

VSP 与地面地震资料的 联合偏移处理

林小竹 包吉山

(江汉石油学院物探系) (成都地质学院物探系)

摘 要

林小竹, 包吉山: VSP 与地面地震资料的联合偏移处理, 《石油地球物理勘探》, 24 (3) 1989: 248~255, 311

本文利用双程全波波动方程, 采用有限差分算法, 沿逆时方向对源点波场和记录波场进行延拓, 并借助于 Claerbout 成像条件, 实现了 VSP 与地面地震资料 (SRP) 的联合偏移处理。方法的关键在于利用了自由面产生的下行多次反射波信息, 以扩大 VSP 成像的范围。采用这种宽孔径成像方法的结果表明, 即使对单个共炮点道集也能收到相当好的成像效果。方法的另一个特点在于波场外推是对整个记录进行的, 因此, 处理中不需要特地识别初至, 也不需要分离上行波和下行波。对合成数据的应用表明, 该算法具有良好的效果和潜力。

关键词: 垂直地震剖面法 波动方程偏移 逆时偏移

ABSTRACT

Lin Xiaozhu and Bao Jishan: The simultaneous migration of VSP data and surface reflection profiling data, *OGP*, 24(3)1989: 248~255, 311

Both source wave field and receiver wave field are continued along reverse-time direction by making use of two-way full wave equation and finite difference method. Then, the simultaneous migration of VSP data and surface reflection profiling data can be achieved with the use of Claerbout image conditions. The essential of this method is to use downgoing multiples generated from free surface so as to enlarge VSP image extent. The use of wide aperture image method even makes single common-shot gather find quite good image result. Furthermore, the extrapolation of wave field is performed on whole seismic

section so that there is no need to identify first break and to separate upgoing wave from downgoing wave in data processing. The application of this method to synthetic data shows its good effect and potential.

Key words: vertical seismic profiling (VSP), wave equation migration, reverse-time migration

引 言

在过去的十多年中,地球物理学家们对早期的地震技术之一——在地球内部深处直接测量的垂直地震剖面(VSP)法重新萌生了兴趣,并获得了崭新的认识,致使对越来越多的探井采用VSP方法。这种既老(指概念提出早,约本世纪三十年代)又新(指应用较晚,近十年的事情)的采集技术得以风行,原因在于它缓解了地面地震方法中遇到的一些实际困难。在地面记录时,经常会出现一些问题。例如,由于风化层衰减而不能接收到较好的反射波,期望信号中往往混杂有相干波和随机噪声。但将检波器置于井中,这些问题就变得容易解决。垂直地震剖面法还能获得较常规反射数据要高的分辨率和较强的穿透性,这在某种程度上补充了常规地震剖面的不足,因此,VSP技术被广泛地用于石油勘探之中。

尽管VSP技术因其自身的长处而在石油勘探领域中得到了广泛的应用,但也并非十全十美。它有一个十分明显的缺点,即垂直地震剖面上波的组合形态远不如地表反射剖面那样看起来直观。即使是一个经验丰富的地震解释员,面对这一张张垂直地震剖面,也往往被弄得束手无策。为使解释工作更好地进行,我们有必要对VSP资料进行偏移归位,将它还原为地下本来的构造形态。最近几年,国内外地球物理界都开展了这方面的研究工作,越来越频繁地用VSP数据进行成像尝试。但到目前为止,有关VSP资料波动方程偏移的文献仍然极少。Chang和McMechan(1986)曾发表了利用激发时间成像条件实现离井VSP数据的逆时偏移;Hu和McMechan(1986)发表了在二维变速介质中利用射线方程外推的VSP数据的偏移。但他们二者都部分地或全部地使用了射线方程。Whitmore和Lines(1986)在讨论盐丘侧翼的VSP深度偏移时,给出了VSP处理的一个实例。而在国内,几种主要的地球物理杂志上迄今还未见到有关VSP资料波动方程偏移方面的论著。

