

何登科,彭苏萍,孙亮,等. 基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿方法及应用[J]. 煤炭学报,2017,42(S2):465-471. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0982

HE Dengke, PENG Suping, SUN Liang, et al. A method and application for surface-consistent amplitude compensating based on common attitude gather[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2):465-471. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0982

基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿方法及应用

何登科^{1,2}, 彭苏萍^{1,2}, 孙亮^{1,2}, 王舒^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要:地表一致性振幅补偿能够解决好采集施工过程中因施工条件改变所附加给地震数据的异常响应,更好地突出地下地质异常在地震数据中的响应,提高勘探精度和分辨率。在实际生产中,由于施工条件的改变导致同一接收点位置上的检波器具有多种不同倾斜姿态,不同的与大地耦合程度,直接导致同一接收点位置上检波器具有不同的接收灵敏度和振幅响应。针对这种与地表一致性原理和理论假设不相符的问题,根据共接收点道集中不同时间段内检波器的倾斜角度,从共接收点道集中抽取出共姿态道集,并经过分析确认共姿态道集内的检波器接收条件更能充分满足地表一致性理论假设,进而设计了基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿算法和技术流程。该技术与现有技术不同之处在于将共姿态道集替换了现有技术中的共接收点道集。通过模型数据测试和实际生产数据检验发现,新技术的应用效果显著,较好地解决了地表一致性振幅补偿问题。

关键词:共姿态道集;地表一致性;振幅补偿

中图分类号:P631 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2017)S2-0465-07

A method and application for surface-consistent amplitude compensating based on common attitude gather

HE Dengke^{1,2}, PENG Suping^{1,2}, SUN Liang^{1,2}, WANG Shu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The surface-consistent amplitude compensation can attenuate the abnormal response of seismic data caused by the acquisition conditions changing and highlight the response by underground geology. It can improve the exploration precision and resolution. In the actual production, the detectors in the same receiving location will have several different inclined attitudes and different coupling with the soil caused by the construction conditions changes, which will directly make these detectors have several different features about receiving sensitivity and amplitude response. In order to solve this problem that the receiving conditions do not match the surface consistency principle and theoretical assumptions, the paper proposed a new method and technique for surface-consistent amplitude compensation based on the Common Attitude Gather, which is the subset abstracted from a Common Receiving Gather according to the tilt angles of its detectors in different periods of time. It is confirmed through analysis that the receiving condition of a Common Attitude Gather can agree with the surface-consistent more fully. The difference between the new technique and the existing ones is that the Common Receiving Gathers are replaced by the Common Attitude Gathers when implemen-

收稿日期:2017-07-17 修回日期:2017-11-22 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金煤炭联合基金资助项目(U1261203);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501102);国家科技重大专项资助项目(2016ZX05066-001)

作者简介:何登科(1975—),男,贵州纳雍人,讲师,博士。Tel:010-62331305, E-mail:He_dengke@126.com

ting. Tests in the model data and the actual production data show that the new technique can effectively solve the surface-consistent amplitude compensation.

Key words: common attitude gather; surface consistency; amplitude compensation

地表一致性振幅补偿是地震数据处理中一个关键技术和环节,其主要目的是削弱野外数据采集过程中因震源的激发条件、检波器的灵敏度等因素随空间或时间发生变化给地震数据带来的影响。这些影响会对地震数据的振幅能量、频率成分和到达时间等造成畸变。在地震数据处理过程中也采用了相应的方法和技术对畸变数据进行校正。例如 TANER 和 WIGGINS 等在早些时候就对道均衡、剩余静校正等的校正过程就依据了相同物理点位置的畸变效应相同的原理^[1-2]。不过,完整的地表一致性概念是 TANER 和 KOEHLER 在 1981 年提出来的,并将地表一致性校正因子分为震源、检波器、炮检距和地下构造等 4 个因子^[3]。1987 年 Yilmaz 在地震数据处理一书中专门写了地表一致性处理章节^[4]。后来不同的专家学者依据地表一致性原则对振幅校正、相位校正、剩余静校正、反褶积等进行了研究分析,提出了相应的算法和技术措施^[5-17]。地表一致性方法和技术对地震数据处理产生了重要的影响,大大提高了地震数据处理剖面的成像质量。

现有地表一致性方法默认震源和检波器满足地表一致性理论假设。其中,同一位置上一般不重复激发震源(尤其是井中炸药震源),其震源效应因子不随时间改变,因此震源是满足地表一致性要求的。然而,在同一接收点位置上,因施工方案的需要会在不同时刻重复布设不同的检波器,不同时间段内的检波器的倾斜姿态、以及检波器与大地耦合程度等发生了改变,即检波器效应因子发生了改变,不满足地表一致性理论假设。针对这个问题,笔者提出基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿算法,补充和完善地表一致性方法,更好地实施振幅校正。

