

· 处理方法 ·

基于褶积模型的动校正及其实现方法

董凤树* 陈浩林 刘原英

(中国石油东方地球物理公司海上勘探事业部)

董凤树,陈浩林,刘原英. 基于褶积模型的动校正及其实现方法. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 387~391

摘要 为了消除基于传统地震动校正过程中出现的动校正拉伸效应, 本文重新审视了动校正的物理意义, 即通过非零炮检距地震记录求取零炮检距处的自激自收旅行时, 以此为出发点从数学上给出了基于褶积模型的动校正(即所谓的真动校正)概念。在此基础上, 提出了利用空间—时间(滤波)叠加法实现向真动校正叠加的逼近。理论合成记录的试算和实际资料的处理结果均显示了该方法的可行性和有效性。

关键词 动校正 褶积模型 叠加 拉伸效应 双曲线 旅行时 炮检距

1 引言

自从 Buchholtz 首次揭示常规 NMO 校正的拉伸效应^[1] 以及 Dunkin 等对其进行研究^[2] 以来, 致力于消除拉伸效应的研究一直十分活跃。Rupert 等提出了称作 BMS (block-move-sum 分块移动合并) 的校正方法^[3], 该方法根据同相轴的分布交错划分一系列数据块, 对不同的块实行静态平移, 然后对平移后的块再进行合并; 近年来 Brouwer 还对 BMS 法做了进一步的研究, 使其有了新的发展^[4]。Bazelaire 提出了双曲线平移 (shifted hyperbolae) 法^[5], 即使用双曲线的焦点时间 t_p 和替代速度 v_{nmo} 。特别值得关注的是 Perroud 等提出无拉伸动校正 (Nonstretch NMO) 方法^[6], 即从调整速度参数入手, 实现接近传统动校正方式的无拉伸动校正处理。

以上研究都是基于传统的地震记录动校正理论, 针对其中所固有的动校拉伸效应采取各种相应辅助手段将其消除。为了消除实际的和理论上固有的动校拉伸畸变效应, 本文从重新审视动校正的物理意义开始, 从数学上给出基于褶积模型的真动校正概念, 提出采用空间—时间(滤波)叠加法实现向真动校正叠加的趋近。

2 基于褶积模型的动校正——真动校正的概念

动校正的基本物理意义就是通过非零炮检距地

震记录求取反射点(正)上方零炮检距的自激自收地震记录。传统的动校正实现过程在文献 [7] 中有详细介绍。这里对传统的动校正以变量替换形式加以一般性概括。若某个具有一定炮检距的道记录表示为

$$S = S(t) \quad (1)$$

式中 t 为记录时间(约定震源激发时刻为计时起点)。该道的非零炮检距接收点的双程旅行时 r 与相应反射点上方自激自收双程旅行时 r' 的关系为

$$r = m(r') \quad (2a)$$

把式(2a)中的旅行时 r 和 r' 分别视为非零炮检距地震记录的记录时间 t 和相应反射点上方自激自收地震记录的记录时间 t' , 则有

$$t = m(t') \quad (2b)$$

以式(2b)对式(1)进行变量替换, 得到的

$$S = S(m(t')) \quad (3)$$

即是传统上式(1)代表的地震记录的 NMO 地震记录。式(3)中 S 为地震记录的值; t' 被视为在零炮检距下的记录时间。这里把记录时间与旅行时相混淆, 并使式(3)表示的地震记录及其时间变量的物理意义含糊。

