

相对保持振幅、频率、相位属性的采集脚印压制技术的采集脚印压制技术

张红军*^{①②} 王君^③ 丁长辉^② 高江涛^③ 王兴宇^③

(^①中国海洋大学,山东青岛 266100; ^②东方地球物理公司研究院海外业务部,河北涿州 072751; ^③东方地球物理公司研究院资料处理中心,河北涿州 072751)

张红军,王君,丁长辉,高江涛,王兴宇. 相对保持振幅、频率、相位属性的采集脚印压制技术. 石油地球物理勘探,2012,47(增刊1):15~19

摘要 本文通过详细分析实际地震资料中出现的采集脚印特征,在综合分析现有的多种压制采集脚印的处理技术基础上,形成了配套的采集脚印压制处理技术系列:叠前数据规则化+叠后(叠前)时间偏移+三维叠后频率波数域滤波+中值滤波+ $f-x$ 相干滤波。基本上实现了在相对保持振幅、频率、相位属性的前提下对采集脚印的有效压制,使得研究区K2目的层的沿层振幅、频率、相位属性特征凸显出来,为地质解释提供了较好的基础数据。

关键词 采集脚印 地震属性 RMS振幅属性 瞬时频率 瞬时相位

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

有关地震勘探中采集脚印的产生机理及其压制方法的讨论一直受到人们的广泛关注^[1~4]。普遍认为由滚动排列方式以及震源和检波器测线间隔决定的不完全采样会引起地震成像中出现周期性的振幅假象,这些振幅假象通常能在时间和深度切片上看到,称之为采集脚印^[4,5]。采集脚印影响地质目标的高精度、高质量地震成像,也影响 AVO 属性分析和速度分析的精度^[4~6]。

消除采集脚印的方法一般有四种:第一种是优化采集系统参数,使不同炮检距的道数变化最小;第二种是通过叠前处理技术,使叠加道集间的差异最小;第三种是通过叠后处理技术压制采集脚印;第四种是在 DMO 和叠前偏移中,采用加权函数或最小数据条件消除采集脚印;陈习峰等^[7]也论述了地震数据中采集脚印的压制方法。然而,上述研究成果往往局限于振幅属性的变化,至于如何利用资料的频率属性、相位属性的变化识别和压制采集脚印鲜

有研究和论述。因此当前有必要建立配套的相对保持振幅、频率、相位属性采集脚印压制处理技术系列。本文研究了实际地震资料采集脚印的特征,讨论了降低采集脚印影响的配套地震资料处理方法,并利用地震资料的振幅、频率、相位属性的变化识别和压制采集脚印,取得了较好效果。

2 压制采集脚印处理方法综述

2.1 叠前数据规则化技术

该项技术主要分为两类:一类是基于傅里叶变换的叠前道内插方法;另一类是基于数据映射理论的 DMO 和反 DMO 法。

2.1.1 叠前道内插的基本原理

叠前道内插的基本表达式

$$D'(x, y, t) = \frac{\sum_i D[x_i, y_i, t - \Delta t(x - x_i, y - y_i, \theta_i)] \cdot W(\cdot)}{\sum_i W(\cdot)} \quad (1)$$

* 河北省涿州市东方地球物理公司研究院海外业务部,072751。Email:zhanghongjun69@bpg.com.cn

本文于2012年2月21日收到,最终修改稿于同年9月14日收到。

式中: $D'(x, y, t)$ 为插值后的振幅; D 为插值前振幅; θ_i 为倾角; $W(\cdot) = W(|x - x_i|, |y - y_i|, f_{xi}, f_{yi})$ 为加权系数。可以看出, 在时间为 t 、坐标为 (x, y) 处的插值振幅值是相邻地震道振幅值的加权求和; 在内插前通过输入样点的时差追踪倾斜反射同相轴, 也就是说, 在插值的同时考虑了倾角变化, 也考虑了相邻道距离的加权。

基于傅里叶变换的叠前道内插就是基于覆盖次数、地震道内插、规则化、能量均衡为一体的三维叠前数据规则化处理技术, 它能够在一定程度上改善观测系统不规则造成的振幅失真的状况, 对偏移叠加数据的波形、频率和能量进行补偿, 从而在一定程度上弥补原始采集的数据缺陷。

然而, 即使选择最佳距离和权系数内插地震道, 当炮检距分组不够小时, 仍会丢失部分炮检距数据, 而炮检距过小又会带来一定的混波现象, 也就是说加权系数无法保证振幅、频率、相位等属性的空间一致性。

