

浅层地震勘探在工程勘察中的应用

赵成斌 刘保金

(国家地震局地球物理勘探中心, 郑州 450003)

摘要 根据地震波传播的基本理论, 首先详细论述了各种波传播的特点, 然后根据各种波的特点, 论述了各种勘探方法——浅层反射波法、浅层折射波法、回折波剖面法及 PS 速度测井等方法的应用前提、应用范围及野外工作方法。并结合本单位近几年的工作成果, 对一些应用实例进行了讨论。该方法在实际应用中解决了许多地质及工程问题, 为城市地震小区划及建筑工程场地的选址提供了必要的参考资料, 取得了较好的效果。

关键词: 浅震; 地震勘探; 地震波传播

近些年来, 随着国民经济的迅速发展, 城市建设的速度也越来越快, 高层建筑也越来越多, 因此城市建筑的抗震问题就提上了议事日程, 从而促进了地震安全性评价等抗震工作的发展。在地震安全性评价工作中, 活动断层勘察及场地类别划分是其中的一项重要内容。另外, 随着各门科学技术的迅速发展, 各种地下资源(如地下水、煤等)的调查任务也越来越多, 各种自然灾害的调查(如地下岩溶等)也应运而生。由于在上述活断层勘察及地下资源和自然灾害的调查中, 所涉及到的勘探深度一般在几十米~几百米的范围内, 因此, 传统的中深层地震勘探仪器已满足不了要求, 而近年发展起来的地质雷达虽能解决地表浅层的问题, 但在上述深度范围内也无能为力。由于近些年来电子技术及计算技术的发展, 仪器设备和计算机的发展促进了地震勘探应用技术的发展。浅层地震勘探仪器不断更新换代, 性能越来越强, 精度越来越高, 为浅层地震勘探应用技术的发展奠定了基础。

1 地震波传播特点^[1]

1.1 反射波

反射波是在波阻抗分界面上产生的一种相对于入射波反向传播的波。对于二维水平层状均匀介质, 设界面深度为 h , 上部介质速度为 v , 可以导出相应的反射波时距曲线方程:

$$t^2 = \frac{X^2}{V^2} + t_0^2 \quad (1)$$

$$\text{法线反射时间: } t_0 = \frac{2h}{V}$$

$$\text{正常时差: } \Delta t_n = t - t_0 \approx \frac{X^2}{2V^2 t_0}$$

从(1)式可以看出,该方程为双曲线方程。对于(1)式所对应的时间剖面,若经正常时差校正后,则形成法线反射时间(t_0)剖面,它直观地反映了反射界面的基本形态。对于共反射点道集记录,也具有与(1)相似的时距曲线方程,因此它是进行动校正处理的基本方程。

对于多层水平介质,设第*i*层的厚度为 h_i ,速度为 V_i ,($i=1, 2, \dots, n$),反射波时距曲线方程为:

$$t^2 = \frac{X^2}{V_0^2} + t_0^2 \quad (2)$$

$$\text{其中 } V_0 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n t_i V_i^2}{\sum_{i=1}^n t_i} \right]^{1/2}, \quad t_0 = 2 \sum_{i=1}^n t_i, \quad t_i = \frac{h_i}{V_i}$$

其形式与(1)相似,其中 V_0 为均方根速度。

由于方程(2)是在入射角 α 很小的假定下近似导出的,因此方程(2)仅适用于在近激发点接收的资料。在远离激发点时若再用(2)式进行动校正,则会造成较大误差,所以反射勘探一般都在近炮点进行。

1.2 折射波

折射波是在速度分界面上(高速层表面)沿高速层表面传播的波。

对于一个水平折射层,设界面以上速度为 V_1 ,下面速度为 V_2 ,厚度为 h ,通过Snell定律可以导出如下的折射波时距曲线方程:

$$t = \frac{X}{V_2} + t_{01} \quad (3)$$

$$\text{截距时间: } t_{01} = \frac{2Z \cos i}{V_1}$$

其中 $i = \sin^{-1}(V_1/V_2)$,称为临界角。

对于多个水平折射层,设第*k*层的厚度为 h_k ,速度为 V_k ,($k=1, 2, \dots, n$),可以得出:

$$t_n = \frac{X}{V_n} + t_{0n-1} \quad (4)$$

$$\text{截距时间: } t_{0n-1} = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{2h_k}{V_k} \cos \alpha_k$$

