

加权抛物 Radon 变换叠加速度分析^{*}

王维红¹ 崔宝文² 林春华¹

1. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 2. 中国石油大庆油田有限责任公司油藏评价部

王维红等. 加权抛物 Radon 变换叠加速度分析. 天然气工业, 2009, 29(2): 42-44.

摘 要 抛物 Radon 变换(PRT)是进行叠加速度分析较为有效的方法,当缺失原始地震记录道时,加权抛物 Radon 变换可改善正变换模型空间域的聚焦性。基于水平或中等倾角地层 CMP 道集时距曲线为双曲线的假设,给出了抛物 Radon 变换叠加速度求取的基本方法,同时给出加权 PRT 求解计算时权系数的选取原则。在数据域加权后,求解矩阵的 Toeplitz 结构并没有破坏,所以仍可用 Levinson 递推法来进行计算。加权抛物 Radon 变换叠加速度分析算法容易实现,且计算精度较高,能较有效地处理含多次波的地震剖面。

关键词 地震波 速度 叠加 系数 多次波 地震数据处理

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.02.009

地震波速度的精确估计对地震资料处理有着十分重要的意义^[1],现主要应用叠加速度谱法来求取地震资料的叠加速度^[2],但分辨率较低。20 世纪 80 年代一些学者用广义 Radon 变换法来求取叠加速度^[3],Hampson^[4]于 1985 年提出了抛物 Radon 变换(PRT)方法,这在地震资料预处理中得到广泛应用。由于地震资料采集的孔径效应使得近偏移距资料缺失,以及在地震资料采集时检波器可能出现故障,所以在数据体中可能出现野值道或道缺失情况^[5],从而使其分辨率降低,难以确定模型空间域同相轴的准确位置。笔者采用简单的道加权处理,使缺失的道不参与叠加计算,这样能大大减弱上述假象。特别是对于浅层的地震同相轴,加权后效果有明显改善。

1 基本原理

1.1 PRT 叠加速度分析的基本理论

设 CMP 道集中一同相轴的零偏移距双程旅行时为 t_0 ,叠加速度为 v_s ,部分动校正速度为 v_c ,进行部分动校正后同相轴的剩余速度为 v_r ,则部分动校正的曲线方程为:

$$t^2 = t_0^2 + x^2/v_s^2 \quad (1)$$

t_0 为部分动校正后 CMP 道集中同相轴的双程旅行时间,其表达式为:

$$t_0^2 = t_0^2 + x^2/v_r^2 \quad (2)$$

而 CMP 道集反射波双曲时距曲线方程为:

$$t^2 = t_0^2 + x^2/v_s^2 \quad (3)$$

对比上述 3 个表达式,有

$$\frac{1}{v_r^2} = \frac{1}{v_s^2} - \frac{1}{v_c^2} \quad (4)$$

部分动校正得到的抛物线表示为:

$$t(x) = t_0 + qx^2 \quad (5)$$

抛物线曲率参数 q 的表达式为^[5]:

$$q = 1/(2t_0 v_c^2) \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可得:

$$\frac{1}{v_s^2} = 2t_0 q + \frac{1}{v_c^2} \quad (7)$$

式(7)为求取叠加速度的公式。

1.2 加权抛物 Radon 变换

部分动校正后 CMP 道集可近似为抛物线的叠加^[5],抛物 Radon 反变换的频率域离散形式写为:

$$\tilde{d}(x, \omega) = \sum_q \tilde{m}(q, \omega) e^{-i\omega q x^2} \quad (8)$$

式中: $\tilde{d}(x, \omega)$ 为 CMP 道集 $d(x, t)$ 的 Fourier 变换; $\tilde{m}(q, \omega)$ 为抛物 Radon 域的频域形式。

