

物 理 勘 探

适用速度垂向变化的 TVDMO 技术

陈 广 思

(石油工业部地球物理勘探局)

摘要

陈广思：适用速度垂向变化的 TVDMO 技术，《石油地球物理勘探》，23 (4)

1988: 411~434

倾斜时差校正技术 (DMO)，用于构造复杂地区的地震资料处理已显示出较好的效果。但由于时域和 F-K 域 DMO 方法耗费机时或占用计算机资源太多，仍然难以广泛应用。目前使用的只是一种简易快速 DMO 方法。

我国的多数盆地为砂、泥岩沉积盆地，其速度呈垂向线性变化，在断层或构造复杂区存在叠加速度多值问题，仅采用目前已有的快速 DMO、时域 DMO 和 F-K 域 DMO 等方法均不能很好地克服多值问题。

本文从曲射线偏移成像原理出发，提出了适用于速度呈垂向线性变化的 TVDMO 技术。这种方法只需要对现有的时域 DMO 技术稍加修改即可实现。修改主要点就是把时域 DMO 的偏移速度，根据偏移距分别乘上一个小于 1 的系数。本文也论证了省略 DMO 处理流程中动校正与反动校正这两个步骤的方法。

ABSTRACT

Chen Guangsi: Time-variant dip moveout (TVDMO) technique applying to the case of vertical velocity variation, OGP, 23 (4) 1988: 411~434

Dip moveout (DMO) correction technique creates quite good result in processing the seismic data collected from the area where geological structure is complex. However, DMO techniques in time domain and F-K domain still can not be widely used at present because they take too much time or computer resource. Now we only use the simple fast DMO method in the data processing.

Most sedimentary basins in China are covered with sand and mud sediments in which seismic velocity is linear with depth. Furthermore, in the area where faults and structures are complex, we often have

multiple stacking-velocity value problem, which can not be ideally solved using fast DMO, time-domain DMO and F-K domain DMO methods.

The time-variant dip moveout (TVDMO) technique applying to the case where seismic velocity is linear with depth is put forward on the basis of imaging principle in curve ray migration. TVDMO technique is essentially a modified time-domain DMO technique. The modification is only to multiply time-domain DMO migration velocities by corresponding K factors less than 1. This paper also demonstrates the simplified DMO processing flow which has neither NMO correction step nor inverse NMO correction step.

前　　言

在地下构造复杂区，由于常规的共中心点叠加所采用的叠加速度，就某时刻而言只对所选定的倾角具有较好的叠加成像效果，而对同一时刻其它倾角的反射波、断面波或绕射波均有不同程度的削弱，从而影响了复杂地区的叠加效果。

为解决上述问题，人们曾提出用叠前偏移方法。但叠前偏移处理工作量很大，而且偏移成像对所采用的偏移速度要求十分苛刻，因此要获得一条优质的叠前偏移剖面，将花费大量的机时。

1978年之后出现了一系列叠前部分偏移方法，即（DMO方法），如1978年的DEVELISH^[8]；1980年Yilmaz等人的叠前部分偏移（PSPM）；1984年Hale的DMO^[7]；1985年吕牛顿的反射点扫描叠加；1986年陈祖传的时域DMO^[2]。近年来国内外从事这一方面研究的文章不胜枚举。

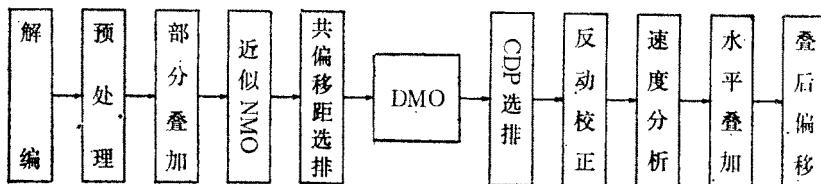


图1 DMO 处理流程

DMO技术多数人是采用零炮检距偏移（即叠后偏移技术）技术实现的，只有个别^[2]人，采用非零炮检距偏移技术（即叠前偏移技术）。现着重介绍一下DMO技术的原理。DMO的处理流程示于图1。图中部分叠加只是为了减少处理工作量，共偏移距选排即为共炮检距剖面，CDP选排相当于共中心点道集。现以Hale方法为主说明NMO和DMO的原理^[1]，^[7]。在以恒速均匀介质为前提条件下，共中心点时距方程为

物理勘探

物理勘探

令 $V_{NMO} = V/\cos\phi$, 则有

$$T = \left(T_0^2 + \frac{x^2 \cos^2 \phi}{V^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$T = \left(T_0^2 + \frac{x^2}{V_{NMO}^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中： T_0 是中心点处的零炮检距反射时间； x 是炮检距； ϕ 是反射界面的倾角。把式（1）改写为

$$T = \left(T_0^2 + \frac{x^2}{V^2} - \frac{x^2 \sin^2 \phi}{V^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

令

$$T_N = \left(T_0^2 - \frac{x^2 \sin^2 \phi}{V^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

则有

$$T = \left(T_N^2 + \frac{x^2}{V^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

使用与倾角无关的速度作动校正，把 T 通过式（5）校正到 T_N ，即为 NMO 校正。而把 T_N 经式（4）校正到 T_0 ，则称为 DMO 校正。在常规叠加中，采用式（2），每次只能选用一种倾角的叠加速度，因而在同一个叠加剖面上无法照顾这种倾角。Hale 在 F-K 域所作的 DMO 校正，实际上也是一种偏移技术。

令 $P_0(T_0, y, x)$, $P_N(T_N, y, x)$ 分别代表零炮检距波场和经过 NMO 校正后的波场。Hale 推导出下列关系式

$$P_0(\omega_0, k, x) = \int A^{-1} e^{i\omega_0 T_N A} dT_N \int P_N(T_N, y, x) e^{-iky} dy \quad (6)$$

$$A = \left(1 + \frac{k^2 x^2}{4\omega_0^2 T_N^2} \right) \quad (7)$$

式中 $P_0(\omega_0, k, x)$ 为 $P_0(T_0, y, x)$ 的二维傅氏变换。将式（6）作二维傅氏反变换，即可获得所要求取的 P_0 波场。

Berg 把 Hale 的 F-K 域 DMO 算子，变换为 T, y 域的 DMO 算子^[4]，使算式变得相当复杂。其实从成像原理出发，时间域 DMO 算子完全可用简单代数式表示。

1984 Jakubowicz 提出快速 DMO 方法，其原理示于图 2。这种快速方法并不具有偏移的性质，因为不论倾角值如何变化，成像位置仍在炮点与接收点之间的中心点处。通过式（4）求得的 T_0 值与式（2）求得的结果是相当的。这办法与我们七十年代所提出的全速度叠加和西方地球物理公司的广角叠加（Broad-Dip-Band Stack）思想是相似的^[9]。只是广角叠加是在 CMP 域进行，并且不作倾角带通滤波，因此叠加噪音较大，同时也不能提供速度分析资料。

物理勘探

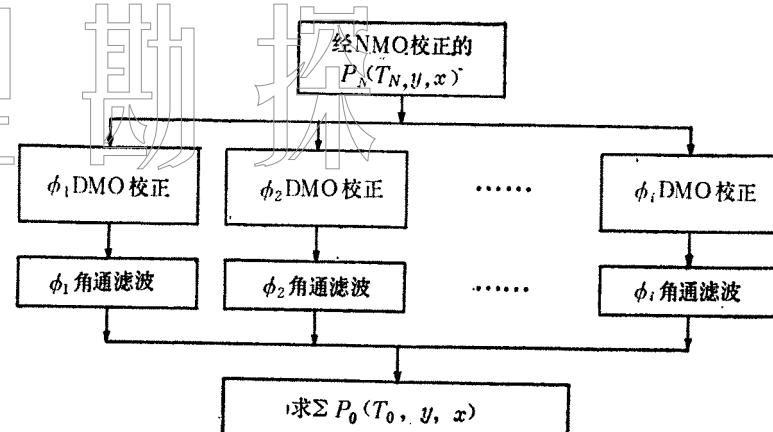


图 2 快速 DMO 方法原理

DMO 处理中的多值问题

目前在石油部物探局 GRI 处理中心所进行的 DMO 处理均采用快速 DMO 方法。处理软件虽也具备 F-K 域 DMO^[7] 和时域 DMO 方法，但均未投入实际应用。主要原因是软件不够完善，太耗费机时或占用机器资源太多等。通过近年来的 DMO 处理实践，表明 DMO 技术对于改善复杂构造地区的地震成像有明显的效果^[1]。但是目前采用的 DMO 技术中存在的多值问题，尚未引起人们广泛的重视。现根据成像原理说明其问题的实质。图 3a 是在某一炮检距条件下，不同界面倾角的反射路径。S 代表炮点，R 代表接收点，M 为中点，P 为倾斜界面的反射点，E 为平界面的反射点。它们的反射时间为 T_{SPR} 和 T_{SER} ，在 M 点处平、斜界面的法向入射反射时间为 T_N 和 T_0 ，而 P 点处的法向入射反射时间为 T_d ，它的地面点为 N。x 代表炮检距，d 代表 N 与 M 两点的距离。图 3b 是 CMP 域的道集时距曲线。应用 DMO 的目的就是要把倾斜界面的时距曲线（虚线），经 DMO 校正后使之与平界面的时距曲线（实线）相一致。

