

石油地球物理勘探丛书

垂直地震剖面法 应用技术

1.4
41
谢明道 编

● 石油工业出版社

石油地球物理勘探丛书

垂直地震剖面法应用技术

谢 明 道 编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是介绍垂直地震剖面法应用技术的书籍。书中对垂直地震剖面法的观测系统设计、震源、测井检波器、采集仪器及其他设备的操作、使用、垂直地震剖面法资料的处理、解释及应用都作了较为详细的介绍。

本书可供从事垂直地震剖面法勘探的工程技术人员使用，也可作为石油地质人员及与石油地质、石油物探有关的大专院校师生参考。

石油地球物理勘探丛书

垂直地震剖面法应用技术

谢 明 道 编

石油工业出版社出版

（北京安定门外安华里二区一号楼）

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 $10^3/4$ 印张256千字 印1—2,000

1991年9月北京第1版 1991年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0381-3/TE·370

定价：3.55元

出版者的话

近二十年来，石油地球物理勘探技术日新月异，发展迅速。为了总结地球物理与地质相结合的经验，推广石油物探方法的新技术，我们组织有关专家、教授编写了这套《石油地球物理勘探丛书》，供石油地球物理工程师学习参考，以期做到物探工作中设计的合理性、采集的可靠性、处理的正确性、解释的科学性，提高解决各种复杂问题的能力。

这套丛书以应用为主，对基本概念和基础理论只做简要阐述，侧重于介绍各种新技术、新方法在实际工作中的应用。内容包括石油重、磁、电、地球化学、放射性、地震各种方法的资料采集、数字处理、成果解释、应用等，预计编写二十余册，每册都力图讲述清楚一个课题，它既是石油物探工作者施展才能的园地，又是您工作案旁的良师益友。让我们为发展石油物探技术，来共同编好和使用好这套丛书吧！

目 录

第一章 VSP的基本原理	(1)
第一节 VSP的由来与发展	(1)
第二节 VSP的基本特点及其在油气勘探中的作用	(2)
第三节 VSP所记录的几种主要波及其时距曲线方程	(4)
第二章 VSP的野外采集工作	(16)
第一节 VSP野外采集前的准备工作	(16)
第二节 VSP采集的现场施工	(18)
第三节 当前采用的几种观测系统	(20)
第三章 VSP的地面采集仪器与操作	(37)
第一节 VSP地面采集仪器应具备的条件	(37)
第二节 用于VSP的几种采集仪器简述	(37)
第三节 DSS-10A数字地震勘探仪器及其操作	(39)
第三章附录1 DFS-V的技术性能	(47)
第三章附录2 三分量信号器	(50)
第四章 用于VSP的测井检波器——下井检波器	(51)
第一节 理想的测井检波器应具备的条件	(51)
第二节 几种类型的测井检波器简介	(55)
第三节 CGG的测井检波器——Geolock-H详述	(64)
第五章 VSP的震源	(78)
第一节 VSP震源的种类	(78)
第二节 几种VSP震源的实际应用	(87)
第六章 用于VSP的电缆车、井口装置以及严寒季节的工作方法	(93)
第一节 用于VSP采集的电缆车	(93)
第二节 MSU-F型电缆车及其操作	(93)
第三节 井口装置	(96)
第四节 严寒季节进行VSP采集的工作方法	(97)
第七章 VSP资料的处理、解释与应用实例	(99)
第一节 VSP资料的处理	(99)
第二节 VSP资料的解释	(110)
第三节 VSP的应用实例	(116)
第八章 野外采集中VSP资料质量的控制	(129)
第一节 与质量有密切关系的几个方面	(129)
第二节 井筒波的压制与克服	(138)

第三节 几种提高VSP资料质量的措施.....	(142)
第八章附录 猎人牌现场微处理机简介.....	(147)
第九章 VSP在HCI中的应用.....	(151)
第一节 地震信息与油气的关系.....	(151)
第二节 VSP用于HCI的有利条件.....	(153)
第三节 VSP用于HCI的几种主要信息.....	(156)
参考文献.....	(164)

第一章 VSP的基本原理

第一节 VSP的由来与发展

多年来，地震勘探工作一直是在地面布置测线，设置排列。近些年来，出现了在井中与地面结合起来设置观测系统的地震勘探方法。人们称这种方法为垂直地震剖面法，或简称为VSP (Vertical Seismic Profiling)。为将该方法与前者区别，将在地面布置地震测线的方法称为水平地震勘探法。如图1.1.1所示。

