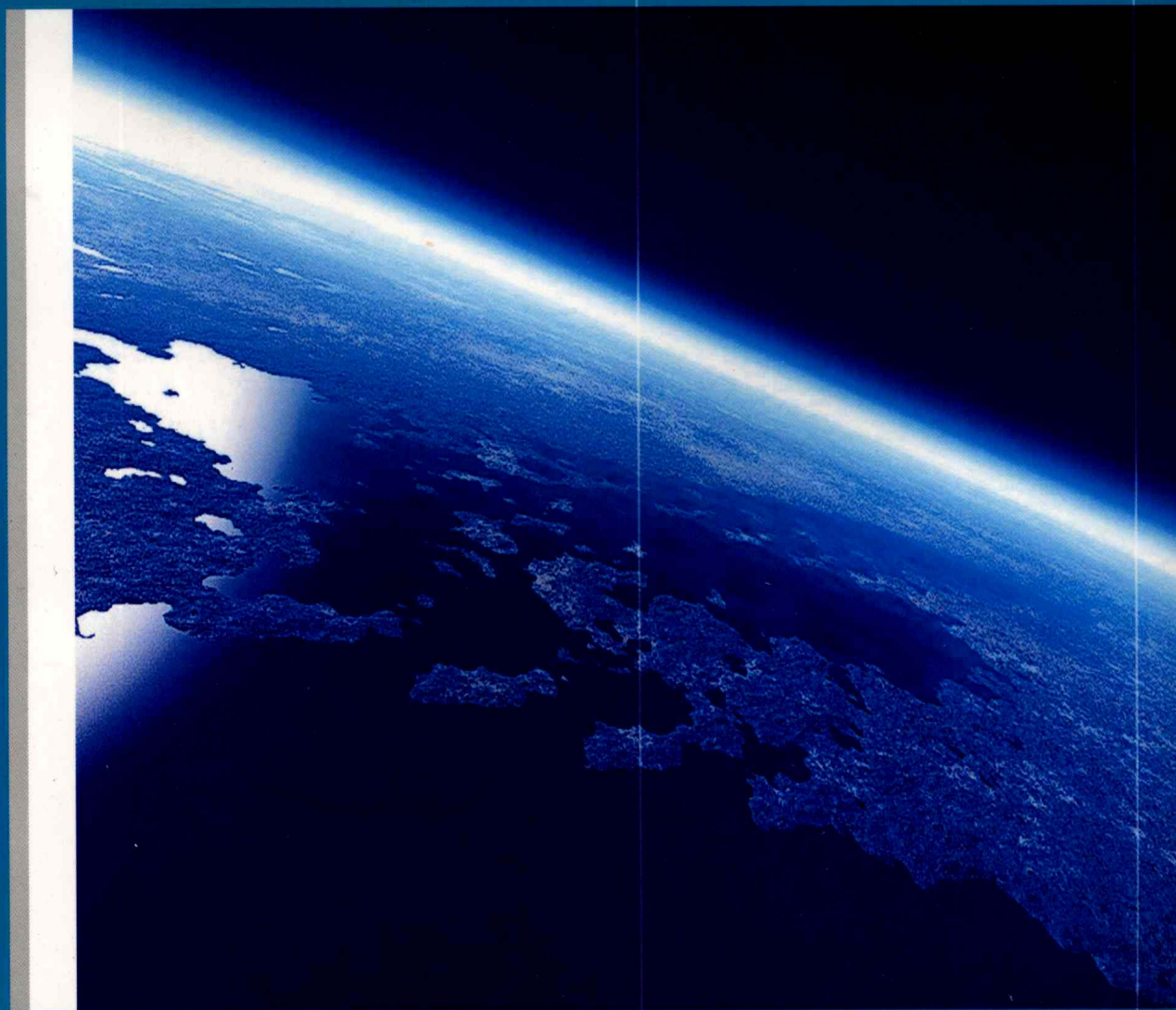


TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

工程地球物理

Engineering Geophysics

■ 宋维琪 编著



中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

工程地球物理

宋维琪 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程地球物理/宋维琪编著. —东营:中国石油大学出版社, 2008. 3

ISBN 978-7-5636-2555-0

I. 工… II. 宋… III. 地球物理勘探 IV. P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 031498 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 工程地球物理

作 者: 宋维琪

责任编辑: 袁超红(电话 0546—8396214)

封面设计: 九天设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791, 8392563)

开 本: 185×260 印张: 15 字数: 382 千字

版 次: 2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 21.00 元

前言

随着城市工程及石油工业的发展,大量新兴城市、经济开发区、旅游区等也蓬勃兴起,诸如高层大楼、大型厂房、地下铁道、高速公路、桥梁、港口、机场、水坝以及核电站等各种类型的高标准工程项目日益增多,工程勘察队伍也相应发展壮大。在石油工业中,浅地层勘探,特别是地表精细速度研究等地质任务迅速发展,这不仅对各种工程基础地质条件提出了更高的要求,对环境资源也要做出相应的评价,而且要求用较少的资金,快速可靠地完成工程监测和环境资源调查任务,因此工程地球物理勘探应时而生。

以工程地球物理手段来解决工程浅地表地质问题是近年来地球物理学发展的一个新的前沿领域。20世纪80年代以来,为满足我国大规模经济建设和国土整治的迫切需要,工程地球物理获得了迅速发展,先后引进和开发了一系列用于工程地球物理地质调查的新方法、新技术,研制了一批先进设备,开发了软件,培训了人才。到目前为止,无论是项目的地质效果,还是方法技术水平的提高,工程地球物理都发展到了一个新阶段。此外,工程地球物理作为一种重要的测试和监测手段,也得到了工程界的普遍关注。在这些领域,相当一部分物探分支方法已经超出了经典的地球物理范围。就世界范围来说,由于城市化进程的加快,这种情况仍有不断扩大的趋势。可以说,正是这些不断被开拓的新领域给工程地球物理注入了强大的生命力。