2.1.2 基于数据映射理论的 DMO 和反 DMO 法

利用 DMO 运算的可逆性(即 DMO 的效应可以通过反 DMO 消除), 采用数据映射法思路实现数据的规则化, 理论上可更好地保持地震波的特征。首先将不规则数据先按照设计好的炮检距分组, 采用时空域 Kirchhoff 积分法进行 DMO 处理, DMO 后的数据已经位于三维规则的共中心点上, 具有规则的炮检距, 每一组炮检距 DMO 的结果相当于单次叠加数据体; 然后对每一组炮检距按照给定的方位角在频率—波数域进行反 DMO, 最后合并数据, 实现数据的规则化, 以改善偏移中由于炮检距不均匀造成的画弧现象。但是, 由于 DMO 后的地震数据消除了观测方位角的影响, 其炮检距不再具有方向性, 故反 DMO 后可输出任意给定观测方位角的地震叠前观测数据, 所以这种方法对采集脚印压制效果并不明显。

2.2 Kirchhoff 积分法叠前时间偏移

Kirchhoff 积分法叠前时间偏移是利用建立的 RMS 速度场, 在给定的偏移孔径内将地震道沿着双平方根方程描述的椭圆曲面相加求和^[8], 并将输入的样点振幅乘以权值, 使地下地层重新恢复到真正的反射振幅, 对不同面元之间的炮检距范围进行一定的再分配, 对于空间假频起到一定的压制作用。

对于二维地震资料, 权值由 Hanitzsch^[9] 提出的直射近似方程

$$A = (t_S + t_R) \left(\frac{t_{0,S}}{t_S^2} + \frac{t_{0,R}}{t_R^2} \right) \quad (2)$$

求得。对于三维叠前时间偏移的权值也按上述方法求出^[10]。式中: t_S 和 t_R 分别是炮点和检波点到成像点的旅行时; $t_{0,S}$ 和 $t_{0,R}$ 分别是成像点到炮点、检波点的垂直旅行时(图 1)。

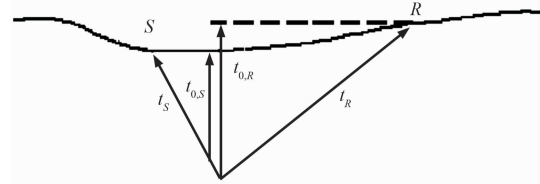


图 1 叠前时间偏移权值示意图

由于速度的误差、各向异性因素的影响、椭圆曲面相加求和时的权值选择与分配等因素都会造成 Kirchhoff 积分法叠前时间偏移相加求和时不能完全同相叠加, 从而造成振幅的不保幅性。但是叠前时间偏移能够量化速度场的精度, 实现地层的准确归位, 并提供用于叠前属性反演的 CRP 道集数据以及消除了倾角影响的均方根速度, 所以叠前时间偏移基本上已经替代了叠后时间偏移。而且在叠前时间偏移中, 可以尽量均衡权值和炮检距的分布关系, 弱化采集脚印的影响。

2.3 叠后三维频率—波数域滤波

图 2 为三维频率—波数域滤波流程图。在地震数据进行三维傅里叶变换后的三维频率—波数域的频率切片中, 采集脚印仍会以某种规则形式显现, 因此可根据其能量特征和分布特征选用合适的陷波器予以剔除。

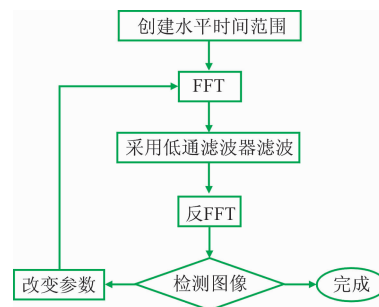


图 2 三维频率—波数域滤波流程

2.4 中值滤波技术

中值滤波是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术, 其基本原理是把数字序列中一点的值用该点的一个邻域中各点值的中值

代替,从而消除孤立的噪声点。假设有一个一维序列 f_1, f_2, f_3, \dots , 对此一维序列进行中值滤波,就是用有一个有奇数点的滑动窗口,设窗口长度(点数)为 m ,从输入序列中相继抽出 m 个数,即 $f_{i-v}, \dots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+v}$ 。其中 $v = \frac{(m-1)}{2}$, $i \in z$, z 表示所有自然数的集合。再将这 m 个数按其数值大小排列,取其序号为中心点的数作为滤波输出。

二维中值滤波器的窗口形状和尺寸对滤波效果影响较大,不同的应用要求,往往采用不同的窗口形状和尺寸。常用的二维中值滤波窗口形状有线形、方形、圆形、十字形以及圆环形等,窗口尺寸一般先用 3 点再取 5 点逐点增多,直到其滤波效果满意为止。

