

VSP资料的叠前波动方程逆时偏移

刘清林 骆毅

(地矿部南京石油物探研究所)

摘 要

刘清林, 骆毅: VSP资料的叠前波动方程逆时偏移, 《石油地球物理勘探》, 24(3) 1989: 281~289

从波动方程出发, 利用有限差分法导出波场外推公式, 由此可以进行波场正演计算和偏移。用P波方程编制的偏移程序VSP MIG既可用于地面资料的偏移, 也可用于井中资料的偏移; 既可用于P波偏移, 也可用于P-SV波偏移, 但需相应的变化速度模型。对于P波和P-SV波, 偏移的成像时间也是完全一样的。分别偏移分离后的上行P波和上行P-SV波, 可以得到纵波和横波两张偏移剖面, 这样比纵、横波资料的联合一次偏移可以得到更多的信息。

关键词: 垂直地震剖面法 叠前波动方程偏移 逆时偏移

ABSTRACT

Liu Qinglin and Luo Yi: Prestack wave equation reverse-time migration of VSP data, OGP, 24(3) 1989: 281~289

Based on wave equation theory, we can use finite difference method to derive wave-field extrapolation formula, by which both wave-field modeling and migration can be made. The migration program VSP MIG that was developed using P-wave equation may be used to migrate both surface seismic data and VSP data. Besides, it may be applied to the migrations of P-wave data and P-SV wave data, in which case the original velocity model should be modified properly. The migrated image times for P-wave and P-SV wave respectively are absolutely equal. The migrations of upgoing P-wave and upgoing P-SV wave which have been separated can offer migrated P-wave section and migrated S-wave section. Thus, we can get more informations than from simultaneous migration of P-wave and S-wave data.

Key words: VSP, prestack wave equation migration, reverse-time migration

引言

自五十年代初开始,特别是近几年来,地震勘探中的 VSP 技术获得了很大的发展,已从过去作为地面资料解释应用的辅助手段变成了勘探与生产中广泛应用的方法。在一些地区, VSP 方法已成为解释工作中必不可少的手段。实践证明, VSP 方法在查清井旁构造,研究岩石的物性,提取纵、横波信息等方面有着广阔的应用前景。目前,零偏移距 VSP 资料的处理已有了一套很好的处理流程,非零偏移距 VSP 资料的处理方法也有了较大的进展。

非零偏移距 VSP 资料的偏移成像,实际上是一种叠前偏移处理。通常我们用于地面地震资料的方法,如 F-K 偏移,有限差分偏移,克希霍夫积分法偏移,相移法偏移,波场外推深度延拓法偏移,虚谱法偏移等都可以用来做 VSP 资料的偏移成像。一些人在 VSP 偏移方面做出了开创性的工作,且已取得了显著的成果,如 G. A. McMechan, C. H. Chen 等。在多个共炮点 VSP 资料的偏移方面, Huang Zhaoying, R. W. Clayton 等人也提出了很好的解决办法。

对于单个炮点的非零偏移距资料,我们采用了全波动方程的有限差分方法,命名为 VSP MIG。该方法道理比较简单,实现起来容易,且可以适应于速度的任意变化。对于同一方程,既可作纵波资料偏移,也可作转换横波资料的偏移,还可以作井中资料与地表资料的联合偏移。同样,也可用于地面资料的叠后偏移,这就使得 VSP MIG 偏移程序具有了广泛的实用性。对非零偏移距 VSP 记录,首先要分离出上行 P 波和上行 P-SV 波,用 VSP MIG 程序可以分别得到纵波和转换横波的偏移剖面,这样比用弹性波一次偏移原始记录能得到更多的信息。对于偏移后的纵、横波剖面,还可以作振幅比分析,以揭示它所隐含的内容。

方法原理

基本理论

二维波动方程的正问题,可以定义为以下的波动方程定解问题 (A)

$$(A) \left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 U = \frac{1}{v^2(x, z)} U_{tt} \quad (1) \\ U|_B = f_1(x_0, z_0, t) \quad (2) \\ U|_{t \geq 0} = f_2(x, z, t) \quad (3) \\ U|_{t < 0} = 0 \quad (4) \\ B = \{(x_0, z_0, t) | x_0 = \pm a, z_0 = 0 \text{ 和 } z_0 = b, t \geq 0\} \\ D = \{(x, z, t) | -a \leq x \leq a, 0 \leq z \leq b, t \geq 0\} \end{array} \right.$$