1 共姿态道集

在地震勘探野外数据采集过程中,当采用多次覆盖技术来回布设多束观测系统时,相邻线束之间会有部分接收线重合,施工中需要重复布设检波器。另外,从装备安全方面考虑,需要每天收回已布设的检波器,第 2 天再重新布设。这两种情况都会造成相同位置的检波器的倾斜姿态、灵敏度和与大地的耦合程度不同。

另外,在某些特殊天气条件下,数据采集的过程中检波器的倾斜姿态和与大地的耦合程度也会发生

改变。例如,冬天施工过程中,早上在近地表冻土层上布设了检波器,中午以后因气温上升导致近地表地层中的冰融化,检波器会发生倾斜,甚至倾倒。在灌木丛中施工时,如果风力较大,连接检波器的线缆难免会拖曳检波器,导致检波器的姿态发生改变。类似这些情况下,检波器与大地的耦合程度会发生变化,其接收性能也会发生改变,检波器因子将会因此不再满足地表一致性原理。

但是,经过分析会发现在检波器倾斜姿态保持不变的各个采集施工时间阶段内,其相应的检波器因子是能够满足地表一致性原理的。因此,为了更好地运用地表一致性方法和技术,特在共接收点道集中依据检波器的倾斜姿态,将连续保持倾斜姿态不变的时间段内的地震数据细分出来组成共接收点道集的子集,称其为共姿态道集^[18-22]。共姿态道集在整个工区中的标识码可由共接收点道集标识码、采集时间段标识码和检波器倾斜姿态标识码共同组成。检波器的倾斜姿态可由野外采集系统自动进行倾斜角度测试并记录在道头数据里,倾斜角度可作为其标识码。采集时间段标识码主要解决不相邻的两个时间段内检波器的倾斜姿态相同的小概率事件问题。

实际的地震勘探项目中,单个的共接收点道集中可能会包含若干个不同的共姿态道集。全区范围内各个接收点位置上的共姿态道集个数(即检波器姿态个数)在一定程度上反映了观测系统中束与束之间的施工方式。如图 1 所示,图 1(a)是 D 工区的共接收点覆盖次数,其满覆盖区域的覆盖次数是基本均匀的。图 1(b)是该工区各接收点位置上的检波器姿态个数的分布,图中可明显看到沿东北—西南方向上有 3 个条带,中间条带的姿态个数明显高于两侧的。这一现象与野外施工班报记录相一致。班报显示该区共施工 24 束,束线方向是西北—东南,每一束的检波器编号从西北向东南方向逐渐增大。施工顺序是先施工每一束的大号检波器部分再施工小号部分,即先在东边区域由西南向东北依次施工,再在西边区域由东北向西南依次施工。于是中间重合部分多次插拔布设检波器,检波器姿态个数整体上比两侧的多。另外,该区范围内多为灌木丛,连接检波器的线缆多数穿过灌木,受到风吹容易拖曳检波器,从而导致检波器倾斜姿态多次发生改变。因此全工区的检波器姿态个数绝大多数大于 1,最大值是 23。

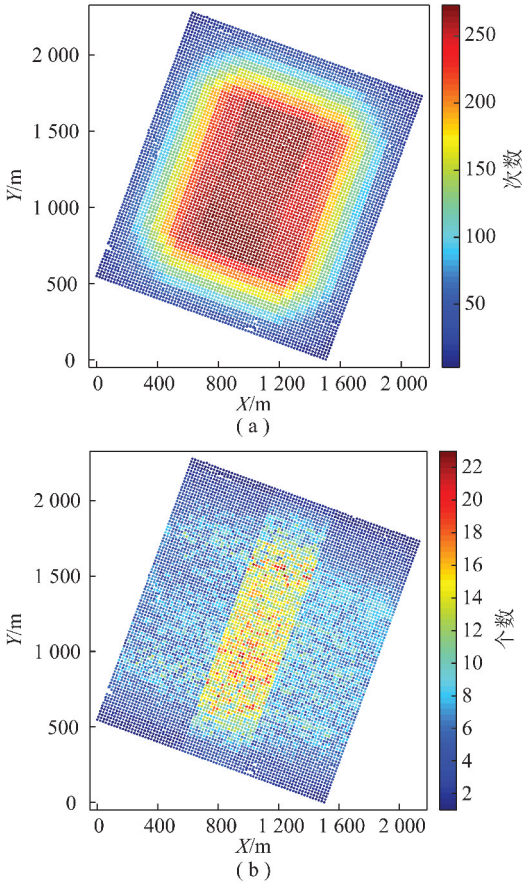


图 1 D 工区共接收点覆盖次数分布 (a) 和检波器姿态个数分布图 (b)