然而,由于工程地球物理研究内容和应用领域的特殊性,它也始终面临着严峻的挑战。工程地球物理在工程勘察等领域的地位和作用,与目前能源和金属矿物探技术发展的水平相比还有一定的差距,缩小这一差距还需要付出相当大的努力。工程地球物理是一项针对性很强的应用技术,也是一门受多种因素制约的综合学科。从这个角度来看,它的发展既有很大难度,又颇具潜力。

工程地球物理勘探是进行地质调查的方法之一,由于它是以观测各种地球物理场的变化规律为基础的,因此当应用物探方法来解决各种地质问题时,它必须具有一定的地质及地球物理条件,这样才能取得满意的效果。工程与环境调查中也不例外。这些条件主要是:

(1) 探测对象与周围介质之间必须有较明显的物性差异。

(2) 探测对象必须具有一定的规模(即其大小相对于埋藏深度必须有相应的规模),能产生在地面上可观测的地球物理异常场。

(3) 各种干扰因素产生的干扰场相对于有效异常场必须足够小,或具有不同的特征,以便能进行异常的识别。

这些条件是物探工作能取得良好效果的前提。此外,在物探资料的解释中还存在多解性的问题,即对于同一异常场可得出不同的地质解释。这种情况往往是由于复杂的地质条件和地球物理场理论自身的局限所造成的。为了克服这种多解性的影响,应尽可能地利用多种地球物理方法的成果,尤其是已知的地质资料,进行综合分析解释,以便得到确切的地质结果。

尽管地球物理方法有许多应用的先决条件,但由于它具有工作效率高、成本低等特点,仍然是被各领域广泛应用的重要勘察手段之一。

工程地球物理方法主要可用来解决以下各方面的问题:

- (1) 浅地表结构及物性调查,测定浅地表速度大小、厚度及基岩层界面的起伏形态。
- (2) 探测断层、裂隙破碎带及地下溶洞等地质体的空间分布。
- (3) 岩石动弹性参数(杨氏模量、剪切模量、泊松比等)的测定及岩体的波速分类和稳定性评价。
- (4) 地基场地土的分层和评价。
- (5) 滑坡、陷落柱、洞穴等的探测以及各类路基、大坝等病害地基的勘察。
- (6) 灌浆质量和混凝土工程(如桩基质量)的检测评价。
- (7) 探测地下电缆、管道的分布及检查其有关腐蚀、渗漏等情况。
- (8) 地下水资源的勘察与评价。
- (9) 环境污染及有关地质灾害的监测等。

本书根据教学需要以及工程地球物理目前的研究和发展现状,对其基本原理、方法技术及应用效果等有关问题进行了介绍,并相应的列为六章。第一章介绍了以弹性波理论为基础的三类分支(折射波、反射波、瑞利波)方法及应用技术;第二章介绍了高密度电阻率法及应用;第三章介绍了脉冲时间域探地雷达的原理及应用;第四章介绍了地下管线探测技术;第五章介绍了激电找水技术;第六章概括地介绍了环境地质调查的内容以及综合地球物理方法在环境地质调查中的应用。

本书第一、第二、第四、第五、第六章由宋维琪编写,第三章由尹兵祥编写,朱卫星进行了文字校改及图件处理工作,最后由宋维琪统稿。本书的编写得到了中国石油大学(华东)地球资源与信息学院领导和地球物理系领导的关心和支持,在本书完成之际,作者向他们表示诚挚的谢意!

由于编者水平及工作经验所限,书中难免有不当及疏漏之处,敬请读者批评指正。

作者
2008年3月

目
录

第一章 工程地震勘察的基本方法	1
第一节 折射波法	1
一、折射波的时距方程和理论时距曲线	1
二、折射波的现场工作方法	14
三、资料的整理与解释	22
第二节 反射波法	34
一、基本原理	34
二、反射波的现场施工方法	46
三、反射波的采集	50
四、数据处理	59
第三节 瑞利面波法	70
一、瑞利面波法的基本原理	71
二、瑞利波的传播及频散曲线	72
三、野外工作方法	80
四、瑞利面波法在工程勘察中的应用	83
参考文献	95
第二章 高密度电阻率法及其应用技术	96
第一节 引言	96
第二节 高密度电阻率法的基本原理及系统结构	97
一、基本原理	97
二、系统结构	100
第三节 野外工作方法技术	101
一、高密度电阻率法的野外工作	101
二、高密度电阻率法的测量系统	102
第四节 高密度电阻率法的资料处理及正演模拟	104
一、资料处理	104
二、正演模拟	107
第五节 高密度电阻率资料的反演	109
一、佐迪(Zohdy)方法简介	109

二、高密度电阻率资料的层析成像	110
第六节 高密度电阻率法在工程与环境地质调查中的应用	113
一、在山西平定某采空区探测中的应用	113
二、在地裂缝探测中的应用	114
三、在松花江斜拉吊桥桥墩选址中的应用	115
四、在回填土地地撵测中的应用	116
参考文献	117
第三章 脉冲时间域探地雷达	118
第一节 探地雷达方法的基本原理	118
一、相关的电磁场理论	118
二、电磁波的传播特点	122
三、电磁波在两种不同介质界面上的特点	127
四、电磁波在多层介质中的传播	130
第二节 探地雷达资料的采集	133
一、探地雷达仪器介绍	133
二、测量方式	135
三、技术参数	137
四、勘察设计	145
第三节 探地雷达资料的处理与解释	150
一、数字滤波	150
二、反滤波(反褶积)	156
三、偏移归位	161
四、雷达图像的增强处理	166
五、探地雷达资料的地质解释	168
第四节 探地雷达方法的应用及实例	174
一、工程基础勘察	174
二、公路工程质量检测	178
三、地下管线探测	181
四、河湖堤坝隐患的探测	182
五、探地雷达在环境地质中的应用	184
参考文献	186
第四章 地下管线探测技术	187
第一节 探测地下金属管线的基本原理	187
一、电磁法探测地下金属管线的基本原理	187
二、施加信号的方式	188
第二节 接收信号的方式及定位定深方法	189
第三节 地下存在两条相互平行无限长载流管线时的定位方法	192
一、三类观测系统定位定深原则与误差估计	193
二、两条平行管线中电流各不相同时的电磁感应	194
三、两条管线间距一定但埋深不同、电流也不同时的电磁感应	195

