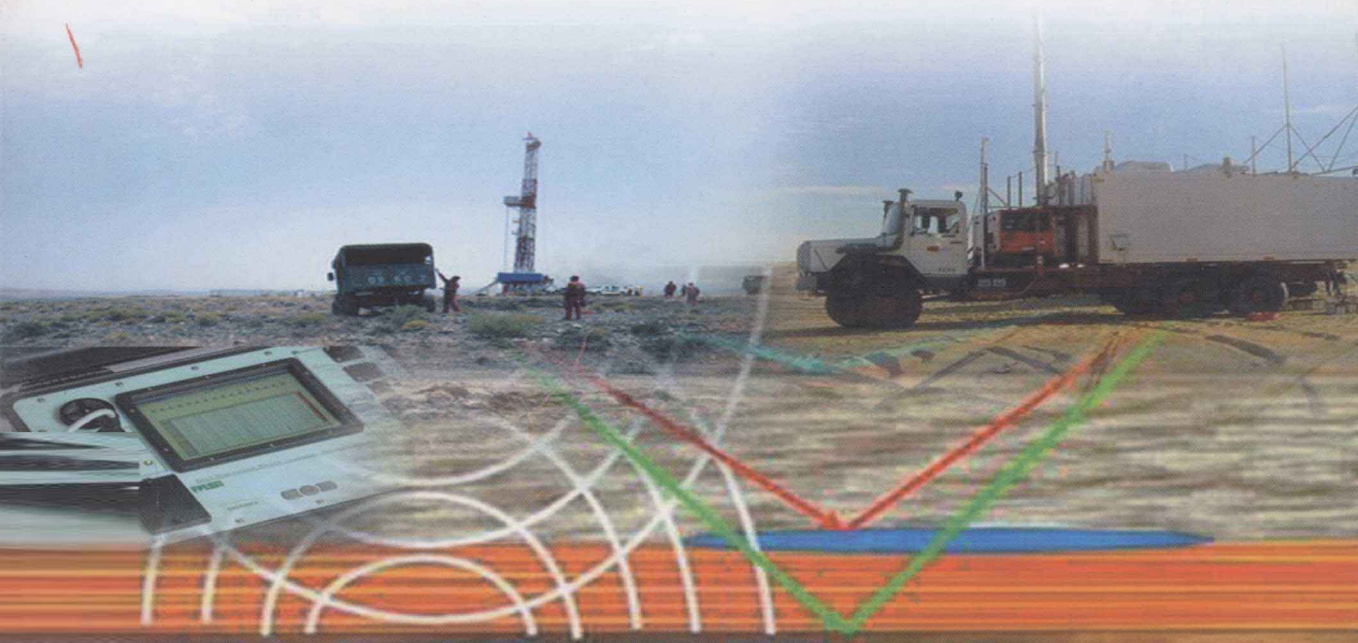


高等院校石油天然气类规划教材

# 地震勘探原理与解释

张明学 主编



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

# 地震勘探原理与解释

张明学 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书在全面系统地阐述了地震勘探基本原理的基础上,着重讲述了在实际地震勘探过程中地震资料野外采集、数据处理,并详细解说了地震地质解释的各种具体工作方法和步骤。同时,本书还简要介绍了地震地层学及地震烃类检测等理论和技术的原理和应用。

本书可作为资源勘查工程等非地球物理勘探专业的本科生教材,亦可供从事地震地质综合解释方面的科研人员和工程技术人员学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

地震勘探原理与解释/张明学主编.  
北京:石油工业出版社,2010.8  
高等院校石油天然气类规划教材  
ISBN 978-7-5021-7869-7

I. 地…  
II. 张…  
III. 地震勘探-高等学校-教材  
IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 115340 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

编辑部:(010)64523574 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京华正印刷有限公司

---

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15.25

字数:387 千字

---

定价:25.00 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

# 前 言

《地震勘探原理与解释》是为资源勘查工程等非地球物理勘探专业编写的本科生通用教材。在剖析了国外及国内各院校所编相关教材特点的基础上,编写小组广泛开展了国内外文献、专著及科研成果的调查研究,结合 20 世纪 90 年代以来培养大学生、研究生的教学经验,建立新的教材体系,拟定了新的编写大纲。编者在多年教学和科研实践的基础上,结合当前地震勘探的现状和发展及石油工业生产与科研的需求,编写了此教材,它适用学时数约为 48 ~ 64 学时。

本教材主要介绍关于地震波的运动学和动力学的基本概念、基本原理及地震资料的地质解释与应用。本教材具有以下特点:

- (1) 结构合理,深入浅出,通俗易懂,便于学生掌握;
- (2) 教材内容覆盖面广,讨论了地震勘探的基本概念、原理和方法;
- (3) 重点突出,根据资源勘查工程专业的特点,在必要的数学推导的基础上注重其在专业中的应用,并去掉了一些繁琐的公式推导;
- (4) 重点突出了如何利用地震资料解释有关石油勘探中的地质构造、地层岩性以及可能的油气储层的说明。

随着世界油气勘探的进展,石油工业形势日趋严峻,地质、地理条件较好的易找油气田越来越少,勘探难度日益增大,世界剩余石油可采储量及总可采资源量均呈下降趋势。这种勘探形势迫使油气勘探理论和技术必须有巨大进展,才能适应世界油气勘探的持续发展。因此,本书增加了地震勘探新方法、新技术,使读者对地震勘探的发展动态有较全面的了解。使用本教材时,可针对教学对象和课程学时安排适当选择讲授内容。

