

谱分解地表异常补偿

田 希 泰

摘 要

常规剩余静校正方法一般分成两步, 首先提取反射波同相轴的时差, 然后由此时差分离出静校正量进行静校正。

J.A.Hileman (1968), M.T.Taner (1974), G.Saghy (1975), R.A.Wiggins, L.C.Morlay (1983) 等人先后提出过多种剩余静校正模型, 人们已经不仅仅把静校正作为一个线性问题对待, 而且还考虑到地表异常造成的振幅衰减。

本文介绍一种完全不同的地表异常校正方法; 通过在频率域里对各种谱分量进行分解, 给出一个地表异常的反滤波因子, 对地震道进行滤波, 使地表异常造成的地震波的振幅衰减和部分时间延迟得到补偿, 从而扩大了自动剩余静校正方法的应用范围。

ABSTRACT

Conventional residual static correction method is normally implemented in two steps: 1) extraction of time difference from reflection events and 2) application of statics separated from the time differences.

J.A. Hileman (1968), M. T. Taner (1974), G. Saghy (1975), R. A. Wiggins and L.C. Morlay (1983) and others have proposed variety of residual static models. Now people not only treat static correction as a linear problem, but also take account of the amplitude attenuation caused by surface anomalies.

The paper introduces a completely different surface anomaly correction method: various spectra components are decomposed in frequency domain to derive a deconvolution operator of surface anomaly and then filter the seismic trace with this operator to compensate the amplitude attenuation of the reflections and partial time delay caused by surface anomaly. Thus, the application of automatic residual static correction method is expanded.

前 言

目前,静校正处理方法已经成为地震资料数据处理的一种常规方法。常规的剩余静校正方法是首先在时间域内提取反射波同相轴的时差,然后对这种时差分解,从中分离出静校正量进行静校正。由于静校正的重要性日益突出,很多人都对时差的提取和静校正量的分离进行了研究,使这种常规的处理方法日臻完善。

J. A. Hileman 等人于 1968 年首先建立了统计自动剩静校正模型。他们只分离被假定为随机的炮点和接收点的剩余静校正。M. T. Taner 等人于 1974 年建立了地表一致性剩余静校对方程,对炮点剩余静校正、接收点剩余静校正和剩余动校正同时进行分离。G. Saghy 等人 (1975) 和 R. A. Wiggins 等人 (1976) 都对剩余静校正问题进行了分析和讨论。前者分析了静校正的脉冲响应,后者用线性代数理论进行了讨论。他们都对静校正计算的稳定性及静校正误差随波长的关系进行了分析。Wiggins 等人后来又考虑了与测线垂直方向上的倾角对时差的影响,建立了宽线静校正模型。

经过上述诸人的努力,地表一致性剩余静校正作为线性问题,已经很好地解决了时差校正。但是,这种模型忽略了地表异常所造成的振幅畸变。所以 M. T. Taner 和 F. Koehler (1981) 把地表一致性校正分成振幅校正和相位(时差)校正两部分:由振幅校正计算地表异常所造成的振幅衰减,从而对振幅进行补偿;由相位校正计算时差校正量。L. C. Morley (1983) 引用这个原理进行了《海底一致性多次波的压制》的研究,并取得了可喜的成果。本文就是引用 Taner 的原理,参照 Morley 的处理技巧,用谱分解法进行静校正,以达到对地表异常造成的振幅衰减进行补偿,对时差进行部分校正。随着频率域研究的逐渐深入,在频率域里进行静校正的方法也会逐渐发展起来。

原理及算法

基本假设^[2]

很显然,近地表异常不仅造成了反射时差和振幅的畸变,而且也造成了更为复杂的与频率有关的时变滤波作用。这种影响不仅施加到记录的浅层部分,也影响到深层反射。但是,为了使得谱分解方法能够实现,还需要对这种很复杂的地表滤波作用进行必要的简化。

1. 地表一致性假设

地面上同一点对上行波和下行波的影响相同。在同一位置上,不同炮点和接收点的影响,可以分别简单地归结为炮点效应和接收点效应,而不考虑同一地面点不同传播方向的波的不同滤波作用。这样,同一炮点对于共炮点记录具有相同的炮点影响,同一接收点对于共接收点记录具有相同的接收影响。

2. 时间一致性假设

在整个记录时间,地面上或近地表的影响因素不变,它们包括震源响应、震源耦

合、近地表衰减、检波器灵敏度及检波器耦合。换言之，表层影响同样地出现在记录的浅层及深层。

3. 反射点一致性假设

一个共深度点道集内的所有道包括相同的反射点信息。

反射波频谱的基本特征

通常我们认为一道地震记录是几种滤波作用褶积的结果。这些滤波作用是震源性、炮点的滤波作用、接收点的滤波作用、地层的滤波作用、电缆及不同传播路径的滤波作用等。在上述假设条件下，我们可以把这几种滤波作用当成只依赖于空间位置的独立变量。这样，一段地震记录可以写成

$$f_{mnkl} = s_n(t) * r_m(t) * c_k(t) * d_l(t) * a(t) \quad (1)$$

其中： $s_n(t)$ ——炮点 n 处的震源响应，它被认为是波的激发过程中近地表地层施加于下行波的影响；

$r_m(t)$ ——接收点 m 处的接收响应，它被认为是接收条件与近地表地层施加于上行波的影响；

$c_k(t)$ ——地面点 k 处的下覆反射层的响应；

$d_l(t)$ ——偏移距为 l 时的偏移距响应，它被认为是电缆响应，球面发散响应和同一反射点不同传播路径对波的传播作用的总和；

$a(t)$ ——震源本身的频率特性；

f_{mnkl} ——一段地震记录。

空间坐标 m 、 n 、 k 、 l 不是互相独立的坐标变量，其中

$$\begin{cases} k = \frac{1}{2}(m+n) \\ l = \frac{1}{2}(m-n) \end{cases} \quad \begin{cases} m = k+l \\ n = k-l \end{cases} \quad (2)$$

