

垂直地震剖面法

朱光明

摘 要

本文介绍了垂直地震剖面法的原理、仪器、野外工作、资料解释及其在地震勘探中的重要作用。

六十年代末至七十年代初,苏联科学院首先发展了一种地震观测方法,名为垂直地震剖面法。随后,西方勘探地球物理学会曾在欧美推广这种方法,并翻译了有关的专著。这里,我们对这种观测方法的原理、仪器、野外工作、资料解释,以及它们在地震勘探理论和实践方面的重要作用作一简要的介绍。

垂直地震剖面 (Vertical Seismic Profile) 是和通常地表观测的水平剖面相对应的。通常的方法是在地表的一些点上激发地震波,同时在沿地表剖面布置的一些检波点上进行观测;垂直剖面也是在地表一些点上激发地震波,但是是在沿井孔不同深度布置的一些检波点上进行观测。前者检波器放在地表,观测剖面沿地表布置,所以称为水平地震剖面;后者检波器放在井中,观测剖面沿井孔垂向布置,所以称为垂直地震剖面。

垂直地震剖面法实际上也是一种井中地震观测方法,它是早已广泛使用的地震速度测井方法的变革和发展。它和地震速度测井的不同在于:前者只利用记录的初至波,后者不仅利用记录上的初至波,也要利用记录上的续至波;前者是单道观测,后者已发展为多道观测;前者(基本上)只利用纵测线(即炮点在井口附近,理论上可看成离井口距离为零),后者不仅利用纵测线垂直剖面,而且还利用一系列非纵测线垂直剖面;前者的目的主要是测定波速,后者主要是在实际地质介质中研究波的形成和传播的规律。除此之外,垂直地震剖面法在发展过程中已经研制了专门的仪器系统,试验了成套的野外工作方法,并发展了解释的理论基础。所以它已远远超出地震速度测井原来的范围,而发展成为一套完整的、独立的、新的观测方法。

垂直地震剖面法有一些明显的优点:

- 1.通常地表剖面基本上是通过观测波场在地表的分布来研究地质剖面的垂向变化,垂直剖面则是通过观测波场在垂直方向的分布来研究地质剖面的垂向变化,因此,波的运动学和动力学特征更明显、更直接、更灵敏。

2.通常地表观测离开介质内部有意义的界面往往较远,所以与界面有关的波往往经过一段复杂的旅程才到达地表,垂直剖面可以在介质内部点上紧靠界面附近观测,因而可以直接记录到与界面有关的单纯的波型。

3.地表地震记录上主要的干扰波大都来自剖面上部,由于这些干扰,往往使地表记录上的波的识别和对比发生困难。垂直地震剖面由于在介质内部点上直接观测,因而有可能避开和减弱剖面上部的干扰,易于识别波的性质。

4.地表观测时由于剖面上部的影响,地震噪声水平较高,仪器有效灵敏度受到限制,因而很难记录和识别低强度的波。垂直剖面在介质内部点上观测,由于地震噪声水平随深度迅速衰减,所以可以大大提高仪器的有效灵敏度,并使低强度波的观测成为可能。

5.地表观测时,不同界面的波到达地表剖面线上各点的方向都是来自下方,且彼此差别不大。垂直剖面观测时,不同界面的波到达剖面线上各点的方向可以是来自上方,也可以是来自下方,而且在界面附近往往发生突变,所以垂直剖面可以有效地利用波的到达方向这一特点。

6.地表观测时,由于低速带和剖面上部的影响,波的质点运动方向发生畸变。垂直剖面由于能避开剖面上部和低速带的干扰,所以能够较准确地观测波的质点运动方向,因而可以利用波的“空间极化”这一特别灵敏的参数来研究波的性质。

垂直地震剖面既是一种勘探手段,又是一种研究方法。通过垂直地震剖面的观测,一方面可以大大改善对地表观测的地震记录上的波的对比,扩大和提高地震勘探解决问题的能力,另一方面可以有效地利用波的各种运动学和动力学参数来研究各种类型波在介质内部形成和传播的规律,从而为各种地震勘探新方法的研究和发展提供理论依据。

二

垂直地震剖面法所用的仪器和地表观测所用的仪器没有本质差别,但是也有一些特点,现分述如下:

井下接收仪器

直到现在还不能说已经研制出完备的垂直地震剖面的井下仪器。在整个仪器研制的过程中,很重要的一个问题就是仪器的多道性问题。最早,只能用单道检波器进行观测,因此一条垂直剖面要放数十甚至上百炮。这样,除了一个炮点要放很多炮有困难外,更主要是难以保证各次放炮记录的波的对比。为了保证波的对比,就要求各次激发条件保持不变,但是严格控制激发条件往往并不容易实现。当然,在某些有利地区,或者用某些特殊的方法,如果能够保持激发条件不变,利用单道检波器也有可能取得较高质量的资料。1963年苏联科学院首先研制和应用了第一个三道接收装置,其中每个检波器都用独立的压板压在井壁上。这种装置可以在三个点上直接观测地震波的某一个分量,也可以在一个点上记录地震波三个分量。这种装置除能减少放炮次数外,还能改善记录续至部分波的对比。随后几年,由于利用这种三点装置进行了大量的观测,才使垂直地震剖面的基本指导思想系统化,并使垂直剖面有了真正实现的可能。进一步把道数增加到三道

以上曾经遇到相当大的技术困难。主要是缺乏合适的多蕊电缆。后来采用增加记录密度的办法才研究出基于脉冲调宽的 12 道装置。现在看来,如果采用数字记录、多路传输和其它先进技术,使道数增加到 12 道以上也是完全可能的。

应该说明,虽然垂直地震剖面的资料取决于多道性,但更取决于每道的质量,例如每道检波器的屏蔽、检波器和井壁之间的接触及检波器的频率特性等等。

地震检波器的频率特性要根据不同的观测任务来选择。当研究波的动力学特征时,采用自然频率为 3~10Hz 的地震检波器。当研究反射时,习惯上使用自然频率为 18~30 Hz 的电动地震检波器。当研究折射波和区域调查时,采用自然频率为 3~15Hz 的地震检波器。在解决某些专门问题,例如研究地壳深部的波场以及研究自然噪声背景随深度的变化时,地震检波器的自然频率有时可低到 1Hz。

通常,低频检波器要求精细的操作,因此低频检波器在升降时要有专门的调节和阻尼。

检波器和井壁之间的紧密接触是很重要的。能把检波器压在井壁上的装置称压板。垂直地震剖面对压板的要求主要是两方面,首先,要求压板的压力足够大,以使检波器能牢固地贴在井壁上,并使检波器上部的电缆保持松弛,这样就能减少电缆波的干扰,并能防止各种与测站有关的共振现象引起地震记录畸变。通常测井中使用的压板,由于压板的压力较小,不超过装置本身的重量,因而装置在其本身重量的作用下可以沿井壁自由滑动。这样,它就不但不能使检波器牢固地压在井壁上,也不能保证电缆放松。其次,要求压板可以控制,也就是说可以由地表控制使任意一个压板获得压力或消失压力。这在无套管的井中特别重要,它可以防止井遭到破坏。另外,这种受控压板使用也较为方便,它既可以在井中设备下降时进行观测,也可以在提升时进行观测,还可以对剖面上任意一点进行重复观测。受控压板有水力类型的或电力类型的。当在有套管的井中工作时,还可用磁力类型的。

如果在较浅的井中(500—600m)或专门为垂直剖面所钻的井中进行观测,也可以使用不受控制的压板。这种压板适合于有套管的井,并且往往只允许在装置提升时进行观测。其主要类型是弹簧型的一种变种,另外自动劈型的偏心轮压板也常使用。

井下地震观测既可以观测单个分量,也可以观测三个分量。当研究转换波、横波和大距离观测的纵波时,使用三分量测站进行三分量记录,其它大量的工作仍只是观测垂直分量。

地表记录仪器

在垂直地震剖面观测中,可以采用标准的测站或者与标准测站类似的专门测站来记录从多道检波器传输来的信号。记录时一般不用滤波,频率滤波主要在磁带回放时进行。

记录反射波时,标准测站的动态范围显得不够,它不能保证在 0~4.5 秒时间内记录无畸变的信号,因此需要扩大动态范围。通常,垂直地震剖面要求有 3~5 级放大,每级之间相差 4~5 倍。

研究折射波时,可利用折射波对比法中所用的低频测站。这一方面是因为大距离观测时所记录的波的动态范围比反射波小,通常有两级放大就已足够。另一方面是因为井中

观测噪声背景较低,道的灵敏度可以提高。

应该指出,减少仪器噪声水平在垂直剖面中更有特殊的意义。因为地表观测时记录道的有效灵敏度受到微震噪声背景的限制,而井中观测时,道的有效灵敏度往往只受放大器噪声水平的限制。也就是说降低仪器噪声水平,才能提高道的有效灵敏度;而道的有效灵敏度不仅对于大距离观测是重要的,就是对于近炮点观测和研究低强度波也是很重要的。当在大深度工作时,在高温高压条件下如何减少仪器噪声,仍是需要进一步研究的问题。

