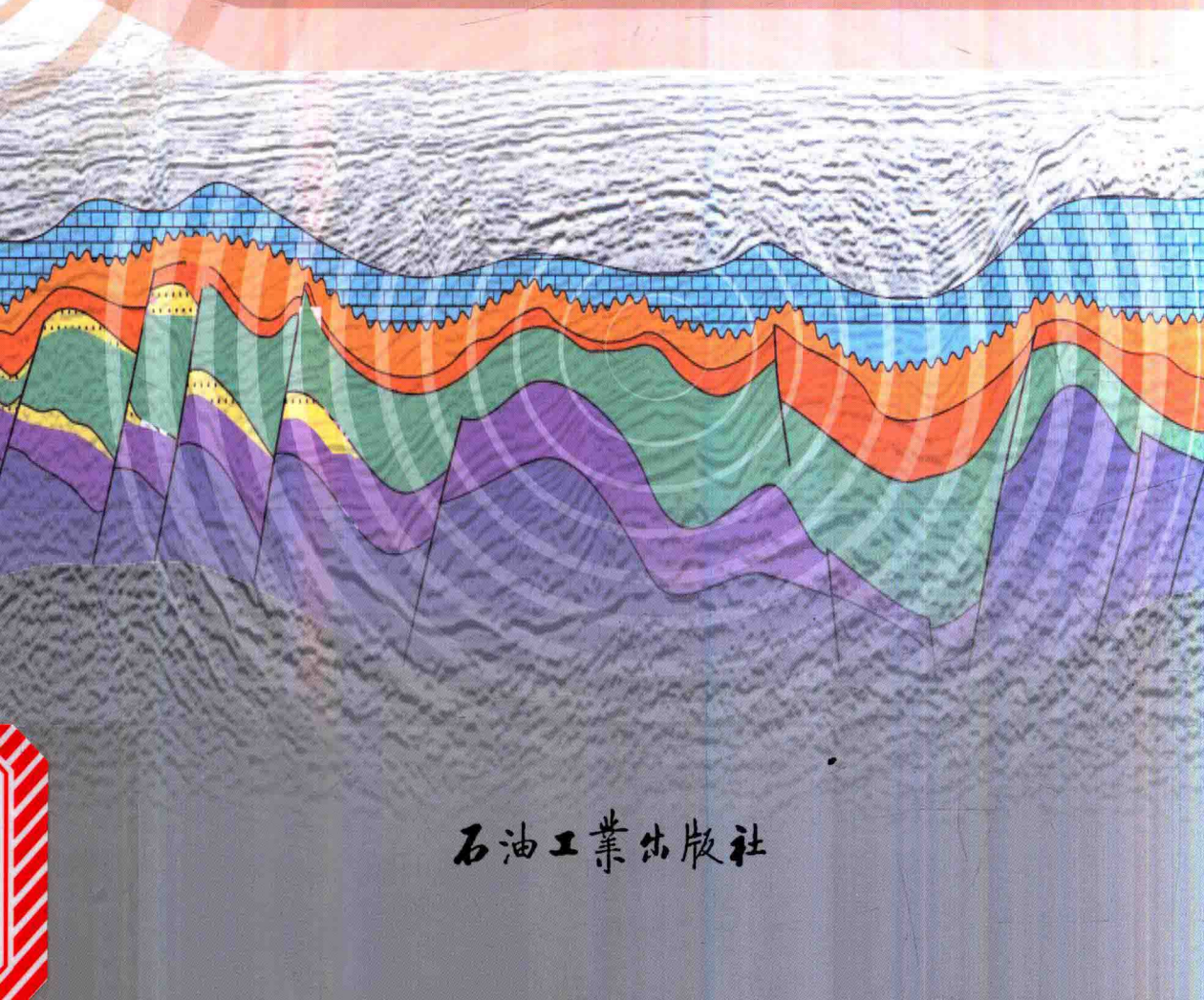


DIZHEN CHENJI YU CHUCENG YANJIU ZHONG DE XINHAO FENJIE FANGFA

地震沉积与储层研究中的 的信号分解方法

刘喜武 宁俊瑞 张远银 © 著



石油工业出版社

国家自然科学基金委员会—中国石油化工股份有限公司石油化工联合
基金项目“页岩油气层及裂缝多尺度多物理正反演(U1663207)”资助

地震沉积与储层研究中的 信号分解方法

刘喜武 宁俊瑞 张远银 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对薄层反射系数反演的需要,研究地震道反射系数和子波同时估计的信号分解算法,地震沉积和储层成像中的非平稳信号时频分解方法与应用策略,以及低频地震反射属性异常油气检测方法。具体包括地震信息处理与计算的基本原理、地震盲反褶积方法、信号谱分解方法、地震信号局域波分解与分数阶 Fourier 变换、地震时频属性提取及其在地震沉积与储层研究中的应用等内容。

本书可供从事地球物理勘探研究工作的科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地震沉积与储层研究中的信号分解方法/刘喜武,
宁俊瑞,张远银著. —北京:石油工业出版社,2017.5
ISBN 978-7-5183-1914-5

I. 地… II. ①刘… ②宁… ③张… III. ①地震-
沉积-地震信号-研究 ②地震-储集层-地震信号-研究
IV. P315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 110016 号

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. com

编辑部:(010)64523708 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:6.75

字数:148 千字

定价:100.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

油气地质地震分析技术包括油气藏构造地震解释、油气储层地震沉积学研究、油气储层地震预测与流体识别 3 个方面。对地震属性信息进行有效挖掘和利用,能够揭示地震勘探资料中隐藏的信息,反映构造、沉积和储层特征。