近年来,叠后(零偏移距)和叠前(非零偏移距)地震数据的逆时偏移已为许多作者所讨论,其主要思想在于观测波场的外推是沿逆时方向进行,而不象通常那样沿深度方向下行延拓。对于零偏移距数据,是将数据外推到时间零点(即爆炸反射面模型),该算法中的成像条件是隐含的,且时间零点处的有限差分波场构成了成像剖面。隐含成像条件的简单化使上述算法不适用于一般情况,对于非零偏移距数据,爆炸反射面模型已不再成立,幸运的是我们可以更一般地定义成像条件。定义广义成像条件的关键思想是源点波场和记录波场可以外推,且反射界面存在于两波场同相的位置上(Claerbout, 1971, 1976)。

方法原理

正演

VSP 合成记录的获取是通过正演模拟下列标量波动方程得到的, 即

$$\rho v^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中 $u(x, z, t)$ 为压力; $v(x, z)$ 为速度; $\rho(x, z)$ 为密度。

延拓

偏移所需的入射波场可通过解下面的波动方程得到,

$$v \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial u_I}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u_I}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial^2 u_I}{\partial t^2} = \frac{\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)}{v(\mathbf{x}_0)} f(t) \quad (2)$$

其中 $u_I(x, z, t)$ 为入射波场; $v(x, z)$ 为速度; $f(t)$ 为震源项; $\mathbf{x}_0 = (x_0, z_0)$ 为震源位置。方程 (2) 是将方程 (1) 中的声阻抗视为常量的结果, 利用它可以减弱层间多次反射波的影响。

偏移所需的反射波场可由类似的波动方程

$$v \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial u_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u_R}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial^2 u_R}{\partial t^2} = \int_s u_s(x_s, z_s, T-t) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) ds \quad (3)$$

外推得到。式中 $u_R(x, z, t)$ 为反射波场; $u_s(x_s, z_s, t)$ 为 VSP 记录; $s(\mathbf{x}_s) = s(x_s, z_s)$ 为记录面 (即探井)。式 (3) 与式 (2) 的不同之处在于震源项上, 它是把反射地震记录的时间轴逆序后作为震源分布项。这也正是逆时偏移的实质所在。