第四节 仪器设备简介及应用实例·····	196
一、仪器设备简介·····	196
二、应用实例·····	196
第五节 非金属管道探测方法概述·····	197
一、示踪电磁法·····	197
二、预埋检测带法·····	198
参考文献·····	199
第五章 激电法找水·····	200
第一节 含水岩石的激发极化现象及数学模型·····	200
第二节 激电法找水所利用的主要参数·····	201
一、表征岩石激发极化强弱的参数·····	202
二、表征岩石激发极化放电快慢的参数·····	202
三、综合参数·····	203
四、其他参数·····	203
第三节 含水岩石的激电性与各种影响因素的关系·····	204
一、湿度·····	204
二、颗粒度·····	204
三、孔隙液浓度·····	205
四、黏土含量·····	205
第四节 等比装置激电测深及异常解释·····	206
一、有限大小含水体·····	207
二、平含水层·····	208
第五节 激电法找水的实际应用效果·····	209
一、以 η_s , J_s 和 D_s 为主要参数的找水效果·····	209
二、以 S_t 和 η_s 为主要参数的找水效果·····	210
三、偏离度参数(r_s)的找水效果·····	211
参考文献·····	212
第六章 环境地质调查中的地球物理方法·····	213
第一节 环境地质调查的内容·····	213
一、环境地质调查的主要范畴·····	213
二、我国当前环境地质调查的主要内容·····	214
三、环境地质调查的特点·····	215
第二节 地球物理方法在环境地质调查中的应用基础·····	216
一、环境地质调查的地球物理基础·····	216
二、地球物理方法在环境地质调查中应用的有效性·····	218
第三节 环境地质调查中地球物理方法的应用·····	220
一、大环境地质调查·····	220
二、现代环境地质变迁的调查·····	225
参考文献·····	231

第一章 工程地震勘察的基本方法

人工震源(如机械敲击)激发所产生的地震波(如纵波、横波、面波等)在地下介质中传播时,由于不同类型的岩石往往具有不同的弹性特征(如速度、密度等),地震波通过这些岩石的分界面时将产生反射波和折射波。不同类型的波具有不同的传播速度、路径、频率和强度,用仪器可以记录各种波的传播时间和波形特征。研究和分析这些波的传播时间和波形特征的变化规律,可以推断出与岩石的性质、结构和几何位置等有关的参数,从而达到工程勘察的目的。本章将讲述工程勘察中的三种基本方法:折射波法、反射波法及面波中的瑞利面波法。

第一节 折射波法

折射波法地震勘探利用人工激发的地震波在地下介质中传播。当穿过波速不同的介质的分界面时,波改变原来的传播方向而产生折射。当下层介质的波速大于其上层介质的波速时,在波的人射角等于临界角的情况下,折射波将会沿着分界面以下层介质中的速度“滑行”。这种沿着界面传播的“滑行”波也将引起界面上层质点的振动,并以折射波的形式传至地面。通过地震仪测量折射波到达地面观测点的时间和震源距,就可以求出折射界面的埋藏深度。

折射波法是浅层地震勘探中一种重要的工程勘察方法,常用来探测覆盖层(或低速层)的厚度、基岩起伏、断层和古河道的分布等水文工程地质问题。

一、折射波的时距方程和理论时距曲线

(一) 直达波的时距方程和理论时距曲线

直达波是一种从震源出发,不经过反射和折射而直接到达地面各个接收点的地震波。假设地下为均匀介质,波在其中的传播速度为 v 。如图 1-1 所示,通过震源点 O 布置测线,在测线上的各点 D_1, D_2, D_3 安放检波器,接收并记录地震信号。可以看出,地震波从 O 点出发,沿测线 x 传播到任意点的旅行时间 t 为:

$$t = \frac{x}{v} \quad (1-1)$$

上式为直达波的时距曲线方程。从上式可看出直达波的时距曲线是一个直线方程,其图形为两条通过原点并且对称于 t 轴的直线,如图 1-1 所示。直达波时距曲线的斜率的倒数就是地表覆盖层的波速度。

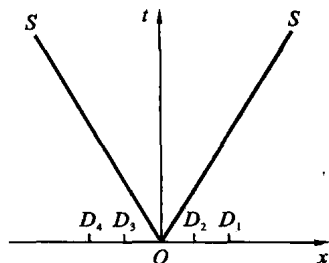


图 1-1 直达波时距曲线

(二) 水平层状介质中传播的折射波的时距方程和理论时距曲线

1. 二层结构

假设地面以下深度为 h 处有一个水平的速度分界面 R ,其上、下层的波速度分别为 v_1 和

v_2 , 且 $v_1 < v_2$, 如图 1-2 所示。从激发点 O 至测线上某一接收点 D 的距离为 x , 折射波射线旅行的路程为 OK, KE, ED 之和, 它的旅行时间为 t 为:

$$t = \frac{OK}{v_1} + \frac{KE}{v_2} + \frac{ED}{v_1} \quad (1-2)$$

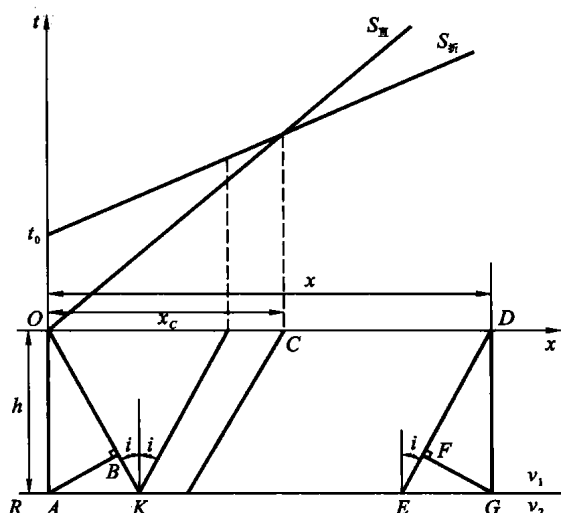


图 1-2 水平二层结构折射波时距曲线

为了证明方便,先由点 O 和 D 分别作界面 R 的垂线,则 $OA=DG=h$;再自点 A 和 G 分别作 OK, ED 的垂线,则几何上不难证明 $\angle BAK = \angle FGE = i$ 。已知 $\sin i = v_1/v_2$, 于是有:

$$\frac{BK}{AK} = \frac{EF}{EG} = \frac{v_1}{v_2}$$

即

$$\frac{BK}{v_1} = \frac{AK}{v_2}$$

$$\frac{EF}{v_1} = \frac{EG}{v_2}$$

上式表明,波以速度 v_1 旅行 BK (或 EF)路程与波以速度 v_2 旅行 AK (或 EG)路程所需的时间是相等的。于是,式(1-2)可以等效置换为:

$$t = \frac{OB}{v_1} + \frac{AG}{v_2} + \frac{DF}{v_1} \quad (1-3)$$

因为 $OB=DF=h \cos i, AG=x$, 所以有:

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2h \cos i}{v_1} = \frac{x}{v_2} + 2h \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_2 v_1} \quad (1-4)$$

这就是水平二层结构的时距方程。由式(1-4)可知,水平二层结构的时距曲线也是一条直线,如图 1-2 所示。这条直线的斜率为 $1/v_2$ 。当 x 等于 0 时,折射波的延长线与 t 轴相交处为 t_0 ,则截距时间 t_0 为:

$$t_0 = \frac{2h \cos i}{v_1} = 2h \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_2 v_1} \quad (1-5)$$

则有:

$$h = \frac{t_0 v_1}{2 \cos i} = \frac{t_0}{2} \frac{v_2 v_1}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (1-6)$$

由此可见,我们可以利用直达波和折射波的时距曲线得出 v_1, v_2 和截距时间 t_0 ,再按式(1-6)计算出激发点下界面的埋藏深度 h 。

2. 三层结构

如图 1-3 所示, $v_1 < v_2 < v_3$, 图中 $OABEFD$ 是在界面 R_2 上产生的折射波的射线路程。

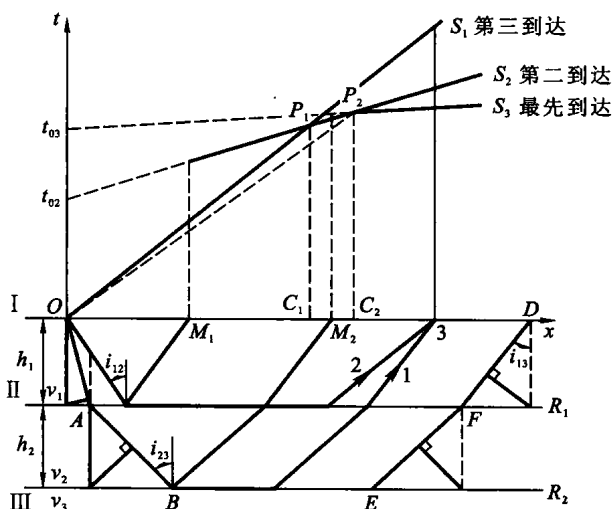


图 1-3 水平三层结构折射波时距曲线

在点 B 产生折射波,则入射角必须满足 R_2 的临界角, $i_{23} = \arcsin(v_2/v_3)$ 。根据斯奈尔定律, $i_{13} = \arcsin(v_1/v_3)$,那么,用与二层结构相同的等效置换方法可以导出三层结构的时距方程为:

$$t = \frac{x}{v_3} + 2h_1 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_3 v_1} + 2h_2 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_3 v_1} \quad (1-7)$$

显然上式为一直线方程,斜率为 $1/v_3$,它延伸至 t 轴的截距时间为 t_{03} :

$$t_{03} = 2h_1 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_3 v_1} + 2h_2 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_3 v_1} \quad (1-8)$$

则有:

$$h = \frac{1}{2} \left(t_{03} - 2h_1 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_3 v_1} \right) \frac{v_3 v_2}{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \quad (1-9)$$

式中, h_1 可以从图中的 S_1, S_2 和式(1-6)计算出来。界面 R_2 的埋深等于 h_1 和 h_2 的和。

从图 1-2 中可以看出,在直达波与折射波曲线相交的点 C 至激发点 O 范围 ($OC = x_c$) 内,检波器最先接收到的是沿地表以 v_1 速度传播的直达波。在点 C 以外,由于折射波在界面上是以 v_2 速度传播的,并且 $v_2 > v_1$,所以折射波会比直达波先到达接收点,然后直达波才陆续到达。我们把将最先到达接收点的波称为初至波。在某区段内,某一界面的折射波总是以初至波的形式最先到达,因此将该区段称为该折射波的初至区,并将 OC 段距离称为该界面折射波的临界距离。在初至波到达之后,陆续到达接收点的波统称为续至波,其相应的区段称为该波的续至区。

如图 1-3 所示, OC 为直达波的初至区,也就是 R_1 界面折射波的临界距离。在 C_1, C_2 范围内, R_1 界面的折射波取代直达波而成为初至波,这一区间是其初至区。直达波从 C_1 点起进入续至区转化为续至波,而在 C_2 点以远, R_2 界面的折射波先到达地面,表现为初至波,该区域为其初至区, OC_2 就是它的临界距离。 R_1 界面的折射波从 C_2 点起也进入续至区。因为在记录上只有初至波是在平静的背景上出现的,所以能够准确、清楚地判断波的初至时刻。在进

