

· 处理技术 ·

大剩余静校正量求解的多尺度反演方法研究

井西利 *

(燕山大学理学院,河北秦皇岛 066004)

井西利. 大剩余静校正量求解的多尺度反演方法研究. 石油地球物理勘探, 2009, 44(5): 564~568

摘要 文中针对大静校正量的剩余静校正问题,提出了基于模型道的剩余静校正方法。通过分析,找出了大静校正量使基于模型道的剩余静校正反演方法产生周波跳跃的原因,并指出在形成模型道的地震波频率上限与最大静校正量之积足够小的条件下,通过叠加形成的模型道是可靠的。据此建立了合理的基于模型道的多尺度剩余静校正方法,并进行了理论数据和实际资料的试算。试算结果表明,该方法可在一定程度上有效解决大静校正量的周波跳跃问题。该方法既具有非线性反演剩余静校正方法的计算效果,同时又具有线性反演方法的较高计算效率的特点。

关键词 静校正 反演 模型道互相关

1 引言

静校正是消除基准面以上地层对地震波走时影响的一种方法,静校正精度的高低直接影响地震成像质量。一般在高程静校正后,仍需进行剩余静校正处理。当近地表地质结构非常复杂,物性参数纵、横向变化剧烈时,地震资料常表现为噪声强或静校正量大的特点,这种情况下利用常规基于线性反演的剩余静校正方法就显得无能为力^[1]。为此 Rothman 将模拟退火非线性反演方法引入到地震静校正问题的处理^[1],并获得了很好的效果,但该方法的计算效率较低,在实际处理中没有被广泛应用。为了提高全局寻优静校正方法的计算效率,一些地球物理学者在此方面开展了大量的研究工作^[2~8],林依华等综合了最大能量方法、模拟退火方法以及遗传算法在寻优问题上各自的优势,提出了一种局部收敛快、全局搜索能力强的综合寻优技术^[9];目前解决具有噪声强或大静校正量的剩余静校正问题普遍采用基于非线性反演的方法,如模拟退火、遗传算法等。

由于非线性方法的计算效率偏低、同时存在处理人员使用时对处理参数难以掌控等问题^[4],在实际生产中,一般难以推广使用。可见,发展一种计算效率较高、便于处理人员使用且能够处理复杂剩余

静校正问题的方法就显得十分重要。

本文从分析复杂静校正问题的特点及产生“周波跳跃”的原因等入手,研究以提高时移量拾取精度为目的的有效方法,从而提高复杂剩余静校正问题求解的可靠性及计算效率。

2 影响静校正量求解的因素分析

目前在剩余静校正处理中主要使用以下两类方法。一类是通过相关等方法拾取地震道的时移量,利用此时移量进行反演来获取炮点及接收点处的剩余静校正量。该类方法的优点是计算效率高,缺点是当资料静校正量较大或信噪比较低时,拾取的时移量不可靠,从而降低求解的剩余静校正量的可靠性,会出现“周波跳跃”现象。另一类是建立以炮点和接收点处的剩余静校正量为自变量的目标函数,利用线性或非线性反演方法求取能够使目标函数取得最优极值解的剩余静校正量。该类方法在使用非线性反演方法求解静校正量时,可以较好地削弱大静校正量及低信噪比对问题求解的影响,获取较高精度的剩余静校正量,但其计算效率偏低,且对处理人员素质要求较高。下面主要以第一类剩余静校正方法为基础,通过对影响静校正量求解的因素分析,改进该类方法对大静校正量问题的适应性。