Fig. 1 Fold distribution (a) and receiver attitude number distribution (b) of common receiving point gathers of work area D

2 基于共姿态道集的地表一致性震幅补偿

在整个采集施工过程中,如果布设在相同接收点

位置上的检波器具有多个不同的姿态标识码,那么说明这些检波器可能是不同的检波器,或者是具有不同倾斜姿态的相同检波器。这些情况都可能会导致该接收点上的检波器具有不同的灵敏度和响应特性,包括不同的振幅响应、不同的方位角特性和不同的起跳时间特性(即静校正问题)^[18-22],需要有针对性地进行特殊处理,才能较好地解决地表一致性问题。例如,在图 2 所示的某工区 X 分量第 3138 号共接收点道集(经线性动校正后)中,地震数据的能量差异比较大,有“挂面条”现象,地表一致性问题比较严重。经检查该道集里检波器的倾斜角度值分别为 $-11.44, -11.43, -11.41, -11.32, -11.25$ 和 -0.87 等 6 个,可以划分为 6 个不同的共姿态道集。不过,由图 2 顶部折线来看,大致可以认为有两种主要的倾斜角度,其中一个为前 5 个的平均值 -11.37° ,另一个为 -0.87° ,同时可以看到两种不同的倾斜角度对应着不同质量的地震数据,其中“挂面条”的弱振幅能量地震数据道对应着 -11.37° 倾斜姿态。

利用现有的地表一致性振幅补偿方法应用了震源因子和检波器因子之后,地震数据中的地表一致性问题并没有得到较好的解决。如图 3 所示,其振幅能量较图 2 显示的原始数据有了一些改变,相同倾斜角度的地震数据地表一致性有一定的改善。但是,“挂面条”的现象仍然存在,其原因在于同一个共接收点道集中不同姿态的检波器具有不同响应特征,而同一个检波器因子是不能够解决不同姿态检波器之间的差异的。因此需要进行基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿分析及应用研究。

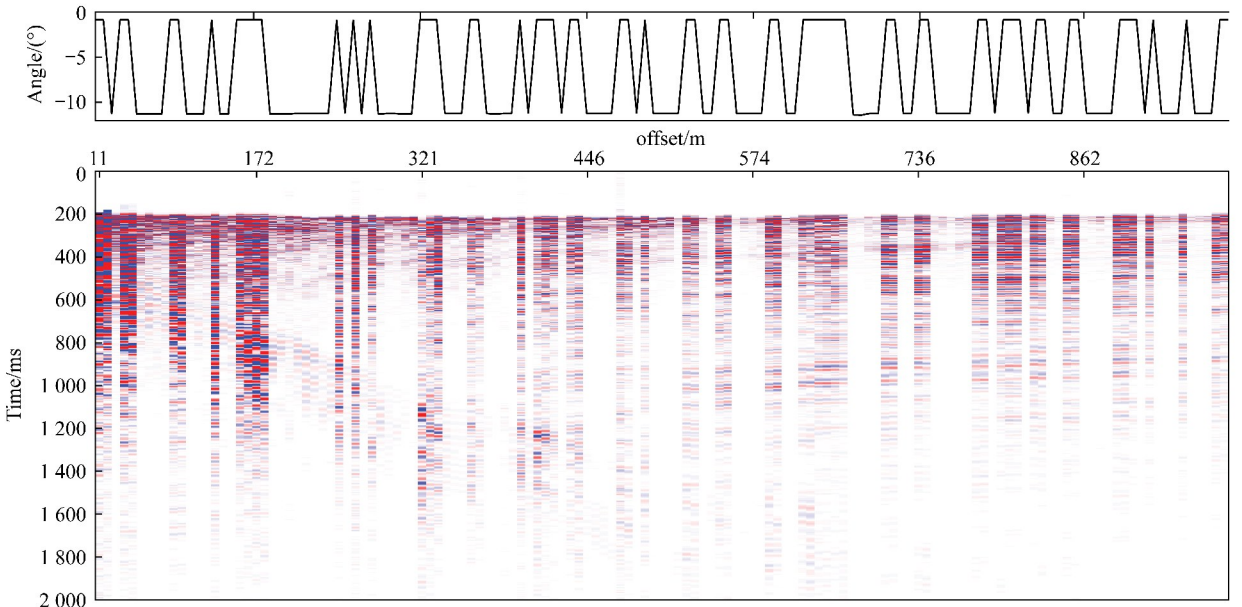


图 2 原始的第 3138 号共接收点道集对应的 X 分量 LMO 数据(顶部折线代表检波器倾斜角度)

Fig. 2 Original 3138th CRG of LMO X component (top's step lines represent tilt angles)