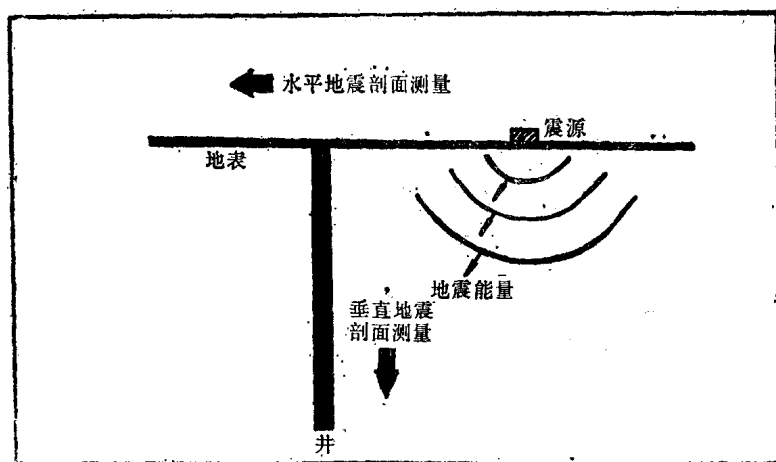


图1.1.1 垂直和水平地震剖面测量基本图形

垂直地震剖面法，早在1917年，Fessenden在他的一篇专利报告中曾提出利用井中震源和检波器探测矿体位置。1927年，美国地球物理公司第一个检波器下井，首创了世界上利用地震资料指导钻井的先例。当时仅能测800m深的井。40年代，一些苏联人如伏尤茨基、甘布尔采夫、波则列夫，他们利用直达纵波测定地层速度。在以后的年代里，他们曾试图利用地震测井获得的续至波信息来说明地质现象。40年代末，地震测井技术进一步发展，有些石油公司进行了高密度的地震测井，即把井内观测的间距缩小到5米。1949年有人把二次大战潜艇上的声纳技术移植到测井工艺方面，出现了连续声波测井技术。1956年公布了连续声波测井资料与岩性（速度、流体含量、孔隙度）之间的关系。1959年苏联人首先提出了VSP法勘探。60年代，他们利用VSP资料成功地识别了波场，帮助对地面地震资料做出正确的解释。1971年苏联VSP专家、苏联科学院院士E.I.加尔彼林在莫斯科出版了一本专著——垂直地震剖面（已由石油工业出版社出版了中译本）。较系统地介绍了VSP技术，并开始利用VSP资料了解横向远离井孔的地质结构。苏联的研究成果引起了西方国家地球物理界广泛地重视。1974年美国SEG(勘探地球物理学会)组织翻译了加尔彼林的“垂直地震剖面”一书。

¹977年,在美国一些石油公司的邀请下,加尔彼林赴美在各公司巡回报告。从此之后,这项技术受到了一些石油公司、地球物理公司和测井公司普遍重视,而且都大力开展该方法的研究与服务。之后,每届SEG年会均有关于VSP方面的文章发表。在1980年第50届SEG的年会上,将VSP列为会议专题。自那时起,许多外国石油公司将该方法列入区域探井测井系列,且作为常规完井程序。非零井源距VSP方法也在不断发展,同时也涌现出一批VSP专家,如P.Kennett、Wyatt、B.A.Hardage等。

随着科学技术的发展,VSP也迅速发展。例如配备了高采样率的地面记录仪器,耐高温高压的下井系统,设计了有前置放大器的测井检波器及能同井壁良好耦合的推靠设施。研制了VSP计算机数据处理专用软件。观测方法亦由零井源距发展为非零井源距以及多变非零井源距方法;由二维VSP正在发展为三维VSP;测井检波器正由单深度三分量检波器发展为多深度单分量检波器并努力改进为多深度三分量检波器系列。

自1980年起,我国石油工业部开始对VSP进行调研后,各油田分别依靠现有设备,相继开展了试验研究,并在不同程度上见到了初步效果。1984年以来,开始或部分或整套地引进了VSP设备。1986年,中国石油学会物探委员会、山东石油学会及天津市石油学会召开石油物探优秀论文报告会,在会上,发表有关VSP的论文有十多篇。这表明,垂直地震剖面法正在我国迅速被推广和应用。

第二节 VSP的基本特点及其在油气勘探中的作用

VSP法是一种新的地震勘探技术,它也是常规地震速度测井技术的发展,它不仅可获取初至直达波信息,而且还可获得初至以后的各类续至波信息。利用这些地震波信息,可研究波场、波速、岩层产状、岩石孔隙度等,为直接找油找气提供了可能性。

