



6

大港油田科技丛书编委会编

地震勘探资料采集技术



石油工业出版社
P E T R O L E U M

I N D U S T R Y P R E S S

登录号	135342
分类号	P631.16
种次号	069

大港油田科技丛书 6

地震勘探资料采集技术

大港油田科技丛书编委会编

5971/25



石油大学0135471

石油工业出版社

内 容 提 要

大港探区已进行了三十多年的石油地震勘探。大港的地震工作者在长期的生产中积累了丰富的实践经验,逐步形成了自己的特色。他们把地震勘探的基本原理和这些经验特色结合起来写成了这本书,奉献给读者。本书介绍了地震勘探的基本原理和方法以及这些原理和方法在生产实践中的应用,并通过典型实例,介绍了有大港特色的几项采集技术,介绍了目前比较先进的地震专用仪器和装备。本书对从事地震勘探的技术人员有一定的参考价值,对石油勘探专业的大专院校学生完成从理论到实践的过渡也有一定的帮助。

图书在版编目(CIP)数据

地震勘探资料采集技术/大港油田科技丛书编委会编.
北京:石油工业出版社,1999.9
(大港油田科技丛书;6)
ISBN 7-5021-2793-3

I. 地…

II. 大…

III. 地震勘探-地震数据-数据处理

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 60015 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 260 千字 印 1—2300

1999 年 9 月北京第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2793-3/TE·2186

定价: 18.00 元

大港油田精神文明丛书总编委

主 任：王 鹏 姚和清

副 主 任：张德寿（常务）

主任委员：孙希敬 陈玉瑾 高兰成 朱敬成 郭德宝 张大德
俞叔武 于庄敬 薛士荣 刘志谦 王鹤龄 于树方
蒋永佑 华勇魁 于秋云 王兴隆 段新坎 黄建庆
李润寿 张国欣

大港油田科技丛书编委

主 任：孙希敬

副 主 任：张大德 于庄敬（常务） 薛士荣

委 员：吴永平 曲经文 周嘉玺 李文瑞 马世煜 毛立言
宋伯韬 周学仁 李学文 刘鸿斌 牟祥汇 孙宝绪
李 淦 王巧月

序

大港油田三十多年来在勘探、开发和建设方面都取得了长足的进步，物质文明和精神文明建设结出丰硕成果，创造了许多成功经验，这些都是广大职工共同努力，发扬艰苦奋斗、顽强拼搏、无私奉献的创业精神的结果。为了使这些成果和经验系统化、理论化，形成财富，促进油田勘探开发建设进一步发展，经济效益大幅度提高，大港油田领导提出编写大港油田“科技丛书”。这个安排引起油田党委的重视，经过认真研究，决定扩大“丛书”编写范围，于1997年5月油田党、政联合下发文件，决定编撰“大港油田精神文明建设丛书”，成立了精神文明建设丛书编委会，下设七个系列，“科技丛书”是其中之一，并成立了编委会。

“科技丛书”怎样写，以哪些读者为对象，写成什么样的书，对这些问题我们花费了较长时间，听取了各方面的意见，进行广泛深入讨论，逐渐形成了明确的指导思想。大家认为这套“丛书”应有独特的品质，它不同于教科书，不同于科普读物，不同于论文集，不同于经验总结（成果汇编），也不同于工具手册。要突出“科技”和“大港”两个特色。“科技”特色是总结大港油田三十多年极其丰富的科学技术实践和创造发明，做到有理论基础、方法原理、实用程序和实践成果，在“科技”特色的基础上，突出“大港”特色，写出大港发明创造的技术，在国内外有影响的技术，使用过的技术，试验过的技术，并有成功和失败的实例分析，还要讨论一些技术的实用性和发展方向，全书不是简单的技术描述和实际案例分析，而是一次再提高再创造，使读者特别是中青年科学技术人员和各级管理干部，还有非本专业的技术人员，有原理可查，有方法可学，有实例可看，有经验可借鉴，起到承上启下的作用。