根据地震记录的褶积模型理论, 地震记录是地震子波与反射系数的褶积^[8]。设作为激发点→界面→接收点的非零炮检距旅行时 r 的函数的各个地层界面的反射系数为

$$R = R(r) \quad (4)$$

根据式(2a)对式(4)做变量替换, 则得到作为反射点

* 天津市大港区东方地球物理公司海上勘探事业部, 300280

本文于 2006 年 11 月 23 日收到, 第一次修改稿于 2007 年 3 月 26 日收到, 第二次修改稿于 2007 年 6 月 7 日收到。

上方的零炮检距自激自收双程旅行时 r' 的函数的各个地层界面的反射系数

$$R = R(m(r')) = R'(r') \quad (5)$$

设非零炮检距的地震记录表示为地震子波 $s(t)$ 与反射系数 $R(r)$ 的褶积

$$S(t) = s(t) * R(t) \quad (6)$$

则式(6)表示的地震记录所对应的自激自收(动校正后)地震记录 $S'(t)$ 应为地震子波 $s(t)$ 与反射系数 $R(r)$ 的褶积,即

$$S'(t) = s(t) * R(m(t)) \quad (7)$$

该式也就是地震子波与动校正后的反射系数时间函数的褶积。其中地震子波不变,而反射系数所对应的旅行时被校正。

我们把式(7)表示的地震记录相对式(6)表示的地震记录的变化称为基于褶积模型的动校正,把 $S'(t)$ 称为 $S(t)$ 的基于褶积模型的动校正地震记录。式(6)和式(7)中的 t 为记录时间,并且根据褶积的表示法,其中的反射系数函数中的旅行时也用 t 表示,但实际上是区分的。这里所做的合理的物理简化和特殊的数学处理是自明的,不再赘述。

因式(7)所表示的基于褶积模型的动校正与传统的动校正相比更符合动校正的物理意义,本文称其为真动校正。将式(7)按照褶积定义展开

$$s(t) * R(m(t)) = \sum_i s(t - r'_i) R(m(r'_i)) \quad (8)$$

也将式(3)按照褶积定义展开

$$S(m(t')) = \sum_i s(m(t') - r_i) R(r_i) \quad (9)$$

对比式(8)和式(9),可见式(3)和式(9)所代表的传统的动校正相当于反射系数中的旅行时未校正,而通过移动和拉伸子波达到校正记录时间的目的,所得到的动校正后的地震记录已不符合褶积模型理论,即不符合真正的地震记录的模式。因此传统的动校正不符合动校正的物理意义。

3 实现方法

从理论上讲,对地震记录做理想的反褶积,求出地震记录反射系数时间函数,就可直接进行真动校正。但这并不现实。本文将避开求取叠前真动校正记录,而是直接求取真动校正叠加道。

可以证明,如果式(6)成立,设 b 为一常数,则

式(6)可改写成

$$S(t+b) = s(t) * R(t+b) \quad (10)$$

下面我们开始用函数的下标 x 表示该函数对应的炮检距 x ,下标 i 表示离散时间值的序号。对于任意自激自收时间 t_i 所对应的动校正量 $m_x(t_i) - t_i$ 是一个常数,则将式(10)写成

$$\begin{aligned} S_x(t + (m_x(t_i) - t_i)) \\ = S(t) * R_x(t + (m_x(t_i) - t_i)) \end{aligned} \quad (11)$$

在此可以方便地引入一个用于计算优化的函数 $f(t)$,并考虑对一个 CMP 道集的所有道做如下双重求和

$$\begin{aligned} \sum_i f(t - t_i) \sum_x S_x(t + (m_x(t_i) - t_i)) \\ = \sum_i f(t - t_i) \sum_x s(t) * R_x(t + (m_x(t_i) - t_i)) \\ = \sum_i \sum_x f(t - t_i) \sum_j s(t - t_j) R_x(t_j + (m_x(t_i) - t_i)) \\ = \sum_x \sum_i \sum_{j=i} f(t - t_i) s(t - t_j) \times \\ \quad \times R_x(t_j + (m_x(t_i) - t_i)) \\ = \sum_x \sum_i \sum_{j=i} f(t - t_i) s(t - t_j) \times \\ \quad \times R_x(t_j + (m_x(t_i) - t_i)) + \\ \quad + \sum_x \sum_i \sum_{j \neq i} f(t - t_i) s(t - t_j) \times \\ \quad \times R_x(t_j + (m_x(t_i) - t_i)) \end{aligned} \quad (12)$$

