

浅层弯线地震勘探采集与处理技术^①

强正阳^{1,2}, 卢育霞^{1,2,3}, 陈永明^{1,2,3}, 马海⁴

(1. 甘肃省地震局 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心,
甘肃 兰州 730000; 4. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要:在浅层地震勘探中,测线常常由于场地的限制而不能沿直线布设。而弯线地震勘探施工过程中炮检中点比较分散,影响共面元道集的叠加和最终剖面的真实性。加之浅层地震资料又有其自身的特殊性,所以选择合理有效的浅层弯线采集与处理技术非常必要。本文以甘肃陇南山区新文县一中测线为例,结合弯线共中心点面元叠加的时间、空间条件,在采集和处理两个环节分析控制炮检中点分散范围的具体方法,获得了真实且高品质的地震剖面。剖面有效波的能量较好,同轴连续清晰,各种干扰波得到了压制,说明浅层弯线地震勘探的方法在理论上和技术上都是可行的。

关键词:浅层地震勘探;弯线技术;共反射面元;炮检点分布;离散距

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)01-0139-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0139

Shallow Seismic Prospecting Data Acquisition and Processing Technology of Crooked-line Measurement

QIANG Zheng-yang^{1,2}, LU Yu-xia^{1,2,3}, CHEN Yong-ming^{1,2,3}, MA Hai⁴

(1. Earthquake Administration of Gansu Province (Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA), Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;
3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China;
4. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: In the collection of shallow seismic prospecting data, limitations of local geological conditions prevent measurements along a straight line. To obtain high-quality seismic data, crooked-line seismic exploration can avoid obstacles and adapt to local geological conditions for shot-point and receiver. However, due to the dispersion of offset, which influences the superposition of common reflection bin gathers and the authenticity of seismic profiles, and the shallow seismic data, acquisition and processing technology are ineffective in the crooked-line method. Therefore, it is necessary to control the quality in crooked-line seismic data acquisition and processing.

During crooked-line data collection, the discrete common midpoint should be controlled within the allowable range to meet the condition of common reflection bin stacking in time and space. At some areas of large curvature, the common midpoints exceeding the range of discrete conditions should be eliminated, and the selective superposition should maintain the concurrency of

① 收稿日期:2012-09-06; 中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2013010

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2012IESLZ02);中国地震局兰州地震研究所地震科技发展基金(2012M05)

作者简介:强正阳(1988-)男(汉族),甘肃白银人,硕士研究生,现主要从事浅层地震勘探资料采集与处理研究工作。Email: greatwy2008@yahoo.com.cn

each stack gathers in common bins.

In the processing of shallow seismic prospecting data, the number of receivers is fewer, and the fold of data is lower than the petroleum seismic data. Therefore, time and space stack conditions of common reflection bins should be fully considered prior to the processing of shallow seismic prospecting data. Compared with regular straight-line seismic prospecting data processing, crooked-line seismic data processing is essentially the same in processing methods, processes, and parameter selection. The most fundamental difference is superposition. Crooked-line seismic data processing includes a common reflection bin stack in which several neighboring reflection points add up as a common reflection bin, while the straight-line is a common reflection point (CRP) stack. For this reason, the crooked-line's common reflection bins gathers are not strictly common reflection point gathers. Larger common reflection bins include more CRP participation in the stack, and the signal-to-noise ratio is high. Due to the average effect, however, a greater number of CRPs involved in the bin superposition results in lower resolution. Therefore, according to the geometric definition of the crooked-line method, crucial steps include selection of the common bin centerline and the common reflection bin grid during data processing in addition to and balancing the relationship between resolution and signal-to-noise ratio.

By using a line measured in the Longnan mountainous area of Gansu province as an example, combined with the superposition of crooked-line common reflection bins in time and space conditions, this paper mainly analyzes the methods of control offset point dispersion range in acquisition and processing. A true and high-quality seismic section was obtained with processing by PROMAX software that showed improvement in effective wave energy, continued clarity in the events of targeted layers, suppression in all types of interference waves. These results prove that the shallow crooked-line seismic prospecting method is feasible and effective in theory and actual usage.

