

迭代抛物 Radon 变换法分离一次波与多次波

谢俊法*^① 孙成禹^① 韩文功^②

(^①中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; ^②中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257000)

谢俊法, 孙成禹, 韩文功. 迭代抛物 Radon 变换法分离一次波与多次波. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 76-81.

摘要 Radon 变换法是进行一次波与多次波分离的常用手段, 最小平方约束下的频率域抛物 Radon 变换将 $t-x$ 域数据转换到 Radon 域后, 因存在剪刀状发散的截断效应, 用传统方法难以彻底分离一次波和多次波。针对这一缺陷, 提出了迭代抛物 Radon 变换法, 即在 Radon 域截取一次波聚焦点附近很小区域内的数据为初始数据, 经过 Radon 反变换和正变换后得到新的 Radon 域数据, 然后用初始数据覆盖对应的小区域, 经过迭代, 最终得到保幅效果较好的一次波, 且几乎不含多次波。利用相同的方法, 也可以得到几乎不含一次波的多次波。最后通过理论模型和实际资料的处理, 验证了本文方法的正确性和有效性。

关键词 Radon 变换 迭代法 一次波 多次波 波场分离

中图分类号: P631 **文献标识码**: A

1 引言

在常规地震资料处理中, 多次波被视为一种相干噪声严重干扰一次波, 降低了地震资料的信噪比; 但也有学者认为可以将多次波转换为一次波^[1], 从而使多次波的信息得以利用。无论是利用多次波, 还是压制多次波, 多次波与一次波的分离都是必不可少的, Radon 变换在多次波与一次波的分离中具有重要的作用。鉴于相同截距时间的一次波和多次波有不同的视速度, 因此在 Radon 域中一次波和多次波显示不同的曲率, 利用该特性就可以将二者分离开来。Hampson^[2]将 Radon 变换用于多次波的剔除, 然而常规最小二乘抛物线 Radon 变换存在剪刀状发散的截断效应, 多次波与一次波仍然难以彻底分离。基于稀疏约束反演的高精度 Radon 变换, 虽然可以获得较高的分辨率, 且截断效应降到足够小, 可以更好地分离多次波和一次波, 但计算量大, 难以保证分离后信号振幅的恢复^[3,4]。以往传统分离一次波和多次波方法的关键是设计折线型切除函数, 但此法存在能量相互泄漏的问题。Wang^[5]

提出了直接利用最小二乘法, 在 Radon 域采用自适应分离方法减弱截断效应, 该方法的核心是设计一个蒙版函数拾取剪切线外侧的残余能量, 然而计算蒙版函数所用的数据同时包含一次波和多次波信息, 且需要选择合适的均衡系数和平滑因子, 可见要彻底分离多次波和一次波并非易事。

本文提出迭代 Radon 变换法分离一次波和多次波, 选取 Radon 域中一次波聚焦点附近很小区域内的数据为初始数据, 然后通过迭代补偿由于截取区域小而造成的能量损失, 使分离前后一次波的振幅基本保持一致。由于截取的区域小且聚焦点附近受多次波的干扰相对较小, 所以得到的一次波区域几乎不含多次波。类似地利用相同的方法, 也可以得到不含一次波的多次波。

2 Radon 变换多次波分离的基本原理

一般情况下, 地下介质的速度随深度的增加而增加, 所以多次波时距曲线和具有相同截距时间的一次波相比有更大的曲率。因此利用在时间域难以分开的多次波和一次波曲率的差异, 即可在 Radon

* 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 266580. Email: xiejunfa2010@163.com

本文于 2012 年 12 月 4 日收到, 最终修改稿于 2013 年 10 月 28 日收到。

本研究受国家科技重大专项课题(2011ZX05006-002-05)资助。

域中实现波场分离。

2.1 基本算法

自 Hampson^[2] 提出离散抛物线 Radon 变换 (PRT) 之后, Radon 变换迅速应用到许多领域, 时间域的抛物 Radon 正变换与反变换的形式为

$$\begin{cases} m(\tau, q) = \int d(x, t = \tau + qx^2) \\ d(x, t) = \int m(q, \tau = t - qx^2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d(x, t)$ 是时间—炮检距域地震数据; $m(\tau, q)$ 是对应的 Radon 域数据。其频率域的正变换与反变换形式为^[1~5]