其中, D 为求解区域; B 为边界; 方程 (1) 为二维波动方程, U_{tt} 为波场对时间的二阶导数; 方程 (3) 为初值条件; 方程 (4) 为自然条件。因此, 定解问题 (A) 可以表述为在已知边界条件和初值条件的情况下, 求波动方程在区域 D 中的解。

一般来说, 正演问题是求解初值问题, 即当 $t \geq 0$ 时的激发波场, 进而求出空间各点波场随时间的变化。而我们所要解决的归位问题, 一般称之为反问题, 即在已知地表或井中资料的情况下, 恢复原来的波动过程, 并根据成像条件确定地下的构造。因此, 这个问题可以表述为下面的定解问题

$$(B) \begin{cases} \nabla^2 U = \frac{1}{v^2(x, z)} U_{tt} & (1) \\ U|_{t \leq T} = f_3(x, z, t) & (5) \\ U|_B = f_4(x_0, z_0, t) & (6) \\ U|_{t > T} = 0 & (7) \\ B = \{(x, z, t) | x_0 = \pm a, z_0 = 0 \text{ 和 } z_0 = b, 0 \leq t \leq T\} \\ D = \{(x, z, t) | -a < x < +a, 0 < z < b, 0 \leq t \leq T\} \end{cases}$$

其中, B 为边界; D 为求解区域; f_4 为一定的边界条件 (如吸收边界条件等); f_3 为地震记录, 它可以位于区域 D 中的任意位置; T 为波场记录的时间最大值。

根据逆时的概念, 可以将定解问题 (B) 看成初值问题求解, 即在时间上从最大时间 T 依次递减 Δt , 由方程 (6) 求出空间每一网格点上不同时刻的值。定解问题 (A) 和 (B) 并没有实质上的差别。从数学上讲, 都是在已知边界条件和初值条件下求解波动方程的解, 只是偏移时需要计算空间每一点上的成像时间。

对于定解问题 (A) 和 (B), 可以采用二阶有限差分法求解。空间坐标, 采用二阶中心差分格式。时间 t , 采用二阶向前差分的显格式。现令, Δx 为 x 方向的采样间隔; Δz 为深度 z 方向的采样间隔; Δt 为时间采样间隔。离散后的波动方程可以表示为以下的形式

$$\begin{aligned} U(ix, iz, it) = & b \cdot U(ix, iz, it-1) - U(ix, iz, it-2) \\ & + az \cdot [U(ix+1, iz, it-1) + U(ix-1, iz, it-1)] \\ & + ax \cdot [U(ix, iz+1, it-1) + U(ix, iz-1, it-1)] \end{aligned} \quad (8)$$

其中系数: $b = 2(1 - ax - az)$, 这里

$$ax = V^2(ix, iz) \cdot \Delta t^2 / \Delta z^2$$

$$az = V^2(ix, iz) \cdot \Delta t^2 / \Delta x^2$$

当空间采样间隔 $\Delta x = \Delta z$ 时, 方程 (8) 可以简化为如下形式^[1]

$$\begin{aligned} U(ix, iz, it) = & 2(1 - 2A^2)U(ix, iz, it-1) - U(ix, iz, it-2) \\ & + A^2[U(ix+1, iz, it-1) + U(ix-1, iz, it-1) \\ & + U(ix, iz+1, it-1) + U(ix, iz-1, it-1)] \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $A = V(ix, iz) \cdot \Delta t / \Delta x$ 。

利用公式 (8) 或 (9) 加上相应的初值、边界条件就可以作正演计算或偏移归位。如果需要求解更高阶的差分方程, 可由这些公式推广到求解三维偏移归位的问题。

边界条件及稳定性条件

边界条件

一般情况下, 我们所处理的问题其空间范围不可能是无限的, 这样就不可避免地在人为边界上产生边界反射, 干扰有效波, 因此必须采用一定的方法消除这种边界反射。我们用 Reynolds^[2] 方法及 Engquist^[3] 的吸收边界条件方法, 可以较好地解决这一问题。

