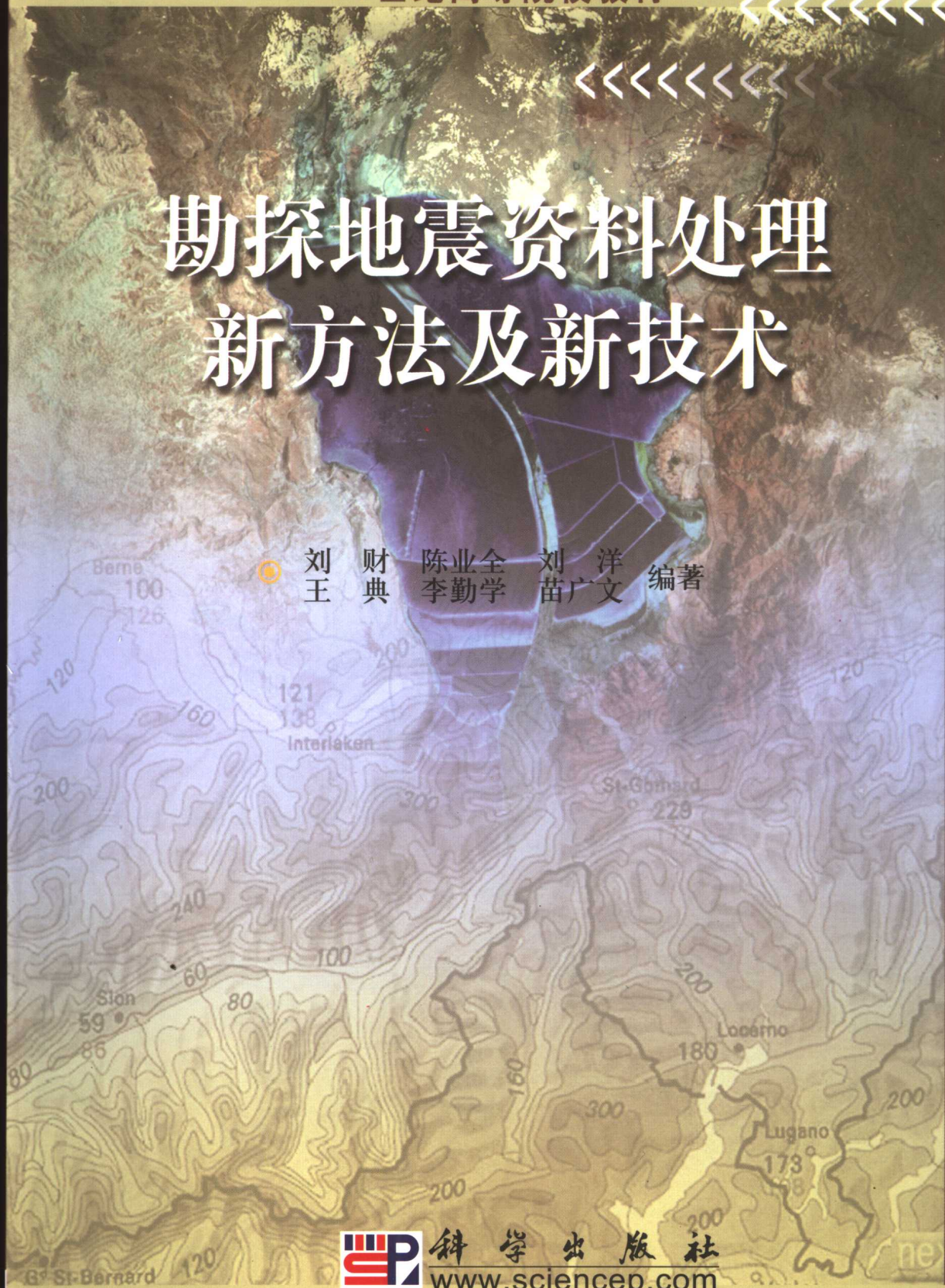




勘探地震资料处理 新方法及新技术

刘 王 财 典 陈业全 刘 洋 苗广文 编著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书共4章,系统地介绍了近年来勘探地震学资料处理中一些新方法
及新技术的基本理论、模型和实际处理效果等方面的内容。

本书从勘探地震学方法的基本理论入手,介绍其发展及主要数学基础,
着重分析了方法的实际应用效果。由于选取的方法比较广泛并且大多是近
期发展起来的技术,因此可以拓宽读者在地震勘探数据处理方面的知识面。

本书可作为地球物理学及地球探测与信息技术专业研究生一年级的教
材,并可作为地震勘探工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

勘探地震资料处理新方法及新技术/刘财等编著. —北京:科学出版社,
2006

(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-017139-X

I. 勘… II. 刘… III. 地震勘探-数据处理-高等学校-教材
IV. P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第034970号

责任编辑:胡华强 郭 森 李久进 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年6月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年6月第一次印刷 印张: 9 1/4

印数: 1—1 500 字数: 170 000

定价: 25.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<环伟>)

前 言

石油工业的迅速发展必须依靠先进的油气勘探理论和能切实解决生产难题的技术。数十年的油气勘探实践已证明,油气勘探方面的理论发展和技术进步对深入油气勘探、增加油气储量、提高勘探效益等发挥着极为重要的作用,而物理学、计算数学及计算机科学等学科的发展对油气勘探领域的理论和技术进步无疑起着促进作用,显然将这些知识引入油气勘探开发领域,对于解决复杂地球物理场特征的认识问题及其信息综合处理是非常重要的。

本书针对复杂地区地震勘探数据特点和要求的一些特殊性,开展了针对性的研究,特别是作者多年来通过主持完成国家自然科学基金、国家相关部委的研究项目,与大庆油田、吉林油田、中原油田等单位合作,开展了提高地震资料的信噪比、分辨率及成像等方面的研究,并及时引进了计算数学中的一些先进算法,开发了有实际效果的应用技术软件。