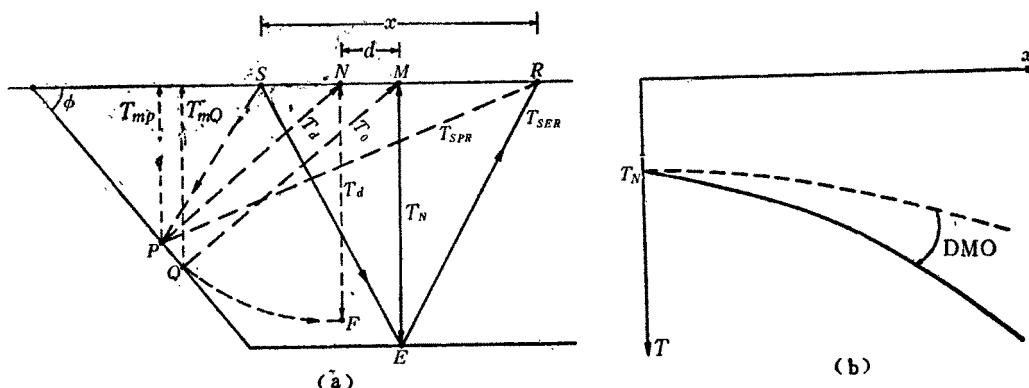


图 3 DMO 成像原理及 CMP 域的道集时距曲线

对快速 DMO 方法来说，虚线的时距式为

实线的时距式为

$$T = \left(T_0^2 + \frac{x^2 \cos^2 \phi}{V^2} \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$T = \left(T_N^2 + \frac{x^2}{V^2} \right)^{1/2} \quad (9)$$

因零炮检距时间相同, 故有

$$T_0 = T_N \quad (10)$$

对倾斜层可用 $V/\cos\phi$ 速度作动校正, 再用速度 V 作反动校正, 即可使倾斜层的时距曲线与平层时距曲线相当。两者均在 M 点正下方处, 不存在任何部分偏移的作用。可是 DMO 方法却存在部分偏移作用。如果图 3a 中平、斜反射时间相等(即 $T_{SPR} = T_{SER}$), 换句话说, 当接收到反射时间 T_{SPR} 的反射样点时, 我们并不知道反射点 P 的位置, 只能认为它是 M 点正下方 E 点处的反射。DMO 的作用就是把 E 点采样点偏移到 N 点正下方的 F 点处, 其偏移后时间与 N 点处零炮检距反射时间 T_d 相同。故 DMO 的作用可以等价地把 N 点作为中心点对待。这时图 3b 的斜层时距曲线仍可用式 (8) 表示, 只需把 T_0 替换成 T_d 。而平层的时距曲线也仍可用式 (9) 表示, 然而式中的 T_N 值应等于 T_d 。

简言之: 快速 DMO 法是在中心点 M 处, 通过 DMO 校正使倾斜反射的时距曲线与平界面反射时距曲线一致。经过动校正叠加后, 可将倾斜界面的反射通过叠后偏移在 Q 点(对应于 M 点的法线入射的界面反射点)成像。

而 DMO 法是在 N 点处(为反射点 P 点对应地面上的法线出射点), 通过校正使斜反射的时距曲线与平反射的时距曲线一致。则在动校正叠加后采用叠后偏移, 使倾斜界面的反射偏移到真正的反射点 P 处成像。

在均匀介质速度为常数时, 以上计算是毫无疑义的。如果速度随埋深而变化, 这时就会出现多值问题。以快速 DMO 法为例, 斜层时距式中的速度应是 Q 点埋深处的均方根速度, 即 $V(T_{mQ})$, T_{mQ} 为 Q 点垂直双程旅行时间。而平层的时距式中的速度应是 E 点埋深处的均方根速度, 即 $V(T_N)$ 。由于 $T_{mQ} \neq T_N$ 故 $V(T_{mQ}) \neq V(T_N)$, 倾角愈大, 两者的速度差别亦愈大。对 DMO 方法说来亦存在多值问题, P 点处的速度与 F 点处的均方根速度显然也是不相等的, 即 $V(T_{mP}) \neq V(T_d)$ 。因此根据均匀介质推导的算式, 把式 (1) 分解成式 (5)(NMO 校正) 和式 (4)(DMO 校正) 就不正确了。

DMO 的多值问题为什么尚未引起大家重视呢? 原因在于我们只是比较 DMO 处理资料与常规叠加资料的结果, 而很少用理论资料去验证 DMO 方法的精度是否符合要求, 也极少用精确的叠前偏移的结果进行比较。为了进一步说明多值问题, 现引用 GSI 的几张理论记录的结果^[6]。至于速度呈垂向变化地区 DMO 方法的成像误差, 将在另一节中专题分析讨论。图 4 的理论模型有四层水平反射界面和一层弯曲界面, 其均方根速度曲线如图 5 所示。图 6 是理论资料用常规方法叠加的结果, 图中可以见到大倾角的反射同相轴品质差, 波形拉伸畸变。图 7 是图 6 中黑三角处的速度分析结果, 发现 1.0s 处有两个速度拾取点。实心圆为平反射界面的速度, 与图 5 给定的理论速度值一致。图 7 中空心圆所拾取的速度值则反映倾斜界面的叠加速度。而这个界面实际上是剖

面左端 0.5s 处的绕射波所形成的，它的实际传播速度为 2000m/s。可是在图 7 中显示的叠加速度上竟高达 3700m/s。采用 DMO 之后的叠加结果展现于图 8，从中可以看出，其叠加品质已大为改善。但在图 9 中 DMO 后的速度分析中，在 1.0s 处仍存在两个速度拾取值（理论记录计算中全部采用了 48 次叠加）。Black 给出了更为复杂模型的叠加结果和速度分析结果^[5]，也说明多值问题不容忽视。

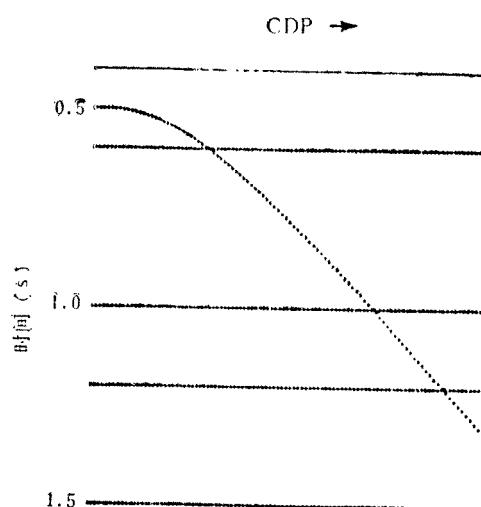


图 4 理论的零炮检距模型

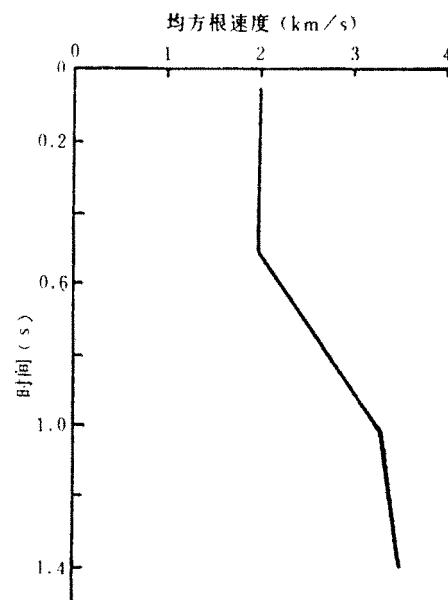


图 5 理论模型的速度分布

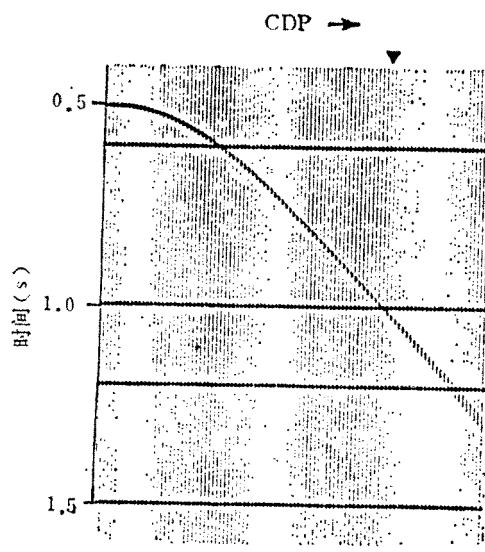


图 6 理论记录的常规叠加结果

▼表示速度分析点的道集位置

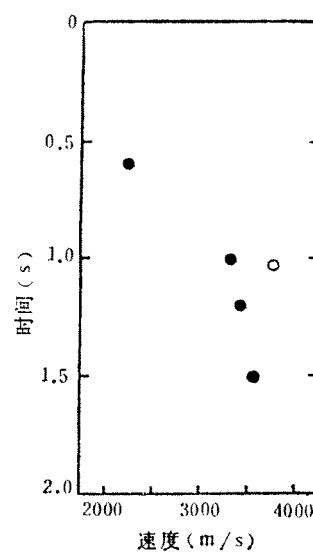


图 7 常规速度分析结果

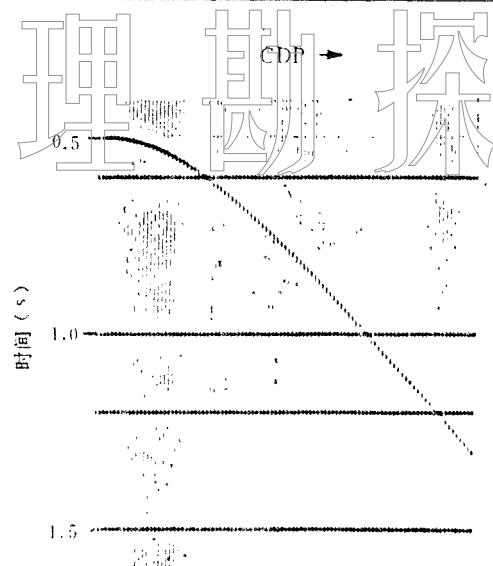


图 8 理论记录经 DMO 后的叠加结果

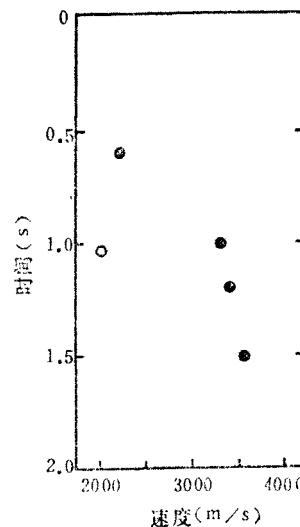


图 9 DMO 后的速度分析结果

DMO 偏移成像

现在首先介绍 DMO 时域成像原理。鉴于我们已拥有的时域 DMO 处理软件, 均采用零偏移距技术, 即通常所说的叠后偏移技术, 其偏移成像原理如图 10 所示, 偏移轨迹为一圆弧, 偏移距为 d , 偏移后的时间为 T_m 。