通过傅氏变换把式 (1) 变换到频率域

$$\tilde{F}_{mnkl} = \tilde{S}_n(\omega) \cdot \tilde{R}_m(\omega) \cdot \tilde{C}_k(\omega) \cdot \tilde{D}_l(\omega) \cdot \tilde{A}(\omega) \quad (3)$$

由时间一致性假设可知：地表异常影响到记录浅层和深层，并且起着相同的作用。我们可以选取包括一组反射的一段地震记录为 $f_{mnkl}(t)$ ，通过傅氏变换把它变到频率域，其中就包含了我们所需要的地表异常。

对式 (3) 两边取对数使其线性化、有

$$\ln \tilde{F}_{mnkl}(\omega) = \ln \tilde{S}_n(\omega) + \ln \tilde{R}_m(\omega) + \ln \tilde{C}_k(\omega) + \ln \tilde{D}_l(\omega) + \ln \tilde{A}(\omega) \quad (4)$$

把式 (4) 改写成^[4]

$$F_{mnkl}(\omega) = S_n(\omega) + R_m(\omega) + C_k(\omega) + D_l(\omega) + A(\omega) \quad (5)$$

这就是我们可以从中分离出地表异常 $S_n(\omega)$ 和 $R_m(\omega)$ 的线性方程组。

对相位谱的处理

一般说来，式 (5) 是复数方程，它包含实部和虚部两部分。因此我们可以得到各个分量的对数振幅谱和相位谱。理想的情况是我们够能分别对两种谱进行分解，求出炮

点和接收点异常的振幅和相位特征,然后算出振幅补偿及时差校正。但是,由于计算相位的反正切函数是一个以 2π 为周期的周期函数,则相位谱就存在一个决定其所在区间的问题。然而,通常认为比较合理的最小相位假设使我们可以避开相位谱的计算。如果把炮点、接收点、反射点和偏移距的滤波作用当作一个线性最小相位系统,它们的频率响应具有最小相位特征,我们就可以只利用振幅谱研究地表异常的频率特性。

谱分解的最小平方模型及迭代运算

线性方程组 (5) 是如同计算时差的静校对方程一样的带限定条件的超定方程组,即当覆盖次数相当大 (大于三次), 每炮道数足够多 (多于六道) 时, 我们可以得到多于未知量个数的方程组, 但这个方程组的解只有在限定条件下才是唯一的。对于这样的超定方程组, 最小平方模型和迭代算法是通常使用的方法。

由式 (5), 定义最小平方误差为

$$E = \sum_n \sum_m (F_{mnl} - S_n - R_m - C_k - D_l - A)^2 \quad (6)$$

由偏导数为零可以算出各种分量 (引入坐标变换 (2))

$$S_n = \frac{1}{M} \sum_m (F_{mn} - R_n - C_{\frac{m+n}{2}} - D_{\frac{m-n}{2}} - A) \quad (7a)$$

$$R_m = \frac{1}{N} \sum_n (F_{mn} - S_n - C_{\frac{m+n}{2}} - D_{\frac{m-n}{2}} - A) \quad (7b)$$

$$A = \frac{1}{MN} \sum_n \sum_m (F_{mn} - S_n - R_m - C_{\frac{m+n}{2}} - D_{\frac{m-n}{2}}) \quad (7c)$$

$$C_k = \frac{1}{L} \sum_l (F_{kl} - S_{k-l} - R_{k+l} - D_l - A) \quad (7d)$$

$$D_l = \frac{1}{K} \sum_k (F_{kl} - S_{k-l} - R_{k+l} - C_k - A) \quad (4e)$$

其中: M 为每炮道数; N 为共接收点道数; L 为覆盖次数; K 为深度点总数。

线性方程组有很多解法, 我们这里采用高斯—赛德尔迭代法。对这种迭代法的收敛性, 很多计算数学的书中都作了讨论, 其结论是: 线性方程组的系数矩阵 $A^T A$ 为正定和对称时, 高斯—赛德尔迭代方法收敛。Martsuk 和 Kuznecov 又证明了当系数矩阵为非负定时, 该迭代方法也收敛。静校正线性方程组的系数矩阵具有这种性质, 所以计算是收敛的。

反滤波因子及滤波^[7]