全书共4章。第1章系统地研究了提高地震资料信噪比的相关技术,针对随机干扰波的特点,开发了二维多级中值滤波技术;针对面波的特点开发了自适应网格滤波器、非线性拉东变换、二维小波变换技术,以及相应的静校正技术、叠前去噪技术、速度分析及多次波压制等方法。第2章研究了提高地震资料分辨率的相关处理技术,主要开发了复数道分析、小波变换、谱相关分析、球面扩散补偿与吸收补偿等技术。第3章针对波场识别与层析成像技术,开发了P、S波波场分离、模糊属性自动机波形识别、回折波CT等技术。第4章应用波动方程反演技术研究岩石物性的特征,开展了子波提取技术、波动方程双参数反演方法、Stokes方程的三参数反演方法、多参数反演技术在深层油气藏预测中的应用等研究。

本书是作者多年科研成果的总结,其中第1章由王典、刘财、苗广文撰写,第2章由刘洋、陈业全、刘财、王典撰写,第3章由刘财、李勤学、陈业全撰写,第4章由刘财、刘洋、王典等撰写。全书由刘财、陈业全和李勤学统稿,王世煜女士完成全书的绘图工作。

书中不完整或不当之处请同行批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 高信噪比技术研究	(1)
1.1 自适应网格滤波器	(1)
1.1.1 方法原理	(2)
1.1.2 应用效果分析	(3)
1.2 非线性拉东变换	(5)
1.2.1 基本原理	(6)
1.2.2 算法设计	(8)
1.2.3 应用效果分析	(9)
1.3 二维小波变换技术	(12)
1.3.1 基本原理	(13)
1.3.2 应用效果分析	(15)
1.4 二维多级中值滤波技术	(17)
1.4.1 理论基础	(18)
1.4.2 应用效果分析	(19)
1.5 其他典型去噪处理技术	(25)
1.5.1 静校正技术的方法研究	(26)
1.5.2 叠前去噪技术	(28)
1.5.3 速度分析及多次波压制	(28)
第 2 章 高分辨率处理技术	(31)
2.1 复数道分析技术	(31)
2.1.1 复数道特征的物理意义	(32)
2.1.2 高分辨率复数道分析方法	(32)
2.1.3 楔状模型记录三瞬参数的计算	(34)
2.2 小波变换技术	(38)
2.2.1 基本理论	(38)
2.2.2 应用效果分析	(39)
2.3 谱相关分析技术	(42)
2.3.1 基本原理	(43)
2.3.2 应用效果分析	(45)

2.4 球面扩散补偿与吸收补偿技术·····	(46)
2.4.1 均匀倾斜层状地层中地震波球面扩散补偿方法研究·····	(46)
2.4.2 一种频域地层吸收衰减补偿方法·····	(54)
第3章 波场识别与层析成像技术·····	(60)
3.1 P、S波波场分离技术·····	(60)
3.1.1 相位法分离P、S波·····	(60)
3.1.2 极化滤波·····	(61)
3.1.3 应用效果分析·····	(61)
3.2 波形识别技术·····	(63)
3.2.1 标准模式串为核的文法及自动机·····	(63)
3.2.2 模糊属性文法·····	(64)
3.2.3 模糊属性自动机·····	(66)
3.2.4 应用效果分析·····	(66)
3.3 回折波CT技术·····	(68)
3.3.1 回折波探测原理·····	(68)
3.3.2 线性化回折波CT技术的应用·····	(78)
第4章 波动方程反演技术·····	(83)
4.1 子波提取技术·····	(83)
4.1.1 波动方程延拓法提取震源子波·····	(83)
4.1.2 分时窗提取地震子波及在合成地震记录中的应用·····	(102)
4.2 波动方程双参数反演方法及应用·····	(109)
4.2.1 原理和方法·····	(109)
4.2.2 算法与数值模拟·····	(111)
4.2.3 实际地震记录反演·····	(114)
4.3 波动方程的三参数反演问题·····	(115)
4.3.1 时间域中的反演问题·····	(115)
4.3.2 频率域的正反演问题·····	(117)
4.3.3 第一类积分方程组的正则解·····	(122)
4.3.4 多个正则参数的优选方法·····	(123)
4.3.5 应用效果分析·····	(124)
4.4 多参数反演技术在深层油气藏预测中的应用·····	(130)
4.4.1 基本原理和方法·····	(130)
4.4.2 工区地质特征·····	(131)
4.4.3 朝阳沟阶地物性反演结果分析·····	(132)
主要参考文献·····	(136)

第1章 高信噪比技术研究

为适应石油勘探飞速发展的需要,我国地震勘探必须进一步发展三大技术——三维勘探技术、三高(高信噪比、高分辨率和高保真度)处理技术与储层预测技术。其中前两项技术被视为地震勘探的两大支柱技术;后一项技术则被视为远景技术。就地震资料处理而言,三高技术是地球物理学家长期追求的目标,而提高地震资料的信噪比又是地震资料处理的基础。众所周知,分辨率是建立在信噪比基础之上的,没有一定的信噪比,就谈不上什么分辨率。实际上,信噪比与分辨率是一个问题的两个方面。以往,由于受到采集和处理技术的限制,不少人认为信噪比与分辨率似乎是一对难以克服的矛盾。随着地震资料采集、处理技术的不断进步,现在普遍认识到信噪比与分辨率是一个对立统一的矛盾。对此,许多专家学者为解决这对矛盾提出了许多有效的途径和方法。

本章主要围绕提高信噪比问题,介绍几种近年来在地震勘探领域比较前沿的应用于实际地震资料提高信噪比的技术,并从实际处理中分析各个方法的优缺点。如果将各个方法有机地配合使用,将达到更好的效果。另外,还特别针对我国西部地区的实际地质条件,提出了一些有针对性的提高地震资料信噪比的方法。

