

文章编号: 1001-1749(2023)05-0579-06

二维弯线采集中测线优化设计方案与实现

刘军胜

(中石化 石油工程地球物理有限公司, 北京 100000)

摘要: 区别于常规二维地震资料采集方法,弯线采集以自由曲线或折线的形式进行测线设计。弯线采集在炮点和检波点选择方面更为灵活,能够有效解决大型障碍物、困难地形区域施工的问题。然而弯线的 CMP 点在平行和垂直测线方向都是离散的,特别是当目的层埋深较浅时,叠加剖面的真实性受到严重影响,降低 CMP 离散度和离散 CMP 点的处理是提升资料品质和可靠性的关键。因此,这里提出了在优选炮点的基础上,利用检波点反演、CMP 点正演、CMP 点 & 检波点分段拟合、迭代优化相结合的方式对,检波点和 CMP 面元进行优化的方案,并通过软件编程实现测线自动优化和分析最小化目的层 CMP 点的离散度,以保障资料品质。

关键词: 空间假频; CDMO; 检波点反演; CMP 点正演; 多项式分段拟合

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.03

0 引言

在复杂地形区域二维地震资料采集中(如在山地、黄土塬、水网、城镇等区域),为了克服各种障碍物的影响,炮检点变观设计、折线施工、非纵观测、弯线采集等方法得到广泛地应用^[1-2]。相较于其他三种方法,弯线采集是最“友好”的施工方式。国内学者自上世纪 70 年代开始至今^[3],对弯线施工的采集方法、资料处理、解释方法做了大量地研究。陆上石油地震勘探资料采集技术规程中明确了二维地震采用折线或弯线施工时,测线拐角和边长应根据 CMP 离散度确定,一般测线转折方位角采用 8°、16°、30° 的递进方式,转折点为激发点或接收点,严重弯曲的地段应增加覆盖次数。页岩气调查地震资料采集与处理技术规程中指出弯线施工时,物理点的横向偏移距应小于第一菲尼尔带半径。杨庆道等^[4]则对弯线地震勘探技术应用中采集和处理的问题进行了梳理和分析,提出“能直不弯、转折角能小不大、转折角

太大时测线能交不连”的弯线设计原则,并提出以面元聚敛响应作为指标,对炮检路径进行优化;强正阳^[5]总结了弯线设计应满足时间、空间、最大离散距等要求;郭晓滨等^[6]提出“三步法”静校正解决处理方面的问题。国外学者 Mladen R. Nedimovic 等^[7-8]提出了振幅叠加和 Cross-dip 叠加方法,解决弯线处理的问题,并提出了振幅叠加和 CDMO 校正量的计算公式。

就弯线设计而言,常规做法是炮点和检波点沿着相同的路径布设,这样限制了 CMP 点的优化。在 2017 年某项目中,笔者根据甲方要求设计了炮检点沿不同路径的宽弯线(三线一炮)施工方案,炮点为沿着道路均匀布设的震源点,中心检波线则为炮点线的中位线,两侧检波线与中心检波线平行。该设计在有效解决了检波点施工问题的同时,也使 CMP 线得到了优化,取得了较好的效果。笔者将以检波点和炮点沿不同路径布设的思路,以某山地项目测线为例,利用 Mladen R. Nedimovic 等^[7]提出的 CDMO(横向倾角时差校正)算式,针对主要目的

层的有效 CMP 点进行反演、正演运算,找出检波线和 CMP 线的最优解。同时将通过分析不同面元尺寸下,目的层覆盖次数的变化来判断新测线 CMP 的收敛特性。

1 设计参数分析

1.1 研究区地震地质条件

在某山地二维测线的施工中,测线穿越大范围的无人区且地形切割剧烈。工区内的山体走向主要为南北向,绵延数为 60 km,东西向则约 6 km~7 km。研究测线属于南北向联络测线,测线位于山中腹地,长约 18 km,山中无任何道路,仅能依托山间南北向沟谷进行设备和人员运输。测线为位于某平缓背斜的一翼,沿测线方向地层平缓,且倾角近视为零。垂直测线方向存在较小倾角,约 5°左右地层倾角。原设计和施工方案为利用沟谷等地形,在尽量降低转折角的基础上,根据“五避五就”的原则优选激发线,然后以激发线上对物理点进行适当调整,均匀布设检波点。现场叠加处理以后,浅层剖面资料显示相邻的数个 CMP 点波形与附近 CMP 波形一致性较差,有多相位,弱相位等问题(图 1)。