坐标原点设在中心点 M 处, E 点表示记录时间 T_{RE} 用偏移速度 V_m 计算所得的深度, 而 F 点代表偏移后时间 T_m 用 V_m 计算的深度, N 点为偏移后的位置, d 为 N 点至 M 点的距离。设记录时间 T_{RE} 处的时间倾角为 $\frac{1}{2} \frac{\partial T_{RE}}{\partial y}$, 则叠后偏移成像公式为

$$\sin \alpha = V_m \frac{1}{2} \frac{\partial T_{RE}}{\partial y} \quad (11)$$

$$T_m = T_{RE} \cos \alpha \quad (12)$$

$$d = \frac{1}{2} T_{RE} V_m \sin \alpha \quad (13)$$

α 代表在介质速度为 V_m 时反射界面偏移后的视倾角。记录时间可以是叠前时间 T , 也可以是经 NMO 后的 T_N , 也可为零炮检距时间 T_0 。只是不同时间具有不同的时间倾角, 但偏移成像均服从上述三个方程。DMO 的做法是把 T 变换成 T_N , 即式(5)的 DMO 校正, 之后在 T_N 的共炮检距剖面上进行 DMO 处理。为了进一步说明这一过程, 尚需简述叠

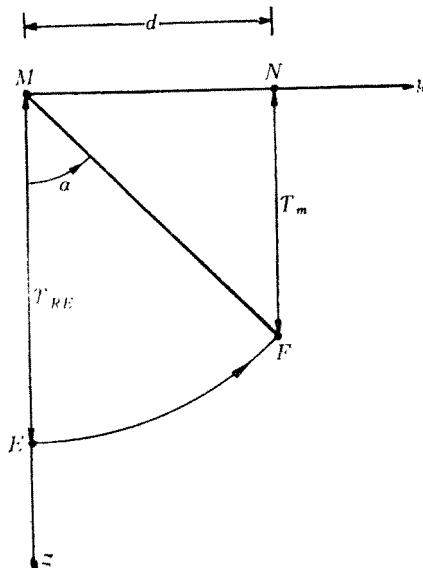


图 10 DMO 时域成像原理

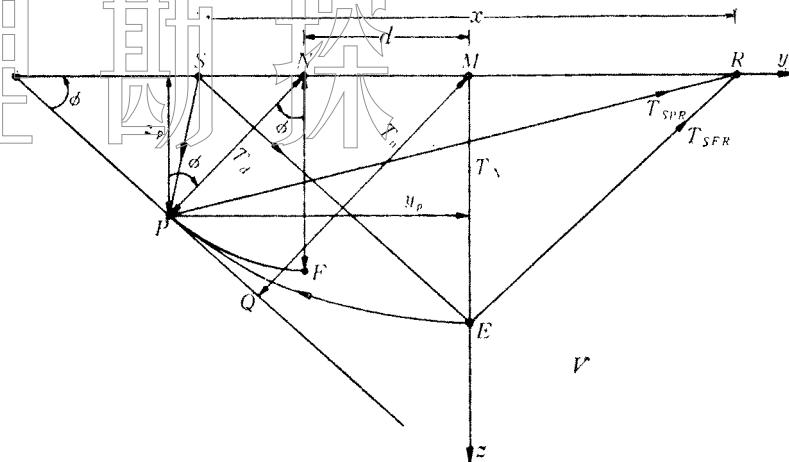


图 11 DMO 成像路径

前偏移成像过程。

图 11 展现了 S 炮点激发 R 点接收的反射路径, P 点为界面上的反射点。反射旅行时间 T_{SPR} 的样点由于记录时并不知道 P 点在何方, 故只能记录在中心点 M 正下方, 且具有相同旅行时间的 E 点处, 即 $T_{SER} = T_{SPR}$ 。根据直角三角形的关系, 可知 M, E 两点的垂直双程时间为 T_N , 满足式(5) 的关系。用介质速度 V 作偏移, 把 E 点的样点移到反射点 P 处成像, 即为叠前偏移。它的偏移轨迹应是一个椭圆。椭圆半焦距 c 和短半轴 b 分别为

$$c = \frac{1}{2}x \quad (14)$$

$$b = \frac{1}{2}T_N V \quad (15)$$

则长半轴为 $a = \sqrt{b^2 + c^2}$, 故有

$$a = \frac{1}{2}TV \quad (16)$$

椭圆方程为

$$\frac{z^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1 \quad (17)$$

式(17)亦可写成

$$z = \pm b\sqrt{1 - y^2/a^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \mp \frac{by}{a^2\sqrt{1 - y^2/a^2}} = \mp \frac{b^2y}{a^2z} \quad (19)$$

反射点 P 的偏移距 y_P 和埋深 z_P 分别为

$$y_P = a \operatorname{tg} \phi / \sqrt{\operatorname{tg}^2 \phi + b^2/a^2} \quad (20)$$

$$z_P = b^2 / \sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \phi + b^2} \quad (21)$$

式中

$$\operatorname{tg}\phi = \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_{\substack{y=y_p \\ z=z_p}} = \frac{by_p}{a^2 \sqrt{1 - y_p^2/a^2}} = \frac{b^2 y_p}{a^2 z_p} \quad (22)$$

P 点法线入射的反射时间为 T_d ，在地面上的出射点为 N 。DMO 的作用是把经 NMO 校正的 T_N 剖面上 E 点处的样点，用叠后偏移技术把它成像到 N 点正下方，垂直双程时间为 T_d 的 F 点处。从而使经过 DMO 处后的剖面真正具有零炮检距性质，故可在叠加后采用叠后偏移技术使其在真正的反射点 P 点处成像。

现在研究把 E 点移到 F 点成像时应采用什么样的偏移速度 V_m ？由图 11 可知， $T_d = 2z_p/V\cos\phi$ ，代入式 (21) 得

$$T_d = \frac{bT_N}{\sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}} \quad (23)$$

将 $\operatorname{tg}\phi = (y_p - d)/z_p$ 代入式 (22)，得

$$d = \frac{c^2 \sin \phi}{\sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}} \quad (24)$$

对照叠前偏移成像式 (12)、(13)，这时式中 T_{RR} 相当于 T_N ，式中的 T_m 相当于 T_d ，故有

$$\frac{T_d}{T_N} = \cos \alpha$$

考虑式 (23)，上式变为

$$\cos \alpha = \frac{b}{\sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}}$$

并有

$$\sin \alpha = \frac{c \sin \phi}{\sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}} \quad (25)$$

为此将式 (13) 改写为

$$d = \frac{1}{2} T_N V_m \sin \alpha \quad (26)$$

将式 (24) 与 (25) 代入式 (26) 得到

$$V_m = \frac{2c}{T_N} = \frac{x}{T_N} \quad (27)$$

当 $\phi = 90^\circ$ 时，最大偏移距为

$$d_{\max} = \frac{x}{2} \cdot \frac{c}{a} = \frac{x^2}{2TV} \quad (28)$$

式 (28) 就是 DMO 的脉冲偏移响应。

综上所述，时域 DMO 是把经过式 (5) 作 NMO 校正的共炮检距的 T_N 时间剖面，

用偏移速度 $V_m = \frac{x}{T_N}$ 作积分法时间偏移，偏移孔径即范围应在 $\pm d_{\max}$ 的范围内。由

于偏移速度较小，偏移孔径也较小，因此 DMO 这种部分偏移的计算工作量就相对较小（指与正确偏移速度的偏移计算量相比较）。

DMO 时域偏移路径也可以用绕射时距式表示

$$T_N = \sqrt{T_d^2 + 4d^2} / \left(\frac{x}{T_N} \right)^2 \quad (29)$$

速度呈垂向变化时 DMO 的成像误差

我国多数沉积盆地为砂泥岩沉积，介质速度随埋深而增大。通常这种速度变化可用一种线性增长的函数表示

$$V = V_0 + Az = V(1 + \beta z) \quad (30)$$

式中 V_0 为地表起始速度， z 为垂直埋深， A 为线性增长系数。式 (30) 对拟合埋深不大时的速度垂向变化是相当准确的，但对埋深较大的情况，往往有一定差别。好在 DMO 的成像误差较大的部分集中在埋深较浅的地段，为此我们就以速度呈线性增长的前提来分析 DMO 的成像误差。

