

冯 暉,张先武,刘 财等. 带有多道相关的抛物线 Radon 变换法分离 P-P、P-SV 波. 地球物理学报, 2011, **54**(2): 304~309, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.005
Feng X, Zhang X W, Liu C, et al. Separating P-P and P-SV wave by parabolic Radon transform with multiple coherence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(2): 304~309, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.005

带有多道相关的抛物线 Radon 变换法 分离 P-P、P-SV 波

冯 暉,张先武,刘 财*,王 典,杨庆节

吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘 要 因为多波多分量地震勘探中 P-P 波和 P-SV 波通常混杂在一起, 所以较好地分离 P-P 波和 P-SV 波能够提高数据处理和解释的质量. 抛物线 Radon 变换法在分离 P-P 波和 P-SV 波时取得了一定效果, 但是在离散叠加的计算过程中会带来假频, 这些假频会干扰波场分离. 本文针对这一问题, 将多道相关算法引入抛物线 Radon 变换, 发展了带有多道相关的抛物线 Radon 变换法. 该方法利用叠加信号具有相似性的特点, 依据多道相关中衡量多道信号相似性的能量比标准, 对叠加过程加以控制, 压制变换中出现的假频. 本文用该方法对合成地震记录进行了波场分离, 取得了较好的效果.

关键词 多波多分量地震, 波场分离, 抛物线 Radon 变换, 多道相关

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.005

中图分类号 P631

收稿日期 2010-07-01, 2011-01-07 收修定稿

Separating P-P and P-SV wave by parabolic Radon transform with multiple coherence

FENG Xuan, ZHANG Xian-Wu, LIU Cai*, WANG Dian, YANG Qing-Jie

College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract Several methods are developed for separating P-P wave and P-SV wave from the multiwave multicomponent seismic data. Parabolic Radon transform is an effective method. But the aliasing phenomena will appear and depress the quality of wave filed separation in the processing procedure of summing discrete amplitude. We introduced the algorithm of multiple coherences into the processing procedure, and developed new separation method of Parabolic Radon transform with multiple coherence. The new method can choose suitable signal into the summation procedure depending on the similarity level value of signals evaluated by the coherence, and depress the aliasing phenomena. We tested the method using the synthetic seismogram and achieved nice result.

Keywords Multiwave multicomponent seismology, Wave field separation, Parabolic Radon transform, Multiple coherence

基金项目 国家 973 计划项目(2009CB219301), 公益性行业科研专项项目(201011078), 吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(200810011), 国家自然科学基金(40974054), 油页岩勘探开发利用产学研用合作创新研究项目(OSP-02、OSR-02)资助.

作者简介 冯 暉, 男, 1973 生, 安徽旌德人, 教授, 主要从事地震勘探和探地雷达信号处理研究. E-mail: fengxuan@jlu.edu.cn

* **通讯作者** 刘 财, 男, 1963 生, 吉林农安人, 教授, 博士生导师, 主要从事地球物理研究. E-mail: liucaif@jlu.edu.cn

1 引言

随着油气勘探对地震勘探技术的要求不断提高,多波多分量地震勘探技术受到人们重视.综合运用纵波和横波资料,有利于人们更好地识别地质构造、地层岩性、裂隙、孔隙度、流体性质等^[1].由于资料采集相对容易,实际进行多波多分量地震勘探时常采用的是转换波地震勘探.因为 P-P 波和 P-SV 波具有不同的运动学和动力学传播特性,两种波场的混杂影响地震数据的处理及解释^[2,3],所以较好地进行波场分离能提高多波多分量地震资料的处理质量.

波场分离的方法有波场方法和数学变换等方法^[4].波场方法中有直接利用偏振方向和振幅、相位的原始关系进行分离^[5],也有通过使用散度和旋度的计算将 P 波和 S 波分离^[6,7],取得了一定的效果,但尚未成熟.数学变换是波场分离的常用方法之一,它是将波场记录从不易区分的数据域变换到某一新的数据域,各种波场记录在这种新域中具有易于分离的特点,将分离后的波场记录再反变换回原数据域,实现波场分离.其中有 $f-k$ 滤波法^[8,9]、 $\tau-p$ 变换法^[10~14]、Radon 变换法^[15~19]等. $f-k$ 滤波法在用线性滤波方法来处理非线性地震波时会产生分离波场的畸变, $\tau-p$ 变换法利用了地震波的运动学特征,在地震资料处理中有广泛的应用,但在分离时波场畸变程度也比较大.20 世纪 90 年代以来,正反 Radon 变换的保真度、精确度和变换速度得到了很大的提高^[17],使得高精度的离散 Radon 变换可以提高分离波场的精度^[10].