1.1 自适应网格滤波器

常规地震信号处理中的消除面波方法,一般都要求输入信号是平稳的。实际上地震波在传播过程中受地层频散作用的影响是不容忽视的。为了有效地消除面波,已经采用了一些方法:多道滤波、谱平衡、线性频率-调制匹配滤波等。所有这些方法在消除面波方面都有一定的效果。而最小均方自适应网格滤波器在消除面波方面有其特有的优越性。

Itakura 和 Saito 在声音信号的处理中第一次提出了基本的网格结构, Makhoul 展示了网格滤波器的优越性。这类方法的主要优点有:

- (1) 直接由输入时间序列求滤波器系数,具有时间递推和阶次递推公式,每输入一个新数据后,都要自动修改滤波器参数适用于时变过程;
- (2) 得到稳定的线性最小平方意义下的最优解;
- (3) 各级之间正交,增加阶次使前面各阶参数不变,可同时得到各阶正、反向预测误差,便于动态定阶;

(4) 计算量仅与滤波器阶数成正比,具有自适应增益因子,根据输入数据所含信息多少调整时间递推修正量大小,具有较快的收敛特性和跟踪时变能力;

(5) 具有良好的数值计算特性,易于硬件实现。

1.1.1 方法原理

Gray 和 Markel, Makhoul, Robinson 等先后给出网络滤波器的基本定义:

$$f_0(n) = g_0(n) = x(n) \quad (1.1.1)$$

$$f_m(n) = f_{m-1}(n) + r_m g_{m-1}(n-1) \quad (1.1.2)$$

$$g_m(n) = r_m f_{m-1}(n) + g_{m-1}(n-1) \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (1.1.3)$$

其中, n 是离散时间; $x(n)$ 是输入地震信号; r_m 是网格反射系数; $f_m(n)$ 和 $g_m(n)$ 是在 m 级中的前向预测残差和后向预测残差(图 1.1.1)。这是一个反滤波结构,工作原理类似于反褶积。因此它能消除面波和压缩有效信号。

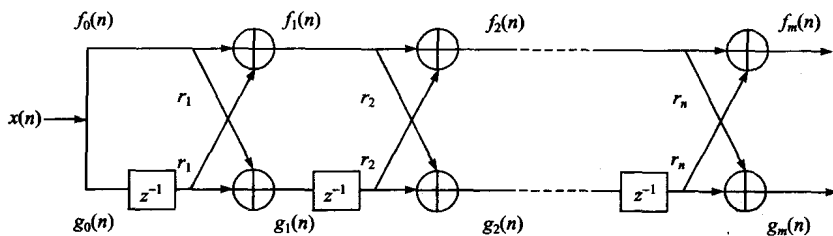


图 1.1.1 基本的网格结构

公式中,反射系数 r_m 的计算是关键,本节应用自适应最小平方网格算法(简称 LMS 法)进行格点滤波参数的计算:

令 $w(n)$ 表示加权函数,使得

$$\begin{aligned} w(n) &= 0 \quad (n < 0) \\ w(n) &\geq 0 \quad (n \geq 0) \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

再定义一个误差函数和加权误差函数:

$$E_m(k) = (1 - \beta) f_m^2(k) + \beta g_m^2(k) \quad (1.1.5)$$

$$\bar{E}_m(k) = \sum_{k=-\infty}^n w(n-k) E_m(k) \quad (0 \leq \beta \leq 1) \quad (1.1.6)$$

那么最佳反射系数 r_m 可以利用使 $\bar{E}_m(n)$ 相对于 r_m 的最小化来求得

$$r_{m+1}(n) = \frac{- \sum_{k=-\infty}^n w(n-k) f_m(k) g_m(k-1)}{\sum_{k=-\infty}^n w(n-k) [\beta f_m^2(k) + (1-\beta) g_m^2(k-1)]} \quad (1.1.7)$$

显然,滤波器是稳定的。其输出是平衡的和正交的,并且可以写成式(1.1.8):

$$r_{m+1}(n) = - \frac{C_m(n)}{D_m(n)} \quad (1.1.8)$$

$$\text{其中} \quad C_m(n) = \sum_{k=-\infty}^n w(n-k) f_m(k) g_m(k-1) \quad (1.1.9)$$

$$D_m(n) = \sum_{k=-\infty}^n w(n-k) [\beta f_m^2(k) + (1-\beta) g_m^2(k-1)] \quad (1.1.10)$$

显然, $C_m(n)$ 和 $D_m(n)$ 有下列的递推公式:

$$C_m(n) = C_m(n-1) + w(0) f_{m-1}(n) g(n-1) \quad (1.1.11)$$

$$D_m(n) = D_m(n-1) + w(0) [\beta f_{m-1}^2(n) + (1-\beta) g_{m-1}^2(n-1)] \quad (1.1.12)$$

一般 $\beta=0.5$, $w(0)=1$ 即可,但 $w(n)$ 的选择原则是:对现时数值加较大的权,而对过去的数值加较小的权。

1.1.2 应用效果分析

LMS 自适应网格滤波器已经用于合成记录和实际地震记录的处理。在做合成记录时应用了如下方程给出的模型:

$$x(t) = s(t) + r(t)$$

其中, $x(t)$ 是地震数据; $s(t)$ 是信号; $r(t)$ 是相干噪声。图 1.1.2 表示一个带有噪声的合成记录。为简单起见,用一个啾鸣信号来模拟直线调频面波,面波的频率范围是 0~10 Hz。而做成合成记录所用的子波是一个中心频率为 30 Hz 的雷克子波。图 1.1.3 是 LMS 自适应网格滤波器处理后的输出。