成像

图 1 表示在常速水平层状介质情形下, 由地面地震 (SRP) 方法所获得的单道记录

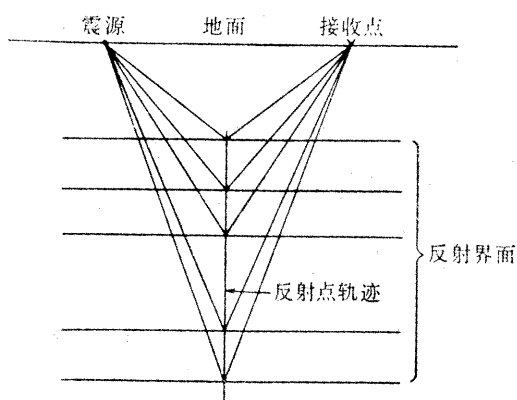


图 1 在常速水平层状介质情形下 SRP 单道记录反射点分布几何图

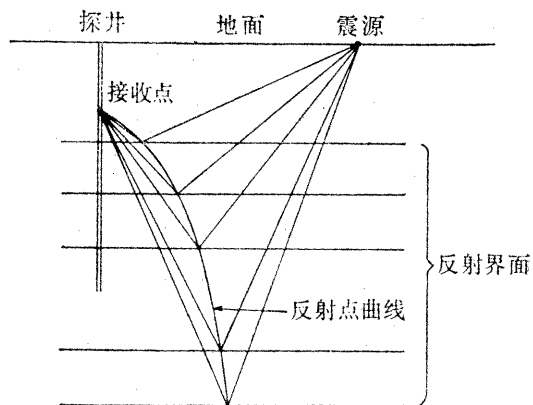


图 2 在常速水平层状介质情形下 VSP 单道记录反射点分布几何图

反射点的分布轨迹。显然,它是一条直线,而直线是易于重合的,所以SRP发展了诸如多次覆盖的野外采集,水平叠加的室内处理等一整套有效的技术手段。图2表示在同样的地下结构条件下,由VSP方法获得的单个记录道反射点的分布轨迹。它是一条曲线,而曲线的完全重合是较困难的,甚至是不可能的,除非震源和检波点位置不变,但那种叠加已属于垂直叠加的范畴,在VSP技术中称为等深度叠加。比较二者反射点的分布轨迹或成像曲线,可以得出结论:VSP不存在象SRP那样的多次覆盖的观测系统,所谓的VSPCDP叠加即使在最简单的情况(水平层状介质的条件)下也是一种近似的概念。

由于VSP偏移属于叠前偏移,爆炸反射面模型不再成立,所以必须对标准(零时)成像条件加以推广(Chang和McMechan, 1986),采用广义成像条件,即反射界面存在于入射波场和反射波场同相的位置上。用公式表示为

$$R(x, z) = \frac{\int_t u_R(x, z, t) u_I(x, z, t) dt}{\int_t u_I^2(x, z, t) dt} \quad (4)$$

式中 R 代表地下的反射率结构,即构造形态。

实 现 步 骤

本方法采用如下几个步骤来完成。

1. 输入模型参数。
2. 选用离散波动方程的二阶或四阶有限差分显格式和二阶吸收边界条件,对波在地下的传播进行数值模拟。
3. 在地表接收来自地下界面的反射波,形成SRP合成记录;在井中接收震源波形通过地层后的各种响应,包括直达波和反射波(或上、下行波),从而形成VSP合成记录。
4. 将数据作为边值条件或震源分布项逆时输入,计算出每个时间步长的地下反射波场值。
5. 利用广义成像条件,对反射波场与入射波场做互相关,获得地下反射率结构,即偏移剖面。
6. 输出结果。

效 果 分 析

为了说明该方法的效果,我们对理论模型做了试验,其结果如下。

模型1

文中采用的第一个模型是点脉冲模型,点脉冲记录如图3a所示,其VSP偏移结果示于图3b。图中可见到两个椭圆,其中一个椭圆是由上行波形成的,它以井中接收点 R 和震源位置 S 为焦点(图3c);另一个椭圆则是由自由面反射的下行波形成的,它是

以井中接收点 R 关于自由面（地表）成镜像对称的虚拟接收点 R' 和震源位置 S 为焦点（图 3d）。一个点脉冲记录经 VSP 偏移后，能形成即包含上行波信息，又包含下行波信息的两个椭圆。而在 SRP 中由于记录的都是上行波信息，一个点脉冲记录偏移的结果只能有一个椭圆（叠前偏移）或一个半圆（叠后偏移）。这正是垂直地震剖面与地表反射剖面的不同之处。这个不同之处也恰好是我们能够加以利用的，它使我们有可能除了利用上行波信息之外，还可以利用下行波信息来扩大成像的范围。