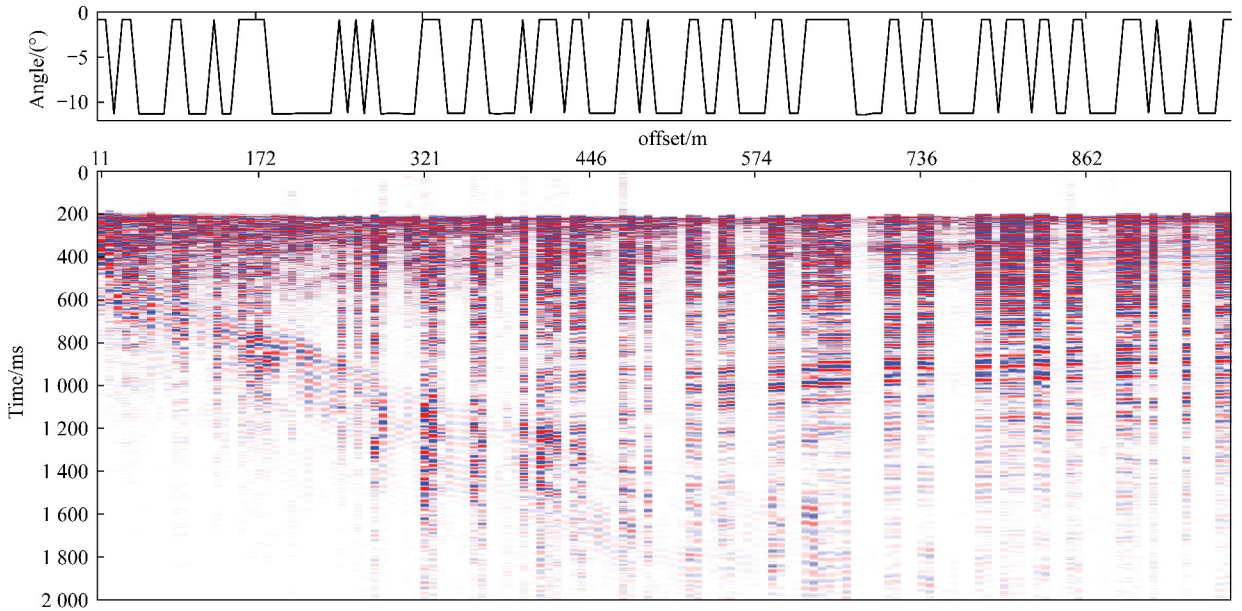


图3 经现有技术振幅补偿之后的第3138号共接收点道集对应的X分量LMO数据(顶部折线代表检波器倾斜角度)

Fig. 3 The 3138th CRG of LMO X component correcting by conventional method (top's step lines represent tilt angles)

基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿算法与目前所采用算法基本上是相同的,不同之处是在有关检波器补偿因子的统计分析中所采用的是共姿态道集数据,而不是现有算法中所采用的共接收点数据。现有算法中的校正公式为

$$D_{ij} = S_i + R_j + O_k + C_l \quad (1)$$

其中, S_i , R_j , O_k 和 C_l 分别是当前讨论的地震数据对应的震源、检波器、炮检距和CDP等4项补偿因子的对数值,每一项的下标是代表了当前讨论的地震数据在上述4个道集中所对应的分量。 D_{ij} 为当前讨论的地震数据能量对数与全区地震数据平均能量对数的差值,代表了该地震道的总的振幅补偿因子。其中,检波器项能量的统计以及补偿因子的统计是在对应的共接收点道集中的全部数据道范围内实施。没有区别不同采集时间段内不同姿态的检波器响应特征,而基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿算法中对不同姿态的检波器计算了不同的补偿因子,其校正公式为

$$D_{in} = S_i + A_n + O_k + C_l \quad (2)$$

与式(1)比较,式(2)中的检波器项因子 R_j 变成了检波器姿态项因子 A_n 。 A_n 的计算与现有技术中 R_j 的计算思路和方法相同,不同的是统计对象和范围发生了改变。在新的方法技术中, A_n 对应的检波器姿态项能量的统计以及补偿因子的统计是在对应的共姿态道集中的全部数据道范围内实施。然后对式(2)经过若干次的Gauss-Seidel迭代求解,最终可也得到各项补偿因子。具体补偿的时候可以根据实

际情况选择不同的补偿因子进行地表一致性振幅补偿。

3 模型数据和实际数据检验

为了检验基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿分析和应用算法的正确性和有效性,特制作了一个三分量地震数值模拟模型。该地质模型由两个地层组成,其参数见表1。