其中 $\alpha_k = \sin^{-1}(V_k/V_n)$

从上述几式可以看出,折射波时距曲线为直线。由于折射波一般都出现在初至区,因此比较容易辨认。而对于出现在续至区的折射波,则可根据其同相轴为直线的特征加以确认。

1.3 绕射波

绕射波是在断层或直立地层棱角、地层夹灭点等处产生的一种波。

对于深度为 H 的断点产生的绕射波,设绕射点以上介质速度为 V ,经推导可得到时距曲线方程:

$$t_D = \frac{1}{V} [H + \sqrt{X^2 + H^2}] \approx \frac{2H}{V} + \frac{X^2}{2VH} = t_0 + \Delta t_D \quad (5)$$

$$\text{正常时差 } \Delta t_D = \frac{X^2}{2\sqrt{H}} = 2\Delta t_n$$

由此可见，绕射波时距曲线也是双曲线，其正常时差是反射波正常时差的两倍。因此，在进行动校迭加后，绕射波仍存在剩余时差，在记录上可看到双曲线同相轴，所以必须用偏移方法把绕射波同相轴偏移归位。

1.4 多次反射波

多次反射波是波在两个反射界面之间多次来回传播而形成的一种波。

对于倾角为 ψ 、激发点至界面法线深度为 h 、界面以上速度为 V 的倾斜界面，可导出二次全程反射波的时距曲线方程：

$$t^{(2)} = \frac{1}{V} \sqrt{X^2 + 4 \frac{\sin^2(2\psi)}{\sin\psi} hx + 4 \frac{\sin^2(2\psi)}{\sin^2\psi} h^2} \quad (6)$$

$$\text{法线反射时间: } t_o^{(2)} = \frac{\sin(2\psi)}{\sin\psi} t_o$$

由 (6) 可知，多次反射波的时距曲线也是双曲线。

对于 m 次全程反射波，有：

$$t^{(m)} = \frac{1}{V} \sqrt{X^2 + 4 \frac{\sin^2(m\psi)}{\sin\psi} hx + 4 \frac{\sin^2(m\psi)}{\sin^2\psi} h^2} \quad (7)$$

$$\text{法线反射时间: } t_o^{(m)} = \frac{\sin m\psi}{\sin\psi} t_o$$

当 ψ 很小时， $t_o^{(m)} \approx mt_o$ ，即多次反射的到时是一次反射波到时的整数倍，因此可依此在迭加速度谱和迭后记录上识别多次波的存在。

1.5 回折波

回折波是波在连续介质中传播时形成的一种初至波。对于速度随深度线性变化的介质，设 $V(Z) = V_0 + KZ = V_0(1 + \beta Z)$ ， β 为速度增长率，可以导出相应的回折波时距曲线方程：

$$t = \frac{2}{V_0\beta} \text{sh}^{-1} \left(\frac{\beta x}{2} \right) \quad (8)$$

由 (8) 式可以看出，回折波时距曲线为反双曲正弦曲线。由于回折波时距曲线某一点的视速度就是射线回折点的速度，因此可以利用下述公式对回折波进行反演解释，计算出地层的垂向速度结构。

$$\begin{cases} \beta = \frac{2}{xV_0} \sqrt{V^*(x)^2 - V_0^2} \\ Z = \frac{1}{\beta} \left(\frac{V^*(x)}{V_0} - 1 \right) \\ V(Z) = V^*(x) \end{cases} \quad (9)$$

2 浅层地震勘探野外工作方法

对于不同的任务和目的，不同的地质条件，可以选用不同的勘探方法。目前，地震勘探方法发展很快，解决不同的问题有不同的方法。就其地震波传播的方式可分为：折射波法、反射波法和回折波法，就其激发和接收方式的不同可分为：横波勘探和纵波勘探。就其测线所处的位置不同可分为：水上勘探、陆地勘探、地下巷道勘探以及 PS 测井