对于单个频率成分,式(8)可写成:

$$d = Lm \quad (9)$$

式中 m 和 d 分别是模型空间和数据空间向量,矩阵 L 的元素表达式为:

$$L_{j,k} = e^{-i\omega q_k x_j^2} \quad (10)$$

* 本文受到国家重点基础研究发展计划(973 计划)“火山岩油气藏的形成机制与分布规律”(编号:2009CB219307)的资助。

作者简介:王维红,1975 年生,工程师,博士;现从事地震资料数字处理方面的研究工作。地址:(163712)黑龙江省大庆市让胡路区科苑路 20 号。电话:(0459)5508762。E-mail:wangweihongdpr@petrochina.com.cn

由于矩阵算子 L 和其共轭转置算子 L^H 不是互逆的,所以采用最小平方法来求解(9)式的正变换。

为增强地震道缺失时 Radon 域的聚焦性,采用数据域加权,来优化最小的目标函数:

$$J = (Lm - d)^H S^T (Lm - d) + \lambda m^H m \quad (11)$$

由最小化目标函数 J 得:

$$(L^H S^T S L + \lambda I)m = L^H S^T S d \quad (12)$$

式中: $W = S^T S$ 为对角阵,其对角元素表示的权系数由初始地震数据确定。上式左端的数学式可写为:

$$a_{jk} = \sum_{i=1}^N W_i^2 e^{i \max_i^2 (q_k - q_j)} + \lambda I_{jk} \quad (13)$$

式中: N 表示 CMP 道集的道数; W_i 为权系数; I_{jk} 为单位矩阵元素; λ 为稳定因子。

式(12)具有 Toeplitz 结构,可用 Levinson 递推法进行求解。式(13)中,权系数的主对角元素对缺失的地震道可取为 $W_{i,i}=0$,对含数据的道取 $W_{i,i}=1$ 。

2 正变换计算

地震资料经常出现道缺失、坏道和坏炮等现象,在 CMP 道集中就表现为道缺失的现象。笔者设计

了6层等厚水平层状介质的速度模型,单层厚度为500 m,其层速度自上而下分别为 1 800、2 100、2 300、2 600、2 900 m/s 和 3 300 m/s。图 1-a 给出了据上述模型模拟的单炮记录,共 120 道地震信号,道间距 20 m,时间采样为 4 ms;图 1-b 为应用常速度进行部分动校正结果;图 1-c 为应用 WPRT 方法计算得到的抛物 Radon 域结果。

为更好地说明 WPRT 算法的优越性,笔者给出了上述地质模型含表面多次波的模拟地震数据(图 2-a)。图 2-b 给出了缺失近偏移距 10 道和中偏移距 10 道的剖面,图 2-c 和 2-d 分别给出最小平方抛物 Radon 变换和加权抛物 Radon 变换的计算结果。对比可知,最小平方方法计算的剖面存在着振幅很大的假象,而加权法得到的剖面和无地震道缺失时最小平方方法计算的结果基本一样。其主要原因是所给出的加权算法使缺失的地震道不参与叠加计算,从而使初始地震记录中各道之间相互干涉的效果较好,得到的 PRT 正变换剖面就具有较高的分辨率。