根据分离出来的 S_n 、 R_m 和 D_l , 我们要设计一个反滤波因子, 滤掉它们对地震信息的影响。

地表异常的功率谱为

$$R(\omega) = \exp[2(S_n(\omega) + R_m(\omega) + D_l(\omega))] \quad (8)$$

它的 Z 变换可以写成

$$R(z) = \bar{B} \left(\frac{1}{z} \right) B(z) \quad (9)$$

其中, $B(z)$ 就是地表异常。

把消除地表异常的反滤波因子定义为

$$A(z) = \frac{1}{B(z)}$$

因为 $B(z)$ 是最小相位的, 所以 $A(z)$ 也是最小相位的。因此, 由式 (9), 可得

$$R(z) A(z) = \bar{B} \left(\frac{1}{z} \right) \quad (10)$$

地表异常的自相关函数 $R(z)$ 所代表的时间序列为

$$r(t) = \text{FT}^{-1}[R(\omega)] \quad (11)$$

因此, 由式 (11) 的自相关函数, 可以用递推方法求出反滤波因子 $a(t)$ 。

最后, 我们得到了经过滤波校正后的地震记录

$$D_{mn} = f_{mn}(t) * a_{mn}(t)$$

谱分解的最佳压制干扰算法

目前, 所有的静校正问题中的剩余静校正分离的算法都采用了高斯—赛德尔迭代法。M. O. Marcoux 在 1981 年提出一种最佳压制干扰的算法来分离静校正时差, 现在推广他的这种算法, 并用来进行谱分量的分解。

把地震道的对数谱方程 (5) 改写成深度点、偏移距坐标的形式

$$F_{kl} = S_{k-l} + R_{k+l} + C_k + D_l + A \quad (12)$$

其中: k 是深度点指数, 它的范围是测线上满覆盖次数的首尾两点; l 是偏移距指数, 它的范围是整个覆盖段。

由式 (12) 可以看出, 各对数谱分量对空间的傅氏变换具有不同的线性相位延迟。因此, 利用倾角滤波的方法能够把这几种分量分离开来。

对式 (12) 进行二维傅氏变换, 经过整理后可得 (附录 I)

$$\begin{aligned} \hat{F}(u, v) = & H(v_+) \hat{S}(u) + H(v_-) \hat{R}(u) + L(v) \hat{C}(u) \\ & + \hat{D}(v) K(u) + AL(v) K(u) \end{aligned} \quad (13)$$

利用指数函数的正交性, 令

$$\begin{cases} Q(u, v) \triangleq \frac{H^*(v_+)}{|H(v_+)|^2 - |H(v_-)|^2} \\ Q(u, -v) \triangleq \frac{H(v_-)}{|H(v_+)|^2 - |H(v_-)|^2} \end{cases} \quad (14)$$

由式 (13) 可以求出各个分量

$$\begin{cases}
 \hat{S}(u) = Q(u, v) \hat{F}(u, v) - Q(u, -v) \hat{F}(u, -v) & u, v \neq 0 \\
 \hat{R}(u) = Q(u, -v) \hat{F}(u, -v) - Q(u, v) \hat{F}(u, v) & u, v \neq 0 \\
 \hat{C}(u) = \hat{F}(u, 0) - H\left(\frac{u}{K}\right) S(u) - H^*\left(\frac{u}{K}\right) R(u) & \begin{cases} u \neq 0 \\ v = 0 \end{cases} \\
 \hat{D}(v) = \hat{F}(0, v) & \begin{cases} u = 0 \\ v \neq 0 \end{cases} \\
 A = \hat{F}(0, 0) - \hat{S}(0) - \hat{R}(0) - \hat{C}(0) - \hat{D}(0) & \begin{cases} u = 0 \\ v = 0 \end{cases}
 \end{cases} \quad (15)$$

其中: K 是变换时的深度点的维数; L 是变换时的偏移距的维数。

可以看出, 式 (15) 中的各个分量可以通过直接计算 (而不需要类似迭代那样的近似计算) 而得, 算出的各个分量经过反傅氏变换就可以得到各个谱分量。

Marcoux^[3] 讨论了式 (15) 的解的存在条件

$$\frac{v}{L} \neq 0, \quad \frac{v}{L} \neq \frac{1}{2}, \quad \frac{u}{K} \neq 0, \quad \frac{u}{K} \neq \frac{1}{2}$$

$$u \neq q \frac{K}{L} \quad (q \text{ 为不等于 } v \text{ 的整数})$$

根据实函数在频率域里的对称性及上面的存在条件, 各个分量的取值范围为 $1 \leq u \leq \frac{K}{2} - 1$, $1 \leq v \leq \frac{L}{2} - 1$ 。为了减小计算量, Marcoux 讨论了最大压制干扰的最佳解是当 $\frac{u}{K} = \frac{v}{L}$ 时计算出的各个分量。这里“最佳”的意义是: 在对有效信号 (此时是炮点和接收点的静校正值) 进行恢复时, 对噪音的放大应为最小。

试验效果分析

我们选择了二连地区的 EH—L2 测线进行试验。该测线位于阿尔善构造带上, 使用 SN338-HR 仪器、炸药震源、48 道接收、12 次覆盖等工作因素。

地表异常补偿的效果分析是对叠加后的记录进行的。为了能够说明问题, 对初始水平叠加和补偿后的水平叠加, 除了进行叠前基准面校正和叠后滤波以外, 不加其它处理。为了尽可能地保留原始数据的频率信息, 在补偿前不对原始数据作动平衡、振幅恢复等处理。