$$M(\omega, q) = \sum D(\omega, x) \exp(j\omega qx^2) \quad (2a)$$

$$D(\omega, x) = \sum M(\omega, q) \exp(-j\omega qx^2) \quad (2b)$$

式中: $M(\omega, q)$ 为 $m(\tau, q)$ 的傅里叶变换; $D(\omega, x)$ 为 $d(x, t)$ 的傅里叶变换。对于每一个频率分量, 将式(2b)写成矩阵形式

$$\mathbf{D} = \mathbf{R}\mathbf{M} \quad (3)$$

式中: $R_{i,k} = e^{-j\omega q_k x_i^2}$, $i = 1, 2, \dots, n_x$; $k = 1, 2, \dots, n_q$; n_x 为原始道集的地震道数; n_q 为变换域 (τ, q) 中 q 道数 (Radon 参数)。

抛物 Radon 正变换公式可以通过求解式(3)得到, 然而由于 n_x 与 n_q 不一定相等, 在 $n_x > n_q$ 的情况下 (实际数据中, 这个条件一般能够满足), 得到正变换的最优解为^[6]

$$\mathbf{M} = (\mathbf{R}^H \mathbf{R} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{R}^H \mathbf{D} \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}^H 为矩阵 \mathbf{R} 的共轭转置; \mathbf{I} 为单位矩阵; λ^2 为阻尼因子, 其值一般在 $0.1 \sim 1$ 之间^[6]。本文使用如下抛物线 Radon 变换对

$$\mathbf{M} = (\mathbf{R}^H \mathbf{R} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{R}^H \mathbf{D} \quad (5a)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{R}\mathbf{M} \quad (5b)$$

将式(5b)代入(5a)得到

$$\mathbf{M} = (\mathbf{R}^H \mathbf{R} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{R}^H \mathbf{R}\mathbf{M} \quad (6)$$

考虑到 λ^2 比较小, 有 $(\mathbf{R}^H \mathbf{R} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{R}^H \mathbf{R} \approx \mathbf{I}$, 所以有

$$\mathbf{M} \approx \mathbf{M} \quad (7)$$

式(7)表明, 式(5)的 PRT 变换对可以认为是近似可逆的, 使得经过 PRT 正变换和反变换之后, 数据基本上不发生变化, 这是 PRT 进行波场分离的必要条件, 也是使用迭代法的前提。

在进行一次波和多次波分离时, 设输入的地震数据 $d(x, t)$ 包含一次波 D1 和多次波 D2, 利用

式(5a)进行 PRT 正变换, 由于一次波和多次波的曲率不同, 所以二者在 Radon 域内的分布区域不同, 从而在 Radon 域内实现波场分离。在 Radon 域内提取一次波数据, 再用式(5b)进行 PRT 反变换就得到一次波数据 D1; 同理, 在 Radon 域内提取多次波数据, 做 PRT 反变换就得到多次波数据 D2。

2.2 算法的可行性分析

式(1)清楚地描述了时间域 PRT 变换是以抛物线为积分路径进行求和, PRT 正变换的截距时间由零逐渐增加, 对于每个截距时间, 将抛物线积分路径按照设定的曲率范围以固定的曲率间隔进行扫描。理论上, 当积分路径与同相轴不完全重合时, 沿该路径的数据有正有负, 它们的和近似为零; 当路径与同相轴完全重合时, 沿此路径积分是对该同相轴所有炮检距数据的同相叠加, 该积分结果的绝对值相对较大; 因此时间域的一个同相轴在 Radon 域内是一个收敛的点 (如图 1b 中的交叉点 1 和 2), 它包含了同相轴所有炮检距的信息, 通过该收敛点可以反推时间域的同相轴信息。

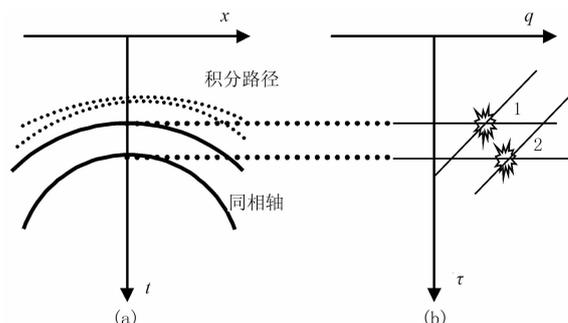


图 1 抛物 Radon 变换从 $t-x$ 域到 $\tau-g$ 域的示意图
(a) 积分路径与同相轴示意图; (b) 图 a 对应的 Radon 域数据示意图