对图2-a给出的含表面多次波地震数据进行速

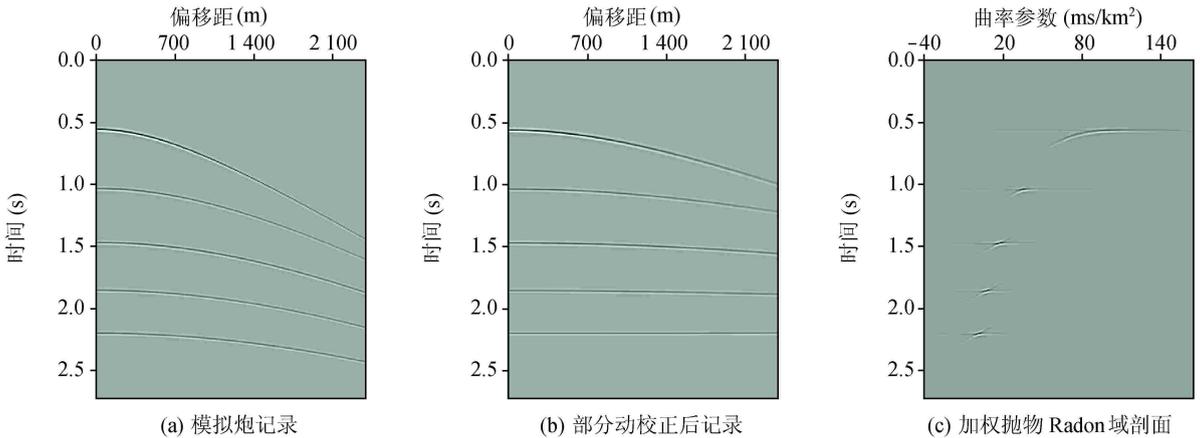


图 1 模拟地震记录及抛物 Radon 域剖面图

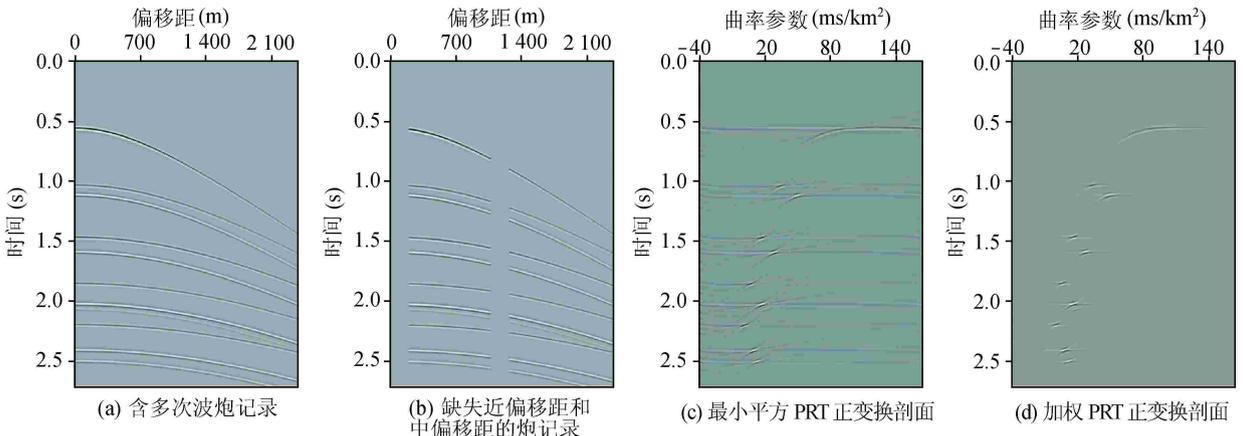


图 2 含多次波和道缺失炮记录及抛物 Radon 域剖面图

度分析,图 3-a 为 WPRT 正变换 Radon 域剖面。可以看出,有效波和多次波在抛物 Radon 域可以分开,故在进行同相轴拾取和叠加速度分析时,笔者取剖面显示的左边点(曲率参数值小的点)作为叠加速度的离散点。图 3-a 实线为速度拾取曲线,根据拾取的叠加速度对图 2-a 进行动校正,其结果见图 3-b。可

看出所有的有效波同相轴都已校平,显然多次波的同相轴校正不足。依据图 3-a 计算得到的叠加速度如图 3-c 所示,对比计算的叠加速度曲线,表明在同相轴的位置得到的叠加速度较为精确,而在其他位置采用线性插值得到,其计算结果和理论曲线相比误差增大,若拾取的点较密则误差将大为减小。