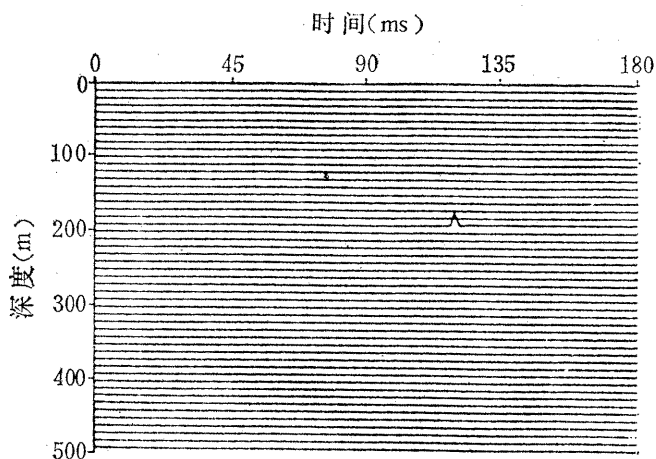


图 3a VSP点脉冲记录

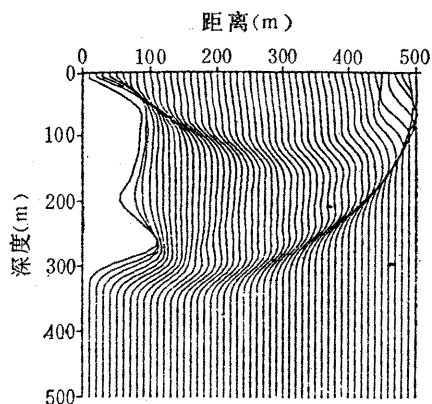


图 3b 点脉冲记录的VSP偏移剖面

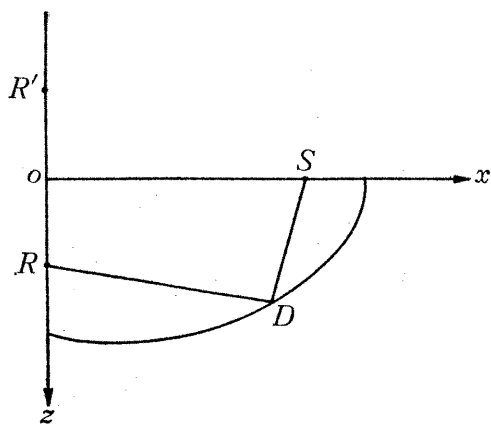


图 3c 点脉冲VSP偏移上行反射波椭圆模型 2

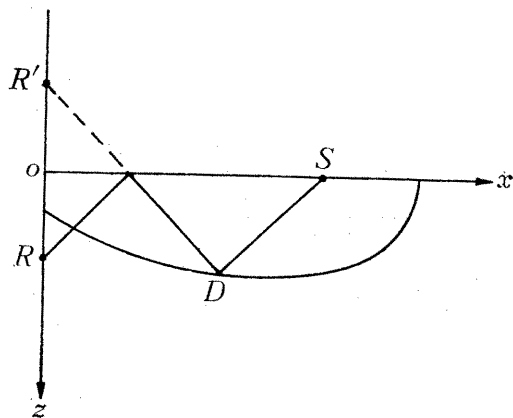


图 3d 点脉冲VSP偏移下行反射波椭圆

第二个模型是倾斜层，其几何结构示于图 4a，倾斜界面的角度为 45° 。图 4b 是它的 VSP 记录，其 VSP 偏移结果如图 4c 所示。从图中可见，成像的范围是很宽的。尽管只是一张单炮记录，却几乎使整个倾斜界面得到很好的成像。此外，还有两点值得引起我们注意，其一是，在 VSP 偏移剖面上，只有 VSP 井靠近震源一侧的界面是可靠的，而 VSP 井远离震源的另一侧的界面往往是一些假象，不可轻信。当然也有例外，具体情况要做具体分析才能得出正确结论。其二是偏移后的剖面上，在震源位置附近有一团阴影，这是震源残留的影响，有时这种影响是很严重的，以致能掩盖一些弱反射界面，所以往往要对震源位置附近的影响进行相对压制，或者干脆就不在震源附近成像。