然而, 空间截断效应影响了 Radon 域的收敛 (图 1b), 在 Radon 域中近炮检距数据导致水平方向的假象, 远炮检距数据导致倾斜方向的假象。从式(7)可以看出, 时间域数据经过 PRT 正反变换后基本不变, 说明在 PRT 反变换过程中, 所有的假象都得到了很好的模拟。由于一次波与多次波在水平方向和倾斜方向的假象可能会交织在一起, 进行波场分离时, 传统的方法是设计折线型切除函数, 它不能使一次波和多次波的假象完全分离, 因此这种方法会导致波场分离不彻底。Radon 域中聚焦点附近很小区域的数据包含了时间域同相轴全部炮检距的信息, 如果仅对聚焦点附近的小区域做 PRT 反变

换,相当于切除了假象,由于聚焦点的区域小且能量集中,它几乎不受其他同相轴的假象干扰,但由于没有同相轴自身的假象参与PRT反变换,会导致能量损失,振幅将会减小。为了弥补能量损失的缺陷,截取Radon域内聚焦点附近区域数据(称之为初始数据)做PRT反变换与正变换,假象能够得到部分恢复;用初始数据覆盖对应区域并做PRT反变换和正变换,假象能够再次得到部分恢复,然后再用初始数据覆盖对应区域并做PRT反变换和正变换,经过一定次数的迭代,振幅可以完全恢复。

2.3 波场分离流程

在进行一次波分离时,对动校正后的数据做PRT正变换,在Radon域截取一次波聚焦点附近很小区域的数据,得到“一次波数据P”,该数据包含了时间域同相轴的所有炮检距信息。每一步迭代都做PRT反变换和正变换,并用“一次波数据P”覆盖Radon域的对应区域,迭代过程中不需要波场分离,经过一定次数的迭代后,一次波能量得到恢复,迭代过程就是一个能量恢复的过程。利用同样方法,可以分离出多次波。迭代Radon变换法分离一次波和多次波的流程如图2所示,需要说明的是,一次波与多次波的分离分别进行,互不影响。

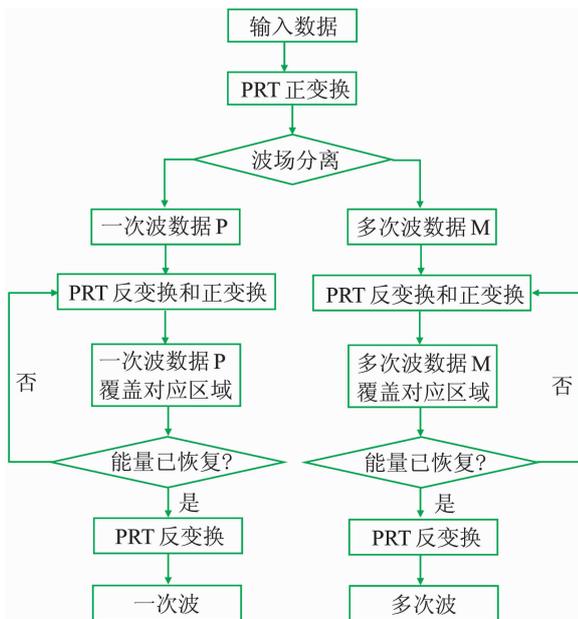


图2 迭代Radon变换法分离一次波和多次波流程

2.4 曲率参数的选择

对于离散抛物线Radon变换,正确选择采样中的离散参数对数据的重建很重要。其中时间方向的

采样一般不会有问题,为了避免假频,需要正确选择曲率参数 q 。

根据有关信号理论,曲率参数 q 的临界采样率应该满足

$$\Delta q_c \leq \frac{1}{f_{\max}(x_{\max}^2 - x_{\min}^2)} \quad (8)$$

式中: Δq_c 为曲率的采样率; f_{\max} 为原始数据中最高有效频率; x_{\max} 为最大炮检距; x_{\min} 为最小炮检距。对于CMP道集, x_{\max}^2 一般远大于 x_{\min}^2 ,故可以忽略 x_{\min}^2 项。

