

低信噪比地震数据折射初至的判定与识别

安圣培*^① 梁向豪^② 彭更新^② 胡天跃^①

(^①北京大学地球与空间科学学院,北京 100871; ^②中国石油塔里木油田公司,新疆库尔勒 841000)

安圣培,梁向豪,彭更新,胡天跃. 低信噪比地震数据折射初至的判定与识别. 石油地球物理勘探,2015,50(3): 451-459,468.

摘要 静校正正是起伏地表条件下地震资料处理的关键技术,其精度依赖于初至拾取的准确性,但低信噪比往往导致初至难以被准确地判别与拾取。折射波干涉法可以提高初至折射波的信噪比,本文在原干涉法的基础上做了三点改进:通过引入反向互相关函数解决近道地震记录叠加次数低的问题;分析干涉法产生“假事件”的原因,并针对互相关扭曲波形产生的“假事件”,应用子波整形对其进行压制;在处理实际三维地震资料时,由于可用于干涉法的炮检点组合数较少导致叠加次数较少,引入检波点域干涉法,增加所有道的叠加次数。合成地震记录和实际地震资料处理结果均验证了本文方法的适用性。

关键词 低信噪比 初至 干涉法 反向互相关 同相轴保真 共检波点域

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.03.010

1 引言

目前,中国油气勘探重点逐步向西部地区转移,这些地区地表条件大部分比较复杂,静校正问题突出,直接影响这些地区的地震勘探效果。常规的层析静校正和折射静校正精度都依赖初至拾取的精度,但复杂近地表条件会降低初至波的信噪比,尤其是中远炮检距的初至折射波,由于球面扩散、近地表吸收和背景噪声的影响,其信噪比往往很低,难以准确识别,从而影响静校正的效果。干涉法为解决这一问题提供了思路。

Claerbout^[1]、Rickett等^[2]最早提出了“日光成像”的概念,即对两道地震记录互相关得到以一点为震源、以另一点为检波点的地震记录,该方法可用于获得地下反射层位和震源分布信息^[3]。Wapenaar等^[4]推导了描述地震干涉的声波和弹性波的格林函数;Snieder^[5]和Wapenaar等^[6]进一步推导了内部衰减介质中地震干涉的声波和弹性波的表示定理;Snieder等^[7]通过理论推导分析了产生干涉“假同相轴”的原因(包括有限孔径导致“非驻点”的贡献不能

被忽略时产生“假同相轴”,当炮点只分布在地表时产生类似“层间多次波”的“假同相轴”);Thorbecke等^[8]针对不同复杂程度的模型,提出了两种压制“假同相轴”的方法。

在干涉法的基础上,Bharadwaj等^[9]提出了超虚折射波干涉法,即对每个炮点指定两个检波点记录做互相关并叠加,将叠加互相关函数与原始记录褶积并再次叠加得到高信噪比资料。理论上,折射波信噪比提高了 \sqrt{N} 倍(N 为参与褶积运算的检波点数)。Mallinson等^[10]应用超虚折射波干涉法提高了远炮检距折射波的信噪比;Alshuhail等^[11]应用超虚折射波干涉法处理了沙特阿拉伯的实际资料;Nichols等^[12]应用虚折射法研究了Boise水文研究基地的近地表情况取得了一定的效果。此外,Halliday等^[13]利用干涉法分离出面波,并使用最小平方滤波法有效地去除了面波;van Wijk等^[14]利用干涉法产生的“假同相轴”获取近地表信息,并用于近地表成像和静校正;Henley^[15]应用干涉法在共角度域实现了基于射线一致性假设的剩余静校正;吴世萍等^[16]应用虚源法实现了复杂上覆地层下的地震相干成像。

* 北京市海淀区北京大学地球与空间科学学院,100871。Email:aspj@qq.com

本文于2014年1月26日收到,最终修改稿于2015年3月3日收到。

本研究由国家科技部“973”计划(2013CB228602)和“863”计划(2013AA064202)资助。

基于以上研究,本文应用折射波干涉法提高低信噪比资料中初至折射的信噪比,并做了三点改进:①应用原干涉法时,由于近道记录的叠加次数少于远道记录,提高信噪比的效果不明显,因此引入反向互相关函数使所有道的叠加次数相同,明显提高了近道记录的信噪比;②针对干涉法产生的“假同相轴”造成初至同相轴失真的问题,应用子波整形有效地压制了干涉法产生的“假同相轴”;③针对实际资料处理时覆盖次数不均衡的问题,引入了检波点域干涉法,提高了所有道记录的叠加次数。模型试验和实际资料测试结果均表明本文方法是可行的。

2 折射波反向干涉

远炮检距初至一般是来自高速层顶的折射波。图 1 为折射波互相关示意图。 $x_1 \sim y$ 的折射波记录^[10]在频率域的表达式为

$$u(x_1, y) = A(x_1, y)e^{i\omega(\tau_{x_1 y'} + \tau_{y' y})} \quad (1)$$

式中: $\tau_{x_1 y'}$ 为 x_1 与 y' 两点之间的走时; $\tau_{y' y}$ 为 y' 与 y 之间的走时; $A(x_1, y)$ 为振幅值。

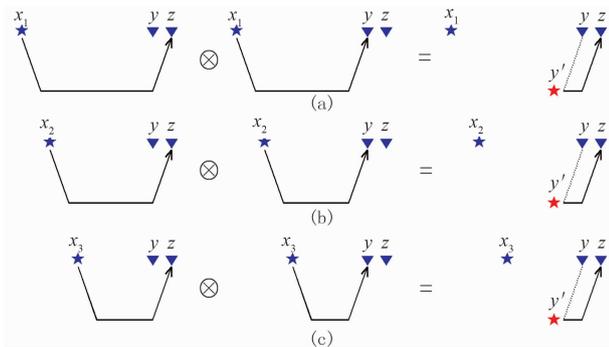


图 1 折射波互相关示意图

(a)、(b)、(c)分别表示不同炮点在两检波点的折射波记录做互相关,得到相同的介质响应;⊗是互相关符号, x_1 、 x_2 、 x_3 为不同炮点, y 、 z 为检波点, y' 为虚源

对 z 、 y 两点的折射波记录做互相关,得到折射波介质响应,物理意义是以 y' 为地下虚拟震源,其折射波在 z 点接收,其激发时间需提前 $\tau_{yy'}$ 。互相关的表达式为

$$\begin{aligned} \varphi(y, z)_1 &= u(x_1, z)u(x_1, y)^* \\ &= |A(x_1, z)| |A(x_1, y)| e^{i\omega(\tau_{x_1 y'} + \tau_{y' z} - \tau_{x_1 y'} - \tau_{y' y})} \\ &\approx |A(x_1, y)|^2 e^{i\omega(\tau_{y' z} - \tau_{y' y})} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\varphi(y, z)$ 为第 x_1 炮在 y 、 z 两点的地震记录的