为了观察应用 LMS 自适应网格滤波器前后子波的情况,从模型中抽出一道,分析其在应用 LMS 自适应网格滤波器前后的频谱。图 1.1.4(a) 是应用 LMS 自适应网格滤波器前的频谱,图 1.1.4(b) 是应用 LMS 自适应网格滤波器后的结果。可以看出已成功地去掉了面波。

为了调查 LMS 自适应网格滤波器在实际应用中的效果,选出某地区的记录 [图 1.1.5(a)], 通过 LMS 自适应网格滤波器处理后,消除了面波 [(图 1.1.5(b))], 同时提高了地震记录的信噪比和分辨率。

总之, LMS 算法是近年来发展起来的一类自适应算法。本节提出的格点滤波

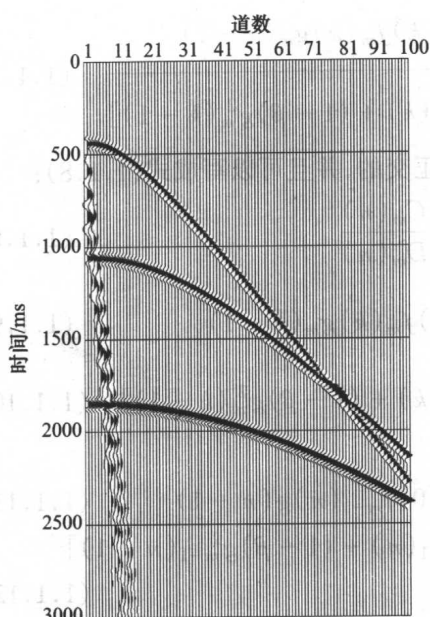


图 1.1.2 带有随机噪声的合成记录

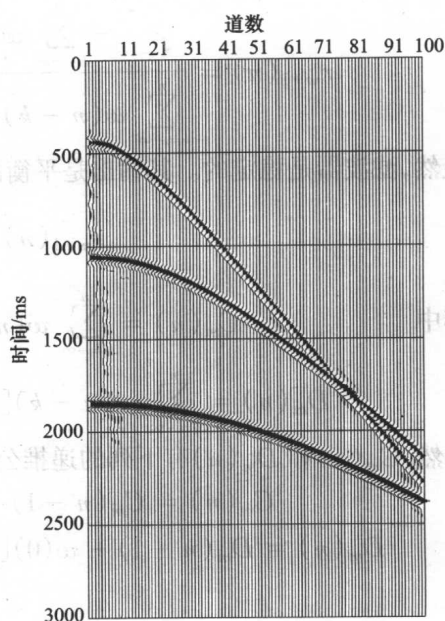


图 1.1.3 LMS 自适应网格滤波器的输出

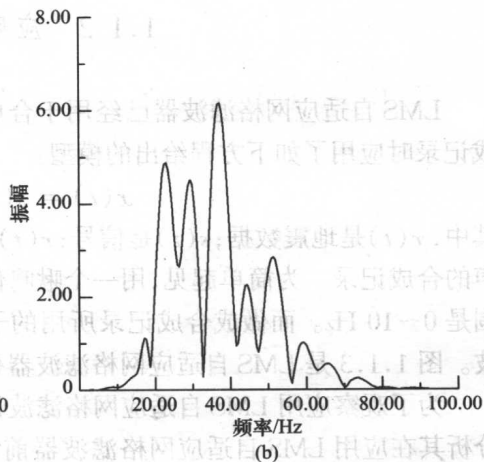
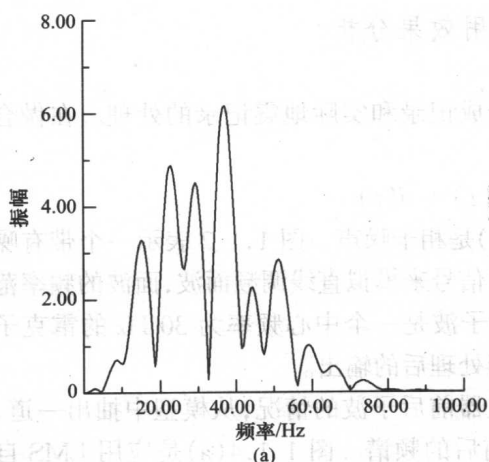


图 1.1.4 应用 LMS 自适应网格滤波器前(a)和应用 LMS 自适应网格滤波器后(b)的频谱

参数连续自适应估计的新思想,是从平衡情况下的格点滤波参数具有与输入信息有关的和式之比这一计算特点出发的。所以由此提出的偏相关系数连续自适应估计的各种方法,可以完全用于这类参数的连续自适应估计。实际资料处理结果表明,LMS 自适应网格滤波只要输入地震记录即可,在处理时变数据方面有较明显