稳定性条件

根据 Mitchell (1969) 或 McMechan (1985) 方法, 采样间隔必须满足以下关系

$$p = \frac{V \cdot \Delta t}{\Delta x} < \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (10)$$

式 (10) 为差分格式所要满足的稳定性条件。

成像时间的计算

在做逆时偏移时, 需要计算每个空间网格点上的成像时间, 即由震源到空间每个网格点上的直达波时间 t_d 。计算时可采用射线追踪方法或解时间场方程^{[5]、[6]}来实现

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{V^2(x, z)}$$

应 用

图 1a 为一水平层状模型, $V_1 = 2000\text{m/s}$, $V_2 = 3000\text{m/s}$, $H_1 = H_2 = 500\text{m}$; 图 1b 为炮检距 $x = 920\text{m}$ 时 VSP 正演记录; 图 1c 是由图 1b 的正演资料偏移后的结果。从井到 AB 线之间的区域为可信度范围, 在可信度范围内, 反射界面已很好地成像了。

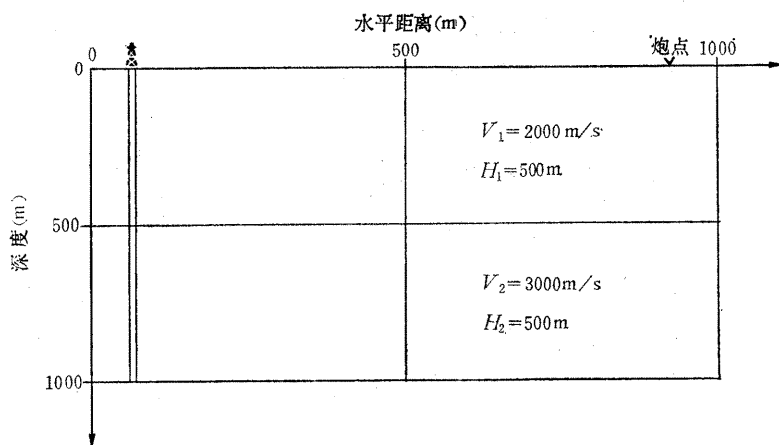


图 1a 水平层状介质模型

图 2a 为界面倾斜的层状介质模型; 图 2b 为相应于图 2a 的正演记录; 图 2c 是由图 2b 经逆时偏移后的结果。

图 3a 为东北吉林某地 QR-3 井的上行波 P 波资料; 图 3b 为计算成像时间所用的初

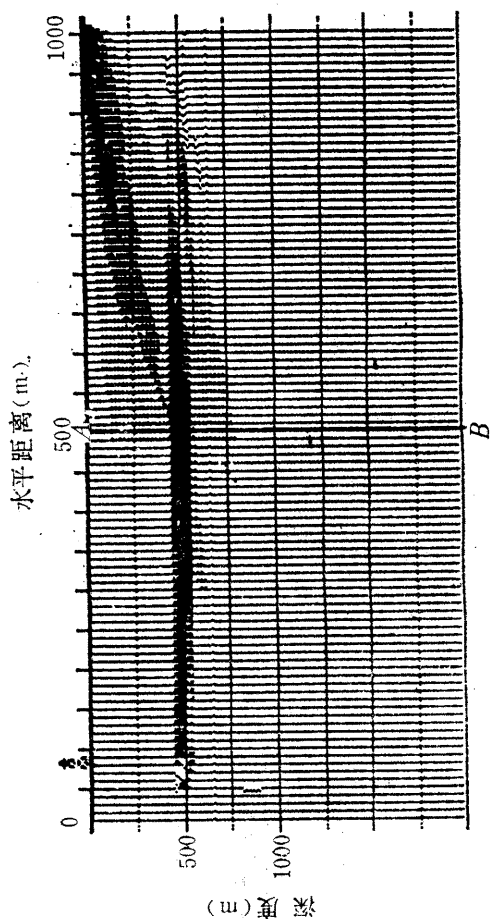


图 1c 图 1b记录的偏移结果

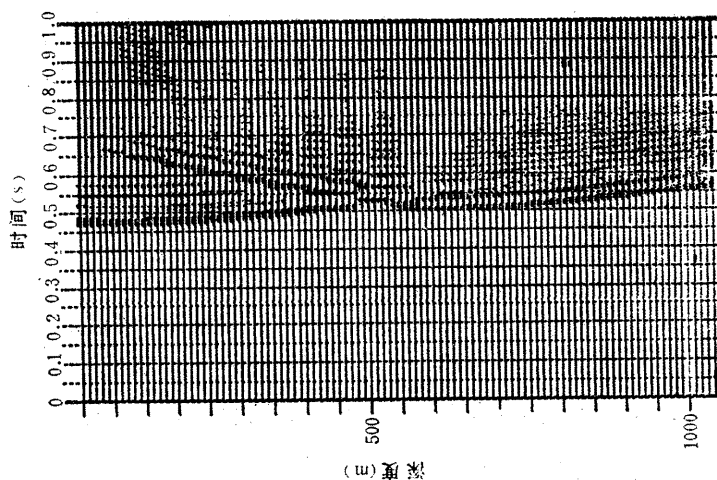


图 1b 非零偏移距正演模型
(偏移距 $x=920\text{m}$)

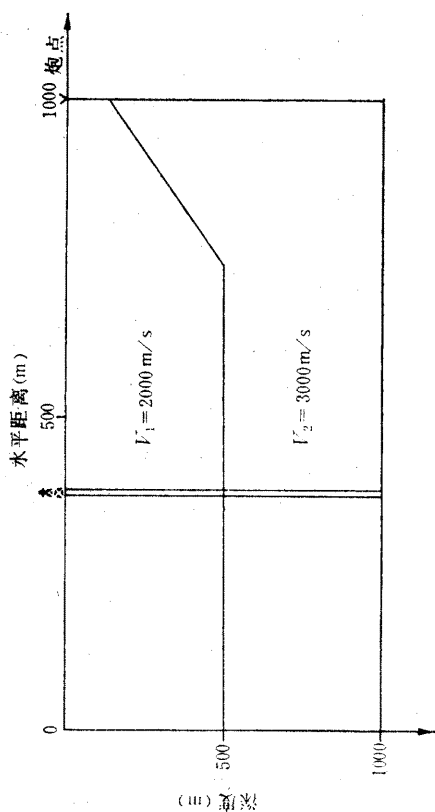


图 2a 理论模型

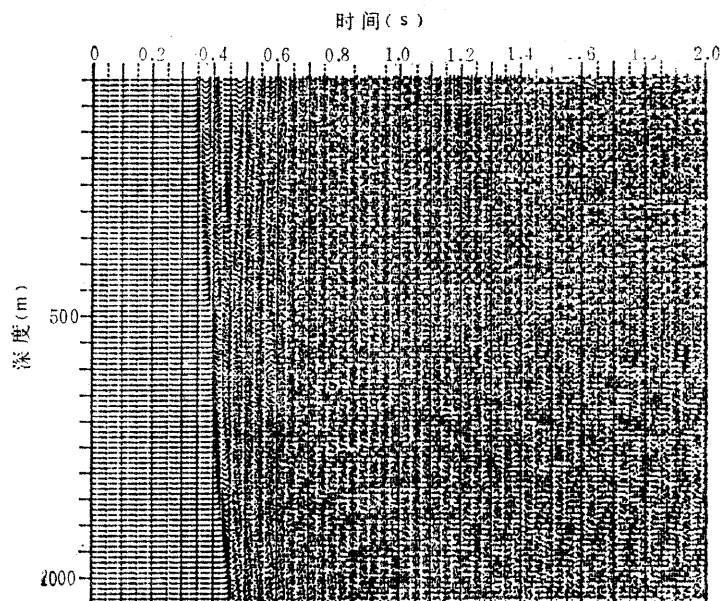
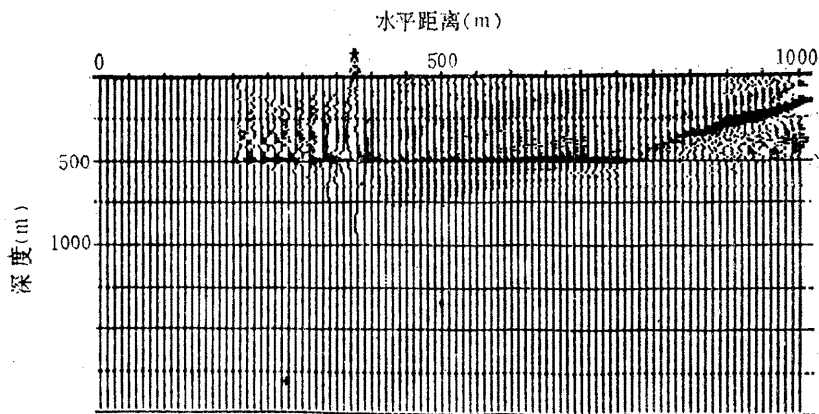