* 河北省秦皇岛市燕山大学西校区理学院,066004

本文于2008年10月18日收到。

本研究得到国家自然科学基金(No. 40374048)资助。

2.1 静校正量大小对地震道时移量拾取的影响

利用上述第一类剩余静校正方法求取各炮点或检波点处的剩余静校正量一般采取以下步骤:首先计算相关地震道的互相关函数;然后通过拾取互相关函数的最大值来确定因静校正量引起的地震道时移量;最后根据该时移量利用数学方法反演各炮点或检波点处的剩余静校正量。由于噪声对互相关函数的形态影响很大,为保证时移量的拾取精度,在实际的剩余静校正处理中一般采用模型道技术压制噪声,从而降低原始地震道噪声对相关函数的影响。模型道通常按下式产生

$$d_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i(x_S^i, x_R^i, t + \Delta t_S^i + \Delta t_R^i) \quad (1)$$

其中: N 表示共中心点道集内地震道总数; x_S^i, x_R^i 分别表示道集内参与叠加的第*i*个地震道的炮点和接收点位置对应坐标; $\Delta t_S^i, \Delta t_R^i$ 分别为第*i*个地震道对应的炮点和接收点处的剩余静校正量。根据傅里叶变换理论,式(1)可写为

$$d_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} D_i(x_S^i, x_R^i, \omega) e^{j\omega(t + \Delta t_S^i + \Delta t_R^i)} d\omega \quad (2)$$

其中 $D_i(x_S^i, x_R^i, \omega)$ 为道集内第*i*个地震道的频谱,对上式中的 $e^{j\omega(t + \Delta t_S^i + \Delta t_R^i)}$ 进行泰勒展开得

$$e^{j\omega(t + \Delta t_S^i + \Delta t_R^i)} = e^{j\omega t} + j\omega(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)e^{j\omega t} - \frac{1}{2!}\omega^2(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)^2 e^{j\omega t} + \frac{1}{3!}j\omega^3(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)^3 e^{j\omega t} + \dots \quad (3)$$

上式也可简写为

$$e^{j\omega(t + \Delta t_S^i + \Delta t_R^i)} = e^{j\omega t} + j\omega(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)e^{j\omega t} + R_2(t) \quad (4)$$

其中

$$R_2(t) = -\frac{1}{2!}\omega^2(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)^2 e^{j\omega[t + \theta(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)]} \quad 0 < \theta < 1$$

如果式(4)中 $R_2(t)$ 与式中的前几项相比足够小,则式(4)可近似写为

$$e^{j\omega(t + \Delta t_S^i + \Delta t_R^i)} \approx e^{j\omega t} + j\omega(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)e^{j\omega t} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)得

$$d_m(t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} D_i(x_S^i, x_R^i, \omega) e^{j\omega t} \times [1 + j\omega(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)] d\omega \quad (6)$$

进一步整理上式得

$$d_m(t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} D_i(x_S^i, x_R^i, \omega) e^{j\omega t} d\omega + \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (\Delta t_S^i + \Delta t_R^i) \right] \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} j\omega e^{j\omega t} d\omega \quad (7)$$

在进行剩余静校正时,一般假设炮点和检波点处的剩余静校正量是一均值为零的随机变量,所以

$$\sum_{i=1}^N (\Delta t_S^i + \Delta t_R^i) = 0 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得

$$d_m(t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} D_i(x_S^i, x_R^i, \omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i(x_S^i, x_R^i, \omega) \quad (9)$$

在水平层状均匀介质假设下,共中心点道集的各地震道的同一层位反射波来自同一反射点。如果预处理及动校正合理,在不考虑噪声影响的情况下,可认为道集内各地震道该层位的地震反射波波形一致,只是各地震道该层位的反射波存在因剩余静校正量而引起的不同时移而已。如果地震道时移量消除,则各道该层位的地震反射波无论波形和反射时间都完全一致。故式(9)中求和符号后面项就是消除时移后的地震信号。所以式(9)写为

$$d_m(t) \approx d(t) \quad (10)$$

其中 $d(t)$ 为该道集不存在静校正量的地震信号。

式(9)和式(10)成立的前提是忽略了 $R_2(t)$ 项,只有当该项相当小时,才能在一定的精度范围内保证式(9)的近似成立。也就是说,只有在此条件下形成的模型道才是可靠的。因此形成模型道时要保证 $\frac{1}{2!}\omega^2(\Delta t_S^i + \Delta t_R^i)^2$ 足够小。对于确定的地震数据,各炮点或接收点的静校正量是确定不变的,所以必须保证 ω 足够小。静校正量越大,参与叠加的地震道角频率 ω 必须越小。