当前VSP法大多采用在地面设置震源来激发地震波,而在井中安置测井检波器的观测方法。如图1.2.1和图1.2.2所示。

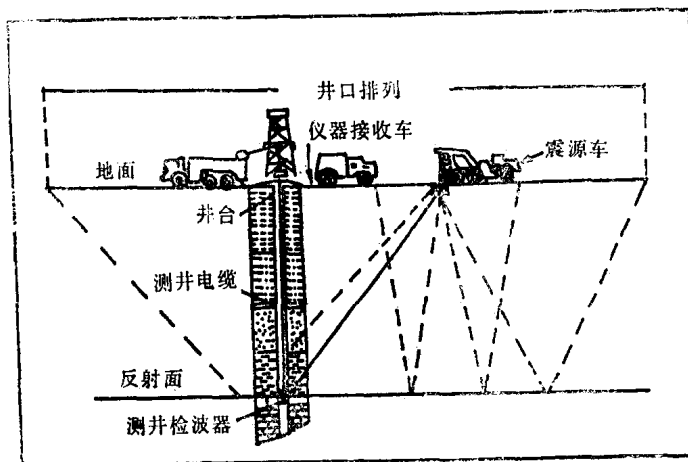


图1.2.1 地震测井示意图

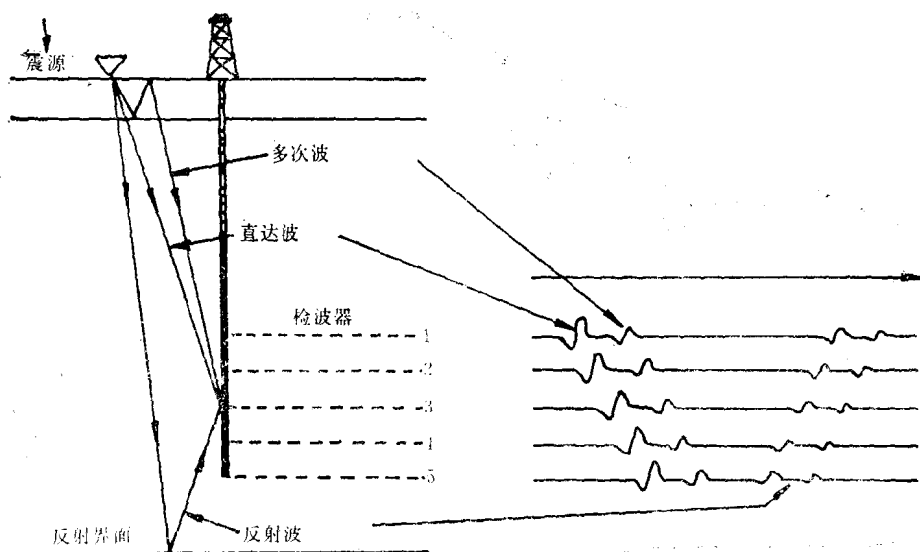


图1.2.2 VSP记录波场示意图

一、VSP法的特点

1. 接收点分布在介质内部

因VSP法的测井检波器是被安置在井中，故VSP的接收点是分布在被测介质内部的。因此，它可用接收点的垂直方向分布形式来研究地质剖面的垂向变化。而水平地震观测则是以接收点在地表的水平方向分布形式来观测和研究地下地质剖面的垂向变化的。所以，前者能更直接、更明显地反映波的运动学和动力学特征。

2. 可记录被研究对象的“单一”地震波

由于VSP的测井检波器置于井中，故可将其放置在被测地层界面之上、附近或其中间，故检波器可直接记录由震源产生而传播到所研究对象的“单一”地震波。而水平地震测量由于检波器置于地表，故只能间接接收由震源产生而又返回地表的双程地震波。

3. 干扰因素少

VSP在井中观测可以避免或减少地面以上的自然干扰；而水平地震测量则所受干扰因素较多。所以，前者易于识别波的性质。

4. 可记录上行波和下行波

VSP可同时记录上行波和下行波，而水平地震测量记录的主要是上行波。所以前者可以更有效地利用波的到达时的时间特性。

5. 检波器为三分量检波器

VSP的观测检波器为三分量检波器，即垂直分量与两个水平分量。而水平地震测量目前只能接收一个垂直分量——单纯接收纵波。（CGG1986年开始有了既可接收P波，又可接收S

波的双炮地面检波器)。如果要接收横波信息,还需采用专门的一套接收与激发设备,且需再进行一次采集。所以,前者由于具有一个垂直分量 Z ,两个水平分量 H_1 和 H_2 ,因而对记录信息可作精确地定量分析。

6. 使用可重复性震源

VSP对于激发源的要求比较严格,主要要求激发是在同一源点且需为恒震源。因此,多使用可重复性的震源。

二、VSP在油气勘探中的作用

(1) 在理想的条件下,VSP要求在低速带以下接收与激发,部分地避开了复杂的低速层影响,高频衰减少。所以,有较高的分辨率和信噪比,可满足高分辨率地震勘探的一些要求。

(2) 在地表条件恶劣的地区(例如厚砾石层地区)和潜水面很低的地段,可利用现有井孔进行VSP测量,然后,将所得垂直地震剖面资料转换成水平地震剖面,用以填补用水平地震测量难以获取地震资料的那个空白地段的资料。