图 2b 相应于2a的非零偏移距VSP记录

图 2c 图2b经逆时偏移后的结果
(偏移距 $x=650\text{m}$)

始速度模型；图 3c 为偏移剖面（偏移距 $x=3500\text{m}$ ）。

图 4a 为 QR-3 井上行 P-SV 波剖面，计算成像时间条件与 P 波相同（图 3b），只是偏移时要用横波速度 V_s 。为了简便起见，这里采用 $V_s = \sqrt{3} V_p$ 。图 4b 为图 4a 的偏移剖面，显示时做了道内均衡。从纵横波偏移剖面可以看出，在较深处波组所对应的一致性较好，在某些部位，纵、横波剖面可以起到互补的作用。图 5 为偏移结果的纵波与转换横波的能量比。图 6 为偏移结果的转换横波与纵波能量比。对于这些结果，尚有待作进一步的解释。

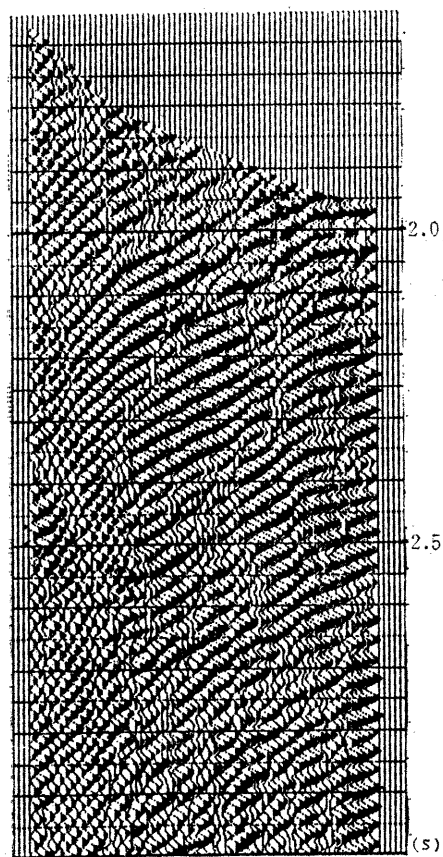


图 3a QR-3井上行P波剖面

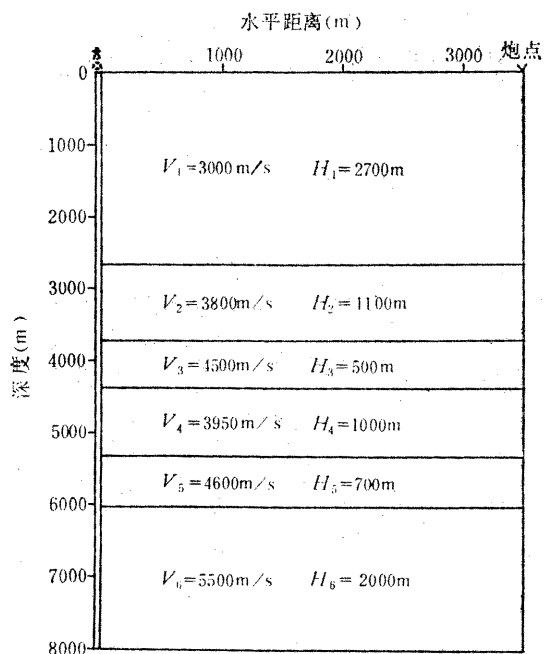


图 3b 计算成像时间的初始速度模型

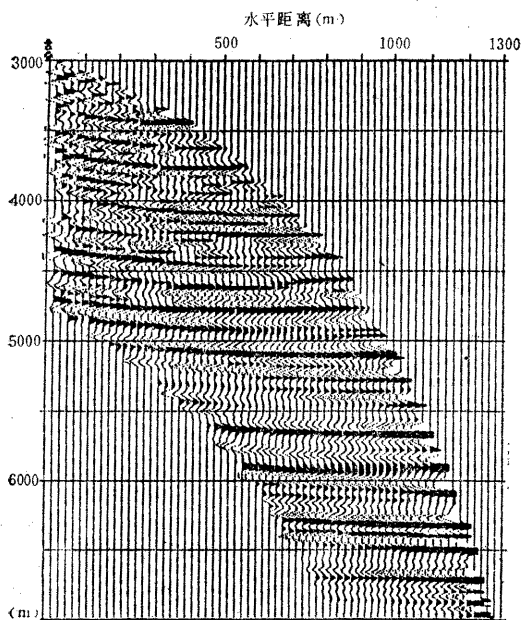


图 3c QR-3井上行P波偏移剖面

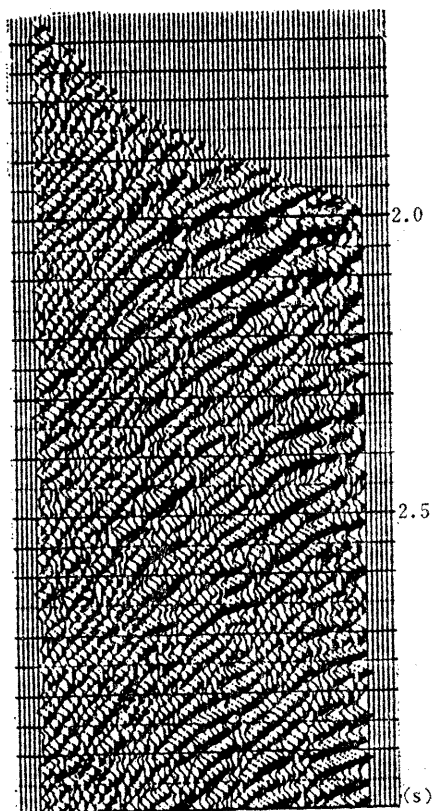


图 4a QR-3井上行SV波剖面

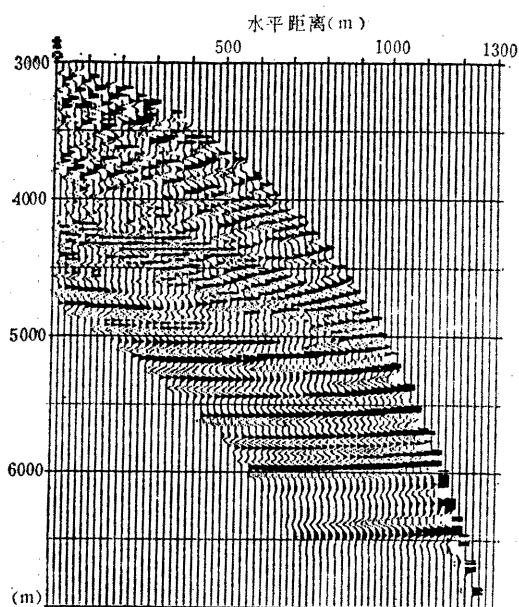


图 4b QR-3井上行P-SV波偏移剖面

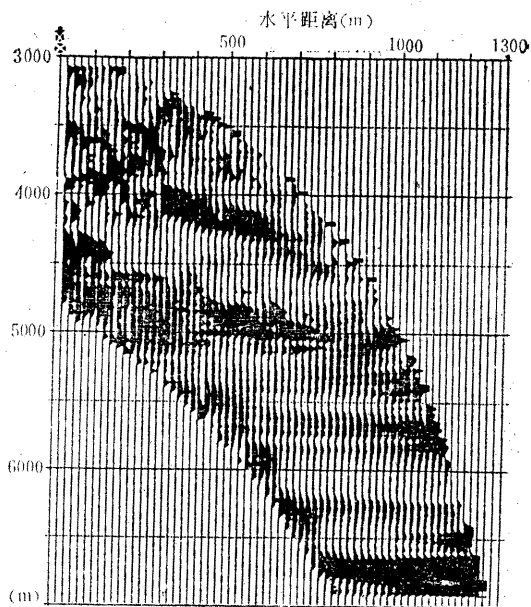


图 5 QR-3井偏移剖面P波与P-SV波能量比

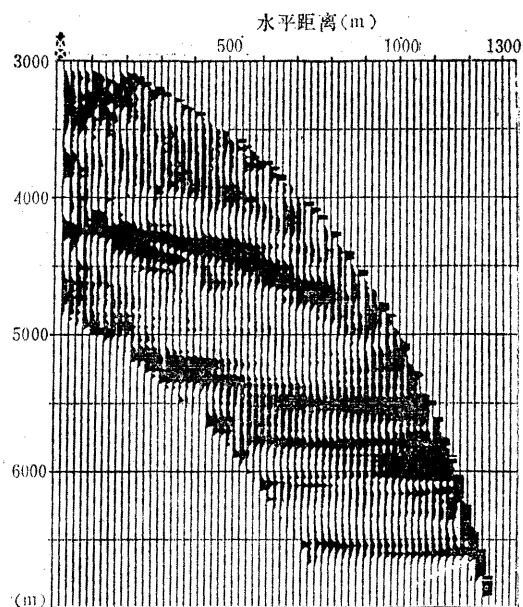


图 6 QR-3井偏移剖面P-SV波与P波能量比

结 束 语

波动方程偏移和正演一样,都是已知初值条件和边值条件外推波场,只是偏移需要计算成像时间。利用纵波方程既可以偏移纵波资料也可以偏移横波资料,只是要改变偏移速度。这样分别偏移纵、横波资料可以得到两张偏移剖面,比纵、横波资料的一次偏移所得的到一张偏移剖面具有更多的信息。