这套“丛书”为广大读者提供大港油田科技发展的历程。大港油田三十多年的发展建设，经历了风风雨雨，有成功的经验和失败的教训，学会借鉴前人的经验和教训，少走弯路，杜绝重复劳动，对我们事业的兴旺发达和科技人员成长都有一定的好处。“丛书”还展示了大港油田的科技全貌，反映了大港油田的技术状况，为广大青年技术干部、各级管理人员和非本专业技术干部了解油田技术状况修通了高速公路。还应说明，活跃在大港油田勘探开发早、中期各条战线的技术骨干，现在多数已经退休，在工作上完成了交接。有许多退休老专家参加“丛书”的编撰工作，把他们多年积累的宝贵经验留下来，也算老专家们在技术上对大港油田的干部职工有了个好交代。这套“丛书”正式出版适逢大港油田勘探开发建设三十五周年之际，谨以此书献给为大港油田建设做出卓越贡献的人们。

这套“科技丛书”，按照油田的习惯说法，包括十个专业共24册约800万字。即：

- 第一册 勘探历程与经验
- 第二册 第三系石油地质基础
- 第三册 油气藏与分布
- 第四册 新区、新层系、新领域
- 第五册 地质实验技术
- 第六册 地震勘探资料采集技术

- 第七册 地震勘探资料处理和解释技术
- 第八册 大港油田开发实践
- 第九册 枣园高凝高粘中低渗断块油田开发
- 第十册 提高采收率技术
- 第十一册 油气藏探边测试方法与应用
- 第十二册 钻井工程技术 (1)
- 第十三册 钻井工程技术 (2)
- 第十四册 钻井工程技术 (3)
- 第十五册 滩海工程技术
- 第十六册 录井技术
- 第十七册 测井技术 (1)
- 第十八册 测井技术 (2)
- 第十九册 电泵采油与分层注水
- 第二十册 防砂工艺技术
- 第二十一册 压裂与酸化工艺技术
- 第二十二册 试油与油井大修
- 第二十三册 油田地面工程设计与施工
- 第二十四册 石油炼制

为了编撰好“丛书”，确保达到设计要求，使各分册有个好质量，编委会认真研究精心设计各册编写提纲，这是写好“丛书”的基础。安排章节的作者力争由学科带头人执笔，分册负责人全文贯通，提出修改意见、把关，负责完成初稿，这是保证“丛书”质量的重要环节。然后由编委会组织6至7名专家进行审查定稿。尽管这方面我们做了不少工作，由于水平有限，错误在所难免，敬请读者批评指正。

孙希敬

1999年2月4日

前 言

在石油勘探史上,地震勘探作为一种较为优越的勘探方法和手段,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。特别是与其它勘探方法相比,其较低的投入、较高的回报,为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 80 年代以来,计算机技术发展突飞猛进,硬件不断小型化,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。

大港油田自 1964 年投入较大规模勘探以来,至 80 年代中期基本完成了全盆地大部分地区的二维地震详查,钻探井和详探井 2416 口,发现了 12 个油气田。随着勘探成熟度的不断提高,较易发现的圈闭面积越来越少,提高地震勘探精度已成为当务之急。在此条件下,大港油田在原中国石油天然气总公司的领导与支持下,完成了诸如多道遥测数字地震仪、两栖野外作业车、滩海特种运载装备、IBM 4381 和 3083 计算机、西方地球物理公司地震资料处理系统、GEOQUEST 解释系统等一系列技术改造。到 90 年代,整个黄骅坳陷的主要含油区带已基本为三维地震资料所覆盖,高分辨率地震勘探技术、VSP 技术等先后得到了应用与推广。在这期间,大港油田的广大地震勘探工作者本着立足油田、服务油田的基本方针,努力提高勘探精度,不断吸收国内外地震勘探新技术、新方法,并结合大港探区的实际情况,进行了一系列不懈的探索,取得了许多宝贵的经验。

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,是很难再有补救的机会的,因此采集阶段工作显得格外重要。根据大港探区勘探工作的实际需要,大港油田物探公司在野外采集方面先后攻克了滩海、城区、山地、低信噪比地区等一系列难点区的采集技术,同时在高分辨率地震资料采集方法上也取得了可喜的进展。

随着社会主义市场经济政策的逐步实施和油田勘探市场的相继开放,大港油田物探公司先后将自己多年探索形成的地震采集技术推广应用到了华北油田、冀东油田、辽河油田、胜利油田和大庆油田等探区,并为多家外国石油公司提供了大量地震勘探反承包服务,所提交的成果获得了用户的好评。