互相关; * 为复共轭,文中假设 $|A(x_1, y)| \approx |A(x_1, z)|$ 。

大于临界炮检距(即初至波由直达波变为折射波所对应的炮检距)的不同炮点得到的 y 、 z 两点之间的折射波介质响应相同。如图 1b、图 1c 所示,第 x_2 、第 x_3 炮在 y 、 z 两点的折射波记录做互相关得到的折射波介质响应与第 x_1 炮相同,互相关同相叠加可得

$$\varphi(y, z) = \sum_{i=1}^n \varphi(y, z)_i \approx \sum_{i=1}^n |A(x_1, y)|^2 e^{i\omega(\tau_{y' z} - \tau_{y' y})} \quad (3)$$

地震记录中除了折射波还有反射波和随机噪声等。以反射波之间的互相关为例,如果炮检距远大于检波点 y 、 z 之间的距离(图 2a),则反射波走时差约等于零;如果炮点 x_2 恰好与检波点 y 重合(图 2b),则 y 点接收到的是自激自收的反射波记录,此时,反射波走时差不为零。因此,不同炮点得到的反射波介质响应不同。同理,其他与反射波或随机噪声有关的介质响应一般也不相同。所以,在互相关函数叠加时,只有折射波介质响应是同相叠加,其信号相对得到加强。

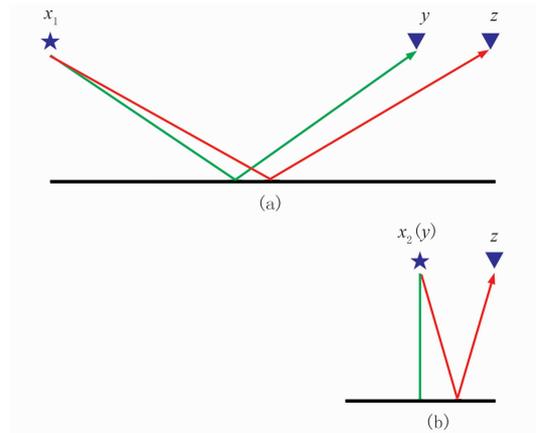


图 2 反射波互相关示意图

(a)炮检距远大于检波点间距时,反射波走时差约等于零;(b)炮点 x_2 与检波点 y 重合时,反射波走时差不为零; x_1 、 x_2 为不同的炮点, y 、 z 为检波点,绿线、红线分别表示 y 、 z 的反射波路径。

进一步利用叠加互相关函数褶积原始地震记录得到干涉法恢复的地震记录。褶积过程如图 3a 所示,将 $S \sim R_1$ 的原始地震记录与 $R_1 \sim R_4$ 间的叠加互相关函数进行褶积,得到 $S \sim R_4$ 的地震记录。同理,利用 $S \sim R_2$ 和 $S \sim R_3$ 的地震记录也能得到 $S \sim R_4$ 的地震记录(图 3b、图 3c),再把 R_4 点的地震记录叠加,可以进一步提高折射波信噪比。

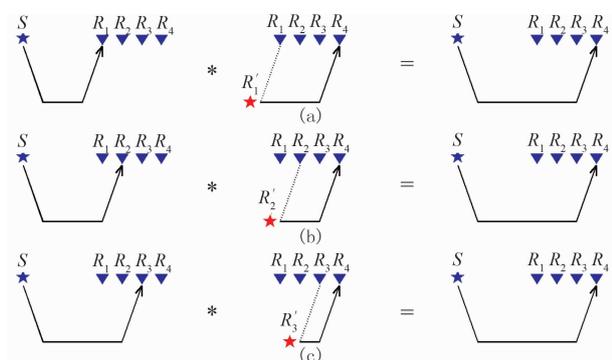


图 3 褶积示意图

(a)、(b)、(c)分别表示利用 $S \sim R_1, S \sim R_2, S \sim R_3$ 的原始地震记录褶积相应的叠加互相关函数得到 $S \sim R_4$ 的地震记录;
* 为褶积符号, S 为炮点, $R_1 \sim R_4$ 为检波点, $R'_1 \sim R'_3$ 为虚源

原干涉法仅利用近道记录褶积叠加互相关函数得到远道记录,使近道记录的叠加次数少于远道记录的叠加次数,导致近道数据恢复效果较差。

为使所有道获得相同的叠加次数,本文引入反向互相关函数,即用 z, y 两点的地震记录做互相关(图 4),得到 z, y 两点之间的反向折射波介质响应,其物理意义是 z 处的虚拟震源产生的地震波沿实际射线路径的反方向传播到 y 点,激发时间延迟了 τ_{zy} ,互相关函数中时间为负的部分是物理可实现的。同样,不同炮点得到的两检波点之间的反向折射波介质响应是相同的(图 4b,图 4c),可以同相叠加。

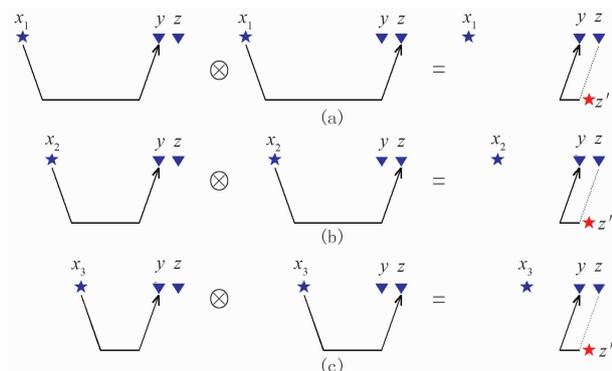


图 4 反向互相关函数示意图

(a)、(b)、(c)分别表示不同炮点在 z, y 的折射波记录做互相关,得到相同的反向折射波介质响应; z' 为虚源

引入了反向互相关函数,就可以利用远道记录褶积反向互相关函数得到近道记录。图 5a 中原方法只利用了 $S \sim R_1$ 的地震记录得到 $S \sim R_2$ 的地震记录,现在可以利用 $S \sim R_3, S \sim R_4$ 的地震记录褶积相应的反向互相关函数得到 $S \sim R_2$ 的地震记录(图 5b,图 5c)。如果存在 N 个检波点,每一个检波点的地震记录都可以由另外的 $N-1$ 个检波点的地