Key words: Shallow seismic exploration; Crook technology; Common reflection bins; Shot point and receiver point distribution; Discrete distance

0 引言

由于受到区域地形、建筑物等对测线展布的限制,浅层地震勘探很多测线不能沿直线布设,所以不得不进行弯线测量。弯线地震勘探是以成熟的直线地震勘探为基础的。国内学者包吉山早在 20 世纪 70 年代就详细讨论了弯线地震勘探的原理和方法^[1],但是限于当时计算机和处理软件还比较落后,弯线测量具体实施和处理起来还是很繁琐,没有真正推广应用。之后陆续有学者对弯线地震勘探做出研究^[2-5],但都是针对煤田石油等中深部地震勘探,而没有涉及到浅层勘探。对于浅层弯线地震勘探而言,一方面由于弯线地震勘探方法较适合于地层倾角小、上覆地层速度较高的地区,而最大分散距往往取决于转折角的大小和最大炮检距。所以炮检距越大,界面倾角越大,埋深越浅,倾斜界面允许的离散距就越大^[5],从而对测线弯曲有较严格的限制。另一方面,由于浅层地震勘探接收道数少,资料覆盖次

数不高,所以浅层弯线勘探的采集和处理要在充分考虑满足共中心点面元叠加的时间、空间条件下,合理选择共反射点面元,平衡分辨率和信噪比的关系,在保证剖面成果真实性前提下,充分发挥弯线勘探在改善复杂地区地震资料质量及地震数据采集施工便利方面的优势。本文以甘肃陇南新一中开展的浅层地震勘探工作为例,探讨弯线勘测的条件及系统设计,以及资料处理技术和质量控制。

1 弯线勘探可行性条件

在弯线测量中,各个激发点和接收点的连线在空间分布上呈“扇面”状展开,弯线多次覆盖技术不符合严格共反射点叠加的定义,从而引入共反射点面元叠加的概念。所谓共反射点面元叠加就是指在理论共反射点可容许的偏离范围内,各相邻反射点记录的叠加,并且这个叠加可以像来自同一反射点那样得到加强。因此弯线地震勘探是三维地震勘探

的一种特殊形式。在弯线数据处理中首先要拾取面元中心线,以固定的面元尺寸进行面元网格化,并使共反射点面元内各道满足叠加的空间、时间条件。

(1) 时间条件

首先,弯线资料在采集时应该满足时间^[6]条件。从共反射点面元的可叠加性考虑,反射点之间的最大时差应满足

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{T}{4} \quad (1)$$

其中 T 为地震波的视周期。

(2) 空间条件

设 B_x 和 B_y 分别是共反射面元网格的长度和宽度,则 B_x 一般选取接收点沿测线最大间距 D 的一半。由于浅层资料覆盖次数不高,弯线处理时网格宽度 B_y 要兼顾共反射点覆盖次数和信号的分辨率,并对比最终的叠加剖面反复修改,结合地层倾角,最终确定一个合理的取值。

(3) 最大离散距

弯曲测线的明显特点就是炮点与检波点连线,随地势弯曲的曲率与地层倾向间的夹角变化而发生变化,也就决定了炮检中点的离散程度^[2]。一般根据探区目的层埋深、倾角等地球物理参数进行参数论证,确定基本采集参数。为了便于理论估算,假设最大离散距与共反射面元的小矩形对角线长相等且与界面倾向重合。

设地层界面最大倾角为 Φ , D_{xy} 为炮检中点的离散距, v 是目的层以上的介质速度。则倾斜界面共反射点面元内可能产生的道间最大时差为

$$\Delta t_{\max} = \frac{2D_{xy}}{v} \sin \Phi = \frac{2 \sqrt{D_x^2 + D_y^2}}{v} \sin \Phi \quad (2)$$

由(1)、(2)两式可得

$$D_{xy} \leq \frac{vT}{8 \sin \Phi} \quad (3)$$

式(3)说明弯线多次叠面对面元边长的要求。倾斜界面使地下炮检中点向上倾方向发生离散,面元道间存在时差。面元内炮检距越大,界面倾角越大,引起的炮检中点离散距越大,直接影响了叠加成果的可信度。目的层倾角越大,对满足共反射点面元时间条件的最大炮检距限制越严格。目的层深度越浅,相同地层倾角产生的离散距越大。

2 弯线观测系统设计

近年来,我们在甘肃陇南各市县做了大量浅层地震勘探工作,由于该地区山大沟深,受地形条件限制,勘探测线常常不能沿直线布设,因此弯曲测线非常普遍。下面我们以陇南市新建文县一中附近的地震测线为例来具体说明浅层弯线地震勘探观测系统的设计过程。

(1) 弯曲测线施工前,要对其预计经过的地方进行认真细致的踏勘,充分了解地层岩性、地表激发条件和地形情况。根据调查,拟布设新文县一中测线场地地表为水泥路面,地势平坦,海拔高度约 970 m,其下覆基岩地层基本水平,岩性以千枚岩和板岩为主。

(2) 结合高精度卫星图片,合理部署炮检路径,精确计算接收点和激发点的坐标,避免炮检路径大



图1 新文县一中测线展布示意图

Fig. 1 Distribution of the measuring line in new Wenxian No. 1 School.