同理,为了避免在抛物线Radon正变换过程中产生假频,必须正确选择曲率参数 q 的范围,曲率参数 q 的范围满足^[7]

$$q_{\max} - q_{\min} = \frac{1}{f_{\max} x_{\max} \Delta x} \quad (9)$$

式中 Δx 为空间采样间隔。

3 模型测试

为了验证该方法的可行性和正确性,制作了图3所示的理论模型。该模型有200道,为动校正后道集,可以清楚地看出三组一次波同相轴已校平,两组极性与一次波相反的多次波同相轴没有校平,因而一次波与多次波的曲率存在差异。图4是对图3作PRT正变换的结果,其中P1,P2和P3是一次波数据,M1和M2是多次波数据。

3.1 PRT的可逆性测试

要进行迭代,首先要保证经过抛物线Radon正变换和反变换后的数据与原来的数据大致相同。为了验证式(5)的抛物线Radon变换对是近似可逆的,对图3进行1次、5次和10次抛物线Radon正变换和反变换,并计算PRT正反变换后与原始数据的差值(图5b~图5d)。从图5中的差值剖面可以看出误差很小,证明式(5)的PRT变换对是近似可逆的。

3.2 一次波的提取

在图4所示的Radon域中选取一次波(P1,P2,P3)聚焦点附近很小区域的数据,它包含了一次波的大部分能量,并且在Radon域中所占的面积很小,保证其尽可能不受多次波干扰。每次利用本文方法迭代时,用迭代前截取的一次波数据覆盖Radon域的对应区域,经过一定次数的迭代之后,做抛

物线 Radon 反变换,便可得到一次波数据(图 6)。图 7 是利用设计折线型切除函数提取的一次波,从图 7 可以看出,在 0.8s 附近,存在多次波的近炮检

距数据;而用本文方法提取的一次波不含多次波(图 6),说明该方法与设计折线型切除函数的传统方法相比更具优势。

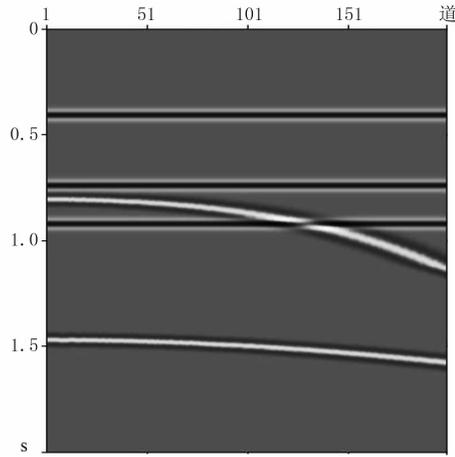


图 3 理论模型($t-x$ 域)