线性 Radon 变换能将时间-空间域中的线性波场变换为 $\tau-p$ 中的“点”^[10],但是对于 P-P 波和 P-SV 波,由于 P-P 波和 P-SV 波的时距曲线方程为曲线,变换后波场记录仍为曲线,交叉混合在一起不易分离.地震勘探中,当炮检距小于界面深度时,P-P 波和 P-SV 波的时距曲线方程都可近似为抛物线方程.采用抛物线 Radon 变换对波场记录处理后,P-P 波和 P-SV 波能收敛到不同的“点”上,易于分离.但在用计算机实现抛物线 Radon 变换时,离散叠加过程中会带来假频现象^[20],这些假频会干扰波场分离.本文利用叠加路径上的数据具有相似性这一特点,在叠加过程中融入多道相关算法,形成带有多道相关的抛物线 Radon 变换法.文中用该方法实现 P-P 波和 P-SV 波波场分离的同时还压制了假频现

象,提高了波场分离的质量.

2 基本原理

2.1 P-P 波、P-SV 波抛物线型时距曲线方程

P-P 波、P-SV 波在水平均匀层状介质中的传播路径如图 1 所示.P-P 波的时距曲线方程为:

$$t = \sqrt{(x^2 + 4h^2)}/v_p = T_{0p} \sqrt{1 + \frac{x^2}{4h^2}}, \quad (1)$$

式中 x 为炮检距, v_p 为 P-P 波速度, h 为界面深度, $T_{0p} = 2h/v_p$.当炮检距 x 小于界面深度 h 时,将(1)式用泰勒级数展开,舍去高阶项,可得:

$$t = T_{0p} + \frac{x^2}{2v_p^2 T_{0p}}, \quad (2)$$

此时,P-P 波时距曲线方程(2)为抛物线方程.

P-SV 波的时距曲线方程可表示为:

$$t = \sqrt{(x_p^2 + h^2)}/v_p + \sqrt{(x - x_p)^2 + h^2}/v_s, \quad (3)$$

式中 x_p 为转换点的水平坐标, v_s 为 P-SV 波速度.当炮检距 x 小于界面深度 h 时,对(3)式用泰勒级数展开,舍去高阶项,得:

$$t = \frac{h}{v_p} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_p}{h} \right)^2 \right] + \frac{h}{v_s} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x - x_p}{h} \right)^2 \right], \quad (4)$$

当界面深度 h 很大或炮检距 x 很小时,转换点水平坐标可近似表示为^[21]:

$$x_p = \frac{x}{1 + v_s/v_p}, \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式,可得 P-SV 波的时距曲线方程为:

$$t = T_{0s} + \frac{x^2}{2v_p v_s T_{0s}}, \quad (6)$$

式中 $T_{0s} = h/v_p + h/v_s$. P-SV 波的时距曲线方程(6)也为一抛物线方程.

2.2 抛物线 Radon 变换在计算机上的实现

设 (x, t) 坐标系下的地震记录为 $\varphi(x, t)$, $\phi(\tau, q)$ 为变换后 Radon 域地震记录.抛物线 Radon 正变换

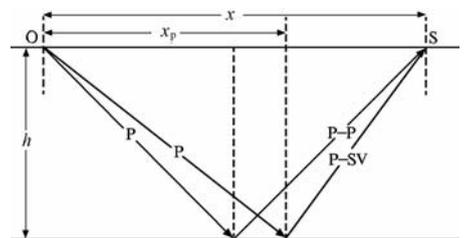


图 1 水平均匀层状介质中 P-P、P-SV 波传播示意图
Fig. 1 Diagram of P-P wave and P-SV wave propagation in homogeneous and horizontal layered medium

离散公式为:

$$\phi(\tau_i, q_j) = \sum_{n=1}^{n=N_x} \varphi(x_n, \tau_i + q_j x_n^2), \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, I, j = 1, 2, 3, \dots, J,$$

I, J 分别表示 τ, q 的总采样点数. 抛物线 Radon 反变换离散公式为:

$$\varphi(x_n, t_m) = \sum_{k=1}^{k=K_q} \phi(t_m - q_k x_n^2, q_k), \quad (8)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N, m = 1, 2, 3, \dots, M$$

N, M 分别表示 x, t 的采样点数.

