

王立歆, 黄广谭, 张彬彬, 等. 局域双曲线 Radon 变换压制散射波研究与应用[J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(1): 27-36.
Wang LX, Huang GT, Zhang BB, et al. Suppressing method study and application of seismic scattered wave based on local hyperbolic Radon transform[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(1): 27-36.

局域双曲线 Radon 变换压制散射波研究与应用

王立歆^{1✉}, 黄广谭², 张彬彬², 朱文博², 张军华²

1. 中石化石油物探技术研究院, 南京 210014
2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

摘要: 一般而言, 由于地下非均质体的存在所产生的二次波源, 由它再生成新的波场, 叫散射波场。目前, 将散射波作为有效波来成像, 已开始在溶洞和裂缝等特殊地质体的识别中得到应用。但对于野外资料采集来说, 地表复杂地区, 如戈壁、砾石区和山前带, 大量存在的散射波却是干扰波, 它们的存在会严重影响资料的品质, 而其研究与实际应用国内外还很少。因此, 通过正演模拟, 分析散射波的基本特征, 在此基础上研究散射波的去噪方法显得十分必要。本文从地震波运动学时距关系出发, 研究了反射波和散射波的几何特征; 然后用有限差分正演, 模拟了散射波场, 用理论模型研究并测试了局域双曲线 Radon 变换散射波去噪新方法。对于实际炮集资料, 分析了 F-K 滤波方法压制散射噪声的局限, 采用局域双曲 Radon 变换有效地去除了炮集中存在的散射噪声, 取得了较好的应用效果。

关键词: 散射波; 时距关系; 有限差分正演模拟; 局域双曲线 Radon 变换; 去噪

文章编号: 1004-4140 (2014) 01-0027-10 **中图分类号:** TP 391.41 **文献标志码:** A

散射噪声是一种广泛存在的地震噪声, 特别是对于地形起伏较大的地段、高陡山区、厚低速带及海底异常体存在的区域, 做好散射波去噪已越来越受到人们的重视。广义上来讲, 波传播到非均质体即会产生波的散射, 形成散射波。连续界面的反射实际可由散射波内部相消和边缘叠合而成^[1]。而孤立的地质体, 特别是尺度与波长相当时, 会产生较强的广角散射, 成为散射波的主要类型^[2]。散射波的产生与散射源紧密相关, 近年来已有不少学者通过散射波的正演模拟和成像, 来探究缝洞和矿脉等特殊地质体的波场规律, 取得了令人可喜的成果^[3-6]。

在实际资料中, 散射波往往以干扰波的形式存在于地震资料中, 它们严重影响了资料的信噪比^[7-9]。为了在资料采集时有效压制散射波, 吴希光等^[9]形成了“九避九就”选线选点, 加大横向检波组合基距, 适当放宽组合高差等采集原则和方法, 一定程度上排除了部分散射波在野外采集时的检波器入口噪声。对于散射波的去噪, 韩佳君等^[10]、郭向宇等^[11]、Ernst^[12]和 David^[13]基本上都是从波动理论出发, 通过散射波成像来实现信噪分离。上述方法模型研究都有较好的效果, 但实际处理对资料复杂程度的承受能力还比较有限, 还需从散射波机理、去噪方法本身等进行深入的探究。

本文首先研究了共炮点记录中散射波的基本特征, 然后分析了共中心点道集反射波和

收稿日期: 2013-06-20。

基金项目: 国家油气重大专项 (2011ZX05049)。

散射波的时距关系, 根据散射波在共炮点道集是中心位于散射点的双曲线, 而在共中心点道集是不规则曲线的特点, 得出了散射波去噪宜选择共炮点道集而不宜选择共中心点道集的结论; 接着用有限差分正演模拟制作反射波和散射波理论模型, 研究在双曲线 Radon 域提取散射波, 再反变换到时域, 并在时域内减去散射波的去噪思路和方法, 开发相应的程序; 最后对实际资料进行处理, 取得了较好的应用效果。理论模型和实际资料处理表明, 利用本方法及开发的程序可以较好地去除资料中任意位置处的双曲散射, 为散射干扰波去噪提供一种有效的方法技术。