针对薄层反射系数反演的需要,本书内容涉及地震道反射系数和子波同时估计的信号分解算法,地震沉积和储层成像中的非平稳信号时频分解方法与应用策略,低频地震反射属性异常油气检测方法,以及相应的实现算法和软件。以二阶统计为基础,建立柯西稀疏约束贝叶斯估计地震盲反褶积框架,采用预条件共轭梯度法迭代反演实现反射系数和子波同时估计,实现薄层反射系数反演。从时频分析的基本原理出发,研究线性时频表示和二次时频分布算法及数值实现;研究基于局域波分解的时频分析方法和基于分数阶 Fourier 变换的广义时频分析方法,对实际应用进行探索。基于非平稳信号时频分析方法研究的实践和认识,给出分频解释和频谱分解的实现方法及其在地震沉积学与储层成像中的应用策略与效果,提取地震旋回和 RGB 显示研究沉积特征,提取时频属性和频谱分解进行地震储层成像。阐述低频地震反射油气储层成像的基本原理和方法,给出物理、数值模拟和应用例子,推导饱含流体多孔介质低频地震反射系数渐进公式,探索频率保持策略和初步应用。基于褶积型地震道盲反褶积分解,开发薄层反射系数和子波提取算法模块;阐述时频分析方法,研制非平稳信号时频分析算法实现与应用。

通过模型和实际数据进行比对试算,证明提出的薄层反射系数反演理论框架是正确的,实现算法具有良好的稳定性、准确性、收敛性和复杂性。数值实现的各类时频分析算法、频谱分解和储层成像策略,算法正确有效,提取的 8 种时频属性,可以较好地描述地震沉积和储层特征。低频地震反射可对储层含油、气、水的不同特征进行界定,提出叠前频率保持实现策略,应用取得一定效果。地震信号的盲反褶积分解和时频分解,核心算法计算快速稳定,FFT 适应任意长度的数据,适应解析信号处理,为地震沉积和储层预测研究奠定基础。

目 录

第一章 引言	(1)
第一节 地震信息处理与计算	(1)
第二节 薄层反射系数反演的地震盲反褶积技术	(3)
第三节 用于地震沉积与储层研究的地震时频属性	(4)
第二章 地震盲反褶积方法研究	(7)
第一节 最小相位稀疏脉冲反褶积	(7)
第二节 Cauchy 稀疏约束 Bayesian 估计地震盲反褶积	(11)
第三章 地震信号频谱分解方法研究	(22)
第一节 时频分析基本原理	(22)
第二节 线性时频表示	(23)
第三节 双线性时频分布	(29)
第四节 模型试算及效果对比	(33)
第五节 时频扫描滤波	(37)
第四章 地震信号局域波分解与分数阶 Fourier 变换	(40)
第一节 基于局域波分解的时频分析方法	(40)
第二节 基于分数阶 Fourier 变换的广义时频分析	(48)
第五章 地震时频属性提取及其在地震沉积与储层研究中的应用	(63)
第一节 地震沉积研究与时频属性的应用	(63)
第二节 频谱分解与时频属性用于地震储层成像	(69)
第三节 低频地震反射储层成像	(86)
参考文献	(98)

第一章 引言

随着电子技术、计算机技术和信息处理技术的发展,地震勘探技术从采集、处理到解释都得到快速发展,已成为油气地质研究的核心技术手段,延伸到油气地质工作的各个领域,如构造、地层、沉积、生油、储层、盖层、油气检测、圈闭、运移、保存条件等,并且在油气田开发中也得到广泛应用^[1]。纵观油气地质地震勘探技术的发展过程和研究内容,包括构造地震技术、地震地层、层序地层、地震沉积、地震岩性与储层研究等,不论地震构造解释、地震地层解释,还是地震地质综合定量分析,始终围绕如何将地震信息有效地转化为地质信息,较为可靠地反映油气地质目标特征^[2]。

油气地质研究中地震分析技术一般包括油气藏构造地震解释技术、油气储层地震沉积学研究、油气储层地震预测与流体识别技术(定量地震分析,主要利用叠前、叠后地震属性与地震反演)等3个方面。地震构造解释在构造地质学和地震成像基本原理的基础上,利用地震反射时间(t_0 时间)、速度和同相轴(倾角、相干性)等运动学(几何特征)信息,将地震勘探成果资料(时间剖面或数据体)转换到深度域,确定反射层埋藏深度,搞清地下岩层的构造形态特征,落实构造圈闭,也就是常规地震解释;地震地层解释以地震地层学、层序地层学和地震沉积学理论和思想方法为基础,利用地震反射特征信息(波形、同相轴的连续性、反射振幅的强弱、反射同相轴局部的内部结构和外部形态、基本地震属性、分频属性等),识别地震反射层序代表的地层学和岩石学意义,确定反射层序的地层年代、沉积体系、地层分布,落实隐蔽圈闭;地震地质综合解释则以地震勘探资料为基础,对地震勘探资料进行信息(特别是与叠前地震有关的属性)的提取、分析和预测(主要是地震波动力学特征信息和表征介质特征的地震反演属性,如振幅、相位、频率、吸收衰减、AVO属性;密度、速度等),综合一切可能获取的资料(地质、钻井、测井、地球化学、综合物探、岩石物理、油藏工程等),合理判别和分析各种地震信息(属性)的地质意义,精细研究油气储层特征,也就是定量地震分析。

因此,油气地质地震分析技术实际上就是利用地震勘探资料及其导出信息进行地质解释和油藏描述。除地震数据本身外,导出的地震属性数据也十分重要,对地震信息和特征(属性)进行有效挖掘和利用,能够揭示地震勘探资料中隐藏的信息。如何提取和分析这些地震属性信息则反映了计算地震解释的发展和水平。

第一节 地震信息处理与计算

对地震信息和特征进行有效的挖掘和利用,就是进行地震信息处理与计算。信息处理与计算在数学上就是一种数学变换和反演估计方法,涉及数学变换(如 Fourier 变换、Z 变换、Laplace 变换、短时 Fourier 变换、小波变换、希尔伯特变换、各种时频变换方法、分数阶 Fourier 变换、KL 变换、Radon 变换等)和反演方法(最小方差估计、最小二乘反演、最大似然估计、各种滤波和反演算法等)。信号处理致力于信号和数据的有效表示。从数学的观点来看,通过在函