计算过程中, 为了避免出现假频, 计算时抛物线 Radon 变换参数 q 的采样率满足^[16, 17]:

$$\Delta q \leq \frac{1}{f_{\max}(x^2)_{\max}}, \quad (9)$$

参数 q 的取值范围满足:

$$q_{\max} - q_{\min} \leq \frac{1}{2f_{\max} |x_{\max}| \Delta x}, \quad (10)$$

其中 f_{\max} 是地震记录的最大频率, x_{\max} 是最大偏移距, Δx 是地震记录的道间距.

2.3 多道相关压制假频

尽管计算过程中对参数 q 进行了合理的选取, 变换后还是会产生一些假频, 这些假频会干扰 P-P 波和 P-SV 波的分离. 对这些假频进行压制, 有利于更好地分离 P-P 波和 P-SV 波.

在作抛物线 Radon 变换时, 沿抛物线叠加的过程中, 各叠加点附近的波形有一定的相似性. 以各叠加点为中心的时间窗口内信号可表示为:

$$\varphi(x_n, \tau_i + q_j x_n^2 + l), \quad l = -L, -L+1, -L+2, \dots, L-2, L-1, L \quad (11)$$

其中 n 表示的是地震记录道数. $2L+1$ 为时窗宽度, 本文中 $2L+1$ 取为一个子波宽度. 能量比标准 E 为:

$$E = \frac{\sum_{l=-L}^L \left(\sum_{n=1}^{n=N_x} \varphi(x_n, \tau_i + q_j x_n^2 + l) \right)^2}{N_x \sum_{n=1}^{n=N_x} \sum_{l=-L}^L \varphi^2(x_n, \tau_i + q_j x_n^2 + l)}, \quad (12)$$

为了使完全相似的各时间窗口内信号的能量比标准 E 惟一, 先对各时间窗口内信号进行能量规格化处理.

在抛物线 Radon 变换公式(7)中的叠加求和之前, 根据各叠加点附近的波形的相似性的大小, 来判断该叠加点是否应该参与叠加. 处理方法如下: 以参与叠加的各叠加点为中心, 开一个时间窗口(文中所用时间窗口宽度为一个子波宽度), 根据多道相关中衡量多道信号相似性的能量比标准来判断所有窗口

内波形相似性大小^[22]. 对能量比标准取一阈值, 如果所有窗口内信号能量比标准大于这一阈值, 各叠加点就参与叠加. 反之, 则不参与叠加.

3 合成地震记录波场分离

3.1 合成地震记录

模型(图 2)是由三个各向同性的均匀水平地层组成, 共有两个反射界面. 各层的厚度、密度、P-P 波速度、P-SV 波速度如图 2 所示. 观测系统的偏移距为零, 最大炮检距为 800 m, 道间距为 40 m, 总的地震记录道数为 21. 合成地震记录时选用的子波是雷克子波, 主频为 15 Hz. 图 3 为合成的地震记录.

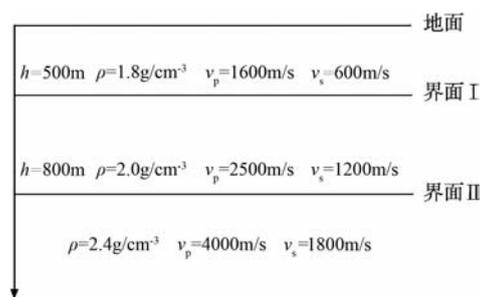


图 2 模型示意图

Fig. 2 Model for synthetic seismogram

3.2 合成地震记录的 P-P 波、P-SV 波分离

对合成地震记录作带有多道相关的抛物线 Radon 变换, 变换时取 q 值的扫描范围为: $(0 \sim 8) \times 10^{-7} \text{ s/m}^2$, $\Delta q = 2 \times 10^{-8} \text{ s/m}^2$, 能量比标准阈值取为 0.6. 从变换结果(图 4)中可以看到, P-P 波和 P-SV 波在 $\tau-q$ 域中能很好地收敛到点上, 沿直线对变换结果作简单的切分处理, P-P 波对应的区域位于所示直线的上方, P-SV 波对应的区域位于所示直线的下方, 切分结果见图 5. 将切分后的结果进行反变换, 得到分离后的 P-P 波和 P-SV 波地震记录(图 6). 采用此方法能很好地将 P-P 波和 P-SV 波分离开来.