表1 两层模型参数

Table 1 Parameters of the two-layers model

层序号	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	厚度/m
1	2 400	800	2.0	800
2	3 000	1 000	2.3	—

观测系统由 10×10 震源阵列和 24×24 的接收器阵列组成,震源间距为60 m,接收点间距为50 m,震源阵列位于接收点阵列的中心。各接收点所接收到的地震体波能量由Zeppritz方程计算的反射系数代替。为了模拟检波器具有不同的姿态,将震源阵列划分成4个子块,每个子块包含25个震源。各个接收点上的检波器模拟了4个不同的姿态,分别对应接收4个不同子块的震源激发的地震体波能量,同时产生4个不同随机数作为4个不同姿态的振幅畸变因子。于是,不同姿态的检波器所接收到的地震体波能量是该接收点对应的反射系数能量与相应姿态的振幅畸变因子的乘积。另外,三分量地震数据按照总的体波

能量的投影关系分配,具体如式(3)所示。

$$\begin{cases} Z_{ijn} = E_{ij}A_{jn} \cos \varphi_{ij} \\ X_{ijn} = E_{ij}A_{jn} \sin \varphi_{ij} \cos \alpha_{ij} \\ Y_{ijn} = E_{ij}A_{jn} \sin \varphi_{ij} \sin \alpha_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中, E_{ij} 为第*i*震源、第*j*接收点对应的地震体波能量,用反射系数代替; A_{jn} 为第*j*接收点的第*n*姿态对应的振幅畸变因子; φ_{ij} 为出射角,这里为了近似模拟近地表风化带的影响,选用了理论出射角的1/3作为 φ_{ij} 的实际模拟值; α_{ij} 为震源到接收点的方位角; Z_{ijn} , X_{ijn} 和 Y_{ijn} 分别为3个分量的实际能量。

通过计算反射系数以及检波器的振幅畸变因子,在模型测试中得到了57 600道模拟地震数据,通过能量的分配最终得到Z,X和Y三个分量的原始振幅。分别对3个分量的原始振幅按照现有技术和本文中的新技术进行了振幅补偿处理,都只应用了震源项和检波器项的补偿因子。图4中依次展示了Z,X和Y三个分量的振幅对比,由图4可以看到3个分量的原始振幅的相对差异分别约为0~8,-12~8和-12~10。经过现有振幅补偿技术分析和应用之后,3个分量的振幅畸变并没有得到校正,相反还有加剧畸变的趋势,3个分量振幅的相对差异分别变成了0~11,-15~9和-25~11。然而,经过新技术分析和应用之后,3个分量的振幅畸变得到了较好的校正,与其理论反射系数对应的能量分配基本相当。从模型数据测试结果来看,新的基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿方法和技术是可行的,能较好地解决振幅能量畸变问题。

另外,新的振幅补偿方法和技术目前也在多个地震勘探生产项目中进行了检验和业务应用测试。其中对某工区的三维三分量地震数据也进行了基于共姿态道集的地表一致性振幅补偿分析和应用,测试结果也是比较好的。例如,与图2,3所显示的第3 138号共接收点道集X分量数据对比来看,图5所示的经新技术补偿之后的振幅能量更一致,基本上解决了不同姿态检波器之间的能量差异,同相轴的能量也变连续了,“挂面条”的现象得到了较好的改善。

在对该区的X和Y分量分别进行基于共接收点道集和共姿态道集的振幅补偿之后,经过相同参数的几何扩散补偿、两分量旋转、速度分析、FK滤波和动校叠加之后,分别得到了相应的R分量叠加剖面。如图6,7所示的第68条XLINE线的叠加剖面中,经过基于共姿态道集振幅补偿所得到的叠加剖面质量相对比较好。基于共接收点道集补偿的剖面中,ILINE_NO号从220~265的范围内的1 000 ms同相