本教材由东北石油大学张明学任主编,中国石油大学(北京)宋炜、西安石油大学苏海、东北石油大学胡玉双任副主编。编写人员分工如下:张明学编写前言、绪论、第一章、第六章;胡玉双编写第二章、每章习题与思考题;苏海编写第三章;宋炜编写第四章、第五章;胡玉双和长江大学杨飞共同编写第七章。

在本书编写过程中,得到了东北石油大学勘查技术与工程专业和长江大学相关同仁以及石油工业出版社的热情帮助,编者在此深表谢意。

限于编写者水平,书中会存在不少问题,欢迎广大读者批评指正。

编 者  
2010 年 5 月

# 目 录

绪论 .....	(1)
第一节 油气勘探的基本方法 .....	(1)
第二节 地震勘探方法简述 .....	(2)
第三节 地震勘探的发展概况 .....	(4)
习题与思考题 .....	(5)
第一章 地震波运动学 .....	(6)
第一节 地震波的基本概念 .....	(6)
第二节 地震波的传播规律 .....	(12)
第三节 一个分界面情况下的反射波时距曲线 .....	(16)
第四节 多层介质情况下的反射波时距曲线 .....	(20)
第五节 连续介质中地震波的运动学 .....	(24)
第六节 折射波运动学 .....	(29)
习题与思考题 .....	(31)
第二章 地震波动力学特征 .....	(33)
第一节 地震波的频谱 .....	(33)
第二节 地震波的振幅 .....	(42)
第三节 影响地震波传播的地质因素 .....	(47)
习题与思考题 .....	(49)
第三章 地震勘探数据的野外采集 .....	(50)
第一节 野外工作方法 .....	(50)
第二节 多次覆盖观测系统 .....	(63)
第三节 地震波的激发与接收 .....	(72)
习题与思考题 .....	(92)
第四章 地震资料数字处理 .....	(93)
第一节 地震资料数字处理概述 .....	(93)
第二节 预处理 .....	(95)
第三节 动校正与静校正 .....	(99)
第四节 数字滤波 .....	(103)
第五节 反滤波 .....	(107)
第六节 共反射点叠加 .....	(110)
第七节 地震波偏移成像 .....	(119)
习题与思考题 .....	(122)

<b>第五章 地震波速度</b> .....	(123)
第一节 几种速度的概念及其相互关系 .....	(123)
第二节 地震波速度的影响因素与分布规律 .....	(130)
第三节 地震波速度的来源 .....	(133)
习题与思考题 .....	(138)
<b>第六章 地震资料的构造解释</b> .....	(140)
第一节 地震资料解释概述 .....	(140)
第二节 地震剖面的特点 .....	(142)
第三节 地震剖面的对比解释 .....	(158)
第四节 各种地质现象在时间剖面上的特征和解释 .....	(167)
第五节 地震构造图的绘制 .....	(178)
第六节 三维地震资料解释 .....	(187)
习题与思考题 .....	(194)
<b>第七章 地震地层解释及储层预测</b> .....	(197)
第一节 地震反射信息的地震地层解释 .....	(197)
第二节 地震信息的岩性解释与烃类检测技术 .....	(207)
第三节 发展中的新技术 .....	(225)
习题与思考题 .....	(234)
<b>参考文献</b> .....	(235)

# 绪 论

## 第一节 油气勘探的基本方法

随着世界经济的快速发展,人类社会对能源的需求逐年增加,而油气资源作为能源最重要的组成部分之一,其需求量更是突飞猛进。油气多深埋在地下几千米,是用什么办法找到的呢?人们经过长期不断的实践,总结并吸取、引用许多科学技术部门的新理论和新技术,已逐步建立了一整套油气勘探的方法和技术。这些方法可以归纳为三大类,即地质法、物探法和钻探法。

### 一、地质法

地质法就是以石油地质学、构造地质学、沉积岩石学等理论为基础,观察并研究出露在地表的地层、岩石,对地质资料进行综合分析,了解一个地区有无生成石油和储存石油和条件,最后做出该地区的含油气远景评价,指出含有油气的有利地区。

### 二、物探法

物探法(地球物理勘探方法)是根据地质学和物理学的原理,利用电子学和信息论等许多科学技术领域的新技术,建立起来的一种较新的勘探油气的方法。这一方法利用各种物探仪器,在地面观测地壳中的各种物理现象,从而推断地下的地质构造和岩性分布的特点,寻找可能的储油(气)构造,是一种间接找油的方法。

物探法能用来查明地下地质构造的特点,主要是因为组成地壳的各种岩石或组成地质构造的各个岩层具有不同的物理性质,因而不同岩石或地层对地面上的物理仪器就有不同的响应,根据仪器测量的结果,经过各种分析研究就可以推断地下地质构造的特点。

物探法特别适用于海洋、沙漠地区以及地表较为松散的沉积地区,因为在这些地区的表面,看不到岩石,地质法受到限制,用大量钻井、取岩心等方法成本高、效率低,所以一般运用物探法。

### 三、钻探法

物探法可以了解地下地质构造的特点,寻找到适合储油的地质构造,但这些构造是否储存油气,还需根据物探法提供的井位进行钻探得以证实。钻探法就是利用物探提供的井位进行钻探,直接取得地下最可靠的地质资料来确定地下的构造特点及含油气的情况。

