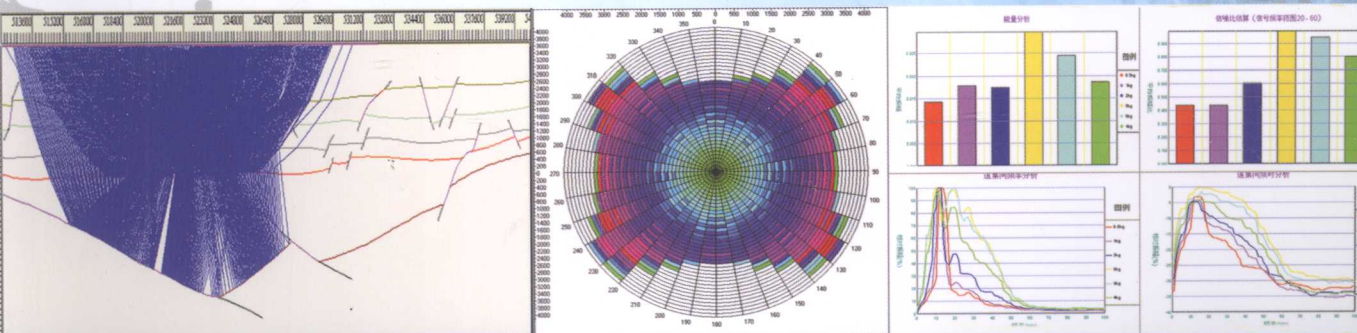


实用地震资料采集技术丛书

地震资料采集 理论与实践

主 编 刘杰烈
副主编 张国富 金昌赫等



石油工业出版社

实用地震资料采集技术丛书

地震资料采集理论与实践

主 编：刘杰烈

副主编：张国富 金昌赫等

石油工业出版社

内 容 提 要

地震资料采集是地震勘探的基础,是地震勘探非常重要的环节之一。本书简要叙述了地震勘探基本原理,介绍了地震采集中表层调查方法、试验方法与分析、地震波激发与接收、人工可控震源、SPS 整理、三分量地震资料采集、内业资料整理、三维地震勘探等勘探方法的原理及应用,并给出了报告编写格式与内容,选登了优秀采集论文等。

本书可以作为从事石油物探资料采集工作人员的培训教材和生产工作的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

地震资料采集理论与实践/刘杰烈等主编.

北京:石油工业出版社,2009.11

(实用地震资料采集技术丛书)

ISBN 978-7-5021-7475-0

I. 地…

II. 刘…

III. 地震勘探-数据采集

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 194744 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: [www. petropub. com. cn](http://www.petropub.com.cn)

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

排 版: 北京时代澄宇科技有限公司

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 18

字数: 432 千字 印数: 1—2000 册

定价: 71.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《地震资料采集理论与实践》

编 委 会

主 编：刘杰烈

副 主 编：张国富 金昌赫

委 员：傅朝奎 周志才 刘绍新 韩明森

司成林 綦蕴诚 关延学 李天树

孙玉群 苏德仁 杜贵锋 郝玉顺

徐克峰 李学军 李崇灿 李森贺

刘占杰 姜凯涛 王安运 付德华

高红宾 李 光 吴志成

前 言

地震勘探是油气勘探中使用最广泛的物探方法。随着现代科学技术的发展，地震勘探采集技术也在不断改进与完善。目前，地震勘探已由构造勘探转向岩性勘探，勘探目标也由平坦区域转向复杂地表区域，地震资料采集则由千道三维勘探转向几千道、上万道三维勘探，生产难度逐年加大。这就要求从事地震资料采集的工作人员加强地震资料采集理论知识的学习，勇于创新物探理论，并通过实践来提高自己的业务水平。而目前能满足我们需求的系统学习书籍短缺。针对这种实际情况，我们特请多年从事地震资料采集的专家，系统总结编写了这本培训书籍。有些章节，如韩明森编写的第十三章“地震资料采集质量控制”，基本上没有参考书籍可参阅，是他根据现行标准，结合本人多年工作的经验总结编写的。

参加本书编写的是：关延学、刘占杰负责第一章、第七章的编写工作，李天树负责第二章编写工作，孙玉群、付德华负责第三章编写工作，苏德仁负责第四章编写工作，杜贵锋负责第五章编写工作，郝玉顺负责第六章编写工作，徐克峰负责第八章编写工作，李学军负责第九章编写工作，李森贺负责第十章编写工作，李崇灿负责第十一章编写工作，刘绍新负责第十二章编写工作，韩明森负责第十三章编写工作，张国富负责第十四章编写工作，傅朝奎、周志才负责第十五章编写工作，全书由李光负责统编、封面设计，并进行统一校对工作。