迭代精度与迭代次数

设 X 为 Y 的对数, X 为对数谱分量, Y 为振幅谱。若 X 的计算误差为 ΔX , 则

$$\ln \hat{Y}_m = X_m + \Delta X$$

功率谱

$$\hat{R}_m = \hat{Y}_m^2 = e^{2(X_m + \Delta X)}$$

自相关系数

$$\hat{r}_m = e^{2\Delta X} \sum_{m=0}^{M-1} e^{2X_m} e^{\frac{i2\pi mn}{M}}$$

自相关系数的相对误差

$$\lambda = \frac{|\Delta r_m|}{r_n} = |e^{2\Delta X} - 1|$$

λ 与 ΔX 的关系示于图 1。可以看出, 当对数谱的精度达到一定程度时(例如 $\Delta X = 0.01$), 再提高它的计算精度, 对自相关系数仅有很小的影响。因此, 再迭代更多的次数就没有什么意义了。实际的计算证明, 迭代三次后, $\Delta X \leq 0.05$, λ 可达 10%; 迭代四次后, $\Delta X \leq 0.01$, λ 可达 2%。从叠加后的结果来看, 三次和四次迭代的结果相差无几。可以认为, 一般地进行四次迭代即可达到满意的精度。

滤波分量对补偿的影响

图 2 是初始叠加剖面, 图 3 是作了炮点和检波点异常 (S+R) 补偿的叠加剖面,

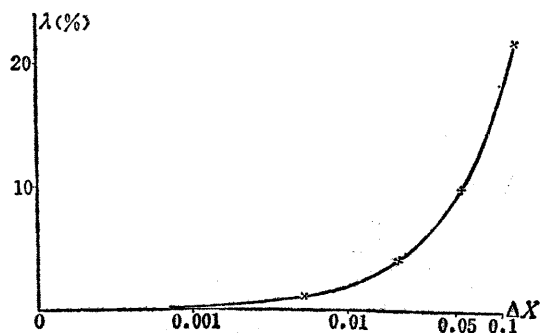


图 1 迭代精度示意图

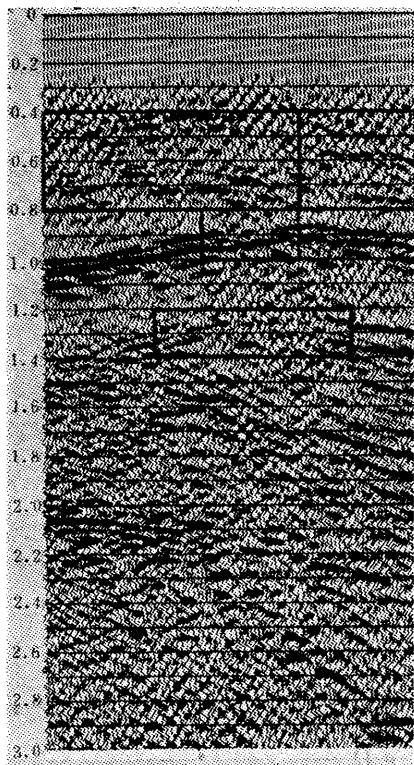


图 2 初始水平叠加剖面

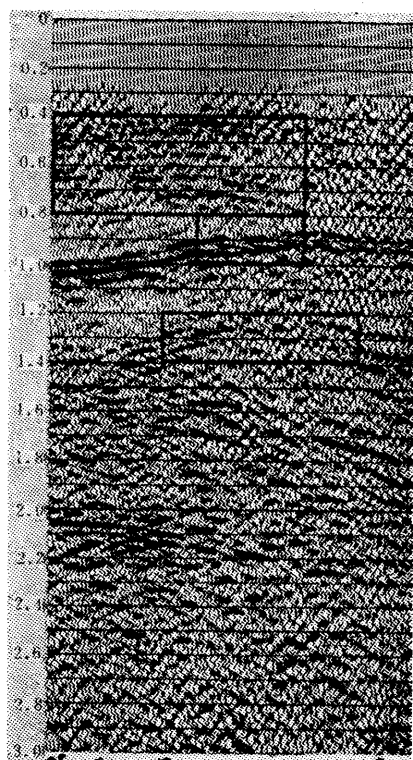


图 3 炮点、检波点异常补偿后的水平叠加剖面

图4是作了炮点、检波点和偏移距异常 ($S+R+D$) 补偿的叠加剖面。可以看出, 0.4—0.8 秒的浅层反射经过补偿以后, 连续性得到了改善; 0.8—1.0 秒的反射能量加强了; 1.2—1.4 秒的反射分辨率改善了。