和 VSP 地震剖面等。下面就各种方法的应用前提及所解决的地质问题简要地讨论一下：

2.1 反射波法

反射波法的应用前提是目的层必须是反射层位，即目的层界面上下必须存在波阻抗 ($Z = \rho V$) 差异 ($Z_2 \neq Z_1$)。由于反射波位于续至区，不易对原始资料进行对比追踪和做地质解释，因此一般采用多次覆盖的方法进行处理。另外，针对具体资源的情况以及工作的目的，还可选用各种不同的抗干扰、提高信噪比的措施进行处理。由于反射波来自波阻抗分界面，因此反射层位较多，资料的分辨率较高。反射波法应用比较广泛，主要有：①油田、煤田及金属矿产等资料的勘探。②地下热水资源的勘探。③活动断层的勘探。④地质灾害调查，如岩溶等。⑤工程地质分层。

反射波的工作方法主要是多次覆盖的工作方法。它可以根据工作要求及具体地质条件选择相应的覆盖次数及其他各种参数。

2.2 折射波法

折射波法的应用前提是目的层必须是折射层位，也就是说界面下的速度必须大于界面以上所有层的速度 ($V_2 > V_1$)。折射波法又可分为两种：初至折射法和对比折射法。初至折射法只追踪初至区的某个界面的折射波，因此易于辨认，识别的准确度较高。对比折射法不仅在初至区而且在续至区追踪折射波，就象反射法应用相位对比追踪波一样，虽然较初至折射波复杂，但能同时追踪多个折射界面的折射波。

折射波法的应用概括地说有五个方面：①低速带测量：为反射和折射测量提供旅行时校正资料。②工程地震：为建筑物提供岩土的弹性参数资料。③概查：测量沉积层厚度和结晶基底的埋深。④深部地震测探：测定地壳和上地幔的速度分布。⑤特殊测量：确定近垂直地质体：例如断层、侵入体、盐丘边界、矿体等。

折射波法的工作方法主要有追逐观测系统和追逐相遇观测系统两种。

2.3 回折波法

回折波法是在连续介质情况下导出的一种方法，回折波的时距曲线主要取决于地下介质的垂直速度结构。由于近地表的地下介质沉积时间较短，垂向承压差异较大，因此近地表的地下介质的速度结构变化较大，一般随深度的增加而增大，因此，在地面所接收到的近激发点的初至波实际上都是回折波。根据回折波的性质，炮检距越远，回折点的深度越大，且其视速度等于回折点的速度，因此可以利用回折波的这一特点，由时距曲线计算出回折点的深度及相应的速度，这在工程地质勘察测定地下速度结构的工作中具有非常重要的作用。

回折波的工作方法主要是展开排列的单次覆盖工作方法。

2.4 PS 测井

PS 测井一般采用逐层检测法，在地表井口的附近激发，在井中不同深度放置检波器接收。为了保证初至波为直达波或透射波，要求激发点离井口较近。为了提高震相识别和拾取的精度，可采用双向敲击的方法，经过相应的资料处理可准确地识别出纵波和横波的各种震相，以提高资料处理和解释的精度。