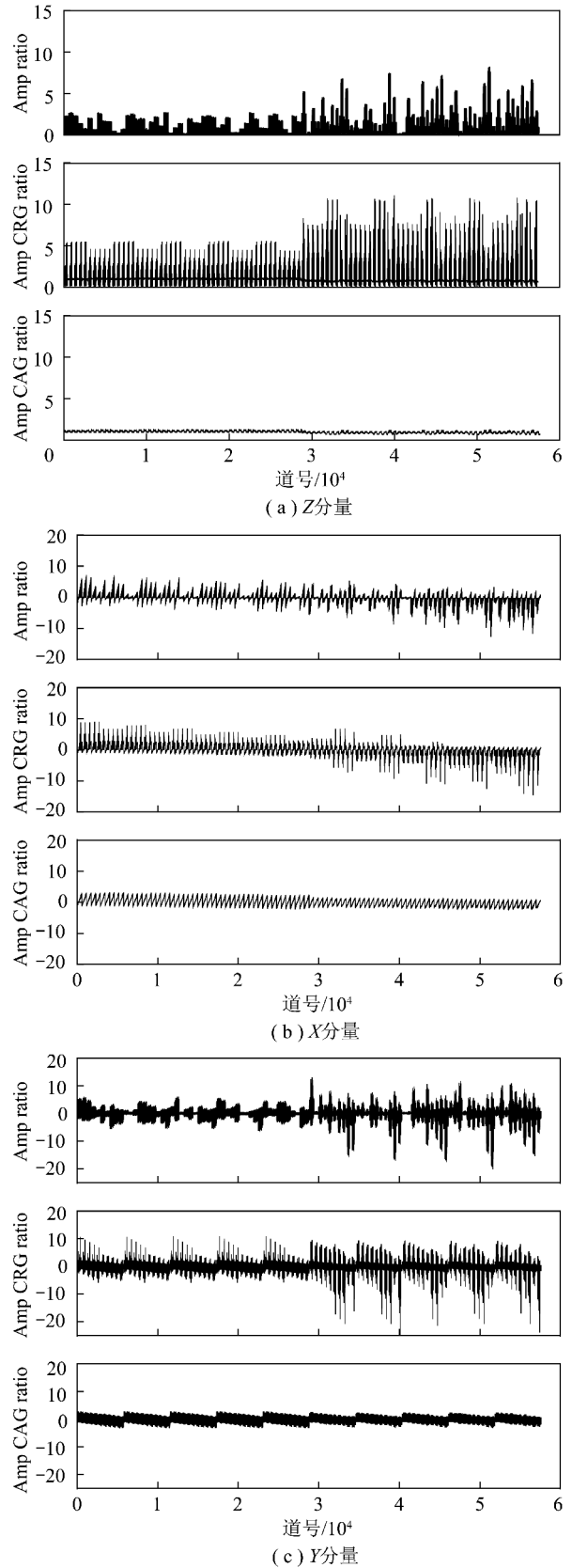


图4 模型测试中的Z,X和Y分量振幅对比
Fig.4 Simulating amplitude comparisons of the Z,X and Y components

每个分量从上至下依次为原始振幅、经现有技术振幅补偿之后的振幅和经新技术振幅补偿之后的振幅

轴连续性较差,而基于共姿态道集补偿的剖面中的对应同相轴比较连续。另外,前者剖面中的 261 线和 262 线在 200 ~ 800 ms 处的振幅能量偏弱,影响了 600 ms 附近的同相轴连续性,而后者剖面中对应位

置的同相轴质量都较好。从模型数据和实际数据的分析中,可以看到基于共姿态道集的振幅补偿方法补充和完善了现有技术,能够提高地震数据处理剖面的质量。

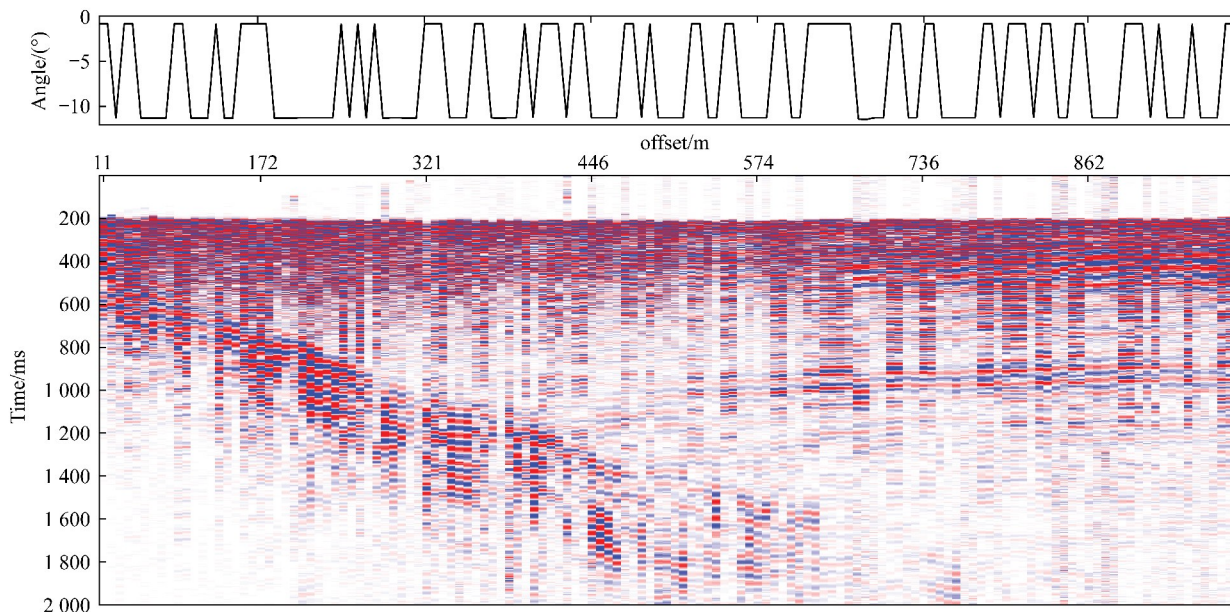


图5 经新技术振幅补偿之后的第3138号共接收点道集对应的X分量LMO数据(顶部折线代表检波器倾斜角度)