(3) 可用VSP资料与地质层位对比,确定地震层位与相应的地质层位。

(4) 可用VSP预告钻井未钻遇的地层深度。

(5) 用VSP资料可提供子波,反褶积因子、速度、反射系数、衰减系数以及其他物理参数。

(6) 可以识别多次波。

(7) 可以同时记录纵波及横波,这样就使地震勘探步入了全波信息利用的领域。根据其提供的速度及速度比、振幅及振幅比、频率及频率比、波长及波长比以及波形结构等信息,可研究井孔周围隐蔽性的油藏及砂岩体,或检测油气及圈定储油范围。

(8) VSP与地面地震勘探相结合,联合对比,用以分析研究波源点有特殊意义。人们可利用以下两方面波场参数变化来研究波场:即检波器-震源之间距离的变化(地表观测特点);以及检波器-地层界面之间的变化(介质内部固有特点)。

(9) VSP资料与声波资料综合应用,可计算大套地层之间的薄层。同时,在做合成记录时,可考虑其折射影响。另外,还可用所做的合成记录与VSP资料解释地震波形成的机制与细致地对比地层。

垂直地震剖面法,也有自己的不足之处。如:野外采集远比水平地震勘探采集工艺复杂。它需要井孔、电缆、电缆车及重复性好的震源,比水平地震勘探工作环节多且繁琐。特别在严寒的冬季施工,更增加了许多麻烦。最大的缺点是它的测量范围有限。这一点远不能与水平地震勘探相比。

第三节 VSP所记录的几种主要波及其时距曲线方程

众所周知,垂直地震剖面既不同于地面的水平地震勘探,也不同于常规地震测井,因而它所记录的信息也不相同。本节将叙述出现在垂直地震剖面中的几种主要地震波及其时距曲线方程。

图1.3.1所示为VSP的几种主要波的射线路径。

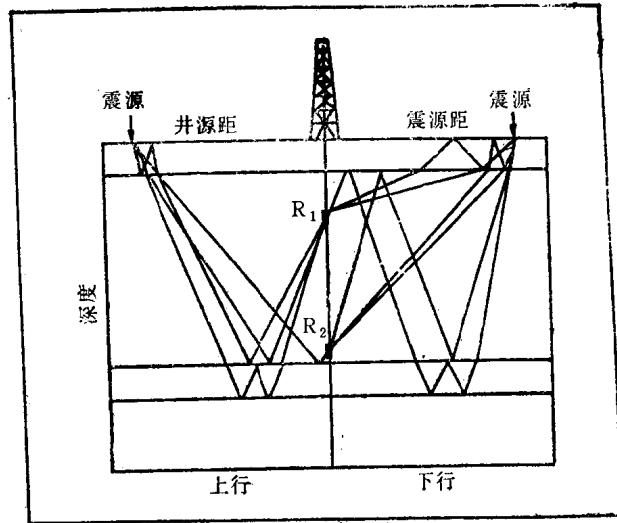


图1.3.1 射线路径

一、垂直地震剖面中出现的几种主要的地震波

在垂直地震剖面中出现的地震波有上行波和下行波。上行波中又可分为一次反射波和多次上行波。下行波中可分为初至直达波和下行波。另外还有井筒波和其他干扰波。如图1.3.2~1.3.4所示，现分述如下。