1 散射波运动学特征分析

1.1 共炮点道集中散射波的基本特征

对于图 1 所示的中间放炮双边接收观测系统, 容易得到反射波和散射波的时距关系:

$$t_{R1} = \frac{(x^2 + 4h_0^2)^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (1)$$

$$t_{S1} = \frac{(L^2 + h_s^2)^{\frac{1}{2}}}{V} + \frac{((L-x)^2 + h_s^2)^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (2)$$

式中, x 为偏移距, h_0 为界面深度, h_s 为散射点深度, L 为散射点与炮点间的水平距离, V 为地层速度。

设接收道数为 41 道, 对于图 1 所示观测系统 ($\Delta x = 50$ m, $h_0 = 200$ m, $h_s = 100$ m, $L = 250$ m, $V = 1\,000$ m/s), 可以绘出时距关系曲线, 如图 2 所示。

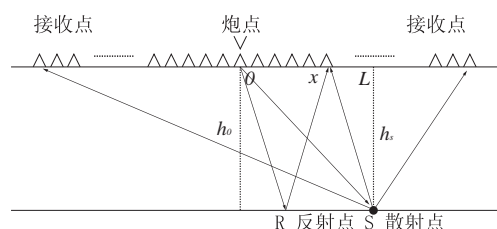


图 1 共炮点道集反射波和散射波炮检关系示意图
Fig.1 Source-receiver relationship diagram of reflection wave and scattering wave in common shot point gather

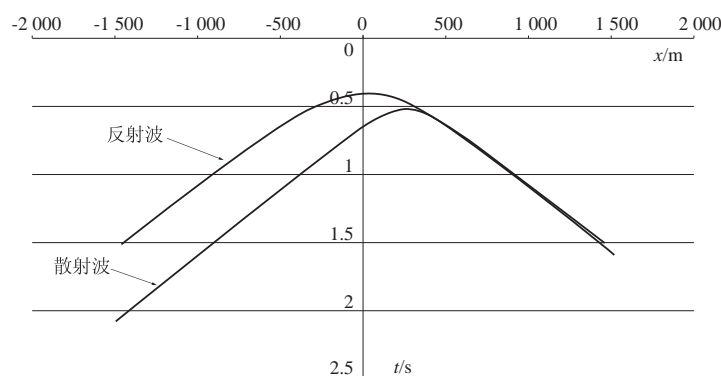


图 2 共炮点道集反射波与散射波时距曲线比较
Fig.2 Time-distance curve comparison of reflection wave and scattering wave in common shot point gather

从图 2 可以看出散射波的几何特征: ① 散射波的时距关系与反射波一样也是双曲线, 不过散射波双曲线顶点位置向散射点漂移; ② 散射波时距曲线斜率与反射波时距曲线斜率基本一致, 所以散射波双曲线的视速度是基本一致的, 在应用 F-K 滤波法进行去噪时, 应

当引起注意。③ 以上考虑的是二维曲线，对于三维观测，上述结论可以推广到双曲面。

1.2 共中心点道集中散射波的特征

如图 3 所示的共中心点观测系统，不难理解并得到反射波和散射波的时距关系：

$$t_{R2} = \frac{(x^2 + 4h_0^2)^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (3)$$

$$t_{S2} = \frac{\left(\left(L + \frac{x}{2} \right)^2 + h_s^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{V} + \frac{\left(\left(L - \frac{x}{2} \right)^2 + h_s^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (4)$$

比较 (4) 式和 (2) 式，可以看到二者时距关系的不同，前者是一时间和偏移距漂移后的双曲线；后者则是两条不同偏移距漂移后的双曲线的组合，是一条不规则的任意曲线。

按图 2 所用参数，根据图 3 共中心点道集炮检关系，可以算出具体时距曲线，如图 4 所示。

从图 4 可以看出：① 共中心点道集中，散射波不再是双曲线，而是两条双曲线的组合，轨迹为一条不规则的曲线；② 对于较远的散射点，近偏移距处曲线平缓，对于较近的散射点，则 t_0 时较小，曲线较陡；③ 对于反射波来说，

可以通过动校正将双曲线校平，但散射波肯定不能校平，而且在共中心点道集中，散射波既不是双曲线也不是抛物线，如何去噪比共炮点道集要难解决，因此不宜在该域进行去噪处理。

