

· 处理技术 ·

地震数据处理中噪声衰减方法的探讨

刘志刚* 谢言光 陈峰

(东方地球物理公司研究院海外业务部,河北涿州 072751)

刘志刚,谢言光,陈峰. 地震数据处理中噪声衰减方法的探讨. 石油地球物理勘探, 2009, 44(增刊1): 67~71

摘要 提高地震资料的信噪比和分辨率贯穿地震数据处理过程的始终。通过对大量地震资料中噪声特点的分析研究及数据处理实践,本文总结出一套压制、衰减噪声的处理方法和流程,重点探讨了近年发展起来的几种压制噪声的新方法。通过对实际地震资料的处理应用,证明文中叙及的几种压制噪声的方法具有较好的处理效果及应用前景。

关键词 地震数据处理 噪声衰减 信噪比 分辨率 滤波 规则噪声

1 引言

在地震勘探中,受浅层低速带速度横向变化及厚度变化的影响,局部地区存在着较强的折射波;野外数据采集在获得有效信号的同时也会采集到面波及其他相干噪声或随机噪声,这些干扰会降低原始单炮记录的信噪比,影响后续的反褶积、速度分析及常规叠加,最终导致剖面质量降低。因此提高原始地震资料信噪比是高分辨率地震数据处理的关键。

追求较高的信噪比和分辨率是地震数据处理的最终目标。但在地理环境恶劣、地表地震地质条件和地下地质结构复杂的地区,不仅地震资料信噪比很低,而且其分辨率更难提高。在地震数据处理中,通常是在有一定信噪比的前提下追求高分辨率,因此提高资料的信噪比是地震数据处理的首要任务。在野外地震数据采集已经完成的情况下,提高资料信噪比的惟一方法是合理运用噪声衰减处理技术。

2 地震资料中噪声特点

随着油气勘探程度的深入和勘探技术的发展,对地震数据精度的要求也越来越高,归纳为“三高—准”,即高信噪比、高分辨率、高保真度和准确成像。地震数据的高信噪比是基础,没有一定的信噪比而要求高分辨率和高保真度就不可能实现。为了有效地衰减噪声,必须先充分了解噪声的特点。

根据噪声出现的规律及其特点,可将其分为规则噪声和随机噪声两大类。

随机噪声主要是指没有固定频率和固定传播方向的波。大致可进一步分为三小类:第一类是地面微震,如风吹草动和一些人为因素引起的无规则振动;第二类是仪器在接收时或处理过程中产生的噪声;第三类是激发所产生的不规则噪声,包括由介质的不均匀性造成的弹性波散射以及来自任意方向、相位变化无规律的波动叠加等。这些随机噪声在地震记录上表现为杂乱无章的振动,其频谱很宽,无一定的视速度,因而很难利用随机噪声与有效波在频谱或传播方向上的差异对其进行压制。

规则噪声(也称相干噪声)主要是指具有一定主频和一定视速度的噪声,如面波、交流电干扰、声波、虚反射、多次反射、浅层折射、侧面波、交混回响和鸣震等。

因为产生噪声的原因及噪声的种类复杂多样,所以噪声的压制也要根据有效反射波与噪声的各种差异区别对待,尽量减少在压噪过程中对有效反射信号的能量损害。下文根据噪声的特点,介绍地震数据处理中一些常规的压噪方法和几种较新的压噪方法。

3 噪声衰减方法

3.1 基于 Fourier 变换的频率滤波

滤波和去噪往往是相关的。在信号分析中,采

* 河北省涿州市东方地球物理公司研究院海外业务部,072751

本文于2009年5月28日收到。

用有效方法对信号的时频谱特征进行分析,分离噪声和信号的时频谱区域,再用适当的方法进行滤波,可达到去噪的目的。

Fourier 变换将信号从时域的表示变为频域的表示,便可分析信号能量在各个频率成分中的分布情况。如果有效波和干扰波的频谱是分离的,就可利用一个滤波器把噪声从信号中清除或减弱,从而得到较高的信噪比,有利于获取有用的信息。这里要求滤波器的频率特性满足

$$H(f) = \begin{cases} 1 & |S(f)| \text{ 以内} \\ 0 & |S(f)| \text{ 以外} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H(f)$ 为滤波器的频谱; $S(f)$ 为地震记录中有效信号的频谱。