目前,我们所采用的全波动方程差分法和正演一样,在作偏移时也会产生反射等干扰,今后拟采用双程无反射波动方程作逆时偏移,可作进一步的比较分析。

在本文的完成过程中,承蒙唐权钧、王维佳、朱弦、顾贤明、何樵登、侯安宁、管路平、郭莹秋等诸位的帮助,在模型制作方面感谢吴露同志的帮助。

参 考 文 献

- [1] McMechan, G. A. : Synthetic finite-offset vertical seismic profiles for laterally varying media, *Geophysics*, 50 (4) 1985: 627~636
- [2] Reynolds, A. C. : Boundary conditions for the numerical solutions of wave propagation problems, *Geophysics*, 43 (6) 1978: 1099~1110
- [3] Clayton, R. , Engquist, B. : Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equation, *BSSA*, 67 (6) 1977
- [4] Whitmore, N. D. , Lines, Larry R. : Vertical seismic profiling depth migration of a salt dome flank, *Geophysics*, 51 (5) 1986: 1087~1109
- [5] Cêrevêng: The ray method in seismology, 1985
- [6] Reshef, M. and Kosloff, D. : Migration of common shot gathers, *Geophysics*, 51 (2) 1986: 324~331
- [7] Etgen, John T. : Prestack reverse time migration of shot profiles, SEP-50, 1987

(上接第280页)

- [3] Moon, W., Carswell, A., Tang, R., and Dillistone, C. : Radon transform wave field separation for vertical seismic profiling data, *Geophysics*, 51 (4) 1986: 940~947
- [4] Hardage, B. A. : *Vertical seismic profiling, part A: principle*, Geophysical press, London, 1983
- [5] 姜天平: 多道中值滤波在分离 VSP 波场中的应用, 《石油地球物理勘探》, 20 (4) 1985: 433~437
- [6] Seeman, B. and Horowicz, L. : Vertical seismic profiling: Separation of upgoing and downgoing acoustic waves in a stratified medium, *Geophysics*, 48(5) 1983: 555~568
- [7] Aminzadeh, F. : A recursive method for the separation of upgoing and downgoing waves of vertical seismic profiling data, *Geophysics*, 51(12) 1986: 2206~2218
- [8] 戈革: 地震波动力学, 石油工业出版社, 1980
- [9] Wyatt, K. D. : Synthetic vertical seismic profile, *Geophysics*, 46(6) 1981: 880~891