行折射波法工作的时候,检波器应当设置在与勘探目的层相对应的初至区内,以提高工作质量。在布置工作时,应当先对该区做一些实验工作,以确定勘探目的层的最佳接收地段。也就是说,要先了解目的层的初至区处在离激发点多远的范围内,以便把检波器埋置在它的初至区之内。

在图 1-2 中, C 点的距离 x_C 可以用式(1-1)和(1-4)联立求解得出:

$$x_C = 2h \sqrt{(v_2 + v_1)/(v_2 - v_1)} \quad (1-10)$$

在实际工作中,通过实测的时距曲线有时能够比较清楚地判定 x_C 的坐标距离,则激发点下的界面深度 h 也可以用下式求出:

$$h = x_C \sqrt{(v_2 - v_1)/(v_2 + v_1)}/2 \quad (1-11)$$

3. 多层结构

多层结构的情况是向深处各层速度递增,即 $v_n > v_{n-1} > \dots > v_2 > v_1$, 由此产生 $n-1$ 个折射界面。第 n 层界面上的折射时距曲线方程可以由三层结构类推得到,其通式如下:

$$t = \frac{x}{v_n} + 2h_1 \frac{\sqrt{v_n^2 - v_1^2}}{v_n v_1} + 2h_2 \frac{\sqrt{v_n^2 - v_2^2}}{v_n v_2} + \dots + 2h_{n-1} \frac{\sqrt{v_n^2 - v_{n-1}^2}}{v_n v_{n-1}} \quad (1-12)$$

图 1-4 中绘出了五层结构的时距曲线。从图中可以看出:随着界面的依次加深,界面上的波速也随之逐渐增大;由于时距曲线的斜率是各层波速的倒数,所以各层时距曲线的斜率也不同,并且互相交叉。速度越大,斜率越小,并且在离激发点适当的位置通常能以初至波的形式出现。界面越深,它的临界距离越长,初至区越远。由此可知,如果要追踪深层界面的折射波,就要在离激发点更远的位置进行观测。

(三) 倾斜界面的折射波的时距方程和理论时距曲线

1. 倾斜单界面

如图 1-5 所示,设 $v_2 > v_1$, 界面 R 的倾角为 ϕ , 在 O_1 点激发,在测线下倾方向距离为 x 处的 O_2 点接收, O_1 和 O_2 处界面的法线深度分别为 h_1 和 h_2 。折射波的射线路径为 $O_1 A B O_2$, 其折射波的旅行时间 t_F 为:

$$t_F = \frac{EF}{v_2} + \frac{h_1 \cos i}{v_1} + \frac{h_2 \cos i}{v_1} \quad (1-13)$$

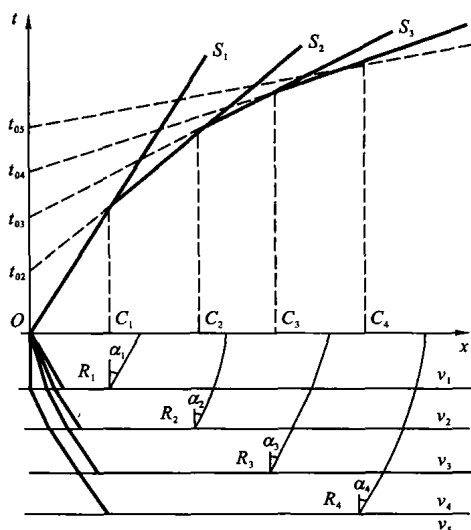


图 1-4 水平多层结构折射波时距曲线

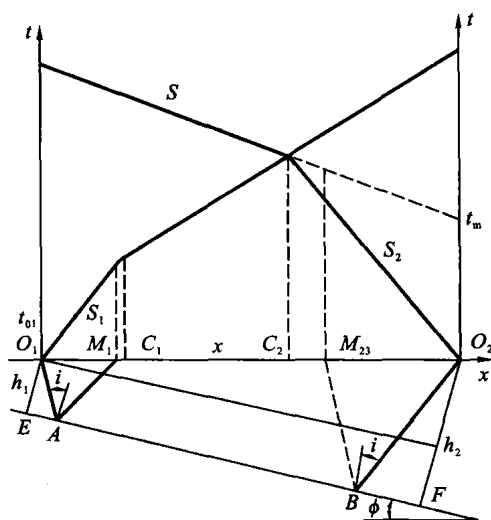


图 1-5 倾斜界面上的时距曲线

由图可知 $EF = x \cos \phi$, $h_2 = h_1 + x \sin \phi$, $v_2 = v_1 / \sin i$, 则有:

$$\begin{aligned} t_F &= \frac{x \cos \phi \sin i}{v_1} + \frac{2h_1 \cos i}{v_1} + \frac{x \sin \phi \cos i}{v_1} \\ &= \frac{x \sin (i + \phi)}{v_1} + \frac{2h_1 \cos i}{v_1} \end{aligned} \quad (1-14)$$

同样, 在 O_2 点激发, 波到达测线上倾方向某点的时间 t_L 为:

$$t_L = \frac{x \sin (i - \phi)}{v_1} + \frac{2h_2 \cos i}{v_1} \quad (1-15)$$

从式(1-14)和(1-15)以及图 1-5 可以看出:

(1) 在倾斜平界面的情况下, 时距曲线仍然为直线, 但它的斜率的倒数并不等于第 2 层的波速。将这个斜率的倒数用 $v^* = \Delta x / \Delta t$ 来表示, 其含义为单位时间内“波沿测线路程旅行的速度”, 并将其称为视速度。在上、下倾观测时所得到的两条时距曲线的斜率不等, 下倾的较陡, 上倾的较缓。也就是说, 下倾接收的视速度 v_F^* 较小, 上倾接收的视速度 v_L^* 较大。