分析原因认为,由于地层存在一定的倾角且 CMP 点位置离散的问题,现场资料处理做了动校正以后,不能完全消除共中心点炮集或道集的时差。如图 2 所示,CMP1、CMP2 经过 NMO 以后仍然存在时差,当 $t_0' - t_0 > T/4$ 时叠加会产生空间假频。在这种情况下,多 CMP 点叠加不但不能提升资料信噪比,反而会削弱信号。此时需要进行 CDMO 处理,计算离散 CMP 点的静校正量,消除空间假频的影响。针对该区单一样式的构造形态,CDMO 校正量能够准确地计算。然而,随着构造条件的复杂化,每个 CMP 点的静校正量的准确计算难度逐渐增大,笔者认为选择合理的弯线设计参数,从设计源头尽量减少空间假频的出现,同时辅以 CDMO 校正是解决问题的关键。

1.2 关键设计参数的选取

假设传播介质为均匀介质,速度为 V ,针对平面反射界面,炮检点的双程旅行时 t 与共中心点 CMP 处的 t_0 之间的关系可以表示为式(1)。

$$t^2(x, y, h) = (t_0(x) + p_y y)^2 + p^2 h^2 \quad (1)$$

式中: x 为沿 CMP 线的偏移量; y 为垂直 CMP 线方向的偏移量; h 为炮检距; p_y 为垂直 CMP 线方向的慢度; $p_x y$ 为垂直 CMP 线方向产生的时差,也就是 CDMO 量; p 为平行测线方向的慢度。

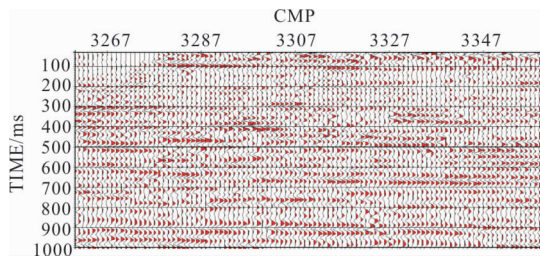


图 1 测线浅层初叠剖面(部分)

Fig. 1 Line brute stack section of shallow layer (partial)

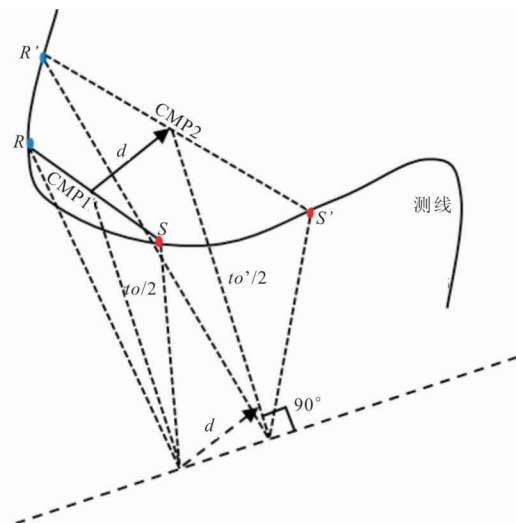


图 2 CMP 点时差示意图

Fig. 2 Time difference diagram of different CMP

Mladen R. Nedimovic^[5] 给出了详细的 p_y 和 p 的计算公式,并进行了简化,见式(2)、式(3)。

$$p_y = \frac{-2 \sin \theta_y \cos \theta_x}{V(1 - \sin^2 \theta_x \sin^2 \theta_y)^{1/2}} \quad (2)$$

$$p = \left[\frac{1}{V^2} - \frac{\sin^2 \theta_x}{V^2} \right]^{1/2} = \frac{\cos \theta_x}{V} \quad (3)$$

式中: θ_x 为平行 CMP 线方向的地层视倾角; θ_y 为垂直 CMP 线方向的地层视倾角。

常规动校正和倾角时差校正能够消除由炮检距产生的影响,即 $p^2 h^2$,但无法消除 $p_y y$ 。 y 是弯线设计的关键点。 $|p_y y| < T/4$ 时能够避免空间假频的影响,而对应 y 应满足如下要求:

$$y < \frac{V * T(1 - \sin^2 \theta_x \sin^2 \theta_y)^{1/2}}{8 \sin \theta_y \cos \theta_x} \quad (4)$$