本书凝聚了编写人员的心血，内容丰富，实践性强。文中详述了地震采集技术人员在地震生产中应掌握和了解的各方面知识，既有知识理论，又有实践经验，因此命名为《地震资料采集理论与实践》。适用于施工员及其他从事物探工作的从业者。

限于编者水平，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 4 月

目 录

第一章 地震勘探基本原理	(1)
一、地震波基本原理简介	(1)
二、地震波传播的运动学特征	(2)
三、地震波传播的动力学特征	(6)
四、地震波入射到分界面上的传播规律	(10)
五、地震波的分类	(12)
六、地震勘探中常用的地下介质模型	(14)
第二章 表层调查	(17)
一、近地表低速层 (LVL) 与静校正的基本概念	(17)
二、表层调查方法	(20)
三、小折射法	(23)
四、表层模型建立	(26)
五、静校正方法	(27)
第三章 试验方法与分析	(28)
一、试验点、线的选择	(28)
二、试验方法和流程	(30)
三、试验资料对比分析方法	(30)
四、试验结论	(39)
第四章 井深设计方法	(40)
一、激发井深设计的意义	(40)
二、表层资料的综合分析与应用	(40)
三、激发井深设计的原理及具体方法	(43)
四、用软件进行井深设计的优点	(43)
五、典型实例	(45)
第五章 地震波接收	(49)
一、有效波和干扰波	(49)
二、检波器组合	(51)
三、检波器埋置	(53)
四、地震检波器的主要参数及工作原理	(54)

五、地震检波器的发展方向	(57)
六、地震波的接收对地震仪器的要求	(58)
第六章 地震波激发	(59)
一、地震波激发要求	(59)
二、地震勘探震源的种类	(59)
三、陆上用炸药震源	(59)
四、松辽盆地的激发技术	(63)
五、地震施工对激发的要求	(65)
第七章 人工可控震源	(67)
一、可控震源工作原理	(67)
二、可控震源参数设计	(68)
三、关于震源扫描方式	(73)
四、关于震源激发方式	(73)
五、可控震源在大庆探区的应用	(75)
第八章 三维地震观测系统设计	(76)
一、三维观测系统设计原则	(76)
二、三维观测系统有关术语的定义	(76)
三、三维观测系统类型	(77)
四、三维地震观测系统参数的选取	(80)
第九章 特观设计方法	(88)
一、特观设计的重要性	(88)
二、偏移特观设计理论基础	(88)
三、特观设计的工作过程	(94)
四、特观设计的几种方法及实例	(96)
第十章 SPS 简介	(108)
一、必填头块记录	(108)
二、地震仪器头块记录	(110)
三、接收器头块记录	(112)
四、震源头块记录	(113)
五、质量控制头块记录包括以下内容	(114)
六、需要注意的问题	(116)
七、SPS 二维和三维实例	(116)
第十一章 近地表沉积研究	(134)
一、地貌—第四纪沉积系统	(135)

二、第四纪沉积物的相分析	(135)
三、常见地貌及沉积结构	(138)
四、近地表沉积的研究方法及内容	(148)
第十二章 三分量地震采集方法	(154)
一、概述	(154)
二、三分量地震采集观测系统设计方法	(155)
三、三分量地震采集激发因素设计方法	(164)
四、三分量地震采集接收方法	(169)
五、三分量表层结构调查方法	(174)
六、三分量勘探前景	(180)
第十三章 地震资料采集过程质量管理	(181)
一、施工准备	(181)
二、施工作业	(192)
三、竣工验收	(208)
附录一 试验点、线施工方法请示有关要求	(211)
附录二 报告编写内容与格式	(213)
一、技术设计编写内容	(213)
二、施工设计编写内容	(219)
三、采集报告编写内容	(224)
附录三 优秀采集论文精选	(238)
地震资料采集噪音形成机理分析及压制方法	(238)
复杂地表条件下地震采集技术在大庆探区的应用	(246)
微测井记录的波形信息在激发井深设计中的应用	(254)
地震延迟叠加激发的药距选择问题	(260)
参考文献	(268)

第一章 地震勘探基本原理

在石油勘探史上，地震勘探对油气田的发现和油气储量的增长起到了举足轻重的作用。与其他勘探方法相比，是一种较为优越的勘探方法和手段。其较低的投入、较高的回报，为广大地质学家和投资者所重视。