在地震资料处理领域, Mi 等^[11]将标准 Kirchhoff 时间偏移与中值滤波相结合进行噪声衰减。中值滤波适用于消除非平稳信号中的峰值噪声。对于脉冲宽度小于 $m/2$ 的相距较远的窄脉冲干扰,中值滤波的效果较好。对于三维叠后数据的每一个时间切片的时窗范围内,统计数据的中值范围,构成采集脚印的振幅值一般会落在中值范围之外,可以当作异常振幅按照给定的门槛值去除,对于时窗范围内且在中值范围内的数据按照一个加权函数进行处理,从而得到一个平滑的地震数据。

中值滤波器的频谱响应与输入信号的频谱有关,呈现不规则、波动不大的曲线,中值滤波频谱特性起伏不大,可以认为信号经中值滤波后,频谱基本不变。所以中值滤波技术对于瞬时频率、连续性等地震属性非常有效,能够消除尖脉冲、孤立的异常值,从而得到较为光滑的属性资料。实际资料处理中应尽量选择包含目的层的大时窗进行运算,并对时窗进行加权,权值应以时窗中心为参考,尽量减少边界效应。

2.5 f - x 相干滤波技术

f - x 相干滤波是假定在局部数据时窗内,信号的视速度不变。通过傅里叶变换将叠后地震数据从时间-空间域(t - x)变换到频率-空间域(f - x),在每个频率切片上沿水平方向逐道移动,相似性高的是信号,随机性的是噪声。

选择相邻若干叠加道,按不同倾角方向再次进行叠加,生成各倾角方向的模型道;再根据模型道与当前处理的中心道的相干程度求出模型道的相关系数;以该相关系数为该模型道的权,求出相干加强

道;对一个频率样点,当自相关时差为零时相关系数最大,即

$$\text{Scalar}(f) = \frac{S(f)^2}{S(f)^2 + N(f)^2} \quad (3)$$

式中: $S(f)$ 为信号频率; $N(f)$ 为奈奎斯特频率。当计算时窗内的地震数据信噪比较高时,最大相关系数接近于 1,信噪比为 1,系数为 0.5,信噪比较低时相关系数为 0。

对于时窗内的每一个频率,根据数据的自相关程度计算一个唯一的相关系数并应用于地震数据中,所有频率计算完后,通过反傅里叶变换将数据返回到时间-空间域。

通常情况下,地震数据中的最低和最高频率成分的信噪比较低,被分配的相关系数也最低,这些频率成分的振幅值随之降低。也就是说, f - x 域相干滤波主要是降低强噪声频率成分的振幅从而相对提高了有效信号频率成分的振幅,实现对数据振幅谱的整形、增强相干能量、抑制随机能量、提高信噪比,突出了反射信号同相轴的连续性。

3 采集脚印压制配套处理技术及其应用

就采集脚印而言,任何一种地震资料处理方法都有其局限性^[12]。在本研究区,通过仔细试验对比,研究出配套的采集脚印压制处理技术系列,并形成了相对保持振幅、频率、相位属性的采集脚印压制流程和应用规范。

3.1 研究区概况

研究区面积约为 374km²,采用正交观测系统(3175-25-50-25-3175)采集,其具体参数为:16 线 8 炮 128 道接收,方位角为 18°,横纵比达到了 0.96。研究区的储层是白垩系碳酸盐岩地层,并在 2600~3300m 深度段发现了高产的工业油流,目的层的时间范围为 1600~2000ms。

实际数据中的相邻 CMP 面元内炮检距呈不规则分布且范围变化较大;相邻 CMP 面元之间的覆盖次数相差不多,但是炮检距分布相差很大;CMP 面元覆盖次数属性同样显示周期性变化特点。这种观测系统必然造成地下面元之间属性分布不均匀,且在横向和纵向上出现周期性变化。在对这类地震资料进行三维 DMO 或三维叠前偏移时,这种“脚印”被加