设有倾角为 ϕ 的倾斜界面， S 点激发， P 点接收，炮检距为 x ，界面上反射点为 P 。 P 点距中心点 M 的距离为 y_p ，埋深为 z_p 。 P 点法线入射的射线路径为 \widehat{NP} ， N 为地面上的出射点，它的双程旅行时间为 T_d ， N 距 M 点的距离为 d 。上述各量的几何关系示于图 12。由炮点 S 经 P 点反射到 R 点的旅行时间为 T ，则经 NMO 校正后的时间为 T_N ，可得如下关系式

$$T = \sqrt{T_N^2 + x^2 / V^2(T_N)} \quad (31)$$

上式是典型的直射线动校正公式。陈广思指出^[3]，在 $x/2$ 不大于 3000m 时，此式计算的结果与曲射线精确值相差只有几个毫秒。式中 $V(T_N)$ 应是 M 点正下方垂直双程时间为 T_N 的均方根速度，据曲射线原理，有

$$V(T_N) = V_0 \sqrt{(e^{AT_N} - 1) / AT_N} \quad (32)$$

在已知 T 、 T_N 和 ϕ 、 V_0 及 A 的情况下，需求取 PN 两点的法线入射的反射时间 T_d 和 N 点距 M 点的距离 d 。以便通过 DMO 的部分偏移，把 M 点下方垂向双程时间为 T_N 的样点（即 E 点）偏移到 N 点下方的垂向双程时间为 T_d 处（即 F 点处）成像。这样在动校正叠加后经过叠后偏移才能使 F 点的样点真正在反射点 P 点处成像。

事实上用曲射线方法求取 d 和 T_d 值的解析解是很困难的，因此我们用数值解来分析。假设工区的 V_0 、 A 、 x 、 ϕ 值已知。令 T_N 为指定数值，则据式 (31) 与 (32) 可以求得反射旅行时间 T 。设 P 点埋深为 z_p ，距中心点距离为 y_p 。这样便可以分别求得 P 点到炮点和接收点的距离 x_s 和 x_r 。令射线路径 SP 和 PR 的地面上的出射角分别为 I_s 及 I_r ，而在界面上的入射角分别为 ϕ_s 及 ϕ_r （图 12），则有

$$x_r = \frac{x}{2} + y_p \quad (33)$$

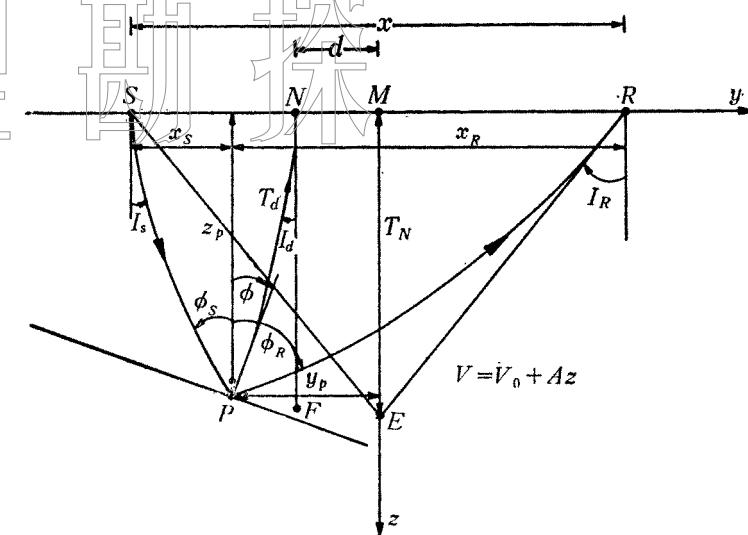


图 12 DMO 成像中各量的几何关系

$$x_s = \left| \frac{x}{2} - y_p \right| \quad (34)$$

式(34)取绝对值的目的在于使以下计算中角度值也取绝对值。现在的问题是如何求得 y_p 及 z_p 值。我们可以用直射线办法先求得其近似值。据式(20)可得

$$y_p = \frac{1}{2} TV(T_N) \operatorname{tg} \phi / \sqrt{\operatorname{tg}^2 \phi + T_N^2 / T^2} \quad (35)$$

因 z_p 肯定小于 E 点的埋深，可令

$$z_p = 0.8 \frac{1}{2} T_N V(T_N) \quad (36)$$

先分析 P 到 R 的曲线射线路径，在已知 x_R 和 z_p 时有下列表达式^[3]

$$z_p = \frac{V_0}{A} \left(\frac{\sin \phi_R}{\sin I_R} - 1 \right)$$

$$x_R = \frac{V_0}{A} \frac{1}{\sin I_R} (\cos I_R - \cos \phi_R)$$

将上述联立式中 I_R 项消去，化简后可得

$$\operatorname{tg} \phi_R = \frac{2x_R A}{\left(V_0 + Az_p - \frac{V_0^2}{V_0 + Az_p} - \frac{x_R^2 A}{V_0 + Az_p} \right)} \quad (37)$$

同理，根据 S 到 P 的曲射线路径有

$$\operatorname{tg} \phi_R = \frac{2x_s A}{\left(V_0 + Az_p - \frac{V_0^2}{V_0 + Az_p} - \frac{x_s^2 A}{V_0 + Az_p} \right)} \quad (38)$$

根据 P 点入射角与反射角相等的原理，在 $y_p < \frac{x}{2}$ 时，由图 12 可见 $\phi_s + \phi = \phi_R - \phi$ ，故有

物理勘探

当 $y_p > \frac{x}{2}$ 时，应有

$$\frac{1}{2}(\phi_R - \phi_S) = \phi \quad (39)$$

$$\frac{1}{2}(\phi_R + \phi_S) = \phi \quad (40)$$

当 z_p 值不准确时，式 (39)、(40) 就不能满足。此时我们可以反复修改 z_p 值直到满足式 (39)、(40) 为止。这样便可根据曲射线原理，分别求得

$$\sin I_R = V_0 \sin \phi_R / (V_0 + A z_p) \quad (41)$$

$$\sin I_S = V_0 \sin \phi_S / (V_0 + A z_p) \quad (42)$$

$$t_R = \frac{1}{A} \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\phi_R}{2} / \operatorname{tg} \frac{I_R}{2} \right) \quad (43)$$

$$t_S = \frac{1}{A} \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\phi_S}{2} / \operatorname{tg} \frac{I_S}{2} \right) \quad (44)$$

$$T' = t_R + t_S \quad (45)$$

式中： t_R 代表 PR 射线路程的单程时间； t_S 代表 SP 射线路程的单程时间； T' 代表 P 点坐标为 z_p 、 y_p 时的反射旅行时间。如 T' 值与实际反射时间 T 值有差别，则应该修改 y_p 值，再重算式 (33) 到式 (45)，直到 T' 值与 T 值相差小于误差要求为止。此时 z_p 及 y_p 为反射点 P 点的真正坐标位置。由此可以求得 P 点处法线入射的曲射线在地面上的出射角 I

$$\sin I = \frac{V_0 \sin \phi}{V_0 + A z_p} \quad (46)$$

P 点距 N 的水平距离为

$$y_p - d = \frac{V_0}{A} \frac{1}{\sin I} (\cos I - \cos \phi) \quad (47)$$

则 P 点法线入射的双程反射时间

$$T_d = \frac{2}{A} \ln \left(\frac{\operatorname{tg} \frac{\phi}{2}}{\operatorname{tg} \frac{I}{2}} \right) \quad (48)$$

d 和 T_d 就是在已知 V_0 、 A 、 ϕ 及 T_N 值时的 DMO 成像偏移距和成像时间，此为曲射线算法的精确解。

现再分析用常规 DMO 方法所算得的偏移距和偏移成像时间。据叠后偏移成像式，即式 (11) 到 (13)，在 T_N 已知时，应有

$$\sin \alpha = V_m \frac{1}{2} \frac{\partial T_N}{\partial y} \quad (49)$$

$$V_m = \frac{x}{T_N} \quad (50)$$

$$T_d' = T_N \cos \alpha \quad (51)$$

$$d' = \frac{1}{2} T_N V_m \sin \alpha \quad (52)$$

它与曲射线精确解的差别为

$$\Delta t = T_d' - T_d \quad (53)$$

$$\Delta d = d' - d \quad (54)$$

我们只要求得 T_N 时间剖面上的各同相轴的时间倾角 $\left(\frac{1}{2} \frac{\partial T_N}{\partial y}\right)$, 就可以求得它们的偏移成像误差 Δt 及 Δd 。下面讨论求取时间倾角的方法。已知某 M 点的 T_N 及 T 值, 其中 x , V_0 , A 和 ϕ 为已知。设 M 点相距 Δy 处有相同炮检距的另一个接收记录道, 它的炮点、中心点与接收点分别为 S' , M' 及 R' , 与原来点的 S , M 及 R 平移了 Δy 距离。令该道距离 M' 点的反射 P' 点偏移距为 y'_p , 则 P' 点的埋深 z'_p 与原来 P 点的 z_p 有下列关系

$$z'_p = z_p + \operatorname{tg} \phi (y_p + \Delta y - y'_p) \quad (55)$$

用 y'_p 代入式 (33) 及式 (34) 求得该相邻道的 x_R 及 x_S 值; 再用 z'_p 值代入式 (37) 及 (38), 即可求得该相邻道的 ϕ_R 及 ϕ_S 值, 然后再用式 (39) 及 (40) 检验算得的 ϕ_R 及 ϕ_S 值是否符合要求。若不符合要求, 可修改 y'_p 值重复上述运算, 直到计算误差小于规定要求为止 (y'_p 的起始值可用与 y_p 相近的值代入)。有了相邻道准确的 ϕ_R 和 ϕ_S 值之后, 结合准确的反射点 P' 的埋深值 z'_p , 代入式 (41) 至 (45), 从而求得了相邻道的反射旅行时间 T' , 再根据式 (31) 求得该相邻道的 T'_N 时间

$$T'_N = \sqrt{T'^2 - x^2 / V^2(T'_N)} \quad (56)$$

上式中 $V(T'_N)$ 表示垂直时间为 T'_N 时的均方根速度, 即式 (32)。但 T'_N 事先不知, 可先用 T' 代入式 (32) 算得一个速度值, 再代入式 (56) 算出 T'_N 值, 之后再用 T'_N 值代入式 (32) 重算速度值, 这样反复迭代多次即可求得相邻道的 T'_N 值。此时, 时间倾角为

$$\frac{1}{2} \frac{\partial T_N}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{T'_N - T_N}{\Delta y} \quad (57)$$