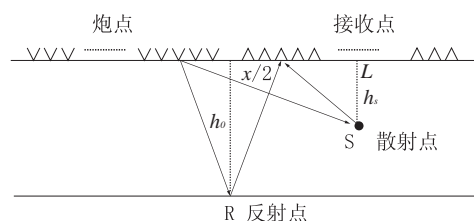


图 3 共中心点道集反射波和散射波炮检关系示意图

Fig. 3 Source-receiver relationship diagram of reflection wave and scattering wave in CMP gather

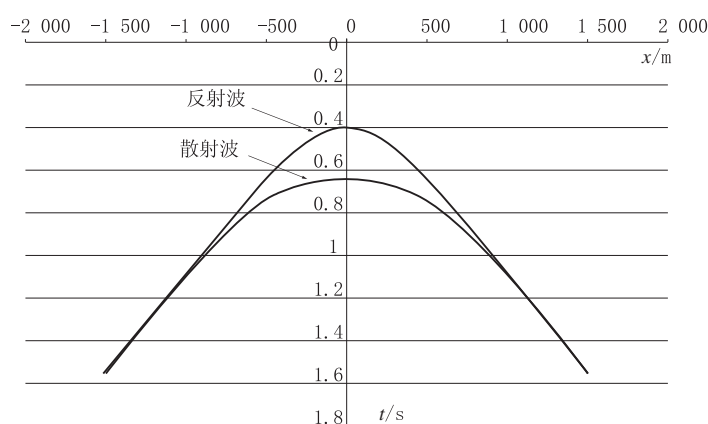


图 4 共中心点道集反射波与散射波时距曲线比较

Fig. 4 Time-distance curve comparison of reflection wave and scattering wave in CMP gather

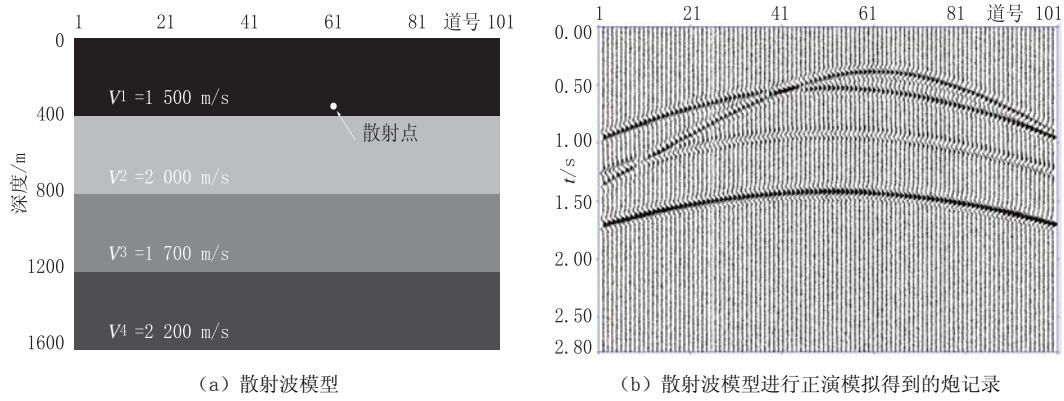


图 5 散射波模型及正演模拟得到的炮记录

Fig.5 The scattering wave theory model and the shot record of forward simulation

2 含散射波地震记录模拟及去噪试验

用有限差分正演模拟^[1]制作如图 5 所示的共炮点理论模型, 含三个中心对称的反射波同相轴、1 个向右偏置的散射波同相轴。模型共 101 道, 1 401 个样点, 2 ms 采样。

由于散射波在共炮点记录中的轨迹是双曲线, 为此选用双曲线 Radon 变换来实现散射波的压制。正反变换公式为^[14]:

(1) 正变换

$$u(\tau, q) = \sum_{n=1}^{N_x} d \left(x_n, t = \left(\tau^2 + qx_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (5)$$

(2) 反变换

$$d'(t, x) = \sum_{i=1}^{N_p} u \left(q_i, \tau = \left(t^2 - q_i x^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (6)$$