现在,有的西方国家已经采用数字磁带记录仪进行记录。由于数字磁带有众所周知的一些优点,例如动态范围大、精度高、资料便于计算机处理等,所以它显然是垂直地震剖面法的地表记录仪器发展的方向。

三

选择什么样的垂直地震剖面的观测系统,像地表剖面一样,要根据调查地区的地质结构和所要解决问题的特点决定。按照详细程度,垂直地震剖面的观测系统大致可分为下面几类:

简单剖面 如图 1 所示。图中 SP 为炮点, l 为炮点到观测井井口的距离, oz 为沿观测井布置的垂直剖面。 oz 线上布置的点是观测点, H 是其中任意一个观测点的深度, B 为界面。圆圈的连线是相应的垂直时距曲线。当 $l=0$ 时,炮点位于垂直剖面线上,这种剖面称为纵测线垂直剖面,当 $l \neq 0$ 时,炮点偏离剖面线,这种剖面称为非纵测线垂直剖面。

垂直剖面序列 图 2 表示出这种观测系统对应的初至波垂直时距曲线。这种观测系统在离开井口不同距离的一系列炮点上激发,在一口井的垂直剖面上记录,最后得到一簇垂直剖面时距曲线。这种观测系统主要用于研究波的性质。

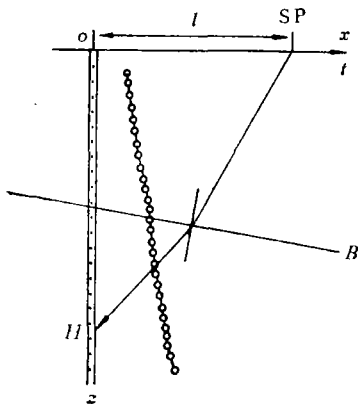


图 1 简单垂直地震剖面示意图

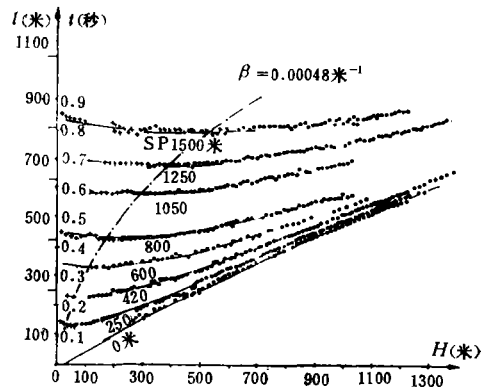


图 2 垂直地震剖面序列

详细对比的观测系统 如图3所示,这种观测系统的主要特点是能保证沿垂直方向和水平方向(不同深度)追踪波,它能追踪地表记录上的波直到垂直剖面形成这些波的界面,从而识别地表记录上波的性质。

垂直剖面炮点之间的距离和炮点数目的选择,也要根据调查问题的特点决定,这里不再赘述。

垂直剖面上检波点(观测点)之间的间隔主要由所记录的波的周期和速度决定。为了保证波的可靠对比,通常要求相邻点之间的相位移不超过大约 $1/3$ 波长。另外,由于垂直剖面的不同段上波速不同,所以不同的剖面段(井段)可以选择不同的检波点距。有关资料可根据电测井曲线或根据对剖面的一般了解事先确定。

下面分别叙述反射波法、折射波法和其它一些方法中垂直地震剖面观测系统的一些特点:

反射波法

按照地表地震记录的情况,反射波法垂记地震剖面的观测任务可分为两种。当地表直录上有稳定的规则波时,垂直剖面观测的目的是确定这些规则波的性质和进行地层对比,最重要的是从各种类型的多次反射中识别单次反射。当地表记录上不可能追踪到规则波或者追踪不稳定时,垂直地震剖面的目的是研究地质上认为有意义的界面的反射特性。

反射波法垂直剖面主要是采用纵测线垂直剖面。这是因为:在大多数情况下,反射波要求在炮点附近观测;在纵测线垂直剖面上,反射波与直达波的干涉区最短,各种波有最佳的时间分离;在水平层状介质或小倾角层状介质的情况下,纵测线垂直剖面可以研究法向入射的波,这时波型最简单,计算最容易;纵测线垂直剖面的资料适合于动力学处理;纵测线垂直剖面除提供波型资料外,还能比较容易地获得速度剖面和层速度资料。

反射波法垂直剖面也采用非纵测线。它主要有两方面的用处,一是研究反射波的强度,因为反射波的强度与波的入射角有关;另一是研究过临界角反射波,在一定条件下,过临界角反射波也可用于勘探。

折射波法

折射波法垂直地震剖面观测的任务是为了确定波的性质和识别剖面上的折射界面。

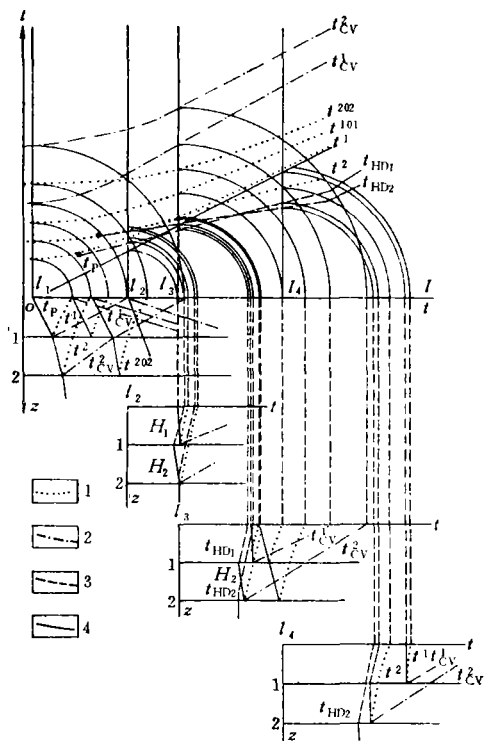


图3 详细对比的观测系统和垂直综合时距曲线

因为折射波要在离开爆炸点的一定距离上才能观测到,所以要采用非纵测线垂直剖面。当研究整个沉积剖面中的折射界面时,往往在离井口不同的距离上布置一系列炮点,最远炮点的距离可达30km,甚至更多。因为大距离观测时操作上的困难,所以常常不用完整的垂直剖面而只用剖面上有关的一段。另外应该从地表地震记录上仔细收集关于波场特征的资料,使每一炮点和每一观测剖面段的选择都有充分的依据。

研究剖面上部及其有关的波场

由于剖面上部分界面明显,速度值低,存在着大量不同性质的干扰波,所以研究剖面上部往往要求高度详细的观测系统。首先是观测点的点距较密,当研究速度值很低且波场很复杂的剖面最上部时,检波点距减小到5m,在低速带中有时甚至减小到3m。其次往往采用联合观测系统。联合系统由一系列垂直剖面组成,剖面的距离要使人们能在地表和不同深度沿垂直和水平方向追踪主要的波组,当垂直剖面系统复盖着深度约200m和长度约1500—2000m的地带时,大约需要400~500炮。图4就是这种联合观测系统的一个例子。其中(a)是观测系统的图解说明,观测实际上在一口井中进行,为了好看,图上把各炮对应的井中观测点展开到对应炮点的下方; (b)是初至波的垂直和水平联合的时距曲线。利用这种观测系统曾满意地绘出中亚地台广大地区剖面上部的波场。

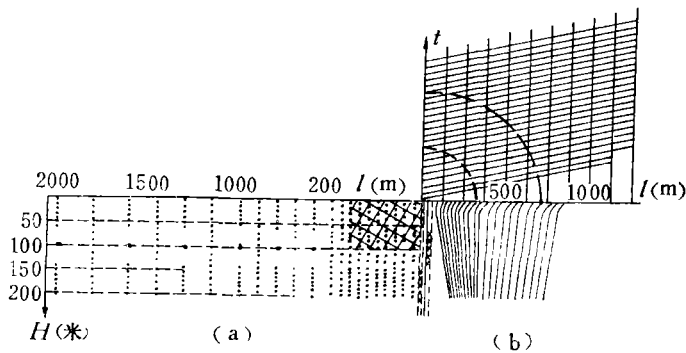


图4 (a) 研究剖面上部的观测系统
(b) 初至波联合时距曲线

水平和垂直联合的观测系统

垂直剖面 and 地表观测结合可以获得地表地震记录上关于波场和波的性质的最完整的资料。地表记录上的波可以沿垂直剖面一直追踪到产生这些波的界面。图5是这种联合观测系统的一个例子。它由11个炮点组成,间隔为0—2,300m的炮点序列主要用于研究碳酸岩沉积厚层上的反射和折射波。其中炮点距离为400、1,000、2,300m时的垂直剖面,为了研究与剖面上部有关的转换反射波和转换透过波,进行了三分量观测。间隔为3,000~7,000m的炮点,主要用于研究深界面附近的折射波以及夹在较浅深度的石灰岩地层的折射波。间隔10,900m和31,700m的炮点用于研究沿结晶基底传播的波。总的来说,这个联合观测系统的目的就是确定0~31km区间内地表记录上波的主要性质。这种系统所用的炸药量变化范围很大,从0.1~100kg。所以,不同炸药量所得到的记录在处理时要标准化到单位炸药量。图5下部为垂直剖面的展开说明图,与各个炮点相对