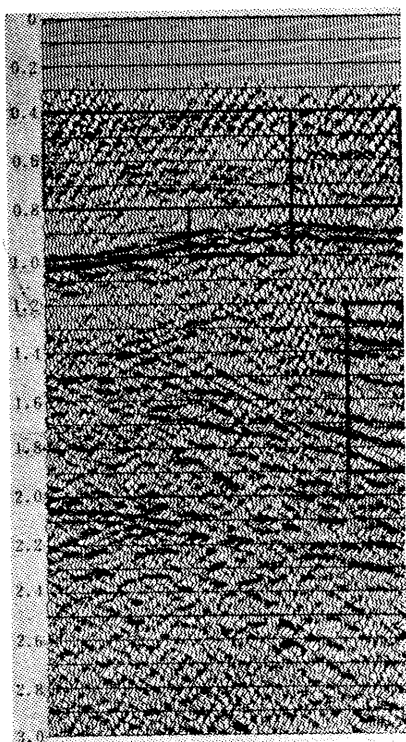


图4 炮点、检波点和偏移距异常补偿后的水平叠加剖面

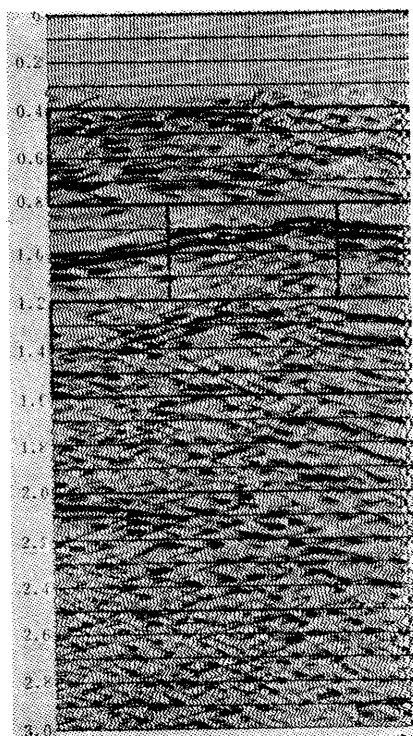


图5 叠后二维滤波的初始水平叠加剖面

在试验中, 我们选择了 1.2—1.4 秒的这一组作为处理对象。这样保证了最大的覆盖次数。但是, 这一组反射的连续性并不好, 信噪比较低, 在空间上的构造形态变化较大, 所以不是理想的标准层。在能够找出好的标准层的地区, 效果会更明显。

比较图2和图3可以看出, 在补偿后的叠加记录上, 大深度点号 (剖面右边) 的反射能量变弱, 作了偏移距影响的补偿后 (图4), 这部分能量得到了补偿。出现这种现象的原因可能是因为该线为小桩号放炮, 小深度点号的检波点有较大的观测重复性, 大深度点号的检波点有较小的重复性。因此, 大深度点号的检波点异常误差较大, 我们不妨称之为“边界影响”。比较图3和图4还可以看到, 偏移距补偿后出现了较强的线性干扰。其原因是: 尽管我们表面上只作了时间域里的滤波, 但是却加上了偏移距效应, 引入了一种空间的滤波作用, 因而也就出现了空间假频现象。图5、图6、图7是上述三种叠加剖面分别作了二维滤波的结果。用它们来比较补偿的效果可能会给出更清晰的印象。

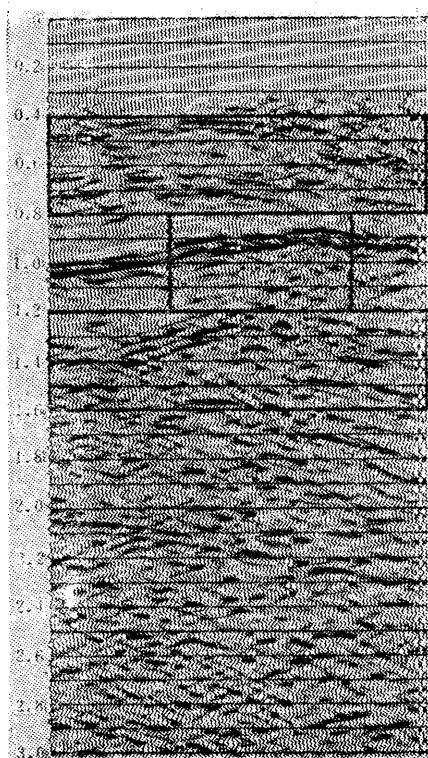


图 6 叠后二维滤波的炮、检补偿的水平叠加剖面

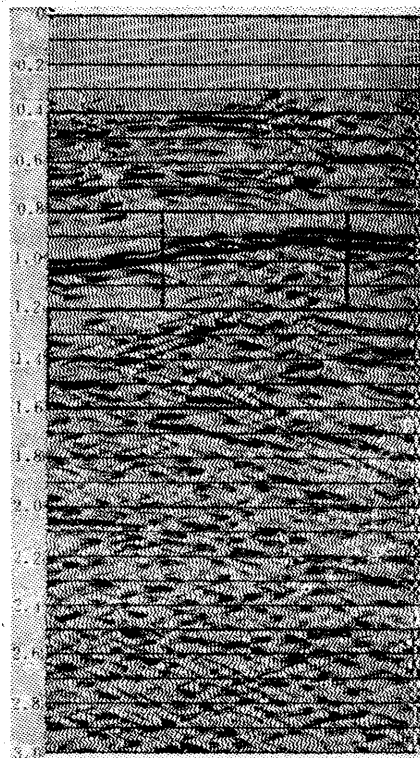


图 7 叠后二维滤波的炮、检、偏移距补偿的水平叠加剖面

长波长静校正

常规的、在时间域里分离静校正时差的方法，一般要求地震道之间的相对时差不能太大，例如不能超过地震波主周期的一半。从原理上讲，谱分解地表异常补偿不存在这种对时差大小的限制，但是由计算过程来看，它仍要求时差不能过大，用这种线性反问题对长波长地表异常的分离效果较差。在迭代过程中，长波长地表异常收敛很慢，精度较低。