地震勘探作为一门边缘性的应用学科，是随着相关学科技术水平的提高而不断发展的。特别是20世纪80年代以来，计算机技术发展突飞猛进，硬件愈趋小型化，计算速度成几何级数增长，各类先进的系统软件和应用软件不断发展和完善；多道数字仪、无线遥测技术、海底电缆接收系统等相继得到开发与应用；在勘探方法上实现了从二维多次覆盖向三维、四维地震勘探等技术的迈进……凡此种种，均带动了地震勘探技术的进步，使地震勘探不但能研究地下构造形态，而且可以对岩性变化和流体性质进行研究；使地震勘探不但能为地质勘探服务，而且可为油田开发服务。

地震勘探由采集、处理和解释三个环节组成，它们相对独立又互相衔接，上一个环节的工作对下一个环节的成果起着关联作用。特别是野外采集投入大、成本高，施工又是一次性完成的，如果发生问题，没有及时发现，很难再有补救的机会，因此采集阶段的工作显得格外重要。

一、地震波基本原理简介

所谓地震勘探，就是通过人工方法激发地震波，研究地震波在地层中的传播情况，以查明地下地质构造和岩性特征，为寻找油气田服务的一种勘探方法。地震波勘探有一套完整、系统的理论，理论推导非常复杂，本教材既不叙述原理的来龙去脉，也不作公式的数学推导。只作简单的概念性介绍。

地震波的形成：弹性理论揭示，波实质上是弹性振动在弹性介质中的传播过程。在地震勘探中，即是在震源瞬间激发产生的冲击力作用下，岩石质点产生弹性振动，这种弹性振动在地下岩层中由近及远传播开去，就形成地震波。

由此可见，地震波的形成必须具备两个条件：首先，要有震源，这是产生冲击力和振动能量的来源；第二，存在能够传播弹性振动的弹性介质。

陆上地震勘探一般采用炸药震源。在地下钻一口井，将炸药包置于井中，然后激发爆炸，在爆炸产生的强大冲击力作用下，地下岩层形成了3个形变区（图1-1）。

1. 破坏圈

炸药爆炸瞬间产生的高温高压气体，对药包周围的岩石形成一股巨大的冲击力，由于冲击造成的压力大大超过了岩石的极限强度，所以岩石被压碎破坏，造成一个空腔和一个破碎

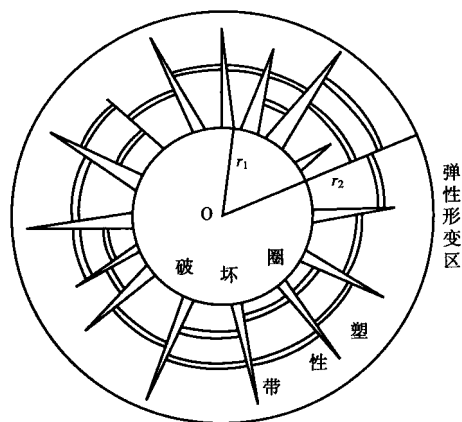


图 1-1 爆炸冲击力作用下的岩层形变

区，它们合称为破坏圈。有相当一部分爆炸能量在这一过程中被消耗掉。

2. 塑性带

随着离开震源距离的增加，爆炸能量迅速减小，于是对岩石的压力也随之减小，但还是超过岩石的弹性限度，因此，此时岩石虽不遭破碎，但发生塑性形变，形成一些辐射状或环状裂隙，称为塑性带。

3. 弹性形变区

过了塑性带后，爆炸能量已经衰减得很小，对岩石的压力也变得很小，同时爆炸的延续时间非常短，只有几百微秒，所以在这个区内的岩石已处于弹性限度内，可以看成理想弹性体，称为弹性形变区。

在弹性形变区内，岩石质点未受外力作用时，它们都处于各自的平衡位置，相对静止。当某个岩石质点受到一个瞬间的外力作用后，这个质点就要离开平衡位置发生位移，于是弹性介质在该点附近产生形变，同时产生了相应的应力。外力消失后，由于应力的作用，使质点向它的平衡位置运动以恢复形变，但是由于惯性的作用，质点不能立刻停止在平衡位置上，进而向相反的方向运动再次产生形变，同时又产生了与形变相对抗的应力。这样继续下去就形成岩石质点在平衡位置附近的弹性振动，直到它的能量消耗完为止。由于岩石质点之间存在弹性联系，所以某个质点产生的振动必然会引起周围相邻质点的振动，相邻质点的振动又引起更远一些质点的振动，这样弹性振动就在岩层中由近及远传播开去，形成地震波。

二、地震波传播的运动学特征

地震波的传播特征主要包括：波前（惠更斯原理）、射线（费马原理）、时距曲线、速度、波形、振幅、能量和频谱。前 4 项为地震波的运动学特征，是几何地震学理论的核心；后 4 项为地震波的动力学特征，是物理地震学研究的重点。

地震波运动学研究的内容是地震波在地层中传播的空间几何位置与传播时间的关系，它与几何光学相似，也是引用波前、射线、时距曲线等几何图形来描述波的运动过程和规律，因此又叫几何地震学。

