

井间地震初至波分析

张文波¹, 朱光明¹, 马德堂², 杜有成¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

[摘要] 在模拟对比不同模型条件下初至波的基础上, 分析了造成初至不清晰两种可能的原因, 一种是初至波为续至波所干扰, 另一种初至波在垂直方向上的投影很小甚至为零。并指出可以综合利用水平分量和垂直分量记录来提高初至时间拾取的精度。

[关键词] 地质工程; 井间地震; 初至波; 多分量

[中图分类号] P631.8⁺1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)01-0070-05

Analysis to First Breaks in Cross Hole Seismic Waves

ZHANG Wen bo¹, ZHU Guang ming¹, MA De tang², DU You cheng¹

(1. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: For some traces in field cross hole seismic records of which the shot point is near to the receiver point in vertical direction, it is difficult to pick the first break time accurately according to the ambiguous first break outline. On the basis of modeling for the first break characters with different velocities, this paper discusses the reasons induced to ambiguous first break outline. One is the influence of the second break wave, and the other is that the vertical projection of first break wave is near to zero. A method for picking first break time accurately is put forward by using both the vertical and the horizontal components synthetically.

Key words: geological engineering; cross hole seismic; first break; multi component

0 引言

初至波层析成像是井间地震技术的重要组成部分, 它需要精确拾取井间地震记录的初至时间^[1-2]。在野外采集的井间地震记录上, 距离炮点深度最近的接收点深度上接收到的地震记录初至往往不清晰, 不易拾取。李庆忠形象地将在垂直方向上接收点与激发点距离小于井间距的接收区称为“牛角尖”区, 认为在该区地震波场极为复杂, “射线理论已经不再适用, 初至也无法准确拾取”, 并指出井间地震今后的出路在于将接收段布置在炮点上方或下方, 在垂直距离上应错开一个井间距^[3]。

然而, 由于受传统认识、震源激发能量及施工设计要求的影响, 目前进行的井间地震勘探并没有严格按照避开“牛角尖”区的要求进行设计施工, 得到的井间地震记录也就不可避免地存在初至拾取的问题。

针对上述问题, 笔者分析了单一反射界面情况下各种初至波的传播特点, 利用水平层状介质模型, 在对比不同速度模型情况下的初至波传播路径和初至时间的基础上, 推导了初至波与续至波振幅矢量合成公式, 分析了近炮点井间地震记录初至不清晰的可能原因。并通过对实际井间地震数据的 H_1 和 H_2 水平分量数据进行旋转合成处理, 得到了清晰连贯的初至。

1 单一水平反射界面井间地震初至波

由于井间地震是在井中激发和井中接收, 其初至除了包含直达波和折射波外, 还有入射波穿过反射界面后到达接收点的透射波^[4]。图 1 是单一水平反射界面情况下的井间地震各种初至波的射线路径示意图, 其中 AD 表示在同一种介质中由震源点直接到达接收点的直达波, ABT 表示从震源点出发穿过反射界面到达接收点的透射波, $ACER$ 表示入射角达到临界角后, 地震波沿界面滑行再到达接收点的折射波。设激发井和接收井之间的距离为 H , 震源点 A 与反射界面 PF 之间的距离 $AP=a$, 接收点 T 与反射界面 PF 之间的距离 $TF=b$, 接收点 R 与反射界面 PF 之间的距离 $PF=c$, 接收点 D 与激发点 A 在垂直方向上的距离为 d , 震源点所在的层速度为 V_1 , 反射界面以下的层速度为 V_2 , $G=V_2/V_1$, 入射角为 α 临界角为 α_0 , 透射角为 β , $GB=x_1$, $BF=x_2$, 则可以得到:

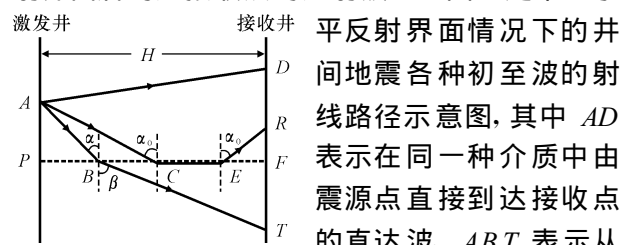


图 1 井间地震初至波示意图

Fig. 1 First Break of Cross well Seismic

直达波走时表达式

$$t_d = \frac{\sqrt{H^2 + d^2}}{V_1}$$

折射波走时表达式

$$t_r = \frac{H}{V_2} + (a + c) \left(\frac{\sec \alpha_0}{V_1} - \frac{\tan \alpha_0}{V_2} \right)$$

透射波在界面上透射点的横坐标表达式 x_1 和透射波走时 t_t 表达式

$$x_1 = \frac{a \sqrt{1 - G^2 \sin^2 \alpha}}{a \sqrt{1 - G^2 \sin^2 \alpha} + b G \cos \alpha} H$$

$$t_t = \frac{\sqrt{x_1^2 + a^2}}{V_1} + \frac{\sqrt{(H - x_1)^2 + b^2}}{V_2}$$

对 3 种类型的初至波进行分析, 可以看出:

(1) 在只有一个反射界面的情况下, 在震源点所在层中的任一接收点上, 均可接收到直达波。

(2) 如果震源点位于低速层, 在反射界面与离开反射界面 $\frac{H - a \tan \alpha_0}{\tan \alpha_0}$ 之间的接收段内可以接收到折射波。如果震源点位于高速层, 则接收不到来

自该界面的折射波。

(3) 无论激发点位于高速层还是低速层, 在反射界面另一侧的任一接收点上均可以接收到透射波。

图 1 中当震源点位于低速层时, 射线在反射界面上存在临界角, 当入射角达到临界角时, $x_0 = GC = a \tan \alpha_0$, 透射波沿界面滑行, 在距离反射界面 $b=0$ 的接收点上可以接收到透射波; 当入射角 α 接近 0 时, 有

$$x_1 = \lim_{\alpha \rightarrow 0} a \tan \alpha = 0$$

$$b = \lim_{\alpha \rightarrow 0} (H - x_1) \frac{1}{\tan \beta} = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{H \sqrt{1 - G^2 \sin^2 \alpha}}{G \sin \alpha} =$$

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{G^2 \sin^2 \alpha} - 1} = \infty$$

当震源点位于高速层时, 不存在临界角。当 $a \neq 0$ 且 x_1 接近 0 时, 有

$$\alpha = \lim_{x_1 \rightarrow 0} \arctan(x_1/a) = 0$$

$$b = \lim_{\substack{x_1 \rightarrow 0 \\ \alpha \rightarrow 0}} (H - x_1) \frac{1}{\tan \beta} = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{H \sqrt{1 - G^2 \sin^2 \alpha}}{G \sin \alpha} =$$

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} H \frac{1}{\sqrt{G^2 \sin^2 \alpha} - 1} = \infty$$

当 $a \neq 0$ 且 x_1 接近 H 时, 有

$$\alpha = \lim_{x_1 \rightarrow H} \arctan(x_1/a) = \arctan(H/a)$$

$$b = \lim_{x_1 \rightarrow H} (H - x_1) \frac{1}{\tan \beta} = \lim_{x_1 \rightarrow H} (H - x_1) \cdot$$

$$\frac{\sqrt{1 - G^2 \sin^2 \alpha}}{G \sin \alpha} = \lim_{x_1 \rightarrow H} (H - x_1) \cdot$$

$$\frac{1}{\sqrt{G^2 \sin^2 \alpha} - 1} = 0$$

2 水平层状介质井间地震初至波

水平层状介质条件下的初至波比单一反射界面条件下的初至波更为复杂, 在水平层状条件下, 初至波除了可能来自直达波外, 还有可能来自上界面或下界面的折射波、来自不同界面的透射波、多次透射波、多次反射波以及各种转换波等^[5-9]。为了分析井间地震记录初至波的特点, 设计了 4 个水平层状介质模型, 用基于旅行时插值的射线追踪方法分别计算每个模型初至波的传播路径和走时。对于每一模型, 观测井段位于 1 500 ~ 1 675 m 之间, 由 7 个厚度均为 25 m 的水平层 $L_1 \sim L_7$ 组成,