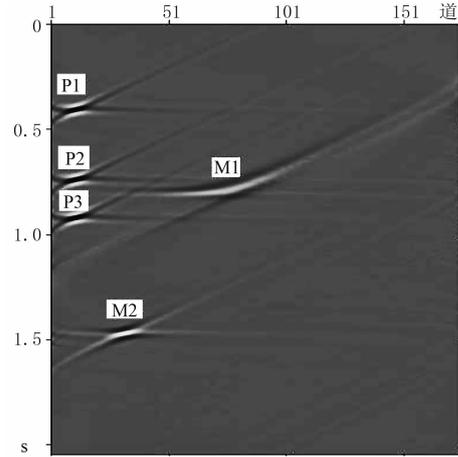


图 4 PRT 正变换结果

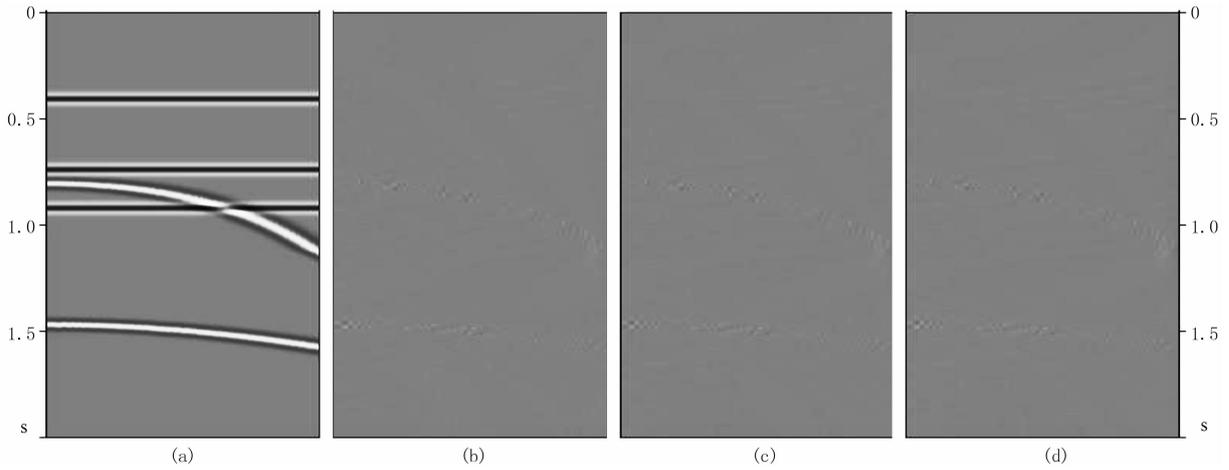


图 5 PRT 正反变换后的剖面及其与原始数据的差值剖面

(a)原始数据;(b)、(c)、(d)分别是原始数据与 1 次、5 次和 10 次 PRT 正反变换迭代后的差值剖面

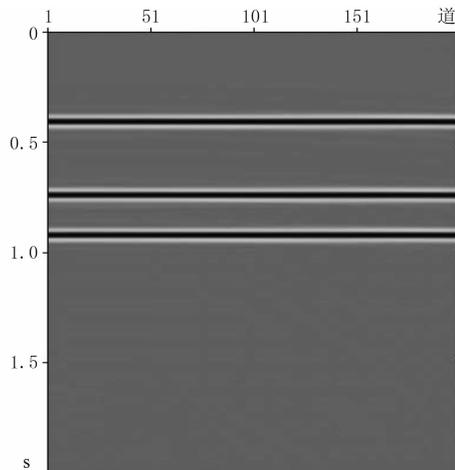


图 6 本文方法分离的一次波

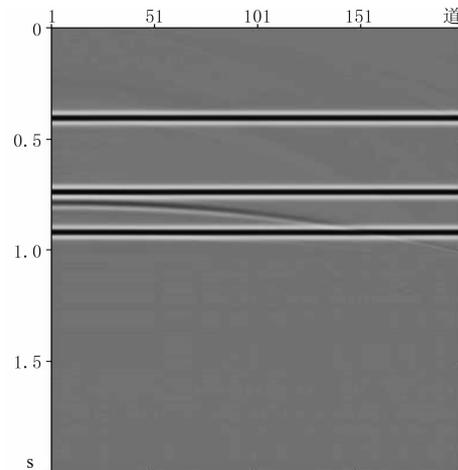


图 7 传统方法分离的一次波

图8是图3与图6中的第5道数据的波形对比图,由图可见,分离后的一次波与原始数据中的一次波吻合较好。图9为图6中对应第一个同相轴振幅的恢复与迭代次数的关系,理想波形指的是图3的波形,没有经过迭代的波形与理想波形的振幅差异相对较大,随着迭代次数的增加,振幅逐渐接近理想波形的振幅,迭代4~5次后,振幅基本上恢复,与理想波形吻合较好。