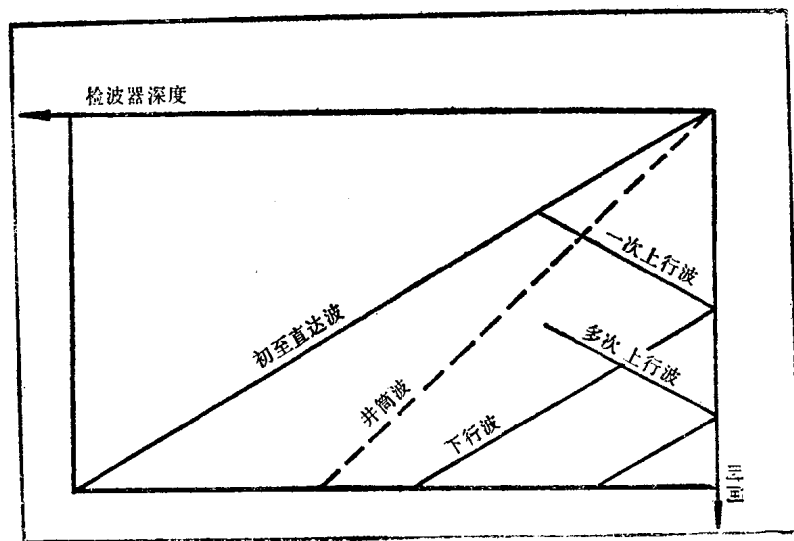


图1.3.2 垂直地震剖面法上的几种主要波

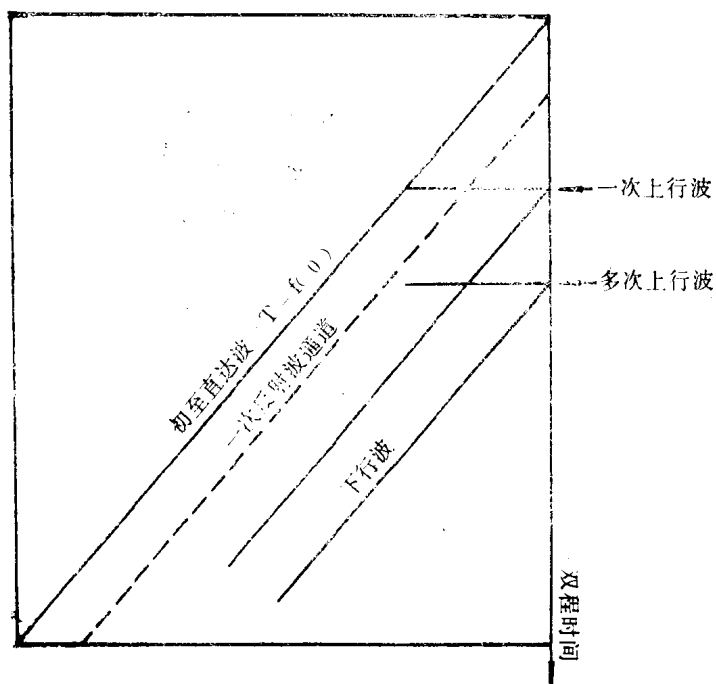


图1.3.3 平滑后的上行波

多次波和上行多次波。凡是来自检波器以上的多次波都是下行多次波，其旅行时间随观测点深度增加而增大，其同相轴具有正视速度，反之，凡是来自检波器以下的多次波都是上行多次波。

4. 上行波

接收到来自观测点以下的各种行程的波（无论是一次的或多次的波）统称为上行波。

5. 下行波

凡是接收到来自观测点以上的各种行程的波（无论是初至直达波或多次下行波）统称之为下行波。

6. 井筒波

它是VSP中常见的一种波。该波是沿着井筒中流体（泥浆）与固体（井壁等）界面传播的一种波，其有时呈多组形式出现。它与井筒的粗糙程度、井内有无套管以及井径的大小均有一定关系。有时也会在测井检波器与泥浆接触面之间形成。总之，在井内两种介质之间存在大波阻抗是它形成的条件。它具有以下特征：速度稳定、且速度值偏低，约1400~1460m/s，其类似于瑞雷波和斯通波，不呈球面发散，频率有时表现为低频18Hz，高频55Hz。由于速度低，不出现在初至区内。

除以上几种波外，还有其它类型的波，如转换波和干扰波等。

有了以上各种波，就可对波场进行分析。分析下行波场，可更好地确定所产生的多次波和层间多次波的存在范围。同时用下行波来设计反褶积因子，对水平地震资料进行反褶积处理，其效果优于常规地震资料的反褶积处理。此外，用下行直达波能较准确地测量地震波振幅的衰减，藉以研究地震波在地下介质中传播时的各种影响因素及影响程度。

分析上行波场，可以知道VSP信噪比远比水平地震勘探反射波地震记录信噪比高，因而能较清楚地反映地质现象；也由于VSP的反射波旅行路径较水平地震勘探反射波的旅行路径

1. 初至直达波

直达波是由震源点出发向接收点直接穿透传播的波，即依次达到井内各观测点的初至波。直达波也称为下行波，其波的旅行时间随观测点深度增加而增大，形成的初至波同相轴具有正的视速度。