激发点位于 1 585 m 处,接收段位于 1 500~1 675 m。

模型 1 为一速度由低到高均匀分布的模型, $L_1 \sim L_7$ 层的速度分别为 2 700 m/s, 2 800 m/s, 2 900 m/s, 3 000 m/s, 3 100 m/s, 3 200 m/s, 3 300 m/s。图 2a 和图 2b 分别为模型 1 的初至波射线路径和初至时距曲线。由图 2a 可以看出, 在离炮点较远的低速层 L_1, L_2 和 L_7 层接收到的初至波是透射波; 离炮点较近的 L_3 和 L_4 层接收到的初至波为来自 L_4 和 L_5 反射界面的折射波; L_5 层和 L_6 层接收到的初至波既有透射波也有折射波。由图 2b 可以看出, 最小初至时间并不对应炮点所在的位置, 而是向高速层所在的层位移动。

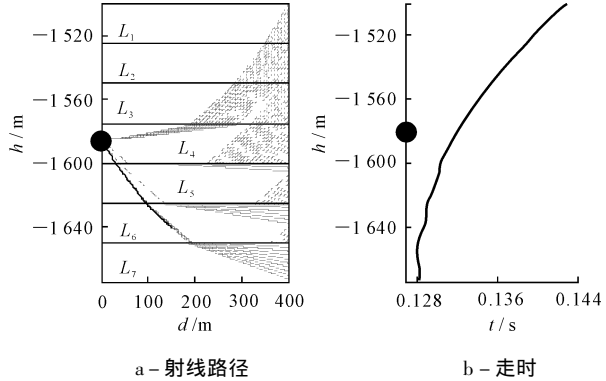


图 2 模型 1
Fig. 2 Model 1

模型 2 为一高低速度交错上升的模型, $L_1 \sim L_7$ 层的速度分别为 2 800 m/s, 3 000 m/s, 2 800 m/s, 3 000 m/s, 3 100 m/s, 3 200 m/s, 3 300 m/s。图 3a 和图 3b 分别为模型 2 的初至波射线路径和初至时距曲线。由图 3a 可以看出, 离炮点较远的 L_1 层接收到的仍为透射波; 由于速度差异的增大, L_2 层、 L_3 层和 L_4 层接收到的初至波均为来自 L_4 和 L_5 反射界面的折射波, 比模型 1 接收到的折射波范围增大; 由于受到 L_6 低速层的影响, $L_5 \sim L_7$ 层接收到的初至波均为透射波。由图 3b 可以看出, 最小初至时间没有对应于炮点所在位置, 明显地向高速层位置方向移动。

模型 3 为一高低速度交错分布的模型, $L_1 \sim L_7$ 层的速度分别为 3 200 m/s, 3 000 m/s, 3 200 m/s, 3 000 m/s, 3 200 m/s, 3 000 m/s, 3 200 m/s, 其中炮点位于低速层, 图 4a 和图 4b 分别为模型 3 的初至波射线路径和初至时距曲线。由图 4a 可以看出, 由于受低速层的影响, 除了震源所在的 L_4 层接收到的初至波为折射波外, 其他层位接收到的初至波均为透射波。由图 4b 同样可以看出, 最小初至