上式用差分值代替微分值。为保证精度, Δy 宜取较小的值, 例如用 10m。图 13 所绘出的 DMO 成像时间误差 Δt 和成像偏移距误差 Δd , 是以 $V_0 = 1.86 \text{ km/s}$, $A = 0.56 \text{ s}$, $\Delta y = 0.01 \text{ km}$, 炮检距 $x = 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 \text{ (m)}$ 六种, $T_N = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 \text{ (s)}$ 共七种, $\phi = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 五种等效数据计算所得的部分有代表性的计算结果。从图中可以明显看出, 倾角 ϕ 愈大, 成像误差也愈大。 T_N 值较小时, 成像误差加大。炮检距 x 加大, 成像误差也增大。成像最大时间误差可达 -85 ms ($x = 3000 \text{ m}$, $T_N = 2 \text{ s}$, $\phi = 50^\circ$) 及 -78 ms ($x = 1500 \text{ m}$, $T_N = 1 \text{ s}$, $\phi = 50^\circ$)。成像最大位置误差可达 216.6 m ($x = 3000 \text{ m}$, $T_N = 2 \text{ s}$, $\phi = 50^\circ$) 及 135.8 m ($x = 1500 \text{ m}$, $T_N = 1 \text{ s}$, $\phi = 50^\circ$), 可见误差如此明显, 理应受到足够的重视。

物理勘探

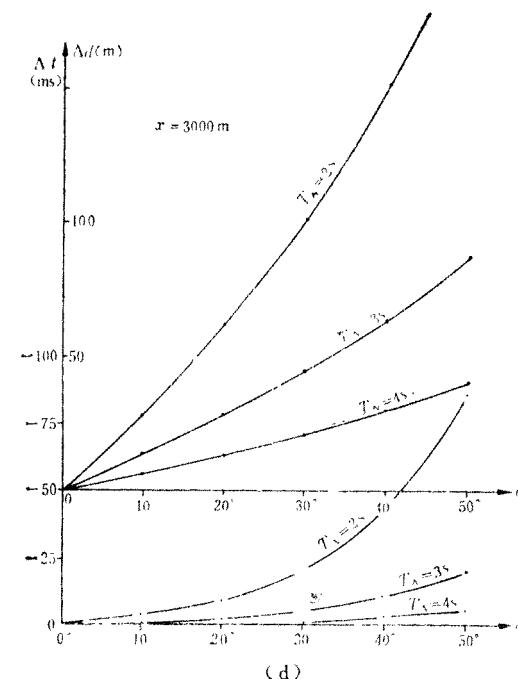
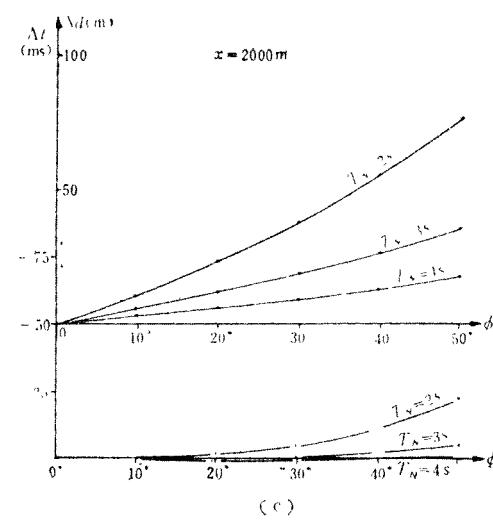
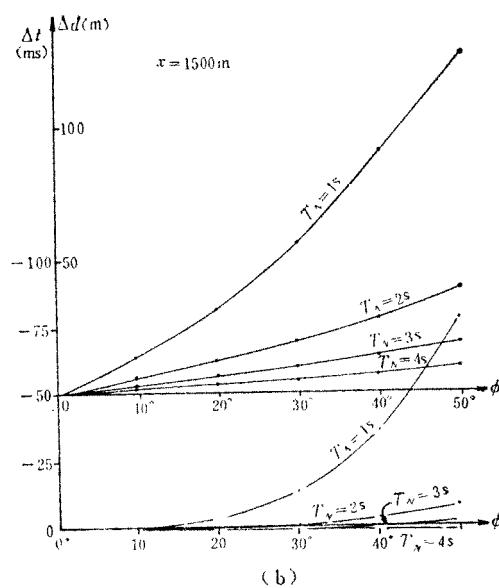
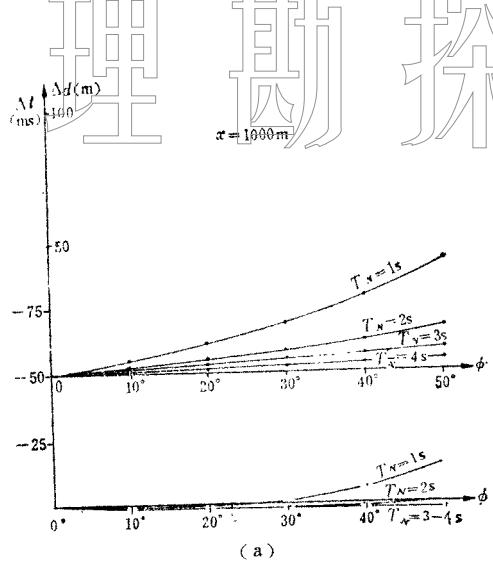


图 13 DMO 成像时间误差和偏移距误差与地层倾角的关系

在速度垂向变化时应采用TVDMO方法

DMO方法是以均匀介质为前提。对动校正后的共炮检距剖面作部分偏移时，是以 x/T_N 作为偏移速度的，不论偏移成像到何处，偏移速度是不变的（指 x 与 T_N 值为某一定值时）。当速度随埋深而变时，偏移速度必须采用时变办法方可满足正确成像的要求。时变倾斜时差校正法（TVDMO），主要点就在于要求偏移速度随偏移距和偏移后

的时间而变，即

$$V_m = K \frac{x}{T_N} \quad (58)$$

式中 K 值随 x 、 T_N 、 A 及偏移距 d 而变化，并满足 $K \leq 1$ 。上一节已经讨论过用曲射线法求得准确的偏移距 d 和偏移后的时间 T_d ，它的正确的偏移速度应为

$$V_m = 2d/T_N \sin \theta \quad (59)$$

$$\cos \theta = T_d/T_N \quad (60)$$

为此 K 值应为

$$K = V_m T_N / x \quad (61)$$

为了求得 K 值与 x 、 T_N 、 d 和 A 的经验表达式，对下列理论数据进行了曲射线法的运算：

$$V_0 = 1.86 \text{ km/s}$$

$$A = 0.56, 0.50, 0.45, 0.40 (1/s)$$

$$T_N = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 (\text{s})$$

$$x = 1, 1.5, 2, 2.5, 3 (\text{km})$$

$$\phi = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$$

把计算结果绘于图 14a—14g。 K 值一般变化在 1—0.88 之间。 K 值随偏移距 d 值增大而减小，随炮检距 x 增大而加大，随 T_N 时间加大而减小。为了说明 TVDMO 的偏移孔径，在 $A = 0.5 (1/\text{s})$ 情况下绘出了 $\phi = 50^\circ$ 和 $\phi = 90^\circ$ 时的脉冲响应，见图 15，由图 15 可知，如果工区最大倾角不超过 50° ，最大炮检距不超过 3km，则 TVDMO 积分法偏移半径应在 400m 以内。如果在 TVDMO 之前事先对剖面上倾角分布有一个比较明确的估计，则可以根据估计值精确设计积分偏移的孔径范围，使运算工作量进一步减小。

根据理论模型所得的 K 值，对不同偏移距 d 采用多项式拟合方法求得的 K 值与 x 、 T_N 和 A 的经验表达式为

$$K = c_1 T_N^3 + c_2 x^3 + c_3 T_N^2 x + c_4 T_N x^2 + c_5 T_N^2 + c_6 x^2 + c_7 T_N x + c_8 T_N + c_9 x + c_{10} + k_A \quad (62)$$

$$K_A = \frac{0.56 - A}{0.16} (c_{11} T_N^3 + c_{12} x^3 + c_{13} T_N^2 x + c_{14} T_N x^2 + c_{15} T_N^2 + c_{16} x^2 + c_{17} T_N x + c_{18} T_N + c_{19} x + c_{20} - 1) \quad (63)$$

式 (63) 只适用于 $T_N \leq 3.5\text{s}$ 。如 $T_N > 3.5\text{s}$ 时，式中的系数改为 c_{11}' 、 c_{12}' 、 c_{13}' 、 c_{14}' 、 c_{15}' 、 c_{16}' 、 c_{17}' 、 c_{18}' 和 c_{20}' 。不同偏移距 d 拟合所得的 20 个系数值列于表 1—表 3。平均的拟合误差为千分之一左右。为验证拟合系数的精度，可用原来的理论数据，只是把其中 A 值改为 0.53，由曲射线法算得 K 值及偏移距 d 值，然后在上述表中找到相近的两到三个 d 值，用式 (62) 及式 (63) 求得相应的 K 值。之后用内插法求得