为了有效消除空间假频影响,要求同一面元内的任意两个 CMP 点的离散距离均要小于 y 。即对于大小为 $d_x * d_y$ 的面元, d_x 为道距的 1/2,而 d_y 应小于 y 。利用研究测线的地层参数计算 y 量,结果见表 1。

表 1 研究测线的地层参数及 y 量Tab. 1 Layer parameters and y value of analyzed line

主要目的层	目的层埋深/m	平均速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{Max } \theta_x / ^\circ$	$\text{Max } \theta_y / ^\circ$	目的层主频/Hz	消除空间假频影响的 y/m
T1	600	2 800	0	5	25	160.4
T2	1 200	3 500	0	6	25	174.1
T3	2 000	3 800	0	6	24	189.0

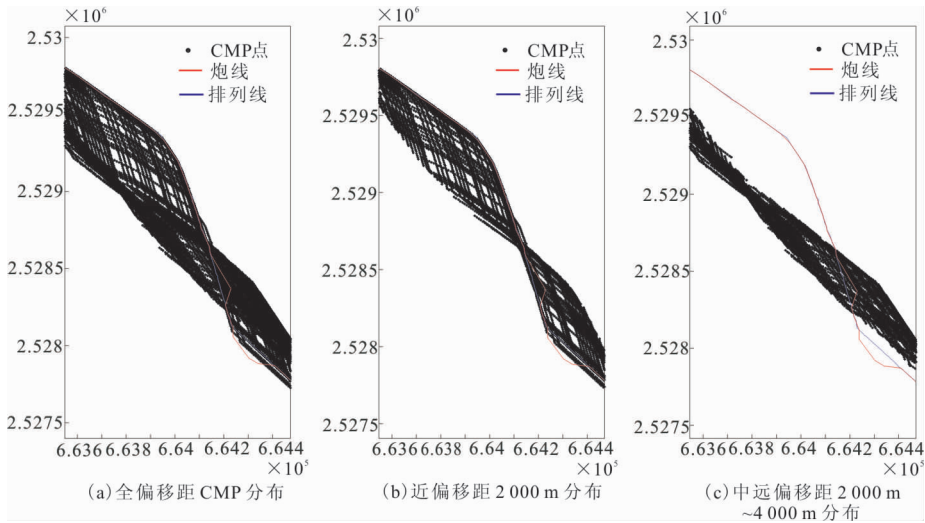


图 3 不同偏移距 CMP 点分布图(局部)

Fig. 3 CMP distribution maps of different offset (partial)

1) 偏移距。项目设计的最大偏移距为 4 000 m, 而实际满足该测线主要目的层的最大偏移距达到 2 000 m 即可。偏移距在 2 000 m~4 000 m 之间炮检点产生的 CMP 点可视为冗余 CMP 点。图 3 为不同偏移距下 CMP 点分布图, 可以看出原设计测线存在大量的冗余点。在测线优化时应暂不考虑 2 000 m~4 000 m 范围内的冗余点, 否则将会影响 CMP 拟合线的选择, 最终影响整体测线优化效果。

2) 面元尺寸。针对不同目的层, 选择合适的面元, 剔除面元外 CMP 点, 进而分析不同面元尺寸下的有效覆盖次数, 可以作为测线优化程度的判定标准。在资料处理时, 也可以根据面元尺寸进行不同偏移距和面元尺寸的分批叠加处理。若面元外的 CMP 点仍较多, 则需考虑进行 CDMO 校正。根据表 1 计算结果, 150 m 为保障研究测线目的层资料的最优离散距。本次分析则选择面元尺寸 12.5 m

