

# 时移动校正和叠加方法

史付生<sup>1</sup> 王 勇<sup>2</sup>

(1. 河北建筑科技学院, 邯郸 056038; 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要: 在水平层状介质假设情况下, 推导了反射波时距曲线的表达式, 指出: 在对水平层状介质情况下, 反射波时距曲线是一时移双曲线. 通过对理论模型和实际资料的处理, 表明时移动校正和叠加方法具有高保真、高分辨率和明显的叠加成像效果. 同时, 用时移动校正  $\tau_0$  分析谱计算层速度较以往用 Dix 公式由叠加速度计算层速度精度要高. 这种方法不仅可以用于复杂构造的地震资料的叠加成像, 也可以应用到高分辨率处理的流程中.

关键词: 动校正; 时距曲线; 叠加.

中图分类号: P315.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)01-0093-05

作者简介: 史付生, 男, 讲师, 1959年生, 1992年毕业于中国地质大学(武汉)应用地球物理系, 获硕士学位, 长期从事地球物理勘探方面的教学和石油物探资料解释的研究工作.

地震反射波的动校正和叠加处理是地震资料数字处理中的关键技术之一. 多年来, 在地震资料数字处理中, 一直使用在水平均匀介质假设情况下, 道集上地震反射波时距曲线是以共中心点(common midpoint, CMP)在地面上的投影为原点的双曲线的动校正公式. 然而, 对于多数实际中存在的层状介质情况, CMP道集上的反射波时距曲线并不满足共原点双曲线, 因此, 现行的动校正和叠加处理不能取得满意的叠加剖面.

对水平层状介质情况下的反射波时距曲线的表达式, 不少学者曾做过研究, 认为水平层状介质情况下的反射波时距曲线表具有时移双曲线的特征<sup>[1,2]</sup>. 本文通过对前人工作的归纳总结, 将其应用于实际.

## 1 时移反射波时距曲线方程

对于水平层状介质情况下的反射波时距曲线, 可用参数方程来描述<sup>[3]</sup>:

$$t(p) = 2 \sum_{k=1}^N \frac{\Delta Z_k / V_k}{\sqrt{1 - (\rho V_k)^2}}, \quad (1)$$

$$x(p) = 2p \sum_{k=1}^N \frac{\Delta Z_k V_k}{\sqrt{1 - (\rho V_k)^2}}. \quad (2)$$

式中:  $x$  是炮检距,  $p = dt/dx$  是射线参数,  $Z_k$  是某一层地层的厚度,  $V_k$  是某一层地层的速度,  $N$  是地层层数. 由于  $\rho V_k < 1$ , 对(1)式和(2)式分别使用二项式展开, 得

$$t = t_0 \sum_{j=0}^{\infty} a_j u_{2j} p^{2j}, \quad (3)$$

$$x = t_0 \sum_{j=0}^{\infty} a_j u_{2(j+1)} p^{2j+1}. \quad (4)$$

式中:  $a_j = \begin{cases} 1, & j=0; \\ (2j-1)!! / (2j!), & j>0. \end{cases}$

$$t_0 = 2 \sum_{i=1}^N \Delta \tau_i, u_j = \sum_{k=1}^N \Delta \tau_k V_k^j / \sum_{k=1}^N \Delta \tau_k.$$

为了求得  $t$  作为  $x$  的函数, 对(3)式和(4)式展成在  $x=0$  处的泰勒级数

$$t = t_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{t^{[k]}(0)}{k!} x^k. \quad (5)$$

式中:  $t^{[k]}(0) = \left. \frac{d^k t}{dx^k} \right|_{x=0}$ .

由于  $t$  是关于  $x$  对称, 所以  $t$  是  $x$  的偶函数, (5)式又可进一步表达成

$$t(x) = t_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{t^{[2k]}(0)}{(2k)!} x^{2k} \quad (6a)$$

或

$$t(x) = t_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Gamma_{k-1}}{2k} x^{2k}. \quad (6b)$$

根据 Taner 等<sup>[2]</sup>以及 Castle<sup>[1]</sup>的研究结果, (6b) 式中级数展开式的前 3 项系数是

$$\Gamma_0 = 1/t_0 u_2, \quad (7a)$$

$$\Gamma_1 = -u_4/(2t_0^3 u_2^4), \quad (7b)$$

$$\Gamma_2 = 3u_4^2/(4t_0^5 u_2^7) - 3u_4/(8t_0^5 u_2^6). \quad (7c)$$

那么, 得到(6)式级数展开式的前 4 项的表达式

$$t = t_0 + x^2/(2t_0 u_2) - u_4 x^4/(8t_0^3 u_2^4) + [u_4^2/(8t_0^5 u_2^7) - u_4/(16t_0^5 u_2^6)]x^6. \quad (8)$$