强^[13~15],在偏移后数据目的层(K2)的地震属性上明显出现与观测系统设计相同的棋盘状分布(图 3)。

3.2 采集脚印压制处理技术系列

叠前数据插值可以解决野外稀疏采样带来的采

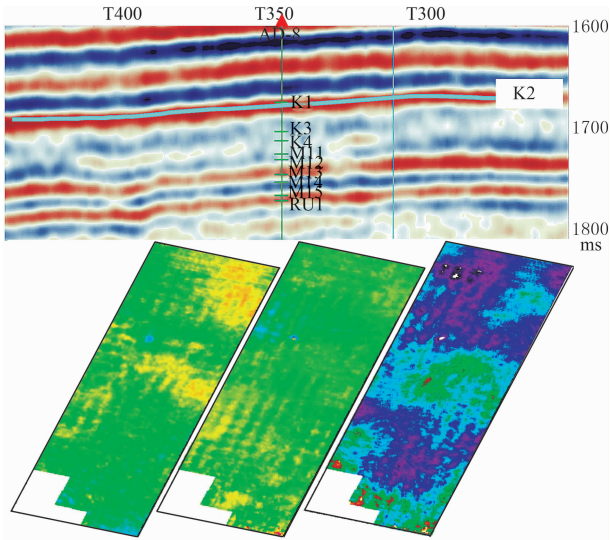


图 3 目的层偏移剖面(上)及其 RMS 振幅(下左)、瞬时频率(下中)、瞬时相位(下右)切片

集脚印问题。为了避免叠前数据插值在炮检距分组不够小时丢失部分炮检距数据,以及因炮检距分组太小时出现的混波现象,在进行叠前插值时,采用 100m 对炮检距分组,取得了一定的效果。

将采集脚印当作叠后数据中存在的噪声进行压制,采用叠后去噪的办法,在不同的域分别压制采集脚印,同时增强有效信号。在偏移数据体上可利用三维频率—波数域滤波适当压制采集脚印,并运用三维中值滤波剔除采集脚印异常值,再采用相干滤波加强有效信号,从而形成了采集脚印压制处理技术系列(图 4)。图 5 为采集脚印压制配套处理前、

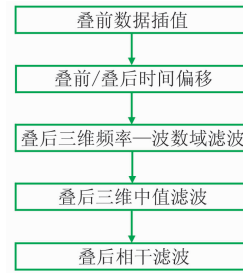


图 4 采集脚印压制配套处理技术流程

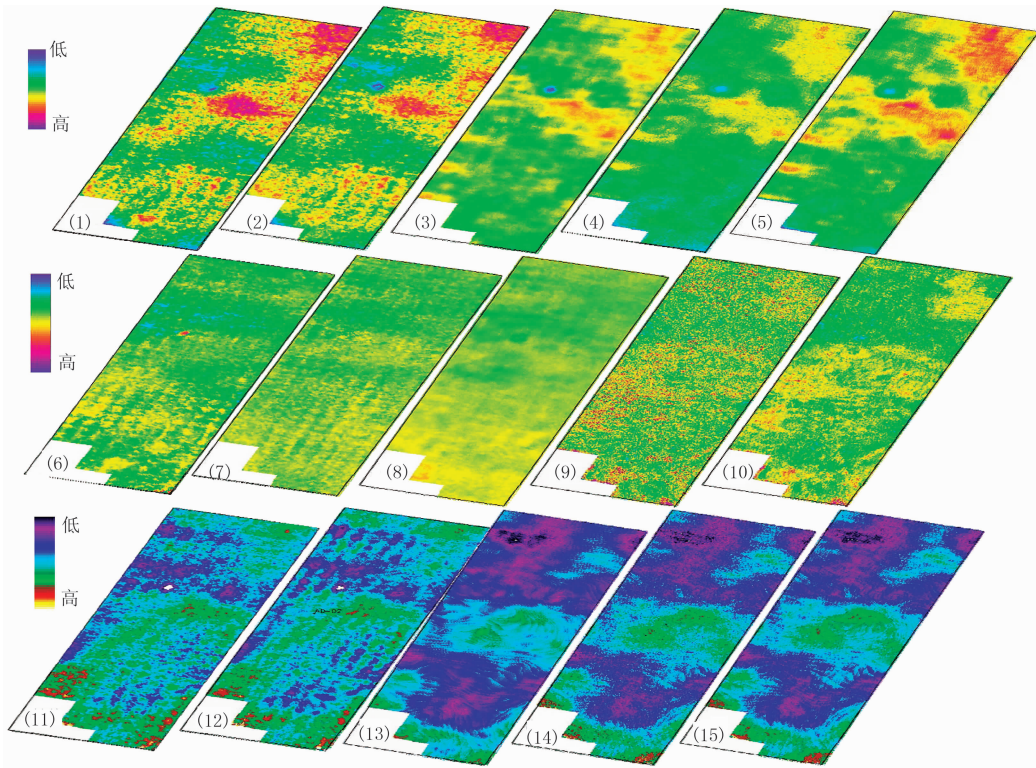


图 5 采集脚印压制配套处理前、后地震属性对比

(1)(6)(11)分别为未作叠前插值的数据叠前时间偏移 K2 储层的 RMS 振幅、瞬时频率、瞬时相位; (2)(7)(12)分别为叠前插值的数据叠前时间偏移 K2 储层的 RMS 振幅、瞬时频率、瞬时相位; (3)(8)(13)分别为三维频率—波数域滤波后 K2 储层的 RMS 振幅、瞬时频率、瞬时相位; (4)(9)(14)分别为中值滤波后 K2 储层的 RMS 振幅、瞬时频率、瞬时相位; (5)(10)(15)分别为相干滤波后 K2 储层的 RMS 振幅、瞬时频率、瞬时相位