* 150 m 和 12.5 m * 300 m 进行对比, 研究优化效果和改进方向。

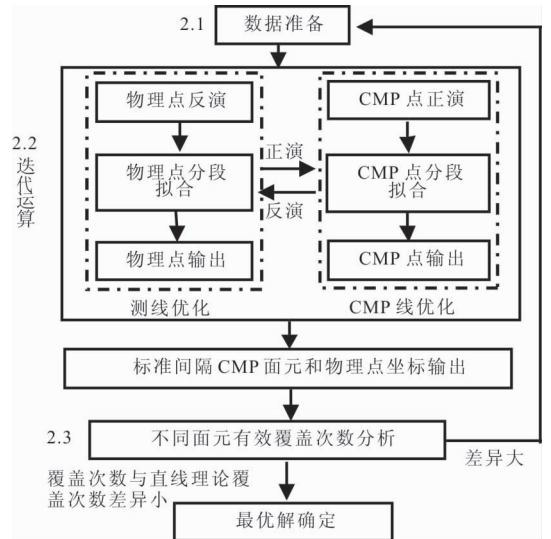


图 4 技术路线和流程

Fig. 4 Technical route and flow chart

2 测线优化流程及应用效果

在炮点线和检波点线一致的情况下,我们可以通过正演模拟分析,利用最小二乘法拟合出最优的 CMP 线,从而实现面元内 CMP 点的最大程度收敛。而当炮点线和检波点线可以分离时,测线优化空间显著增加。对于固定的检波点或者炮点,选取初始 CMP 线,通过如图 4 所示的流程即可实现对物理点和 CMP 线的优化。以研究测线为例分析部分关键流程和应用效果。

2.1 数据准备

数据准备阶段主要需要输入物理点、初始 CMP 线、偏移距、面元尺寸、检波点范围、炮点范围、施工模式(滚进或滚出)、分段拟合方式和断点等参数。研究测线的炮点是实际钻井点位,作为固定物理点,初始 CMP 线为根据原始检波点由设计软件 OMNI 3D 弯线设计模块计算的 CMP 线。项目施工模式为滚进滚出的模式。分段拟合方式和断点则是通过对初始 CMP 点进行回归和拟合分析得出的最优拟合方式,本测线为三次、四次多项式分两段分别拟合。

2.2 迭代运算

数据准备完毕以后,利用程序将对物理点和 CMP 点进行不断的正演、反演迭代优化,随着拟合次数的增加,测线的拟合优度、回归平方和逐渐减小,断点处的 CMP 线分段拟合误差也逐渐减小(图 5)。当拟合优度和回归平方和变化较小时,可认为拟合得到近视最优解。随着迭代的继续增加,反而会出现测线端点处拟合度降低的问题(图 6),这种现象在非滚进滚出的情况下更为突出。经过不断测试分析,选择三次迭代进行正反演模拟运算。

2.3 不同面元有效覆盖次数分析

利用程序计算不同面元位置和尺寸条件下,覆盖次数的变化情况,验证目的层覆盖次数的均匀性和有效覆盖次数的变化。图 7 为偏移距为 2 000 m 条件下的计算和对比结果。从图 7 可以看出,经过

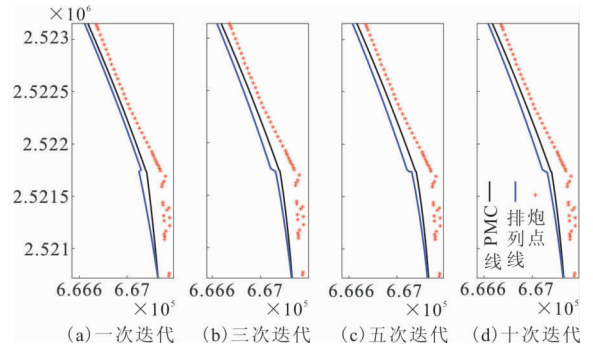


图 5 断点附近拟合结果对比

Fig. 5 Comparison of fitted results near breakpoint

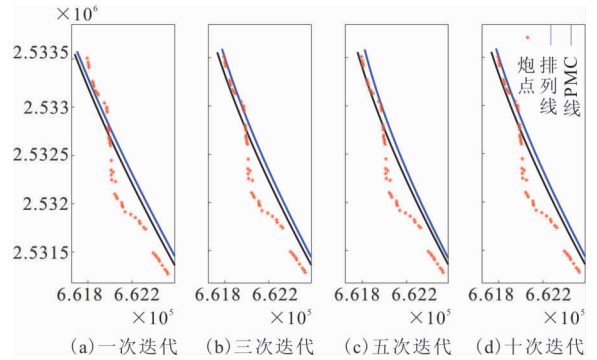


图 6 端点附近拟合结果对比

Fig. 6 Comparison of fitted results near endpoint

优化后的测线覆盖次数均匀性、150 m 范围内离散度等方面得到显著提升, CMP151—650 段和 CMP1146—1350 段效果最为明显。然而, CMP 654—837 和 CMP932—1148 段改善不明显,即使重新选择初始 CMP 线进行二次优化后仍然得到相似的结果。分析主要原因为该区域炮点成连续“S”型大范围偏移, CMP 点难以有效收敛(图 8)。CMP 和检波点优化不能有效解决这一区域的问题,可通过加强 CDMO 攻关处理、调整炮点位置或者加密炮点等三种方式实现离散 CMP 点的叠加,提升目的层有效覆盖次数,进而保障资料品质。