3.3 多次波的提取

在图4的Radon域中选取多次波(M1, M2)聚

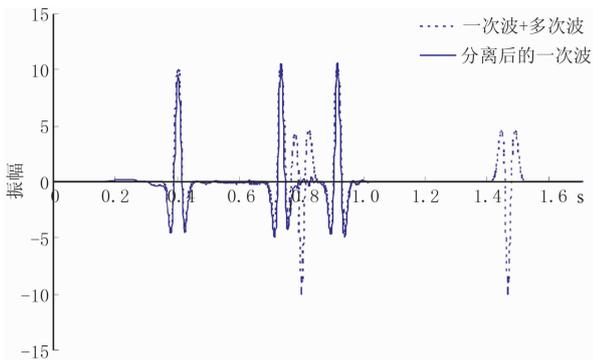


图8 图3与图6中的第5道波形对比图

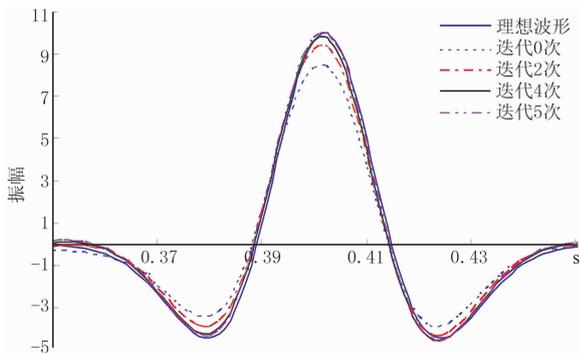


图9 一次波振幅的恢复与迭代次数的关系

焦点附近很小区域的数据,该区域包含了多次波的主要能量且在Radon域所占的面积很小,保证几乎不受一次波干扰。每次利用本文方法迭代时,用迭代前截取的多次波数据覆盖Radon域的对应该区域,经过一定次数的迭代后,做抛物Radon反变换,得到不含一次波的多次波。利用设计折线型切除函数的传统方法提取的多次波,存在少量一次波的近炮检距数据,说明该方法比设计折线型切除函数的传统方法更具优势。

本文方法提取的多次波与原始数据中的多次波吻合较好,与一次波类似(图9),没有经过迭代的波形与理想波形的振幅误差相对较大,随着迭代次数的增加,振幅逐渐恢复,波形也与理想波形吻合较好。

4 实际资料测试

图10是用本文方法分离实际资料中一次波和多次波的结果。从图10a中可以看出,从1.4s开始,多次波较强,几乎看不到一次波。从分离出的一次波剖面中很难找到多次波(图10b),从图10c的多次波剖面上也很难找到一次波,说明本文方法能够有效分离一次波和多次波。

图11是用设计折线型切除函数的传统方法对同一实际资料进行一次波和多次波分离的结果。由图可见,由于多次波比较发育且能量较强,在分离出的多次波剖面中很难看见一次波(图11c);但在分离出的一次波剖面中,能够发现多次波的同相轴(图11b方框内),在2s以后的远炮检距数据中也能发现多次波,且由于受到多次波的干扰,一次波的