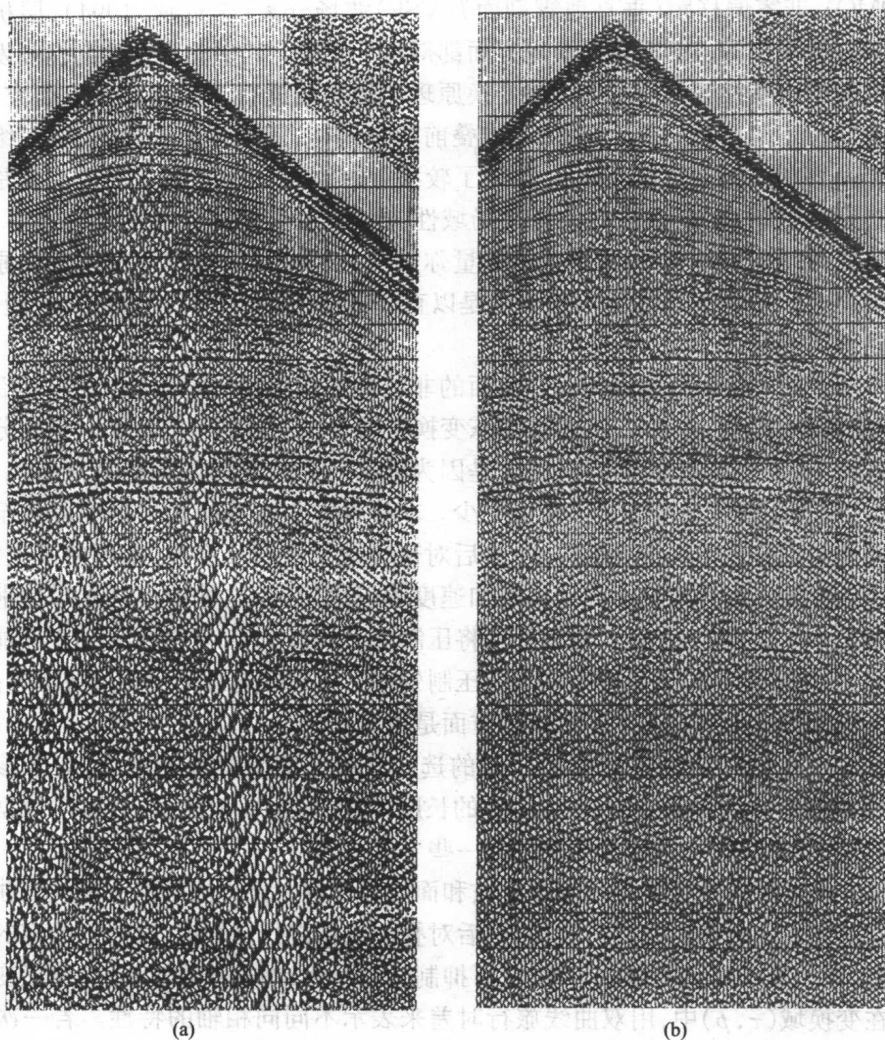


图 1.1.5 含有面波的实际记录(a)与自适应网格滤波器的输出(b)

的改进,为解决子波时变问题提供了有效的手段。这种新的连续自适应网格去噪方法,具有运算速度快、参数控制简单及效果稳定的特点。

1.2 非线性拉东变换

自从奥地利数学家拉东(Radon)在 1917 年首先在数学研究中推导出建立图像的理论以来,拉东变换技术越来越得到广泛的应用。如在速度分析(Panos et al., 1994)、压制多次波(Douglas et al., 1992)、动校正、纵横波分离、倾角时差校

正(DMO)、非零偏移距(垂直地震剖面)(VSP)波场分离(李远钦, 1994)、层析成像、偏移(徐基祥等, 1998)和反演等方面都得到了应用。其中北京石油勘探开发科学研究所的徐基祥等先后利用拉东变换原理对地震波进行了偏移成像等研究, 如二维叠后拉东偏移及拉东反偏移、二维叠前拉东偏移、三维叠前投影偏移、三维叠后投影偏移和二维叠前深度偏移, 取得了较满意的效果。然而, 常规拉东变换是沿直线进行的倾斜叠加, 在应用中有其局域性, 比如, 用常规拉东变换无法处理 $t-x$ 域中非线性问题, 否则会造成严重的能量弥散现象; 再比如, 用常规拉东变换原理进行地震 CT 成像时, 要求地震波射线是以直线进行传播, 然而, 根据费马原理, 这显然是不可能的。

本节介绍一种以双曲面为积分曲面的非线性拉东变换, 该变换是对数据沿曲面(双曲面)的积分(叠加)。而常规拉东变换是沿直线进行的倾斜叠加。在积分曲面的选择上, 采用双曲线簇作变换, 这是因为地震反射资料的同相轴是双曲线, 显然, 它比用直线簇作变换能量弥散得更少。非线性拉东正变换是根据地震波至旅行时差的差别分离不同类型地震波, 然后对部分数据进行反变换, 就可使多次波、噪声得到压制。当多次波干扰使得叠加速度难以确定时, 这种处理就显得特别重要。给出一个精确的速度后, 叠加处理将压制更多的多次波, 若多次波仍在叠加最终剖面上, 则需要对每道集进行多次波压制处理。尽管处理每个道集的成本较高, 但在压制常规叠加压制不了的多次波方面是很有效的。

在非线性拉东变换中, 参数 (τ, p) 的选择直接影响到变换的结果, 对于参数 τ , 可根据有效波出现的范围, 选取一定的长度; 对于参数 p 值的范围, 可以依据一次波能量大约对应的时差, 把变换中的一些 p 值置零。

可以将这种方法应用于压制多次波和面波等干扰。该方法是沿一系列双曲面对正常时差校正后的道集进行叠加, 然后对叠加数据进行褶积滤波(对于给定的有限数据, 褶积算子既可提高分辨率, 又可抑制线性干扰, 如边界效应)后算出正变换值。在变换域 (τ, p) 中, 用双曲线旅行时差来表示不同同相轴的特性。若一次波与多次波之间存在不同的时差, 则它们出现在不同范围内的变换域 (τ, p) 中。当叠加面接近同相轴的时差时, 则变换域 (τ, p) 中的多次波与一次波分离得就越明显, 最后从原始地震记录中减去包含有多次波的局部变换结果。同样原理, 对面波消除所作的试验, 效果较好。

1.2.1 基本原理

非线性拉东变换既可在时域内实现, 也可在频域内实现。设地震记录为 $\varphi(x, t)$, (t, x) 域中投影的截距时间为 τ , p 为射线参数。则非线性拉东正变换是沿曲线 $t = \tau + pg(x)$ 的积分(叠加), 即

$$\phi(p, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi[x, \tau + pg(x)] dx \quad (1.2.1)$$