PS 测井主要用于测量 P 波和 S 波的速度，以便计算土层的泊松比、动剪切模量和动

杨氏模量等动力参数，为场地上建筑物的抗震设计提供资料。

3 资料处理与解释

3.1 资料处理

地震勘探资料处理，可根据实际需要，针对不同的目的、不同地质条件和不同的资料采用不同的处理手段。对于反射和折射地震勘探，基本资料处理流程见图 1。

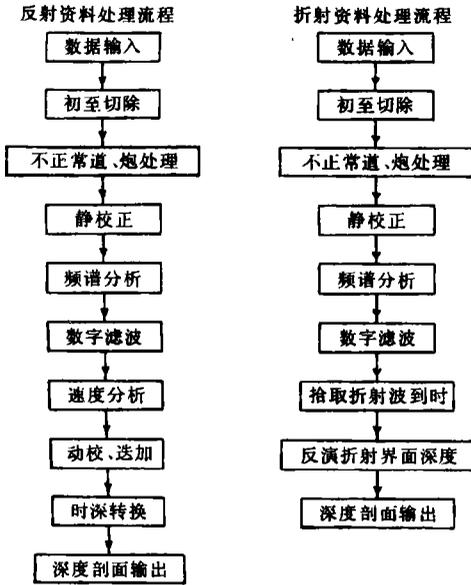


图 1 资料处理流程图

均匀层状介质某一层中的速度。

当界面水平时， $V_a = V_s$ ；

当界面倾斜时， $V_a = V_\varphi$ ； $V_\varphi = \frac{V_s}{\cos\varphi}$ ；

因此， $V_a \geq V_s$ ， $V_a > \bar{V}$ 。

3.2.2 单炮资料的解释

首先对原始资料进行对比，根据各种波的不同特征确定记录中的各种波的类型，识别出有效波和干扰波，然后就可以根据所得速度资料以及其他有关资料，结合有效波的特点，找出其同相轴出现异常的地方，进行地质解释，以确定断裂或其他地质构造现象的存在。

3.2.3 迭后时间剖面或深度剖面的解释

对于迭后的时间剖面或深度剖面，各种波的形态都比较清晰，因此就可以根据以往有关地质资料做出相应的解释。但在解释过程中，要对相应的沉积环境做出推断解释，以便排除一些假象所造成的某些假地质现象。

3.3 应用实例

3.2 资料解释

3.2.1 各种速度的概念和用途

迭加速度 V_a ——用速度谱或速度分析的方法求得的速度，仅用于迭加处理，只要获得迭加反射的最大能量，就认为迭加速度是正确的，而不问界面产状或波形变化的影响。

均方根速度 V_r ——是在水平多层介质的情况下，用双曲线的时距关系代替实际的非双曲线的时距方程而引出的，即当介质为多层水平情况时求得的迭加速度。

等效速度 V_e ——界面倾斜时的迭加速度。

平均速度 \bar{V} ——是把水平多层介质看作均匀介质而引出的假想速度，仅用于时深转换。

层速度 V_n ——也称间隔速度，它是均

3.3.1 浅层反射波法

图2是内蒙某煤田浅层地面反射时间剖面。该剖面采用高分辨率浅层地震反射的多次覆盖技术,在地表沙丘、沙垅无规则分布的煤田矿区探测出了错断 2^{-2} 煤层的断距大于5m的断层,取得了良好的效果。