由此可见,油气勘探石油是一件很复杂的工作,需要地质学家和地球物理学家紧密配合、综合分析。地质学家和地球物理学家要有良好的地球物理知识和地质知识,以便利用地球物理资料做出地质解释。地质学家和地球物理学家通力合作,才有可能使石油勘探工作顺利地进行。

## 第二节 地震勘探方法简述

### 一、什么是地震勘探

大量实践证明,地震勘探是最有效的勘探方法。地震勘探就是用人工方法(如爆炸、敲击等)产生振动(地震)后,研究振动在地下的传播规律,以查明地下地质情况和有用矿藏的一种勘探方法。

地震勘探根据其利用地震波的类型不同,可分为三种基本方法,即:反射波法地震勘探方法、折射波法地震勘探方法、透射波法地震勘探方法(包括垂直地震剖面法)。反射波法地震勘探方法和折射波法地震勘探方法都是在地面激发,在地面上观测反射波和折射波。而垂直地震剖面法则是在地面激发,在井中观测地震波。反射波法地震勘探方法主要用于石油和天然气的勘探,透射波法地震勘探方法是它的辅助手段,折射波法地震勘探方法在石油勘探中用得很少。本书主要讨论反射波法地震勘探方法。

### 二、地震勘探的基本原理

“地震”就是“地动”的意思。天然地震是地球内部发生运动而引起的地壳的振动。地震勘探是用人工的方法引起地壳振动,最常用的方法是打一口浅井,在井内放一定量的炸药,使之爆炸产生人工地震波,再用数字地震仪记录下爆炸后地面上各点振动的情况,再经过对记录下来的资料的处理和人机联作解释,推断地下地质构造的特点。

那么人工地震为什么能查明地下地质构造呢?它的原理很简单,如人在山谷或在大厅里大喊一声,能听到回声,这是因为声波在空气中传播,遇到障碍物会发生反射的缘故,利用声波反射现象,可以测出障碍物离开我们所站地方的距离。例如:已知声波在空气中传播的速度

$v = 340\text{m/s}$ ,如测量出从呼喊开始到听见回声的时间  $t = 4\text{s}$ ,那么障碍物离开我们的距离  $S = \frac{1}{2}vt =$

$\frac{1}{2} \times 340 \times 4 = 680\text{m}$ ,地震勘探的基本原理与此十分类似。

如图 0-2-1 所示,在地面某一条线上的某点放炮,由此就产生地震波向地下传播。地震波遇到不同岩层的分界面(波阻抗差界面)就会发生反射,另一部分能量继续向下传播,再遇到另一界面时再继续发生反射。在放炮的同时,在地面上用检波器及数字地震仪记录来自各个地层分界面的反射波引起地面振动的情况和反射波到达的时间  $t$ ,再换算成垂直入射反射时间  $t_0$ ,这样测得速度后就可以计算出地下各地层的埋藏深度。如果在一条条测线上观测,并对观测结果进行各种数字处理,就可以得到形象地反映地下岩层分界面埋藏深度起伏变化的资料——地震剖面图(如图 0-2-2 所示)。再结合其它物探方法和地质、钻井等方面的资料,对地震剖面进行解释,就能查明地下可能储油的构造,确定钻探井位。