本书旨在总结大港油田集团公司的地震勘探发展历程和现行地震采集技术,展示大港油田集团公司的科技水平,为进一步实现“科技兴油”做贡献。书中所列举的实例以大港探区为主,也列举了少量大港油田物探公司所完成的外探区及国外项目实例。

大港油田科技丛书编委会地球物理专业负责人毛立言对本书编写提纲进行了整体构思,编写人为:第一章:毛立言、顾培城;第二章第一节毛立言、郭德荣,第二、三节:王梅生、

周宝华、王其华，第四节：顾培城，第五、六节：郭德荣、毛立言、季国兴，第七节：王梅生，第八节：王长春、熊金良；第三章第一节：顾培城、郭德荣，第二节：季国兴，第三节：王梅生，第四节：王长春、王其华，第五节：郭德荣、季国兴，第六节：顾培城；第四章第一节：车宝堂、代远军，第二节：陈正华，第三节：周宝华。全书由王长春、顾培城完成统稿，最后由毛立言、赵学平、胡德胜、肖景华、杨在岩、王光奇等审查后定稿。

由于我们工作领域在我国东部地区，技术上难免存在一定的局限性，又因水平所限，错误在所难免，敬请批评指正。

《地震勘探资料采集技术》编写组

1999年8月6日

目 录

第一章 地震波基本原理简介	(1)
第一节 地震波的形成.....	(1)
第二节 地震波传播的运动学特征.....	(2)
第三节 地震波传播的动力学特征.....	(5)
第四节 地震波入射到分界面上的传播规律.....	(9)
第五节 地震波的分类.....	(11)
第六节 地震勘探中常用的地下介质模型.....	(13)
第二章 地震资料采集技术	(15)
第一节 石油地震勘探技术的发展.....	(15)
第二节 观测系统.....	(19)
第三节 地震波激发技术.....	(26)
第四节 地震检波器及其接收条件.....	(40)
第五节 地震勘探中的干扰波.....	(60)
第六节 资料采集的几项重要技术工作.....	(69)
第七节 试验工作.....	(74)
第八节 地震勘探最新技术的发展.....	(76)
第三章 大港地区现行地震勘探技术	(88)
第一节 滩海地区地震资料采集技术.....	(88)
第二节 城区地震资料采集技术.....	(94)
第三节 山地地震资料采集技术.....	(102)
第四节 高分辨率地震资料采集技术.....	(107)
第五节 低信噪比地区地震资料采集技术.....	(114)
第六节 VSP 资料采集技术	(119)
第四章 大港探区地震勘探配套技术与装备的发展	(127)
第一节 地震勘探测量.....	(127)
第二节 地震记录仪器.....	(133)
第三节 海滩特种运载设备.....	(153)
参考文献	(158)

第一章 地震波基本原理简介

石油勘探实践证明,地震勘探与钻井相配合来寻找油气田,是一种行之有效的勘探方法。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。因此,地震波原理是地震勘探的理论基础^[1~2]。由于本书是一本技术参考书,而不是教科书,所以编写本章时,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。

第一节 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,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)。

一、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。

二、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。

三、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,在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

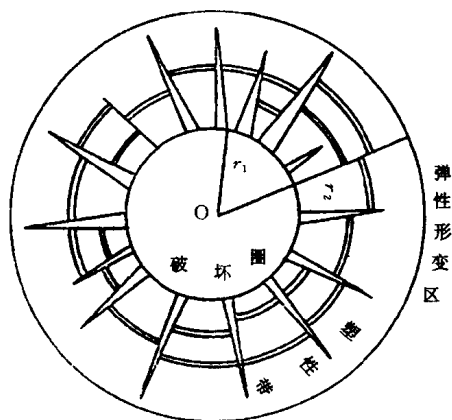


图 1-1 爆炸冲击力作用下的岩层形变

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。

第二节 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。

一、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,见图1-2。

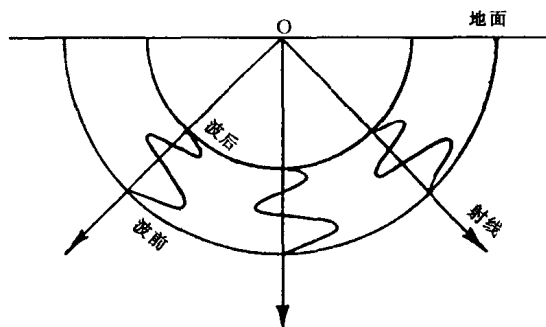


图1-2 波前、波尾与射线

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。

二、射线与射线原理

地震波的传播,除了可以用波前来说外,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它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。