当式(5)不满足时,形成的模型道形态与理想模型道有一定的差别,用该模型道与同道集的地震道相关,相关程度变低,拾取的时移量可靠性降低,静校正时会出现“周波跳跃”现象。

地震波是有限带宽的,地震波的不同频率成分满足式(5)的程度不同,较低的频率成分满足式(5),而较高的频率成分会使式(5)难以满足。对于确定的静校正量,同一道集形成的模型道里,低频模型道的可靠性高,而高频模型道的可靠性低。因此我们必须根据最大静校正量的大小确定形成模

型道的频率范围。采用可以满足式(5)的地震波频率成分来形成模型道,从而保证利用相关方法拾取地震道时移量的可靠性。但当仅含有低频分量的模型道与频率成分对应的各地震道进行相关计算时,相关函数随相对时移的变化缓慢,因而根据该相关函数拾取的时移量精度还不高,但这时获取的各地震道的时移量比较接近真实时移量,在此基础上剩余的时移量与拾取前的时移量相比明显变小,原来不能够保证式(5)成立的较高频分量,也可以使其得到满足,这样通过不断提高频率成分,最终获取高精度的各地震道的时移量。以上表明本文算法是采用多尺度方法来获取高精度的时移量。

2.2 噪声对静校正时移量拾取的影响

以上在没有考虑噪声的情况下,对可靠模型道的形成进行了分析,但在实际地震资料采集过程中,地震记录难免会受到各种噪声的影响,同时道集内各地震道又来自于不同的炮点和接收点,受野外环境、地下不同传播路径等因素的影响,各地震道有一定的差异。为提高模型道的精度,受噪声影响较大的地震道应尽量减少其对模型道形成的影响,因此必须对异常道有一定的识别方法。由于同一共中心点道集的各地震道均来自同一反射点的反射波,导致各道有较大幅度的相似性,如果因其他原因使某一地震道发生畸变,该道与其他地震道的相似性明显降低,即与其他地震道的相关性变差。据此可根据地震道之间的相关性来判断噪声的影响或识别异常道。道集内互相关值越大的地震道,说明受噪声的影响越小;相关值越小的地震道,与其他地震道的差异越大,受噪声的影响越大。因此为提高模型道的抗噪能力,本文把经归一化的互相关值作为道集内各道参与模型道叠加的加权因子。具体模型道的表达式为

$$d_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i d_i(t) \quad (11)$$

其中 α_i 是经归一化的各地震道与其他地震道的互相关系数。

3 静校正量的求解方法及步骤

3.1 目标函数

本文剩余静校正量求解的目标函数为

$$\mathbf{O}(\mathbf{M}) = [\mathbf{T}_p - \mathbf{T}_s(\mathbf{M}) - \mathbf{T}_r(\mathbf{M})]^T \times \mathbf{C}^{-1} [\mathbf{T}_p - \mathbf{T}_s(\mathbf{M}) - \mathbf{T}_r(\mathbf{M})] \quad (12)$$

其中: \mathbf{M} 为由各炮点和接收点处的剩余静校正量构成的向量; \mathbf{T}_p 为由各地震道在各尺度下拾取的总时移量构成的向量; $\mathbf{T}_s(\mathbf{M})$ 和 $\mathbf{T}_r(\mathbf{M})$ 分别为由各地震道的炮点和接收点所组成的向量; \mathbf{C} 为数据拾取协方差矩阵。本文采用高斯—牛顿迭代法来求解上式这一优化问题,迭代格式为

$$\mathbf{M}_{k+1} = \mathbf{M}_k - \left[\frac{\partial^2 \mathbf{O}}{\partial \mathbf{M}^2}(\mathbf{M}_k) \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{O}}{\partial \mathbf{M}}(\mathbf{M}_k) \quad (13)$$