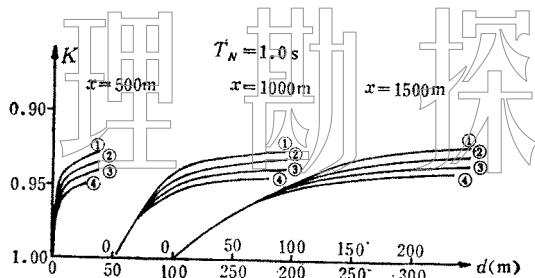
物
理

图 14a 曲射线法计算结果
①~④分别表示 $A=0.56, 0.50, 0.45, 0.40$

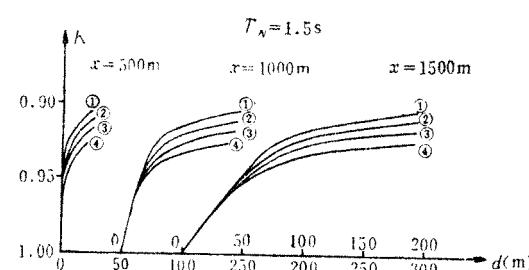


图 14b 曲射线法计算结果
①~④同图14a

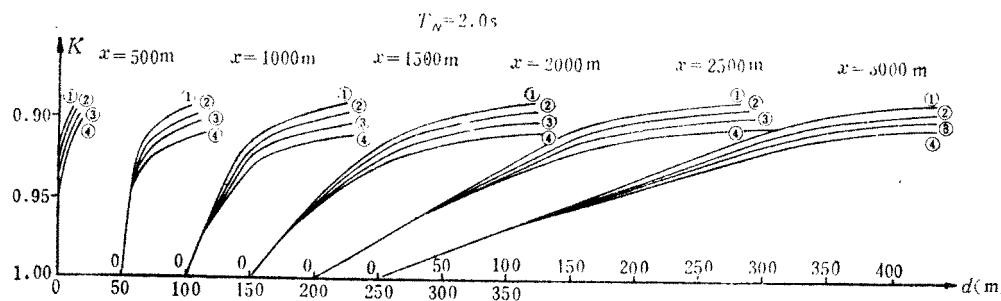


图 14c 曲射线法计算结果
①~④同图14a

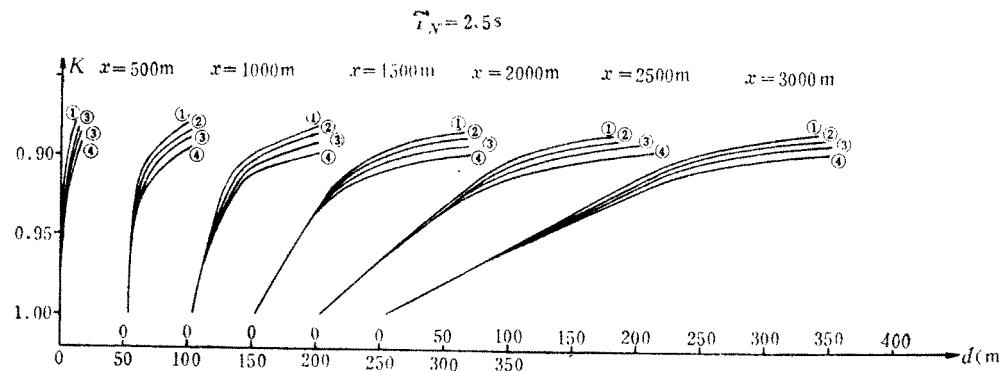


图 14d 曲射线法计算结果
①~④同图14a

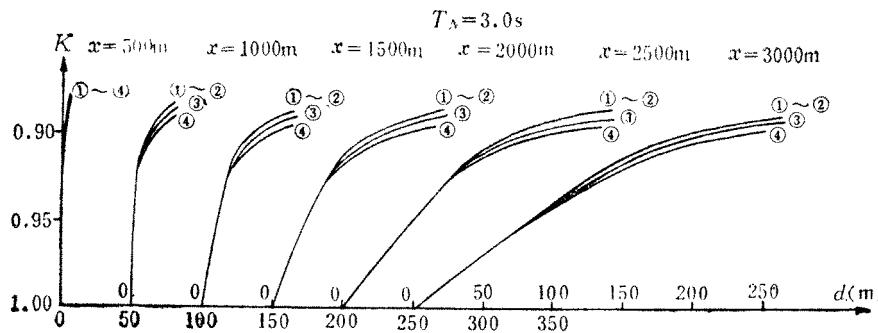


图 14e 曲射线法计算结果
①~④同图14a

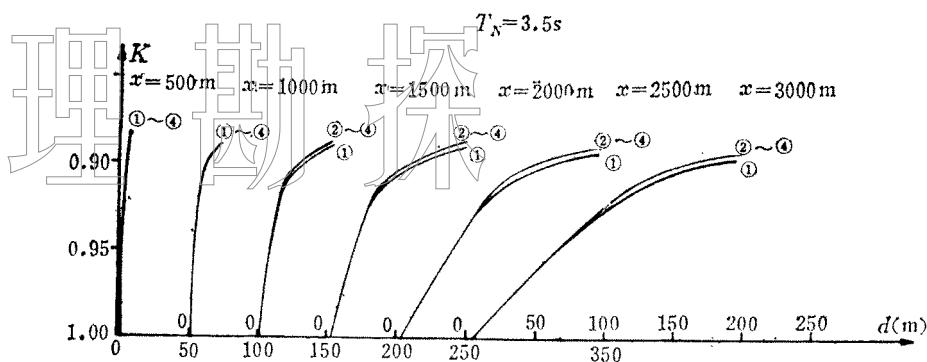


图 14f 曲射线法计算结果

①~④同图 14a

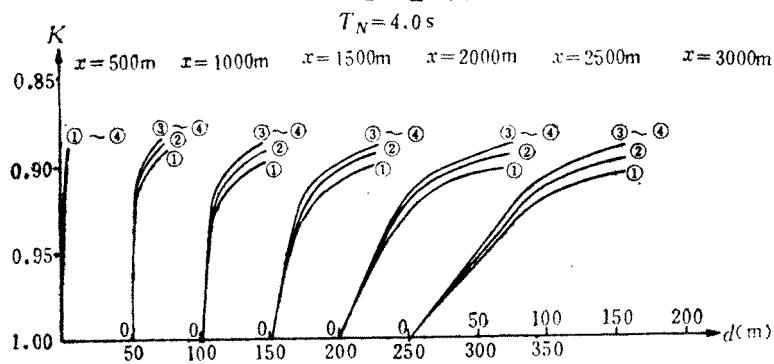
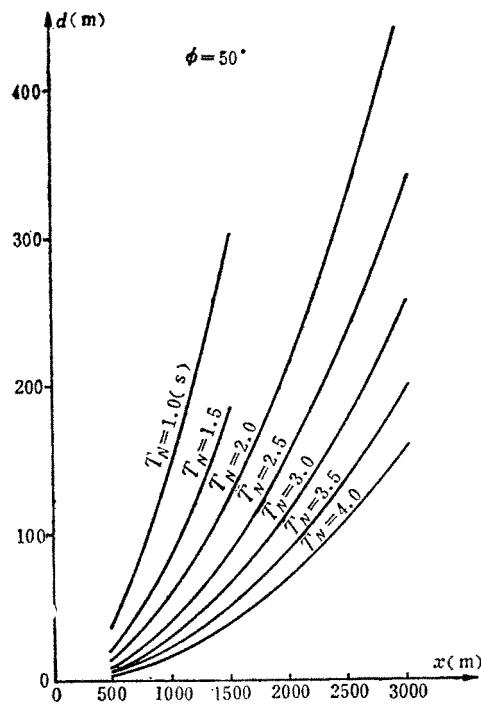
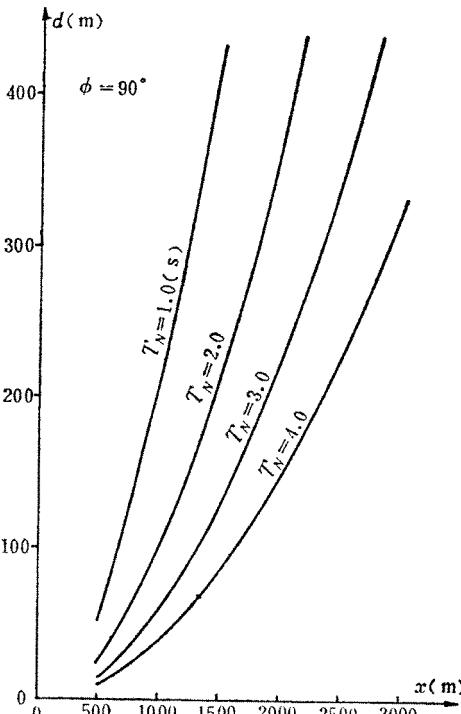


图 14g 曲射线法计算结果

①~④同图 14a

图 15a TVDMO偏移孔径选择范围
($\phi=50^\circ$)图 15b TVDMO偏移孔径选择范围
($\phi=90^\circ$)

d 值处的 K 值。令 d 值介于表上相邻的 d_1 , d_2 和 d_3 值之间, 再用式(62)、(63)求得相应的 K_1 , K_2 和 K_3 值, 则对应于 d 的 K 值应为

$$K' = \frac{(d - d_2)(d - d_3)}{(d_1 - d_2)(d_1 - d_3)} K_1 + \frac{(d - d_1)(d - d_3)}{(d_2 - d_1)(d_2 - d_3)} K_2 + \frac{(d - d_1)(d - d_2)}{(d_3 - d_1)(d_3 - d_2)} K_3 \quad (64)$$