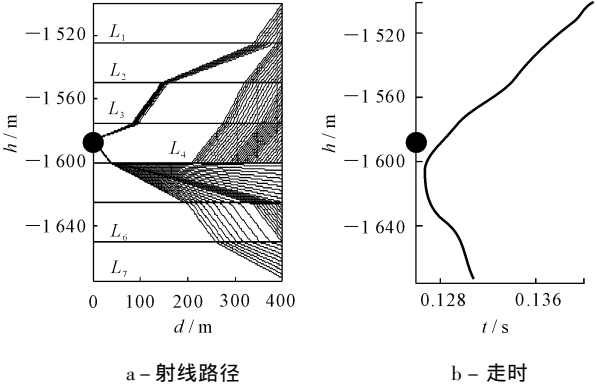


图 3 模型 2
Fig. 3 Model 2

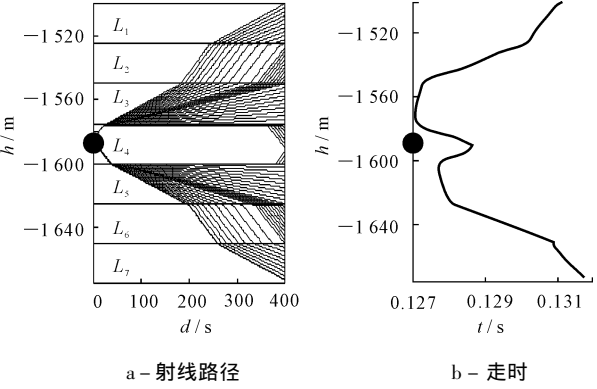


图 4 模型 3
Fig. 4 Model 3

时间向高速层位置移动的规律。

模型 4 也为高低速度交错分布的模型, $L_1 \sim L_7$ 层的速度分别为 3 000 m/s, 3 200 m/s, 3 000 m/s, 3 200 m/s, 3 000 m/s, 3 200 m/s, 3 000 m/s, 其中炮点位于高速层, 图 5a 和图 5b 分别为模型 4 的初至波射线路径和初至时距曲线。由图 5a 可以看出, 在震源所在的高速层, 可以接收到直达波; 并且由于速度高低均匀交错分布, 其他层位接收到的

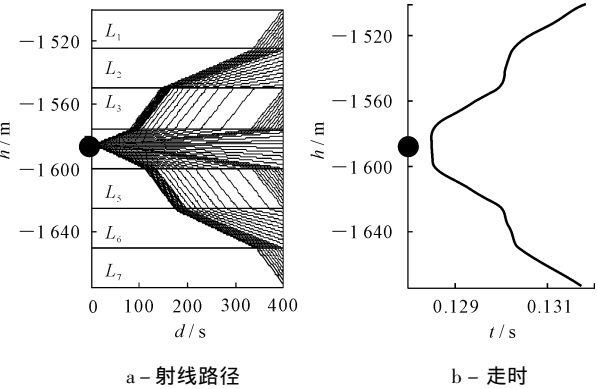


图 5 模型 4
Fig. 5 Model 4

均为透射波, 在此情况下, 初至波的最小时间对应相应的炮点位置, 如图 5b。

综上所述, 即使在水平层状介质条件下, 除了震源点位于上下均为低速层的高速层中, 在近炮点可以接收到直达波或透射波外, 在其他情况下, 近炮点接收到的初至波多数为折射波。

3 近炮点井间地震记录初至不清晰原因分析

根据地震波传播理论, 在复杂介质条件下, 以不同路径传播的地震波可能同时到达同一接收点, 或到达同一接收点的时差很小, 按照波的叠加原理, 接收点处的质点位移是每个地震波各自引起质点振动的矢量和。根据付氏变换理论, 信号可以看成是不同频率和相位的各个频率分量线性叠加之和, 利用单一频率来讨论问题不失一般性。

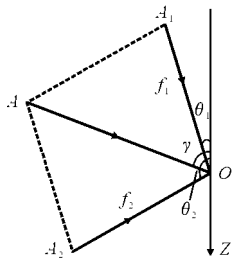


图 6 初至波与续至波矢量合成
Fig. 6 Vector Sketch Map of the First and the Second Break Wave Vector

设到达同一接收点频率为 ω 的两列地震波 f_1 和 f_2 分别为初至波信号和续至波信号, 如图 6, $f_1 = A_1 \cos(\omega t_1 + \varphi_1)$, $f_2 = A_2 \cos(\omega t_2 + \varphi_2)$, 其中 A_1 和 A_2 分别为初至波和续至波的振幅, $\omega t_1 + \varphi_1$ 和 $\omega t_2 + \varphi_2$ 分别为初至波和续至波的相位。将振幅 A_1 和 A_2 分别看作方向为 θ_1 和 θ_2 的矢量, 利用旋转矢量法可以得到初至波和续至波叠加后在接收点引起质点振动的振幅 A 和振动方向 γ 为