后地震属性对比。由图可见,处理结果的沿层振幅属性、瞬时频率属性、瞬时相位属性中的采集脚印逐步得到压制,信噪比逐步提高,基本上实现了相对保持振幅、频率、相位属性的前提下有效压制采集脚印。对于 K2 储层的沿层 RMS 振幅、瞬时频率、瞬时相位属性效果较好。

4 结束语

由于任何一种地震资料处理方法对于采集脚印的压制都有其局限性,所取得的效果也很难完全满足振幅、频率、相位等属性在油气识别中的需要,为此须建立配套的有效压制采集脚印的系列处理技术。本文的配套处理技术系列可较好地保护有效信号,沿地质层位的振幅属性、瞬时频率、瞬时相位等属性凸显出来,能为地质解释提供较好的基础数据。当然,从采集设计入手,提高采集的时间精度和空间精度才是彻底消除采集脚印的根本。

参 考 文 献

- [1] 侯成福,蒋连斌,高淑琴. 三维观测系统与采集脚印. 石油地球物理勘探,2007,42(6): 611~615
Hou Chengfu, Jiang Lianbin and Gao Shuqin. 3-D geometry and acquisition footprints. *OGP*, 2007, 42(6): 611~615
- [2] 董世泰,刘雯林,乐金. 压制三维地震数据采集脚印的方法研究. 石油地球物理勘探,2007,42(1): 7~10
Dong Shitai, Liu Wenlin and Yue Jin. Approach of suppressing acquisition footprint of 3-D seismic data. *OGP*, 2007, 42(1): 7~10
- [3] 麻三怀,杨长春,韩晓丽等. 采集脚印分析和处理方法综述. 地球物理学进展,2008,23(2):500~507
Ma Sanhuai, Yang Changchun, Han Xiaoli et al. The review of methods of acquisition footprint analysis. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(2): 500~507
- [4] 熊金良,狄帮让,岳英等. 基于地震物理模拟的采集脚印分析. 石油地球物理勘探,2006,41(5):493~497
Xiong Jingliang, Di Bangrang, Yue Ying et al. Analysis of acquisition footprints based on seismic physical simulation. *OGP*, 2006, 41(5): 493~497
- [5] 杨红霞. 地震数据采集技术进展. 勘探地球物理进展, 2003, 26(5, 6): 463~468
Yang Hongxia. Advances in seismic data acquisition. *Progress in Exploration Geophysics*, 2003, 26(5, 6): 463~468
- [6] Marfurt K J. Suppression of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping. *Geophysics*, 1998, 63(3): 1024~1035
- [7] 陈习峰,李云. 叠前偏移中压制采集脚印的一种方法. 小型油气藏,2008,13(1):25~28
Chen Xifeng and Li Yun. A method of suppressing acquisition footprints in pre-stack migration. *Small Hydrocarbon Reservoirs*, 2008, 13(1): 25~28
- [8] 王克斌,曹孟起,张玮等. 连片叠前偏移处理技术与应用实践. 北京:石油工业出版社,2008,7~23
- [9] Hanitzsch C. Comparison of weights in prestack amplitude preserving Kirchhoff depth migration. *Geophysics*, 1997, 62(6): 1812~1816
- [10] Peles O, Kosloff D, Koren Z et al. A practical approach to true amplitude migration. *Journal of Seismic Exploration*, 2001, 10, 183~203
- [11] Mi Y, Li X and Margrave G F. Median filtering in Kirchhoff migration for noisy data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000, 19: 822~825
- [12] 张红军,吴琳,王君. 地震资料处理中采集脚印压制方法研究. SEG/SPG 2011 年国际地球物理会议论文集, 2011
- [13] Kurt J et al. Suppression of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping. *Geophysics*, 1998, 63(3): 1024~1035
- [14] Anat C et al. Reducing 3-D acquisition footprint for 3-D DMO and 3-D prestack migration. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1177~1183
- [15] Gerard T S et al. Seismic array theorem and rapid calculation of acquisition footprint noise. *Geophysics*, 2001, 66(6): 1843~1849

(本文编辑:金文昱)