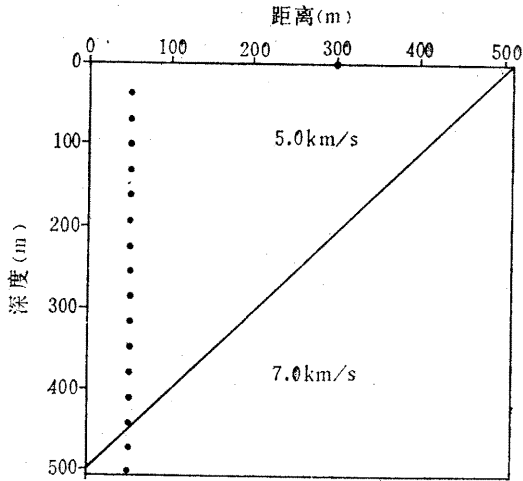


图 4a 倾斜层模型

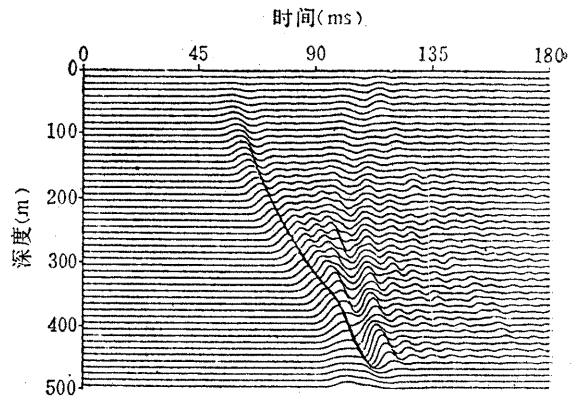


图 4b VSP记录

模型 3

第三个模型是断块模型,其几何结构如图 5a 所示。图 5b 是左边探井的 VSP 记录,记录上除了下行直达波外,来自断块倾斜面和下底面的上行反射波也相当清楚;其 VSP 偏移的结果示于图 5c,它基本上反映了模型左边的结构。图 5d 是右边探井的 VSP 记录;它的 VSP 偏移结果如图 5e 所示。图 5f 是在地面接收到的 SRP 记录,此张记录剖面的质量应该说是较高的。从记录上可以清楚地看到来自断块角点的绕射波和下底面的反射波,它的直达波(初至)振幅相对反射波或其它续至波而言是很强的,要进行相对压制或自动增益控制才能显示出直达波之后的有效信号。图 5f 的偏移剖面示于图 5g,图中绕射能量基本上收敛,断块的角点和部分下底面清晰可见。但单纯地面记录的这种偏移,其成像范围是相当有限的,它根本反映不出断块模型的基本结构,可见记录孔径