(2) 在界面上升端激发、下倾方向接收时, 折射波的临界距离 $O_1 C_1$ 或盲区 $O_1 M_1$ 都较小, 时距曲线的截距时间 t_{01} 也较小; 反之, 临界距离 $O_1 C_2$ 或盲区 $O_2 M_2$ 就大些, 截距时间 t_{02} 也较大。可见, 可以利用 t_0 截距时和临界距离的大小判别界面的倾向, 并且可以用截距时计算出激发点下界面的法线深度 h_1 和 h_2 。当然, 在野外布置测线工作时也应注意: 当测线两端临界距离不等时, 要适当调节激发点与检波器之间的距离。

(3) 当 $i + \phi \geq 90^\circ$ 时, 若在下倾方向接收, 折射波将无法返回地面, 因为这时盲区无限大, 而在上倾方向接收则入射角总是小于临界角, 无法形成折射波。野外工作中遇到这种情况时, 应当改变测线的方向, 使界面视倾角与临界角之和小于 90° , 这样就可以观测到折射波。

(4) 若在上倾方向接收, 当 $i > \phi$ 时, v^* 为正; 当 $i = \phi$ 时, v^* 趋向于 ∞ , 即时距曲线是水平状, 其斜率为零; 当 $i < \phi$ 时, v^* 为负, 也就是时距曲线倒转, 这意味着折射波先到达离激发点较远的接收点, 而较近处折射波反而到达得较晚。

(5) 视速度是沿测线观测到的波的传播速度, 即 $v^* = \Delta x / \Delta t$ 。实际上, 在 Δt 时间内波传播了 Δl 的路程, 即波的真实速度 $v = \Delta l / \Delta t$, 则有:

$$v^* / v = \frac{\Delta x / \Delta t}{\Delta l / \Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta l}$$

假定 α 为波前面与地面之间的夹角, e 为射线与地面之间的夹角, 则有:

$$v^* = \frac{v}{\sin \alpha}$$

或

$$v^* = \frac{v}{\sin e} \quad (1-16)$$

上式表明了视速度与真速度之间的关系, 称为视速度定理。由此可知: 当 e 由 0° 变为 90° 时, 视速度 v^* 的值由真速度变为无限大; 当 e 大于 90° (射线方向与 x 轴的方向相反) 时, 视速度 v^* 为负值, 但 v^* 的绝对值不可能小于真速度值。

根据定义, 视速度与时距曲线互为倒数关系。视速度可以通过时距曲线确定, 但如果时距曲线不是直线而是曲线, 则视速度沿着速度测线是不断变化的。因此, 所谓某点的视速度, 是指时距曲线在该点的斜率的倒数。

(6) 界面倾角的计算。由式(1-14)和(1-15)可以得到:

$$v_{\text{下}}^* = \frac{v_1}{\sin(i + \phi)} \quad (1-17)$$

$$v_{\text{上}}^* = \frac{v_1}{\sin(i - \phi)} \quad (1-18)$$

求解以上两式可得:

$$i = \frac{\arcsin \frac{v_1}{v_{\text{上}}^*} + \arcsin \frac{v_1}{v_{\text{下}}^*}}{2} \quad (1-19)$$

$$\phi = \frac{\arcsin \frac{v_1}{v_{\text{下}}^*} - \arcsin \frac{v_1}{v_{\text{上}}^*}}{2} \quad (1-20)$$

式中, $\frac{v_1}{v_{\text{上}}^*}$ 和 $\frac{v_1}{v_{\text{下}}^*}$ 可以通过时距曲线求出。

2. 多层倾斜结构

多层倾斜结构的时距方程可以根据类似的几何关系逐层推导出来。设 x 为接收点到激发点的距离, v_k 为各层的速度, h_k 为相应各层的垂直厚度, i_k 为波在各层界面的入射角, ϕ_k 为各层界面的倾角, 则任意层倾斜界面(见图 1-6)的时距方程可以表示为:

$$t_{\text{下}} = \frac{x}{v_1} \sin(i_{n-1} + \phi_{n-1}) + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{h_k}{v_k} [\cos(i_k + \phi_k) + \cos(i_k - \phi_k)] \quad (1-21)$$

$$t_{\text{上}} = \frac{x}{v_1} \sin(i_{n-1} - \phi_{n-1}) + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{h_k}{v_k} [\cos(i_k + \phi_k) + \cos(i_k - \phi_k)] \quad (1-22)$$

根据上述方程可以计算出各界面相应的折射波时距曲线。

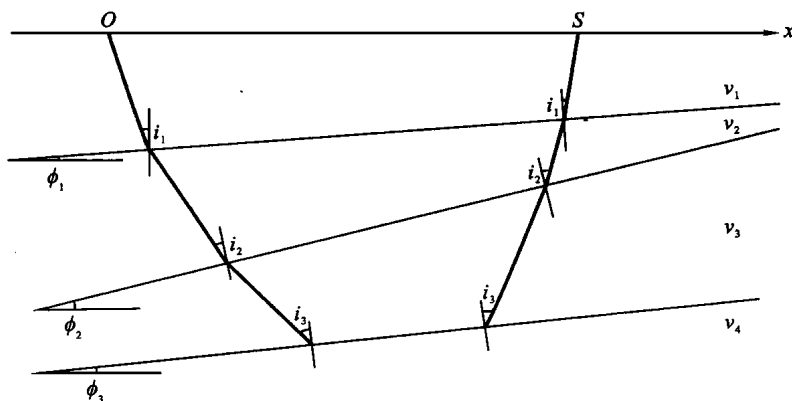


图 1-6 倾斜层结构折射波时距曲线

(四) 界面的时距曲线

1. 层状介质中的情况

(1) 层状介质中的隐伏层。

隐伏层是指在地面上观测不到其界面所产生的折射波的岩层。根据前面的讨论可知, 只有当下部岩层的波速大于上覆岩层的波速时才有可能产生能够返回地面的折射波, 但实际情况并非都符合这种条件。如果出现低速夹层, 或者下部岩层的速度是正常递增的, 但其中某层的厚度较小, 那么该层所产生的折射波就不可能出现在初至区, 用初至折射波法勘探时不能测得该层的存在, 因此称该层为“隐伏层”。