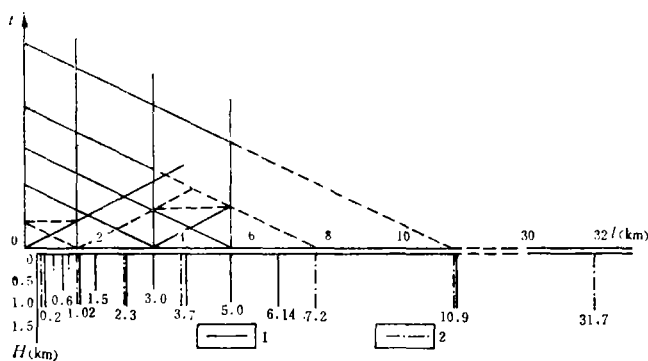


图 5 水平垂直联合观测系统

应的井中观测深度画在炮点下方，末端的数字是炮点离观测井的距离。图 5 上部为与地表观测相对应的观测系统。

四

在地表观测中，激发条件是地震勘探效果所需要研究的主要方向之一。垂直地震剖面观测和地表观测一样，激发条件对于整个地震记录面貌也有着非常重要的影响。下面分别来叙述有关垂直剖面激发条件的一些问题。

激发条件的稳定性 对于垂直地震剖面，这是一个特别重要的问题。在垂直剖面观测中，由于接收装置的道数较少，为了保证各次放炮所得地震记录的波的对比，就要求激发条件稳定。保持激发条件稳定与激发岩性有关，当在砂质粘土层中激发时，开始 3~4 炮之后，同相轴形状就能很好地确定，以后也能很好地保持。在某些特定情况下，一口井放 30~40 炮都是可能的。但是当在硬介质（页岩、泥灰岩）中激发时，同相轴的重复性将明显变坏，振幅比和单个相位的周期都将分散在一个宽的范围内。保持激发条件稳定也与炸药量和激发深度等因素有关。在一定条件下，采用非爆炸震源有可能更好地保持激发条件稳定。

爆炸深度 对于很不均匀的剖面上部，爆炸深度对入射波有着强烈的有时甚至是决定性的影响。经验表明，当低速带结构比较简单时，如果把炸药包恰好放在低速带底面附近，有可能成功地避免鬼波的干扰。增加爆炸深度有时反而会使激发条件变坏。图 6 是说明这种情况的一个例子。当激发深度 $h = 20\text{m}$ ，即正好靠近低速带底部时，直达波波形比较简单。随着爆炸深度增加，直达波的波形急剧变坏，相位数增多，同相轴受到干扰，二次波明显开始，这些二次波就是低速带底部形成的鬼波。当爆炸深度 $h = 33\text{m}$ 时，直达波波形最复杂。从 $h = 40\text{m}$ 开始，二次波实际上已完全形成，并且随着深度增加，越来越滞后于初至波。当 $h = 80\text{m}$ 时，两种波的到达时差约为 0.1 秒。当低速带结构比较复杂时（例如有好几层），通常完全消除鬼波是不可能的。这时也只有增大深度来减少鬼波干扰的影响，但是增大深度会引起地震记录上波的数目的增加。实践中通常选择一种

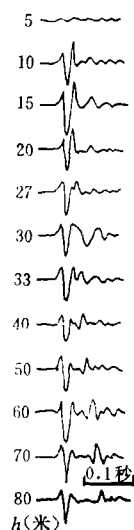


图 6 激发深度对直达波的影响

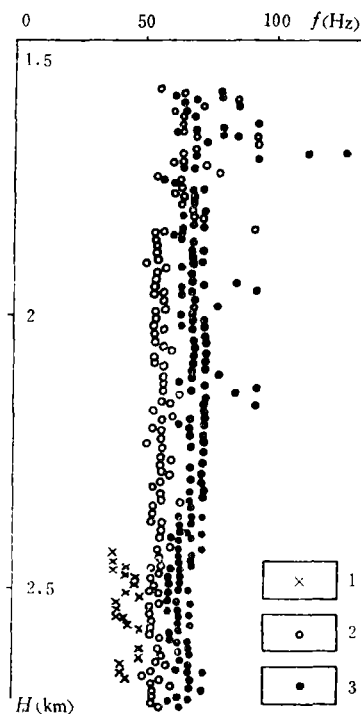


图 7 直达波主频图 (三种激发深度)
(1) $h=16$ 米 (2) $h=70$ 米 (3) $h=125$ 米

最佳深度,使得波形不太复杂,地震记录上波的数目又比较少。爆炸深度的改变除了引起直达波和鬼波干涉条件的变化外,也会引起激发岩性的变化。另外,爆炸深度还影响波的频率成分。图 7 是某地纵测线垂直剖面所观测的波的主频图。由图可见,即使在较大深度观测时,第一个脉冲的主频范围变化也很大,不同爆炸深度的主频范围列表如下。

爆 炸 深 度 (m)	125	70	16
主 频 范 围 (Hz)	65~70	50~55	45

除此之外,经验还表明,在低速带的松散沉积中激发通常比在低速带之下频谱低。选择爆炸深度时,应该考虑地质问题对地震波频率的要求。

炸药量 对于垂直地震剖面来说,应尽可能选择小炸药量。因为小药量激发的波重复性较好。大炸药量不仅会使同相轴的重复性变坏,还会增加很多与剖面上部有关的不需要的波,使波场复杂化。同时,因为垂直剖面观测中记录仪有很高的有效灵敏度,所以利用小炸药量也是有可能的。

激发条件的检验 如何检验激发条件是否保持稳定呢?实践表明,激发条件对地震记录的影响首先表现在直达波的波形上,所以通过在介质内部点上观测直达波可以最有

效地检查激发条件。具体办法是利用一种辅助装置,使这种辅助装置能记录到与深部装置类似的直达波波形。这种辅助装置通常放在一个专门的井中,深度150~200m,利用较低的道灵敏度(不用放大器)和宽的频带(10~300Hz)进行记录。这种辅助装置也可以是放在以炮点为中心、半径为70~100m的圆上的一组检波器,通过这组检波器所得记录的平均值反映深部的直达波波形。当炮点离开垂直剖面距离较远时,可以使各次爆炸分布在以辅助装置为中心、半径为20~30m的圆周上来观测直达波波形。应该说明,激发条件方面的问题并没有完全解决,仍需继续进行试验研究。在这方面可控非爆炸震源应该有着更宽广的前景。

五

垂直剖面上波的运动学特点是垂直地震剖面资料解释的基础,它比水平剖面波的运动学特点更明显,占有更重要的地位。

有关入射波和折射波初至垂直时距曲线的特征,在地震测井中已经进行了研究和利用。有关入射波、折射波、首波、反射波在续至区的时距曲线特征,在发展垂直地震剖面的过程中也已进行了系统的讨论。现把简单介质结构情况下的主要结果叙述如下。

1. 常速介质

时距曲线方程式为

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{H^2 + l^2} \quad (1)$$

式中 l 为炮点到井口的距离, H 为观测点的深度, v 为速度。这个公式就是地震测井中用来计算速度的算式。

2. 速度按线性规律增加的介质

设速度随深度变化的规律为

$$v(H) = v_0(1 + \beta H) \quad (2)$$

则初至波时距曲线方程式可用参数形式表示如下

$$t = \begin{cases} \frac{1}{v_0\beta} \operatorname{arc ch} \left[\frac{\beta^2(l^2 + H^2)}{2(1 + \beta H)} + 1 \right] & \text{当 } l \neq 0 \text{ 时} \\ \frac{1}{v_0\beta} \ln(1 + \beta H) & \text{当 } l = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

当 $l \neq 0$ 时,非纵测线的时距曲线上有一个极小点,其纵坐标为

$$H_{\min} = \frac{1}{\beta} (\sqrt{1 + \beta^2 l^2} - 1) \quad (4)$$

因为极小点是 l 和 β 的函数,所以利用极小点 H_{\min} 对不同 l 的分布可以求 β 。图2就是

这样一个例子。点划线指示时距曲线极小点位置，初至波的视速度在极小点以上为负，在极小点以下为正，极小点的轨迹正好与速度增加的规律 $\beta = 0.00048^{-1} \text{ s/m}$ 一致。

