



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

勘探地震学教程

陈传仁 李国发 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校石油天然气类规划教材

勘探地震学教程

陈传仁 李国发 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了勘探地震学的基本原理和方法,对几何地震学、地震数据采集、共中心点叠加原理、地震波的速度、地震勘探资料解释和几种常用的地震方法等内容做了详细的介绍。

本书可作为石油院校地球物理、地球物理测井、石油地质等相关专业的教材,也可供石油行业相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

勘探地震学教程/陈传仁,李国发主编.

北京:石油工业出版社,2011.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.高等院校

石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-8527-5

I. 勘…

II. ①陈…②李…

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(2011)第 128748 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) 64251362 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:17.5

字数:437 千字

定价:30.00 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

2004年10月,中国石油教育学会和石油工业出版社组织石油高校召开了石油地质与勘探专业教材规划研讨会。在此会议上,本教材被列为高等院校石油天然气类规划教材。2008年11月,由石油工业出版社组织石油高等院校老师在长江大学召开了本教材的编写大纲研讨会,本书是根据此次会议确定的大纲编写的。

本书具有以下几个方面的特点:

(1) 结构合理,重点突出。本书按地震勘探采集、处理、解释的三个主要环节,分列了第二章、第三章、第五章,在这三部分中,考虑到地震资料数字处理单独设有课程,重点突出采集和解释两部分。第一章重点讲述几何地震学原理,对物理地震学的概念则尽量简化。对地震勘探中非常重要的速度概念,则单列了第四章。本书对基本概念、基本理论和基本方法的阐述力求简洁,将复杂的公式的推导过程尽量简化。第六章仅对几种常用的地震方法作了概述,使读者对这几种方法有最基本的了解。

(2) 内容取舍得当,篇幅适中。考虑到该专业“弹性波动力学”和“信号分析与处理”都单独设有课程,因此,对这两方面的内容不单列章节。但注意到了与这两部分内容的衔接,除对个别重要的概念作一般的讲述外,一般不作过多的讲述,避免重复,这使得本书的篇幅大为压缩。目前该课程的理论教学大多在80学时左右,因此,本书的内容取舍比较适中。

(3) 既具有实用性又具有先进性。本教材既保证了课程的基本内容,又尽量把新的比较成熟的勘探理论和方法写进教材,以缩小教学内容和实际生产需要之间的差距。如加强了三维勘探方面的内容,介绍了海上勘探、变速成图、波阻抗反演、地震属性分析、储层预测等方面的内容,第六章介绍了垂直地震剖面法、多波多分量地震勘探、四维地震勘探和微震监测技术等较新的地震勘探方法和技术。

本教材由陈传仁(长江大学)和李国发[中国石油大学(北京)]主编。其具体编写分工为:朱广生(长江大学)编写绪论,陈传仁编写第一章和第二章第九节,苏海(西安石油大学)编写第二章第一节至第八节,张明学(东北石油大学)编写第三章,毛宁波(长江大学)编写第四章,李国发编写第五章,桂志先(长江大学)编写第六章,陈传仁负责统稿。

我们深知,教材的编写工作是一项长期而艰巨的任务,且责任重大,不仅直接影响着人才的培养质量,也直接影响读者的思维方式和思想方法。虽然我们做了努力,但限于水平,书中错误和缺点在所难免,敬请使用本教材的广大师生和读者批评指正。

编者

2011年4月

目 录

绪论	(1)
第一节 勘探地震学概述	(1)
第二节 勘探地震学发展简史	(2)
第三节 我国地震勘探发展简史	(6)
第一章 几何地震学	(9)
第一节 地震波的传播	(9)
第二节 一个分界面情况下反射波的时距曲线	(17)
第三节 多层介质情况下的反射波时距曲线	(27)
第四节 连续介质中地震波的运动学	(32)
第五节 地震折射波运动学	(39)
第六节 多次反射波	(47)
第二章 地震数据采集	(52)
第一节 地震勘探分辨率	(52)
第二节 地震勘探线布置	(60)
第三节 反射波法观测系统	(67)
第四节 地震波的激发	(81)
第五节 地震波的接收	(91)
第六节 地震干扰波	(96)
第七节 表层结构调查	(106)
第八节 海上地震勘探概述	(118)
第九节 地震勘探组合法	(124)
第三章 共中心点叠加原理	(150)
第一节 共中心点时距曲线方程	(150)
第二节 共中心点叠加原理	(152)
第三节 多次叠加的特性	(155)
第四节 多次叠加的频率响应和统计效应	(165)
第五节 影响叠加效果的因素	(169)
第四章 地震波的速度	(172)
第一节 几种地震速度的概念	(172)
第二节 影响地震速度的主要因素	(177)
第三节 地震速度参数的测定方法	(186)
第四节 地震速度之间的相互关系	(194)
第五章 地震勘探资料解释	(203)
第一节 地震剖面 and 地震切片	(203)
第二节 地震剖面的对比解释	(206)