3 结论

笔者提出了一种以提升 CMP 收敛度为目标的二维弯线采集测线优化设计方案,能够改善弯线采集资料品质。通过研究分析,认为弯线采集中应注意以下问题:

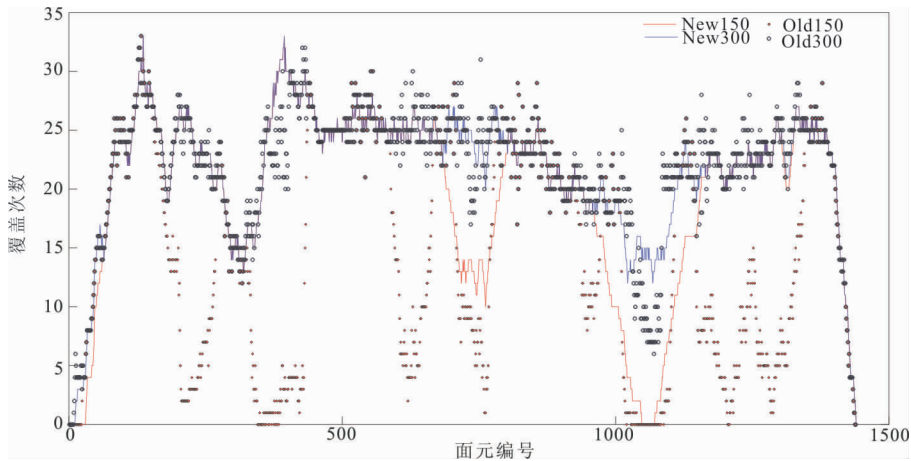


图7 不同面元尺寸测线优化前后有效覆盖次数对比(偏移距 2 000 m)

Fig.7 Effective folds comparison between different bin sizes before and after line optimization

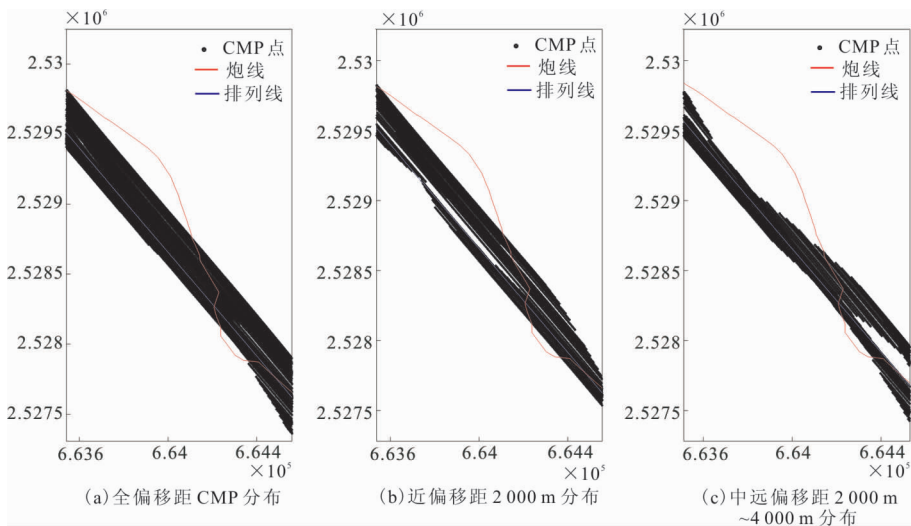


图8 CMP651—1145 不同偏移距物理点和 CMP 点分布

Fig.8 Shots, receivers, CMP distribution comparison of different offset of CMP651—1145

1)合理的测线设计是弯线二维施工的关键环节。设计中应针对测线的主要目的层参数进行设计论证分析,灵活优化物理点,在提升 CMP 点收敛度的基础上,提升目的层有效覆盖次数。