由于散射波相对反射波能量要弱、分布范围有限(散射点下方局部范围, 而且一般不对称), 因此应将散射波作为去噪和成像的目标, 单独将散射波挑选出来并加以去除, 这样不但可以较好地去除散射波, 而且还不会损伤有效波。另一个问题是, 由于炮集中散射波常不对称, 若用双边 Radon 变换容易造成反变换后散射波能量部分失真, 为此采用单边 Radon 分别处理、然后再合在一起的处理方式。

图 6 (a) 为对图 5 所示模型以散射波顶点为中心的左半剖面的处理结果, 所用软件为自主开发的 Radon 变换程序, 该软件可以较好地聚焦并可以任意切除散射波的能量。在 Radon 域将散射波切除后, 变换到时间域, 即得到散射同相轴的左半支。类似地, 对右半剖面进行处理, 可以得到散射波的右半支(图 6 (b))。图 5 (b) 减去左半支和右半支散射波, 即得到最终的去噪结果, 如图 6 (c) 所示。可以看到, 虽然左边散射波还有一定的耦合残留, 但主要散射波能量已经去除, 而且由于减去的是散射波能量, 反射波得到振幅保持。

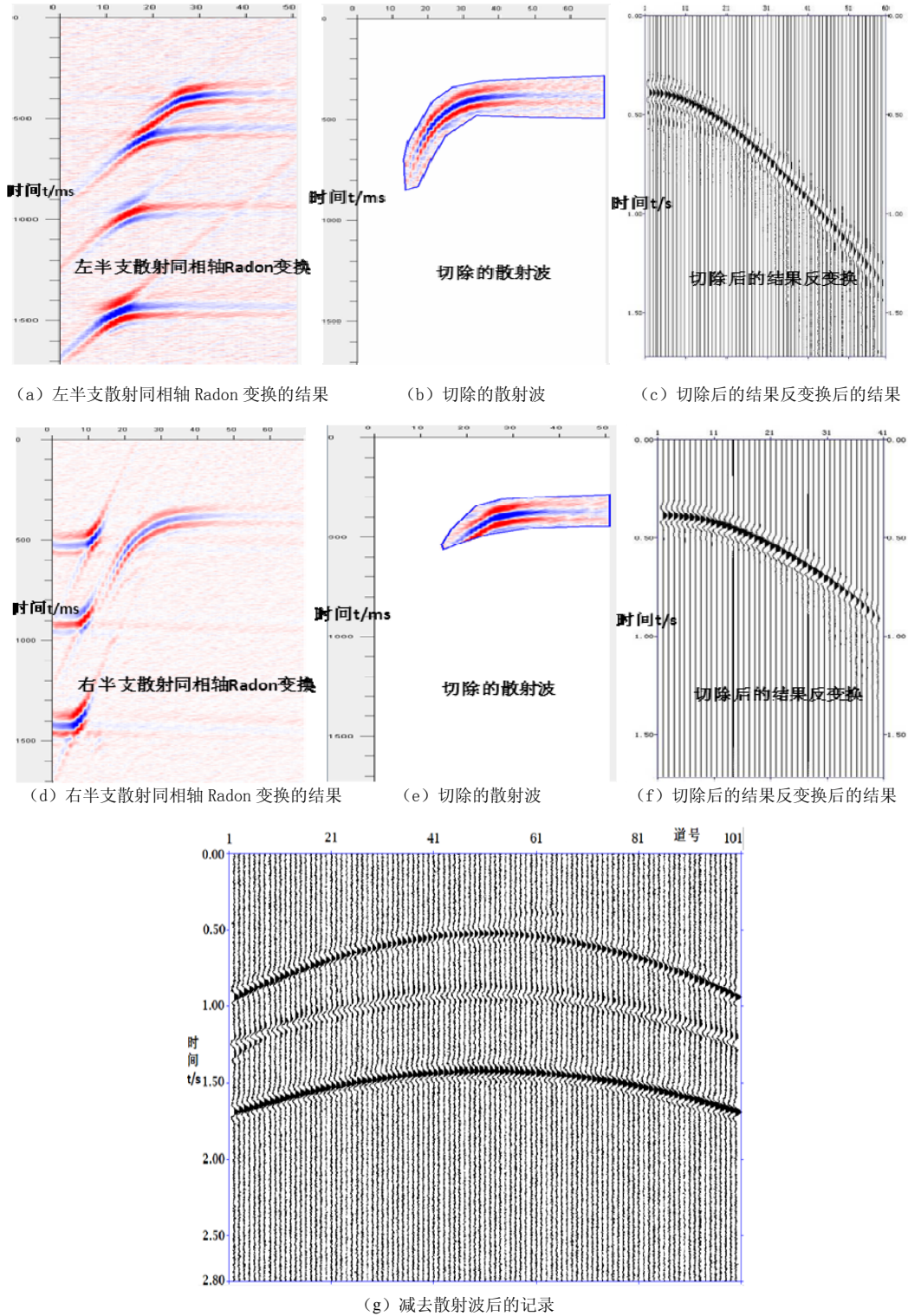


图 6 用双曲 Radon 变换去除理论模型中的散射波噪声

Fig. 6 Removing the scattering wave noise in the theoretical model by hyperbolic Radon transform

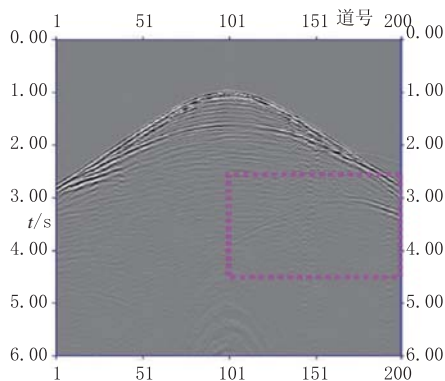


图7 含双曲散射噪声的实际炮集记录

Fig.7 Real CSP seismic record containing hyperbolic scattering noise

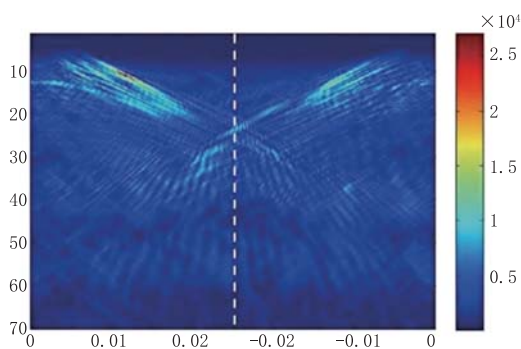


图8 实际资料的谱分析

Fig.8 Spectrum analysis of real data