3.2 叠前规则噪声衰减

通常二维滤波被称为视速度滤波。这是一种常用的去除相干干扰的方法,它是根据反射波和干扰波传播的视速度不同,实现去除干扰波、突出有效波的目的。由于视速度可表示为

$$v^* = \frac{f}{k^*} \quad (2)$$

所以它也被称为 $f-k^*$ 域滤波,简称 $f-k$ 滤波。但是,频率域的切除往往造成假频效应,使地震记录中出现假同相轴、有效波波形畸变,给地震解释造成陷阱。另外有效波和相干干扰常常混叠在一起,在滤除相干干扰的同时,相应的有效波成分也受到压制。因此 $f-k$ 滤波在地震数据处理中宜慎用。

这类方法的基本思想是将规则干扰自动地识别出来并减去,而且被减掉的部分主要集中在干扰覆盖的区域,其他部分则不受影响,整体压制产生的效应是局部的。推荐采用多道识别、单道逐点压制的策略,这样做有以下两大优点:

(1)可以适应线性噪声同向轴的变化,克服了 $f-k$ 法和 $\tau-p$ 法压制线性噪声的弱点;

(2)避免了在记录上产生蚯蚓化现象。

这类方法的局限是需要满足两个基本假设:其一,干扰波具有线性同向轴;其二,干扰波的视速度与有效波的视速度有一定差别(可分离)。

3.3 中值滤波法衰减相干噪声

中值滤波法是一种倾角滤波方法,是沿叠前数据中有效波同相轴方向,使用中值滤波器,压制相干噪声,增强有效信号的同相性方法,属于非线性的地震噪声压制方法。该方法基于两个假设:①沿主要

局部倾角是相关的;②振幅值沿倾角方向是渐变的。对局部倾角的扫描是以中心点为中心,以奇数道为时窗宽度,在一定时窗内完成的;并确定最大倾角,由此通过插值计算主倾角的采样值,要求所确定的倾角适用于所选数据。估算中心点的采样值时,或按照各采样点对中心点作用权值相同方式(去除一个最大值或一个最小值),或按照高斯钟形分布方式,在以中心点为中心的一个半区间内,在该曲线所控制的 $2/3$ 面积内确定权值对中心点的贡献,从而达到增强有效信号压制噪声的目的。

3.4 自适应面波衰减

原始单炮中往往存在低频干扰,尤其是面波比较发育,由于面波的主频一般较低,所以往往采用高通滤波滤除面波,但这并不是一种可取的方法,因为高通滤波在滤除面波的同时也完全损失了有效信号的低频成分,而这种低频成分无论是对提高分辨率还是做波阻抗反演都是至关重要的。

对面波的综合分析发现,从视速度、能量及频率分布范围等各方面,面波与有效波均存在较大的差异。因此利用时-频分析的方法可以确定面波的存在范围,并根据加权衰减对面波进行压制。

总之,本方法是根据有效波与面波在空间域和频率域的分布特征及能量衰减特性等方面的差异,利用统计分析的方法来识别和压制面波。

利用地震信号的模型识别出面波后,就可通过

$$F'_t(f) = H_t(f)F_t(f) \quad (3)$$

对面波实现压制。式中: $F_t(f)$ 为地震信号在时间 t 的频谱; $F'_t(f)$ 为面波压制后的频谱; $H_t(f)$ 为面波的压制因子,且

$$H_t(f) = \begin{cases} 1 & Y_t(f) < P_t(f) \\ P_t(f)/Y_t(f) & Y_t(f) > P_t(f) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $Y_t(f)$ 为地震记录在时间 t 的归一化振幅谱的包络; $P_t(f)$ 为地震子波相对于峰值频率的归一化振幅谱。

该类方法在压制面波的同时,对有效信号的低频成分和其他信息基本不做处理。经实际地震资料处理检验,其适应性较强,效果比较稳定。

3.5 强能量干扰的分频压制

原始地震数据中常常存在着各种各样的干扰,如强能量的声波、猝发脉冲、簇状噪声和强能量干扰等,都给叠前多道处理带来了极其不良的影响(如地表一致性振幅补偿、统计子波反褶积等);而叠前多