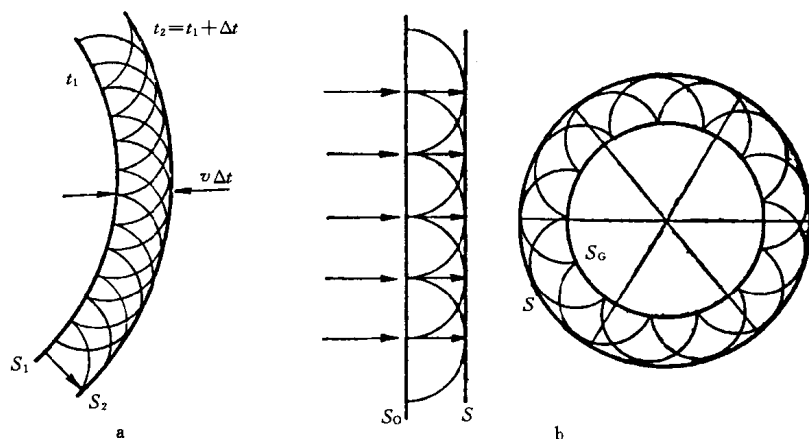


图 1-3 均匀介质中的波前求取方法

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

三、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 360 道、480 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。

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，所以我们在本书中不再重复，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 。