因为同相叠加加强,不同相叠加相对减弱,式(12)在一定程度上趋近于

$$\begin{aligned} \sum_x \sum_i \sum_{j=i} f(t - t_i) s(t - t_j) R_x(t_j + (m_x(t_i) - t_i)) \\ = \sum_x \sum_i f(t - t_i) s(t - t_i) R_x(t_i + (m_x(t_i) - t_i)) \\ = \sum_x \sum_i f(t - t_i) s(t - t_i) R_x(m_x(t_i)) \\ = \sum_x f(t) s(t) * R_x(m_x(t)) \end{aligned} \quad (13)$$

因此

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_x f(t - t_i) S_x(t + (m_x(t_i) - t_i)) \rightarrow \\ \sum_x f(t) s(t) * R_x(m_x(t)) \end{aligned} \quad (14)$$

或

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_x f(t - t_i) S_x(t + (m_x(t_i) - t_i)) \\ = \sum_x f(t) s(t) * R_x(m_x(t)) + N_d(t) \end{aligned} \quad (15)$$

我们称该式左端

$$\sum_i \sum_x f(t-t_i) S_x(t+(m_x(t_i)-t_i)) \quad (16)$$

为空间—时间叠加道,其计算方法为空间—时间叠加法。定义

$$N_d(t) = \sum_x \sum_i \sum_{j \neq i} f(t-t_i) \times s(t-t_j) R_x(t_j+(m_x(t_i)-t_i))$$

为本算法的衍生噪声。式中 $f(t)$ 为子波系数,是人为给定的。我们把 $S_x(t+(m_x(t_i)-t_i))$ 称为空间—时间叠加道的 x, t_i 分量,而当 t_i 一定时的所有 x, t_i 分量称为 t_i 分量集。

当 $f(t) \equiv 1$ 时, $\sum_x f(t)s(t) * R_x(m_x(t)) = \sum_x s(t) * R_x(m_x(t))$, 与式(7) 比较,可知为真动校正叠加,通常是子波被因子 $f(t)$ 改造的真动校正叠加。若设定一个 $f(t)$,使得当 t 在使子波函数不为零的范围内 $f(t)=1$,且当 t 在该范围外 $f(t)$ 过渡为 0,则可使式(15)左端更高效地趋近于真动校正叠加,衍生噪声 $N_d(t)$ 更低。

更一般地讲,式(15)建立了空间—时间叠加道与真动校正叠加道之间的关系,空间—时间叠加道就是含噪声的真动校正叠加道。所以空间—时间叠加法把不能回避的动校拉伸问题转换为噪声问题。而信号中存在不规则的、与有效信号有差异的噪声则是地震数据处理中比较熟悉和较容易解决的问题。

引入一个滤波算子 F ,形式上对单个 x, t_i 分量起作用,去除在 t_i 分量集中的水平同相轴之外的成分,保留水平同相轴的成分,则

$$\sum_i \sum_x f(t-t_i) F S_x(t+m_x(t_i)-t_i) = \sum_x f(t)s(t) * R_x(m_x(t)) \quad (17)$$

是理想的真动校正叠加。同样,我们称式(17)等号左端为空间—时间滤波叠加道,相应的计算方法为空间—时间滤波叠加法。

4 试算结果及对比分析

4.1 合成记录的处理

我们首先用合成记录验证本文所述方法的可行性和有效性。建立一个简单的具有 6 个反射层的地质模型,图 1 是基于此模型的地震合成记录 CMP 道集。图 2 是利用处理系统中的动校正模块做了不

完整的传统动校正的结果,显然其中每一层上的远炮检距道都保留因动校正拉伸而引起的畸变。我们对传统动校正数据进行了严格切除(图 3)。图 4 是 CMP 叠加的结果。由于不含噪声并做了精细的动校拉伸切除,所以图 4 几乎等同于自激自收的剖面形态。