3. 层状介质

在具有一个分界面的情况下，当 l 较小时，初至波是直达波，当 l 增大到某一距离时，如果下层速度大于上层（即 $v_{p2} > v_{p1}$ ），则可以观测到首波。

首波的时距曲线是一条直线，方程式为

$$t = \begin{cases} -\frac{1}{v_p} [2H_v \cos i_c \cos \phi + l \sin(i_c \pm \phi) - H \cos(i_c \mp \phi)] & \text{当 } \phi \neq 0 \\ -\frac{1}{v_p} [(2H_v - H) \cos i_c + l \sin i_c] & \text{当 } \phi = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其视速度为

$$v_a = \begin{cases} -\frac{v_{p1}}{\cos(i_c \mp \phi)} & \text{当 } \phi \neq 0 \\ -\frac{v_{p1}}{\cos i_c} & \text{当 } \phi = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由公式可见，在垂直剖面上首波的视速度是负值，这与实际观测也是一致的。

能够观测到首波的极小 l 值为

$$l_{\min} = H_v \tan(i_c \pm \phi) \quad (7)$$

当 l 满足

$$H_v \tan i_c < l < 2H_v \tan i_c \quad (8)$$

时，首波只能记录在靠近折射界面邻近的地段上，其中一部分作为初至记录，一部分作为续至记录。当

$$l > 2H_v \tan i_c \quad (9)$$

时，首波在整个垂直剖面上都能记录到。

图 8 是一个分界面情况下不同 l 的直达波、首波和反射波时距曲线及射线路径图。由图可见，在与爆炸点 o_1 相应的垂直时距曲线图中直达波是初至波，反射波是续至波； o_2 时，首波开始出现； o_3, o_4, o_5 时，随着 l 的增加，首波作为初至的记录区域逐渐扩大； o_6 时，整个垂直剖面，首波都可以作为初至。图上点划线表示出首波可以作为初至出现的界限。

在一个分界面情况下，垂直剖面上除观测到上述（直达波和首波）外，还可观测到界面上形成的反射波、反射转换波、透射波和转换透射波等二次波。图 9 示出了四种 l 情况下的一次波和二次波时距曲线。由图可见，当入射角小于临界角时，一次波和二次波时距曲线有一个与界面深度相对应的公共点，当入射角大于临界角时，入射纵波、反射纵波、转换反射波、转换透射波时距曲线有一个公共点，但首波和与首波相应的转换

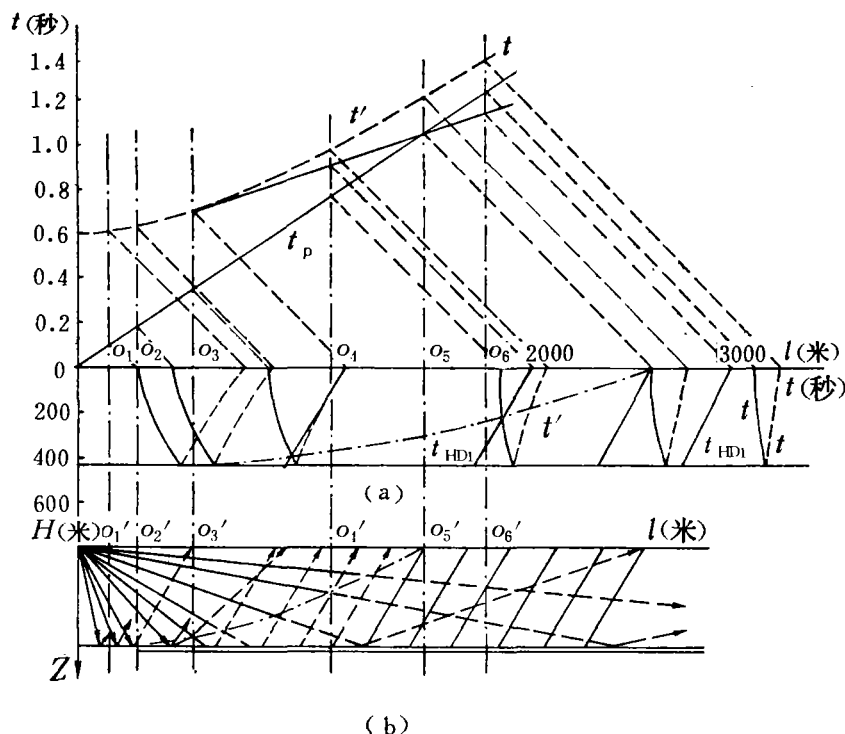


图 8 (a) 直达波、首波、反射波联合时距曲线 (b) 射线图

透射波将分开。

在多层介质情况下,沿非纵测线垂直剖面观测时,初至波可能是直达波和透射波,也可能是较深界面来的首波。图 10 示出三层介质情况下直达波、首波、透射波的时距曲线分布图。由图可见,从某个距离 l 开始,折射界面以上的初至波是首波,折射界面以下是透射波,经过折射界面时,初至波的视速度由负(首波)变为正(透射波),利用视速度符号的变化可以确定折射界面的深度。

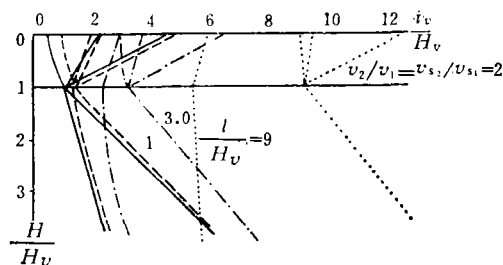


图 9 直达波、首波和各种二次波理论时距曲线

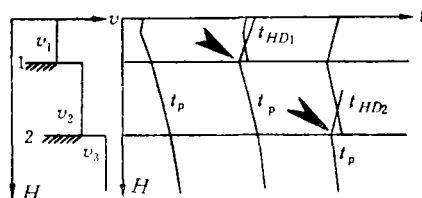


图 10 三层介质情况下不同 l 的直达波、首波、透射波的时距曲线

在 m 层介质中进行观测时,与 $n-1$ 层和 n 层界面有关的首波时距曲线方程为

$$t = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{v_{pk}} \cos i_{kn} + \sum_{k=m+1}^{n-1} \frac{d_k}{v_{pk}} \cos i_{kn} + \frac{l}{v_{pn}} - \frac{H - \sum_{k=1}^m d_k}{v_{pm}} \cos i_{mn} \quad (10)$$

式中 $i_{kn} = \arcsin v_k/v_n$ 。分析上式, 可见首波时距曲线为一直线, 其斜率为 $\cos i_{mn}/v_{pm}$ 。

对于图上的三层介质, 在第二层分界面上形成首波的条件为

$$l_{\min} = \frac{d_1 v_{p1}}{\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p1}^2}} + \frac{d_2 v_{p2}}{\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p2}^2}} \quad (11)$$

当 l 增大时, 首波记录范围 ΔH 也扩大

$$\Delta H = \frac{l - d_1 \tan i_1 - d_2 \tan i_2}{\tan i_1} \quad (12)$$

当 $l = d_1 \tan \arcsin \frac{v_{p1}}{v_{p3}} + 2d_2 \tan \arcsin \frac{v_{p2}}{v_{p3}}$ 时, 首波在整个第二层中都能记录到。

当 l 继续增加时, 第一层中也能观测到第二层底面的首波。根据首波时距曲线及速度值 $v_{pn} = v_b$, 利用公式

$$v_{pm} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^2 i_{min}}{v_{pn}^2} + \frac{1}{v_{pn}^2}}} \quad (13)$$

可计算出 m 层的层速度。

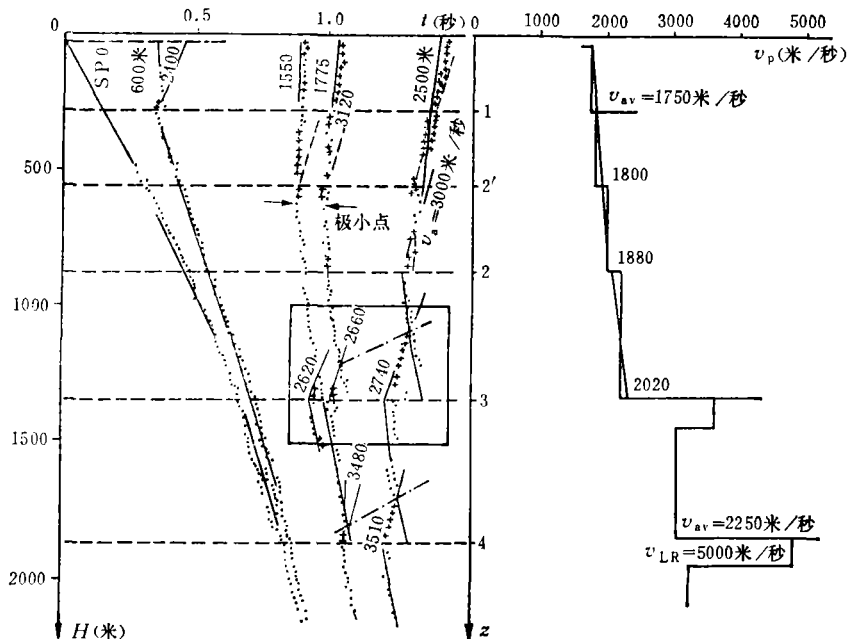


图 11 初至波时距曲线 (左) 和根据垂直地震剖面资料构制的速度剖面 (右)