1. 波前与波前原理

假设地下岩石为均匀介质。所谓均匀介质是指地震波在其中的传播速度等于常数的介质。

在地表“O”点爆炸后，地震波就开始从震源“O”处向各个方向传播开去。如果把某一时刻（ t_1 ）介质中所有刚开始振动的点连成曲面，这个面就叫做 t_1 时刻的波前。而由 t_1 时刻介质中所有刚停止振动的点连成曲面，叫做 t_1 时刻的波尾。波前与波尾之间的介质质点，此时正在振动，所以这个区间叫做振动带（图 1-2）。

惠更斯原理指出的是波前向前传播的规律，波前上的每一个点都可以看成是一个新的点

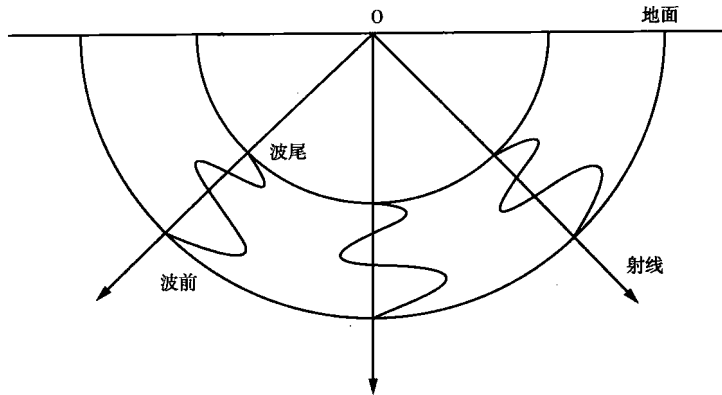


图 1-2 波前、波尾与射线

震源，叫做子波源；子波源发出的子波以原速度传播，所有子波波前形成的包络面就是新的波前。

根据这个原理，可以由已知时刻的波前，用作图法求出后来时刻的波前。图 1-3 就是在均匀介质中求取球面波和平面波前的作图方法。

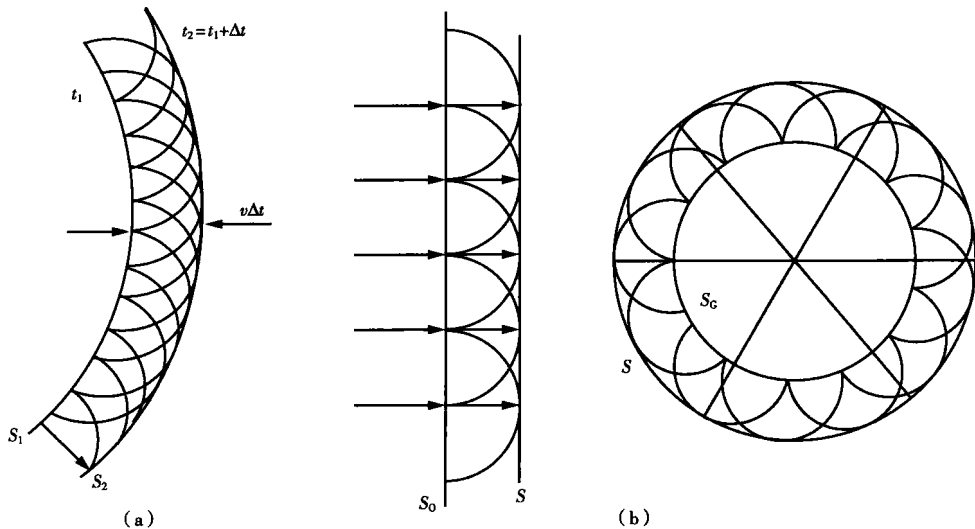


图 1-3 均匀介质中的波前求取方法

(a) 利用惠更斯原理求新波前；(b) 惠更斯原理对平面波和球面波的应用

2. 射线与射线原理

地震波的传播，除了可以用波前来描述外，还可以用射线来表示。可以认为，地震波从介质的这一点传播到另一点是沿着一条假想的“路径”运动的。这条假想的路径就叫射线。在各向同性介质中，通过某点的射线总是和通过该点的波面相垂直。

射线只是个假想的概念，并不真正存在，真正存在的是波前。实际的波前图是很复杂的，而采用射线来研究时，往往可使问题大大的简化，所以射线成为几何地震学中方法研究的基础。