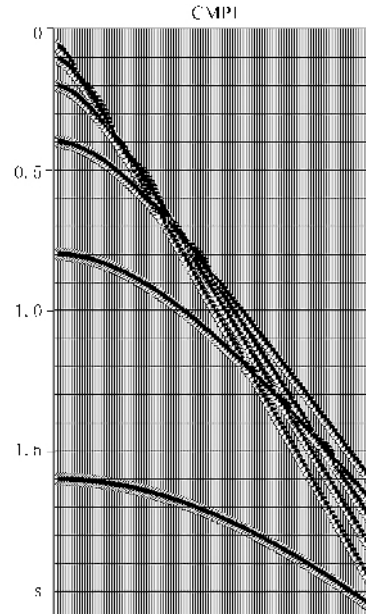


图 1 理论模型对应的 CMP 道集

图 5 显示了本文所引入的空间—时间叠加中的 0.05s 分量集数据。图 6 是空间—时间叠加法的最终 CMP 叠加剖面,可见其相对有效信号较弱的衍生噪声背景。为了从视觉上突出衍生噪声的存在,图 6 中的剖面深层已做了部分滤波。进行宽带通滤波可以在保护有效信号的基础上去除超高和超低频的干扰成分,图 7 是滤波后的剖面。图 8 是空间—时间滤波叠加过程中通过 F-K 滤波得到的 0.2s 分量集数据,可见衍生噪声在叠加前被有效压制。图 9 显示了空间—时间滤波叠加法的直接结果。

4.2 实际应用

对所选取的实际资料用式(16)取 $f(t) \equiv 1$ 进行粗略的试算,得到图 10 所示的一段叠加剖面。图 11 是对相同资料进行了传统动校正处理的叠加剖面。图 10 和图 11 剖面的其他处理流程大致相同。图 10 中 1.7s 处得到了更清晰的同相轴。剖面整体噪声水平比较高是由于处理中没有去除衍生噪声。在真动校正叠加方法中适当选取尽量不改变子波形状的梯形 $f(t)$ 因子去除衍生噪声,得到图 12 所示具有更高信噪比的叠加剖面。