地震勘探的原理是利用地震波从地下地层界面反射至地面时带回来的旅行时间和波形变化的信息,推断地下的地层构造和岩性。

### 三、地震勘探的生产过程

地震勘探的生产工作基本上可分为以下三个环节。

#### 1. 野外采集工作

这个阶段的任务是在地质工作和其它物探工作初步确定的有含油气希望的地区布置测



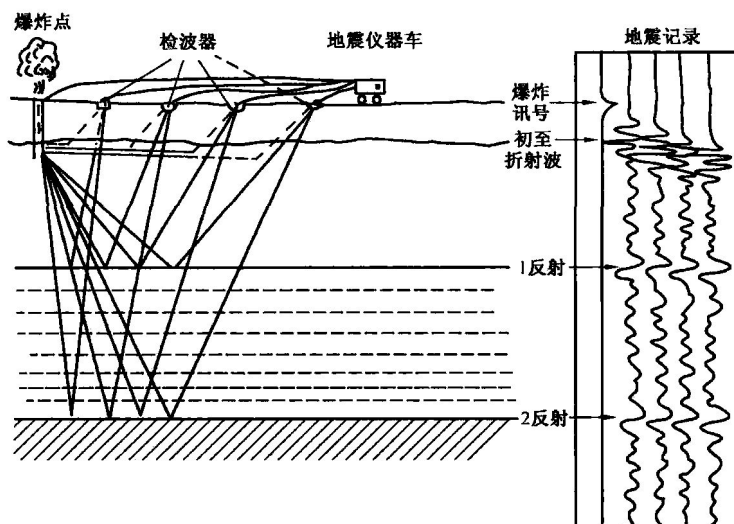


图 0-2-1 地震勘探示意图

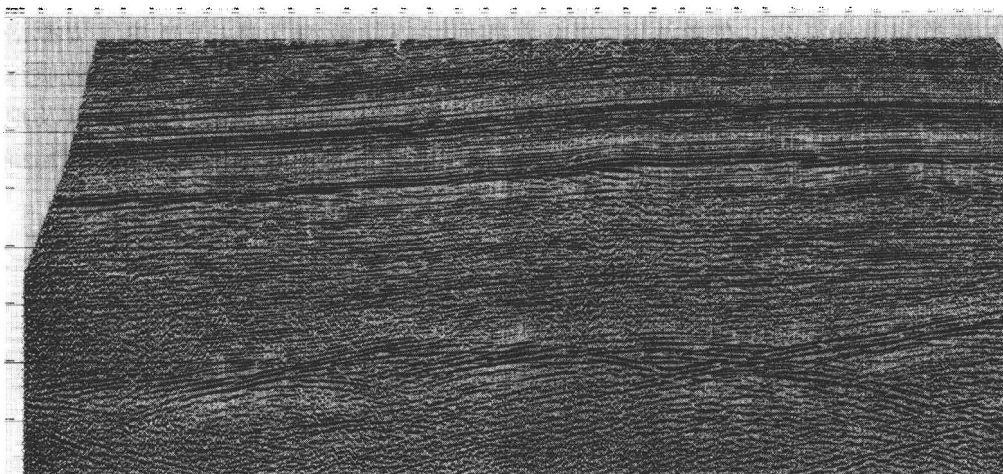


图 0-2-2 地震剖面图

线,人工激发地震波,并用野外地震仪把地震波传播的情况记录下来。进行野外采集工作的组织形式是野外地震队。这一阶段的成果是得到记录了地面振动情况的地震数据磁带(野外原始资料)。

## 2. 室内资料处理

这个阶段的任务是根据地震波的传播理论,利用数字电子计算机对野外获得的原始资料进行各种“去粗取精、去伪存真”的加工处理工作,以及计算地震波在地层内传播的速度等。这一阶段得出的成果是地震剖面图和地下地层传播的速度资料。资料处理工作在配备有数字电子计算机和有关专用仪器设备的计算站来完成。

## 3. 地震资料的解释

经过处理后的地震资料(每一条测线对应一张地震剖面),能基本反映出地下地质构造的特点。但是,地下的情况是很复杂的,地震剖面上的许多现象既可能反映地下的真实情况,也

可能存在某些假象。在地震剖面上只能看出地层沿剖面方向的起伏形态,而没有一个完整的立体概念。地震资料的解释工作,就是要综合地质、测井、钻井及其它物探资料,对地震剖面进行深入的分析研究,对各反射层相当于什么地质层位做出正确的判断,对地下地质构造的特点进行说明并绘制反映某些主要层位完整的起伏形态的图件(构造图)。最后,查明含油构造或地层圈闭,提供钻探井位。

随着地震技术的发展,地震解释大致可以分为三个阶段,即地震构造解释阶段、地震沉积解释阶段和地震地质综合解释阶段。20世纪70年代中期以前,主要是地震构造解释阶段,即在构造地质学和地震成像基本原理的基础上,确定地下主要反射界面的埋藏深度,落实和描述地下岩层的构造形态特征,此阶段的主要目的是为钻探提供有利的构造圈闭。20世纪70年代中期,随着数字地震技术的发展,地震剖面质量显著提高,研究人员开始了地震沉积学方面的解释。这一时期研究主要以地震地层学和层序地层学理论(思想方法)为基础,识别地震反射层所代表的地层学和岩石学意义、确定反射层或波组所代表的地层年代、确定地震相类型借以分析沉积体系与砂体横向展布,以落实隐蔽油气藏、描述地下储层空间几何形态为主要目的。进入20世纪80年代后期,油气勘探的任务更为艰巨,油气勘探的难度越来越大,油气勘探向深度和广度进军。在新的勘探地区,遇到十分复杂的地表条件和地下地质条件,且油气藏类型十分复杂。在老油区,面临着如何寻找隐蔽油气藏、提高油气资源潜力等问题。人们对地球物理的综合分析与解释予以了更大的关注,并提出了地震地质综合解释。即以地震资料为基础,综合一切可能获得的资料(包括地质、钻井、测井以及地球化学和其它地球物理等资料),合理判别和分析各种地震信息的地质意义,以达到精确重现地下地质情况的目的。

### 第三节 地震勘探的发展概况

地震勘探从出现到现在,在地震波的基本理论、仪器设备、野外工作方法、处理技术、解释方法等各种方面,不断改进发展。这一过程大致可分为三个阶段:

(1)光点记录,用人工整理资料。

所谓光点记录,就是把地面振动的情况用照相方法记录下来,这样得到的记录是“死的”,不能改变因素重新处理,因此原始资料质量低,资料全部由人工整理,效率低,精度也不高。

(2)模拟磁带记录,用模拟电子计算机整理资料。

模拟磁带记录就是把地面振动的情况以模拟的方式录制在磁带上(与磁带录音类似),这比光点记录先进了一些,可以使记录变“活”,资料处理也可部分自动化。但是,这种记录由于叠加次数少,干扰波得不到应有的压制,地震资料质量不够高,影响解释精度。

(3)数字磁带记录,用数字电子计算机整理资料。

数字磁带记录就是在野外利用数字地震仪记录地震波振幅的离散数值(而不是记录连续小波形),得到的原始资料质量高,在室内处理时更加灵活、精确。资料整理的自动化程度和工作效率都获得提高,得到的地震剖面更能形象地反映地质构造形态,便于解释,以提供更精确的钻探井位。

回顾地震勘探技术的发展历程,地震勘探技术始终处于不断创新、飞速提高的过程之中,大概经过了六次飞跃(见表0-3-1)。至今它已经形成了一个复杂、庞大而完整的科学体系。