数的完备集中展开信号,就可以实现信号的不同表示,也就是对信号进行有效分解。一种特别表示的重要意义是可以更好地理解信号的特征,这种表示是由实际上或对实际情况十分重要的物理量表示其特征。

一、信号表示的反演方法

地球物理信息处理就是利用计算机分析处理地球物理资料。信号处理的理论和方法是地球物理信息处理的重要基础,特别是现代信号处理理论与方法应用于各种地球物理信息和数据处理问题。地球物理数据处理是从研究时间域采样的滤波理论和谱分析开始的。而随机信号处理的一个重要问题是波形估计,也称滤波问题。滤波一词和含义远不限于“选频”这一狭窄的概念。凡是对时间序列(随机信号的一次实现)进行的处理是以改善对信号的理解过程的均称为滤波。平稳随机信号最优估计归结为维纳(Winer)滤波,即地球物理数据处理中的最小平方滤波,按照均方误差最小准则设计滤波器,例如,地震勘探最小平方反褶积、预测反褶积、同态反褶积、最小熵与最大熵反褶积。非平稳随机信号的最优滤波器是卡尔曼(Kalman)滤波。Kalman滤波的目标是对随机动力学系统的状态变量进行估计和预测,最大似然反褶积就是以Kalman滤波为基础的方法,递推结构使得Kalman滤波可以方便地跟踪非平稳的状态变化,并可扩展到非线性系统。Winer滤波给出了线性滤波在统计意义下的最优解,但Winer滤波的实现需要对输入信号进行先验统计,并要求输入信号的二阶统计特征是已知的。这在实际应用中是不现实的,一种实际实现方法是通过学习(或者说是一种递推的调节算法)自适应获得这些统计量,以得到实际上可实现的滤波器。初始时滤波器的系数预置,可能产生较差的估计结果,但随着对环境的学习递推地对滤波器系数进行调节,估计结果将收敛到逼近于最优滤波器(Winer滤波器)的性能。这类线性滤波器称为自适应滤波器,如地震勘探中的盲反褶积和盲分离方法。

在线性自适应滤波和功率谱估计中仅使用随机信号的二阶矩。二阶矩对高斯过程能完全表示,但对非高斯过程采用二阶矩描述是不完整的,可以利用高阶矩(离散统计)获得随机信号更多有用的信息,进行非高斯随机信号处理。例如,在地震子波估计中,利用二阶矩和功率谱进行子波估计是相位盲的,即不包含相位信息,只能处理最小相位子波,而利用高阶矩和高阶谱分析可以提取子波振幅和相位信息,实现非最小相位子波估计(系统辨识)和盲反褶积。最近兴起的盲信号处理也是利用高阶统计学方法,如独立分量分析(ICA)、盲源分离(BSS)和盲信号提取(BSE)等就是高阶统计学方法。

二、信号表示的时频变换方法

地球物理信号在地层中传播,由于吸收衰减,实际是时变的,即非平稳随机过程。要想获得局域瞬变过程特性,得到精细分析结果,必须利用具有时频局部化特性的分析工具——时频分析(Time - Frequency Analysis),这也是其他处理分析方法的基础。傅里叶变换(Fourier Transform)是线性系统分析最重要的工具,必须在整个时间轴上对 $f(t)$ 和 $e^{i\omega t}$ 进行混合。因此,傅里叶变换无法抽取信号的局域性质,即没有能力抽取或定位信号在某个时间附近的瞬变特性。为此,人们研究各种时频分析方法,进行局域时间和频率联合分析,如短时 Fourier 变换及离散 Gabor 展开、Wigner 分布、小波变换、Cohen 类时频分布、自适应核函数时频分析、基于分数阶 Fourier 变换的广义时频分析,以及局域波分解方法(Hilbert - Huang 变换、经验模式分

解)等方法。它们广泛地应用于地球物理信号分析和处理中,如地震波能量补偿、时变滤波去噪及精确检测地震纵波到达时,也可检测地层变化,提高地震勘探资料对薄层的识别能力,研究地震层序和旋回分析等。

三、计算地震解释

信号分析和数据处理的基础理论和方法作为地球物理数据处理(分析)的基础,主要用于地球物理数据的信息改进,如数字滤波、反褶积、初静校正、叠加、成像、去噪、提高分辨率等,近年来大力发展了信息提取、分析和预测方法,如各种地震属性分析、频谱分解、地震相分析、速度分析、储层参数分析及预测等。当然信号处理中涉及的统计数据分析、时间序列分析和反演算法等具有更广泛和深刻的内容,实际应用中的关键和核心可归结为科学计算问题。本文主要研究油气地质地震解释技术中的分析与计算问题。

地震信息提取分析与计算,即地震属性分析或计算地震解释,是构造地震解释技术、地震地层解释技术和地震定量分析等油气地质地震技术的核心内容与手段,其中需要分析计算的项目众多,内容广泛,如相干、曲率等几何属性用于构造解释,时频属性用于地震沉积学研究,叠前地震属性和反演用于地震储层定量研究等。

用于地震地质解释的一切地震信息可以统称为“广义地震属性”,包括由叠前或叠后地震数据,经过数学变换等导出的有关地震波的几何形态特征、统计特征、动力学特征及表征介质特征的反演参数等,它们能够反映地震勘探资料中隐藏的信息,并可将这些信息转换成与岩性、物性或油藏参数相关的、直接用于地质解释和油藏工程的信息,进行诸如油气检测、沉积解释、储层参数估算、多道相干分析等应用。在众多的地震属性中,基本地震属性一般主要包含时间、相干性、振幅、波形、相位、频率、吸收衰减、AVO 属性,以及速度、密度或波阻抗等类别。根据提取方法的不同,又可分为瞬时属性、单道和多道分时窗属性、面属性、体属性等。