2. 一次反射波

即波由反射界面向上反射然后传播到观测点的波。一次反射波旅行时间随观测点的深度减少而增大，且只有当观测点位于界面之上时才能记录到它，其同相轴具有负的视速度。

3. 多次波

VSP观测到的多次波有下行

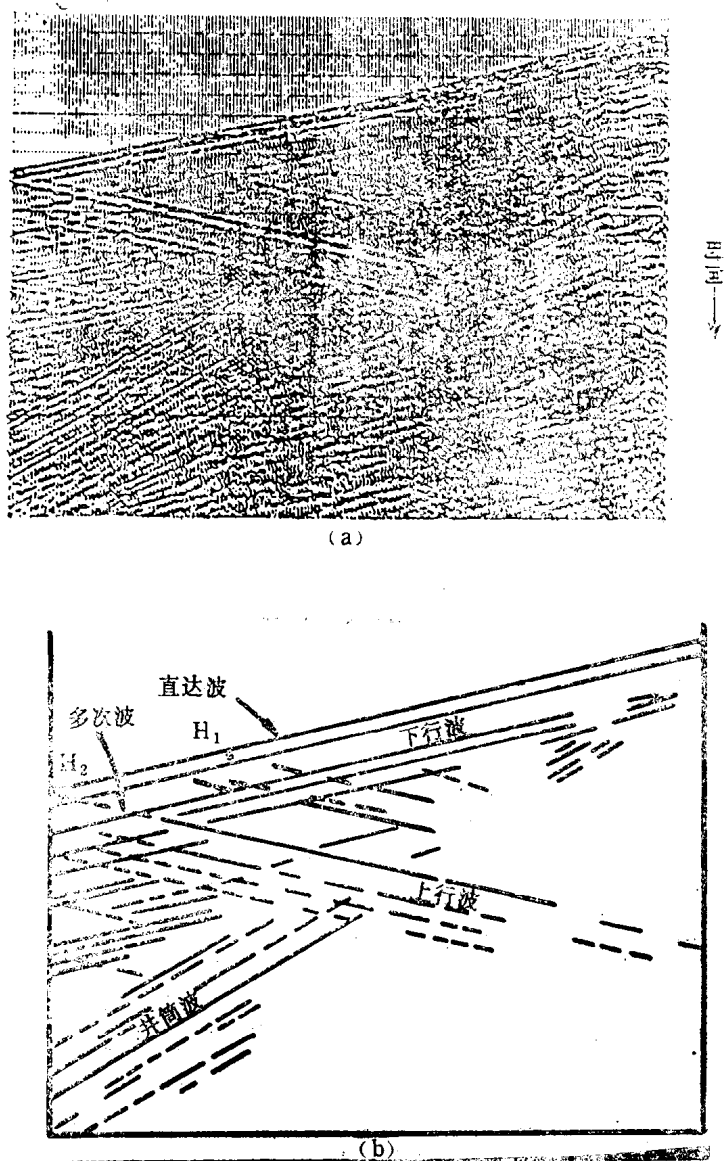


图1.3.4 VSP记录中波场的解释
(a) 实际VSP剖面; (b) 波场示意

短，故其具有能量强的特点，所以便于清楚地观测地质体的细微变化；还因VSP的接收点接近目的层，所以VSP所记录的上行波比水平地震勘探中的反射波有更高的分辨率。

二、VSP中几种主要波的时距曲线方程

时距曲线是表示波自激发点传播到接收点的时间与路程的关系。它的类型取决于地下地质体的结构与观测方式。目前，VSP的观测方式较多，本节只叙述一些基本观测方法和几种主要波的时距曲线方程。

在讨论它们的时距曲线方程时，假定其都是在均匀介质中传播，并用以下符号表示式中

各个参数

V ——平均速度；

h_i ——观测深度；

H ——激发点至界面的法线深度；

l ——被测井井口至激发点的距离（即井源距或炮井距，也有人称为偏移距）；

φ ——地层倾角。

现在，分析这些参数在各种时距曲线中的关系。

1. 直达波时距曲线（ $t_{\text{直达}}$ ）方程

当 $l=0$ 时，

$$\text{则 } t_{\text{直达}} = \frac{h_i}{V} \quad (1.3.1)$$

当 $l \neq 0$ 时

$$\text{则 } t_{\text{直达}} = \frac{1}{V} \sqrt{h_i^2 + l^2} \quad (1.3.2)$$

2. 上行反射波时距曲线（ $t_{\text{上行}}$ ）方程

当 $l=0$ 且地层水平时，

$$t_{\text{上行}} = \frac{1}{V} (2H - h_i) \quad (1.3.3)$$

(1) 当在上倾方向激发时，由图1.3.5可知

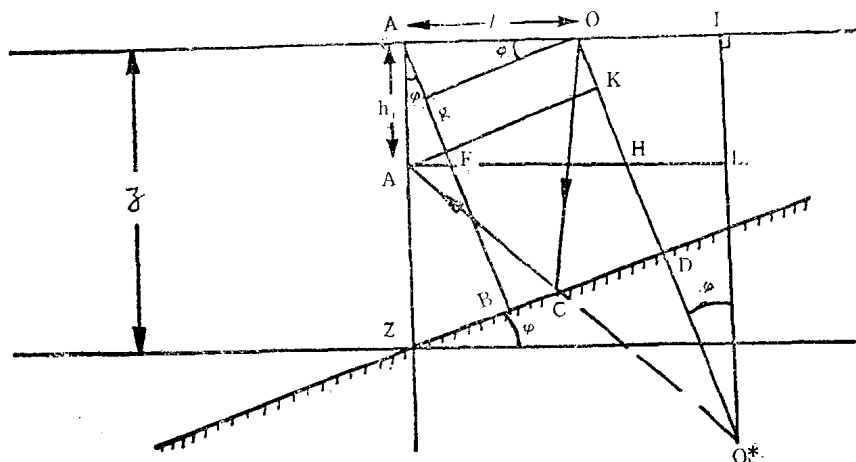


图1.3.5 上行反射波射线路径(上倾方向激发)

$$H = AB - Ag$$

$$= AZ \cdot \cos\varphi - l \sin\varphi$$

$$= z \cdot \cos\varphi - l \sin\varphi$$

$$O^*A' = \sqrt{(A'L)^2 + (O^*L)^2}$$

$$A'L = l + OI = l + 2H \sin\varphi$$

$$O^*L = O^*I - h_i = 2H \cdot \cos\varphi - h_i$$

$$\therefore O^*A' = \sqrt{(2H\sin\varphi + l)^2 + (2H\cos\varphi - h_i)^2}$$

$$\therefore t_{\text{上行}} = \frac{O^*A'}{V} = \frac{1}{V} \sqrt{(2H\sin\varphi + l)^2 + (2H\cos\varphi - h_i)^2}$$