道滤波和多道相干性处理又都存在着某些固有的缺陷。本文采用“多道识别,单道处理”的思路对叠前噪声进行压制,表明此种做法对不同地区的地震资料都有较好的效果。

通常采用加权中值技术识别高能噪声。设一组地震道(炮集、CMP 道集或检波点道集)为 $x(i, j)$, 可求出其包络 $A(i, j)$ 及沿道方向 $A(i, j)$ 的加权中值, 所用检测噪声准则为

$$l(i, j) = \begin{cases} \frac{A(i, j)}{M(i, m)\alpha} & A(i, j) > \text{thr}(i, j)M(i, m) \\ 1 & A(i, j) \leq \text{thr}(i, j)M(i, m) \end{cases} \quad (5)$$

式中: thr 为阈值; $M(i, m)$ 为中值; α 为衰减比例, 显然 $0 < \alpha \leq 1$ 。式(5)表示对 $A(i, j)$ 大于一定程度的值进行衰减处理。

在识别出异常噪声后, 再对记录道进行加权得到去噪结果

$$\hat{X}(i, j) = \frac{X(i, j)}{l(i, j)} \quad (6)$$

由于强能量干扰在不同频段范围内表现的特征不同, 因此本方法在实现过程中采用了分频处理方式。

3.6 去线性相干波场技术

这类方法主要用于消除地震记录上的折射鸣震和散射波。其基本思路是通过空间道相关识别出线性相干波场, 然后从地震道中予以剔除。其数学表达为

$$S_0(t) = x_0(t) - N(t) \approx x_0(t) - \frac{1}{M} A(t) \quad (7)$$

其中

$$A(t) = \sum_{k=0}^{M-1} x(t+k\tau) = \sum_{k=0}^{M-1} S_k(t+k\tau) + \sum_{k=0}^{M-1} N_k(t+k\tau) \approx MN_0(t) \quad (8)$$

式中: $S(t)$ 表示有效信号; $x(t)$ 表示观测信号; $N(t)$ 表示噪声; T 为有效波主周期, τ 为线性相干波场的道间时差, 且有 $M \geq T/\tau$ 。

由于空间相关是对干扰波进行的, 而有效波的求取是逐道进行的, 所以不存在有效波的混波及蚯蚓化问题。该方法直接把干扰波能量从地震道中剔除, 其去噪效果较为明显。该方法的处理效果取决于线性波场的相干性, 相干性越处理好效果越好。

3.7 随机噪声衰减技术

由于地表条件的复杂性, 地震资料中常含有多

种随机噪声, 如微震、背景干扰等。这些噪声分布范围很广, 严重影响了地震资料的信噪比。推荐选用下列方法消除随机干扰。

(1) $f-x$ 域中随机噪声衰减 利用线性预测理论和随机噪声不能预测的原理, 对叠后剖面上的线性同相轴(包括有效信号和线性噪声)进行预测, 分离信号与噪声, 压制剖面上随机噪声, 增强有效信号。

(2) 相干加强 利用地震反射同相轴的相干性, 已成为叠后提高信噪比和压制噪声的有效手段。相干加强方法的原理是: 对需做相干加强的某地震道的若干相邻道沿不同倾角做叠加构成模型道, 再计算该道与各倾角模型道间的相干系数, 然后用相干系数构成加权因子对各模型道进行加权, 最后将加权后的各模型道相加构成输出道, 即可达到提高信噪比的目的。

(3) 多项式拟合提高信噪比 应用多项式拟合方法提高数据信噪比是由俞寿朋等提出的。其主要设计思路是根据有效信号在空间上的相似性, 用多道相干的方法确定时窗内有效波同相轴的时空位置, 然后求出有效波在这一时窗内的标准波形, 并根据各道的相关系数对对应道进行能量分配, 完成有效波时间及振幅两方面的拟合。拟合后的地震剖面的信噪比将有显著提高, 并且剖面数据的高频成分不受损失, 能保持原有信号的分辨率, 同时也能较好保持原始各道的相对振幅。