应用高斯超几何级数展开, (8)式可表达成

$$t(x) \approx t_0 \left[ 1 - \frac{u_2^2}{u_4} \right] + \sqrt{\left[ t_0 \frac{u_2^2}{u_4} \right]^2 + \frac{u_2}{u_4} x^2}. \quad (9)$$

令

$$S(x) = u_4/u_2^2, \quad (10a)$$

$$\tau_S(x) = t_0[1 - 1/S(x)], \quad (10b)$$

$$\tau_0(x) = t_0/S(x), \quad (10c)$$

$$V^2(x) = S(x)u_2. \quad (10d)$$

将(10)式代入(9)式, 得

$$t(x) = \tau_S + \sqrt{\tau_0^2 + x^2/V^2}. \quad (11)$$

(11)式表明, 水平层状介质情况下, 反射波的时距曲线方程是具有时移量  $\tau_S$  的双曲线方程。

## 2 时移动校正公式的实现

### 2.1 时移动校正公式

将(10)式中  $\tau_S$  的表达式代入(11)式, 整理得

$$(t - t_0 + \tau_0)^2 = \tau_0^2 + x^2/v^2. \quad (12)$$

因为  $\delta_i = t - t_0$  是 CMP 道间时差, 所以(11)式又可表达成

$$(\delta_i + \tau_0)^2 = \tau_0^2 + x^2/v^2. \quad (13)$$

(12)式和(13)式即是时移动校正公式. 它们与常规动校正公式的区别在于: 动校正的未知量由  $(t, v_a)$  变成  $(t, \tau_0, v)$ .  $v_a$  是叠加速度,  $v$  是水平层状介质时距曲线方程中引入的介质速度, 一般来说,  $v$  小于  $v_a$ . 因此, 在应用时移动校正公式时, 不妨设  $v$  等于一小常速度 (小于或等于第一层介质速度).

### 2.2 由静校正实现动校正

根据(13)式, 可以求得计算地震道的动校正量公式:

$$\delta_i = \sqrt{\tau_0^2 + x^2/v^2} - \tau_0. \quad (14)$$

可以看出, (14)式与  $t_0$  无直接关系. 该方法进行各道的动校正只需要有与炮检距有关的静态时移量、输入介质速度  $v$  和叠加前用于 CMP 资料的聚焦时间  $\tau_0$ . 因此, 这种方法不会产生动校正后波形拉伸问题. 叠加后地震剖面具有较好的保真度.

### 2.3 扫描空间的确定

在实施成像分析的过程中, 如果能事先估计出  $\tau_0$  值的范围, 可以较大程度地提高计算效率, 同时又可以节省不必要的资源浪费. 比较(13)式与如下常规的时距曲线方程

$$(t_0 + \delta_i)^2 = t_0^2 + (x/v_a)^2. \quad (15)$$

式中:  $v_a$  是叠加速度.

解方程(13)和方程(15), 得:

$$v_a = v(2\tau_0 + \delta_i)^{1/2}/(2\tau_0 + \delta_i)^{1/2}. \quad (16)$$

分析(16)式可知, 当  $\delta_i$  的值与  $\tau_0$  和  $t_0$  的值比较是小数时, 只要能确定处理地震资料所在地区的最大叠加速度值  $v_a$ , 就可确定不同时间所对应的  $\tau_0$  值.

令  $\delta_i = 0$ , 得

$$\tau_0 = t_0(v_a/v)^2. \quad (17)$$

## 3 计算层速度公式

将(12)式进行级数展开 (保留四阶近似), 有

$$t(x) = t_0 + \frac{x^2}{2v^2\tau_0} - \frac{x^4}{8v^4\tau_0^3} + O(x^6). \quad (18)$$

对比(18)式与(8)式, 得

$$t_0 = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (19)$$

$$v^2\tau_0 = \left( \sum_{i=1}^n v_i^2 t_i \right)^2. \quad (20)$$

(20)式中的  $v$  是第一层介质的速度, 可以看成一常数. 那么, (20)式的差分形式可表示成:

$$v_{\text{int}}^2 = v^2 \cdot \Delta\tau_0/\Delta t_0. \quad (21)$$

(21)式即是应用时移动校正公式的成像分析结果计算层速度的公式.