Fig. 5 The 3138th CRG of LMO X component correcting by new method (top's step lines represent tilt angles)

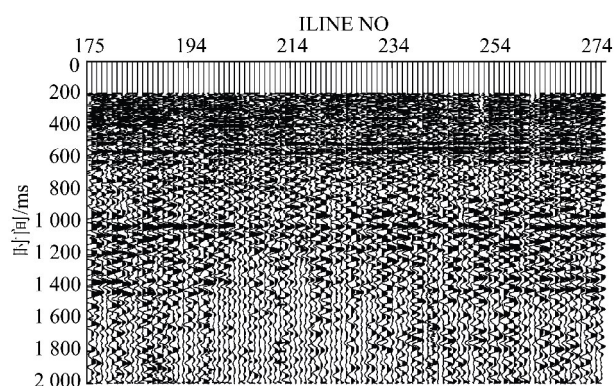


图6 经现有技术振幅补偿之后的R分量叠加剖面

Fig. 6 A section of R component stack profile after amplitude correcting by conventional method

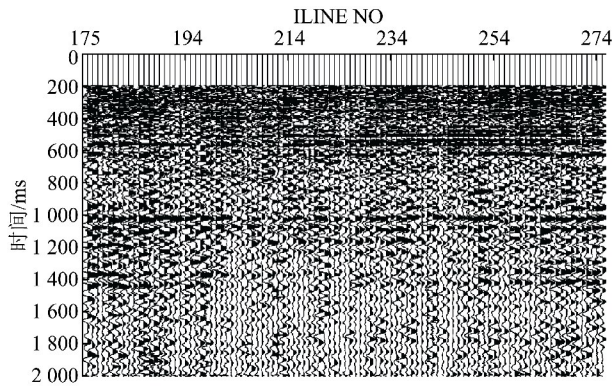


图7 经新技术振幅补偿之后的R分量叠加剖面

Fig. 7 A section of R component stack profile after amplitude correcting by new method

4 结论与讨论

地表一致性原理和方法的应用对于地震勘探至关重要,因为该技术的应用能够解决好采集过程中因施工条件改变所附加给地震数据的异常响应,做好保幅保真处理,更加集中突出地下地质异常在地震数据中的响应,提高勘探精度和分辨率。在地表一致性振幅补偿方法和技术中尤其默认震源和接收点满足一致性理论假设。然而,由于各种施工条件的影响会导致接收点位置上的检波器并不始终满足一致性理论假设,例如多次覆盖技术中以及出于检波器等设

备安全考虑,会在同一个接收点位置上多次布设上不同的检波器,或者因冻土融化、风吹拖曳等原因导致同一个检波器产生不同的倾斜姿态,与大地耦合程度也发生改变。

这些条件下都会使得检波器不能满足地表一致性要求,但是在检波器的倾斜姿态没有发生改变的各个时间段内其接收特性是满足地表一致性要求的。因此,依据检波器的倾斜姿态可以在共接收点道集中抽取出子集组成共姿态道集,在其基础上发展新的地表一致性振幅补偿方法和技术。检波器补偿因子在现有方法技术中是从共接收点道集中统计分析得到

的,而在新技术方法技术中是从共姿态道集中统计分析得到的,这是两者的本质差别。

通过模型数据测试和实际生产数据检验发现,新方法技术的应用效果显著,较好地解决了地表一致性这幅补偿问题。

该方法技术的应用,进一步完善了地表一致性振幅补偿方法技术,同时也为地表一致性相关的其他方法技术提供了借鉴和参考。不过,如何从地震数据中分析和识别不同的检波器姿态,弥补依赖采集系统检测检波器倾斜姿态的施工成本和不足,是后期研究的方向。

参考文献(References):