透射波时距曲线的渐近线是一条光滑曲线, 其斜率为 $1/v_{pn}$, 在厚层介质情况下,

利用透射波时距曲线有可能确定厚层内部的速度。

在地震测井中，利用折射波资料确定层速度和平均速度比较可靠，它可以排除信号不准和激发条件不稳定引起的误差。

图 11 是利用波的运动学特点对资料进行解释的一个实例。当 $l=0$ 时，垂直剖面上记录的全是直达波。 $l=600\text{m}$ 时，整个剖面记录的几乎也是直达波和透射波，首波只在界面 1 附近的一小段上作为初至记录下来。当 $l=1550\text{m}$ 和 1775m 时，剖面上部记录的是曲射线折射波，时距曲线是弯曲的，在大约 650m 深度处有一极小点。在速度界面附近出现首波，其时距曲线用虚线表示。在深度较大时，界面 3 和界面 4 的首波可以作为初至，且视速度是负的。根据界面附近初至波由首波转变为透射波和视速度由负变为正，可以确定界面位置。首波作为初至的记录范围随 l 的增大而增加，当 $l=2500\text{m}$ 时， $H=680\text{m}$ 处的弱速度界面的首波也可以作为初至出现在记录上。

六

垂直地震剖面对于研究地震波的动力学特性也有着突出的优点，它不仅能更精确和更可靠地研究波振幅、频率、相位等参数，而且能利用质点运动轨迹（又称波的极化特性）这一最灵敏的新参数。

1. 在介质内部点上观测时，由于噪声水平较低，因而有可能研究强度很低的波。图 12 是某地研究首波的垂直剖面地震记录。由图可见，首波在一定条件下才能作为初至，且强度很低。首波的强度比紧接着它后面的反射波要低数十—数百倍。这样低强度的波在地表地震记录上是难以识别的。

2. 在介质内部点上观测时，由于能记录到比较单纯的直达波和反射波形，所以能较可靠地测定反射系数和各个波的频率成分。图 13a 是入射角 i 分别为零度和 40 度时直达波和反射波的波形图，图 13b 是对应的频谱曲线，图 13c 是对于两种入射角不同频率的波的反射系数曲线。由图可见，垂直地震剖面不仅可以较准确地测定反射系数，而且能测定反射系数谱。

3. 在介质内部点上观测时，由于能在不同深度较可靠地测定波的振幅，因而就

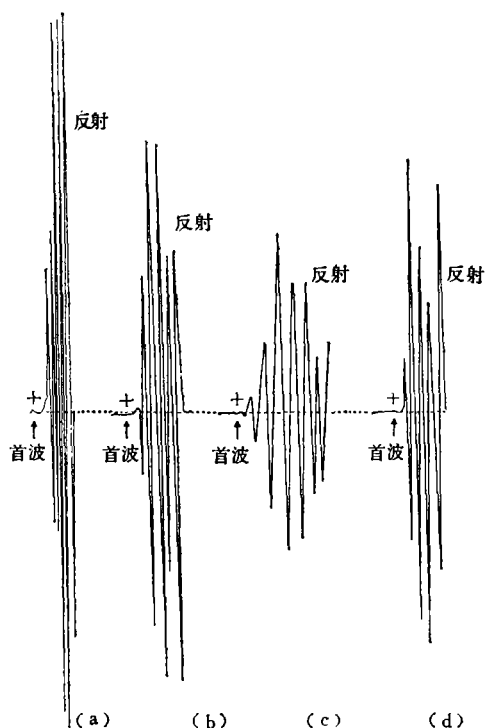


图 12 首波和反射波强度

(a) $h=280\text{米}$, $l=600\text{米}$, 42号井

(b) $h=1280\text{米}$, $l=1775\text{米}$, 42号井

(c) $h=1150\text{米}$, $l=2500\text{米}$, 42号井

(d) $h=18\text{米}$, $l=2500\text{米}$, 20号井

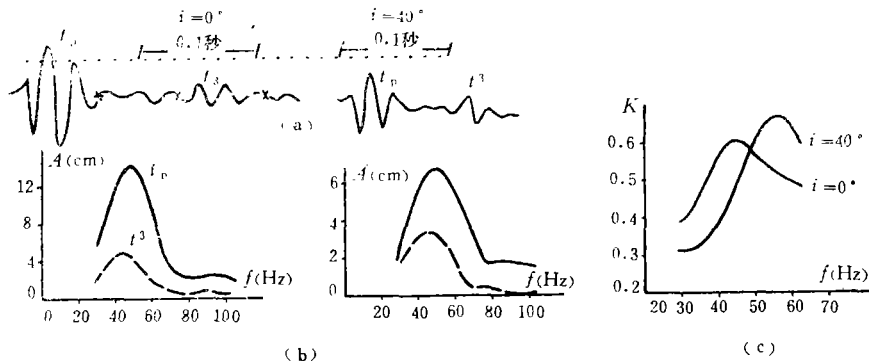


图 13 (a) 法线入射和 $i=40^\circ$ 时直达波和反射波的波形图
(b) 对应的频谱曲线
(c) 对于两种入射角的反射系数谱曲线

有可能真正地实际测定介质的吸收系数和波散特性。另外,利用观测横波倾斜入射到界面上分裂成 SV 波和 SH 波的情况,还能研究岩层的各向异性。大家都知道岩层吸收系数的差异比速度差异大得多,饱和油气的岩层与不饱和油气的岩层之间吸收系数也有明显的差异。所以人们早就想利用吸收这一参数来划分地层和直接找油气,碰到的障碍主要是难以测定和提取吸收系数。现在,垂直剖面无疑增加了这种可能性。至于岩层中各向异性系数的特点,目前还研究得不多,在解决某些地质问题时,这种参数也可能成为判别的一个重要标志。

4. 利用质点运动轨迹这一敏感的参数是垂直地震剖面法的主要特点之一。地表观测资料由于低速带的影响,使质点运动轨迹受到很大的畸变,因而往往不能利用质点运动方向来分析波场的特点。在介质内部用三分量对称装置观测,有可能测定不同深度点上质点运动方向的变化,因而也就有可能利用质点运动方向来细致地分析波场。

图 14a 是某地观测的初至波垂直时距曲线和质点运动方向曲线图。由图可见,当炮点距离为 $l=140\text{m}$ 和 $l=240\text{m}$ 时,双曲线形态的垂直时距曲线在接近界面处被一段负视速度的时距曲线所代替。这段时距曲线与图 14b 右边波形图上的首波初至相对应。因为这段时距曲线较短,且首波强度很低,所以仅从运动学特点不能可靠地确定首波。但是从质点运动方向曲线可见,在这个深度,射线角度从正值到负值发生了突变。这一明显的标志能可靠地判断首波的存在。除此之外,由垂直时距曲线是双曲线可以看出对应的波是曲射线折射波,根据不同 l 值的时距曲线的极小点可以确定介质的速度增加系数 β 值。但是用时距曲线确定极小点误差较大,而由质点运动方向曲线的零点确定 β 值则比较可靠。图 14c 中“1”是根据方向曲线确定的零点,“2”和“3”是假定 $\beta=0.0015$ 和 $\beta=0$ 时计算的理论曲线。方向曲线确定的 β 值为 0.0015 ,因为方向曲线的零点连成的曲线和 $\beta=0.0015$ 曲线很吻合。这个 β 值与速度测井资料也非常一致。

图 15 是另一地区用水平和垂直联合的观测系统详细研究剖面上部的一个例子。由图可见利用垂直时距曲线可以划分出剖面上深度 18m 、 34m 和 55m 的三个界面,但是