直达波的时距曲线方程为：

$$t = x/v \quad (1-1)$$

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：

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{4H^2 + X^2} \quad (1-2)$$

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。

四、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：

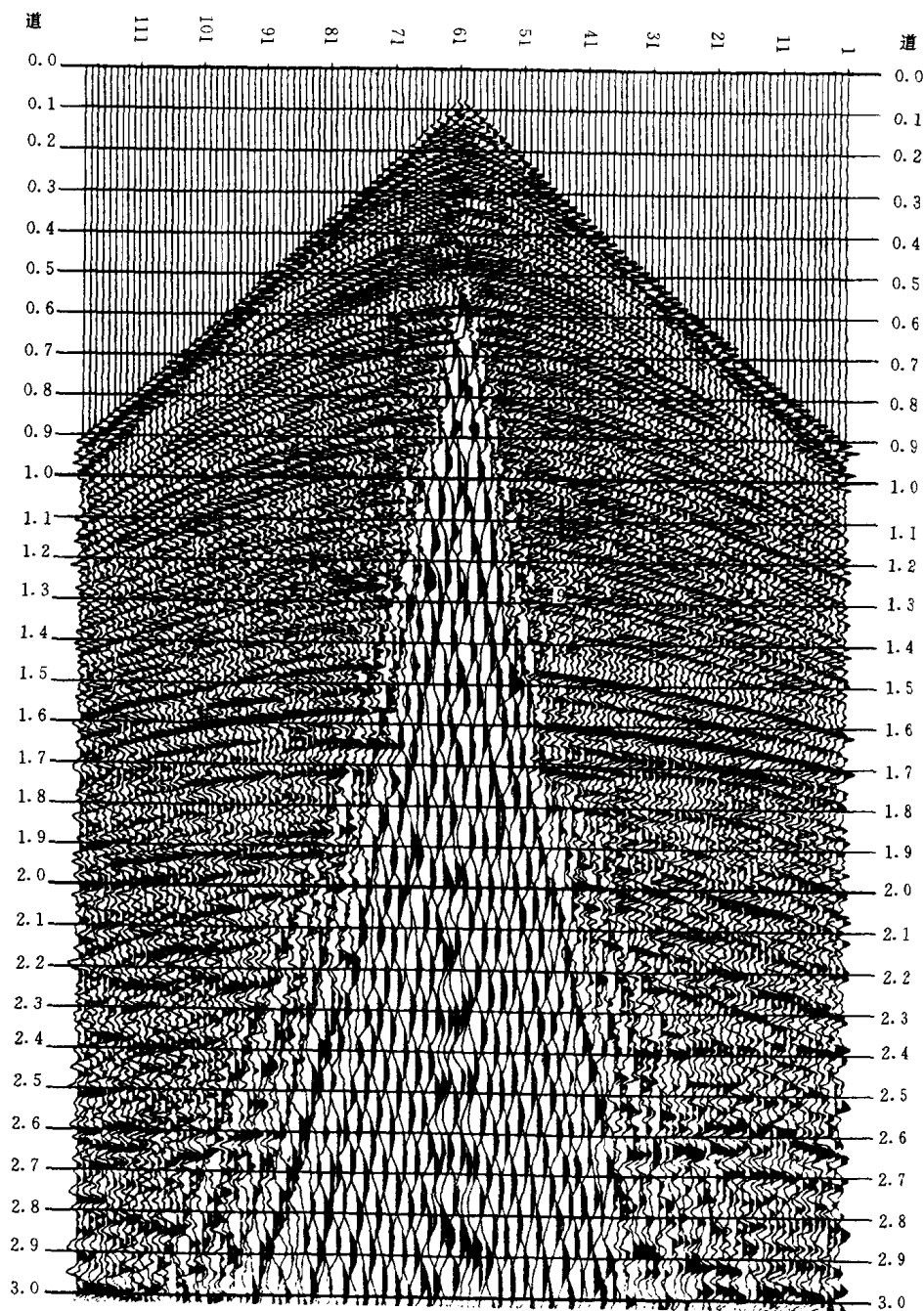


图 1-4 孔店—羊三木地区的原始地震记录

$$v^* = \frac{dx}{dt} \quad (1-3)$$

上式表示，视速度是时距曲线斜率的倒数。

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

$$v^* = v / \sin \alpha \quad (1-4)$$

$$\lambda^* = \lambda / \sin \alpha \quad (1-5)$$

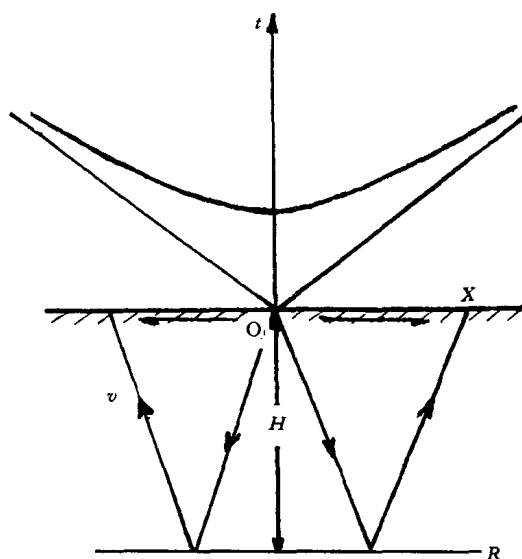


图 1-5 直达波和反射波的时距曲线

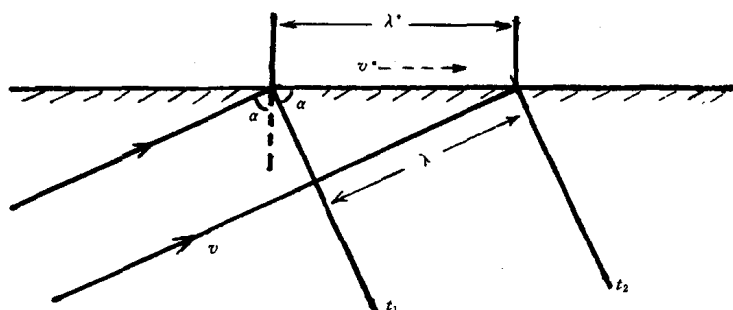


图 1-6 视速度与真速度的关系

因为恒有 $\sin\alpha \leq 1$ ，所以视速度总是 $\geq$ 真速度，视波长总是 $\geq$ 真波长。

第三节 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 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。