长波长静校正是由近地表大范围的速度异常引起的。这种异常对叠加记录的质量影响不大，然而它却严重地改变了时间剖面的结构。当地下构造幅度较小时，长波长静校正就会使构造形态模糊。长波长静校正还会给同一反射层不同覆盖次数的叠加剖面带来畸变。所以，在短波长剩余静校正已经较好地解决之后，长波长静校正的研究就日益被人们所重视。

长波长静校正

根据静校正对叠加记录的影响，可以把静校正分成不同的空间分量。高频及中频静校正的空间范围是从一个道间距到一个排列长度。因此，一个共深度点的各道存在明显的时差，这样就会造成水平叠加结果变差。低频静校正的空间周期大于一个排列长度，这种静校正并不在共深度点道集内产生明显的时差，所以对水平叠加产生较小的信号衰

减。但是,随着覆盖次数的增加,静校正影响的幅度变宽变小,从而改变了剖面上同相轴的关系,造成了构造形态的畸变。

构造项对长波长静校正的影响^[1]

无论在时差分离的线性方程组中还是在谱分解的线性方程组中,地震数据包括炮点静校正、接收点静校正、剩余动校正(或与偏移距有关的异常)和构造项。直观地想象,长波长静校正的存在就好象地下存在某种构造形态,静校正的波长越长,静校正与构造项的影响就越不容易分开。所以,在计算静校正值之前,如果能去掉线性方程组中构造项的影响或使它的作用减至最小,我们就能较真实地求出静校正值。

D. J. Kirkham^[1]等人曾经给出一种共深度点远、近叠加道相减消掉构造项的影响模型。他们把12次覆盖的共深度点道集,先取小偏移距的六道叠加,再取大偏移距的六道叠加,然后两种叠加道相减。因为各道具有相同的构造分量,所以这种近、远叠加道的相减就消掉了构造项的影响。这种剩余叠加的过程可以模拟为一种空间的滤波作用,它的通放带是 $\frac{3}{4}$ —5个排列长度。我们可以得出结论:这种深度点叠加的剩余值在较大的波长范围内保留了静校正信息。

谱分解法进行长波长地表异常补偿

在时间域,由共深度点内的道时差可以分离出长波长静校正;在频率域,可以由对数谱的分解来进行长波长地表异常的补偿。

在一个共深度点道集内任选两道,它们之间的偏移距差为 l ,把这两道相减,由式(5)可得

$$\Delta F_{mnl} = S_n - S_{n-l} + R_m - R_{m+l} + D_{\frac{m-n}{2}} - D_{\frac{m-n}{2}+l} \quad (16)$$

取平方误差

$$E = \sum_n \sum_m \sum_{l=1}^{L-1} [\Delta F_{mnl} - (S_n - S_{n-l}) - (R_m - R_{m+l}) - (D_{\frac{m-n}{2}} - D_{\frac{m-n}{2}+l})]^2$$

由它对各分量的偏导数为零可以求出

$$S_n = \frac{1}{M(L-1)} \sum_m \sum_{l=1}^{L-1} [\Delta F_{mnl} + S_{n-l} - R_m + R_{m+l} - D_{\frac{m-n}{2}} + D_{\frac{m-n}{2}+l}] \quad (17a)$$

$$R_m = \frac{1}{N(L-1)} \sum_n \sum_{l=1}^{L-1} [\Delta F_{mnl} - S_n + S_{n-l} + R_{m+l} - D_{\frac{m-n}{2}} + D_{\frac{m-n}{2}+l}] \quad (17b)$$

式(16)在深度点、偏移距坐标系内可以写成

$$\Delta F_{kl} = S_{k-l_1} - S_{k-l_2} + R_{k+l_1} - R_{k+l_2} + D_{l_1} - D_{l_2} \quad (18)$$

从中可以求出

$$D_{l_1} = \frac{1}{K(L-1)} \sum_k \sum_{\substack{l_2 \\ l_2 \neq l_1}}^{L-1} [\Delta F_{kl} - S_{k-l_1} + S_{k-l_2} - R_{k+l_1} + R_{k+l_2} + D_{l_2}] \quad (17c)$$

其中: n 、 m 、 k 、 l 分别为炮点、接收点、共深度点和偏移距指数; N 、 M 、 K 、 L 分别为炮点数、接收点数、深度点数和覆盖次数。

式 (17) 就是长波长地表异常补偿的最小平方差。我们可以用常规的高斯—赛德尔迭代法对它进行计算。

为了使用最佳压制干扰算法求出长波长地表异常的各个分量, 把式 (18) 写成

$$\Delta F_{kl} = S_{k-l} - S_{k-(l+\Delta l)} + R_{k+l} - R_{k+(l+\Delta l)} + D_l - D_{l+\Delta l} \quad (19)$$

对式 (19) 进行二维傅氏变换并整理得 (附录 I)

$$\delta \hat{F}(u, v) = \alpha(u) H(v_+) \hat{S}(u) + \beta(u) H(v_-) \hat{R}(u) + \gamma(v) K(u) \hat{D}(v) \quad (20)$$