震记录得到,相当于每一道的叠加次数都是 N ,这样就实现了所有道叠加次数相同。

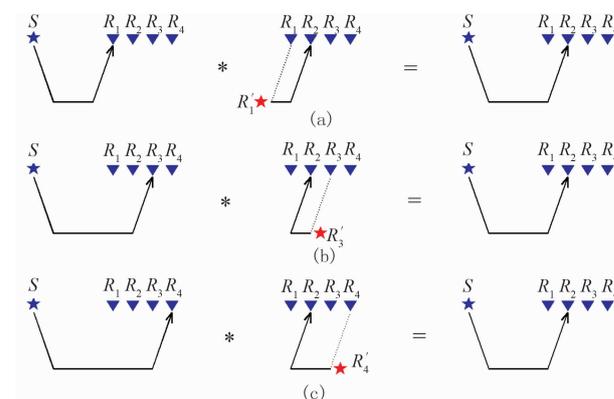


图 5 反向互相关后褶积示意图

(a) $S \sim R_1$ 的记录褶积 $R_1 \sim R_2$ 之间的互相关函数得到 $S \sim R_2$ 的记录;(b) $S \sim R_3$ 的记录褶积 $R_3 \sim R_2$ 之间的反向互相关函数得到 $S \sim R_2$ 的记录;(c) $S \sim R_4$ 的记录褶积 $R_4 \sim R_2$ 之间的反向互相关函数得到 $S \sim R_2$ 的记录; R'_1, R'_3, R'_4 为虚源

3 同相轴保真

折射波干涉法在提高折射波信噪比的同时会在地震记录上形成“假同相轴”,难以准确地判定和识别真实的同相轴。产生“假同相轴”主要有三个原因。

(1)互相关扭曲波形,图 6 中两个完全相同的子波做互相关,理论上应该得到零点处的脉冲函数,但由于原子波中两侧的负向旁瓣具有很强的相似性,互相关会产生两个额外的正向旁瓣,构成了真实同相轴两侧的“假同相轴”。

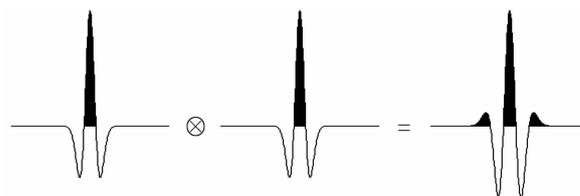


图 6 两个相同子波互相关结果

(2)与反射波和随机噪声有关的介质响应在互相关函数中无法同相叠加。理想情况下,高叠加次数会使这部分信息相互抵消。但由于炮点数有限导致叠加次数有限,这些信息不能完全抵消,褶积结果中会出现与折射波无关的虚假信号。

(3)理论上干涉法得到真实介质脉冲响应的假设前提是在一个由炮点组成的闭合曲面内进行积分,要求炮点连续分布以及时间连续采样。但实际

情况中,用于干涉法的炮点并不构成闭合曲面,且炮点离散分布,时间离散采样,假设条件不满足,因此会产生“假同相轴”。

本文针对“假同相轴”产生的前两个原因,通过子波整形的方法压制“假同相轴”,实现同相轴保真。

首先区分叠加互相关函数中不同子波对应的介质响应。其中折射波介质响应对应的子波峰值(因同相叠加)一般远大于其他介质响应对应的子波峰值,所以峰值较大的子波一般对应折射波介质响应(包括初至折射波和深层折射波),峰值较小的子波一般是反射波或随机噪声。实际资料处理中只保留峰值较大的子波,峰值较小的子波直接归零。

然后选取合适的时窗,对保留下来的子波进行整形。一般的矩形窗在边缘处会直接截断波形,产生尖锐的突变,形成虚假的脉冲信号,所以在矩形窗两侧加上具有平滑衰减效果的 Kaiser 窗作为本文使用的整形窗。时窗尺寸的选取对子波整形的效果有直接影响,时窗过大,无法压制子波中负向旁瓣,时窗过小会扭曲原有的主瓣波形,改变相位信息。所以需要确定既能有效压制旁瓣且尽可能多地保留主瓣宽度的时窗。本文对比了不同宽度时窗截取子波后的互相关结果(图 7)。其中,使用两个相同的子波做互相关,子波表达式为

$$R(t) = [1 - (\pi ft)^2] e^{-(\pi ft)^2} \quad (5)$$

式中:主频 f 为 50Hz;时间范围从 $-0.15s \sim +0.15s$ 。由图 7 可以看到随着时窗宽度的减小,正向旁瓣的峰值随之减小,当时窗宽度为 0.023s 时(图 7c),正向旁瓣完全消失,既达到了理想的压制效果又可保持主瓣的峰值信息基本没有改变。

最后分析不同频率的子波对应的最佳时窗宽度(最佳时窗宽度定义为使旁瓣峰值与主瓣峰值的比值 < 0.01 的临界时窗宽度)。假设地震子波是雷克子波,则子波的主瓣宽度与主频的关系为

$$L_m = \sqrt{2} / (\pi f) \quad (6)$$

通过数值模拟研究不同主瓣宽度下使用不同截取时窗宽度压制旁瓣的效果。图 8 为不同频率旁瓣峰值与整形时窗宽度的关系曲线。可以看到,随着时窗宽度减小,旁瓣峰值先稍稍增大,之后急剧地减小,当到达最佳时窗宽度时,正向旁瓣可以被完全压制。