另外, 由于多项式拟合对复杂地层产状的适应性较强, 因此多项式拟合最好是在去除规则干扰后进行, 以免规则干扰波当作有效信号得到加强。

(4) 小波变换与 K-L 变换联合去噪 当地震信号中存在强随机噪声时, 为克服 K-L 变换去噪方法的缺陷, 使用小波变换结合 K-L 变换方法改善去噪处理效果。首先对地震信号进行 4 个尺度的小波变换。实际应用中考虑到地震记录中有效反射波一般频率较低, 而随机噪声通常集中在高频部分, 因而在对地震信号进行小波变换时, 认为在尺度 1 上主要是噪声。若直接将尺度 1 上小波系数置为 0, 虽然能够去除大部分随机噪声, 但少量的有效信号也会损失。如对尺度 1 上小波系数再进行 4 个尺度的小波变换, 可认为第二次小波变换的尺度 1 上小波系数置为零, 将第二次变换其余尺度上小波系数重构。将重构结果作为第一次小波变换的尺度 1 上小波系

数,再和第一次小波变换其他尺度上小波系数重构得到对原地震信号去除高频噪声的信号。这样就去除大部分高频随机噪声,而且基本不影响地震记录中的有效信号成分。

在去除高频随机噪声后,可使用 K-L 变换对处理后的地震信号再次处理,以进一步去除随机噪声,并提取其中相干信号。经合成剖面 and 实际地震剖面验证,该方法有较好的去除强随机噪声的效果。

4 噪声衰减技术应用效果

图 1 是叠前规则噪声衰减技术压制地震记录中

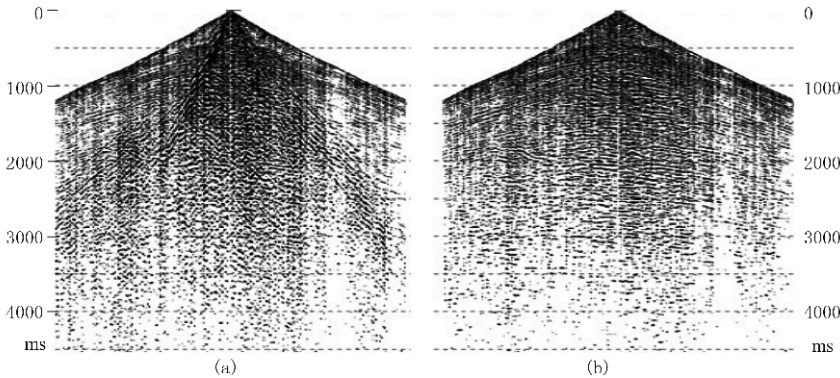


图 1 叠前规则噪声衰减技术压制线性噪声前(a)、后(b)地震记录对比

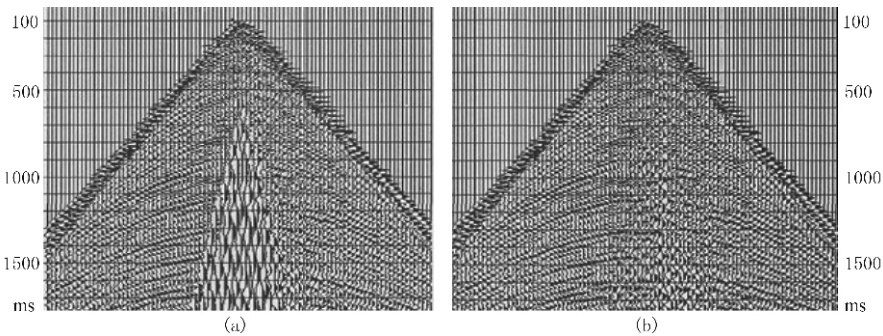


图 2 自适应面波衰减前(a)、后(b)的炮集记录对比

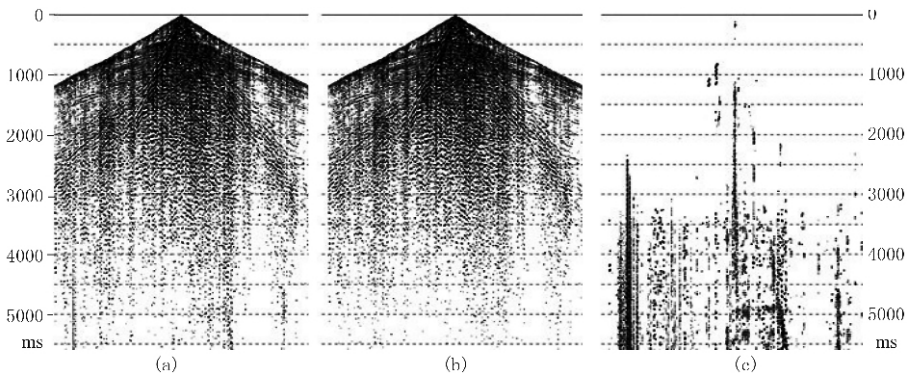


图 3 强能量干扰的分频压制前(a)、后(b)的对比记录及去除的噪声(c)