波沿射线传播的时间和其他任何路径传播的时间比较起来为最小，这就是费马原理或时

间最小原理。根据费马原理很容易理解下列现象：在均匀介质中，球面波的射线是一簇由波源发出的辐射线，平面波的射线是一簇垂直于波面的平行线。

3. 时距曲线与时距曲线方程

研究地震波在地下介质中的传播规律，其目的是为了指导我们用地震勘探方法来查明地下地质构造特征。前面已经论述过，地震波的传播规律可用波前或射线来描述，但是在实际工作中，不可能直接观测到介质中的波前或射线分布位置和形状，所以必须引入与地震勘探实际观测系统有关的时距曲线概念。

实际的地震资料采集是采用地面一次激发，多道接收的施工方法，目前在三维地震勘探中接收道数可达到 3600~4800 道，甚至更多。图 1-4 是一张实际地震记录，中间放炮，两边对称接收，总道数 120 道。引用时距曲线概念，就能将这张记录与地下介质构造特征联系起来。

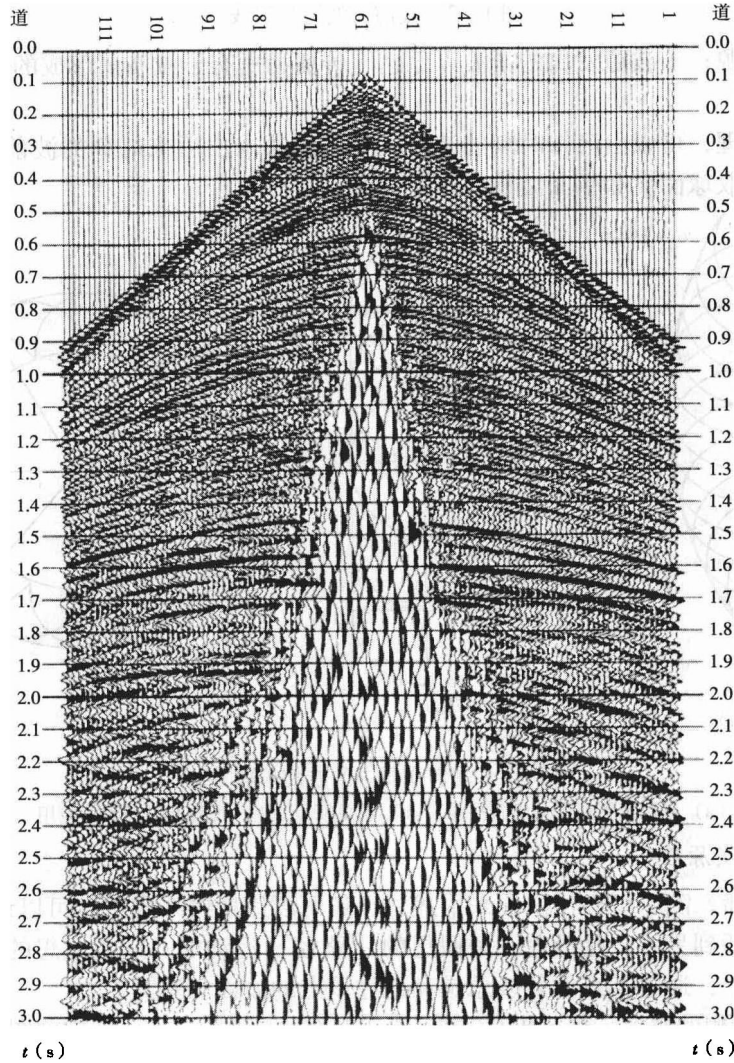


图 1-4 某工区原始地震记录

时距曲线是表示波从震源出发，传播到测线上各观测点的传播时间 t 同观测点相对于激发点的距离之间的关系。时距曲线方程是时距曲线的代数方程式。几乎所有的地震勘探教材都将时距曲线列为几何地震学理论的重点，有兴趣的同学可以详细查阅一下相关专业教材，这里只作简单论述。

假设均匀介质，观测点相对于激发点的距离为 X ，波速为 V ，反射界面埋深为 H 。则直达波的时距曲线方程为：

$$t = X/V$$

直达波的时距曲线是直线，见图 1-5。再观察图 1-4 的直达波初至，发现也是近似直线。两者对比，是很相似的。

反射波的时距曲线方程为：

$$t = (4H^2 + X^2)^{1/2}/V$$

反射波时距曲线是双曲线（图 1-5），同样，图 1-4 中的反射波同相轴形态也是弯曲成双曲线的，两者也很相似。因此，引入时距曲线概念的重要性就在于：它将地震记录上的同相轴和地下岩层的构造形态、特征联系起来了。