其中, $g(x)$ 决定着用于地震记录 φ 叠加的时差曲线。

下面推导非线性拉东反变换。

对式(1.2.1)中 τ - p 域记录 $\phi(p, \tau)$ 作关于 τ 的一维傅里叶变换, 有

$$\bar{\phi}(p, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(p, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (1.2.2)$$

考虑积分:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(p, \tau) e^{-i\omega(\tau + pg(x_0))} d\tau dp = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\phi}(p, \omega) e^{-i\omega pg(x_0)} dp \quad (1.2.3)$$

同时, 由式(1.2.1)可得出

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(p, \tau) e^{-i\omega(\tau + pg(x_0))} d\tau dp \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} dp \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, \tau + pg(x)) e^{-i\omega(\tau + pg(x_0))} dx \end{aligned} \quad (1.2.4)$$

整理得

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, t) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{2\pi} |g(x)| \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| \bar{\phi}(p, \omega) e^{i\omega pg(x)} dp \quad (1.2.5)$$

对式(1.2.5)作反傅里叶变换得

$$\varphi(x, t) = \frac{1}{2\pi} |g(x)| F^{-1} \left[\int_{-\infty}^{\infty} |\omega| \bar{\phi}(p, \omega) e^{i\omega pg(x)} dp \right] \quad (1.2.6)$$

其中, F^{-1} 表示反傅里叶变换。用微分关系可将式(1.2.6)写成

$$\varphi(x, t) = -\frac{1}{2\pi} |g(x)| \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} F^{-1} [(-i \operatorname{sgn} \omega) \bar{\phi}(p, \omega) e^{i\omega pg(x)}] dp \right\} \quad (1.2.7)$$

其中, sgn 表示符号函数。根据傅里叶变换与褶积的关系, 频率域乘积等于时间域的褶积及傅里叶变换延迟定理:

$$\varphi(x, t) = -\frac{1}{2\pi} |g(x)| \frac{\partial}{\partial t} H^+ \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\phi}(p, t - pg(x)) dp \quad (1.2.8)$$

其中, H^+ 表示希尔伯特变换。

式(1.2.1)和式(1.2.8)为正、反非线性拉东变换。式(1.2.1)称为非线性拉东正变换, 式(1.2.8)称为非线性拉东反变换。

非线性拉东变换与经典的拉东变换的区别在于, 非线性拉东变换是将时空域 t - x 中的一条曲线 $t = \tau + pg(x)$ 映射到 τ - p 域上的一个点, 如图 1.2.1 所示。

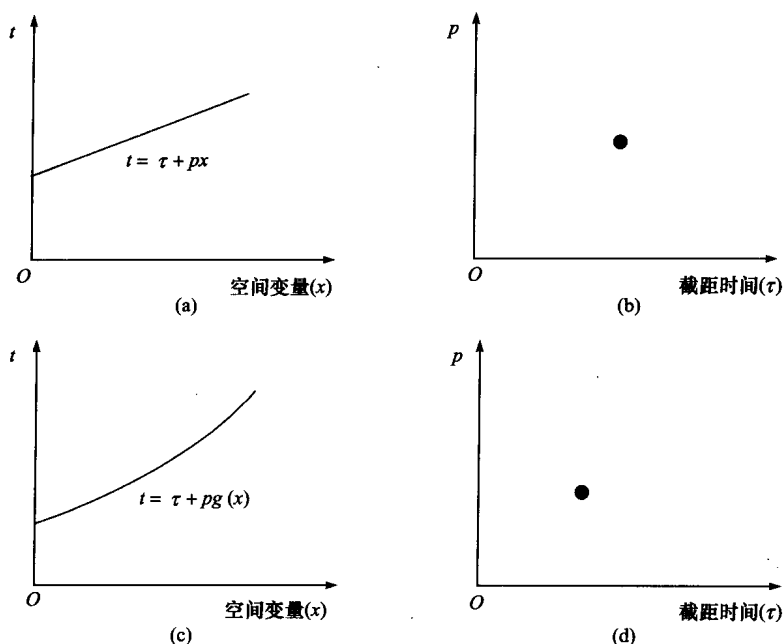


图 1.2.1 (a)和(b)线性拉东变换示意图;(c)和(d)非线性拉东变换示意图

需要注意的是,非线性拉东变换是对双曲线 $g(x)$ 作叠加,对于不同的问题采用不同的曲线簇作变换。

1.2.2 算法设计

首先,把式(1.2.1)写成如下形式:

$$\phi(p, \tau) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi[x, \tau + pg(x)] dx \quad (1.2.9)$$

其中, ϕ 为地震记录; φ 为变换; x 为空间变量; p 为射线参数; τ 为截距时间;函数 $g(x)$ 决定着用于数据 ϕ 叠加的时差曲线。此方程将常规的拉东变换由沿直线倾斜叠加推广为沿任意曲线的积分。

再对其离散化:

$$\phi(p_j, \tau) = \sum_{k=1}^N \varphi[x_k, \tau + p_j g(x_k)] \Delta x_k \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (1.2.10)$$

然后再把式(1.2.8)写成下面离散化:

$$\varphi(x_k, t) = -\frac{1}{2\pi} \left| g(x_k) \right| \frac{\partial}{\partial t} \left[\sum_{j=1}^M \left(\frac{1}{\pi T} \right) \cdot \phi(p_j, t - p_j g(x_k)) \Delta p_j \right] \quad (k = 1, 2, \dots, M) \quad (1.2.11)$$

在计算过程中,由时间域变换到频率域容易实现。式(1.2.9)的一维傅里叶变换为

$$\bar{\phi}(p, \omega) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \bar{\varphi}(x, \omega) e^{i\omega p g(x)} dx \quad (1.2.12)$$

其中,

$$\bar{\phi}(x, \omega) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \varphi(x, t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.2.13)$$