3.2 静校正量计算的具体步骤

根据影响剩余静校正量求解的因素分析,具体静校正实现步骤如下:

- (1) 设置最大静校正量限值,选取尺度模式,以设置的最大静校正量限值为依据,计算最大尺度;
- (2) 计算道集内各道的互相关函数,确定叠加权因子;
- (3) 根据尺度模式确定叠加尺度,形成该尺度对应的叠加模型道;
- (4) 计算地震道与共中心点道集模型道的相关函数,拾取时移量;
- (5) 对道集内各地震道进行时移,然后重复第(2)~第(4)步,如已达到尺度模式的最上限频率,则进入下一步;
- (6) 根据拾取的各地震道的总时移量,利用式(13)求解静校正量。

4 模型及实例试验

4.1 时移量求取的理论记录试验

为验证大时移量求取理论分析的正确性及有效性,对一理论道集各道的时移量进行了分析计算。我们选用一个共中心点道集,该道集共计 24 道,1ms 采样,记录长度为 5s,计算时窗为 0.5s。该道集是在理论地震道通过随机加入静校正时移产生,最大时移量为 100ms,地震道的视周期约为 35ms。该静校正量远大于地震信号视周期的一半(此为常规静校正方法的最大静校正量极限值),在此情况下,利用常规线性剩余静校正方法会陷入局部最优解,获取到错误的静校正量,出现“周波跳跃”现象。

图 1 是时窗内的原始地震道集示意图。图中左起的 24 道为该道集的地震道记录,右起第一道为该

道集 24 个地震道记录的叠加道记录,右起第二道为该道集理想模型道记录(没有静校正时移量的地震道记录)。从图中可以看出,受大静校正量的影响,道集中地震道的叠加道波形发生严重变异,该叠加道与道集内的各地震道相关性较差,这时用该叠加地震道与其他各地震道进行相关计算,通过相关最大值来拾取地震道的时移量可靠性差。

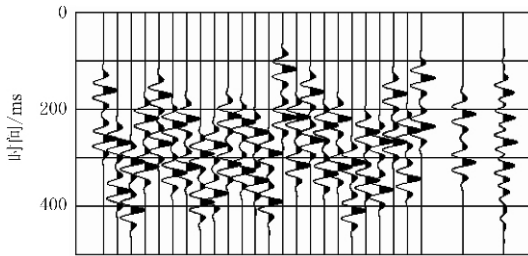


图 1 静校正前的原始地震道集

图 2 为地震道集的 2Hz 以下的分量记录,图中左起的 24 道为该道集的各地震道 2Hz 以下的分量记录,右起第一道为该道集 24 个地震道记录的叠加地震道 2Hz 以下的分量记录,右起第二道为该道集没有静校正时移量的地震道 2Hz 以下的分量记录。从该图中可以看出,叠加道形态与道集内的各地震道形态基本一致,前面的理论分析及图中显示都可证明,各地震道的差异主要是由于静校正所引起的地震道时移,这时叠加道与道集内的各地震道相关性好,通过确定相关函数的极值可以拾取正确的时移量,为获取正确的剩余静校正量提供了前提。

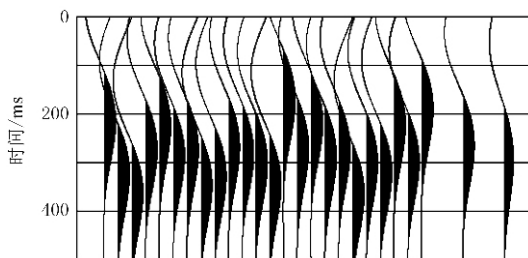


图 2 2Hz 以下地震道集分量记录

图 3 是利用 2Hz 以下低频分量地震记录计算的时移量进行时移后的地震道集记录。从图中可以看出,各地震道由静校正量引起的时移基本消除,但由于低频分量地震记录的幅值随时间变化缓慢,因而相关函数的变化也比较缓慢,故数据拾取的精度较低,同时由于叠加道形态与各地震道形态还有一定的差异,所以静校正量精度低,静校正后各地震道