线性噪声的效果显示,从噪声衰减后地震记录(图 1b)可看出,地震单炮中的线性噪声得到了较好压制。采用这种多道识别、单道逐点压制的方法避免了蚯蚓化现象。

图 2 是自适应面波衰减技术的处理效果显示,从中可看出应用自适应面波压制技术使面波得到了较好的压制,而其他信息基本未受影响。

图 3 是强能量干扰的分频压制技术的处理效果分析,从对强能量干扰压制前(图 3a)、后(图 3b)的对比记录及去除的噪声信号(图 3c)可以看出,这种多道识别、单道处理的方法既能去除强能量干扰,又基本上没有损失其中的有效信号成分,具有

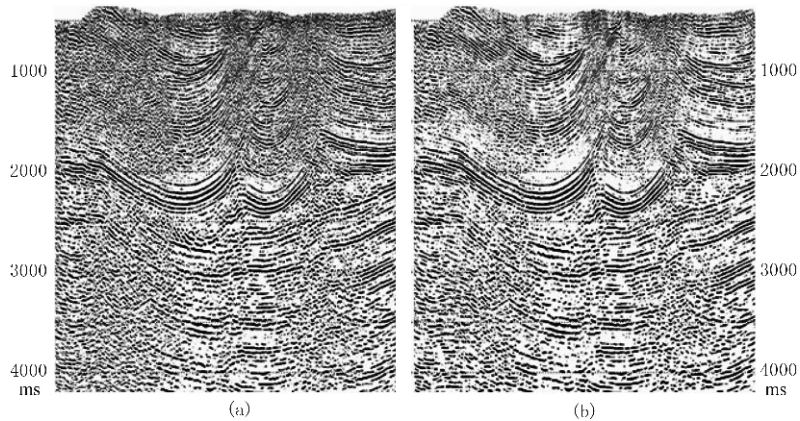


图4 信号相干加强技术衰减随机噪声前(a)、后(b)的叠加剖面对比

较高的保真度,取得了较好的压制强能量干扰的处理效果。

图4是信号相干加强技术的处理效果显示,从随机噪声压制后的叠加剖面(图4b)可见,应用信号相干加强技术能较好压制随机噪声,使剖面的信噪比得到了较大提高。

5 结束语

在地震数据处理中,进行噪声衰减和提高信噪比是这一过程的基础,也是关键。随着地震勘探的深入及探区地表的日趋复杂,进一步改进噪声衰减技术显得更加必要。本文提及的噪声衰减技术在应用中有较强的针对性,并强调处理结果应具有较高的保真度。针对不同特性的噪声,在采用适用的噪声衰减方法的同时,还应在尽量减少假频的前提下

综合应用多种噪声衰减方法,以期达到最佳的噪声衰减效果。

参考文献

- [1] 熊翥. 地震数据数字处理应用技术. 北京:石油工业出版社,1993
- [2] 熊翥. 如何改善 $F-K$ 滤波的效果. 物探科技通报,石油地球物理勘探局研究院,1994
- [3] 李庆忠. 走向精确勘探的道路. 北京:石油工业出版社,1993
- [4] 程乾生. 信号处理的数学原理. 北京:石油工业出版社,2003
- [5] Jones I F, Levy S. Signal-to-noise ratio enhancement in multichannel seismic data via the Karhuner Loeve transform. *Geophysical Prospecting*, 1997
- [6] 俞寿朋等. 用地震多项式拟合提高叠加剖面的信噪比. 石油地球物理勘探, 1988, 23(1): 131~139
- [7] 李承楚. 关于中值滤波的理论基础. 石油地球物理勘探, 1986, 21(4): 372~379

(本文编辑:朱汉东)