式(1.2.12)说明在时间域中沿曲线的积分,在变换域中则为相移积分。其离散形式为

$$\bar{\phi}(p_j, \omega) = \sum_{k=1}^N \bar{\varphi}(x, \omega) e^{i\omega p_j g(x_k)} \Delta x_k \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (1.2.14)$$

式(1.2.14)也可写成

$$\bar{\phi}_\omega(p_j) = \underline{A} \varphi_\omega(g(x_k)) \quad (1.2.15)$$

其中, $M \times N$ 阶矩阵元素 $\underline{A}$ 为

$$A_{j,k} = e^{i\omega p_j g(x_k)} \Delta x_k \quad \begin{pmatrix} j = 1, 2, \dots, M \\ k = 1, 2, \dots, N \end{pmatrix} \quad (1.2.16)$$

式(1.2.15)的最小平方反演解为

$$\phi_\omega(g(x_k)) = [\underline{A}^* \underline{A}]^{-1} \underline{A}^* \bar{\phi}_\omega(p_j) \quad (1.2.17)$$

其中, $\underline{A}^*$ 是 $\underline{A}$ 的共轭矩阵。

消除干扰波(如多次波、噪声等)的算法首先需要对变换域中干扰能量的位置进行估计,然后根据其不同的时差,通过拉东变换来计算它的变换位场,分解不同的同相轴。在包含干扰波能量的参数范围内通过拉东反变换估算干扰波,再从原始共中心点道集中减去该干扰波能量的办法实现。它能在一次波中较精确地识别多次波、噪声等干扰。

在非线性拉东变换(τ, p 域变换)中,参数选择直接影响到变换结果。对于参数 τ ,可根据有效波出现的范围,选取一定的长度,其间隔 $\Delta\tau$ 可根据不出现时间假频和提高计算速度的要求进行考虑;对于参数 p 值的范围,我们根据一次波能量大约对应的时差,把变换中的一些 p 值置零。 p 值的范围选择过大,易带入不必要的干扰; p 值的范围选择过小,又会造成数据丢失,在逆变换时无法恢复。

1.2.3 应用效果分析

考虑到地震反射波的特点,应用一种利用双曲面变换压制多次波的方法,即通过对叠加数据进行褶积滤波来计算正变换的值。当叠加面越接近同相轴的时差,则变换域中多次波与反射波分离得就越明显。另外,多次波常常影响资料处理时

的速度分析,若在进行速度分析的地震道集中消除多次波干扰,则可以获得较好的叠加速度估计值。准确的速度估计值,又可以使叠加剖面上多次波得到更好的压制。从而大大提高了地震资料的处理质量。

通过对地震资料中任何不期望有的同相轴时差进行参数化,对那些无用的能量进行有选择的变换,经非线性拉东反变换后,从原始数据中减去这些干扰。相对于传播时间和偏移距而言,多次反射波的时差曲线也为双曲线。因此,可以把时间延迟函数 $g(x)$ 用数学公式表示为

$$g(x) = \sqrt{(x_k)^2 + (z_{\text{ref}})^2} - z_{\text{ref}} \quad (1.2.18)$$

其中, x_k 是接收点的偏移距; z_{ref} 是常量,被定义为参考深度。 z_{ref} 的选择不是任意的,因为该参数决定着这些双曲线和那些反射波之间的差异。这种差异越小,变换域中所出现的同相轴就越紧、越密。这里,令参考深度等于最大偏移距,用这个 z_{ref} 可以最佳地分辨该深度上的反射同相轴,即可得到非线性拉东变换的离散正、反变换公式:

$$\phi(p_j, \tau) = \sum_{k=1}^N \varphi[x_k, \tau + p(\sqrt{(x_k)^2 + (z_{\text{ref}})^2} - z_{\text{ref}})] \Delta x_k \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (1.2.19)$$

$$\begin{aligned} \varphi(x_k, t) = & - \frac{|x_k|}{2\pi \sqrt{(x_k)^2 + (z_{\text{ref}})^2}} \\ & \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[\sum_{j=1}^M \left(\frac{1}{\pi} \right)^* \phi \left[p_j, t - p_j(\sqrt{(x_k)^2 + (z_{\text{ref}})^2} - z_{\text{ref}}) \right] \Delta p_j \right] \\ & (k = 1, 2, \dots, M) \end{aligned} \quad (1.2.20)$$

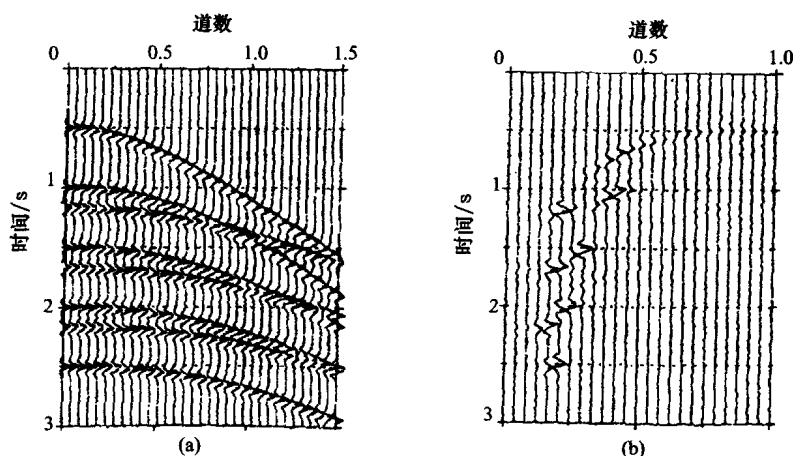


图 1.2.2 含有多次波合成记录(a)与拉东反变换(b)