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\theta_2 - \theta_1)}$$
$$\gamma = \arccos \frac{A_1 + A_2\cos(\theta_2 - \theta_1)}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\theta_2 - \theta_1)}} + \theta_1$$

A 在水平方向和垂直方向的分量 U 和 W 分别为

$$\begin{cases} U = A \sin \gamma \\ W = A \cos \gamma \end{cases}$$

分析此关系式可知:

(1) 根据井间地震观测的特点, 一般情况下 θ_1 和 θ_2 取值范围为 $(0, \pi)$, 则 γ 的取值范围为 $(0, \pi)$, A 的取值范围是 $(|A_1 - A_2|, |A_1 + A_2|)$ 。 A 随 $\theta_2 - \theta_1$ 在 $(0, \pi)$ 之间的增大而减小, 在 $A_1 = A_2$ 且 $\theta_2 - \theta_1$ 趋近 π 时, A 趋近于零。

(2) 在 A_1 和 A_2 不为零的情况下, 水平分量 U 随着 γ 趋近 $\pi/2$ 而增大, U 在 $(0, \pi)$ 区间不会为零, 但在 $A_1 = A_2$ 且 $\theta_2 - \theta_1$ 趋近 π 时, A 趋近于零; 垂直分量 W 随着 γ 趋近 $\pi/2$ 而减小, 在 $\gamma = \pi/2$ 时为零。

(3) 在只有初至波 f_1 的情况下, 水平分量 $U = A_1 \sin \theta_1$ 在 $(0, \pi)$ 区间不为零, 垂直分量 $W = A_1 \cos \theta_1$ 在 $\gamma = \pi/2$ 时为零。

所以, 从理论上讲, 对于水平层状介质, 近炮点井间地震记录垂直分量上的初至波可能振幅很小甚至为零, 水平分量初至虽不会为零, 但其幅度可能很小甚至接近于零。造成实际近炮点井间地震记录初至不清晰的两种可能原因, 一是初至波与续至波到达时间相差很小, 初至波为续至波所干扰, 造成初至波能量很小甚至为零, 二是对于近炮点井间地震记录, 到达接收点初至波的射线传播方向与垂直方向的夹角接近 $\pi/2$, 初至波在垂直方向上的投影很小, 甚至为零。

图 7a 和 7b 分别为对模型 2 进行弹性波动方程正演得到的垂直分量和水平分量的合成记录, 从图上明显可以看出, 在垂直分量的记录上, 近炮点处的初至能量弱且不清晰, 但在水平分量上, 近炮点处的初至清晰连贯。

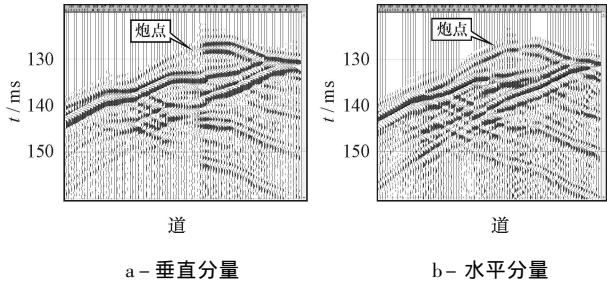


图 7 由模型 2 得到的波动方程合成记录
Fig. 7 Synthesized Record of Model 2 by Wave Function Modeling

4 综合利用多分量数据拾取初至

井间地震勘探一般是多分量接收, 在多数情况下, 近炮点垂直分量记录初至波能量很弱且不清晰。由于受井下检波器接收方向的影响, H_1 和 H_2 两个水平分量记录的初至也是不清晰和不连贯的, 但是, 通过对两个水平分量记录做极性调整和旋转合成等处理, 有可能在近炮点记录上得到清晰连贯的初至或者增加能够准确拾取初至的道数。所以, 在拾取初至时, 综合利用垂直分量和水平分量来拾