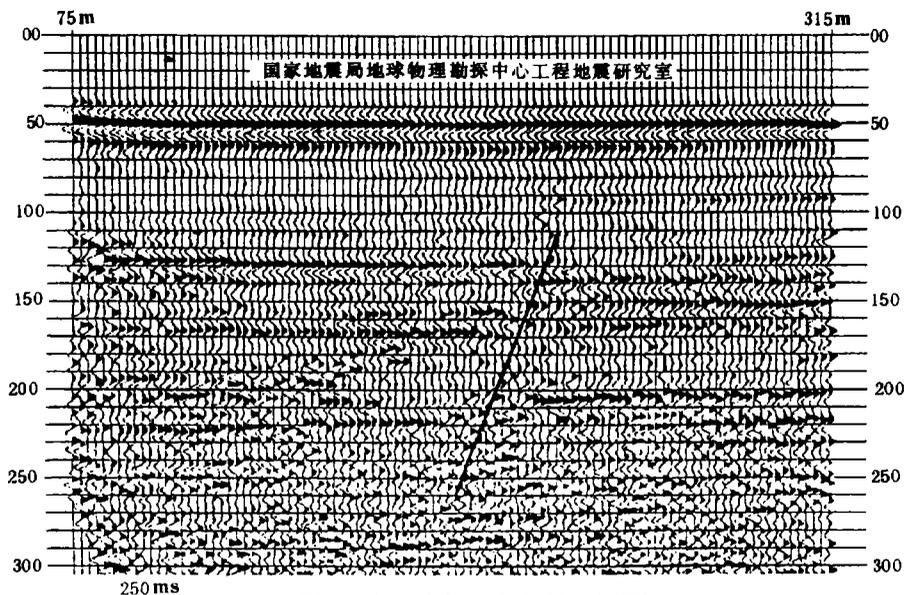


图2 内蒙某煤田反射时间剖面图

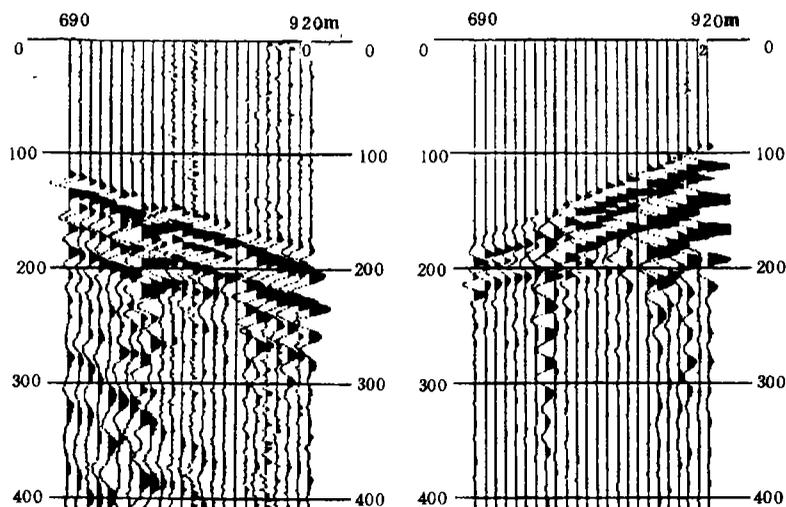


图3 折射波单炮记录图

综合分析本工区获得的地震反射 t_0 时间剖面可以看出, 2^{-2} 煤层的反射波能量强,产状平缓,在整个工区可连续追踪。整个工区的断裂具有断距小、小断层多、标志明显和规律性强等特点。断距一般在5~10m,断层在 t_0 时间剖面上多表现为同相轴明显错断,性质均为正断层,且在相邻时间剖面上特征一致。

3.3.2 浅层折射波法

图 3 是山东某地浅层折射剖面同一排列两端放炮的单炮记录。从图中可以看出，在 760m 处同相轴明显错断，且具有明显的拉伸现象。从右图可以看出断层两端的能量发生了明显的变化，这些现象均表明在 760m 处有断层存在，经计算断距约为 1.4m，后经验证，取得了较好的地质效果。