一、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。

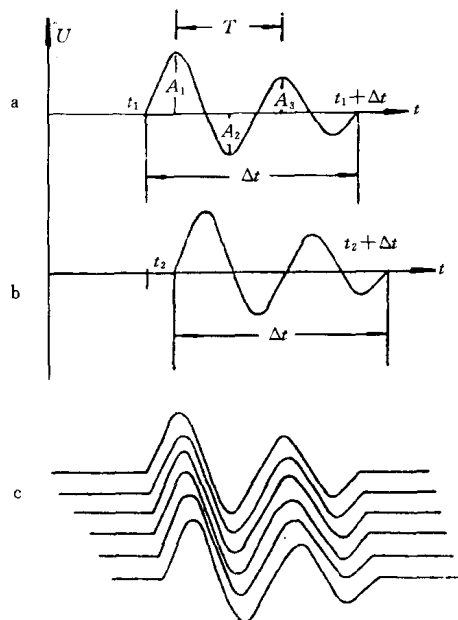


图 1-7 地震波振动曲线

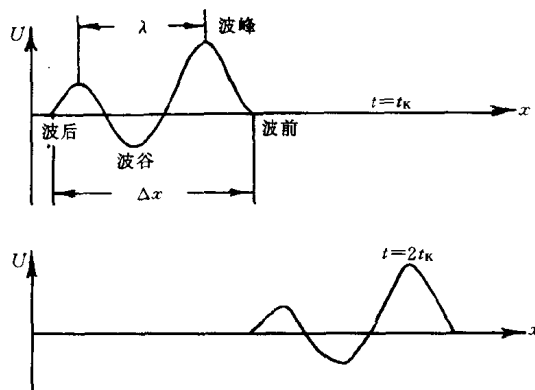


图 1-8 地震波波剖面

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。

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

$$\lambda = Tv = v/f = 1/k \quad (1-6)$$

地震脉冲波的视参数与波速 v 也有类似关系：

$$\lambda^* = T^*v = v/f^* = 1/k^* \quad (1-7)$$

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^* 和视波长 λ^* ，是在任何情况下都要特别强调的。

二、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。与其它物性参数相比较，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。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 $A_1, A_2, \dots, A_n$ ，平均振幅 A 定义为：

$$A = \sum_{i=1}^n A_i / n \quad (1-8)$$

3) 均方根振幅：假设条件同上，均方根振幅 A_r 定义为：

$$A_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 / n} \quad (1-9)$$

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：

$$A = D_s D_d D_a R D_t D_r D_x A_0 \quad (1-10)$$

式中 A_0 ——地震波初始振幅；

A ——地震反射波的最终记录振幅；

D_s ——综合的激发条件造成的衰减因子；

D_r ——综合的接收条件造成的衰减因子；

D_d ——波前发散因子；

D_a ——介质吸收衰减因子；

R ——反射系数；

D_t ——中间界面透射损失因子；

D_x ——综合其它因素（如面波、声波、侧面波、异常波、环境噪音等干扰波）造成的衰减因子。

三、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：

$$E = C \rho \tau f^2 A^2 \quad (1-11)$$

式中 C ——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：

$$\omega = C \rho f^2 A^2 \quad (1-12)$$

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 :

$$I = \omega V = C\rho V f^2 A^2 \quad (1-13)$$

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。

四、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”,1.6s 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:620~820ms,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,主频估计约为 50Hz;1.6s 反射波频宽 6~50Hz,主频大约 30Hz;2.5s 反射波频宽很窄,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。

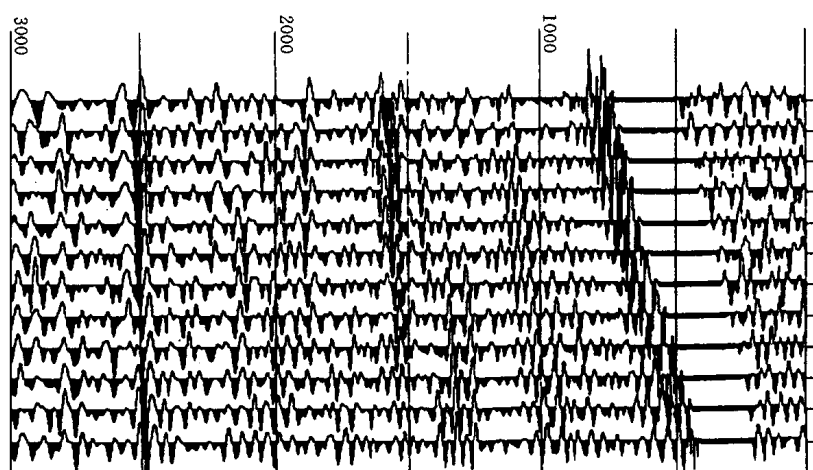


图 1-9 野外原始地震记录