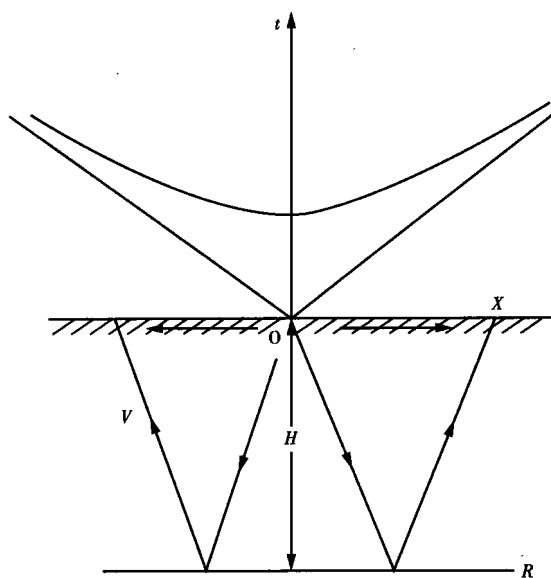


图 1-5 直达波和反射波的时距曲线

4. 视速度与真速度

真速度是指地震波沿垂直于波前方向的传播速度，通常就直接称为速度，用 V 表示；视速度是指地震波沿测线方向传播的速度，一般用 V^* 表示。视速度概念与时距曲线紧密相关，它可由时距曲线求得，即采用微分形式：

$$V^* = dx/dt$$

上式表示，视速度是时距曲线斜率的倒数。

假设平面波以 α 角入射到水平界面上, 速度为 V (图 1-6), S_1 和 S_2 代表两个波前平面, 相距为 λ , λ 是真波长, 设视波长为 λ^* , 视速度为 V^* , 则有

$$V^* = V/\sin\alpha$$

$$\lambda^* = \lambda/\sin\alpha$$

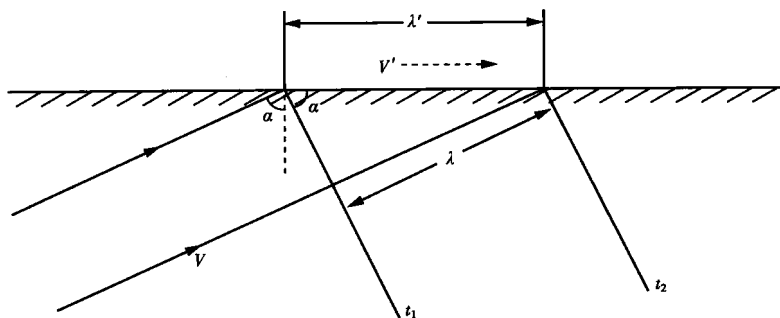


图 1-6 视速度与真速度的关系

因为恒有 $\sin\alpha \leq 1$, 所以视速度总是大于等于真速度, 视波长总是大于等于真波长。

三、地震波传播的动力学特征

地震波动力学主要研究波动的形状变化、振幅、能量大小和频谱分布等问题, 它们是物理地震学的基础。

很长一段时间地震波动力学在地震勘探中只起理论指导的作用, 实际的资料处理和解释方法, 都是以几何地震学为基础建立起来的。直到 20 世纪 70 年代, 由于石油勘探进入岩性勘探阶段, 要求地震资料能提供更多、更准确的动力学信息; 同时数字地震仪和计算机技术的出现和发展, 又使地震波动力学理论的深入研究和实际应用有了实现的可能。正是基于这种必要性和可能性, 才促使地震勘探从研究构造形态发展到研究岩性、岩相以及直接找油的新阶段。

1. 地震波波形

波在弹性介质中的传播过程, 实质上是质点位移随时间和空间变化的过程, 描述质点位移随时间或空间变化的图形叫做波形。如果在地面上沿某一条测线布置多道检波器来观测地震波, 质点的空间位置用 x 表示, 振动时间用 t 表示, 质点位移用 U 表示, 则地震波波形可分为两种: 一种是振动曲线 (图 1-7), 另一种是波剖面 (图 1-8)。振动曲线是反映某个固定质点, 不同时刻的振动关系图形, 用 $U(t)$ 表示。这一种应用比较广泛, 大家也比较熟悉, 平常看到的地震记录就是属于这一种图形。波剖面是反映同一时刻不同质点间的振动关系的图形, 用 $U(x)$ 表示。

简谐波可用振幅 A 、周期 T 、频率 f 、波长 λ 和波数 k 来描述。地震波是非周期振动, 是脉冲波, 不能直接用上述参数表示, 为了有所区别, 在地震勘探中第二次引入“视”参数的概念, 以此来描述地震波的特性。