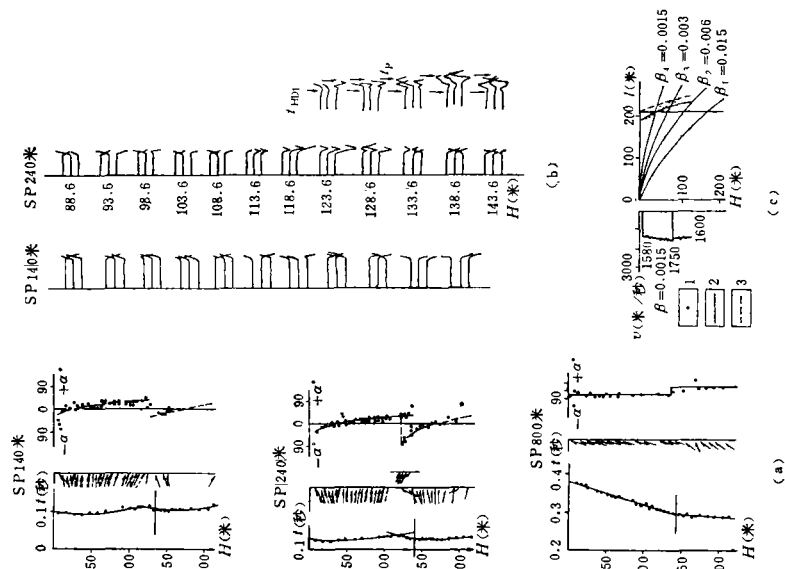


图 14 (a) 初至波时距曲线、质点运动方向和质点运动方向曲线 (b) 初至运动方向曲线 (c) 由质点运动方向测定 β 值 ($\beta=0$ 为观测值, 2、3 为 $\beta=0.0015$ 和 $\beta=0.006$ 的理论计算曲线)

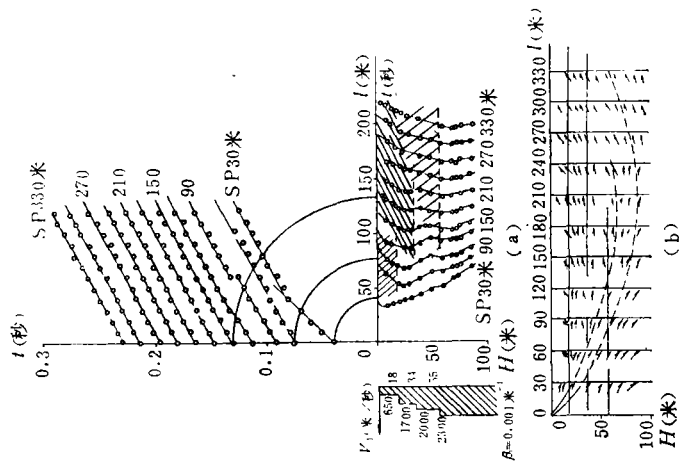


图 15 (a) 水平—垂直综合时距曲线 (b) 位移动方向场

质点方向图能更可靠地确定界面的位置。图 16 是同一地区一个垂直平面内的波场图。

从平面内方向由正到负的突变点可以确定深层介质的速度增加系数 $\beta = 0.001^{-1} \frac{1}{\text{m}}$ 。从

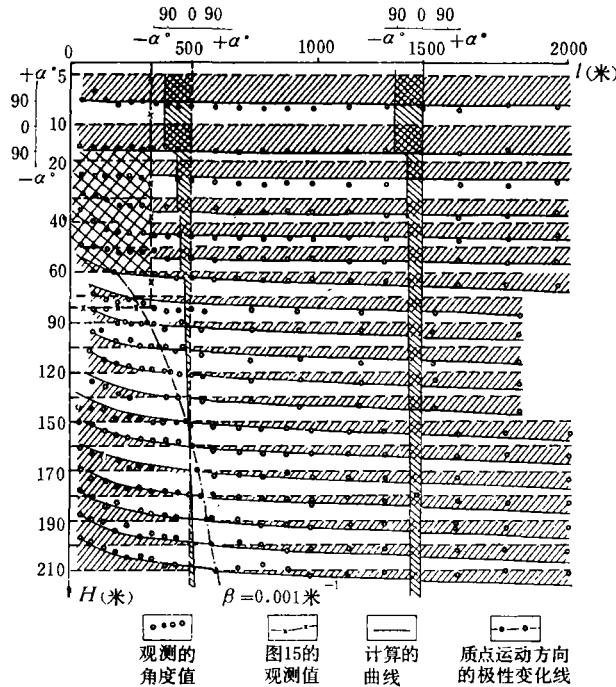


图 16 一个垂直平面内的质点运动方向变化曲线

$l = 500\text{m}$ 剖面上方向曲线图角度值的跳变可以划分出深度为 18、34、55m 的三个界面。角度值虽然都是正值，但是在界面处有跳变。其跳变幅度分别是 27 度、9 度和 7 度。

除上述例子外，质点运动方向图对于识别横波、转换波也是特别有效的。

七

地震勘探方法的勘探能力首先取决于这些勘探方法所形成的波场。垂直地震剖面法由于能够剖析地表观测的复杂波场、识别各种类型的波和确定与各种类型波有关的地质单元，所以它可能大大地提高各种地震勘探方法的勘探能力。

第一，垂直地震剖面法能改善对震源条件的研究

大家知道，单张记录的质量首先取决于震源条件，改善激发条件是增强地震勘探能力的首要课题之一。要改善激发条件，首先就要研究激发条件。根据地表观测的资料研究激发条件，往往受到很大的限制，因为地表观测时，直达波受到地表破碎现象和剖面上部介质不均匀性的影响，大大地改变了原来的面貌。直达波是直接受震源条件控制的，它是波场中传播的各种类型波的开始。它的波形影响着地震记录上所有波的波形。紧

接着直达波的人射波波列与激发点周围介质和剖面上部结构有关，它影响地震记录上波的数量和地震记录的面貌。地表观测由于难以记录不受畸变的直达波，因而也就失去这种研究震源条件的有效手段。因为垂直地震剖面法是在介质内部不同深度点上观测的，所以能直接观测到简单的直达波初至波形和紧接着直达波的人射波波列，因而可以客观和严格地评价震源条件。它不仅以研究震源激发的强度、频谱和方向性，而且还能研究剖面上部对震源条件的影响。图 17 是某地直达波和反射波波形图。其中图 17a 是同一深度点 ($H = 1000\text{m}$) 接收、不同深度炮点激发的记录，图 17b 是同一深度 ($h = 75\text{m}$) 激发、不同深度接收的地震记录。由图可见，除直达波和反射波的干涉带外，反射波波形基本上是受直达波控制的。图 6 是利用垂直剖面观测直达波以试验激发深度影响所得的地震记录。在 $h = 20\text{m}$ 时，直达波形状最简单，这里正好在低速带底面之下。由此可选择最佳的激发深度。图 18 是利用垂直地震剖面研究直达波子波形状的记录。由图可见，其中有的子波与雷克子波的形状非常接近。其它实验资料也分别与另外一些理论假设相一致。直达波子波波形除用以研究震源的频谱、强度外，在理论研究和资料处理（例如反褶积）方面也有重要作用。图 19 是利用垂直地震剖面研究横波的记录。从图上可以看出所激发的横波和纵波的强度和频谱以及横波两水平分量之间的少量位移。

