运算速度快,可使不同深度的反射波信噪比和分辨率达到最佳折中<sup>[34]</sup>。同时,作者又给出了基于测井约束条件下的分频,重构高分辨处理方法<sup>[35]</sup>。

(4)油田开发期间所面临的一个重要问题,就是必须搞清构造和储层展布。这一点很大程度上取决于三维地震资料的品质。但是,大多数情况油田由两个以上三维地震工区所组成。不同时间采集的三维地震资料在频率、能量强弱和信噪比上差异很大,如果不能很好解决工区与工区之间拼接问题,就无法进行精细构造解释和储层反演。因此,作者提出三维地震资料拼接中的地震子波处理方法<sup>[36]</sup>。

(5)为了提高小波域地震资料处理速度,作者提出了小波域滤波算子的提取方法,提高计算速度 5~10 倍。并且推证出导数地震剖面和小波域处理的地震剖面之间的关系。为了提高小波函数分辨率,作者提出了提高小波函数分辨率的插值方法。

(6)通常描述地震信号瞬时特征的物理量有:瞬时频率、瞬时相位、瞬时振幅(以下简称为瞬时参数)。地震波的瞬时参数不仅可以直接用来研究地球介质的岩性、构造等,而且也可以反演介质的品质因数。在研究非平稳信号时,瞬时参数尤为重要。因此,尽管瞬时频率、瞬时相位及瞬时振幅等概念几十年前已引入,但提高瞬时参数的计算精度,探讨其物理意义,探索它的各种应用一直是很活跃的研究领域。

瞬时参数的常用方法是:用 Hilbert 变换求出该信号对应的解析信号,再利用解析信号求瞬时参数(如瞬时频率等)<sup>[37]</sup>。地震记录中所含噪声(如随机干扰等)对这种方法计算结果影响很大。探讨一种抗干扰能力强、计算精度高的瞬时参数计算方法,对地震信号瞬时特征分析(特别是叠前资料)是很重要的。

文献[18,19]建立了解析小波变换与经典 Hilbert 变换之间的关系。构造的解析小波为基



本小波,把信号分解在时间—尺度域(或称为相空间),确定有效信号的能量分布空间;在有效信号的能量分布空间利用上述定理求有效信号对应的解析信号,进而计算瞬时参数。作者基于此进一步研究了分频提取瞬时特征参数。并且应用到实际资料处理,取得了较好效果。

(7)地震波沿地层向下入射时,随深度的加深,高频成分被吸收,形成高频衰减异常。但这种高频衰减是线性递增的一种背景值。当地震波穿过油气层时,会形成局部高频衰减现象,M. P. Matheray 等 1995 提出了用傅氏变换求取异常谱,用高低频比计算高频衰减率,即拟吸收系数<sup>[39]</sup>。俄罗斯 PANGEA 软件中也采用了该方法在小时窗内计算沿层拟吸收系数,并且在实际油气检测应用过程中取得了一定效果。外国一些商用油藏描述软件也采用了上述方法来检测油气藏。但是,基于小时窗的傅氏变换计算高频衰减存在着几个问题:第一,时窗太小,虽然可以用扩边方法减小吉卜斯效应,但是容易造出人为异常;时窗太大,在整个时窗内具有平均效应,很难准确刻画那一个砂层出现高频衰减。第二,傅氏变换局部化特征很差,难以用于微观分析。因此,作者根据上述方面存在问题,提出在小波域分频计算瞬时振幅,然后,利用高低频比来计算高频衰减,即拟吸收系数<sup>[40]</sup>。该方法利用小波分析具有局部化刻画清晰的特点,同时,计算出瞬时拟吸收系数,不存在平均效应,能准确的刻画出每一砂层高频衰减特征。该方法分辨率取决于原始地震剖面的分辨率。

(8)地震解释过程中最大的问题仍是断层解释,M. Bahorich 等于 1995 年提出地震相干数据的应用方法,从而使得断层的自动解释成为可能。K. J. Marfurt 等于 1998 年提出了基于相似性的相干算法计算地震属性,该方法稳定性强,对断层的划分精度很高<sup>[41,42,43]</sup>。我国一些学者引入该项技术后,在解释断层上取得了经验和成果,并在此基础上提出了改进<sup>[44,45]</sup>。M. Bahorich 等提出的方法是在地震振幅数据体上作相干分析,振幅纵横强弱关系,信噪比都会直接影响计算出的相干体的质量,尤其是断层两侧地震信号信噪比低,在计算出的相干体上断点模糊,噪声干扰很大,而且能量也较弱。K. J. Marfurt 等提出采用地震信号和地震信号 Hilbert 变换来计算相干体,增强稳定性,并且取得了明显效果。但是,Hilbert 变换的质量在计算相干体时非常重要,该变换对噪声十分敏感,如果原始地震数据中噪声太大,很可能计算出 Hilbert 变换的误差很大,以致影响 K. J. Marfurt 等的方法应用效果。

M. Bahorich 等和 K. J. Marfurt 等提出的方法都是在全频带上计算相干体,而并未考虑到突出一定频带相干体的问题,尤其是突出用以解释小断层的高频段相干体信息。本文基于上述前人研究成果,提出一种基于小波变换的相干体计算方法。该方法采用模拟地震子波的小波函数分频计算瞬时相位,根据 M. Bahorich 等方法用分频的瞬时相位计算相干体,通过重构系数,对一定频带相干体放大或减小(主要突出特定频段相干体)和直接用小波分频变换的实、虚部(相当 Hilbert 变换),根据 K. J. Marfurt 等方法计算相干体。根据本文研究实例,采用分频重构的相干体,易于突出被忽略的小断层信息<sup>[46,47,48]</sup>。

(9)地震波阻抗反演是岩性预测的有效手段之一<sup>[49]</sup>,其中最常用的是广义线性反演,该方法有较高的精度,但对高频随机噪声敏感。高频噪声在广义线性反演中对解病态方程组影响大,即使加正则化因子<sup>[50,51,52]</sup>也无法完全消除高频噪声的影响。因此,基于小波变换分频去噪功能及广义线性反演精度高的特点,在反演迭代过程中,为了控制反演迭代速度和精度,采用了统计参数和地震记录拟合方差来控制反演质量<sup>[53]</sup>。作者提出了小波域的波阻抗分频重构的反演方法<sup>[54]</sup>,其反演结果与实际情况相吻合<sup>[55,56]</sup>。

(10)时频分析方法在地质层序分析中有着特殊功效,文献<sup>[57]</sup>提出了在频率域用三角形滤波器进行时频分析,作者直接用小波变换进行时频分析,提高了计算精度和速度。