数学、物理、计算机以及地质学的各个分支都渗透到各个领域之中。

表 0-3-1 地震勘探技术的发展历程

时 间	阶 段	进 展
20 世纪 30 年代	第一次飞跃	由折射地震法改进为反射法
20 世纪 50 年代	第二次飞跃	出现多次覆盖技术
20 世纪 60 年代	第三次飞跃	数字地震仪及数字处理技术
20 世纪 70 年代初期	第四次飞跃	偏移归位成像技术
20 世纪 70 年代后期	第五次飞跃	三维地震勘探技术
20 世纪 90 年代	第六次飞跃	高分辨率与三维地震结合

在石油和天然气勘探中,地震勘探方法的发展最迅速,特别是 20 世纪 60 年代中期进入数字地震技术阶段后更是突飞猛进,从主要研究地下的地质构造特征,发展到可以了解地层岩性圈闭。近几年地震勘探逐步向提供储层内部参数发展,特别是储层横向预测、储层参数的描述、开发地震等方面都有较大进展。

和其它物探方法相比,地震方法的主要特点是精度高,分辨率高,探测深度大。迄今为止,地震勘探方法已成为最重要的地球物理技术,它在石油勘探中的广泛应用证明了地震工作的重要性。多年以来,西方世界在物探方法的投资中,百分之九十几用于地震勘探,因为其具有与钻探相比成本较低,并可了解大面积的地下地质构造情况的特点。

从物理和地质结合的观点,地震勘探对寻找有弹性差异、成层性好的地质体特别有效,因此,它主要用于勘探石油、天然气、煤田及盐丘矿床。在我国,自大庆油田开发以来,95% 的新油田都是由地震勘探提供构造的,而世界范围内的墨西哥湾油田、中东油田、黑海油田和北海油田的发展也是如此,此外,地震勘探在寻找地下水资源、地热以及工程勘探和地壳测深中也有着重要作用,总之它应用很广,地质、开发、采油都离不开物探。

### 习题与思考题

1. 什么叫地震勘探?
2. 地震勘探的基本原理是什么?
3. 地震勘探的生产过程分哪几部分? 每部分的任务是什么?
4. 简述地震勘探技术的发展历程。

# 第一章 地震波运动学

地震勘探的基本任务之一是确定地下的地质构造,这个任务的解决主要利用了波的运动学特性。

地震波运动学研究地震波波前的空间位置与其传播时间的关系,它与几何光学相似,也是运用波前、射线等几何图形来描述波的运动过程和规律,因此也叫几何地震学。在本章首先介绍地震波传播的基本概念和传播规律,然后讨论均匀介质、层状介质以及连续介质中反射波和折射波的运动学。

## 第一节 地震波的基本概念

### 一、地震波的形成

#### 1. 什么是地震波

波是一种常见的现象,例如声波、水面波、地震波等。敲鼓时因鼓面振动带动它周围的空气分子振动,振动通过空气向外传播形成声波。石子投入水中,水的质点发生振动,振动沿着水表面,由近及远向外传播出去,形成水面波。

波就是振动在介质(空气、水、岩层等)中的传播过程。没有振动就谈不上振动的传播,波也就不存在。振动是波动的震源,所以首先要有开始振动的震源存在。当震源在地表层激发后,地表层介质中的质点通过介质质点的相互作用,会引起邻近质点的振动,邻近质点的振动又会引起下邻近质点的振动,如此能量传播下去就形成了波动。在地震勘探中,震源有两种,一种是炸药震源,另一种是非炸药震源(如可控震源、蒸汽枪、电火花震源等)。虽然震源的激发形式不同,但其目的都是为了引起岩层质点的振动,激发较强的地震波。因此所谓地震波就是地球介质中传播的振动。

#### 2. 地震波实质是一种在岩层中传播的弹性波

地震波是在岩层中传播的,形成弹性波的条件是要有一种能传播弹性振动的介质,并且要在这种弹性介质中激发振动。弹性理论研究表明,每一种物体在外力作用下主要表现为弹性还是塑性,要取决于具体的条件。在外力很大,作用时间又很长的情况下,大部分物体都表现为塑性性质(外力去掉后,物体还保持其受外力作用时的状态);反之,在外力很小,作用时间又很短的情况下,大部分物体表现为弹性性质(外力取消后,恢复成原来状态)。物质的弹性和塑性是相对的,在一定条件下可以相互转化。

那么地层是否可以看成是弹性介质呢?当在岩层中用炸药“爆炸”激发地震波时(图1-1-1),在炸药包附近,爆炸所产生的强大压力大大超过了岩石的极限强度,岩石遭到破坏,形成一个破坏圈炸出空洞。随着离开震源距离的增大,压力减小,但仍超过岩石的弹性限度,发生塑性变形。在塑性带以外压力降到弹性限度以内,又因为炸药爆炸的产生的是一个延续时间很短的作用力,根据弹性理论,这一区域的岩石发生弹性形变(图1-1-2)。地震勘探通常都在远离震源外进行接收,因此除震源附近以外的绝大部分地区,岩石都可以近似地当作理想弹性体或完全弹性体来研究,所以地震波实质上是一种岩层中传播的弹性波。这里需

要指出的是,振动通过弹性介质向外传播时,仅仅是把振动的能量向外传播,而质点本身并不向外移动。如果弹性介质是无限的,那么振动将在很大的范围内进行传播。爆炸时岩石的影响见图 1-1-2。