值得注意的是,即使在正常时差校正后的地震道集中,反射波的剩余时差也近似于双曲线。叠加面与反射时差吻合得越好,变换域中不同同相轴的定位就越好。此方法的基本假设是,多次波时差、噪声时差与一次波时差不同,当变换域中多次波、噪声和一次波反射波同相轴分离时,则多次波、噪声就可以从一次反射波中分离出来(图 1.2.2 至图 1.2.4)。在实际地震资料处理中应用取得了预期的效果(图 1.2.5)。

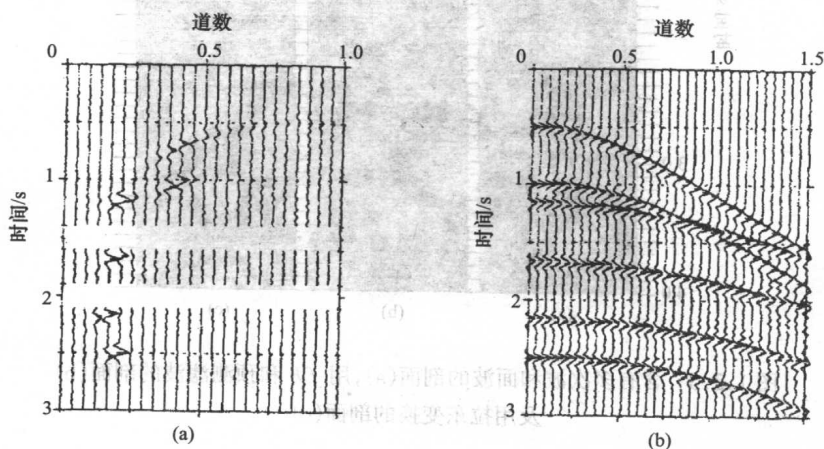


图 1.2.3 切除两层的多次波图(a)与拉东反变换后的成果图(b)

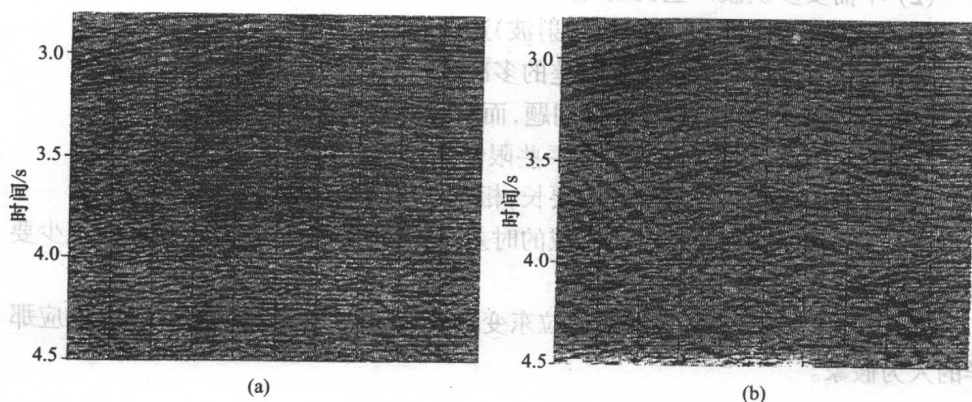


图 1.2.4 含有多次波的剖面(a)及消除多次波的剖面(b)

总之,在试验过程中,为了更好地消除多次波,在非线性拉东变换前,应该先进行噪声消除。因为在变换域中,较高的噪声可能会限制反射同相轴的分辨率,从而降低了非线性拉东变换消除多次波的功能。

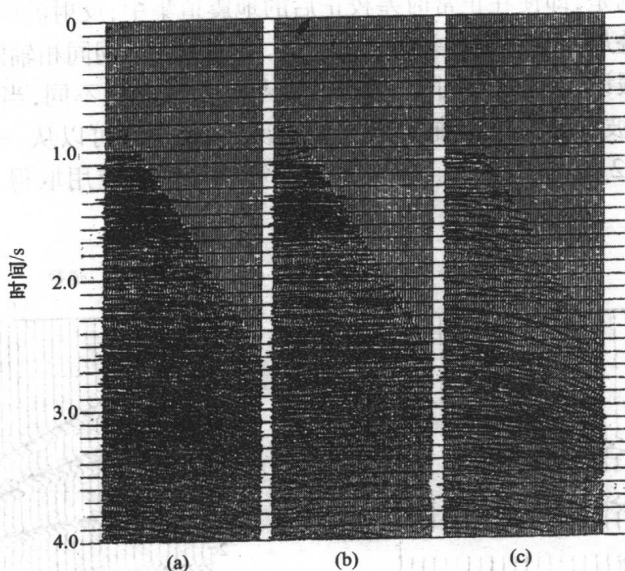


图 1.2.5 含有多次波和面波的剖面(a),用 $f-k$ 和预测滤波的剖面(b)及用拉东变换的剖面(c)

非线性拉东变换技术的优点为:

- (1) 在全部炮检距处同等地实现多次波消除和噪声衰减;
- (2) 不需要多次波产生机制的知识;
- (3) 不需要多次波和一次波(反射波)速度的详细资料;
- (4) 可以衰减各种具有可变时差的多次波;
- (5) 可处理 $t-x$ 域中的非线性问题,而不会造成能量弥散现象。

与非线性拉东变换技术有关的一些限制条件是:

- (1) 计算时间明显比常规技术要长,相对处理成本较高;
- (2) 多次波必须有足够的供衰减的时差,从经验上看,近道与远道之间至少要有 30ms 的时差,才能使该方法有效;
- (3) 像 $f-k$ 滤波一样,在非线性拉东变换域里的截止可能引起像 Gibbs 效应那样的人为假象。

1.3 二维小波变换技术

在处理地震数据时,过去比较重视中层和浅层信息,深层信息往往被忽略。因此,深层地震数据的信噪比和分辨率都很低。很难落实地质构造,给深层油气形成和演化的研究带来困难。