我们可以用前面讨论过的最大压制干扰的最佳解算法求出式 (20) 中的各个分量。可以看出, 式 (20) 中只有三种未知量, 它要比式 (13) 中五种未知量在计算上会稳定得多。

结 束 语

用谱分解的方法进行地表异常的补偿是一种新的探索, 今后还需要在理论上和计算机实现上做大量的工作, 以便弥补其不足。

我认为这个方法所出现的一些困难, 从根本上可以归结到它的原始地球物理模型。方程 (1) 是这种方法的模型, 它已被地球物理学家们所接受, 但是它的可靠性和唯一性却无法证明。正如文章开头所指出的那样, 地震波的传播经过很复杂的滤波作用, 但为了使问题简化, 我们把式 (1) 中的各项以外的滤波作用都当成了噪音。这些噪音必然给计算带来误差。而在文章开头所作的各种一致性的基本假设也会引起误差。所有这些误差都是目前的地球物理理论不能估计和分析的。

另外, 计算过程中还作了相位的假设, 如果说可控震源激发信号的相位可以预知 (姑且不论经大地滤波后的地震波是否保留其相同的相位), 那么炸药震源激发信号的相位就很难预测了。这样, 计算中所作的最小相位假设有时只剩下了计算上的便利而失去了物理上的准确。这也正是这个方法只能对地表异常所造成的时差作部分补偿的原因。

到目前为止, 我们在处理实际资料时还只是对动校正以前的地震道进行试验。由于动校正时差的存在, 所选的傅氏变换的时窗要很大, 这样不仅增加了处理时间, 也使基本模型式 (1) 中的反射点项更不确定; 反射能量较强的浅层反射也由于动校正时差的缘故而降低了覆盖次数。所以, 我们最终的目的是要对动校正之后的记录进行处理。那么动校正波形拉伸对频谱造成什么影响? 它使整个计算会产生什么效果? 这些问题还有待于进一步研究。

实际资料的处理结果使我们受到了鼓舞, 它说明了这种方法赖以建立的物理模型是合理的。计算方法正确, 如果对迭代次序、滤波因子长度、功率谱标量因子做出合理的选择, 采用平滑、加权及其它的特殊技巧, 处理的精度会更高些。随着对相位谱研究的深入, 一种最终能在频率域里解决静校正问题的方法定会研究出来, 这样, 不同频率具有不同静校正的问题也会在频率域里得到解决。

在程序编制及调试过程中, 得到了严昌言、王广年、赵振文、穆凌云等同志的帮

助, 俞寿朋同志对方法的使用提出了宝贵的意见, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] D. J. Kirkham and E. Poggiagliolmi, Long period statics determination by inverse filtering, 《Geophysical Prospecting》, Vol.24, No.4, 1976
- [2] M.T.Taner and F.Koehler, Surface consistent corrections, 《Geophysics》, Vol.46, No.1, 1981
- [3] M. O. Marcoux, On the resolution of statics, structure and residual normal moveout, 《Geophysics》, Vol.46, No.7, 1981
- [4] L. C. Morley and J. F. Claerbout, Predictive deconvolution in shot-receiver space, 《Geophysics》, Vol.48, No.5, 1983
- [5] R. N. Bracewell, The Fourier transform and its application, McGraw-Hill Book Company, 1977
- [6] F. Kirchheimer, Long period static analysis by trigonometric approximation, Expanded abstracts of 53rd SEG Meeting, 1983
- [7] J. F. Claerbout, Fundamentals of geophysical data processing, McGraw-Hill Book Company, 1976

附录 I: 谱分量的分解

把式 (12) 重写如下

$$F_{kl} = S_{k-l} + R_{k+l} + C_k + D_l + A \quad (\text{I}-1)$$

由离散傅氏变换对 (注: 地球物理上的定义与数学上的定义往往差一个符号)

$$F_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{i \frac{2\pi m n}{N}}$$

$$f_n = \sum_{m=0}^{M-1} F_m e^{-i \frac{2\pi m n}{N}}$$

及平移定理

$$f(n-a) \supset e^{i \frac{2\pi a m}{N}} F_m$$

对式 (I-1) 进行二维傅氏变换, 有

$$\begin{aligned} \hat{F}(u, v) = & \hat{S}(u) \left[\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{i \frac{2\pi l u}{K}} e^{i \frac{2\pi l v}{L}} \right] + \hat{R}(u) \left[\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{-i \frac{2\pi l u}{K}} e^{i \frac{2\pi l v}{L}} \right] \\ & + \hat{C}(u) \left[\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{-i \frac{2\pi l v}{L}} \right] + \hat{D}(v) \left[\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} e^{-i \frac{2\pi k u}{K}} \right] \\ & + A \left[\frac{1}{KL} \sum_{l=0}^{L-1} \left(\sum_{k=0}^{K-1} e^{-i \frac{2\pi k u}{K}} \right) e^{-i \frac{2\pi l v}{L}} \right] \end{aligned} \quad (\text{I}-2)$$