3 实际资料散射波去噪处理

实际资料中主要存在线性散射和双曲散射以及它们的叠合形式^[7-9]。比较有规律的线性散射可以用视速度滤波来去除,对于双曲散射来说,由于在共中心点道集中同相轴的非双曲性和炮集中散射轴相对于炮点的非对称性,用常规的商业软件无法实现这样的去噪功能。为此,采用本文方法来实现双曲散射的去噪。

图7为某一含双曲散射噪声的实际炮集记录,在剖面的右下方有一能量较强的散射波,它的存在会影响目的层的反射能量。图8为它的FK谱,可以看到图中很难将散射噪声与有效波区分开来,显然用视速度滤波来去除双曲散射是行不通的。

通过图7,我们也已经看到这样一个事实:散射噪声分布有一定的范围,并不是整个炮记录中都存在,对于三维资料来说,只分布在散射点下方的一个曲面上。为此,我们采用局域去噪的思想,先将散射波存在资料取出来,再分别提取左右半支散射波的能量,最后减去散射波得到去除实际散射波的炮记录。

由于商业软件上还没有以上局域去噪方法,我们自行开发了软件,主要实现过程为:①在地震剖面中找到散射波的具体位置;②以散射波顶点为分割点加局域窗对左右小剖面进行处理;③Radon域提取散射波并加一Butterworth相关窗切除,以消除截断效应。

对图7矩形框内的实际资料(时间2800~4520ms,道号100~200),以散射波顶点为分割点对左右小剖面进行处理,Radon域提取散射波并在时域加以去除,结果如图9所示。

从图9可以看出,散射双曲线在Radon域具有比较明显的特征,在不损伤其他有效波的情况下可以做到较好的切除。

对去除了散射波的资料进行谱分析,得到去除散射能量的FK谱,如图10(a)所示。将图10(a)与图8的FK谱进行相减,得到图10(b)。

分析散射波去除前后的谱,可以发现散射波在FK谱中呈如下特征:①散射波能量没有初至、面波和反射波强,F-K变换无法将其能量凸显出来;②散射波与有效波耦合在一起,其分布范围很难确定,无法直接切除;③对于中间放炮、两边接收的道集,在FK谱中,散射波不像有效波具有对称特征。