图 9 为主瓣宽度与最佳时窗宽度的关系曲线。可以看到,最佳时窗宽度与主瓣宽度的比值随着主

瓣宽度增加而增大,且数值逐渐趋于稳定。依据这条曲线,可以根据子波主瓣宽度选取时窗的宽度。

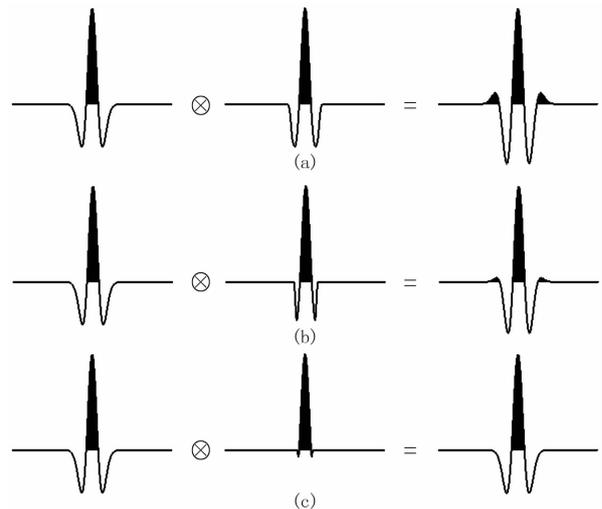


图 7 使用不同宽度的时窗做子波整形
(a)0.063s; (b)0.043s; (c)0.023s
(左)原始子波; (中)整形后子波; (右)互相关结果

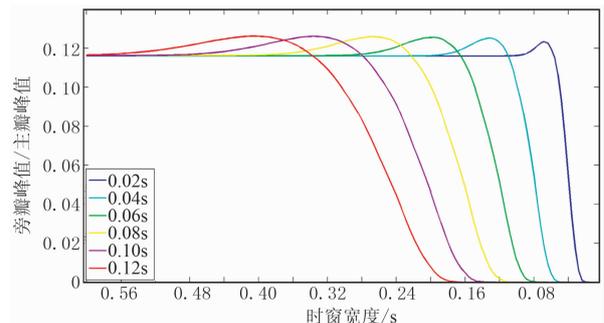


图 8 不同频率旁瓣峰值与整形时窗宽度的关系曲线

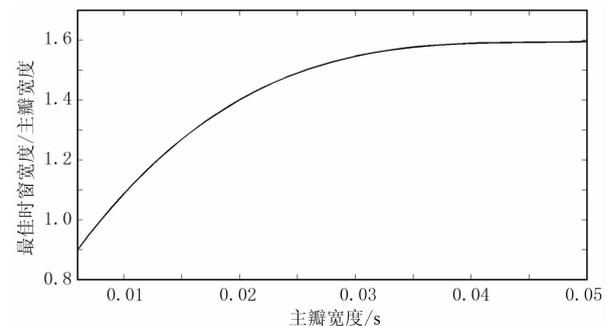


图 9 雷克子波主瓣宽度与最佳时窗宽度关系曲线

实际资料中的子波与雷克子波相比较对称性较差,为了保证压制效果,截取时窗宽度为 1.1 倍的主瓣宽度。从实际地震记录中提取初至子波(图 10a),并从相应的叠加互相关函数中提取峰值最大的子波(图 10b),直接褶积的结果中有明显的正向旁瓣

(图 10c)。对互相关函数中的子波进行整形(图 10e),可以看到褶积结果中正向旁瓣得到很好的压制,同时主瓣信息没有明显改变(图 10f)。

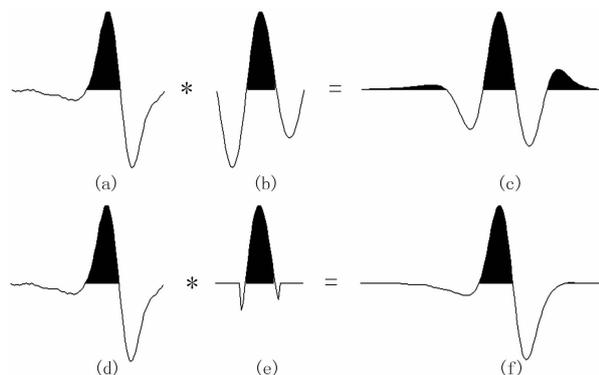


图 10 实际地震资料提取的子波褶积示意图

(a)、(d)为原始数据中的初至子波;(b)叠加互相关函数中提取的子波;(c)未做子波整形的褶积结果;(e)对(b)所示的子波整形;(f)子波整形后的褶积结果

4 检波点域干涉法

干涉法提高信噪比的效果主要取决于叠加次数,而叠加次数取决于可用于干涉法的炮检点数量。实际三维地震资料能够产生共折射波路径的炮检点组合较少,应用折射波干涉法时会出现叠加次数低导致信噪比低的情况。为此本文将干涉法扩展到了检波点域。

原干涉法在炮点域进行,叠加互相关函数反映的是两个检波点之间的介质响应。根据地震波的可逆性,在检波点域也可以实现干涉法:对两个炮点在同一检波点的地震记录做互相关,得到两个炮点之间的介质响应(图 11),将不同检波点对应的炮点之间的互相关函数叠加再褶积,就得到干涉法恢复的地震记录,将这部分结果与炮点域干涉法的结果叠加,得到最后恢复的地震记录。

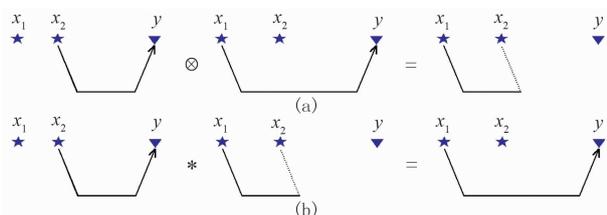


图 11 检波点域干涉法示意图

(a) $x_1 \sim y$ 的记录与 $x_2 \sim y$ 的记录做互相关得到 $x_1 \sim x_2$ 之间的互相关函数;(b) $x_2 \sim y$ 的记录褶积 $x_1 \sim x_2$ 的互相关函数得到 $x_1 \sim y$ 的记录

对 M 个炮点和 N 个检波点的地震记录,炮点域干涉法褶积后的叠加次数为 N ,检波点域干涉法的叠加次数为 M ,所以联合炮点域和检波点域干涉法的最终叠加次数增加到 $M+N$ 。

5 合成数据实例

为了比较原干涉法和改进干涉法的效果,建立水平层状模型(图 12a)。网格数为 200×80 ,网格尺寸为 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 。共两层介质,上层为低速层,P波速度为 700m/s ,厚度为 75m ,下层为高速层,P波速度为 1500m/s ,厚度为 225m ,共 30 个炮点和 70 个检波点,炮距和道距均为 5m ,时间采样间隔为 0.001s ,记录时长为 1.2s ,震源为雷克子波,主频为 20Hz 。利用空间 4 阶精度、时间 2 阶精度的有限差分法实现弹性波正演模拟。

为了应用折射波干涉法提高远炮检距道集的初至信噪比,截取合成数据中的远炮检距道集(图 12b)。为模拟低信噪比情况,在合成数据中加入了高斯随机噪声(图 12c),可以看到初至的信噪比降低,难以准确分辨。先应用原干涉法对该资料进行处理(图 12d),可以看到,随机噪声得到了压制,远道的初至也得到了很好的恢复,但近道记录由于叠加次数低,恢复效果很差。再应用加入反向互相关的干涉法处理(图 12e),由于所有道集的叠加次数相同,近道初至的信噪比明显提高,但“假同相轴”很明显,初至同相轴失真。最后应用加入反向互相关和子波整形的干涉法处理(图 12f),可以看到“假同相轴”得到明显压制,可以有效地判定和识别真实的初至同相轴,实现了同相轴保真。