将计算所得的数据中任意选取 32 个数据作了对比, 发现拟合所得 K' 值与用曲射线计算所得的 K 值多数相差不到千分之一, 对比结果列于表 4。这 32 个数据的 K' 值均方根误差为 $\pm 0.39\%$ 。可见拟合精度能够满足实际需要。

DMO 或 TVDMO 可在 动校正之前进行

众所周知, 处理中的动校正或反动校正均需涉及样点的内插, 因而产生动校拉伸波形畸变等问题。如果我们在进行 DMO 或 TVDMO 时, 能把流程中的动校正(NMO)和反动校正两个步骤省去(见图 1), 不仅可以提高处理效率, 对提高精度也有一定意义。现以均匀介质的 DMO 为例, 说明其可行性。

假定 y , z 的原点坐标位于中心点 M 点处, 该处零炮检距反射时间为 T_0 , 界面倾角为 ϕ , 则任意 y 值处的零炮检距反射时间为

$$T_0(y) = T_0 + 2y \sin \phi / V \quad (65)$$

则反射时间和动校正后时间可表示为

$$T = \sqrt{T_0^2(y) + x^2 \cos^2 \phi / V^2} \quad (66)$$

$$T_N(y) = \sqrt{T_0^2(y) - x^2 \sin^2 \phi / V^2} \quad (67)$$

则在任意值 y 处上述三种时间剖面(共炮检距)的时间倾角分别为

$$\frac{1}{2} \frac{\partial T_0}{\partial y} = \frac{\sin \phi}{V} \quad (68)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial T_N}{\partial y} = \frac{T_0(y)}{T_N(y)} \frac{\sin \phi}{V} \quad (69)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_0(y)}{T} \frac{\sin \phi}{V} \quad (70)$$

若将 $T_0(y)$ 化简成 T_0 , $T_N(y)$ 化简成 T_N , 则 DMO 输入样点时间(指动校正前)为

$$T = \sqrt{T_d^2 + x^2 / V^2} \quad (71)$$

在 T 时间剖面上, DMO 部分偏移后的时间应相当于 T_N 时间剖面 DMO 偏移后时间 T_d 再加上反动校正值

$$T'_d = \sqrt{T_d^2 + x^2 / V^2} \quad (72)$$

根据叠后偏移成像式 $\cos \beta = T'_d / T$, β 为 T 时间剖面的 DMO 偏移视倾角, 则得

表 1

 $T_N \leq 3.5s$ 时拟合系数 (式(62))

d (m)	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	EK (10^{-3})
12.5	2.9788	-3.6064	-9.3820	6.5501	-3.4466	-19.1026	37.6682	-67.8659	61.3415	970.5679	+4.52
25	2.2963	-12.2949	-10.9091	14.3980	8.3120	20.2236	8.9319	-80.8764	27.4904	984.2783	± 3.31
50	3.0968	-18.6334	-13.3105	22.4175	12.3211	54.7797	-24.7459	-63.9606	-8.4966	978.6446	± 2.01
75	1.3028	-14.0128	-8.7297	14.3166	19.8273	56.5505	-23.9240	-78.6935	-29.5649	996.4844	± 2.74
100	0.7253	-8.9220	-4.4297	3.8423	16.8902	55.3169	-6.2304	-85.5407	-61.0706	1019.056	± 2.88
125	1.7562	-11.5883	-4.1246	5.4033	10.7416	76.0430	-19.9818	-54.9758	-102.6151	1026.331	± 2.45
150	0.8374	-0.0152	2.5790	-9.2601	2.9330	34.8421	13.6425	-70.4530	-65.1721	1014.581	± 2.14
175	1.8551	6.2425	1.6815	-11.9257	-2.1427	-1.7511	31.6122	-79.0794	-11.1481	983.4662	± 1.20
200	-0.2959	9.1728	7.6794	-17.8288	-0.1097	-6.3954	30.5901	-78.9789	-11.6366	986.982	± 0.43
225	-0.7328	11.5893	11.1267	-22.9907	-5.5954	-15.3991	43.3011	-83.5266	-5.7904	986.3721	± 0.62
250.	-1.3658	8.9323	13.1976	-26.4402	-6.8848	7.0637	53.9594	-93.6737	-66.6000	1034.971	± 0.76
300	-2.2069	-5.5224	5.6548	1.5185	20.3481	45.7193	-46.1231	-44.2181	-44.1568	983.7461	± 1.00
350	-2.3956	-9.7864	2.2264	9.8700	29.9577	54.1586	-66.1936	-46.4225	-40.9980	983.223	± 1.54
400	-3.0037	-11.7595	-0.6727	18.5038	42.0888	47.1933	-92.9666	-45.0062	5.1063	947.5756	± 1.54

 d 为偏移距, 全部系数值乘 10^{-3} EK 为 K 值拟合误差。

$T_N \leq 3.5s$ 时拟合系数 (式63)

表 2

d (m)	$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{1,4}$	$c_{1,5}$	$c_{1,6}$	$c_{1,7}$	$c_{1,8}$	$c_{1,9}$	$c_{2,0}$	EK (10^{-3})
12.5	-0.5086	-2.6775	3.0223	-0.7879	-4.2719	21.1302	-10.3958	24.7617	-39.5725	1 011.82	± 2.55
25	-1.1800	0.3382	4.3021	-1.9268	-3.7107	6.1744	-10.5887	26.7433	-17.0025	1 002.852	± 2.23
50	-1.0347	1.2260	5.1869	-3.8063	-7.6665	5.1038	-5.2507	30.9363	-26.2660	1 013.784	± 1.74
75	-1.8915	3.6809	6.6024	-4.7899	-6.6317	-9.2293	-6.2249	32.9100	2.0391	996.9395	± 1.56
100	-1.3647	4.5606	7.9671	-5.2111	-14.6040	-15.4578	-9.2896	54.4748	18.3977	974.3872	± 1.68
125	-3.2218	2.5761	9.3313	-6.6625	-7.6538	-2.0931	-6.4837	40.3369	-9.6632	1 000.863	± 1.35
150	-3.0439	4.6244	6.7315	-5.1528	-3.4032	-19.7148	-1.8502	26.2712	26.5114	984.499	± 1.13
175	-2.9587	-0.7764	4.2019	-0.9151	-2.0351	-8.3373	-10.7250	22.5314	-23.8093	1 024.044	± 0.80
200	-2.2143	4.5851	5.2382	-7.6820	-7.4371	-20.9873	22.1272	1.2917	18.4572	1 004.702	± 0.45
225	-1.9848	3.1035	3.7920	-5.9899	-5.7544	-12.0806	19.6118	1.8102	-2.8141	1 022.199	± 0.66
250	0	0	0	0	-9.9842	-4.2930	6.4405	26.0009	0.9010	995.9226	± 0.75
300	0	0	0	0	-10.9918	0.9191	4.8182	35.4072	-22.2933	1 014.8	± 0.38
350	0	0	0	0	-10.9904	-0.7259	4.9005	34.7760	-13.4609	1 004.655	± 0.77
400	0	0	0	0	-10.4932	0.1244	3.6696	34.3185	-14.2893	1 007.73	± 0.61

d 为偏移距, 全部系数值乘 10^{-3} , EK 为K值拟合误差。

表 3

d (m)	c'_{15}	c'_{16}	c'_{17}	c'_{18}	c'_{19}	c'_{20}	EK (10^{-3})
12.5	-4.1773	1.0055	11.5631	-2.5846	-44.4842	1 063.629	± 1.26
25	-6.6153	2.6717	8.8229	20.3670	-40.9066	1 016.98	± 1.29
50	-2.9490	-0.4916	-0.3950	9.5091	6.5927	991.9494	± 0.63
75	0.9844	0.9865	-0.8433	-19.4862	0.7234	1 053.124	± 0.28
100	1.0206	0.9653	-5.8966	-8.9143	17.7870	1 016.32	± 0.29
125	-1.7373	-1.0812	-2.1628	-0.2258	13.0174	1 011.353	± 0.11
150	3.7925	0.9730	-1.9409	-44.9272	1.9145	1 112.819	± 0.15
≥ 175	3.7925	0.9730	-1.9409	-44.9272	1.9145	1 112.819	± 0.15

d 为偏移距, $c'_{11} \sim c'_{14}$ 全部为零, 所有系数均乘 10^{-3} , EK 为 K 值拟合误差。

拟合计算的 K 值和用曲射线计算的 K 值对比如表

表 4

d (m)	T_N (s)	x (km)	K	K'	d (m)	T_N (s)	x (km)	K	K'
29.925	1	0.5	0.9365	0.9349	191.364	2	3.0	0.9612	0.9410
35.872	1	0.5	0.9336	0.9329	284.216	2	3.0	0.9137	0.9136
116.271	1	1.0	0.9315	0.9309	30.543	2.5	1.0	0.8937	0.8953
138.646	1	1.0	0.9287	0.9287	37.499	2.5	1.0	0.8894	0.8920
250.517	1	1.5	0.9243	0.9229	120.712	2.5	2.0	0.8945	0.8963
296.670	1	1.5	0.9225	0.9213	148.260	2.5	2.0	0.8885	0.8901
51.764	1.5	1.0	0.9179	0.9178	266.414	2.5	3.0	0.8961	0.8979
67.435	1.5	1.0	0.9144	0.9129	327.501	2.5	3.0	0.8877	0.8894
148.944	1.5	1.5	0.9113	0.9107	50.243	3	1.5	0.8921	0.8904
179.600	1.5	1.5	0.9072	0.9065	62.131	3	1.5	0.8874	0.8868
43.794	2	1.0	0.9017	0.9024	138.308	3	2.5	0.8949	0.8986
53.359	2	1.0	0.8973	0.8974	171.124	3	2.5	0.8881	0.8894
74.461	2	1.5	0.9063	0.9082	38.300	3.5	1.5	0.8954	0.8964
97.627	2	1.5	0.9008	0.9004	47.657	3.5	1.5	0.8906	0.8895
263.670	2	2.5	0.8984	0.8993	105.825	3.5	2.5	0.8984	0.9023
321.148	2	2.5	0.8920	0.8943	131.731	3.5	2.5	0.8922	0.8934