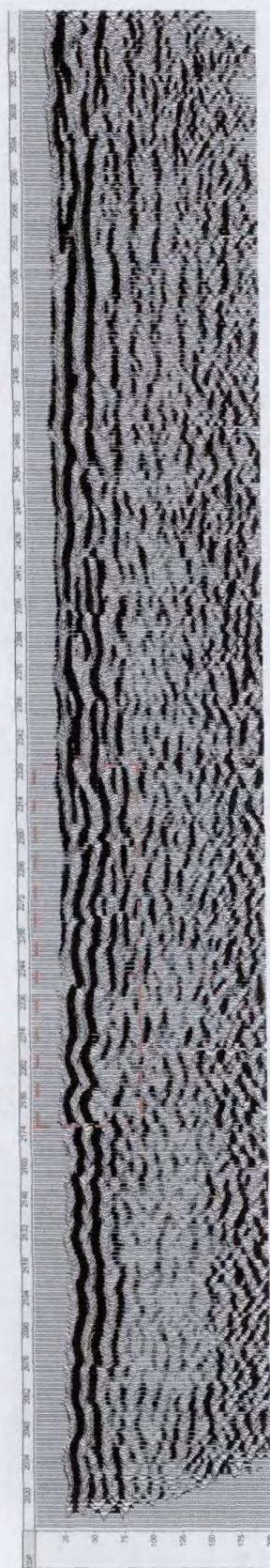


图2 新文县一中测线直线处理结果
Fig.2 The linear-line seismic profile in new Wenxian No.1 School.

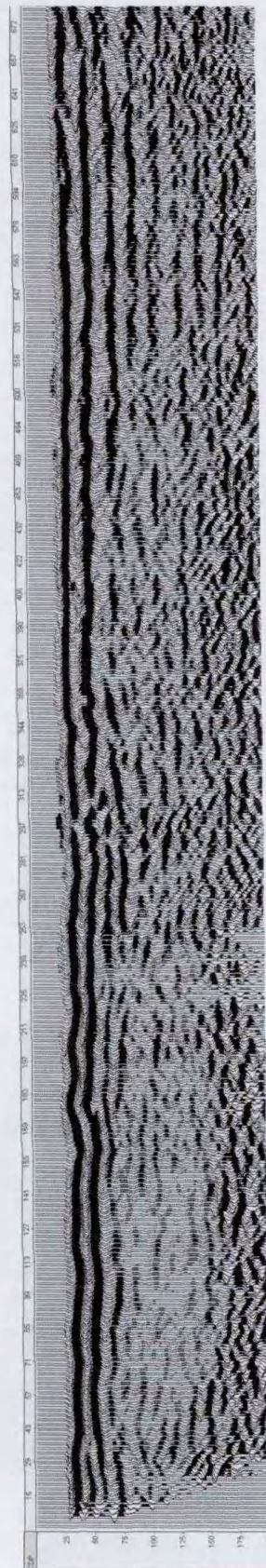


图5 新文县一中测线弯线处理结果
Fig.5 The crooked-line seismic profile in new Wenxian No.1 School.

弧度、大距离地向同一个方向弯曲。本测线起始走向 138° , 在距起点 216~240 m 处向 SE 方向偏 29° , 其弧度缓慢变化, 最后呈 167° 走向直线延展, 测线总长 680 m。我们将弯曲测线布设为折线, 炮点、检波点置于线上使折线段内的检波点等距, 并实测出各折线段两端点的坐标。

(3) 在弯线地震勘探设计中, 认真分析和研究折线转角大小、面元大小和叠加次数等对弯曲测线地震勘探成果信噪比分辨率的影响, 经过反复试验确定这些主要参数。

根据新文县一中测区情况, 按地层倾角 $\Phi = 10^\circ$, 平均速度 $v = 1700$ m/s, 有效波最小视周期 $T = 0.01$ s, 由式(1)、(3)计算得 $\Delta t_{\max} = 0.025$ s, $S_{\max} = 10.8$ m。施工时我们选取网格最大边长为 2 m, 可满足时空条件和离散距条件。结合区域地质资料推测目标层深度约为 30~50 m, 为了保证浅层反射波具有较高的覆盖次数, 又可以量避开震源面波、声波的影响。经过反复试验对比, 选择了 2 m 道间距, 8 m 偏移距, 单边激发观测系统, 最大覆盖次数为 12 次, 垂向叠加 6 次。本次探测采用人工锤击震源激发, 使用的是 48 道浅层地震勘探仪。