为了进一步检验该方法在复杂地表情况下的适用性,建立垂直断层的模型(图 13a)。在 $x=600\text{m}$ 处存在一个垂直断层,断层左侧的低速层厚度为 150m ,右侧的低速层厚度为 75m ,其他的物理参数与图 12a 中的水平层状模型相同。

同样截取垂直断层模型的合成记录中远炮检距道集(图 13b),可以看到垂直断层的存在增加了数据的复杂性,初至波不再呈现线性同相轴的特点。在合成数据中加入高斯随机噪声(图 13c),可以看到由于信噪比低,炮检距大于 570m 的初至已经完全无法分辨。分别应用原干涉法(图 13d),加入反向互相关的干涉法(图 13e)和加入反向互相关及子

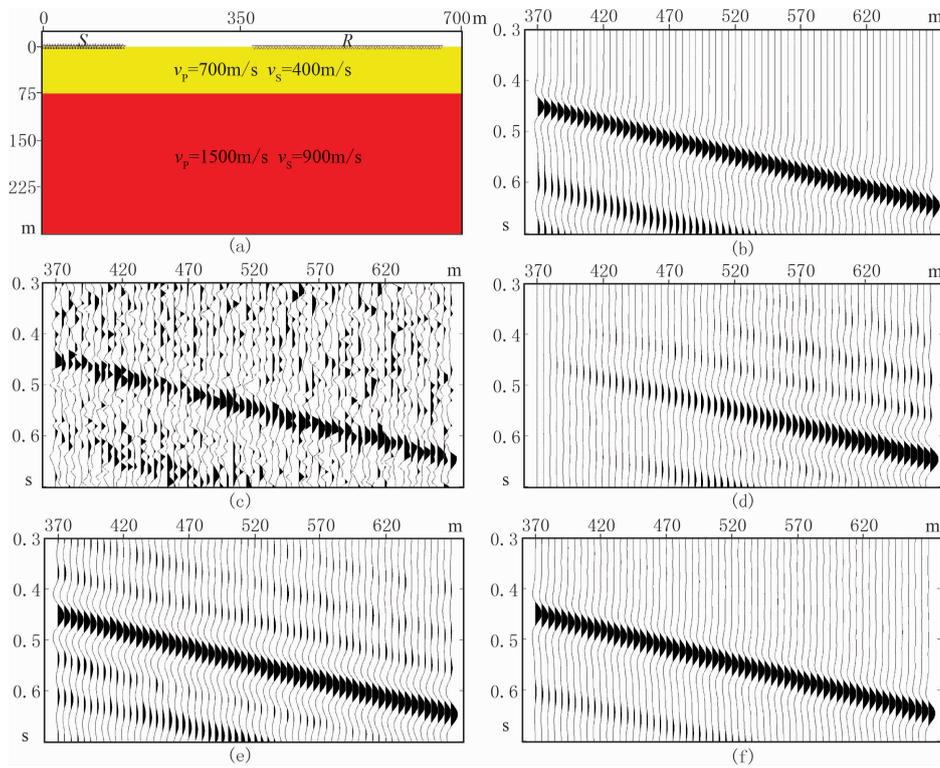


图 12 水平层状模型合成记录干涉法处理结果

(a)水平层状模型；(b)远炮检距原始单炮记录；(c)加入高斯随机噪声；(d)原干涉法处理结果；
(e)加入反向互相关的干涉法处理结果；(f)加入反向互相关和子波整形的干涉法处理结果

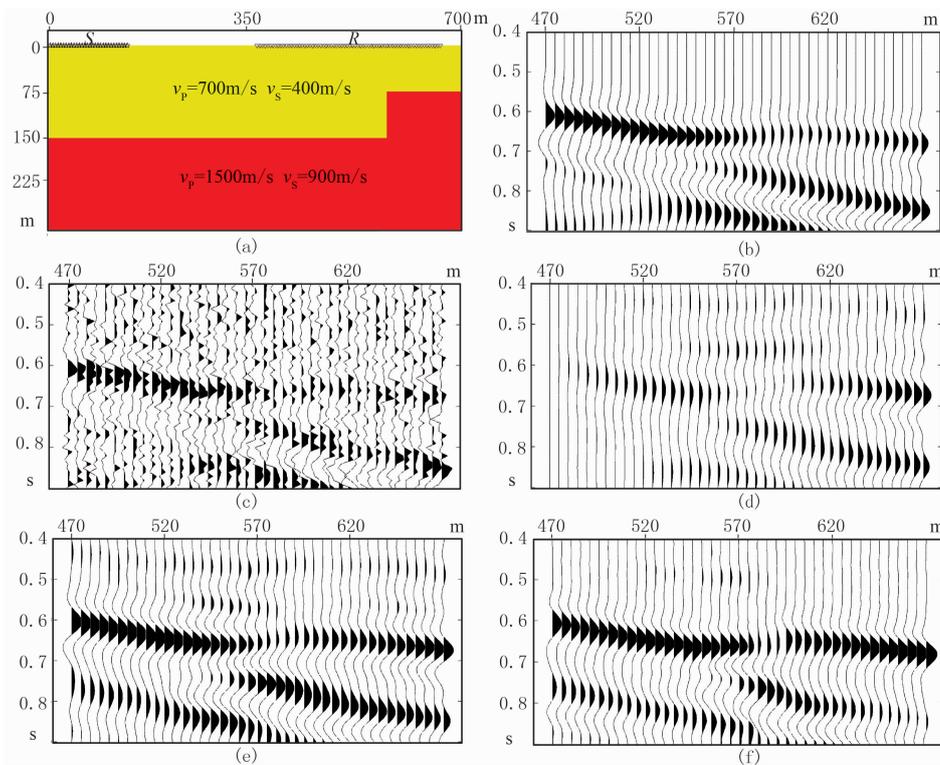


图 13 垂直断层模型的合成数据干涉法处理结果

(a)垂直断层模型；(b)远炮检距原始单炮记录；(c)加入高斯随机噪声；(d)原干涉法处理结果；
(e)加入反向互相关的干涉法处理结果；(f)加入反向互相关和子波整形的干涉法处理结果

波整形的干涉法(图 13f)处理数据。从图 13f 的结果中看到初至的信噪比明显提高,相比图 13e 的结果,“假同相轴”也得到了一定程度的压制。说明该方法在处理具有一定复杂性的近地表资料时也能取得较好的效果。