其中 $H = z\cos\varphi - l\sin\varphi$

(1.3.4)

(2) 当在下倾方向激发时, 由图1.3.6可知

$$H = Og + gD = l\sin\varphi + AC = l\sin\varphi + AZ \cdot \cos\varphi = l\sin\varphi + z\cos\varphi$$

$$OO^* = 2H \quad OF = OO^*\sin\varphi = 2H\sin\varphi$$

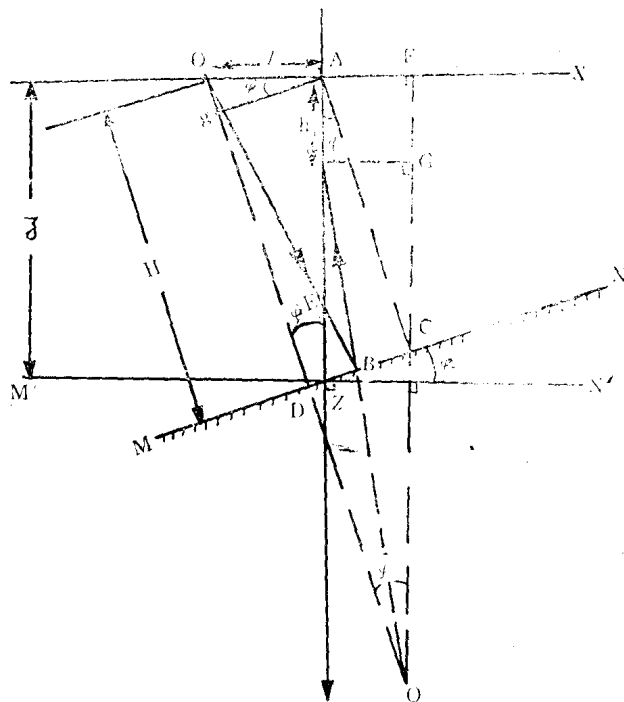


图1.3.6 上行反射波射线路径(下倾方向激发)

$$AF = OF - l = 2H\sin\varphi - l$$

$$A'G = AF = 2H\sin\varphi - l$$

$$O^*G = OO^*\cos\varphi - FG = 2H\cos\varphi - h_i$$

$$A'O^* = \sqrt{(A'G)^2 + (GO^*)^2}$$

$$= \sqrt{(2H\sin\varphi - l)^2 + (2H\cos\varphi - h_i)^2}$$

$$t_{\text{上行}} = \frac{O^*A'}{V}$$

$$\text{即 } t_{\text{上行}} = \frac{1}{V} \sqrt{(2H\sin\varphi - l)^2 + (2H\cos\varphi - h_i)^2}$$

其中 $H = l \sin \varphi + z \cos \varphi$

(1.3.5)

3. 一次下行反射波时距曲线方程

如图1.3.7所示, 射线路径 $O^{**}A = O_1B + BC + CA = O^*C + CA$

$$\therefore t_{\text{下行}} = \frac{O^{**}A}{V} = \frac{1}{V} \sqrt{(AD)^2 + (O^{**}D)^2}$$