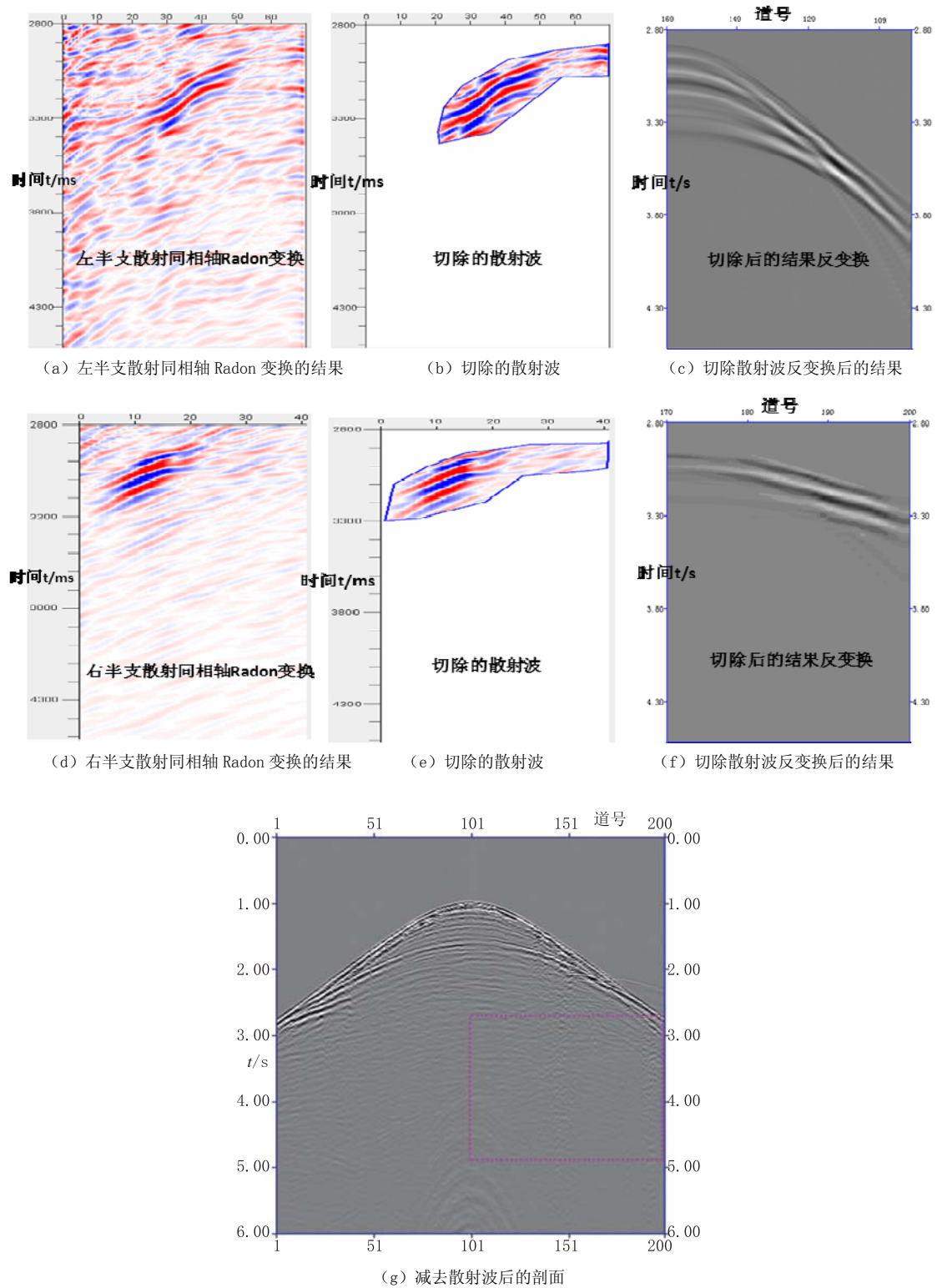


图 9 地震资料散射波去噪处理

Fig.9 Scattered wave denoising processing of seismic data

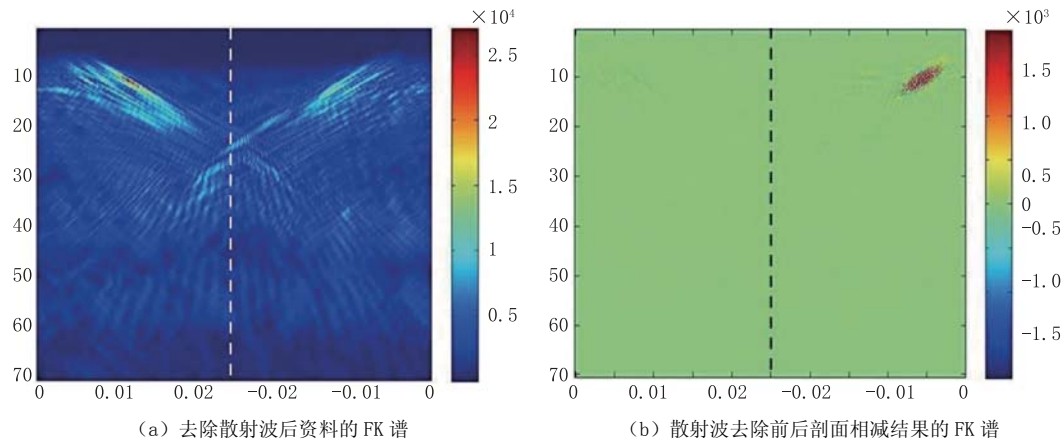


图 10 散射波去除前与去除后相减结果的谱分析

Fig. 10 Spectrum analysis of the subtraction between before and after scattered wave remove

4 结论

通过理论研究和实际资料的处理与分析,得出以下几点有探讨价值的认识和结论:

(1) 地震散射波同相轴的顶点位于散射点下方位置,不受震源位置的影响,散射波顶点时间大小仅与散射点位置有关系;散射点相当于二次震源,随着散射点尺度的增大,散射的能量也会加强。

(2) F-K 滤波可以去除视速度与有效波不同的噪声,但是对双曲散射噪声来说,通过视速度方法很难分开有效波与散射波,不拟采用该方法。

(3) 在 FK 谱中,散射波与有效波往往呈现耦合状态,散射波不易被发现;对压制前后结果对比可以看出,散射波常不具有对称分布的特征。

(4) 用本文开发的局域双曲线 Radon 变换,可以克服商用软件在应用条件上的不足,在 Radon 域精确地去除散射波能量;在时域;在不损伤有效波的情况下能较好地去除散射噪声。

(5) 局域双曲 Radon 变换压制散射波方法对于散射点源少和地表相对简单情况,可以达到较好的去除效果;但对地形十分复杂的地区,其应用也有一定的局限性。

参考文献

- [1] 沈鸿雁. 地震散射波成像技术研究[D]. 陕西: 长安大学, 2010.
Shen HY. Research of seismic scattering wave imaging technology[D]. Shanxi: Changan University, 2010.
- [2] 吴如山. 地震波散射: 理论与应用[J]. 地球物理学进展, 1989, 4(4): 1-23.
Wu RS. Seismic wave scattering: Theory and application[J]. Progress in Geophysics, 1989, 4(4): 1-23.
- [3] 黄雪继. 地震波散射场相位移法波动方程正演模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2003.
Huang XJ. Seismic wave scattering field wave equation forward modeling phase displacement method[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2003.
- [4] 尹军杰. 地震散射波场特征的数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005.
Yin JJ. A study on seismic scattered wave characteristics by numerical simulating[D]. Beijing:

- China University of Geosciences(Beijing), 2005.
- [5] 雷蕾, 印兴耀, 张厚森. 孔洞性介质地震散射波场正演模拟[J]. 特种油气藏, 2011, 18(3): 64-67.
Lei L, Yin XY, Zhang HM. Forward modeling of seismic scattered wave field of porous medium[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, 18(3): 64-67.
- [6] 徐明才, 高景华, 荣立新, 等. 散射波地震方法在蔡家营多金属矿区的试验研究[J]. 物探与化探, 2003, 27(1): 49-54.
Xu MC, Gao JH, Rong LX, et al. An experimental study of seismic scattering event method in the Caijiaying polymetallic district[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2003, 27(1): 49-54.
- [7] 吴希光, 李亚林, 张孟, 等. 复杂地区地震资料低信噪比的原因及对策(一)——表层散射波是导致地震资料低信噪比的根本原因[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 27-32.
Wu XG, Li YL, Zhang M, et al. Causes of and solutions to a low signal-to-noise ratio of seismic data in complex area, Part I: Scattering of surface wave resulting in low signal-to-noise ratio of seismic data[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 27-32.
- [8] 吴希光, 李志荣, 李正佳, 等. 复杂地区地震资料低信噪比的原因及对策(二)——表层散射波的基本性质及形态特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(2): 38-42.
Wu XG, Li ZR, Li ZJ, et al. Causes of and solutions to a low signal-to-noise ratio of seismic data in complex area, Part II: Basic property and shape features of surface scattered waves[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 38-42.
- [9] 吴希光, 李志荣, 张晓斌, 等. 复杂地区地震资料低信噪比的原因及对策(三)——表层散射波压制的技术方法[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 57-61.
Wu XG, Li ZR, Zhang XB, et al. Causes of and solutions to a low signal-to-noise ratio of seismic data in complex area, Part III: Technical methods of surface scattered wave suppression[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 57-61.
- [10] 韩佳军, 韩立国, 巩向博, 等. 基于波动理论的近地表散射噪音衰减[J]. 世界地质, 2010, 29(2): 310-313.
Han JJ, Han LG, Gong XB, et al. Attenuation of near-surface scattering noise based on wave theory[J]. Global Geology, 2010, 29(2): 310-313.
- [11] 郭向宇, 凌云, 魏修成. 近地表散射波的叠后衰减[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(3): 201-208.
Guo XY, Ling Y, Wei XC. Post-stack attenuation of near-surface scattered wave[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(3): 201-208.
- [12] Ernst F. Reduce the influence of scattered wave on seismic record[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1999, 38(1): 59-65.
- [13] David WE. Weak elastic-wave scattering from massive sulfide orebodies[J]. Geophysics, 1998, 64: 289-299.
- [14] 张军华. 地震资料去噪方法——原理、算法、编程及应用[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2011.
Zhang JH. Seismic data denoising method: Theory, algorithm, programming and application[M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2011.

Suppressing Method Study and Application of Seismic Scattered Wave Based on Local Hyperbolic Radon Transform

WANG Li-xin^{1✉}, HUANG Guang-tan², ZHANG Bin-bin²,
ZHU Wen-bo², ZHANG Jun-hua²

1. Research Institute of Petroleum Geophysical & Prospecting SINOPEC, Nanjing 210014, China

2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: Generally, seismic waves scatter when they meet a subsurface heterogeneous body, i.e. a scattering source. Currently, scattered imaging technique which uses scattered waves as effective waves has been used in the identification of special geologic bodies such as caves and fractures. However, in the Gobi Desert, gravel areas, mountain front and other surface complex areas, scattered waves affect the quality of seismic data seriously and are interference waves for seismic field data. Because related research and practical application are not clearly seen at home and abroad, it is necessary to analyze basic characteristics and study denoising method of scattered wave. Firstly, this paper analyzes the geometric characterization of reflection wave and scattered wave based on the t-x relationship in seismic kinematics. Then, finite difference method is applied to simulate scattered wave field and local hyperbolic Radon transform method is proposed to suppress scattered wave for theoretical models. For field CSP data, the limitation of FK filtering to denoise scattered wave is analyzed and then local hyperbolic Radon transform technology is used to remove scattered wave on shot gathers, the results show that scattered wave obtains effective suppression using this method.

Key words: scattered wave; t-x relationship; finite difference forward simulation; local hyperbolic Radon transform; denoising



作者简介: 王立歆[✉] (1971—), 男, 博士, 中石化石油物探技术研究院成像所所长、高级工程师, 主要从事地震成像方法研究与地震资料处理工作, Tel: 025-68109703, E-mail: wanglx.swty@sinopec.com。