广义地震属性的提取分析和预测是地震信息与计算的主要内容,其中波阻抗或反射系数反演,各类分频地震属性的计算和分析对于地震沉积和储层研究具有重要意义。地震波阻抗作为广义地震属性中一种重要的属性,表征地球介质的弹性性质,具有明确的物理意义,是一种确定性的属性。围绕地震波阻抗反演的各类地震反演方法已发展成为岩性油气藏和油气储层研究的核心技术。在利用地震属性研究储层中,以时频属性提取分析技术为核心发展了频谱分解技术(与调谐频率有关)、分频解释技术(包括低频成分的稳定提升、高频成分的扩展)、瞬时属性(各种定义的时频属性:如瞬时平均频率、瞬时带宽、斜度、峰度等)的分析技术等,成为储层研究的重要技术。

第二节 薄层反射系数反演的地震盲反褶积技术

地震反褶积是子波处理、提取地下反射系数和提高地震勘探资料分辨率及压制多次反射波的有效手段。地震反射序列反褶积以统计估计意义下的最优滤波(Winer 滤波、Burg 滤波、Kalman 滤波)或有限项误差平方和最小意义下的最小二乘滤波,以及非高斯非线性优化滤波、同态滤波等为基础,最优估计地震反射系数和地震子波,可以纳入系统控制与辨识的统一框架中,其中涉及两个问题:一是采用何种估计准则,二是相应地采用何种算法求解。

地震反褶积中反射系数和地震子波都是未知的,是一个褶积型混合的盲信号分离处理过程,所以有人称为“地震盲反褶积”,盲信号处理是统计信号处理(随机信号处理)的一类,并非全盲,需要借助统计假设才能实现,如稀疏脉冲地震反褶积(Winer 滤波)在假设反射系数为白噪声、地震子波为最小相位情况下用最小二乘算法实现地震反褶积和子波估计。因此,除了利用其他信息事先得到反射系数或子波后实施的确定性反褶积以外,地震反褶积基本上就是仅从地震道出发借助统计假设的“统计性反褶积”,亦即所谓的“地震盲反褶积”。

由于有些学者没有厘清地震反褶积的基本思路和方法,经常把“地震盲反褶积”解释成了一个不明确的概念,甚至拔高成一种新方法或新技术,其实就是统计性反褶积方法,关键看如何实现。有人把不对反射系数作高斯白噪声假设,不对子波作最小相位假设,利用高阶统计量实现的地震反褶积称为“地震盲反褶积”。实际上不管是利用二阶统计量(如方差,似然函数等),还是高阶统计量(如峰度,负熵,互信息率等,在地震处理中早已有之,如最小熵反褶积就是基于高阶统计的方法。),仅从地震道中反演反射系数和子波而实施的统计性反褶积都是所谓的盲反褶积^[3]。

可见,关于反射系数和子波的统计假设是针对实现方法的需要,而有时候这些假设恰恰又是十分合理的。如,采用二阶统计量自相关(自协方差)从地震道反演地震子波和反射系数,不假设地震子波最小相位和反射系数高斯白噪声,实现起来比较困难,反之容易实现,也比较合理。那么,如果不假设反射系数为高斯白噪、子波也不是最小相位,无非就是自相关的方法失效,可采取其他方法,但须对反射系数作其他假设才能实现,全盲是不能处理的,如反射系数是按照 Cauchy 概率稀疏分布的假设条件,就可以采用基于贝叶斯最大后验概率(二阶统计方法)实现统计反褶积,估计出稀疏反射系数和非最小相位子波;如果反射系数统计分布为非高斯(正态)分布,就可以采用基于高阶统计量(高阶统计方法)的非线性反演实现地震盲反褶积(如最小熵反褶积、Bussgang 类方法、ICA 方法等),估计出反射系数和非最小相位子波,至少理论上是如此。尽管目前基于高阶统计的方法在理论上研究较多,但是实用化存在较多问题,如稳定性、收敛性、精度、抗噪声能力和带限数据长度适应问题。基于同态滤波的反褶积方法在理论和实际应用中也都存在一些问题,不能实用化。因此,实际地球物理数据处理中,应用最广也最可靠的方法仍是基于二阶统计的最小二乘反褶积,在假设反射系数为白噪、子波为最小相位情况下进行,如稀疏脉冲反褶积、预测反褶积、Burg 最大熵反褶积等。

薄层反射系数反演是薄储层预测的重要手段,也是当前研究的热门,如 ThinMAN[®] 和 OpenPetro[®] 软件都开发了相应的功能。

第三节 用于地震沉积与储层研究的地震时频属性

拓展地震信号频带,也是有效时频属性提取的基础,再通过频谱分解,在时频域中提取各种时频属性进行分析和利用,是地震沉积和储层研究的重要手段。薄层反射系数反演和地震频谱分解都是对地震信号的有效分解,前者是对反射系数和地震子波进行反褶积分解,后者是对地震信号进行分频分解。提高反演的精度和时频局部化精度始终是研究的焦点,研究新方法和新的应用策略,对于地震沉积和储层研究十分重要。

一、非平稳信号时频分析

提取时频属性的首要方法是时频分析技术。时频分析在时间频率联合域,而不是单一的时间域或频率域来表示信号,是时变非平稳信号分析的有力工具^[4]。所谓时变就是指信号的统计特性是随时间而变化的。由于平稳信号只是非平稳信号的一种特殊情况,即最简单的非平稳信号,因而信号的时频分析适合于平稳和非平稳、时变和非时变信号。目前,非平稳信号时频分析方法可以划分为两大类:基于 Fourier 变换的全域波方法和基于 Hilbert - Huang 变换经验模式分解的局域波方法。局域波分解方法是近年来才发展起来的方法,正在探索之中。以 Fourier 变换为基础的全域波方法是对研究平稳信号(全域波)的传统的 Fourier 变换的改进,包括:适合分析时变非平稳信号(局域波)的时频局部化改进,基于分数阶 Fourier 变换适合分析时变非平稳信号(局域波)的时频旋转及其局部化改进,后者也是近年来正在发展的方法。传统 Fourier 变换时频局部化改进方法包括:时频线性表示方法的短时 Fourier 变换(Short - Time Fourier Transform, STFT)、Gabor 变换、连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)、S 变换(S - Transform, ST)、Chirplet 变换(自适应线调频高斯基展开)等,以及二次以上时频分布、Wigner 分布(Wigner - Ville Distribution, WVD)及其改进、Cohen 类时频分布、自适应时频分布(Adaptive Optimum Kernel Time - Frequency Representation, AOK)等。