6 起伏地表应用实例

选取塔里木盆地的实际地震资料进行处理,工区位于和田地区西昆仑山山前甫沙构造带,由于经历了多期构造运动,形成了复杂的构造特征,断裂发育。工区总体呈南高北低的趋势,地表起伏较大,海拔高程为 1760~3200m,高差为 1440m(图 14)。微测井及小折射数据测得工区低速带厚度(最厚可达 400m)横向变化大,单炮记录信噪比极低,面波、多次折射波、异常干扰等干扰波发育,静校正问题严重。

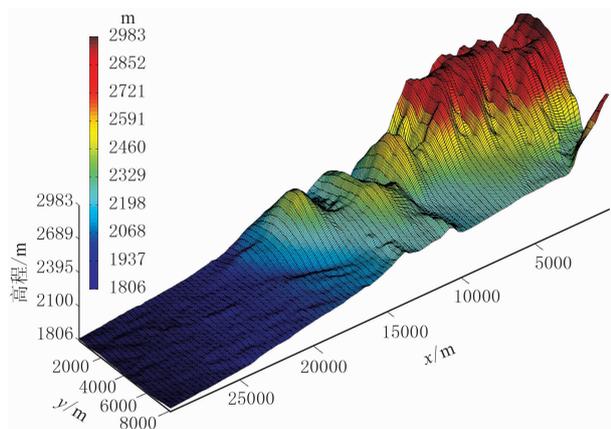


图 14 工区高程图

工区自南向北从山区逐渐过渡到山前带地区。图 15 展示了 A 测线的炮点分布,可控震源只在相对平缓的地区使用。根据地形以及所使用的震源将数据分为三类:山区数据(使用炸药震源),山下炸药震源数据和山下可控震源数据,每类数据的典型单炮记录如图 16 所示。

山区单炮记录(图 16a)的初至信噪比较高,但由于地表起伏剧烈,多次折射、反射和侧面波等异常干扰发育。山下地区仍存在较大的高程差,但地势趋于平缓,逐渐向平坦的戈壁地区过渡,这部分地区的地表上覆盖着一层较薄的黄土。山前带炸药震源单炮记录如图 16b 所示,靠近平坦戈壁地区的道集初至信噪比很低,主要因为薄黄土层严重吸收有效

信号,接收到的有效反射能量弱,较强的背景噪声降低了资料的信噪比。工区最北段的山下可控震源单炮记录如图 16c 所示,在远炮检距处的初至信噪比极低,难以分辨。

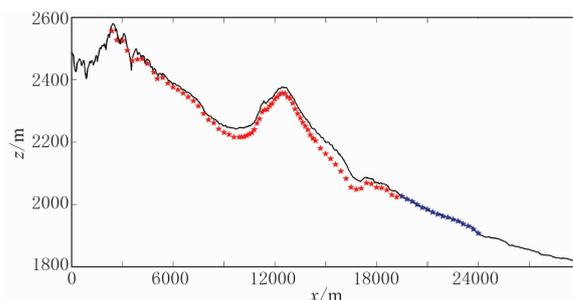


图 15 工区 A 测线高程图

红星为炸药震源,蓝星为可控震源

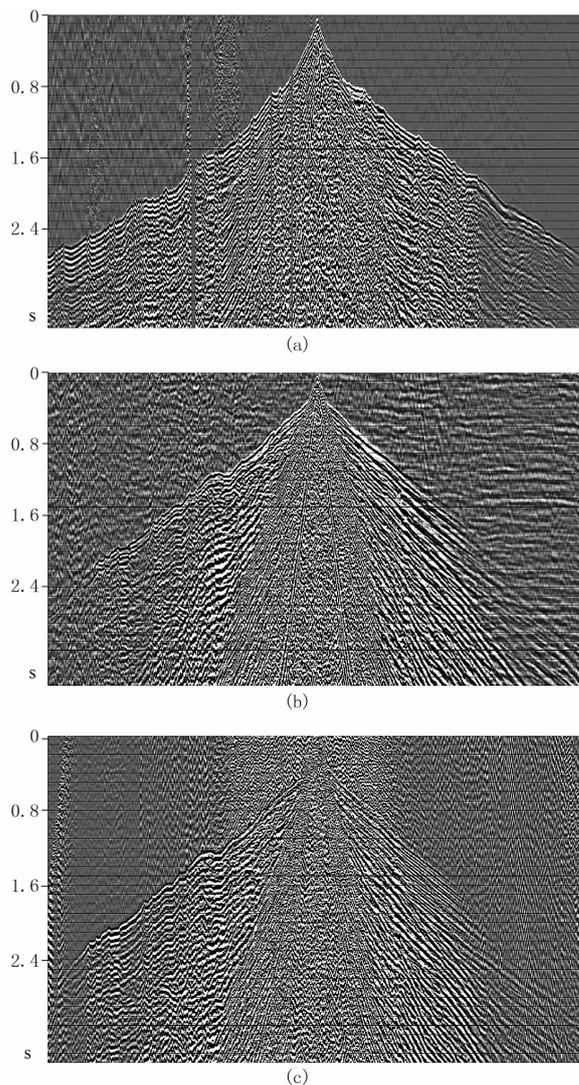


图 16 工区三种典型单炮记录

(a)山区炸药震源单炮记录;(b)山下炸药震源单炮记录;
(c)山下可控震源单炮记录

常规的三维观测系统中炮线与检波点线一般是正交或斜交分布,与检波点测线共线的炮点数较少,而且沿检波点测线方向相邻炮点的间距很大,所以能够产生共折射波路径的炮点数很少,使干涉法的叠加次数较低,影响最后的效果。另外,由于工区北段使用了炸药震源和可控震源,两种不同震源产生的地震数据的相位、频率和信噪比都存在差异,所以分别对这两类震源记录使用干涉法。每条测线上使用的可控震源记录为 16 炮,数量较少,导致对可控震源记录应用干涉法的可用炮检点数很少。联合使用炮点域干涉法和检波点域干涉法增加叠加次数。

6.1 山下炸药震源记录处理效果

选取一组山下炸药震源记录中的共检波点道集,通过两个单炮记录验证改进干涉法的效果。实例 1 的原始数据如图 17a 所示,可以看出,整个道集的背景噪声较强,且中间的部分道集存在严重的规则干扰(椭圆内)。应用改进干涉法(图 17b)后,背景噪声和规则干扰都得到了有效压制,信噪比明显提高,初至同相轴清晰可辨。

实例 2 的原始数据如图 18a 所示,背景噪声非常强,资料信噪比极低,炮检距大于 4800m 的道集完全无法分辨出初至同相轴(椭圆内)。应用改进后的干涉法后(图 18b),背景噪声水平降低,初至波的