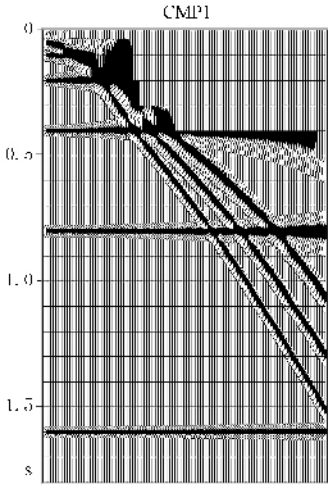


图2 不完全传统动校正

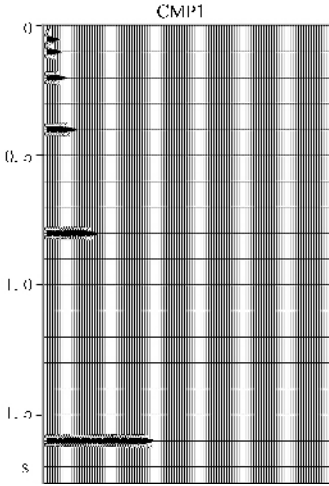


图3 常规动校正拉伸切除

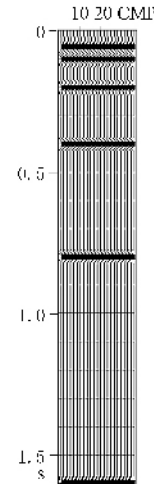


图4 传统动校正叠加

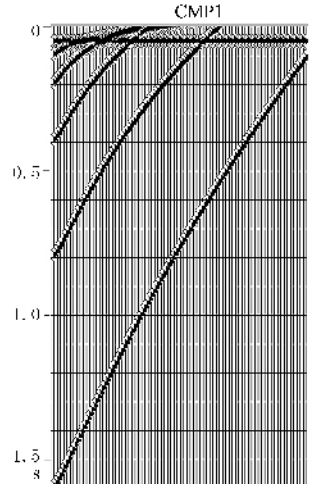


图5 空间—时间叠加的0.05s分量集

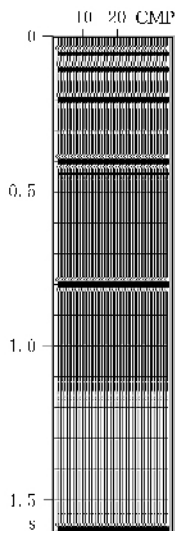


图6 含干扰的真动校正叠加剖面

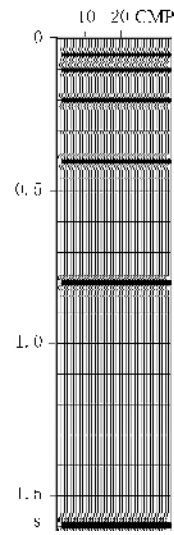


图7 宽带滤波后真动校正叠加剖面

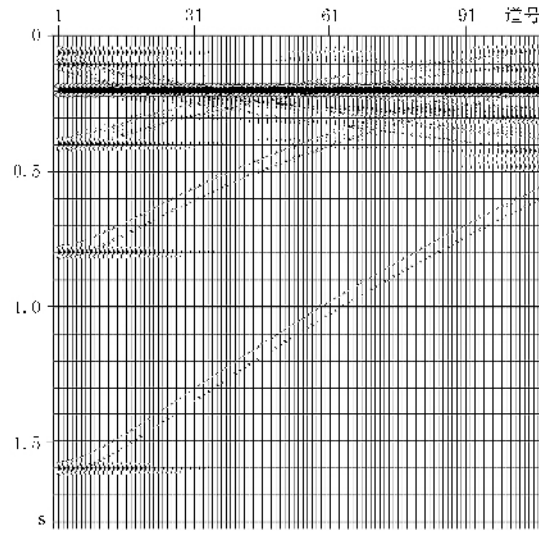


图8 空间—时间滤波叠加后的0.02s分量集

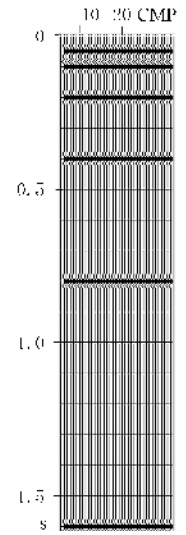


图9 空间—时间滤波叠加剖面

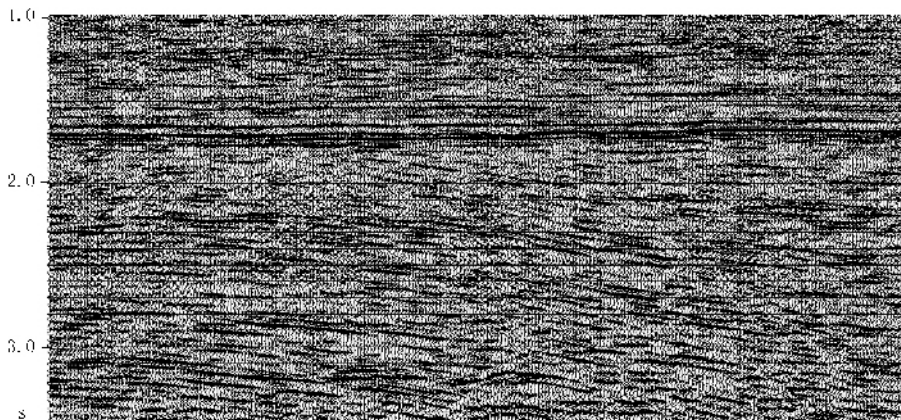


图10 含衍生噪声的真动校正叠加剖面

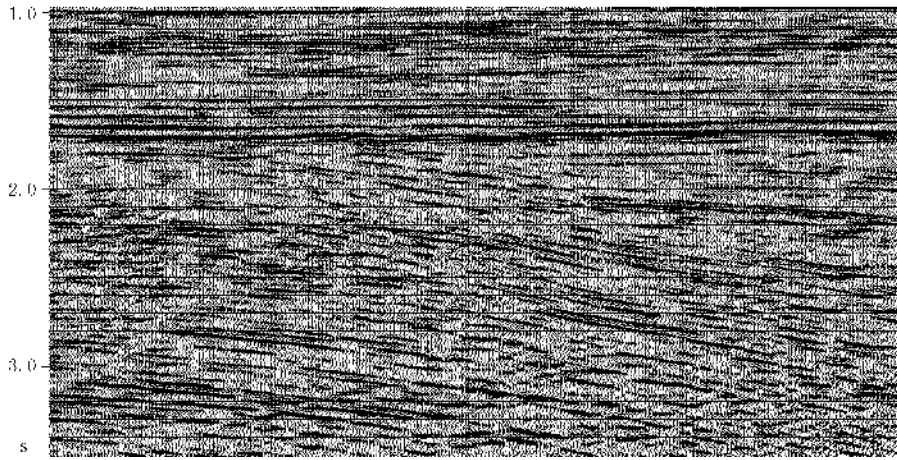


图 11 传统动校正叠加剖面

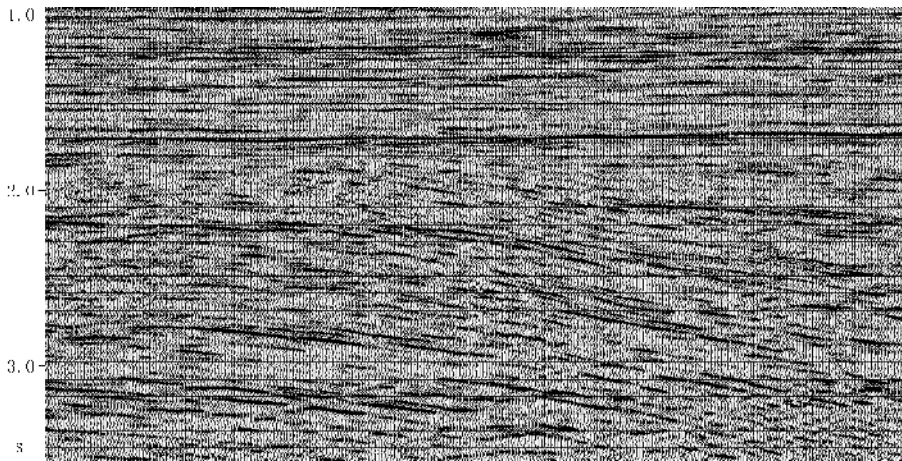


图 12 做了衍生噪声去除处理的真动校正叠加剖面

5 结束语

本文提出了基于褶积模型的真动校正概念及其实现方法。文中的理论推演试图加深对动校正概念的理解。本文还通过使用合成记录和实际资料的试算,验证了方法的可行性和有效性。笔者期望本文阐述的概念可为动校正及相关问题的研究提供一条思路。

本文中的理论工作和相应公式是作者在东方地球物理公司海上事业部工作期间完成的。感谢该部提供了良好工作环境和融洽的合作氛围等。

参考文献

[1] Buchholtz H. A note on signal distortion due to dy-

namic(NMO) corrections. *Geophysical Prospecting*, 1972, 20(2):395~402

[2] Dunkin J W and Levin F K. Effect of normal moveout on a seismic pulse. *Geophysics*, 1973, 38, 635~642

[3] Rupert G B and Chun J H. The block move sum normal moveout correction. *Geophysics*, 1975, 40, 17~24

[4] Brouwer J H. Improved NMO correction with a specific application to shallow-seismic data. *Geophysical Prospecting*, 2002, 50, 225~237

[5] de Bazelaire E. Normal moveout revisited-Inhomogeneous media and curved interfaces. *Geophysics*, 1988, 53, 143~157

[6] Perroud H and Tyge M. Nonstretch NMO. *Geophysics*, 2004, 69, 599~607

[7] Yilmaz Ö. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, 1987

[8] 陆基孟. 地震勘探原理(下册). 山东东营:石油大学出版社, 1993

(本文编辑:朱汉东)