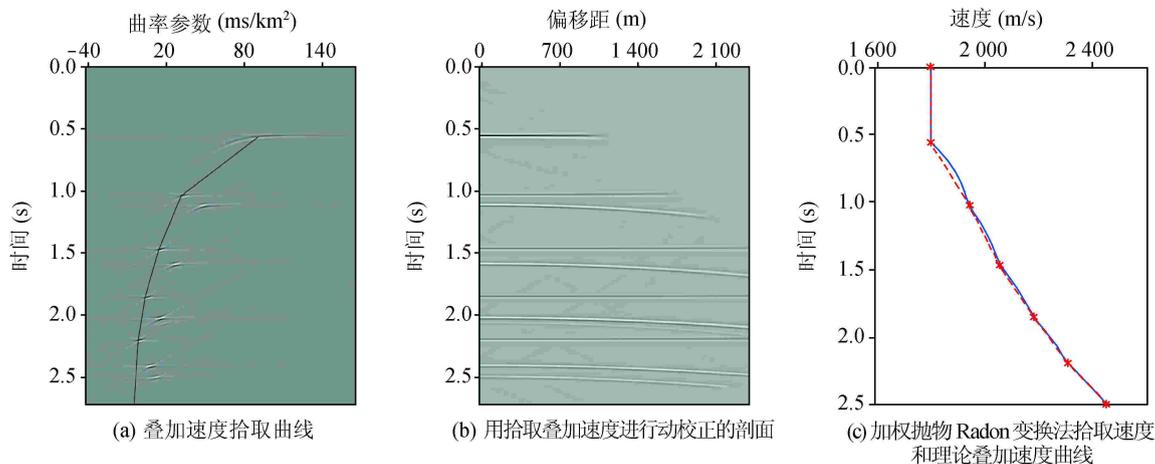


图 3 叠加速度拾取和动校正剖面图

3 加权 PRT 速度分析

为说明叠加对多次波的压制作用,图 4 给出了叠加道和理论模拟得到的零偏移距道的对比图,从图可以看出,能量很强的多次波基本被压制,但是多次波的能量剩余还很大,所以要比较有效地压制多次波,需采取其他的专项压制方法。

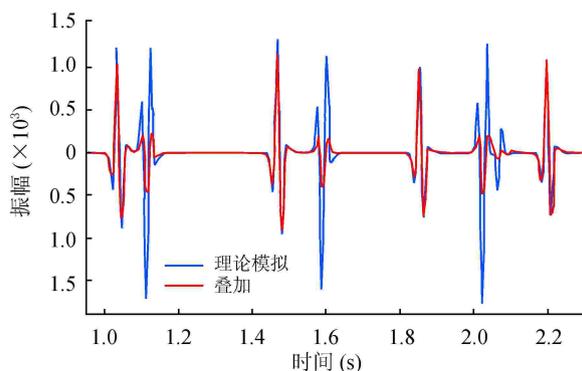


图 4 叠加道和模拟的零偏移距道对比图

4 结论

对缺失道在数据域进行加权,可使数据在抛物 Radon 域有效的叠加,从而增强变换域的聚焦性。对于叠加速度分析来说,WPRT 法可有效处理原始数据存在道缺失的情况,因为 WPRT 在抛物 Radon

域有很强的聚焦作用。

加权抛物 Radon 变换叠加速度分析算法容易实现,能较为有效地处理含多次波的地震剖面。由计算实例可知,叠加对多次波有一定的压制作用,但要得到较好的多次波压制效果,要借助于其他的专项处理方法。

速度分析的例子表明 WPRT 法叠加速度求取的算法简单且计算精度较高,稍加改进可实现叠加速度的计算机自动拾取。

参 考 文 献

- [1] 何光明,贺振华,黄德济,等.叠前时间偏移技术在复杂地区三维资料处理中的应用[J].天然气工业,2006,26(5):46-48.
- [2] TANER M T, KOEHLER F. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions [J]. Geophysics, 1969, 34(6):859-881.
- [3] THORSON R, CLAERBOUT J. Velocity-stack and slant-tack stochastic inversion [J]. Geophysics, 1985, 50(4):2727-2741.
- [4] HAMPSON D. Inverse velocity stacking for multiple elimination [J]. Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists, 1986, 22(1):44-55.
- [5] 王维红,刘洪.抛物 Radon 变换法近偏移距波场外推[J].地球物理学进展,2005,20(2):289-293.

(修改回稿日期 2008-12-20 编辑 韩晓渝)