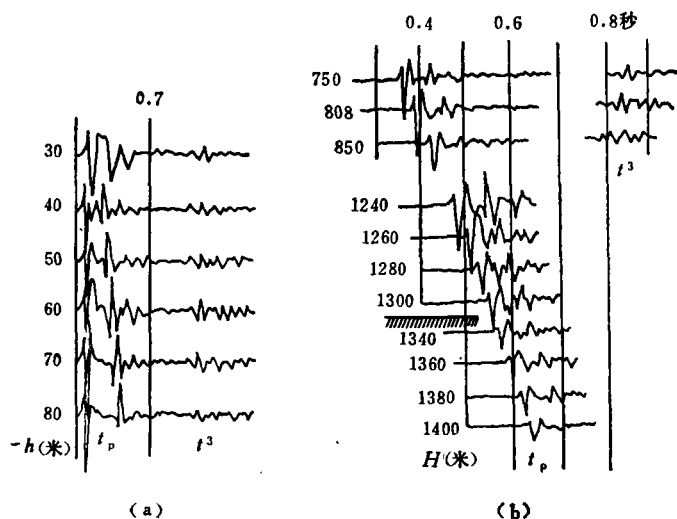


图 17 直达波和反射波波形图

(a) 同一接收点 $H = 1000\text{m}$ 的波形图，

$Q = 0.8\text{kg}$, $l = 600\text{m}$

(b) 同一爆炸深度 $h = 75\text{m}$ 的波形图，

$Q = 0.5\text{kg}$, $l = 100\text{m}$

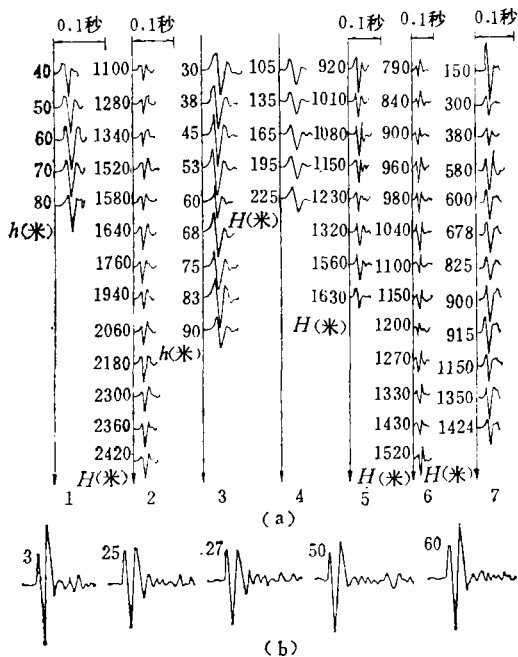


图 18 (a)直达波子波波形
(b)不同炮点复制的子波波形

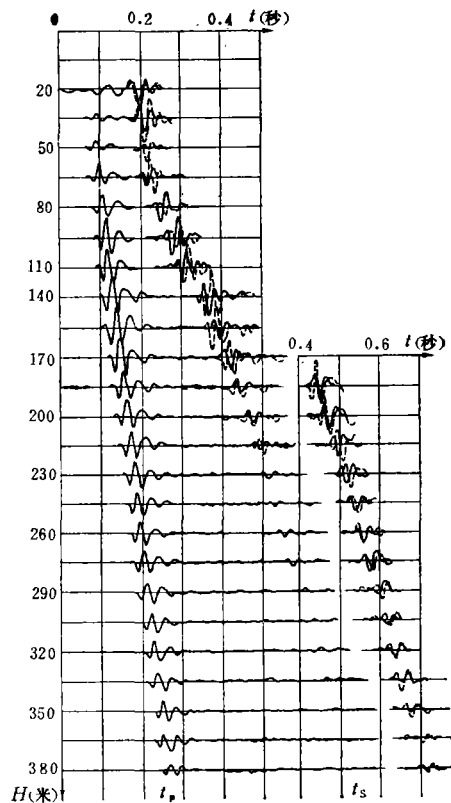


图 19 激发横波的垂直剖面
地震记录 (撞击激发)

垂直地震剖面法因为有助于研究震源条件，因而也就能为选择最佳的激发条件提供可靠的资料。

第二，垂直地震剖面法能根据波的运动学特点较可靠地识别波的性质

确定地震记录上波的性质是地震资料解释的主要课题。但是由于剖面上部干扰和由于各种波的运动学特征在地表记录上不够明显，所以根据地表观测的资料来确定波的性质，通常只有在构造简单的情况下才是可靠的。波的动力学理论的研究以及以多次叠加为基础的各种资料处理方法的发展，大大改善了辨别波的性质可靠性。但是对于复杂地区，仍然存在着很多困难。

垂直地震剖面上各种波的运动学特征比地表清楚得多：

图 20 是某地地表观测的纵反射波和多次波在水平剖面上的时距曲线。因为多次波和一次波之间波的运动学特征不明显，所以很难辨认出多次波。图 21 是同一地区根据垂直剖面的地震记录作出的垂直时距曲线示意图，图中明显地看出界面 3 的多次反射。

图 22 是某地首波和过临界角反射波的垂直时距曲线图。根据界面 3 附近时距曲线

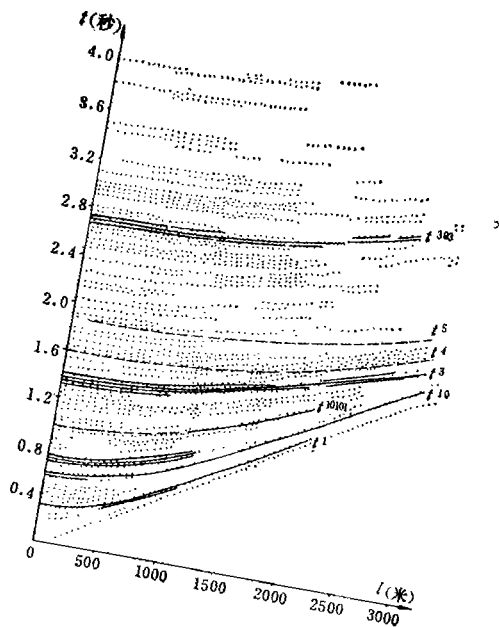


图 20 水平剖面的反射波
和多次波时距曲线

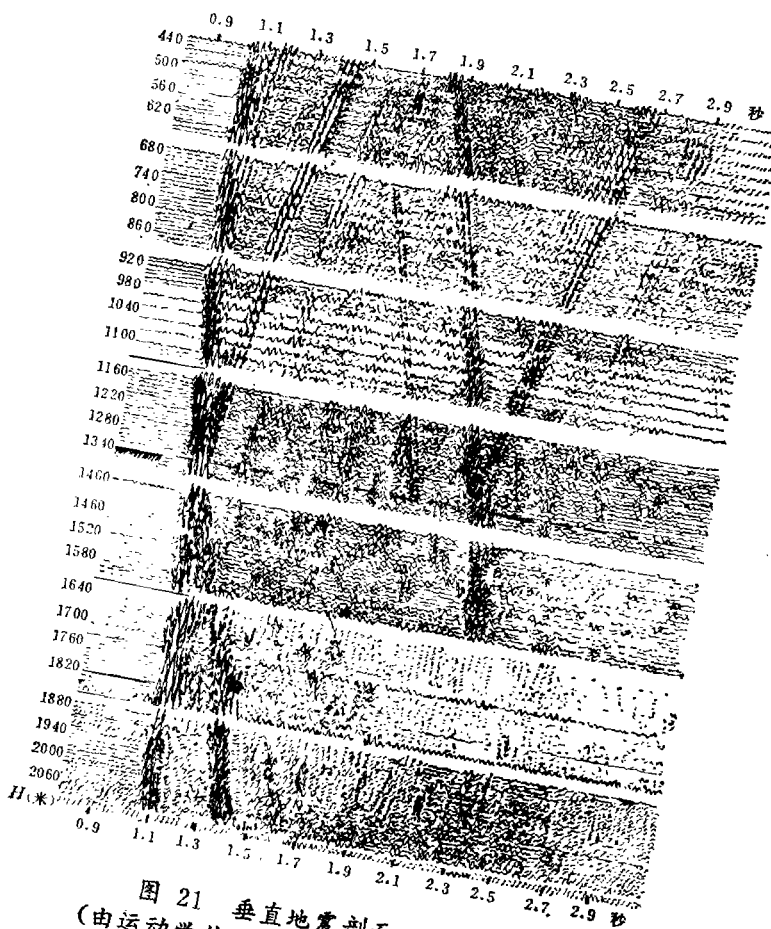


图 21 垂直地震剖面地震记录
(由运动学特征识别界面 3 的多次反射)

视速度极性的改变，可以识别出首波，同时也可以看出，首波一般不能在地表作为初至波接收。长期以来，流行着一种错误的概念，认为折射波对比法所观测的是首波。现在垂直地震剖面的资料说明，由于首波强度低，且往往不能成为初至，所以在地表观测的不是首波，而是曲射线折射波或过临界角反射波。

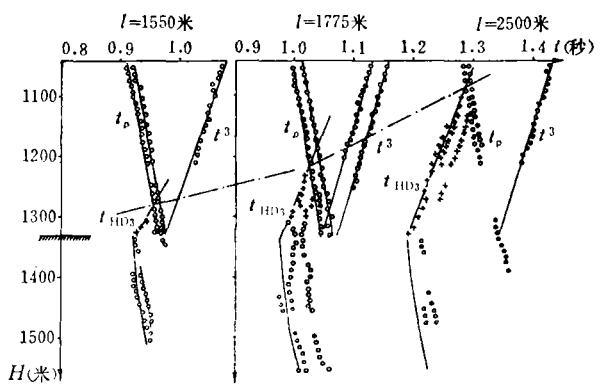


图 22 界面 3 附近首波和过临界角反射波垂直时距曲线

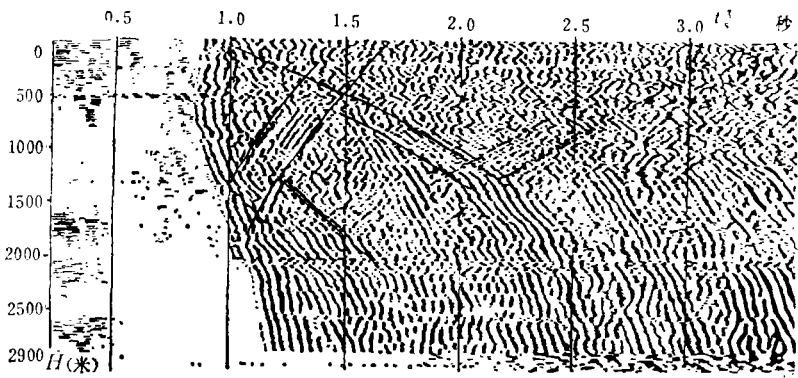


图 23 界面 3 的纵波和横波

图 23 是利用垂直剖面识别横波的例子。由波的运动学特征可以明显地判别横波。垂直地震剖面对于识别转换波、反射-折射波和折射-反射波等也比地表观测有许多优越性。

第三，垂直地震剖面能大大提高地层对比的精度

地表观测时，由于速度资料不充分，仪器观测产生相移和通常观测的波地震频率不高等等原因，所以即使波的性质已经确定，也往往不能精确地确定层位。例如，对于反射波来说，利用反射波和直达波垂直时距曲线在反射界面处有一个共同点的特点，可以精确地确定反射波的层位。图 3 和图 24 都示出了这种情况。在利用反射波和直达波时距曲线共同点来确定反射界面时，应该注意，有时由于入射波和反射波在界面附近互相干涉，有可能限制对比的精度。为了改善对比精度，已经研究了一些方法，例如方向接收法、