水平三层时距曲线如图 1-7 所示。平层状介质中的低速层三层介质各个界面的时距曲线

的方程为：

$$T_1 = \frac{x}{v_1}$$

$$T_2 = \frac{x}{v_2} + \frac{2h_1}{v_2 v_1} \sqrt{v_2^2 - v_1^2}$$

$$T_3 = \frac{x}{v_3} + \frac{2h_2}{v_3 v_2} \sqrt{v_3^2 - v_2^2} + \frac{2h_1}{v_3 v_1} \sqrt{v_3^2 - v_1^2}$$

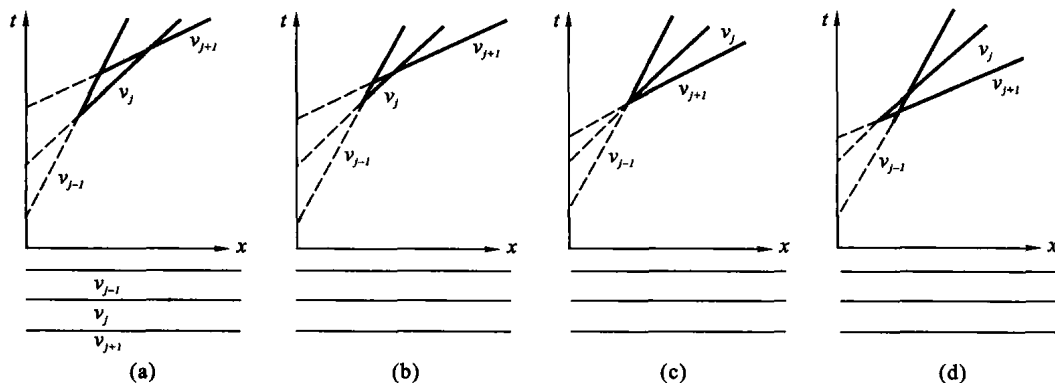


图 1-7 水平三层时距曲线示意图

在正常情况下，三层介质各层的速度分布满足 $v_1 < v_2 < v_3$ 的关系，并且各层有一定的厚度，这时从初至波的地震记录中能够得到反映各个界面的折射波时距曲线，从而求得 v_1/v_2 界面和 v_2/v_3 界面的埋深。通常用 t_0 法求得的界面埋深公式为：

v_1/v_2 界面：

$$h_1 = \frac{t_{01} v_1 v_3}{2 \sqrt{v_3^2 - v_1^2}} \quad (1-23)$$

v_2/v_3 界面：

$$h_{1,2} = \left[\frac{t_{02}}{2} + h_1 \left(\frac{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}}{v_3 v_2} - \frac{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_3 v_1} \right) \right] \frac{v_3 v_2}{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \quad (1-24)$$

然而，如果存在 $v_1 > v_2, v_3 > v_2$ 并且 $v_1 < v_3$ 的速度剖面，根据斯奈尔定律可知，在 v_1/v_2 界面上不可能产生返回地面的折射波，从折射波的地震记录中不能发现 v_2 低速层的存在，单纯从时距曲线看只相当于两层介质，这就是存在低速层的异常情况。这时如果没有钻孔或波速测井等其他相应的资料来检验及核对，就很容易将三层介质当作两层介质来处理，从而将根据时距曲线求得的 v_3 当作 v_2 （因为不存在 v_2 的时距曲线），将 t_{02} 当作 t_{01} ，并代入两层介质的公式来计算界面的深度。这样计算的结果和实际的 v_2/v_3 界面深度之间有很大的误差。从一些计算实例来看，低速层 v_2 的速度愈小或者其厚度 h_2 愈大，产生的误差愈大，有时所产生的相对误差在 50% 以上。因此，在有低速层的地区进行折射波法地震勘探时，应该有钻孔资料、地震波速测井以及其他的地球物理资料相配合才能进行解释，否则无法得出正确的结论。

另外，在有条件的地区，或者在低速层的埋深不大的情况下，可将激发点移至低速层内进行激发，这样可以从钻孔中直接得到第 1 层的厚度 h_1 ，在时距曲线上求出 v_1, v_3 和 t_{02} ，再根据井口时间“ t^* ”算出低速层速度 v_2 的值。

$$v_2 = \frac{z - h_1}{t^* - h_1/v_1} \quad (1-25)$$

式中， z 为激发点的深度。

将计算出的 v_2 和求出的 v_1, v_3, h_1 和 t_{02} 代入式(1-24), 就可以正确地求出 v_2/v_3 界面的深度。

中间夹有低速层的四层介质的情况比三层介质要复杂一些。因为按照大小不同的 4 种速度(v_1, v_2, v_3, v_4)来排列, 可以有 24 种不同的排列组合关系。对折射波法来说, 只有满足 $v_1 < v_2 < v_3 < v_4$ 的排列, 并且各层有一定的厚度, 这样的四层介质的剖面才是正常的, 才能够从初至波的地震记录上得到反映四层介质的时距曲线, 而其他的排列关系都不可能得到正常的四层剖面的时距曲线。其他的排列均存在“异常”情况。这些“异常”情况的存在使得四层地震剖面在地震记录上有时呈现三层或两层的假象, 严重地影响了折射波法资料的分析 and 利用。因此, 与三层介质中夹有低速层的情况类似, 若要得出正确的解释, 必须要有钻孔资料和物探资料的配合, 或者将激发点放在低速层内进行激发等。

五层介质或更多层介质中夹有低速层的问题大体上也与上述讨论相似。只是层数愈多, 各层之间的排列组合关系愈复杂, 低速层出现的类型也愈多, 但其计算方法是一致的, 在此不再赘述。

(2) 水平层状介质中正常速度的薄层。

所谓正常速度的“薄层”, 是指各层速度的分布满足 $v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_i$ 的关系, 但其中某层的厚度 h_i 不大, 使得其所产生的折射波不能在初至区出现。下面以三层介质为例加以讨论。