第三节	地震反射层位的地质解释·····	(208)
第四节	断层解释·····	(212)
第五节	典型地质现象的反射特征和解释·····	(217)
第六节	地震构造图·····	(221)
第七节	地震地层学简介·····	(225)
第八节	地震资料岩性解释和储层预测·····	(229)
第六章	几种常用的地震方法·····	(241)
第一节	垂直地震剖面法·····	(241)
第二节	多波多分量地震勘探·····	(250)
第三节	四维地震勘探·····	(260)
第四节	微震监测·····	(267)
参考文献	·····	(271)

绪 论

第一节 勘探地震学概述

勘探地震学是应用地球物理学的一个分支。地球物理学是利用物理学原理研究地球的科学。应用地球物理学则主要研究地壳较浅部分的地层、构造和矿藏,如沉积盆地的大小、基底深度和结构、地层、次级构造单元,背斜、向斜、断层,工程地质涉及的近地表地层结构,溶洞等,以及铁、铀、煤、油、气、水等矿藏。应用地球物理学包括地震勘探、重力勘探、磁法勘探、电法勘探、放射性勘探及矿场地球物理(测井)方法等。

勘探地震学是利用岩石的弹性性质研究地下矿床和解决工程地质、环境地质问题的一个学科。通常,用人工激发地震波,地震波通过不同路径传播后,被布置在井中或地面的地震检波器及专门仪器记录下来。这些地震波携带有所经过地层的丰富地质信息,计算机对这些地震记录进行处理分析,并用计算机、人工或人机对话方式对处理后的地震资料进行解释,便可知道地下不同地层的空间分布、构造形态、岩石性质,直至可以了解地层中是否含有石油和天然气等,并可解决大坝基础、港口、路、桥的地基、地下潜在的危险区等工程地质问题,以及环境保护、考古等问题。根据波传播路径不同,地震勘探分为反射波法、折射波法和透射波法。目前,绝大多数国内外地震队使用反射波法。按照所使用的地震波的类型讲,绝大多数是单一的纵波,少数使用多波多分量地震法。某些情况下,使用专门设计的专门地震方法解决特定问题,这些专门的地震方法有垂直地震剖面法、井间地震法、垂直电缆法、微地震(又称无源地震)法等。

勘探地震学是为寻找石油和天然气而发展起来的。几乎所有的石油公司都要依靠地震资料来确定每一口探井和采油井位置,世界绝大多数油气田都是先由地震工作找到构造,再由钻井发现的。现在,油气田开发与管理越来越依赖于地震工作。我国现有油气田中绝大多数也是根据地震资料进行钻探发现的。就是在光点地震仪年代,在发现克拉玛依油田和大庆油田中,地震勘探也起到了很大作用(王尚文等,1983)。大庆油田的发现井——松基3井,其井位曾几经变动。最后,在研究了最新一批地震勘探成果后,才由高层决策定下了这口至关重要的基准井井位,导致这个世界著名大油田的发现。正因为有无数这样的实例,地震勘探在石油工业中得到了普遍应用。世界地球物理勘探费用中,地震勘探约占95%以上;重力、磁法、电法、放射性及测井等地球物理方法的费用加在一起尚不到5%,地震工作在石油工业中举足轻重的地位也由此可见一斑。图0-1-1表示我国地震勘探工作量与油气新增储量的关系(3D地震工作量按1:10折算成2D地震公里数)。由图0-1-1可知新增油气储量与地震工作量有密切关系。反过来,新油气田的发展也进一步刺激了地震勘探的发展。

目前,世界上还没有一种探测方法能象勘探地震学那样对地下介质作出整体的精确而详细的三维描述,无论是重力、磁法、电法、放射法或测井等地球物理方法,还是钻井、地质等其他方法,就地层描述的垂向分辨率而言,地震方法远不如测井方法,可惜测井描述的仅仅是沿井壁附近的地层,钻井也是如此。然而钻井可对井孔地层进行直接观测,地震勘探是一种间接

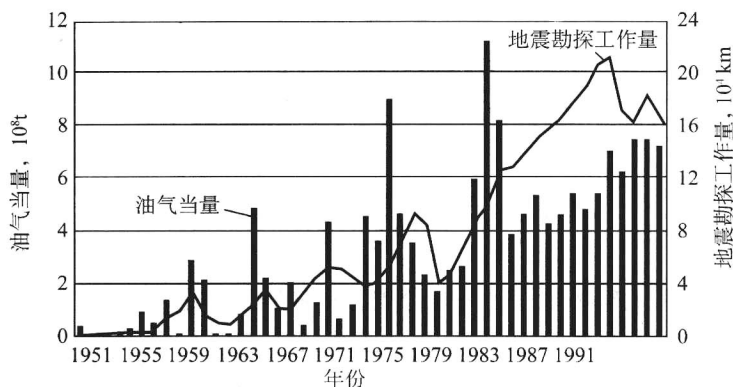


图 0-1-1 地震勘探工作量与油气新增储量关系图
(据张德忠, 2000)