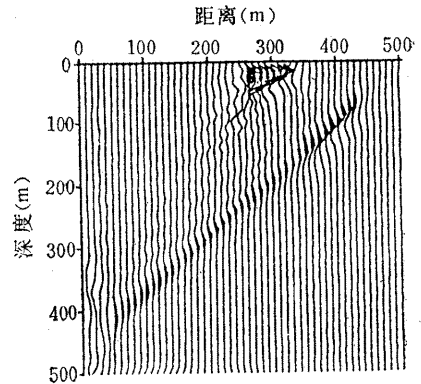


图 4c VSP偏移剖面

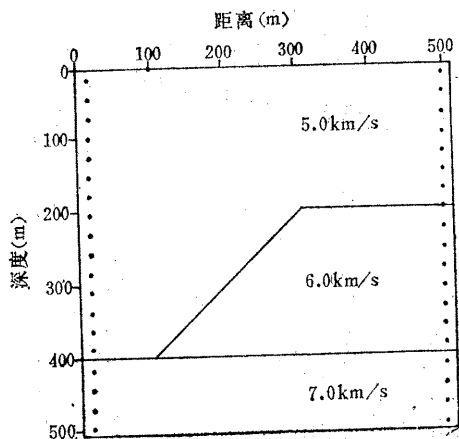


图 5a 断块模型

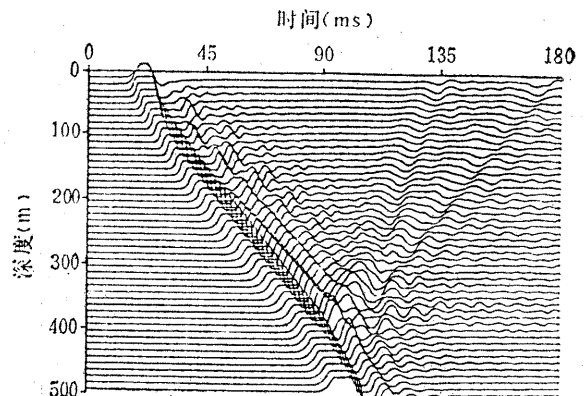


图 5b 左边探井的 VSP 合成记录

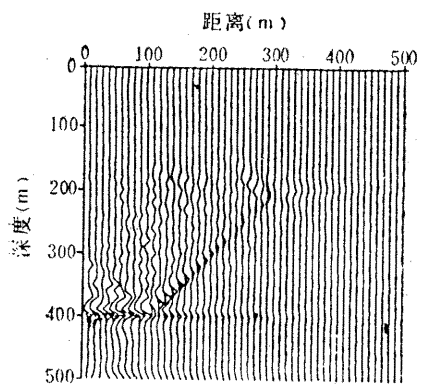


图 5c 左边探井的VSP偏移剖面

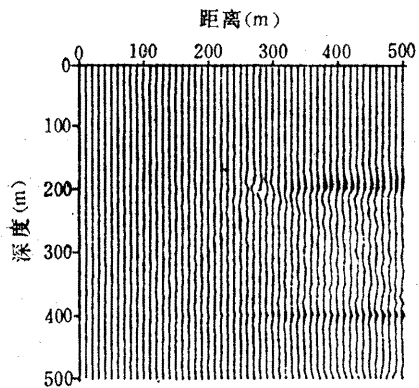


图 5e 右边探井的VSP偏移剖面

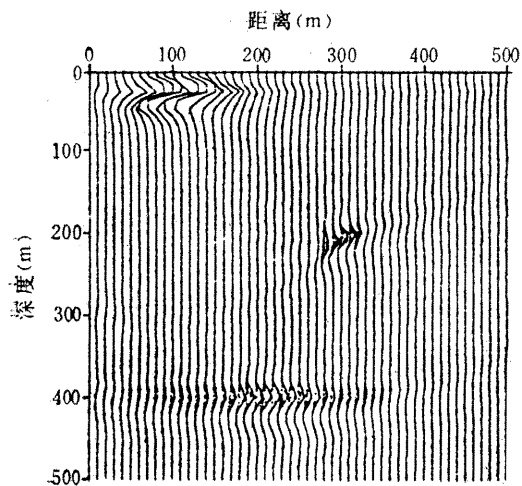


图 5g SRP偏移剖面

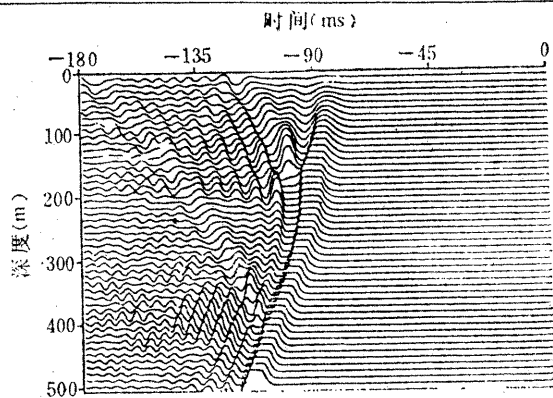


图 5d 右边探井的VSP合成记录

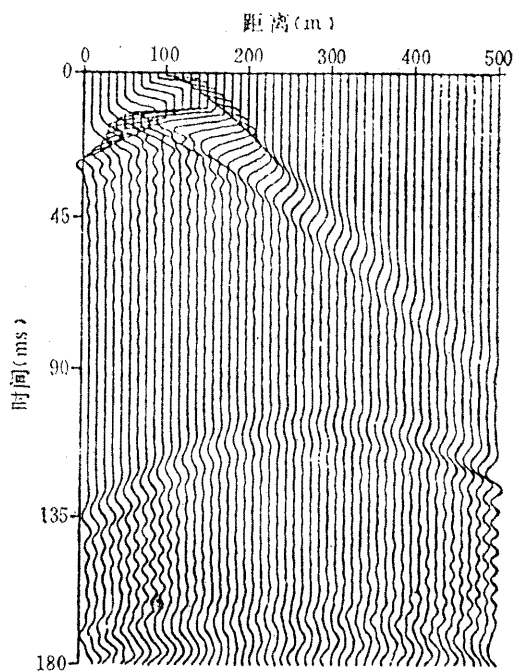


图 5f SRP合成记录

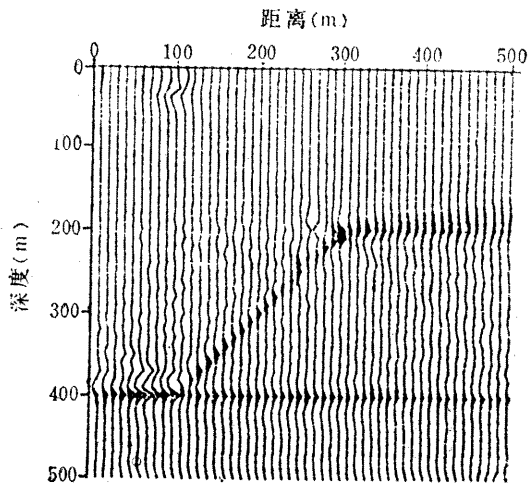


图 5h VSP与SRP联合偏移剖面

是多么严重地影响着成像的范围以及偏移的质量。图 5h 是 VSP 资料与 SRP 资料联合偏移的结果,从图中可见,偏移赝像基本上消失,断块模型的结构得到了完整的恢复,甚至可与原始模型(图 5a)进行对比,这正是宽孔径成像的诱人之处。

结 束 语

VSP 数据的外推既包括上行波也包括下行波两个方向,因此,需要采用双程外推算子。由于本文在实现外推时采用了双程全波波动方程,故不存在倾角限制。

评价 VSP 偏移后的图像时,记住处理的是单个震源所产生的叠前数据是很有必要的。通过合成的例子,我们已说明了记录的孔径是如何强烈地影响着偏移成像的信息,部分数据只能完成部分成像。因此,整个目的带不可能由单个震源完全成像,这种成像的可靠解释只有在充分考虑了记录的几何结构情况下才得以进行。如果有效孔径足够宽,则即使从单个震源的共炮点道集上也有可能恢复出相当完整的构造成像。这种宽孔径成像可通过同时偏移井下和地表数据来获得。把这种研究方法用于实际的主要困难也许还在于数据的采集,至少,无论何时在井中记录 VSP 都应认真思考怎样同时也在地面上接收。这种低成本的改进将从根本上提高 VSP 数据、地表数据的价值和可解释性。