$V_0=1.86\text{ km/s}$, $A=0.53/\text{s}$, K 为实测, K' 为拟合算得。

物理勘探

$$\sin \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{T_d'}{T}\right)^2} = \frac{1}{T} \sqrt{T_N^2 - T_d^2} \quad (73)$$

而在 T_N 时间剖面上的 DMO 偏移视倾角 α 有如下关系

$$\cos \alpha = T_d / T_N$$

代入式 (73)，并化简可得

$$\sin \beta = \frac{T_d}{T} \sin \alpha \quad (74)$$

据成像式 (11)，在 T_N 时间剖面上有

$$\sin \alpha = \frac{x}{T_N} \cdot \frac{1}{2} \frac{\partial T_N}{\partial y} = \frac{x T_0}{T_N^2} \frac{\sin \phi}{V} \quad (75)$$

而在 T 时间剖面上应有 $\sin \beta = V_m \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial y}$ ，故在 T 时间剖面的偏移速度 V_m 为

$$V_m = \sin \beta / \left(\frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \left(\frac{T_N}{T} \cdot \frac{x T_0}{T_N^2} \cdot \frac{\sin \phi}{V} \right) \\ / \left(\frac{T_0}{T} \cdot \frac{\sin \phi}{V} \right) = \frac{x}{T_N} \quad (76)$$

这说明动校前的 DMO 仍采用相同的偏移速度 $\frac{x}{T_N}$ 。则动校正前的绕射时距式和偏移路径分别为

$$T = \sqrt{T_d'^2 + 4d^2} / \left(\frac{x}{T_N} \right)^2 \quad (77)$$

$$d = \frac{1}{2} \frac{Tx}{T_N} \sin \beta \quad (78)$$

对于 TVDMO 说来，只需在上述两式中把 $V_m = \frac{x}{T_N}$ 替换成 $V_m = K \frac{x}{T_N}$ 即可。

综上所述，时变倾斜时差校正(TVDMO)的实施步骤可归纳为以下几步：

1. 要掌握工区垂向时间的均方根速度函数 $V(T_m)$ 。 T_m 相当于偏移后的时间，可按下列函数式以非线性最小二乘方办法拟合 A 值和 V_0 值

$$V(T_m) = V_0 \sqrt{(e^{4T_m} - 1) / AT_m} \quad (79)$$

2. 按图 1 流程得到不同炮检距的各类共炮检距的时间剖面，如采用动校正前的做法则剖面上的时间为反射旅行时间 T 。

3. 对每一种炮检距为 x 的 T 时间剖面作积分法时间偏移，令 DMO 校正前的波场为 $P(T, y, x)$ ， T 代表采样时间， y 代表中心点坐标， x 代表炮检距，则可根据式 (31) 求得相应 T 的 T_N 值。但是在 T_N 未知前无法求得 $V(T_N)$ ，故可以先用 $V(T)$ 代入求得近似 T_N 值，之后再经迭代几次，即可求得准确的 T_N 值。

把上述样点按下式送到输出的波场 $P_d(T_d', y+d, x)$ ，

$$T = \sqrt{(T_d')^2 + 4d^2 / \left(\frac{x}{T_N}\right)^2} \quad (80)$$

式中 T_d' 为 DMO 校正后时间, d 为已知的偏移距。例如送到相邻第一道, 则 $d = \Delta y$ (Δy 为相邻中心点的间距), 送到相距第 i 道处则 $d = i\Delta y$ 。根据已知的 d 和 x, T_N , A 值, 在表 1, 2, 3 中查得相应的 20 个系数, 则 K 值可由式 (62) 求得。如果 d 值在上述表中没有, 可找到与之相近的数值 d_1, d_2, d_3 , 要求 d 值介于这三个相邻值之间, 再用式 (62) 分别算得相应的 K 值为 K_1, K_2, K_3 , 则 d 值处的 K 值可通过内插, 即通过

$$K = \frac{(d - d_2)(d - d_3)}{(d_1 - d_2)(d_1 - d_3)} K_1 + \frac{(d - d_1)(d - d_3)}{(d_2 - d_1)(d_2 - d_3)} K_2 + \frac{(d - d_1)(d - d_2)}{(d_3 - d_1)(d_3 - d_2)} K_3 \quad (81)$$

求得。送样求出的偏移孔径应小于脉冲响应的范围, 或按工区最大倾角事先算得 (见图 24 和图 25)。然后把所有样点按要求送到相应的输出波场对应的位置上去, 再按积分法把相同位置上的样点累加起来, 即得到 DMO 之后的波场

$$P_D(T_d', y + d, x) = c_m O_m(T_d') * \sum P_d(T_d', y + d, x) \quad (82)$$

式中, 符号 * 代表褶积,

$$c_m = \sqrt{\frac{2}{T_d' \left(k \frac{x}{T_N} \right)^2}} \quad (83)$$

$$O_m(T_d') = \int f^{1/2} e^{i\pi/4} \cdot \exp i2\pi f T_d' df \quad (84)$$

事实上也可以先累加, 然后对累加过的各道作一次时变滤波, 其算子为 $c_m O_m(T_d')$ ^[10]。

4. 完成所有炮检距的 DMO 校正后, 即可按图 1 流程选排成 CMP 道集, 作以后各项的常规处理工作。如果在动校正前作 DMO, 则图 1 中的反动校正一项可以省略。

应该指出, 上述第三步中的积分法偏移也可改用差分法偏移。只要能用好正确的偏移速度 ($k \frac{x}{T_N}$), 其效果应该是相等的。

结 束 语

在速度呈垂向线性变化的情况下, TVDMO 技术要比均匀介质的 DMO 具有更高的成像精度, 而且解决了均匀介质 DMO 技术中无法克服的多值问题。在 TVDMO 之后可以作速度分析, 分析所得的叠加速度与倾角无关, 因此可作为偏移速度使用。用 TVDMO 之后的速度场, 经过适当的平滑后也可作为叠后偏移速度。这样要比以往用常规叠加速度按 85% 至 110% 测试求取偏移速度的做法, 要科学得多。

随着中国东部断块复杂油田滚动勘探开发的不断深入, 为了定好“一井穿透尽可能多的油层”的定向井, TVDMO 技术对明确断点、收敛绕射、正确归位断面具有很重要

石油地球物理勘探

的作用。如能在三维技术上应用 TVDMO，其地质效果将更加理想。

TVDMO 技术只需对现有时域 DMO 软件进行少量的修改就可用于生产。应该指出，对动校正前的 TVDMO 技术，它的 K 值最好直接按反射旅行时 T 的时间剖面，由曲射线法直接计算 K 值为好。因为我们在推导动校正前 DMO 时用了动校正式 (71) 和反动校正式 (72)。对于均匀介质来说，它们的速度 V 值是不变的，而对非均匀介质，则动校速度为 $V(T_N)$ ，而反动校的速度应为 $V(T_d)$ ，两者是有差别的。故应按 T 时间剖面直接计算 K 值，而不宜简单采用 T_N 时间剖面计算所得的 K 值。

本文方法思路在形成过程中，曾与物探局研究院不少同志作过十分有益的讨论，尤其是俞寿明、田树仁等同志的意见对作者帮助很大，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 田树仁、范雅琳：DMO 在渝河集地区的应用，《石油地球物理勘探》，22（2）1987：136～146
- [2] 陈祖传：一种比较灵活、快速时域 DMO 方法，《复杂条件地震方法座谈会论文选集》，中国石油学会物探委员会，1986。
- [3] 陈广思：变速直射线空校法，《石油地球物理勘探》，(2) 1981：42～50
- [4] Berg, L. E. : Pre stack partial migration, Presented at the SEG 54th Annual Meeting, Atlanta, December 2—6, 1984
- [5] Black, J. L., Ralph J. G. and Sanders J. I. : A comparison of two ways of imaging complex structures, Presented at the SEG 56th Annual meeting, Houston November 2—6, 1986
- [6] G. S. I. : Time-Variant dip moveout, Brochure published by Geophysical Service Inc. 1986
- [7] Hale, I. D. : Dip moveout by Fourier transform, *Geophysics*, 49(6)1984: 741～757
- [8] Judson, D. R., Schultz, P. S. and Sherwood, J. W. C. : Equalizing the stacking velocities of dipping events via DEVELISH, Presented at the 48th SEG Annual Meeting, 1978
- [9] Western Geophysical: Imaging steep structure Dip—Moveout processing, Brochure published by Western Geophysical Company, 1984
- [10] 陈广思，王铁鸣，刘在枢：美国一个石油公司的处理技术介绍，《石油物探译丛》，(1) 1983：1～26