3 弯线资料处理的关键步骤与质量控制

首先将采集资料按照常规直线方法进行了处理, 得到了叠加时间剖面(图 2)。明显可以看出直线处理的剖面中含有几个折线段, 其有效波的能量及连续性在转折处均有明显的变化, 造成了地层挠曲、断裂的假象。在这种情况下必须对资料进行弯线处理。

弯线地震数据处理和常规直测线地震数据处理相比, 处理方法、流程和参数选择等基本相同, 最根本的区别在于叠加。前者是共反射面元叠加而后者是共反射点叠加。弯线共面元道集不是严格的共反射点道集, 它是把若干个邻近反射点叠加起来作为一个共反射面元的。在折线转角一定的情况下, 反射面元大, 参与这个面元叠加的地震道就多, 信噪比就高; 而反射面元小, 参与这个面元叠加的地震道就少, 信噪比就低。由于面元叠加的平均效应, 参与这个面元叠加的地震道增多, 分辨率就会降低。所以, 根据弯线的几何关系的定义, 在处理过程中最重要的是面元中心线的选择和共反射面元网格的选取(图 3), 控制好分辨率与信噪比的关系。

3.1 面元中心线的选取

面元中心线的选取一般是在炮检中点分布图上

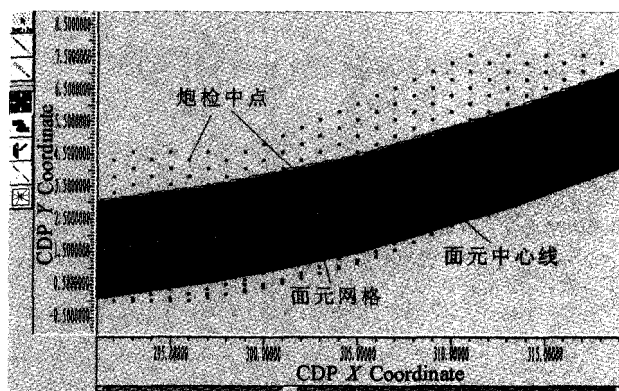


图 3 炮检中点分布及面元中心线示意图

Fig. 3 The schematic diagram of offset midpoint distribution and bin centerline.

选取一条分散度最小的线, 使其转折弧度缓慢变化, 以避免相邻面元间炮检中点和覆盖次数的剧变。由于浅层地震勘探覆盖次数较低, 当遇到测线弯曲变化很大时, 反射点的分布就会非常离散。在这种情况下, 中心线的选择不一定严格按照分散度最小, 而是要使中心线尽量穿过反射点密集带, 既要保证反射点面元道集中有足够的道数, 同时又要保证道集内炮检距分布均匀、合理, 以保证叠加剖面的高频成分。

3.2 面元网格的定义

共反射面元是以面元中心线为中心展布的若干个小矩形, 其长度 B_x 除了选取接收点沿测线最大间距的一半外, 还要求做到面元长度和炮检中点的间隔相同, 且互相独立、互不跨越^[7]。在反射点比较分散的情况下, 要合理选择面元网格的长度, 保证资料叠加效果。在构造简单, 地层平缓的地区, 面元宽度 B_y 可以适当增加。但在分辨率要求较高的地区, 面元宽度应该尽可能缩小。图 4 是新文县一中弯线处理的共反射道集叠加覆盖次数图, 由于在测

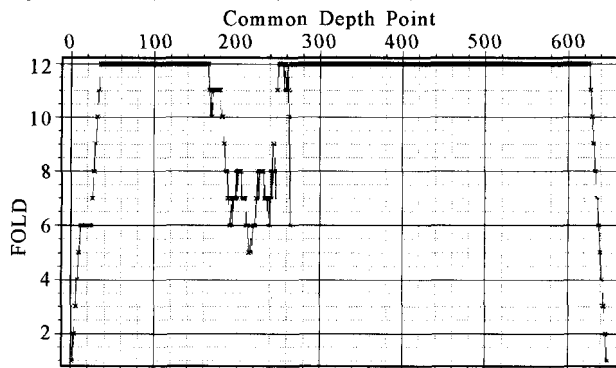


图 4 共反射点道集覆盖次数

Fig. 4 Fold number of common reflection gather.