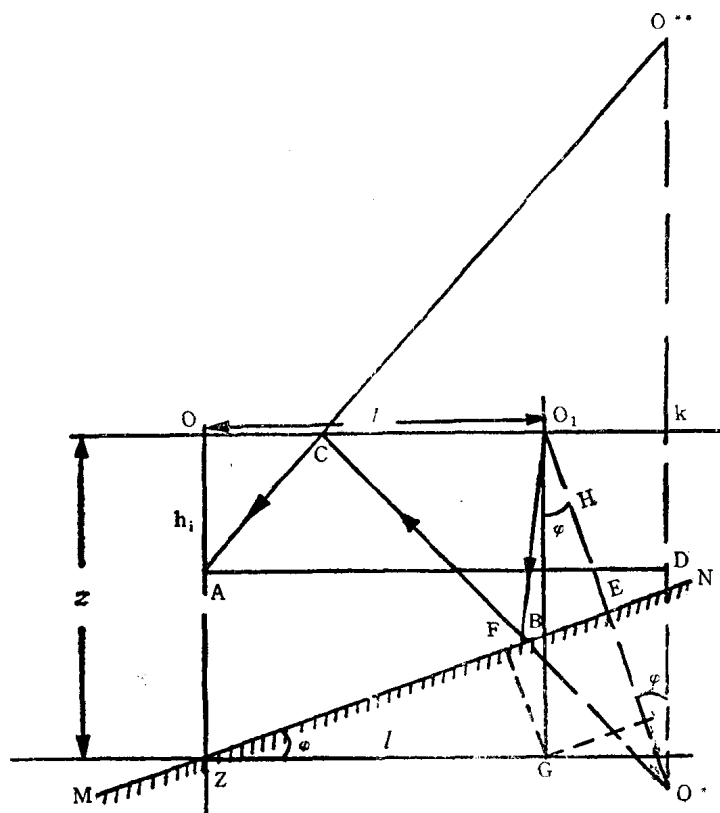


图1.3.7 一次下行反射波射线路径

$$AD = OO_1 + O_1K$$

$$O_1K = O_1O^* \sin \varphi = 2H \sin \varphi$$

$$\therefore AD = l + 2H \sin \varphi$$

$$O^{**}D = O^{**}K + KD$$

$$= KO^* + OA$$

$$= O_1O^{**} \cdot \cos \varphi + h_i$$

$$= 2H \cos \varphi + h_i$$

$$\therefore O^{**}A = \sqrt{(AD)^2 + (O^{**}D)^2}$$

$$= \sqrt{(l + 2H \sin \varphi)^2 + (2H \cos \varphi + h_i)^2}$$

$$\text{其中 } H = O_1I - EI = O_1G \cdot \cos \varphi - FG$$

$$= z \cdot \cos \varphi - l \cdot \sin \varphi$$

$$\therefore t_{\text{下行}} = \frac{1}{V} \sqrt{(2H \sin \varphi + l)^2 + (2H \cos \varphi + h_i)^2} \quad (1.3.6)$$

其中 $H = z \cdot \cos \varphi - l \sin \varphi$

4. 连续介质中初至波时距曲线方程

假设有连续介质 $V(H) = V_0(1 + \beta H)$ 。为了便于研究，我们将半空间 $V(H)$ 介质分成若干厚度为 ΔH 的水平薄层，并把每个薄层的速度看作常数，这样就可以把连续介质作为层状介质来研究。如果把层状介质细分，那么层状介质就变成连续介质了，此时，地震波的射线形状则由折线变成了曲线。我们知道，进行水平地震勘探时波在连续介质中传播的规律，其波射线和等时线呈两正交簇，而在垂直地震剖面中，由于接收方式不同，其传播规律也不尽相同。

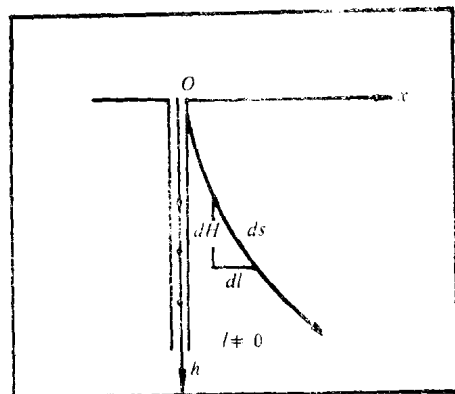


图1.3.8 地震波通过射线元示意图($l=0$)

(1) 当零井源距 ($l=0$) 时，如图1.3.8所示，地震波通过射线元 ds 的时间为

$$dt = \frac{ds}{V(H)}$$

在地震波垂直入射时，上式可写成

$$dt = \frac{dH}{V(H)}$$

于是，地震波到达某一深度 H 的传播时间为

$$t = \int_0^H \frac{dH}{V(H)} = \frac{1}{V_0 \beta} \ln(1 + \beta H) \quad (1.3.7)$$

也可写成指数形式，即

$$H = \frac{1}{\beta} [\exp(V_0 \beta t) - 1] \quad (1.3.8)$$

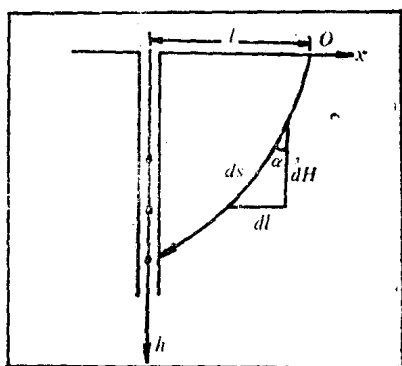


图1.3.9 地震波通过射线元($l \neq 0$)

(2) 在非零井源距 ($l \neq 0$) 时，如图1.3.9所示，地震波通过射线元 ds 的时间为

$$dt = \frac{ds}{V(H)} = \frac{dH}{V(H) \cos \alpha(H)}$$

则地震波到达某一深度 H 所需时间为

$$\begin{aligned} t &= \int_0^H \frac{dH}{V(H) \cos \alpha(H)} \\ &= \frac{1}{V_0 \beta} \ln \frac{(1 + \beta H)(1 + \sqrt{1 - \rho^2 V_0^2})}{1 + \sqrt{1 - \rho^2 V_0^2 (1 + \beta H)^2}} \end{aligned}$$