增长时距曲线法、入射波和反射波相位比较法等。除此之外, 还应注意, 把反射界面看成是厚层之间的分界面也往往是与实际不符的。实际介质在大多数情况下是由薄层或薄层组组成的。对于单个薄层, 可对比薄层顶面, 对于速度差小的一套薄层组, 可将垂直地震剖面 and 合成地震记录联合使用。

利用垂直地震剖面也可以对折射波资料较精确地实现地层对比。这时应注意初至波时距曲线形状的变化和首波通过分界面时线性极化的破坏(参看图 3 和图 11)。

第四, 垂直地震剖面有助于增加勘探深度

反射波法中影响勘探深度的主要原因之一就是多次波的干扰。垂直地震剖面法不能提供压制多次波的手段, 但是能提供关于有效波和干扰波的参数和性质的资料, 因而使我们能选择增强有效波和压制多次波的最佳系统, 从而增加勘探深度。例如, 利用垂直地震剖面求得的关于射线速度的资料, 对于选择共深度点叠加的有关参数就非常重要, 它可能增加共深度点资料的勘探能力。

第五, 利用垂直地震剖面资料可以更详细、更精确地构制速度剖面

常规地震测井也可以构制速度剖面, 但确定层速度不可靠, 特别是速度差小的地层。对于薄层和速度渐变的地层则更加困难。

垂直地震剖面可以利用初至波, 也可以利用所有的续至波来构制速度剖面, 因而可以更详细地划分速度剖面。例如根据纵测线垂直剖面的初至波资料, 可以先象地震测井一样粗略地划分剖面, 而后根据非纵测线垂直剖面的初至波资料, 补充剖面上的折射界面, 对于厚层还能确定速度随深度增加的系数。另外, 根据非纵剖面上的续至波(反射波、转换波等)可以识别反射界面, 这些界面常常反映高速薄层。除此之外, 利用垂直地震剖面, 既可以求垂直方向的速度, 也可以求各种倾斜方向的速度; 既可以求平均速度和层速度, 也可以求对共深度点叠加非常重要的射线速度; 既可以求纵波速度, 也可以求横波速度; 根据转换波资料还能求钻井尚未达到的深度的横波资料。

声波测井求速度的精度可能比垂直地震剖面高, 但是垂直地震剖面所测定的速度类型要广泛得多。

第六, 利用垂直地震剖面可以仔细研究井孔附近的剖面

这种方法类似于一种透视法, 在井孔中布置一系列检波点, 沿地表剖面线布置一系

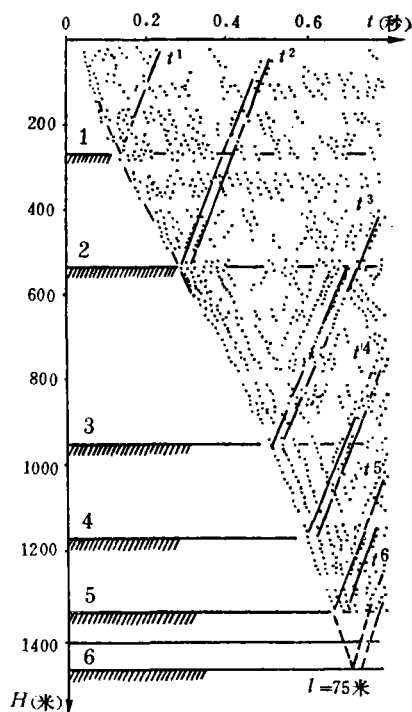


图 24 地震记录前部波的垂直时距曲线—由直达波和反射波垂直时距曲线在反射界面上的共同点确定反射层位

列激发点,根据波的到达方向对波进行识别。从运动学方面来看,这等价于大深度放炮,地表观测。这种方法名为转换时距曲线法。它在勘探阶段和钻井结合起来可以减少钻井工作量,对于勘探盐丘侧面等地质问题特别有用。

八

垂直地震剖面法除能增加各种地震勘探方法的勘探能力外,在方法研究方面也有非常重要的作用。

第一,垂直地震剖面法使我们便于采用最一般的研究物理场的方法来研究实际介质的波场。地震波的传播,本质上是地震能量传输和转移的过程,介质是传播能量的导体,地震波场的分布可看成是介质对地震脉冲反作用的结果。因此,通过对地震波波场分布特点的研究,可以研究实际介质的分布,就象根据介质对电脉冲的反作用来研究电网络参数一样。这样可以引入研究一般物理场的方法来研究地震波波场。但是地表观测的资料是介质对震源处产生的脉冲的一种复杂综合的反作用,且通常难以将波场的各个成份分开,所以对于地表观测的资料,难以引用这些研究物理场的最一般的方法。垂直地震剖面法是在介质内部点上观测的,条件比较简单,因而有可能分解波场中的各个成份,并找出对波场有决定性影响的因素。从而使利用研究物理场的最一般方法来研究波场成为可能。

第二,垂直地震剖面可提供构制简化介质模型的参数。任何一种地震观测资料解释的方法,都是以某种特定的介质模型为基础的,整个解释过程的效果大大取决于模型的选择。20多年前,最早选择的是2~3层的简单模型,对于比较简单的地质结构,这种模型取得了很好的效果。但是实际介质是复杂的,超声测井资料证实,实际介质是由薄层和薄层组组成的。为了对比较复杂的地质结构作出恰当的简化模型,仅仅根据地表观测的资料往往感到困难。利用地震测井和声波测井资料是改善模型设计的一种有效途径。而垂直地震剖面能提供有关构制简化介质模型的更丰富的资料。根据垂直地震剖面所提供的平均速度、平均层速度、射线速度、速度梯度以及波的振幅、波形、极化方向、有效反射系数、有效吸收系数等重要参数,有可能更合理地设计简化的介质模型。所设计的模型,在主要部分相当详细,在中间部分可高度地“平均”。

第三,垂直地震剖面法是研究剖面上部影响的重要方法。垂直地震剖面证实地表和剖面上部是形成多次波和各种干扰波的主要来源。

第四,垂直地震剖面法为地震波在实际介质中的模拟增加了可能。地震波在实际介质中的模拟,比在实验室样品上模拟更可靠,有更多的优越性。

第五,垂直地震剖面为更广泛地提取和利用岩层的新参数增加了可能。

过去很长时间,研究波场时只利用了“波至时间”、均平速度等少数信息,对于地质对象,主要也只依据其速度差异。动力学理论和实践的发展使人们一方面可以进一步观测波的振幅、频率、相位、极化方向等信息,另一方面有可能利用岩层的吸收、波散、各向异性系数、弹性系数等参数。因为垂直地震剖面法能比地表更灵敏和更可靠地

观测这些动力学特性，因而也有可能更可靠和更精确地测定岩层的速度、反射系数、吸收、波散、各向异性和弹性等参数。这对于研究地震勘探新方法和发展地震勘探新的地质和地球物理基础，都带来了不可估量的前景。

第六，垂直地震剖面法为利用多种类型的地震波创造了条件。

过去很长一段时间，我们采用的地震勘探方法，主要是纵反射波法。这种方法在地震勘探中起了很大的作用，现在也仍然是主要采用的方法。但是随着遇到的愈来愈复杂的问题，单纯用纵反射波法就感到资料不足或精度不够。所以必须探讨其它方法，进行综合勘探。例如，不仅利用反射波，也利用折射波、首波、曲射线折射波、过临界角反射波；不仅利用纵波，也利用横波和各种转换波等。但是，这些波是否可以利用，在什么条件下可以利用以及如何利用等问题，必须进行系统的研究。垂直地震剖面法因为能较方便地分解波场，因而能够仔细地研究各种波，这就为各种类型波的利用准备了前提。

九

垂直地震剖面法正在进一步发展。在苏联，这种方法已经投入工业生产，在美、法等国也正在试验研究。发展的主要方向是：

在仪器方面，主要完善仪器和观测技术。对于井下仪器，要增加道数，测量质点运动的全矢量，使压板在地表能独立控制，以及要控制井下检波器组的取向。对于地面仪器，要采用数字记录。

在观测方法方面，主要是发展水平剖面和垂直剖面联合的观测系统和空间三维的观测系统。把通常的地震测井完全转为垂直地震剖面，并把垂直地震剖面列入标准地球物理调查的设计中。

在资料解释方面，主要是利用计算机和数字记录，发展一套定性定量的运动学和动力学的资料处理和解释方法。