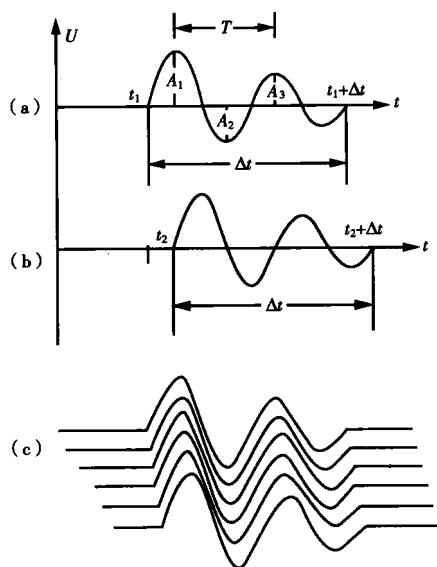


图 1-7 地震波振动曲线

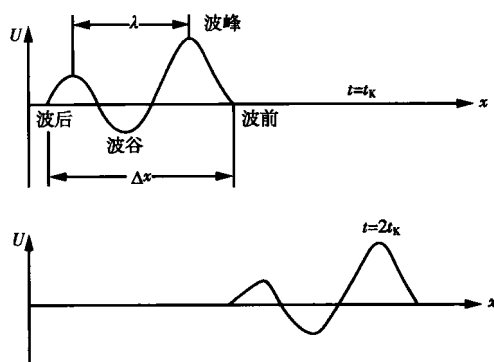


图 1-8 地震波波剖面

已知简谐波的 A 、 T 、 f 、 λ 、 k 与波速 V 之间有下列关系：

$$\lambda = TV = V/f = 1/k$$

地震脉冲波的视参数与波速 V 也有类似关系：

$$\lambda^* = T^* V = V/f^* = 1/k^*$$

注意，在地震勘探理论中共有两次引入“视”参数概念。第一次引入的原因是由于沿不同方向观测时，地震波的传播速度和波长概念有所不同。为了表示区别，将沿地震波传播方向观测的参数定义为真参数，将地震波沿测线方向运动的参数定义为视参数。第二次引入“视”概念与观测方向无关，目的只是为了将描述脉冲波的特征参数与描述简谐波的特征参数区别开来。由于地震勘探中的主要研究对象是地震波，实际中又不存在简谐波，所以在一般情况下就不十分强调第二种视参数的概念，在实际应用中常常将“视”字省略掉了。至于第一种视速度 V^* 和 f^* ，是在任何情况下都要特别强调的。

2. 地震波振幅

反射波振幅是地震勘探中的一个极重要的参数。在地震资料采集、处理过程中，人们千方百计地增强有效波，压制干扰波，目的就在于提高反射波振幅。与其他物性参数相比较，反射波振幅包含了更多的地震、地质信息；数字技术的推广又为深入研究、应用地震波振幅参数提供了有利的条件。20 世纪 70 年代形成的亮点技术和 80 年代发展起来的 AVO 技术，就是利用反射波振幅特性直接进行岩性追踪和油气检测的典型例子。

1) 几个不同的地震波振幅概念

地震波是非周期脉冲, 一般有几个波峰, 其振幅大小不一样, 所以因研究或实际工作的不同需要, 引入三种不同的振幅概念, 以适应不同研究对象的需要。

①最大值振幅: 这是选择波峰或波谷中数值最大者作为地震波振幅。

②平均振幅: 假设地震脉冲波延续几个采样点。各采样点振幅值为 A_1 、 A_2 、 $\cdots$ 、 A_n , 平均振幅 A 定义为:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i / n$$

③均方根振幅: 假设条件同上, 均方根振幅 A_r , 定义为:

$$A = \left(\sum_{i=1}^n A_r^2 / n \right)^{1/2}$$

一般说来, 引用理论地震子波时, 常选择最大值振幅, 当研究的问题涉及地震波能量或强度时, 更多地选择均方根振幅; 通常平均振幅很少引用。

2) 反射波的振幅衰减因子

地震波从激发、传播、接收到最后在磁带上记录下来, 在这过程中它的振幅要发生一系列的变化。如果将各种因素的影响都用衰减因子来表示的话, 则反射波地震记录中的振幅可以表示为下式:

$$A = D_s D_d D_a R D_t D_x A_0$$

式中, A_0 为地震波初始振幅; A 为地震反射波的最终记录振幅; D_s 为综合的激发条件造成的衰减因子; D_t 为综合的接收条件造成的衰减因子; D_d 为波前发散因子; D_a 为介质吸收衰减因子; R 为反射系数; D_t 为中间界面透射损失因子; D_x 为综合其他因素 (如面波、声波、侧面波、异常波、环境噪声等干扰波) 造成的衰减因子。