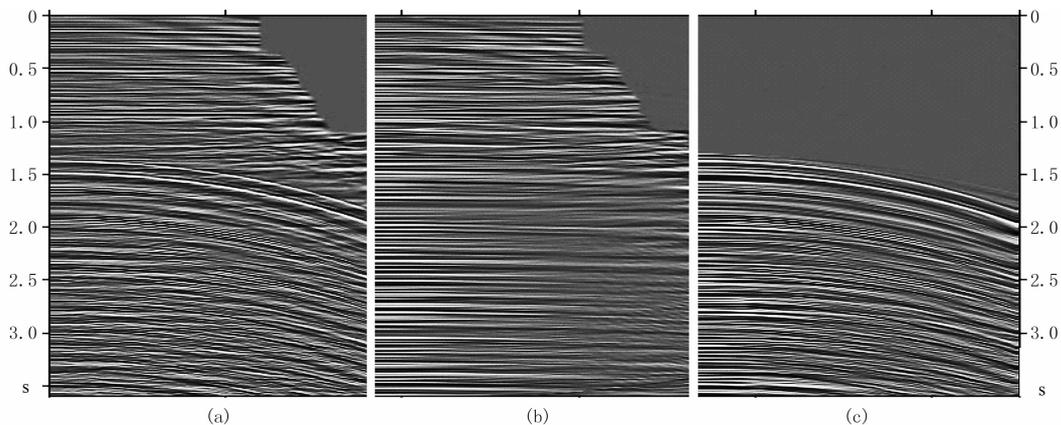


图10 本文方法分离实际资料中一次波和多次波的结果

(a)原始实际资料道集;(b)分离出的一次波道集;(c)分离出的多次波道集

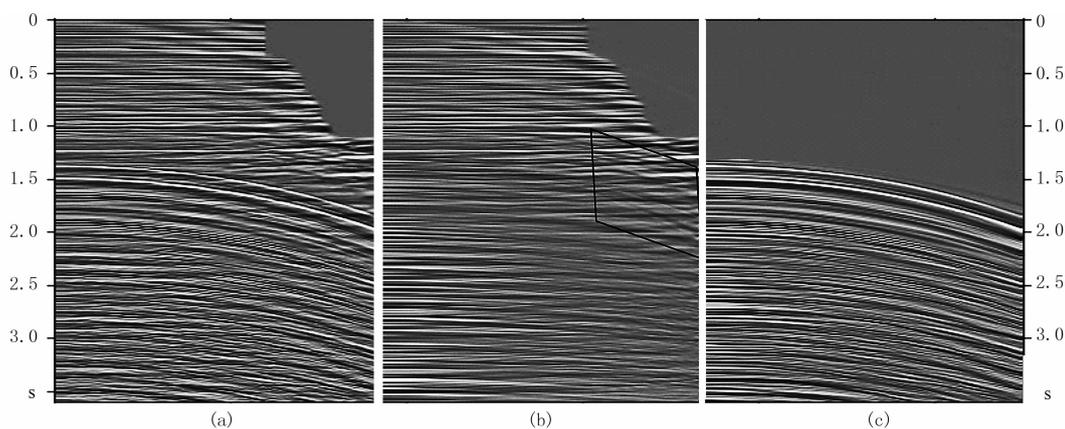


图 11 传统方法分离实际资料中一次波和多次波的结果

(a)原始实际资料道集; (b)分离出的一次波道集; (c)分离出的多次波道集

同相轴不连续。从图 10 和图 11 的一次波剖面的对比中,说明本文方法比设计折线型切除函数的传统方法更具优势。

5 结论

本文基于 PRT 变换对的近似可逆性提出迭代 PRT 算法分离一次波和多次波,并给出了波场分离的流程,模型数据和实际资料的处理验证了该方法的正确性,得出如下结论:

(1)迭代抛物线 Radon 变换法必须使用近似可逆的 Radon 变换对,这样经过抛物线 Radon 正变换和反变换之后的数据,几乎不发生改变, Radon 变换对的可逆性是应用迭代法的前提;

(2)抛物 Radon 变换的积分路径包含了整个道集的所有炮检距,即 Radon 域聚焦点附近区域的数据包含了时间域同相轴所有炮检距信息,因此通过该数据可以反推时间域同相轴各炮检距的信息;

(3)迭代过程是一个能量恢复的过程,利用本文方法分离出的一次波(或多次波),在振幅和波形上与分离前的一次波(或多次波)几乎一致,可以认为这种方法具有一定的保幅性,理论模型和实际资料的处理验证了该方法的可行性和正确性。

参考文献

- [1] Curry W and Shan G. Interpolation of near offsets using multiples and prediction-error filters. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2008, 27: 2421-2424.
- [2] Hampson Dan. Inverse velocity stacking for multiple elimination. Journal of the Canadian Society of Explo-

ration Geophysicists, 1986, 22(1): 44-55.

- [3] 郭全仕,张卫华,黄华昌等. 高精度拉冬变换方法及应用. 石油地球物理勘探, 2005, 40(6): 622-627.
Guo Quanshi, Zhang Weihua, Huang Huachang et al. High-precision Radom transform method and its application. OGP, 2005, 40(6): 622-627.
- [4] 巩向博,韩立国,王恩利等. 压制噪声的高分辨率 Radon 变换法. 吉林大学学报, 2009, 39(1): 152-157.
Gong Xiangbo, Han Liguang, Wang Enli et al. Denoising via high resolution Radon transform. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(1): 152-157.
- [5] Wang Yanghua. Multiple attenuation: coping with the spatial truncation effect in the Radon transform domain. Geophysical Prospecting, 2003, 51(1): 75-87.
- [6] 张军华,吕宁,雷凌等. 抛物线拉冬变换消除多次波的应用要素分析. 石油地球物理勘探, 2004, 39(4): 398-405.
Zhang Junhua, Lv Ning, Lei Ling et al. Analysis of applied factors for using parabolic Radon transform to remove multiple. OGP, 2004, 39(4): 398-405.
- [7] 曾友良. Radon 变换波场分离技术研究[硕士学位论文]. 中国石油大学(华东), 山东青岛, 2007.
- [8] Wang Yanghua. Antialiasing conditions in the delay-time Radon transform. Geophysical Prospecting, 2002, 50: 665-672.

(本文编辑:金文昱)

作者简介



谢俊法 博士研究生, 1987 年生; 2010 年本科毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业, 现在该校攻读地质资源与地质工程专业博士学位, 研究方向为地震资料数据处理。