4 对比分析

对合成地震记录直接作抛物线 Radon 变换, 变换时参数 q 的选取与对合成地震记录作带有多道相关的抛物线 Radon 变换相同, 变换结果见图 7. 从图 7 中可以看到, P-P 波和 P-SV 波在 $\tau-q$ 域中并不能很好地收敛到点上, 而是在每个点附近产生了交叉状的区域. 这些交叉状的区域会干扰 P-P 波和 P-SV 波的分离. 沿直线对变换结果作简单的切分处理,

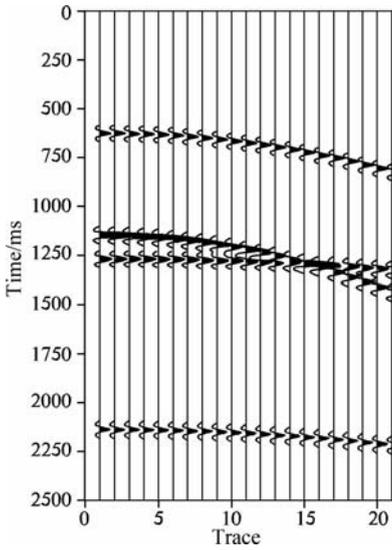


图 3 由图 2 的模型获得的合成地震记录
Fig. 3 Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 2

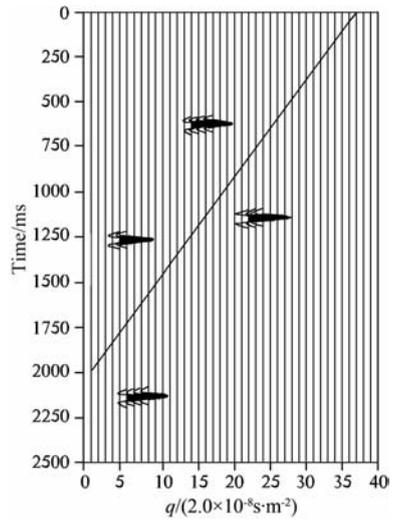


图 4 对合成地震记录作带有相关的抛物线 Radon 变换结果
Fig. 4 Synthetic seismogram shown in Fig. 3 after processed by Parabolic Radon transform with multiple coherence

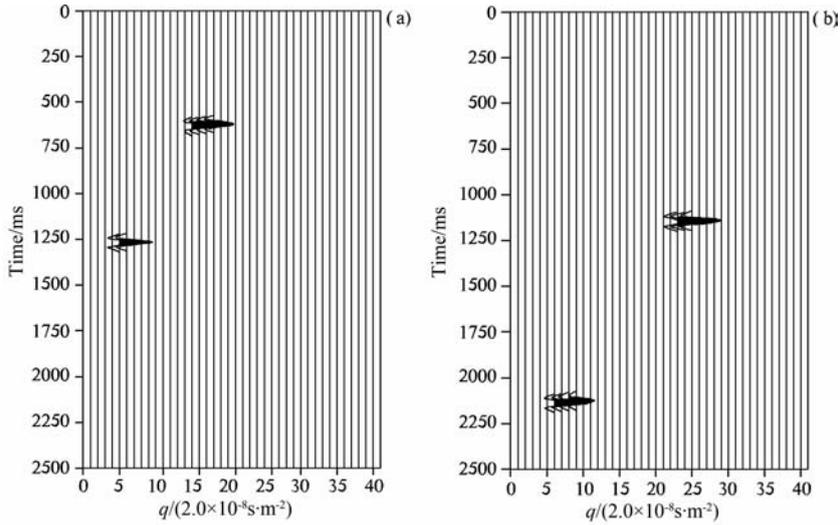


图 5 对合成地震记录作带有相关的抛物线 Radon 变换后 τ - q 域中 P-P 波 (a) 和 P-SV 波 (b) 记录切分结果
Fig. 5 P-P wave (a) and P-SV wave (b) shown in Fig. 4 separated in τ - q domain