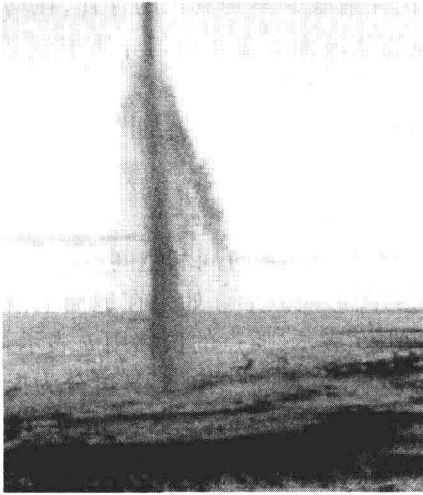


图 1-1-1 炸药震源激发地震波

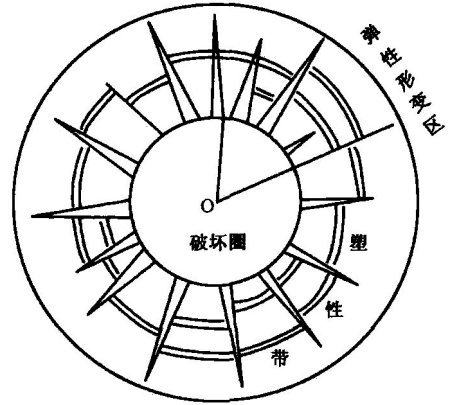


图 1-1-2 爆炸对岩石的影响示意图

## 二、波的特征

### 1. 波面

假设地下岩层是均匀的(波的传播速度是常数),炸药在 O 点爆炸,地震波就从爆炸点开始,向地面以下各个方向传播。如果在某一时刻  $t$ ,我们把空间中所有刚刚开始振动的点连成曲面,该曲面称为某一时刻  $t$  的波前面,简称波前。所有刚刚停止振动的点构成的曲面叫做波尾,如图 1-1-3 所示。显然,在某一时刻波前以外的质点尚未开始振动,波尾以内的质点振动已经停止,只有在波前和波尾之间,质点正处在不同强度的振动状态,这个区间称为振动带。在振动带内,振动相位相同的各点构成的面叫做等相位面。波前面既是等相位面,也是等时面。如果依次给出不同时刻的波前,就可以确定一系列等时面的时间与空间的关系,也就给出了波在介质中的传播特征。必须指出,波是不断前进的,从而波前和波尾这两个曲面也在随着时间不断地推进,所以不指明哪一时刻来谈波前和波尾是没有确切意义的。

根据波前面的形状,可以把波分为球面波和平面波两种(见图 1-1-3)。在地震勘探中由点震源激发的波是球面波,当远离震源只考虑波面上一部分时,这部分球面波又可近似地看成平面波。

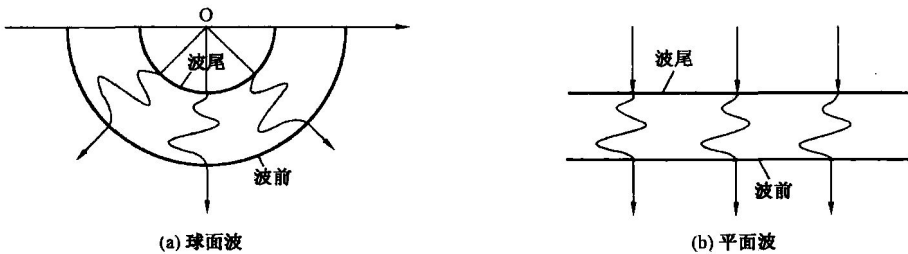


图 1-1-3 波前面

## 2. 射线

在几何地震学中,用于描述波动能量从一点传播到另一点的路径就是射线,又称波线。它是用来描述波的传播路线的。射线总是垂直于波面。

我们引入射线概念,只是为方便研究问题,但必须记住射线并不是真正的存在,在均匀介质中( $v$ 一定)认为地震波以直线形式向外传播,射线垂直于波面。在非均匀介质中( $v$ 变化)认为地震波以曲线形式向外传播,射线也垂直于波面。

在条件适当时,利用射线的概念,可将波的传播问题简单化,而得到的结果又和实际情况相近或相等。这是一种用几何作图来反映物理过程的简单方法。

## 3. 振动曲线和波剖面

振动在弹性介质中的传播过程(即波动),实质上是质点位移随时间和空间(指质点的空间位置)变化的过程,描述质点位移随时间和空间变化的图形叫波形。如果在地面上沿某一条测线观测地震波,质点的空间位置用 $x$ 表示,振动时间用 $t$ 表示,质点的位移用 $u$ 表示,则地震波的波形可以用 $u(x,t)$ 的函数关系(称为波动方程)表示。地震波的波形又可分为振动曲线和波剖面两种,分别用 $u(t)$ 和 $u(x)$ 表示。

### 1) 振动曲线

波在传播过程中,某一质点的位移大小是随时间而变化的,描述某一质点位移与时间关系的图形叫振动曲线,习惯上称为振动图,如图 1-1-4 所示。振动图反映了地震波在传播过程中某一质点随时间振动的特点,用振动的周期、频率和振幅可以区别不同的振动。