本文作者及其研究工作曾得到成都地质学院贺振华副教授,原煤炭工业部地质局物探公司超声模型实验室于振清高级工程师的帮助。与美国哥伦比亚大学黄肇英及朱玉华两位博士所进行的多次讨论对作者也大有裨益,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Balch, A. H. and Lee, M. W.: Vertical seismic profiling: technique, applications and case histories, IHREC, Boston, 1984
- [2] Baysal, E., Kosloff, D. D. and Sherwood, J. W. C.: The two-way nonreflection wave equation, *Geophysics*, 49 (2) 1984: 132~141
- [3] Chang, W. F. and McMechan, G. A.: Reverse-time migration of offset vertical seismic profiling data using the excitation-time imaging condition, *Geophysics*, 51 (1) 1986: 67~84
- [4] Gazdag, J. and Carrizo, E.: On reverse-time migration, *Geophysical Prospecting*, 34 (6) 1986: 822~832
- [5] Hardage, B. A.: *Vertical seismic profiling, part A: principles*, Geophysical Press, London, 1983
- [6] Hu, L. Z. and McMechan, G. A.: Migration of VSP data by ray equation extrapolation in 2-D variable velocity media, *Geophysical Prospecting*, 34 (5) 1986: 704~734
- [7] Hu, L. Z. and McMechan, G. A.: Wave-field transformation of vertical