除了从时间域出发的常规非平稳信号时频分析方法外,通过频率域局部化直接扫描实现分频的方法在地震数据结构分析中最早取得了明显的应用效果。时频分析真正用于层序地层学,直接进行沉积旋回划分,还应追溯到俄罗斯勘探地球物理研究院穆申教授等学者在 20 世纪 80 年代初所推出的基于分频扫描的构造层序解释技术。穆申教授 1992 年来华讲学后,推进了这项技术的应用,核心是进行有针对性的双倍频程三角宽带递归(指数递增)滤波。时频变换方法研究始终围绕提高时频分析精度、交叉项抑制、自适应等目标进行。

地震沉积学和地震储层成像研究中的核心原理就是如何挖掘和有效利用地震勘探资料中的联合时频属性信息。联合时频分析、分频解释和频谱分解等技术是其主要的实现工具。如果不严格区分,时频分析技术、分频解释和频谱分解,几乎是大同小异的概念,时频分析算法用于地震勘探资料,延伸应用可实现分频解释和频谱分解,而分频解释和频谱分解的基础就是时频分析。采用的时频分析算法和应用策略对提高地震沉积和储层研究的精度有重要的影响。

二、地震沉积与储层研究中的时频属性技术

地震时频分析方法就是对地震勘探资料中的时频属性的进一步挖掘和利用,理论和实践均已表明其对于研究地层层序结构、沉积特征、储层和含油气性等具有明确而有效的应用效果。近年来油气地质地震研究发展了两项重要的技术(或学科),即地震沉积学和地震储层成像(包括频谱调谐确定储层厚度、地层结构成像,储层参数地震预测和油层检测),逐渐成为研究和应用的热点^[5]。地震沉积学认为不同频率的地震勘探资料可反映不同的沉积特征,低频地震勘探资料的反射更多反映岩性(或波阻抗),高频资料更多反映地层时间层序界面;不论纵向还是横向瞬时频率的连续变化代表沉积旋回和相带的变化特征。波阻抗反演(地震相位转换)、分频解释(纵向时频旋回和地层层序分析、横向时频三原色 RGB 显示)、等时地层切片等技术是地震沉积学的研究手段。另外的一个方向中,与地层厚度调谐效应、岩性流体变化、地层层序变化研究密切相关的地震时频属性已成为地震储层预测中关键地震属性之一,特别

是与频谱分解有关的地震储层成像技术。地震储层成像主要利用频谱调谐原理描述储层的展布和厚度,特别是对河道和砂体的描述,利用联合时频分析、提取时频属性和分频解释,还可以进行地层结构成像、储层参数预测和油气检测。

三、低频地震反射储层成像技术

近年来,众多的理论研究和油田实际数据均表明反射地震波中的低频分量对于含油气储层具有很好的反映能力,含有关于储层的重要信息^[6]。利用地震勘探资料低频信息进行油气检测和油藏监测,理论和实践均具有可行性。国外关于低频反射信息用于储层成像的岩石物理性质方面,已进行过大量的物理模拟和数值模拟实验工作^[7],储层中饱含气体、水和油等流体,其反射特征在低频的不同频带内有不同的反映,如含油气储层在 $0 \sim 5\text{Hz}$ 以下反射振幅共振增强,含水储层在 $15 \sim 50\text{Hz}$ 左右反射振幅共振增强,这种现象不能用波阻抗和厚度频率调谐解释。地震勘探资料处理和解释人员很早就发现,含油气储层地震反射振幅特征异常,特别是引入分频处理技术后,在低频反射频带地震剖面上,含油气储层出现明显的低频阴影现象用于储层描述和油气检测,取得了较好的效果。Korneev 等人推导了低频区域中源于充满流体的孔隙介质的地震反射的近似表达公式^[8],其中,频率相关成分的反射系数与储层信号频率和流体流动性的平方根成正比。这意味着储层流体的流动属性能够通过反射信号的分析 and 提取而获得。研究低频地震反射储层成像技术对于油藏地球物理分析具有重要意义。

第二章 地震盲反褶积方法研究

根据 Wold 定理,地震反褶积是对褶积地震道一种信号进行分解,得到地震道中的反射系数序列和地震子波,但是由于噪声的存在、反射系数序列和子波均不知,实现同时盲估计比较困难,一般必须借助统计性假设^[9]。

在实际工作中,地震反射系数序列反褶积以统计意义下的最优滤波(Winer 滤波、Burg 滤波、Kalman 滤波)或有限项误差平方和最小意义下的最小二乘滤波,以及同态滤波为基础,估计地震反射系数和地震子波,并可以纳入系统控制与辨识的统一框架中。地震反褶积主要的方法包括最小平方反褶积(预测反褶积和稀疏反褶积)、伯格反褶积(最大熵反褶积)、最小熵反褶积、同态反褶积、Kalman 滤波最大似然反褶积等;子波估计的方法包括最小相位子波估计的谱因式分解和非最小相位子波估计的高阶谱估计等方法。

采用基于高阶统计量(高阶统计方法)的非线性反演可以实现地震盲反褶积(如最小熵反褶积、Bussgang 类方法、ICA 方法等)^[10-13],估计出反射系数和非最小相位子波,至少理论上是如此。尽管目前基于高阶统计的方法在理论上研究较多,但是实用化存在较多问题,如稳定性、收敛性、精度、抗噪声能力和带限数据长度适应问题^[14-15]。基于同态滤波的反褶积方法在理论和实际应用中也都存在一些问题,不能实用化。因此,实际地球物理数据处理中,应用最广也最可靠的方法仍是基于二阶统计的最小二乘反褶积。存在的主要问题始终是如何获得良好稳定性、准确性、收敛性和复杂性的算法。