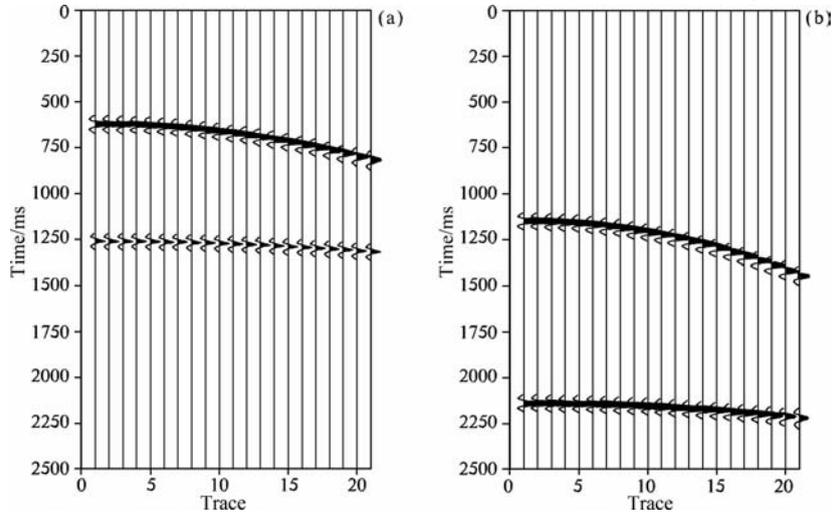


图 6 带有多道相关的抛物线 Radon 变换法从合成地震记录中分离出的 P-P 波 (a) 和 P-SV 波 (b)
Fig. 6 P-P wave (a) and P-SV wave (b) extracted from synthetic seismogram processed by Parabolic Radon transform with multiple coherence

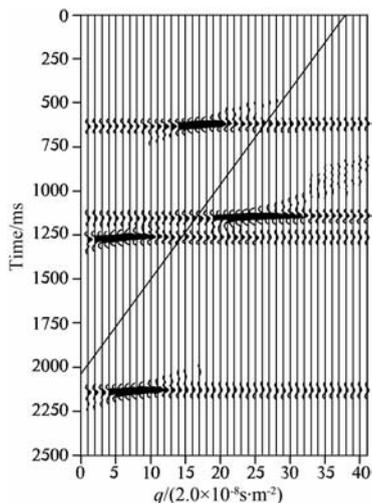


图7 对图3所示合成地震记录进行抛物线 Radon 变换结果
Fig. 7 Synthetic seismogram shown in Fig. 3 after processed by Parabolic Radon transform

P-P 波对应的区域位于所示直线的上方, P-SV 波对应的区域位于所示直线的下方, 切分结果见图 8. 将切分后的结果进行反变换, 得到分离后的 P-P 波和 P-SV 波地震记录 (见图 9). 从图 9 中可以看到, P-P 波和 P-SV 波不能很好分离. 对比图 4 和图 7, 采用多道相关抛物线 Radon 变换能很好地消除抛物线 Radon 变换中在每个点附近产生的交叉状区域, 有利于更好地分离 P-P 波和 P-SV 波.

5 结 论

本文利用叠加路径上的数据具有相似性这一特点, 在叠加过程中融入多道相关算法, 形成了带有多道相关的抛物线 Radon 变换分离 P-P、P-SV 波方

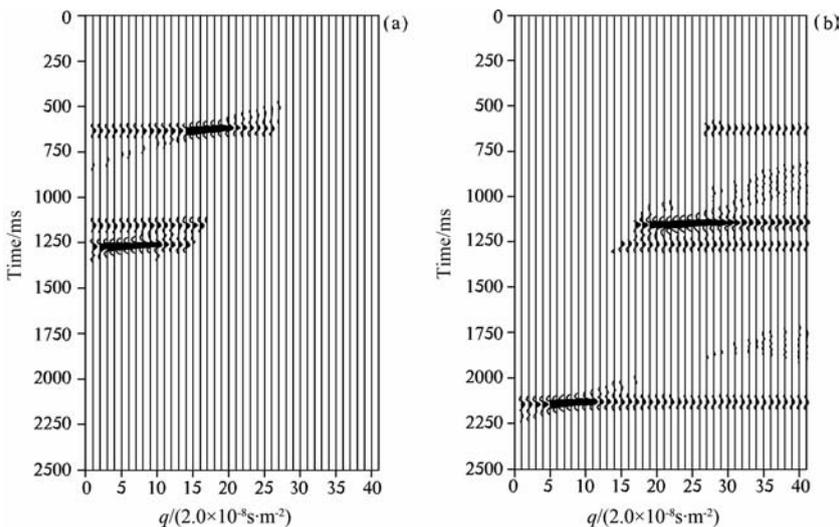


图8 对合成地震记录作抛物线 Radon 变换后 τ - q 域中 P-P 波 (a) 和 P-SV 波 (b) 记录切分结果
Fig. 8 P-P wave (a) and P-SV wave shown in Fig. 7 separated in τ - q domain