线弯曲部分进行了共反射面元网格化,使得 160~240 m 之间的炮检中点道集覆盖次数有一个明显下降。

总之,在浅层弯线资料的处理中,要仔细分析面元大小、叠加次数等因素对弯线叠加剖面的信噪比和分辨率的影响,反复比较并确定这些主要参数。

最终,我们在新文县一中细致踏勘的基础上进行了弯线路径的设计,并严格按照共中心点面元叠加的时间和空间条件,控制了炮检中点分散度。将所获得的资料按照弯线处理方法,得到了新文县一中浅层弯线地震勘探真实且高品质的叠加时间剖面(图 5)。其有效波的能量较好,同向轴连续清晰,各种干扰波得到了很好的压制,总体结果符合前期地质调查的判断^[8-9]。可见在浅层勘探中利用弯线地震勘探技术可以获得较好的地震资料,提高了地震勘探应用效果。

值得我们注意的一点是,对于任何资料,如果在弯线资料采集和处理工作中存在失误或瑕疵,都可能导致共反射点面元道集内各道失去可叠加性,使得正常剖面段上的单相位强反射波在大转折角弯线段上变为双相位或多相位,发生相位反转和分岔的现象^[5]。特别是在浅层地震勘探中,会引起频率变低、振幅变弱和连续性变差等现象,从而很容易造成断层、裂缝等错误解释。因此,弯线地震解释中尤其要对转折角弯线剖面段的反射波组特征变化原因进行认真分析,在处理环节采用不同的面元中心线和网格宽度进行处理。当选用的面元网格宽度导致测线弯曲部位剖面失真时,应减少面元的垂向边长,避免由于共反射点面元内各道不同相而产生的假象。

4 结论

(1)弯线地震勘探的方法在理论上和技术上都是可行的,它大大地扩充了传统共反射点叠加概念所容许的偏离范围,实际效果也是非常有意义的。

(2)浅层地震勘探精度要求高且目的层埋深浅,弯线实地测量时,应该使测线尽可能为直线,并且尽量减小转折角。在施工前踏勘的基础上进行面元聚敛分析,对炮检路径进行优化设计。

(3)弯线地震勘探方法有其严格的前提条件,需从弯线地震数据采集和处理两个环节进行控制。处理时要合理选取共反射线,把离散的炮检中点控制在共反射点面元叠加的时间和空间条件允许范围内。针对弯线曲率较大的个别地段,要剔除超过离散条件范围的炮检中点,采用选择性叠加,保证面元

内各叠加道的同相性。

(4)弯线地震资料解释中应特别注意分析弯线路径转折的剖面段上的波组特征变化原因,避开由于共反射点面元内各炮检中点超限分散而引起的层位断裂等假象。

【参考文献】

- [1] 包吉山. 弯曲测线多次覆盖[J]. 石油物探, 1977, (4): 16-28.
BAO Ji-shan. Multiple Coverage of Crooked Line[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1977, (04): 16-28
- [2] 杨双安, 魏书宏. 煤田弯线地震勘探技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(4): 55-57.
YANG Shuang-an, WEI Shu-hong. Coal field Crook Seismic Prospecting Technology and Application[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(4): 55-57
- [3] 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 Liang-hong, TIAN Xiao-ping. Application of Coalfield Slalom Seismic Prospecting Data Acquisition Technique in Loess Tableland[J]. Coal Geology of China, 2006, 8(6): 43-45.
- [4] 王永奎, 殷全增, 李攀峰. 地震弯线技术在地形复杂地区煤田勘探中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(5): 59-62.
WANG Yong-kui, YIN Quan-zeng, LI Pan-feng. Application of Seismic Slalom Line Technology in Complicated Area Coalfield Prospecting[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(5): 59-62.
- [5] 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 Qing-dao, WANG Wei-feng, YIN Yi-dong, et al. Some Issues in Applications of Seismic Crooked Line[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(3): 365-369.
- [6] 董敏煌. 地震勘探[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 121-122.
DONG Min-huang. Seismic Exploration[M]. Dongying: Petroleum University Publishing House, 2000: 121-122.
- [7] 阎世信, 吕其鹏. 黄土塬地震勘探技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 93-95.
YAN Shi-xin, LV Qi-peng. Seismic Exploration in Loess Plateau Area[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 93-95.
- [8] 卢育霞, 刘琨, 姚凯, 等. 甘肃文县上城台地的地震记录分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增): 393-397.
LU Yu-xia, LIU Kun, YAO Kai, et al. Analysis on Seismic Records Observed on Shangcheng Platform in Wenxian, Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33 (Suppl.): 393-397.
- [9] 陈永明, 滕光亮. 汶川地震中甘肃滑塌灾害特征及减轻对策刍议[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增): 451-455.
CHEN Yong-ming, TENG Guang-liang. A Preliminary Discussion on the Characteristics of Landslide-collapse Disaster Induced by Wenchuan Earthquake in Gansu and Countermeasures for Disaster Mitigation[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Suppl.): 451-455.