去除子波效应,进行薄层反射系数反演是薄储层重要的预测手段,商业化软件 ThinMAN[®] 和 OpenPetro[®] 均推出了这一功能,它们采用频率域最小熵反褶积方法。本文研究将根据 Canadas 等提出的非最小相位子波和非白噪反射系数地震盲反褶积框架^[16-18],给出 Cauchy 稀疏约束贝叶斯估计地震盲反褶积算法策略,实现反射系数反演和子波同时估计。

第一节 最小相位稀疏脉冲反褶积

在假设子波是最小相位的情况下,利用子波的功率谱(或自相关)等于地震记录的自相关,就可以估计出最小相位子波。从功率谱(自相关函数)估计出最小相位子波的问题,常常归结为功率谱的因式分解问题。这里设子波已知。

对于含有噪声的地震记录,设反射系数序列 $q_k, k = 1, \dots, n_q$ 为稀疏脉冲,最小相位子波已知为 $w_k, k = 1, \dots, n_w$, 噪声为 $n_k, k = 1, \dots, n_n$, 地震记录为 $s_k, k = 1, \dots, n_s$, 褶积模型为

$$s_k = w_k * q_k + n_k \quad (2-1)$$

也可以写成:

$$s_k = \sum_{j=1}^k w_{k-j} * q_j + n_k \quad (2-2)$$

反褶积的目的是从记录数据中 s_k , 恢复反射系数 q_k , 为此设计一个反滤波因子 f_k , 理想情况下满足 $f_k * w_k = \delta_k$, 实际上, 我们只能计算得到 f_k 的近似估计 $\hat{f}_k$, 这时 $\hat{f}_k * w_k = a_k$, a_k 称为平均函数, 只有在理想情况下才是 δ_k 函数。用 f_k 对式(2-1)两端作用, 得到反射系数的近似估计:

$$\begin{aligned}\hat{q}_k &= \hat{f}_k * s_k = \hat{f}_k * w_k * q_k + \hat{f}_k * n_k = a_k * q_k + \hat{f}_k * n_k \\ &= (\delta_k + a_k - \delta_k) * q_k + \hat{f}_k * n_k = q_k + (a_k - \delta_k) * q_k + \hat{f}_k * n_k\end{aligned}\quad (2-3)$$

因此, 反褶积就是要寻找反子波算子 $\hat{f}_k$ 使得估计的反射率接近真实反射率。满足:

$$\begin{cases} \hat{f}_k * w_k \approx \delta_k(d_k) \\ \hat{f}_k * n_k \approx 0 \end{cases}$$

写成矩阵表示形式

$$\begin{cases} C_w f \approx d \\ C_n f \approx 0 \end{cases}\quad (2-4)$$

其中, C_w, C_n 分别为子波和噪声的褶积矩阵, f 为反波滤波因子向量, $d = (1, 0, \dots, 0)^T$ 。采用 2 范数度量误差, 使下述目标函数最小得到反子波:

$$J(f) = \|C_w f - d\|^2 + \beta \|C_n f\|^2\quad (2-5)$$

其中, β 为折中参数。若用噪声的方差矩阵 $E(C_n^T C_n) = \sigma^2 I$ 代替 $C_n^T C_n$ 上式写成:

$$J(f) = \|C_w f - d\|^2 + \mu \|f\|^2\quad (2-6)$$

其中, $\mu = \beta\sigma^2$, 也称预白化参数(这里也是噪声的方差), 其大小在压缩脉冲和压制随机噪声之间起折中作用, 一般取最小相位子波零时刻幅值的 0.5%, 太小则噪声压制不够, 线性系统求解不稳定, 太大则脉冲压缩不够, 图 2-1 给出了试验例子。

对目标函数求导并使之等于零, 则反子波由下述正规方程给出

$$(C_w^T C_w + \mu I)f = C_w^T d = (\bar{b}_0, 0, \dots, 0)^T\quad (2-7)$$

实际上, $\bar{b}_0 = \frac{1}{f_0}$, 以后会看到, 这种情况无需知道子波, 利用 Levison 递推可以直接求出反子波算子(反褶积算子), 实施反褶积, 进而可求得子波。上式可以记成如下形式:

$$(R + \mu I)f = g\quad (2-8)$$

其中, $R = C_w^T C_w$ 为输入子波的自相关矩阵; $g = C_w^T d$ 为输入子波与理想输出的互相关。将反子波 $\hat{f}_k$ 与地震记录 s_k 褶积得到反射率估计, $\hat{q}_k = \hat{f}_k * s_k$ 。既可以得到反射系数, 提高分辨率, 同时也可去除随机噪声。