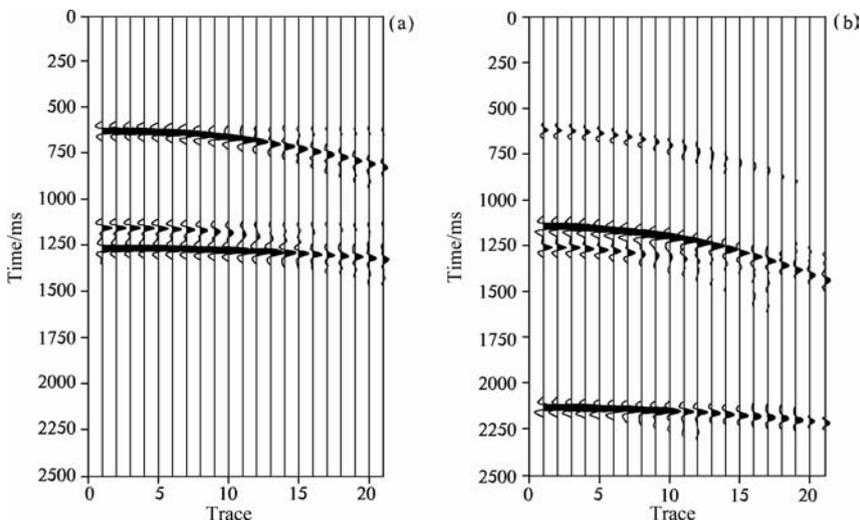


图9 抛物线 Radon 变换法从合成地震记录中分离出的 P-P 波 (a) 和 P-SV 波 (b)
Fig. 9 P-P wave (a) and P-SV wave (b) extracted from synthetic seismogram processed by Parabolic Radon transform without multiple coherence

法. 该方法较好地压制了抛物线 Radon 变换带来的假频现象, 提高了波场分离的质量. 对于炮检距小于界面深度时的地震记录, 该方法能取得较好效果.

参考文献 (References)