来自同一层位的反射波还有一定的时差,但可以认为该尺度下获取的时移量是向正确时移量方向的一次较好逼近,各地震道的残余时移量较小。由本文的理论分析可知,要保证模型道与道集内各地震道有较好的相似性,从而提高拾取精度,静校正量和地震道频率是影响模型道与相关地震道相似的关键因素。静校正量越大,保证相似的地震波频率必须越低;静校正量越小,保证相似的频率可以提高。因而可以在此基础上采用逐步缩小尺度进行校正。

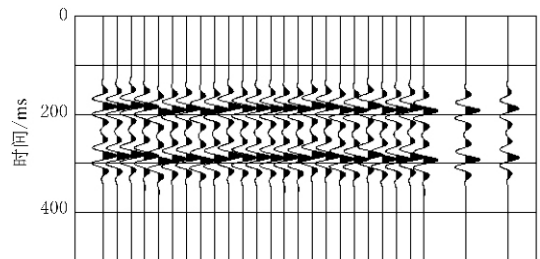


图 3 大尺度静校正后的地震道集

图 4 为经多尺度方法获取的时移量消除后的地震道集记录,该记录是在低频分量静校正后,按一定尺度模式逐步缩小尺度静校正后的地震记录。从图中可以看出因静校正量引起的时移量得到了较好的消除,各地震道的同相性明显增强。通过对计算的各地震道总时移量与各道真实的时移量对比发现,两者吻合很好,说明本文多尺度方法获取的时移量是可信的。

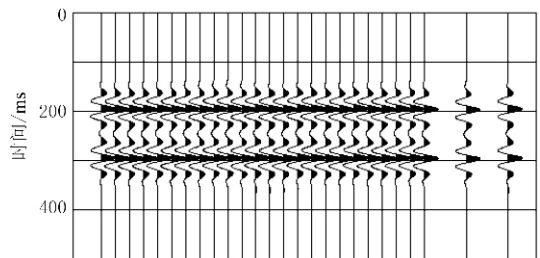


图 4 多尺度静校正后的地震道集

4.2 实际资料的静校正处理

利用本文方法对实际资料进行了试处理,图 5 与图 6 分别为 D 区的实际地震资料的初始叠加剖面和部分 CDP 道集(7 个道集)。该资料覆盖次数为 6 次,采样间隔为 2ms,利用线性插值方法对原始地震数据进行了插值,使其采样间隔为 1ms。为了检验本文方法的有效性,分别采用了本文和最大能量方法进行了剩余静校正计算。

图5显示该资料地震道的剩余静校正量较大,最大约40ms,而地震道的视周期约为35ms。最大剩余静校正量已大于地震波视周期的一半,本次处理采用的尺度模式为

$$f_n = 2 \times 2^{(n-1)} \quad (14)$$

这里 f_n 为各尺度的上限频率。根据实际资料的主频,最终确定最小尺度的频率为32Hz,故计算尺度共计5个,分别为2,4,8,16,32Hz。每个尺度进行一次时移量计算。在多尺度下计算的时移量次数为5次。在利用最大能量方法的静校正计算中,迭代计算的次数为5次。

图7与图8分别为本文方法和最大能量方法的静校正剖面。图8表明基于线性反演的最大能量方法不能够解决较大的剩余静校正量问题,出现了“周波跳跃”现象,而本文方法利用多尺度的基本思想较好地克服了大静校正量时移对静校正计算的影响。它们两者的静校正次数基本相当,但由于本文方法需要一定的尺度分解时间,因而计算效率略低于最大能量方法,但远高于模拟退火等非线性反演方法。