式中: $u=0, 1, \dots, K-1$; $v=0, 1, \dots, L-1$ 。

$$\begin{aligned}
 \text{令} \quad H(x) &\triangleq \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{i 2 \pi n x} \\
 v_+ &\triangleq \frac{v}{L} - \frac{u}{K} \\
 v_- &\triangleq \frac{v}{L} + \frac{u}{K} \\
 L(v) &\triangleq \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{-\frac{i 2 \pi l v}{L}} \\
 K(u) &\triangleq \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} e^{-\frac{i 2 \pi k u}{K}}
 \end{aligned}$$

式 (I-2) 可以简化成

$$\begin{aligned}
 \hat{F}(u, v) &= H(v_+) \hat{S}(u) + H(v_-) \hat{R}(u) + L(v) C(u) \\
 &\quad + D(v) K(u) + A L(v) K(u)
 \end{aligned} \quad (\text{I-3})$$

由指数函数的正交性可知

$$\begin{aligned}
 L(v) &= \begin{cases} 1 & v=0 \\ 0 & v \neq 0 \end{cases} \\
 K(u) &= \begin{cases} 1 & u=0 \\ 0 & u \neq 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

所以, 式 (I-3) 可以化简为

$$\begin{cases} \hat{F}(u, v) = H(v_+) \hat{S}(u) + H(v_-) \hat{R}(u) \\ \hat{F}(u, -v) = H^*(v_-) \hat{S}(u) + H^*(v_+) \hat{R}(u) \end{cases} \quad u, v \neq 0 \quad (\text{I-4})$$

“*” 表示共轭。

$$\begin{aligned}
 \text{令} \quad Q(u, v) &\triangleq \frac{H^*(v_+)}{|H(v_+)|^2 - |H(v_-)|^2} \\
 Q(u, -v) &\triangleq \frac{H^*(v_-)}{|H(v_+)|^2 - |H(v_-)|^2}
 \end{aligned}$$

由 (I-3) 和联立方程组 (I-4) 可以求出各个分量

$$\begin{cases} \hat{S}(u) = Q(u, v) \hat{F}(u, v) - Q(u, -v) \hat{F}(u, -v) \\ \hat{R}(u) = Q(u, -v) \hat{F}(u, -v) - Q(u, v) \hat{F}(u, v) \\ \hat{C}(u) = \hat{F}(u, 0) - H\left(\frac{u}{K}\right) \hat{S}(u) - H^*\left(\frac{u}{L}\right) \hat{R}(u) \\ \hat{D}(v) = \hat{F}(0, v) \\ A = \hat{F}(0, 0) - \hat{S}(0) - \hat{R}(0) - \hat{C}(0) - \hat{D}(0) \end{cases} \quad \begin{cases} u, v \neq 0 \\ u \neq 0 \\ v = 0 \\ u = 0 \\ v \neq 0 \\ u = 0 \\ v = 0 \end{cases} \quad (\text{I-5})$$

附录 I: 长波长谱分量分解

把式 (19) 重写如下

$$\Delta F_{kl} = S_{k-l} - S_{k-(l+\Delta l)} + R_{k+l} - R_{k+(l+\Delta l)} + D_l - D_{l+\Delta l} \quad (\text{I}-1)$$

它的二维傅氏变换为

$$\begin{aligned} \delta \hat{F}(u, v) = & \hat{S}(u) \left[\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{-\frac{i 2 \pi l u}{K}} e^{-\frac{i 2 \pi l v}{L}} \right] \\ & - \hat{S}(u) \left[\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{-\frac{i 2 \pi (l+\Delta l) u}{K}} e^{-\frac{i 2 \pi l v}{L}} \right] \\ & - \hat{R}(u) \left[\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{-\frac{i 2 \pi l u}{K}} e^{-\frac{i 2 \pi l v}{L}} \right] \\ & - \hat{R}(u) \left[\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{-\frac{i 2 \pi (l+\Delta l) u}{K}} e^{-\frac{i 2 \pi l v}{L}} \right] \\ & + \hat{D}(v) \left[\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} e^{-\frac{i 2 \pi k u}{K}} \right] \\ & - \hat{D}(v) e^{-\frac{i 2 \pi \Delta l v}{L}} \left[\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} e^{-\frac{i 2 \pi k u}{K}} \right] \end{aligned} \quad (\text{I}-2)$$

令

$$H(v_-) \triangleq \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{i 2 \pi \left(\frac{v}{L} - \frac{u}{K} \right) l}$$

$$H(v_+) \triangleq \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} e^{i 2 \pi \left(\frac{v}{L} + \frac{u}{K} \right) l}$$

$$K(u) \triangleq \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} e^{-\frac{i 2 \pi k u}{K}}$$

$$\alpha(u) \triangleq 1 - e^{-\frac{i 2 \pi \Delta l u}{K}}$$

$$\beta(u) \triangleq 1 - e^{-\frac{i 2 \pi \Delta l u}{K}}$$

$$\gamma(v) \triangleq 1 - e^{-\frac{i 2 \pi \Delta l v}{L}}$$

则式 (I-2) 可简化为

$$\delta \hat{F}(u, v) = \alpha(u) H(v_+) \hat{S}(u) + \beta(u) H(v_-) \hat{R}(u) + \gamma(v) K(u) \hat{D}(v) \quad (\text{I}-3)$$