- [1] 王磊, 李建荣, 王赞. 多分量转换波地震勘探技术. 油田地质与采样率, 2002, **9**(7): 1~4
Wang L, Li J R, Wang Y. A summary on seismic exploration technique of multicomponent converted wave. *Oil & Gas Recovery Technology* (in Chinese), 2002, **9**(7): 1~4
- [2] 尧德中, 周熙襄, 钟本善. VSP 记录的纵、横波分离方法与应用. 石油地球物理勘探, 1993, **28**(5): 623~628
Yao D Z, Zhou X X, Zhong B S. Method for separating out P-wave or S-wave in VSP data, and its application. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 1993, **28**(5): 623~628
- [3] 付雷, 刘财, 王建民等. 大庆地区 P-SV 波地震资料处理技术. 地球物理学进展, 2004, **19**(2): 414~419
Fu L, Liu Cai, Wang J M. Seismic processing of P-SV wave in Daqing area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, **19**(2): 414~419
- [4] 刘保童, 朱光明. 地震数据正交投影分解方法的研究与应用. 地球物理学进展, 2005, **20**(3): 654~660
Liu B T, Zhu G M. Orthogonal decomposition approach of seismic data and its application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, **20**(3): 654~660
- [5] 刘光鼎, 李幼铭, 吴永刚等. 陆相油储地球物理学导论. 北京: 科学出版社, 1998
Liu G D, Li Y M, Wu Y G, et al. Reservoir Geophysics in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998
- [6] 井涌泉, 高红伟, 王维红. 二维各向同性介质 P 波和 S 波分离方法研究. 地球物理学进展, 2008, **23**(5): 1412~1416
Jing Y Q, Gao H W, Wang W H. The study of P-waves and S-waves separation in two-dimensional isotropic media. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(5): 1412~1416
- [7] Sun R. Separating P- and S- waves in a prestack 2-dimensional elastic seismogram. In: 61th Ann. Mtg., Eur. Assn. Geosci. Eng., Extended Abstracts, 1999, paper 6~23
- [8] 耿建华, 马在田, 董良国. 单分量地面记录地震波场分离的非线性滤波方法研究. 地球物理学报, 2002, **45**(增刊): 268~273
Gen J H, Ma Z T, Dong L G. Seismic wave of one-component record separation by non-linear filtering. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(Suppl.): 268~273
- [9] 罗省贤, 李清明. $F-k$ 域多波变速波场分离. 物探化探计算技术, 1999, **21**(2): 126~132
Luo S X, Li L M. Multi-wave field decomposition by the variable velocity method in $F-k$ domain. *Computing Technique for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, **21**(2): 126~132
- [10] 王维红, 首皓, 刘洪等. 线性同相轴波场分离的高分辨率 $\tau-p$ 变换法. 地球物理学进展, 2006, **21**(1): 74~78
Wang W H, Shou H, Liu H, et al. High resolution $\tau-p$ transform in linear events wavefield separation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(1): 74~78
- [11] 周龙泉, 刘福田, 刘劲松等. 利用 $\tau-p$ 波场反演法确定东沙群岛的地壳速度模型. 地球物理学进展, 2005, **20**(2): 503~506
Zhou L Q, Liu F T, Liu J S, et al. Determination of the crustal velocity model of Dongsha islands using the inversion of $\tau-p$ wave field. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, **20**(2): 503~506
- [12] 吴律. $\tau-p$ 变换及应用. 北京: 石油工业出版社, 1993
Wu L. $\tau-p$ Transform and its Application (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [13] 曾有利, 乐友善, 单启铜等. 基于高分辨率 Radon 变换的 VSP 波场分离方法. 石油物探, 2007, **46**(2): 115~119
Zeng Y L, Le Y S, Shan Q T, et al. VSP wavefield separation based on high-resolution Radon transformation. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2007, **46**(2): 115~119
- [14] 武克奋. 双向预测法压制线性干扰波和多次波. 石油物探, 2005, **44**(5): 458~460
Wu K F. Strong linear interferences and multiples suppression based on dual prediction model. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2005, **44**(5): 458~460
- [15] 刘喜武, 刘洪, 李幼铭. 高分辨率 Radon 变换方法及其在地震信号处理中的应用. 地球物理学进展, 2004, **19**(1): 8~15
Liu X W, Liu H, Li Y M. High resolution Radon transform and its application in seismic signal processing. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, **19**(1): 8~15
- [16] 黄新武, 吴律, 牛滨华等. 抛物线 Radon 变换中的参数采样与假频. 石油大学学报(自然科学版), 2003, **27**(2): 27~31
Huang X W, Wu L, Niu B H. Sampling and aliasing of parameters in parabolic Radon transform. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)* (in Chinese), 2003, **27**(2): 27~31
- [17] 牛滨华, 孙春岩, 张中杰等. 多项式 Radon 变换. 地球物理学报, 2001, **44**(2): 263~271
Niu B H, Sun C Y, Zhang Z J, et al. Polynomial Radon transform. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(2): 263~271
- [18] 巩向博, 韩立国, 牛建军等. Radon 变换在非规则观测系统中波场分离的应用. 地球物理学进展, 2008, **23**(6): 1886~1893
Gong X B, Han L G, Niu J J, et al. Wave field decomposition via Radon transform in the irregular observation system. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(6): 1886~1893
- [19] 黄新武, 吴律, 宋炜. 拉东投影法三维叠前深度偏移. 地球物理学报, 2004, **47**(2): 321~326
Huang X W, Wu L, Song W. 3-D pre-stack depth migration with Radon projection. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(2): 321~326
- [20] Marfurt K J, Schneider R V, Mueller M C. Pitfalls of using conventional and discrete Radon transforms on poorly sampled data. *Geophysics*, 1996, **61**(5): 1467~1482
- [21] 许士勇, 马在田. 快速有效的转换波共转换点叠加技术. 地球物理学报, 2002, **45**(4): 557~568
Xu S Y, Ma Z T. A fast and efficient common conversion point stacking technique for converted waves. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(4): 557~568
- [22] 程乾生. 信号数字处理的数学原理. 北京: 石油工业出版社, 1993. 323~332
Cheng Q S. The theory of digital signal processing (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. 323~332