概括起来, 时移动校正和叠加以及层速度计算的实现步骤如下: (1) 输入一个 CMP 道集; (2) 给出一个初始速度  $v$  (一般选浅层最小速度), 用(12)式对 CMP 道集中的每一地震道的所有反射时间, 在给定的  $\tau_0$  范围内计算  $t_0$  值, 形成  $t_0 \sim \tau_0$  谱; (3) 对



图 1 三层介质模型分析结果

Fig. 1 Analysed result of three-layer medium model

a. 用射线追踪正演的共同中心点 CMP 道集记录; b. 时移动校正  $\tau_0$  分析谱; b<sub>1</sub>. CMP 记录; b<sub>2</sub>.  $\tau_0$  分析谱; b<sub>3</sub>. 聚焦能量; c. 校正和叠加结果; c<sub>1</sub>. 常规动校正和叠加结果; c<sub>2</sub>. 时移动校正和叠加结果

所得到的  $t_0 \sim \tau_0$  谱进行分析, 在不同的  $t_0$  上选取最大能量所对应的  $\tau_0$  值; (4) 将步骤(3)中的解释结果代入(14)式, 计算 CMP 道集中的每一道不同时间段的校正量  $\delta_t$ , 然后, 逐段进行校正; (5) 对校正后的地震道叠加; (6) 应用步骤(3)中的解释结果, 使用(21)式计算层速度.

## 4 计算实例及效果分析

为了验证时移动校正成像方法的有效性, 以下结合理论模型计算结果和实际资料处理结果给予讨论说明.

### 4.1 层状介质模型

为了验证方法的正确性, 我们设计了一个三层介质模型. 第一层为水平反射界面, 双程垂直反射时间为 0.6 s, 介质速度为 2 000 m/s; 第二层同样是水平反射界面, 双程垂直反射时间为 0.9 s, 介质速度为 2 500 m/s; 第三层为倾斜反射界面, 倾角为 30°, 双程垂直反射时间为 1.2 s, 介质速度为 3 000 m/s. 三层介质模型分析结果如图 1, 从图 1b 中可以很清楚地看出时移动校正的成像时间  $\tau_0$  和对应的  $t_0$  时间. 对比图 1c<sub>1</sub>, 1c<sub>2</sub> 可见: (1) 在常规动校正中, 由于大炮检距记录道的动校存在较严重的拉伸作用, 影响了叠加道的质量; (2) 时移动校正和叠加结果较常规动校正和叠加结果具有较高的保真度. 图 2 是使

用图 1b 分析结果计算的层速度结果, 计算结果与给定的模型速度相差较小.

### 4.2 实际资料处理及效果分析

图 3a 是我国西部某盆地一条经二维精细处理的地震叠加剖面. 该区地下受挤压作用成逆推覆地质构造, 造成地下地层产状变化大, 地层速度纵横向变化剧烈, 多处呈速度翻转. 勘探目的层较深, 在 2.5 s 以下. 因此, 采用常规的速度分析和动校正叠加方法不能取得满意的结果. 图 3b 是经时移动校正成像方法得到的地震叠加剖面. 与图 3a 比较, 时移动校正成像在地震剖面上信噪比高, 所反映的地质



图 2 层速度计算结果

Fig. 2 Calculated interval velocities

图中实线由时移动校正  $\tau_0$  分析谱, 使用文中(21)式计算得到, 与实际相差较小; 虚线由常规速度分析, 使用 Dix 公式计算得到



图 3 二维精细(a)和时移动校正(b)方法处理的地震叠加剖面

Fig. 3 Processed stack sections by time-shifted NMO and conventional method

由图上可见在 CMP190~270 的范围内, 3.3 s 左右的反射层明显清楚

构造清楚.

## 5 结论

时移动校正叠加方法与常规的动校正叠加方法相比具有以下特点:(1)常规的动校正叠加方法是在假设地下介质为均匀水平界面情况下提出的,时移动校正叠加方法是在假设地下介质为水平层状地层情况下提出的.因此,后者较前者更接近实际地层情况.(2)时移动校正叠加方法对于校正炮检距时差使用静态时移的方法.因此,它不存在动校正拉伸畸变

问题.(3)实际资料处理表明:尽管时移动校正方法是在假设地下介质是水平层状地层情况下提出的,但对于复杂地质构造地区,它仍然优于常规的动校正叠加方法.(4)用时移动校正分析谱计算的速度比由叠加速度计算的速度精度要高.

### 参考文献:

- [1] Castle R J. A theory of normal moveout [J]. *Geophysics*, 1994, 59(6): 993~999.
- [2] Taner M T, Koehler F. Velocity spectra-digital computer derivation and application of velocity functions [J]. *Geophysics*, 1969, 34: 859~881.
- [3] 长春地质学院.地震勘探[M].北京:地质出版社,1980.