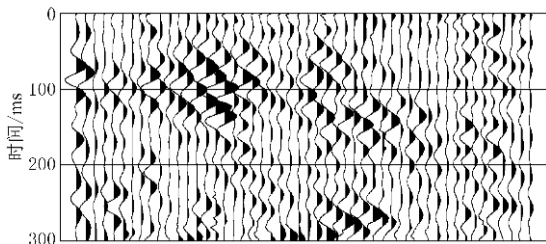


图5 初始叠加剖面

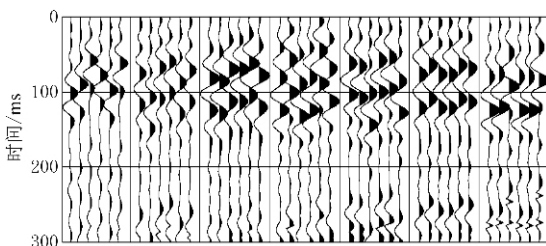


图6 CDP道集记录

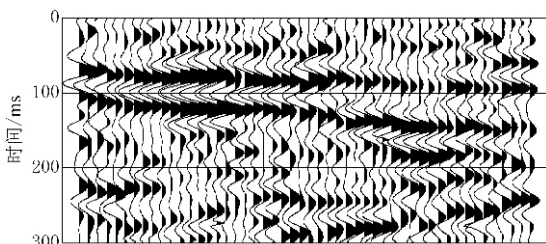


图7 本文方法的静校正剖面

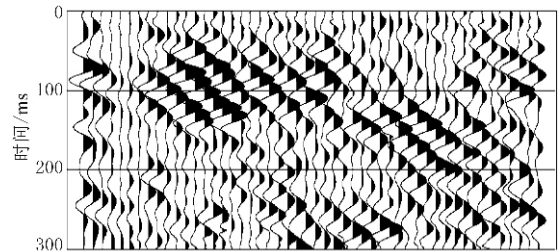


图8 最大能量方法的静校正剖面

5 结论

大静校正量的剩余静校正是实际地震资料处理中的一个棘手问题,通过对常规基于模型道的线性反演方法分析得出,大静校正量时移与地震波频率共同制约着模型道的形成质量,两者的乘积为一相对较小量时,模型道的形成质量是可信的。当该条件不满足时,由于模型道与相关地震道的较大差异,会出现“周波跳跃”现象。理论和实际计算表明,在解决大静校正量的剩余静校正问题时,本文提出的多尺度剩余静校正方法在一定程度上具有与非线性反演方法相同的计算效果,同时具有与线性反演方法相近的计算效率,且对处理人员的应用水平没有过高要求。

参考文献

- [1] Rothman D H. Automatic estimation of large residual statics corrections. *Geophysics*, 1986, 51:332~346
- [2] 井西利,杨长春,李幼铭等. 地震静校正全局最优问题的求解. *地球物理学报*, 2002, 45:707~713
- [3] Stork C, Kusuma T. Hybrid genetic autostatics; new approach for large amplitude statics with noisy data. *Expanded Abstracts of 62nd SEG Mtg*, 1992, 1127~1131
- [4] 姚姚. 地球物理非线性反演模拟退火法的改进. *地球物理学报*, 1995, 38:643~650
- [5] 林依华,尹成,周熙襄等. 一种新的求解静校正的全局快速寻优法. *石油地球物理勘探*, 2000, 35(1):1~12
- [6] 李录明,罗省贤. 复杂三维表层模型层析反演与静校正. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(6):636~646
- [7] 张继国,刘连升. 复杂区初至层析反演静校正. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(4):383~385
- [8] 苟量,彭真明,王克斌. 混合优化自动剩余静校正方法研究. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(4):454~458
- [9] 林依华,张中杰,尹成等. 复杂地形条件下静校正的综合寻优. *地球物理学报*, 2003, 46:101~106

(本文编辑:冯杏芝)