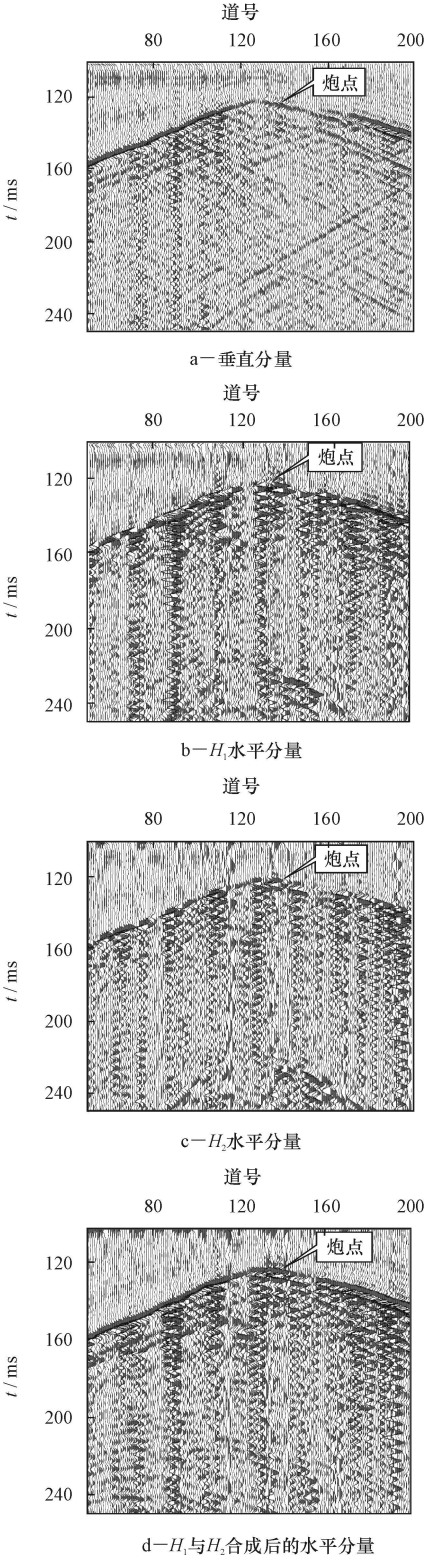


图 8 实际井间地震资料

Fig. 8 Field record of cross well seismic

取初至,有可能部分解决或改善近炮点初至不清晰的问题。图 8a、图 8b 和图 8c 分别是某地采集的井间地震记录的垂直分量 Z 和水平分量 H_1 及 H_2 。图 8d 是对 H_1 和 H_2 进行极性调整和旋转合成后的水平分量记录,在该记录上,初至清晰连贯,可以准确拾取。

5 结论

(1)正如李庆忠所说,在离炮点较近的井间地震记录上,地震波场复杂,初至不易拾取。

(2)在井间地震记录上,最小的初至时间往往不和相应的炮点位置相对应,而是向高速度层位偏移,这一现象可以为井间地震资料解释提供指导。

(3)对于水平层状介质,近炮点井间地震记录的初至波,无论垂直分量还是水平分量其振幅能量都可能很小甚至为零。

(4)近炮点井间地震记录初至不清晰的可能原因,一是初至波与续至波到达时间相差太小,初至波为续至波所干扰,二是到达接收点初至波的传播射线方向与垂直方向的夹角接近 $\pi/2$,初至波在垂直方向上的投影很小甚至为零。

(5)综合利用垂直分量和水平分量记录来拾取初至,可以得到较好地初至或者增加能够拾取初至的记录道数。

文中实际井间地震数据由西安弘传科技有限公司提供,在此表示感谢。

[参 考 文 献]

[1] 吴 律. 层析基础及在井间地震中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

[2] 陈世军, 刘 洪, 周建宇, 等. 井间地震技术的现状与展望[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 524 - 529.

[3] 李庆忠. 井间地震勘探的误区及出路[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(1): 2 - 11.

[4] 何惶华. 罗家地区井间地震方法与效果[J]. 石油物探, 2002, 41(增刊): 4 - 8.

[5] Rector J W. Cross well Methods; Where are We & Where are We Going[J]. Geophysics, 1995, 60(3): 627 - 630.

[6] 赵 群, 郝守玲. 井间地震观测系统的物理模型研究[J]. 石油物探, 2004, 43(3): 298 - 300.