## AN APPROACH TO TIME-SHIFTED NORMAL MOVEOUT AND STACKING

Shi Fusheng<sup>1</sup> Wang Yong<sup>2</sup>

(1. Hebei Institute of Architectural Science and Technology, Handan 056038, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The expression of the time-interval curve of the reflective waves is derived on the condition of the horizontal layered strata, indicating that the time-interval curve of the reflective waves is a time-shifted hyperbola in the layered strata. The processing of theoretical model and real data shows that the time-shifted normal moveout and stacking may produce a high-fidelity, high-resolution and accurate stacking image effect. At the same time, the interval velocity derived from the time-shift-corrected spectrum  $\tau_0$  is more accurate than

that derived from the traditional Dix-equation-calculated stacking. This method is not only used for the stacking image of the seismic data in complex area, but also for the flow chart of the high-resolution processing.

**Key words:** normal moveout; time-interval curve; stack.

\* \* \* \* \*

(上接 70 页)

质学院徐中信教授介绍了对美方科学工作者的印象:他们的研究思路有值得中方借鉴之处;他们工作热情高,身体素质好.第一阶段野外工作共完成了 100 km 的剖面试验.1993 年进入室内研究阶段.同年 12 月,英国《自然》杂志发表中方首席科学家赵文津、多尔·内尔森等人的论文“深地震反射提供的印度大陆向藏南下面俯冲的证据”.

在 INDEPTH 项目开展过程中,中方建立了自己的深部资料处理中心,中美双方先分别处理资料,然后进行交流讨论,找出双方的优缺点,再作进一步处理、改进.双方在野外数据采集、超深地震资料处理、地球物理和地质解释方面密切合作,及时交流.双方互相尊重,合作十分成功.1995 年 11 月,美国《科学》杂志发表了专文,以“正确的合作可以拯救生命和移动大山”为题,介绍了中美合作的 INDEPTH 的成果,对中国有关当局向美国开放喜马拉雅边界地区给予了高度的评价.

由于中美合作 INDEPTH 第一阶段取得了成功,双方在有关部门的支持下,于 1994 年 1 月 14 日签署了开展 INDEPTH 项目第二阶段研究协定,并于当年初进藏开展野外工作,在雅鲁藏布江缝合带两侧开展深反射和多学科的合作研究,探测缝合带两侧结构构造.完成深地震反射剖面 240 km,利用 9 台 REFTEK 型宽频地震仪器,进行为期半年的记录观测.这一阶段试验期间,七八位德国科学家也参加了合作研究,发挥了很大作用,他们带来了 30 台 REFTEK 型仪器负责两线广角反射观测;加拿大地质调查局大地电磁专家托恩斯也带着 ZIMS 型长周期仪器,开展了西藏高原首次长周期大地电磁场观测.这样,中美合作发展成中、美、德、加等 4 国合作研究,参与的科学家来自 9 个国家.

中方采取了灵活的开放式管理方法,即少数人

员固定,多数人员流动,尽量吸收年轻的硕士、博士生参加. INDEPTH 第一阶段中美科学家的室内资料对比了 3 次,地质解释也对比了几次.第二阶段,中方对资料处理了 4 遍,反映中国科学家严谨治学、工作扎实的特点.美国国家科学家基金会对 INDEPTH 项目前两阶段做的评论都不错,1996 年 8 月在北京召开的第 30 届世界地质大会上,国际岩石圈委员会主席,美国休斯顿大学伯克教授在主旨发言中谈到: INDEPTH 项目的合作模式可能是今后解决重大地学基础问题的可效仿模式.1996 年 12 月 6 日出版的美国《科学》杂志 274 卷中,发表了 INDEPTH 项目 5 篇论文,中、美科学家在这一研究工作中发挥了同等重要的作用,中国自然科学基金会学刊也发表了介绍 INDEPTH 项目研究的专文.

第三阶段将使用更多的 REFTEK 型地震仪进行野外工作,野外记录两年,室内研究两年.这是一项跨世纪工程,工作量将比前两期大数十倍,争取继续完成深地震反射剖面 200 km,广角剖面长 400 km,双方已就 INDEPTH 第三阶段合作研究有关问题于 1998 年 5 月达成协议. INDEPTH 项目中方首席科学家赵文津认为:项目第三阶段原设计包括地球物理、地质、地球化学等多学科的研究内容,将视资金情况滚动逐步开展起来,中方重视同美方的合作,也希望德、法等国科学家参与,并希望同南亚地区、尼泊尔、巴基斯坦加强合作研究,开展横穿喜马拉雅造山带的地质地球物理综合研究.中国有很多地质构造独特的地区,包括天山、喀喇昆仑山、南海等,中方已有长期研究的成果和经验,也希望与包括美国在内的海外科学家,就这些地区的地质问题开展合作研究.中方重视基础科学与应用科学的衔接,希望通过研究深部地质探究深部成矿区域背景,通过研究盆地形成演化及油气生成关系,加快开发当地资源,从而促进西藏及附近地区的经济发展.