3. 地震波能量与强度

根据波动原理, 波在其中传播着的那一部分介质的能量 E 等于动能和势能之和。假设波正在传播的那部分介质的体积为 τ , 密度为 ρ , 波的振幅为 A , 频率 f , 则波的能量:

$$E = C \rho \tau f^2 A^2$$

式中, C 为常数。

将包含在单位体积介质内的能量称为波的能量密度 ω 。有:

$$\omega = C \rho f^2 A^2$$

在实际问题讨论中, 真正有意义的不是波的总能量, 而是单位时间内通过单位面积的能量, 称为波的强度 I :

$$I = \omega V = C \rho V f^2 A^2$$

从上面三式中可以看出, 波的能量、能量密度和强度都与波的振幅平方成正比, 由此再次证实振幅这个参数的重要性。

4. 地震波频谱

波形是时间域内的地震波传播特征，频谱是频率域中的地震波传播特征，两者是完全等价的，可以通过傅氏变换将它们联系起来。

目前有许多处理方法，如滤波、反褶积、偏移、正反演等技术，既有时域的算法，又有频域的软件，通过傅氏变换，可以对同一地震资料灵活地选择时域或频域软件进行处理比较，这对于提高地震资料处理质量是非常有利的。

在野外资料采集方法研究中。频谱分析也占据着重要的地位。图 1-9 是一张野外原始地震记录，是时间域的地震波波形记录。在这张图上我们选择 3 个波组：750ms 处的直达波及 1.6s 和 2.5s 处的反射波。将这 3 组波形作一比较，很明显直达波波形最“瘦”，1.6ms 反射波波形“胖”了一些，而 2.5s 处反射波波形最“胖”。尽管这一分析是定性的，缺乏定量上的确切性，但还是能佐证地震波在介质中传播的高频吸收衰减理论。如果针对这 3 个波组选择 3 个时窗：620 ~ 829ms，1500 ~ 1700ms，2400 ~ 2600ms，通过傅氏变换，将 3 个时窗内的波形记录分别转换到频率域中去，于是便得到图 1-10 所示的 3 张频谱图。我们已经强调过，如果局限在时窗范围内进行考察的话，那么图 1-10 与图 1-9 只是在表现形式上有所不同，而在实质意义上是完全等价的。这 3 张振幅谱清楚地显示：直达波频宽 10 ~ 80Hz，主频约为 50Hz；1.6s 反射波频宽 6 ~ 50Hz，主频大约 30Hz；2.5s 反射波频带很窄，约 6 ~ 30Hz，主频降到 16Hz。频率域的结论同样符合地震波传播的吸收衰减理论，但在这一实例中频率域的研究已经从定性分析提高到定量估算了，因此它比时间域的分析结果更深入，更具有指导意义和实用价值。

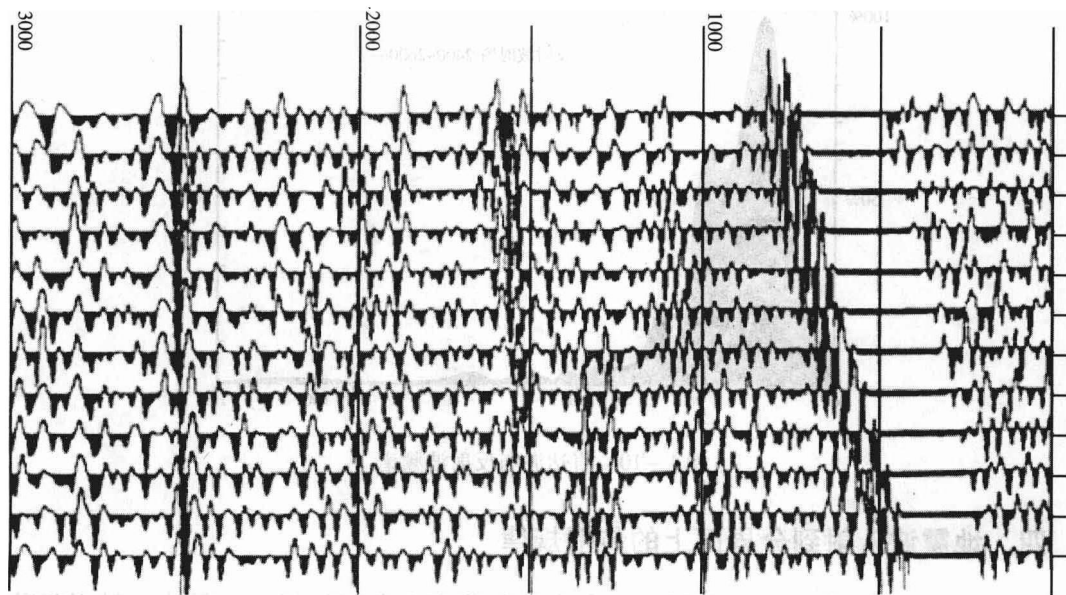


图 1-9 野外原始地震记录