- [1] TANER M T, KOEHLER F, ALHILALI K A. Estimation and correction of near-surface time anomalies [J]. *Geophysics*, 1974, 39(4): 441-463.
- [2] WIGGINS R A, LARNER K L, WISECUP R D. Residual statics analysis as a general linear inverse problem [J]. *Geophysics*, 1976, 41(5): 922-938.
- [3] TANER M T, KOEHLER F. Surface consistent corrections [J]. *Geophysics*, 1981, 46(1): 17-22.
- [4] YILMAZ O. Seismic data processing [M]. SEG, 1987: 196-203, 506.
- [5] LEVIN S A. Surface-consistent deconvolution [J]. *Geophysics*, 1989, 54(9): 1123-1133.
- [6] CARY P W, LORENTZ G A. Four-component surface-consistent deconvolution [J]. *Geophysics*, 1993, 58(3): 383-392.
- [7] 国九英, 周兴元. 二维及三维地表一致性相位校正 [J]. *石油地球物理勘探*, 1995, 30(3): 345-350.
GUO Jiuying, ZHOU Xingyuan. Surface-consistent phase correction in 2-D and 3-D domains [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1995, 30(3): 345-350.
- [8] 张昌君, 罗晓微. 四分量地表一致性反褶积 [J]. *石油物探*, 1997, 36(S1): 63-66.
ZHANG Changjun, LUO Xiaowei. Four-component surface-consistent deconvolution [J]. *Geophysical Prospection for Petroleum*, 1997, 36(S1): 63-66.
- [9] 高少武, 周兴元, 蔡加铭. 反射波地表一致性相位校正 [J]. *石油地球物理勘探*, 2001, 36(4): 480-487.
GAO Shaowu, ZHOU Xingyuan, CAI Jiaming. Surface-consistent phase correction for reflection wave [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2001, 36(4): 480-487.
- [10] 李生杰, 施行觉, 郑鸿明, 等. 复杂地表条件反射振幅一致性校正 [J]. *地球物理学报*, 2002, 45(6): 862-869.
LI Shengjie, SHI Xingjue, ZHENG Hongming, et al. The consistent correction of seismic amplitude in complicated surface area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(6): 862-869.
- [11] 蔡希玲, 刘学伟, 王彦娟, 等. 地表一致性统计相关分析法及其应用 [J]. *石油物探*, 2006, 45(4): 390-396.
CAI Xiling, LIU Xuewei, WANG Yanjuan, et al. Surface-consistence statistical autocorrelation of seismic data [J]. *Geophysical Prospection for Petroleum*, 2006, 45(4): 390-396.
- [12] MONTANA C A, MARGRAVE G F. Surface-consistent Gabor deconvolution [A]. SEG Technical Program Expanded Abstracts [C]. 2006: 2812-2816.
- [13] VAN VOSSSEN R, CURTIS A, LAAKE A, et al. Surface-consistent deconvolution using reciprocity and waveform inversion [J]. *Geophysics*, 2006, 71(2): 19-30.
- [14] 王君, 周兴元, 恽春华. 地表一致性约束下异常振幅衰减技术的实现 [J]. *石油物探*, 2011, 50(5): 493-498.
WANG Jun, ZHOU Xingyuan, YUN Chunhua. Realization of surface consistent constrained anomaly amplitude attenuation technology [J]. *Geophysical Prospection for Petroleum*, 2011, 50(5): 493-498.
- [15] CARY P, NAGARAJAPPA N. Questioning the basics of surface on-sistent scaling [A]. SEG Technical Program Expanded Abstracts [C]. 2013: 418-422.
- [16] KAZEMI N, BONGAJUM E, SACCHI M D. Non-minimum phase surface consistent sparsity constrained blind deconvolution [A]. SEG Technical Program Expanded Abstracts [C]. 2014: 3200-3204.
- [17] CARY P, NAGARAJAPPA N. Surface-consistent phase corrections by stack-power maximization [A]. SEG Technical Program Expanded Abstracts [C]. 2014: 4320-4324.
- [18] 何登科, 彭苏萍. 共姿态道集地表一致性振幅补偿方法及装置 [P]. 中国专利: ZL201510107456.2, 2016-01-20.
- [19] 何登科, 彭苏萍, 刘琳. 共姿态道集方位角分析和校正方法及装置 [P]. 中国专利: ZL201510031081.6, 2016-03-02.
- [20] HE D K, PENG S P. Correcting the orientation of the horizontal receiver based on the Common Attitude Gather in 3D3C seismic exploration [A]. 78th EAGE Conference and Exhibition Expanded Abstracts [C]. 2016.
- [21] 何登科, 王舒, 孙亮. 多波勘探中基于共姿态道集的水平分量检波器方位角校正方法 [A]. 2016 中国地球科学联合学术年论文集(三十)——专题 54: 煤炭资源与矿山地球物理 [C]. 北京: 中国地球科学联合学术年会, 2016: 2732-2734.
- [22] 何登科, 彭苏萍, 孙亮. 基于共姿态道集的静校正方法及装置 [P]. 中国专利: ZL201610487239.9, 2016-06-28.