信噪比明显提高,可以很好地识别炮检距大于 4800m 的道集的初至同相轴。

6.2 山下可控震源记录处理效果

图 19a 是截取的可控震源记录,由于表层黄土的影响,原始记录中存在强烈的背景噪声,资料的信

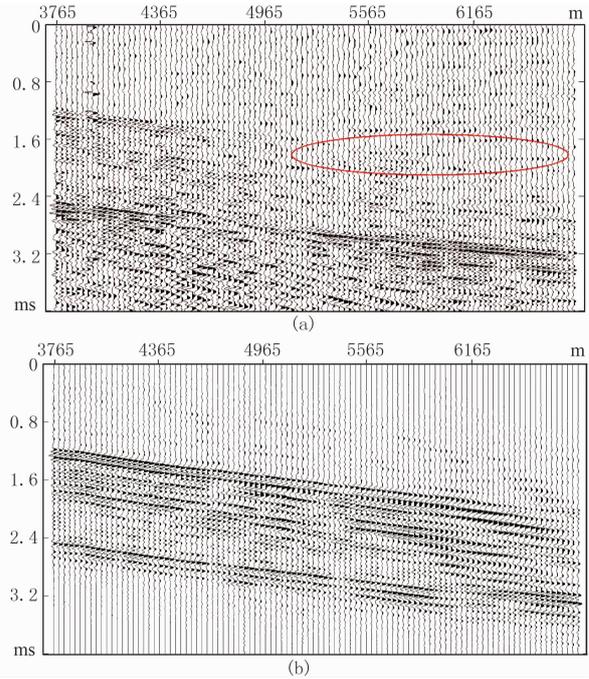


图 18 山下炸药震源记录应用改进干涉法处理结果(二)
(a)原始记录; (b)应用改进干涉法得到的结果

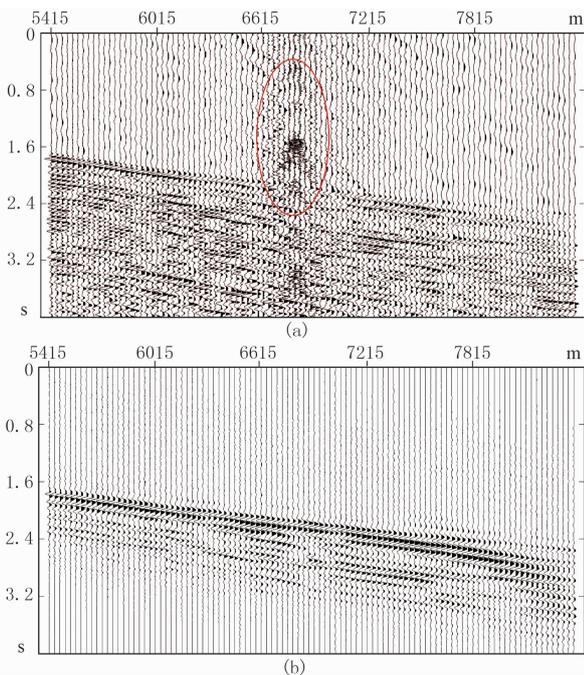


图 17 山下炸药震源记录应用改进干涉法处理结果(一)
(a)原始记录; (b)应用改进干涉法得到的结果

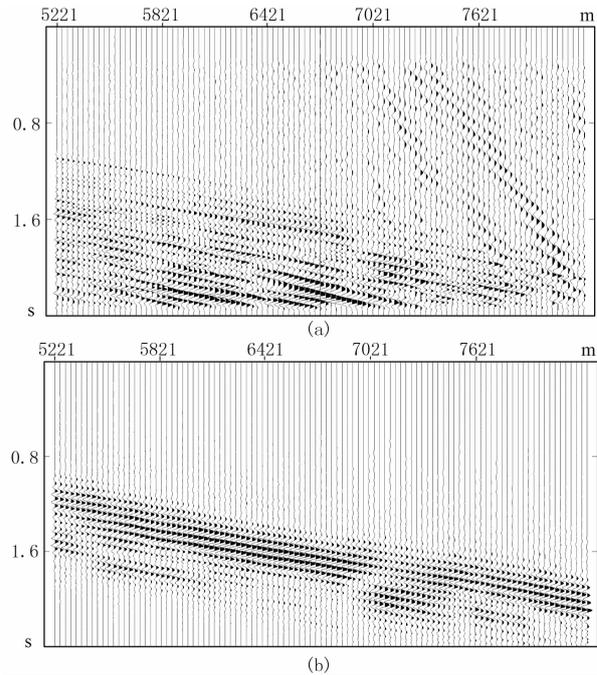


图 19 山下可控震源记录应用改进干涉法处理结果
(a)原始记录; (b)应用改进干涉法得到的结果

噪比极低。由于可控震源数量少,最终用于干涉法的单炮记录只有 14 炮。联合使用炮点域和检波点域干涉法的结果如图 19b 所示,可以看出,背景噪声得到有效压制,可以有效识别原始数据中远炮检距道集中的初至同相轴。

6.3 山区数据处理效果分析

图 20a 是截取的山区单炮记录,由于地表起伏剧烈,初至同相轴的形状很不规则,且部分道集资料信噪比很低,难以识别初至。图 20b 是应用改进干涉法处理的结果,可以看到初至同相轴相比原始资料更加清晰,背景噪声得到有效压制,提高了初至同相轴的识别度。通过对山区数据的分析,说明改进的干涉法在处理地表剧烈起伏的地震数据时同样有效,拓宽了该方法的应用范围。

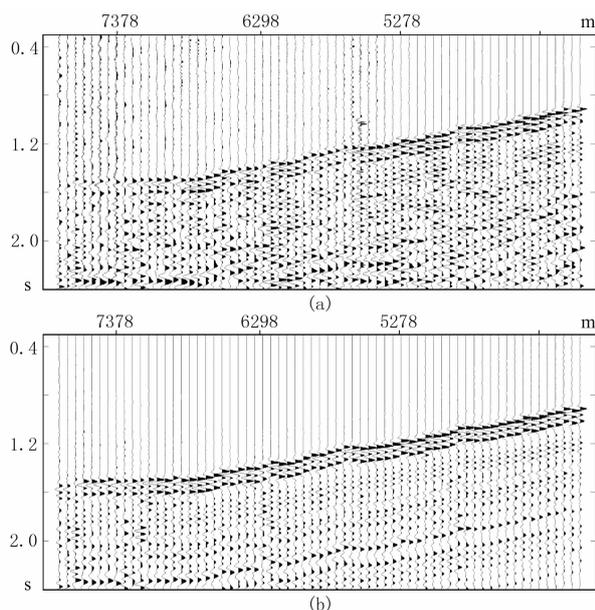


图 20 山区单炮记录应用改进干涉法处理结果
(a)原始记录;(b)应用改进干涉法得到的结果

7 结论

本文针对低信噪比叠前资料中无法准确判定和识别初至的问题,利用折射波干涉法提高初至折射波的信噪比,并对原干涉法做了改进,合成记录 and 实际资料处理结果均验证了该法的可行性和适用性,并得出如下结论:

(1)反向互相关函数可以解决近道地震记录叠加次数低的问题,使所有地震道的叠加次数都为 N (N 为使用的检波点数);

(2)针对互相关扭曲波形产生的“假同相轴”,对叠加互相关函数中的子波做整形可以压制旁瓣的影响,并得到最佳整形时窗与子波主瓣宽度的关系曲线,为选取合适的整形时窗提供了依据;

(3)检波点域干涉法可以进一步增加所有道的叠加次数,使叠加次数提高了 $M+N$ 次(M 和 N 分别为使用的炮点数和检波点数);

(4)本文方法与原干涉法相比,不仅提高了水平层状模型合成地震记录的信噪比(包括初至同相轴信噪比),而且提高了垂直断层模型的合成地震记录的信噪比(包括初至同相轴信噪比),验证了该方法处理复杂近地表条件地震资料的适用性;

(5)通过对塔里木盆地实际三维地震资料中三种不同类型的地震记录(山下炸药震源记录、山下可控震源记录和山区数据)分别应用改进干涉法,有效地压制了原始数据中的强背景噪声,原本无法识别的初至同相轴变得清晰可见,使低信噪比资料的初至自动拾取成为可能。

参考文献

- [1] Claerbout J F. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, 1968, 33(2): 264-269.
- [2] Rickett J and Claerbout J. Passive seismic imaging applied to synthetic data. *Stanford Exploration Project*, 1997, 87-94.
- [3] Schuster G T. Theory of daylight / interferometric imaging: tutorial. 63rd annual EAGE Meeting Expanded Abstracts, 2001, A-32.
- [4] Wapenaar K and Fokkema J. Green's function representations for seismic interferometry. *Geophysics*, 2006, 71(4): SI33-SI46.
- [5] Snieder R. Extracting the Green's function of attenuating heterogeneous media from uncorrelated waves. *Journal Acoustical Society America*, 2007, 121(5): 2637-2643.
- [6] Wapenaar K, Slob E, and Snieder R. Seismic and electromagnetic controlled-source interferometry in dissipative media. *Geophysical Prospecting*, 2008, 56(3): 419-434.
- [7] Snieder R, Wapenaar K and Larner K. Spurious multiples in seismic interferometry of primaries. *Geophysics*, 2006, 71(4): SI11-SI24.
- [8] Thorbecke J and Wapenaar K. Analysis of spurious events in seismic interferometry. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2008, 27:1415-1420.
- [9] Bharadwaj P, Schuster G T and Mallinson I. Super-virtual refraction interferometry: theory. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2011, 30:3809-3812.

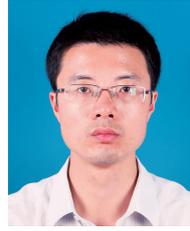
(下转第 468 页)

tion. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 54(3): 369-389.

- [32] Hokstad K. Multicomponent Kirchhoff migration. *Geophysics*, 2000, 65(3): 861-873.
- [33] 岳玉波. 复杂介质高斯束偏移成像方法研究[博士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- [34] 黄建平, 袁茂林, 李振春等. 双复杂条件下弹性波非倾斜叠加精确束偏移方法研究. *石油物探*, 2015, 54(1): 56-63.
Huang Jianping, Yuan Maolin, Li Zhenchun et al. An accurate elastic beam migration method without slant stack for complex surface and subsurface geological conditions. *GPP*, 2015, 54(1): 56-63.
- [35] Hill N R. Gaussian beam migration. *Geophysics*, 1990, 55(11): 1416-1428.
- [36] Hill N R. Prestack Gaussian-beam depth migration. *Geophysics*, 2001, 66(4): 1240-1250.

(本文编辑: 金文昱)

作者简介



黄建平 博士, 博士生导师, 1982年生; 1999年进入中国科技大学地球物理专业学习, 2008年获该校理学博士; 2009年至今在中国石油大学(华东)地球科学与技术学院物探教研室工作。2012年入选中国石油大学骨干教师人才建设工程, 2012年首届“青年科技奖”获得者; 2014年获得教育部霍英东青年教师奖, 国家自然科学基金评审专家, 山东省自然科学基金评审专家。长期从事复杂介质地震波正演模拟、绕射波分离成像、高斯束偏移及最小二乘偏移方法研究。近年来在国内外著名杂志及专业会议上发表论文80余篇。主持国家自然科学基金2项、“973”课题2项、山东省自然科学基金1项, 国家油气重大专项课题3项。申请国家发明专利4项, 授权软件著作权18项。

(上接第459页)

- [10] Mallinson I and Bharadwaj P. Enhanced refractor imaging by supervirtual interferometry. *The Leading Edge*, 2011, 30(5): 546-549.
- [11] Alshuhail A, Aldawood A and Hanafy S. Application of super-virtual seismic refraction interferometry to enhance first arrivals; a case study from Saudi Arabia. *The Leading Edge*, 2012, 31(1): 34-39.
- [12] Nichols J, Mikesell D and van Wijk K. Application of the virtual refraction to near-surface characterization at the Boise Hydrogeophysical Research Site. *Geophysical Prospecting*, 2010, 58(6): 1011-1021.
- [13] Halliday D F, Curtis A, Robertson J A et al. Interferometric surface-wave isolation and removal. *Geophysics*, 2007, 72(5): A69-A73.
- [14] van Wijk K, Calvert A, Haney M et al. The critical angle in seismic interferometry. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2008, 27: 2737-2740.
- [15] Henley D C. Interferometric application of static corrections. *Geophysics*, 2012, 77(1): Q1-Q13.

- [16] 吴世萍, 彭更新, 黄录忠等. 基于虚源估计的复杂上覆地层下的地震相干成像. *地球物理学报*, 2011, 54(7): 1874-1882.
Wu Shiping, Peng Genxin, Huang Luzhong et al. Seismic interferometry imaging based on virtual source estimation with complex overburden. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(7): 1874-1882.

(本文编辑: 金文昱)

作者简介



安圣培 博士研究生, 1990年生; 2013年本科毕业于北京大学地球与空间科学学院地球物理系, 现为北京大学固体地球物理专业博士研究生, 主要从事静校正和叠前资料去噪方面的研究。