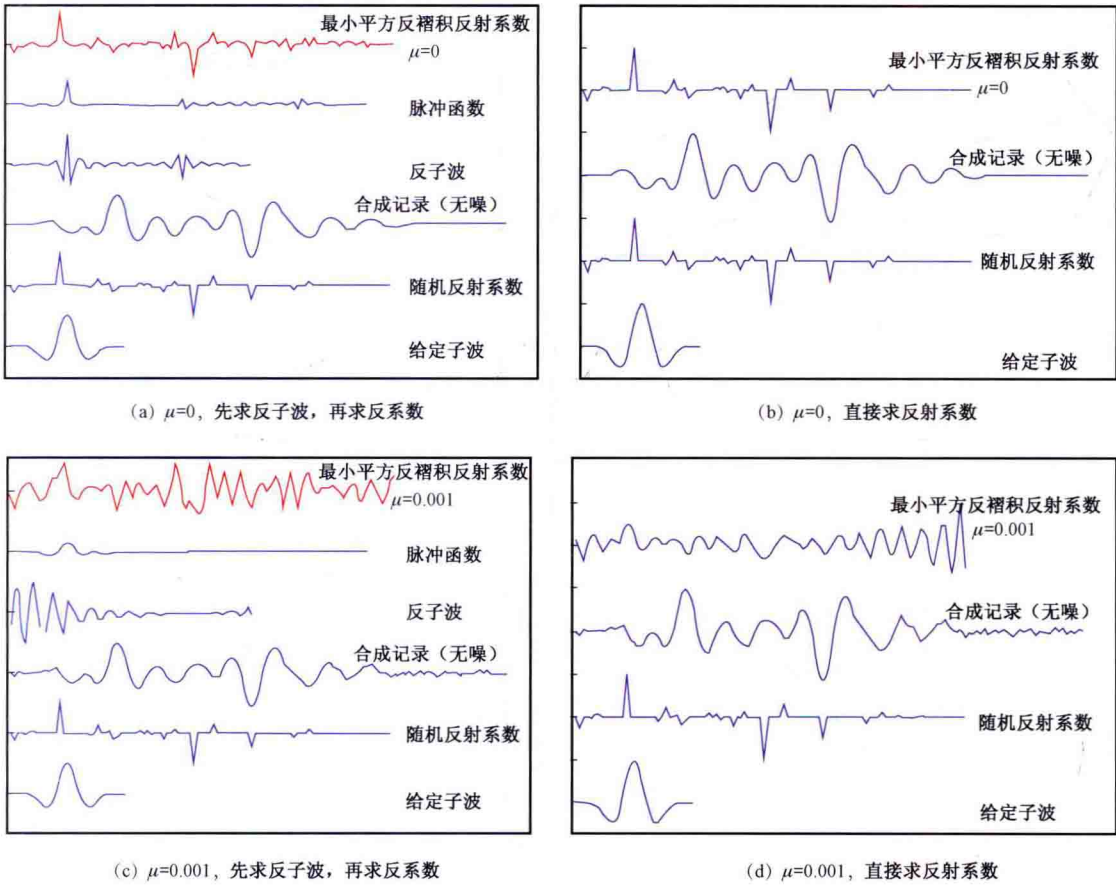
上述方法称为最小相位稀疏脉冲反褶积, 属于 L2 范数反褶积, 或最小二乘方反褶积。当

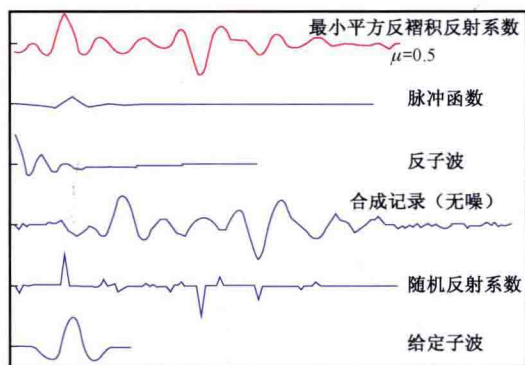
$\mu = \beta\sigma^2$ 较大时,反演的反子波算子和反射率为带限信号,不是稀疏脉冲。

在上述方法中如果反褶积寻找反子波算子 $\hat{f}_k$ 使得 $\hat{f}_k * w_k \approx d_k$ 和 $\hat{f}_k * n_k \approx 0$,其中 d_k 为具有一定延续时间的窄脉冲,称为最小平方波形反褶积。

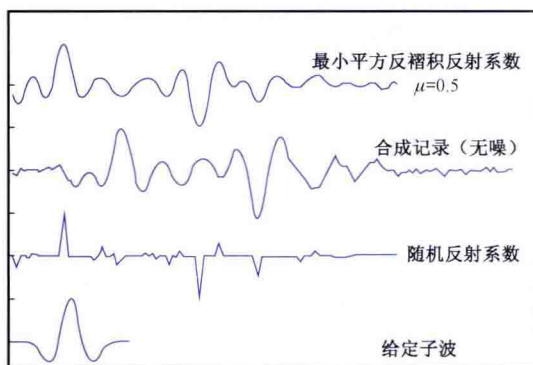
图 2-1 是阻尼最小二乘方法反褶积实验结果。折中参数 μ 在含噪数据的反褶积中起到关键作用,一方面使线性系统求解稳定,另一方面压制噪声,所以一定要选择适当。此外反滤波算子的长度也要适当给定(后面所给程序中的参数 NF)。实际反褶积中的地震子波要从地震道中估计得出,还需注意选取自相关时窗的长度和位置。必须强调指出,反褶积技术与其说是科学,还不如说是艺术,在针对实际数据进行反褶积之前,最好针对一小块数据多试验一下反滤波因子长度、折中参数、地震道自相关长度和位置等参数的不同组合,优选最佳组合参数。

由于大多数情况下地震子波和反射率函数都是未知的,所以常用的方法都是统计性方法,如最小二乘方反褶积(稀疏反褶积、预测反褶积)、Burg 反褶积(最大熵反褶积)、最小熵反褶积、最大似然反褶积、同态反褶积等。其中应用最广的是以子波最小相位假设为基础的最小二乘方反褶积(含基于其他概率准则的方法)。





(e) $\mu=0.5$, 先求反子波, 再求反系数



(f) $\mu=0.5$, 直接求反射系数

图 2-1 最小平方反褶积折中参数实验结果

下面给出最小平方反褶积的 MATLAB 程序段:

% 先求反子波(反褶积算子),再实施反褶积

```
function [f,o] = ls_inv_filter( w,NF,Lag,mu );
```

% w - - wavelet;

% NF invert wavelet length;

% Lag - - - the maximum location of wavelet;

% mu - - tradeoff parameter

```
NW = max( size( w ) ); % lenght of the wavelet
```

```
NO = NW + NF - 1; % Legth of the output
```

```
[ mc,mr ] = size( w );
```

```
if mc <= mr; w = w'; end;
```

```
b = [ zeros( 1,NO ) ]'; % Desire output
```

```
b( Lag,1 ) = 1. ; % Position of the spike
```

```
C = convmtx( w,NF ); % Convolution matrix
```

```
R = C' * Came * eye( NF ); % Toeplitz Matrix
```

```
rhs = C' * b; % Right hand side vector
```

```
f = inv( R ) * rhs; % Filter could solve by CG method
```

```
if nargout == 2
```

```
o = conv( f,w ); % Actual output
```

```
end
```

```
return
```

```
q = conv( f,s );
```