设有三层理论模型参数为: $v_1 = 500$ m/s, $v_2 = 2v_1, v_3 = 5v_1, h_1 = 5$ m。对 0.5, 1, 2, 3, 5, 7.5, 10 m 的不同厚度计算其理论时距曲线, 从图 1-8 中可以看出, 尽管各层的速度满足了 $v_1 < v_2 < v_3$ 的正常关系, 但当第 2 层的厚度不够大($h_2 \leq h_1$) 时, 由 v_1/v_2 界面产生的折射波仍然不能以初至波的形式出现在地震记录上, 而只能在续至波中出现。因此, 从初至波时距曲线看也只是一种假两层的情况。这与低速层的影响相似, 同样不能单独地进行解释。对于这种情况, 除了要充分地 与钻孔以及其他的物探资料相配合之外, 还必须识别和利用续至波的记录。在有比较完整的续至波资料的基础上, 是有可能从中求出该“薄层”的速度并作进一步解释的。

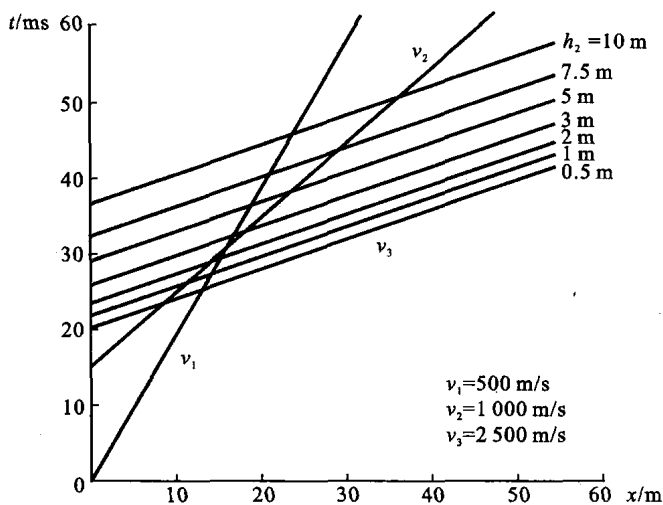


图 1-8 正常速度下的薄层

(3) 层状介质中的局部低速体。

在水平层状介质上进行折射波法地震勘探时, 如果发现时距曲线上有不正常的滞后段或

突然“脱节”的现象,很可能就是存在局部低速体(或不连续带)的一种标志。图 1-9 所示为一个存在低速透镜体的折射波时距曲线图,根据相遇时距曲线上“滞后”时间的异常范围可大致确定该透镜体沿测线分布的长度。另外,根据“滞后”时间 Δt 还可以近似估算出透镜体的中心厚度 H 。计算公式为:

$$H = \frac{\Delta t}{\frac{\sqrt{v_2^2 - v_3^2}}{v_3 v_2} - \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2}} \quad (1-26)$$

式中, Δt 为“滞后”时间的最大异常值; v_1 和 v_2 分别为第 1 层和第 2 层的速度值; v_3 为低速透镜体的速度值。

v_1 和 v_2 可直接从时距曲线上求出; v_3 在计算时往往可以先假定一个速度 ($v_3 < v_1$) 进行试算,然后再作修改,以求出近似的 H 值。

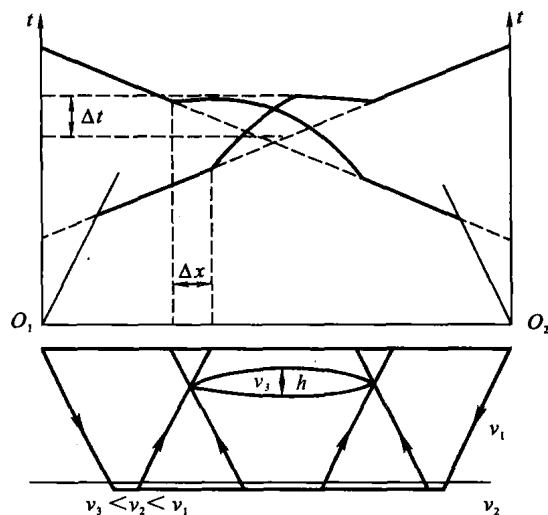


图 1-9 层状介质中的局部低速体

估计该透镜体埋深 D 的公式为:

$$D = \Delta x \frac{v_2^2 - v_1^2}{2v_1} \quad (1-27)$$

上式中的 Δx 可从相遇时距曲线上量出。

图 1-9 中所表示的是一个不完整的低速层对时距曲线产生的影响。折射波通过低速层时在时距曲线上突然出现“脱节”的现象,对于这种情况,可以根据“脱节”处异常的大小,用计算透镜体厚度的方法来估算低速层的厚度。

2. 直立界面的折射波时距曲线

设有直立的分界面 W 分隔速度为 v_2 和 v_3 的介质,它上面的水平覆盖层的厚度为 h ,波速为 v_1 (其中, $v_1 < v_2 < v_3$),如图 1-10 所示。当爆炸点位于 v_2 上边时,波从 O 点出发,入射到 v_1, v_2 之间的水平界面 R 时必定会产生沿界面滑行的折射波,其出射角 $i_{12} = \arcsin v_1/v_2$,即沿测线观察到的 P_{121} 。符号 P_{121} 表示纵波 P 从爆炸点经过波速为 v_1 的介质,再以 v_2 速度在界面上滑行,最后又出射回 v_1 介质。以下含义类同。视速度 $v^* = v_2$,接收段在 BC 之间,沿界面滑行至 A 点(垂直分界面 W 的位置)将会产生绕射波,但因能量比较微弱,而且是叠加在 P_{121} 的背景上,一般不能给出时距曲线。过 A 点在界面 R 上又转换成新的折射波,其出射角 $i_{13} = \arcsin v_1/v_3$,即 P_{1321} 视速度 $v^* = v_3$,接收段在 D 点以远。 P_{121} 与 P_{1321} 在 CD 段相互重叠交叉。