2)弯线设计中应尽量避免连续的“S”型弯折。大偏移量的“S”型弯折,一方面会造成浅层覆盖次数的缺少或严重降低;另一方面影响 CMP 点收敛度,造成 CDMO 量的急剧增大,降低资料的可信度。

3)检波点、炮点、CMP 点之间的迭代正演、反演计算,辅以拟合分析能够实现测线的不断优化。而编程软件中的拟合回归分析、方程求根、循环计算等

算法也促进了测线自动优化地实现。

4)在复杂构造带或陡倾角地层区域应尽量避免弯线设计或仅采用小弯折施工。若采用弯线采集,资料处理阶段需不断开展 CDMO 校正攻关,提升叠加资料的可靠性。

参考文献:

- [1] 杨安,魏书宏.煤田弯线地震勘探技术及应用[J].煤田地震与勘探,2002,30(4):55—57.
YANG S A, WEI S H. Coal field crook seismic prospecting technology and application[J]. Coal Geology & Exploration,2002,30(4):55—57. (In Chinese)

- [2] 郭良红,田小平.黄土塬区煤田弯线地震勘探采集技术的应用[J].中国煤田地质,2006,18(6):43-45.
GUO L H, TIAN X P. Application of coalfield slalom seismic prospecting data acquisition technique in loess tableland[J]. Coal Geology of China, 2006,18(6):43-45. (In Chinese)
- [3] 包吉山.弯曲测线多次覆盖[J].石油物探,1977(04):16-28.
BAO J S, Multiple coverage of crooked line[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1977(04):16-28. (In Chinese)
- [4] 杨庆道,王伟锋,尹以东,等.弯线地震勘探技术应用中的若干问题[J].石油地球物理勘探,2011,46(3):365-369.
YANG Q D, WANG W F, YIN Y D, et al. Some issues in applications of seismic crooked line[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(3):364-369. (In Chinese)
- [5] 强正阳,卢育霞,陈永明,等.浅层弯线地震勘探采集与处理技术[J].地震工程学报,2013,35(1):139-144.
QIANG Z Y, LU Y X, CHEN Y M, et al. Shallow seismic prospecting data acquisition and processing technology of crooked-line measurement[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1):139-144. (In Chinese)
- [6] 郭晓滨,李刚,冯永强.“三步法”静校正正在鄂北麻黄山地区地震资料采集处理中的应用[J].海洋地质动态,2006,22(4):34-36.
GUO X B, LI G, FENG Y Q. Application of "three-step method" static correction to seismic data processing in Mahuangshan of Northern Hubei province[J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(4):34-36. (In Chinese)
- [7] MLADEN, R. NEDIMOVIĆ, GORDON F. West Crooked-line 2D seismic reflection imaging in crystalline terrains: Part 1, data processing[J]. GEOPHYSICS, 2003, 68(1), 274-285.
- [8] BECKEL, RUTH A, JUHLIN C. The cross-dip correction as a tool to improve imaging of crooked-line seismic data: a case study from the post-glacial Burtr? sk fault, Sweden[J]. Solid Earth Discussions, 2018(10):581-598, DOI:10.5194/se-2018-120.

Line optimization design scheme and implementation in crooked-line survey

LIU Junsheng

(Sinopec Geophysical Corporation, Beijing, China 100000, China)

Abstract: Unlike conventional 2D seismic data acquisition, the crooked-line survey designs the line as a free curve or brake line. The crooked-line survey is more flexible in choosing shot and receiver points and can effectively solve the operation difficulties of enormous obstacles and complex terrain areas. However, the CMP points of the curved line are discrete in both the parallel and vertical directions, especially when the target layer is shallow; the authenticity of the stack section is seriously affected. The key to improving data quality and reliability is reducing CMP dispersion and discrete CMP points' data processing. In this paper, an optimizing scheme was raised. Based on the preferred shot points design, the receiver points and CMP bin could be optimized through receives inversion, CMP point forwarding, Polynomial Piecewise fit, and Iteration. The automatic optimization and analysis of the survey line was realized through software programming. The programs helped minimize the target layer's dispersion and ensure the data quality.

Keywords: spatial aliasing; CDMO correction; receivers inversion; CMP forwarding; polynomial piecewise fit