% 直接求反射系数(实施反褶积,MU 决定反褶积结果的频宽和视分辨率)

```
function f = ls_deconv( w,d,mu );
```

% w - - wavelet;

% NF inverts wavelet length;

% Lag - - - the maximum location of wavelet;

% mu - - tradeoff parameter

```

NW = max( size( w ) );           % lenght of the wavelet
NO = max( size( d ) );
NF = NO - NW + 1;               % Leght of the reflectivity
[ mc, mr ] = size( w );
if mc <= mr; w = w'; end;
[ mc, mr ] = size( d );
if mc <= mr; d = d'; end;
C = convmtx( w, NF );           % Convolution matrix
R = C' * C + mu * eye( NF );    % Toeplitz Matrix
rhs = C' * d;                   % Right hand side vector
f = inv( R ) * rhs;
return

```

第二节 Cauchy 稀疏约束 Bayesian 估计地震盲反褶积

一、盲反褶积数学框架

如果假设地下介质为水平层状介质模型,子波为雷克(Ricker)子波,地震记录可以看作是由震源子波与地下反射率函数、多次反射、仪器等诸多因素相褶积的过程。令 $d(t)$ 、 $w(t)$ 和 $n(t)$ 分别表示地震记录、地震子波及噪声,忽略透射损失,褶积过程数学模型(褶积模型)可以近似描述为

$$d(t) = \sum_{i=1}^{\infty} r_i w(t - \tau_i) + n(t), \quad (2-9)$$

其中, r_i 为地下第 i 个界面的反射系数; τ_i 为从激发点经地下第 i 个界面反射到接收点的双程旅行时。式(2-9)可以表示成褶积形式:

$$d(t) = r(t) * w(t) + n(t), \quad (2-10)$$

其中,反射率函数 $r(t) = \sum_{i=1}^{\infty} r_i \delta(t - \tau_i)$ (可以是反射系数序列,也可以包括多次反射的影响)。长期以来,褶积模型广泛用于描述地震反射勘探信号。反褶积就是褶积的逆过程,从地震记录 $d(t)$ 中恢复出反射率函数 $r(t)$ 或地震子波,实施子波处理和压缩。通常地表爆炸激发的地震子波是未知的,在地震记录上相邻反射的地震波又是重叠的,无法从地震记录中分离出地震子波,这是由于地下地层的厚度通常要小于地震子波的波长。因此,地震反褶积基本上是一个盲的过程,包括两个子问题的求解:子波估计和反子波算子设计。

假设随机噪声是正态的,子波长度很短,子波反问题的解的概率也是高斯分布的,地震反褶积问题可归结为如下极小优化问题数学框架:

$$\varphi(r, w) = \frac{1}{2} \alpha_d \|d - r * w\|_2^2 + \frac{1}{2} \alpha_w \|w\|_2^2 + \frac{1}{2} \alpha_r C(r) \quad (2-11)$$

其中, $\alpha_d = \frac{1}{\sigma_d^2}$, $\alpha_w = \frac{1}{\sigma_w^2} \alpha_r = \frac{1}{\sigma_r^2}$, σ_d 、 σ_w 、 σ_r 分别为地震数据、子波和反射系数的方差;
 $C(r) \propto \|r\|_2^2$ 为一个表示反射系数随机性的正函数, 与反射系数 2 范数平方成正比。进一步讨论在单位子波能量约束下, 反射系数具有一定的奇函数性质时, 式(2-11)可化为

$$\varphi(r, w) = \frac{1}{2} \alpha_d \|d - r * w\|_2^2 + \frac{1}{2} \alpha_r \|w\|_2^2 C(r) \quad (2-12)$$

若反射系数和子波独立(或弱相关), 可以分解成两个问题行松弛迭代分别求解子波和反射系数:

$$\varphi(r_0, w) = \frac{1}{2} \|d - r_0 * w\|_2^2 + \frac{1}{2} \frac{\alpha_r}{\alpha_d} C(r_0) \|w\|_2^2 \quad (2-13)$$

$$\varphi(r, w_0) = \frac{1}{2} \|d - r * w_0\|_2^2 + \frac{1}{2} \frac{\alpha_r}{\alpha_d} \|w_0\|_2^2 C(r) \quad (2-14)$$

二、Bayesian 反演与 Cauchy 稀疏约束正则化

1. 最小二乘反演

以反射系数反演为例。设单道反射系数序列 $q_k, k = 1, \dots, n_q$ 为稀疏脉冲, 子波已知为 w_k , $k = 1, \dots, n_w$, 噪声为 $n_k, k = 1, \dots, n_n$, 地震记录为 $s_k, k = 1, \dots, n_s$, 褶积模型可以写成:

$$d_k + n_k = w_k * r_k \quad (2-15)$$

若噪声近似为 0, 写成褶积矩阵形式:

$$C_w q \approx s \quad (2-16)$$

其中, C_w 为子波褶积矩阵; q 为反射序列向量; s 为地震记录向量。反演反射率算子、最小二乘准则使地震记录与褶积结果之间的误差平方和最小。误差为

$$\varepsilon_k = s_k - \sum_j w_j \hat{q}_{k-j}, k = 1, \dots, n_s \quad (2-17)$$

目标函数写成:

$$J = \sum_k \rho_1\left(\frac{\varepsilon_k}{\sigma_k}\right) \quad (2-18)$$

其中, $\rho_1(u) = \frac{1}{2} u^2$; σ_k 为每个记录的标准差, 为了简便, σ_n 通常取相同值。写成矩阵形式:

$$J = \frac{1}{2\sigma_n^2} \|C_w q - s\|_2^2 \quad (2-19)$$

由规则化方法得

$$C_w^T C_w q = C_w^T s \quad (2-20)$$

C_w^T 表示 C_w 转置。规则化式(2-20)为一个 Toeplitz 矩阵的线性系统, 通常可以用矩阵求逆、