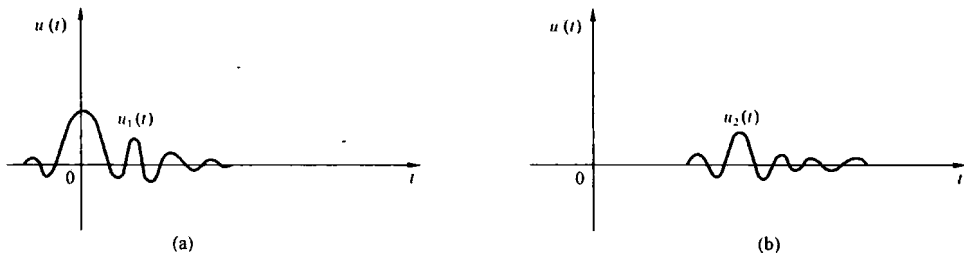


图 1-1-4 介质中不同质点的振动曲线

振动一般分为周期振动和非周期振动,振动过程中周期(或频率)保持不变的振动叫周期振动。谐振动属于周期振动的一种,振动图形是一条正弦曲线。谐振动的振动图形不仅周期不变,振幅也始终保持不变,它是振动中最简单的振动形式。



图 1-1-5 脉冲振动(单道地震记录)

在振动过程中周期或频率是变化的振动叫做非周期振动。脉冲振动是属于非周期振动的一种,其特点是延续时间很短,且脉冲的周期和振幅都是变化的(如图 1-1-5 所示)。为了与谐振动相区别开来,在脉冲振动的周期,频率和振幅前面都加一个“视”字,叫做视周期、视频率和视振幅,并用 $T^*$ 、 $f^*$ 和 $A^*$ 分别表示。

地震波属于脉冲振动,地震勘探中所获得的地震记录,实际上是一系列地震波传播到地表时引起地表质点振动的脉冲图形。其中每个脉冲图形都表示一个岩层分界面的反射波返回到地面引起的质点振动图形,靠前面的脉冲表示浅层反射,靠后面的脉冲表示深层反射。如果在地面沿测线设置多道检波器,得到的多个振动图形的总和就是地震记录,如图 1-1-6 所示。

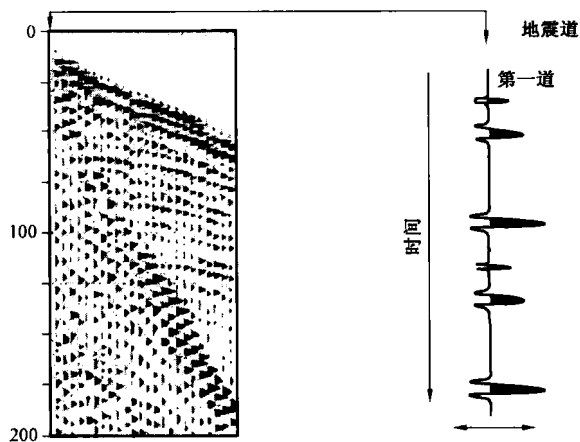


图 1-1-6 共炮点野外地震记录

地震勘探中,振动的正向极值叫波峰,负向极值叫波谷。波峰的个数习惯上称为相位数,如第一波峰叫第一相位。在地震资料对比中所说的“波形特征”,就是指振动相位数、视周期、视振幅及其相互关系。同一界面来的波,其波形特征是相似的,不同界面来的波,其波形特征是不同的,这是在地震资料解释中经常运用的基本原则之一。

## 2) 波剖面

波在传播过程中的某一时刻,介质中各个质点的位移是不同的,描述质点位移与空间位置关系的图形叫波剖面,也叫波形曲线,如图 1-1-7 所示。

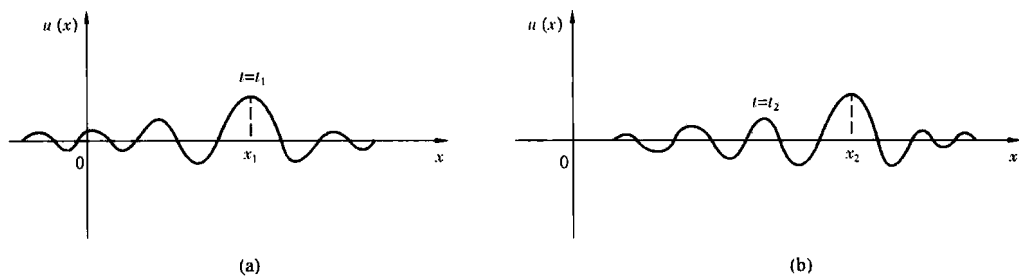


图 1-1-7 波剖面(两个不同时刻的波形曲线)

在地震剖面上,如果我们沿横坐标轴  $x$  画出某一时刻各检波点地面质点的位移  $u(x)$ ,那么这条曲线就是某时刻  $t$  的波剖面。图 1-1-8 中则显示出一个谐波的波剖面。对于谐波,当质点从平衡位置又回到平衡位置的最小距离,称为波长  $\lambda$ 。波长的倒数称为波数  $k$ 。它表示在单位距离上波的个数。波源每振动一次,波就前进一个波长的距离  $\lambda$ 。波源每秒振动的次数就是频率  $f$ ,所以每秒前进的距离是波速  $v = \lambda f$ 。于是我们得到:

$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{T}$$

式中  $T$ ——周期。

在同一种介质中,如果频率不同的正弦波具有相同的传播速度,则由上述公式可知,波的频率越高,它的波长就越短。

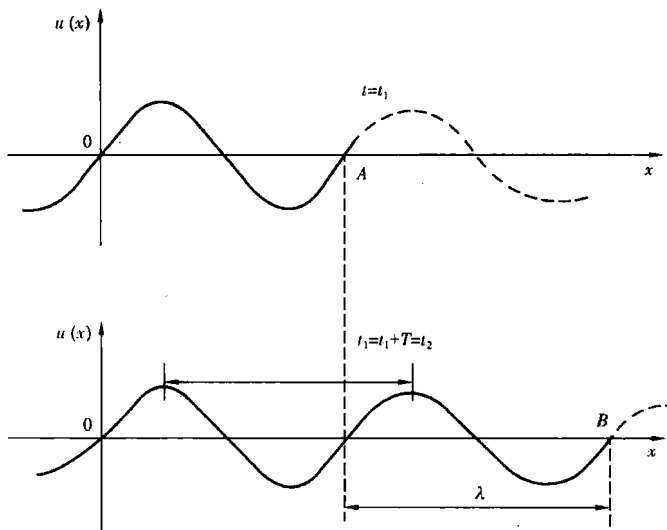


图 1-1-8 波长定义示意图

#### 4. 地震子波

在信号分析领域中,把具有确定的起始时间和有限能量的信号称为子波。在地震勘探领域中子波通常指的是 1~2 个周期组成的地震脉冲。由于大地滤波器的作用,尖脉冲变成了频率较低、具有一定延续时间的波形,成为地震子波(图 1-1-9)。一般情况下,地震子波在地层中传播,随着传播距离的增加,其振幅和波形要发生变化,而在许多情况下,可以粗略地认为地震子波形状基本不变,只是幅度会因各种原因而衰减。在地震勘探中把地震子波看作组成一道地震记录的基本元素。地震勘探的原理,可以理解为就是利用地震子波从地下地层界面反射回地面时带回的旅行时间和形状变化的信息,推断地下的地层构造和岩性信息。实际工作中根据子波能量分布状况分为最小相位子波、最大相位子波、零相位子波。最小相位子波有时称为前载子波,能量集中在前端、由于大多数脉冲地震震源产生的原始脉冲是接近最小相位的,因此地震子波一般是最小相位(最小延迟)子波。最大相位子波能量则主要集中在尾部。零相位子波能量主要集中在中间,且波形对称。这三种子波的能量分布见图 1-1-10。

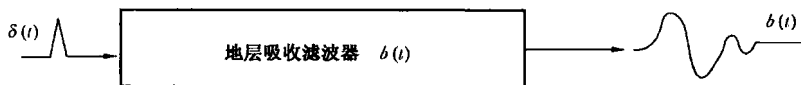


图 1-1-9 地震子波的形成



图 1-1-10 几种子波能量分布



### 三、地震波的基本类型

#### 1. 体波

地震波的传播实质上是岩层中弹性形变的传递。物体受应力作用后的应变一般具有两种形式,即平动和转动。平动是指平移或体积形变,具有这种运动形式的波称为纵波。转动是指物体形状变化,又称剪切应变,具有这种运动形式的波称为横波。两种形变状态以其本身的速度从震源向外传播。这两种波都是体波,都在无限均匀介质中传播。

##### 1) 纵波(P波)

已知纵波传播的扰动是体积膨胀(或压缩)类型。当弹性体受胀缩力的作用时,弹性介质将发生伸缩形变。反映在介质内的质点层面之间,在纵波传播的路径上,形成一系列的膨胀带和压缩带,如图 1-1-11 所示。图中的 AB 区是压缩带,而 BC 区则是膨胀带。在另一时刻,原来的压缩带变成了膨胀带,而原来的膨胀带却变成了压缩带。这种由近而远、胀缩相间的交替过程向外传播,就形成了波,这种波称为纵波。质点的振动方向与波的传播方向一致。由于它的质点振动是胀缩型的,所以这种波又称为胀缩波。

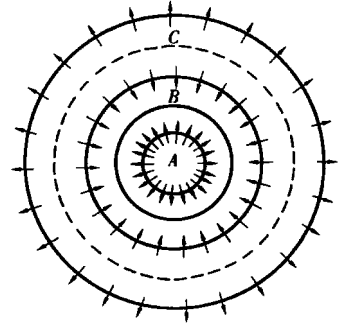


图 1-1-11 球面纵波的质点位移

##### 2) 横波(S波)

当弹性体受剪切力作用时,弹性介质将产生切变。反映在介质的质点层面之间,将发生横向交错,从而引起介质中的质点产生横向振动。这种由近及远、质点交错横向振动向外传播,也形成一种波,称为横波。在横波传播中,质点的振动方向与波的传播方向垂直,如图 1-1-12 所示。由于横波是由物体受到剪切力产生的,所以又称为剪切波。横波分为两种形式:如果质点的横向振动发生在波传播方向的垂直平面内,这种横波称为 SV 波;如果质点的横向振动发生在波传播方向的水平面内,这种横波称为 SH 波,如图 1-1-13 所示。



图 1-1-12 球面横波的质点位移

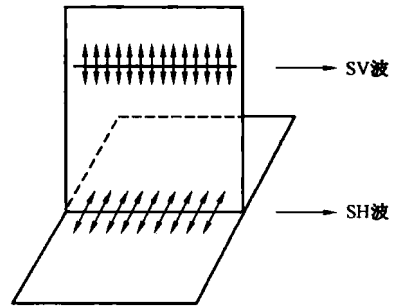


图 1-1-13 SV波和SH波

#### 2. 面波

在无限均匀介质中,只产生纵波和横波,它们都是体波。但在地表与空气接触的自由表面