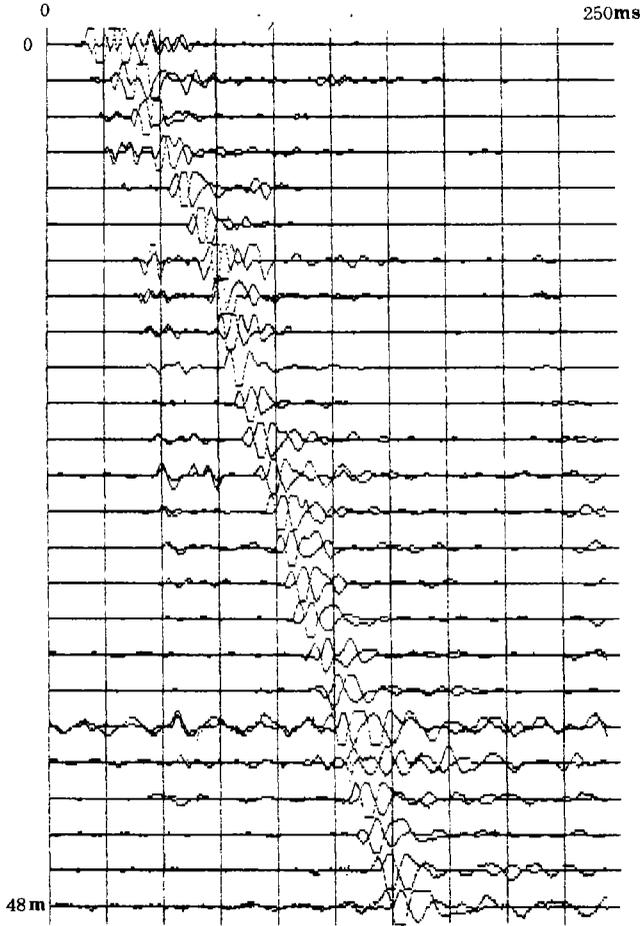


图 4 回折波记录图

3.3.3 回折波法

图 4 是采用回折波法测量场地横波速度结构的原始记录图。该剖面采用双向敲击横波、不同点距接收的工作方式，根据实际需要布置排列长度。在资料处理时首先采用相应的软件把双向敲击的记录绘在一起，确保了震相识别的准确性，提高了震相对比的精度。从图中可以看出，横波能量较强，纵波能量较弱，横波初至清晰，便于识别。然后利用相应的反演程序，可反演计算出场地的横波深度—速度结构值。

3.3.4 PS 测井

图 5 是逐层检测法横波速度测井的原始记录图。该测井采用在地面双向敲击横波、在

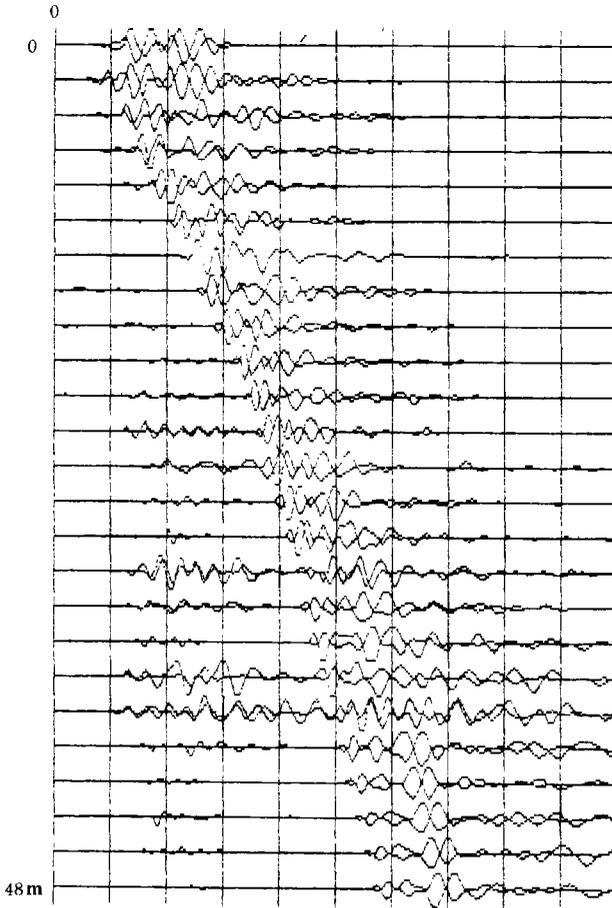


图5 PS测井记录图

井下进行2米点距接收的工作方式。在资料处理时首先采用相应的软件把双向敲击的记录绘在一起,提高了记录的分辨率。从图中可以看出,横波能量较强,初至清晰,具有较高的信噪比和分辨率,便于震相识别和解释。然后再利用相应的反演计算软件,可计算出相应的横波深度—速度结构值。

(1997年3月30日收到初稿)

参 考 文 献

- 1 何樵登主编. 地震勘探原理和方法. 北京: 地质出版社, 1986. 79—109

THE APPLICATION OF SHALLOW SEISMIC EXPLORATION IN ENGINEERING PROSPECTING

Zhao Chengbin Liu Baojin

(Geophysical Prospecting Centre of State Seismological Bureau, Zhengzhou, 450003)

Abstract

First, this paper has discussed the propagational characteristics of every seismic wave in detail according to the basic theory of the seismic wave propagation. Secondly, according to the characteristics of every wave, it has discussed the applied premise, the applied range and the field working method of every exploration method; the shallow reflection method, the shallow refraction method, the diving wave profile method and the PS velocity logging, and has discussed some application examples combining our work in latest several year. These methods have solved many geologic problems and engineering problems in practical application, and have provided necessary reference material for the city seismicity division and the choice of construction sites, and have achieved better results.

Subject words: applied premise; applied range