测量方法, 因此, 地震资料在进行处理和解释时要用已有钻井数据来标定。地震资料只有在结合钻井资料、测井资料、地质资料及其他地球物理资料进行处理和综合解释后才会获得更可靠的信息和成果。地震资料所获得的成果的正确与否最终也必须用钻井结果来验证。

第二节 勘探地震学发展简史

勘探地震学是由研究天然地震的地震学孕育而来的。地震勘探作为一种工业方法, 在其实现真正工业应用前, 经历了漫长的思想与基础理论准备, 天才的先驱们科学设想与艰辛的理论探索为勘探地震学奠定了牢固的基础。古代科学家们当初观测研究的是天然地震, 这一自然现象给先人们带来巨大的灾难和恐怖。人类最早的天然地震的记载是中国帝舜 35 年 (公元前 2221 年) 蒲坂 (今山西永济县蒲州老城) 一带地震 (《太平御览·咎征部》卷 880), 这比西方文献知道的古埃及最早地震记载早 21 年。公元 132 年东汉时的张衡 (图 0-2-1) 制成了一台观测天然地震的仪器—当时叫“地动仪” (图 0-2-2), 这是世界上第一台地震仪。1883 年世界公认的现代地震学奠基人, 英国人 John Milne 是将张衡地动仪介



图 0-2-1 张衡画像

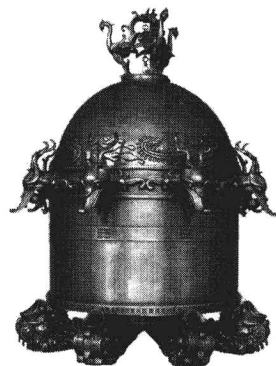


图 0-2-2 张衡地动仪 (冯锐模型)

绍到西方的第一人，他写道；“根据我们所见的史料，最早的验震器是中国人张衡创制的。”他绘制了张衡地动仪复原模型，认识到张衡地动仪的工作原理是悬垂摆。他与 Ewing 等设计的第一台现代意义上的地震仪用的就是悬垂摆原理。前苏联著名地球物理学家顾尔维奇教授曾明确指出张衡发明的地动仪是世界上第一台地震仪，同时指出它的结构已具备现代地震仪的基本特点。世界著名自然科学史家英国人李约瑟在其巨著《自然科学史》中指出“地震仪的鼻祖出在中国，这一点是无可置疑的，……不少西方地震学家，如 Milne, Sieberg 和 Berlage 等都曾坦率地承认张衡在这方面的巨大功绩。”

1760 年至 1761 年，剑桥大学提出地震的振动是弹性波传播所致。1818 年关于波的传播理论的研究报告获得了法兰西研究院最高奖。约在 1828 年，S. D. Poisson 从理论上证明了纵波和横波都可独立存在。1841 年，苏格兰人 J. D. Forbes 发明了一台地震仪，不久又发明了一台粗糙的振动自动记录器。他这台地震仪比张衡的地震仪晚了 1700 多年。1846 年，爱尔兰人 R. Mallet 提出了地震波反射、折射的概念，并提出关于将地震观测应用于解决地质问题的设想；1848 年，他进一步提出了用以研究地质问题的建议，这无疑是人类首次提出用人工地震研究地壳浅层结构的设想；1849 年，他发明了一种检波器；1851 年，他用火药激发人工地震并记录下人工地震波的特征，测定了砂岩和花岗岩中面波的速度。1876 年，美国人 H. L. Abbott 用 5000lb (1lb = 0.45359kg) 黄色炸药人工激发地震波，并测量了地震波的速度。1881 年，John Milne 及其合作者在日本用落重法激发地震波，因此，成为现代落重法非炸药震源的创始人。

从 1890 年到 1914 年第一次世界大战爆发这段时间内，地震学理论取得了巨大进展。这期间各国科学家作出了许多重要贡献，其中包括俄国的加里津，日本的 F. Omori，南斯拉夫的莫霍洛维奇，苏格兰的 J. D. Forbes，英国的 J. Michell、J. W. Strutt、A. E. H. Love、E. Wiechert 和 K. Zoeppritz。在此期间，爱尔兰人 R. Mallet 的研究成果已具备地震勘探法思想。德国格丁根大学地球物理研究院的 E. Wiechert 组织了一个国际地球物理学家组，他的合作者和学生中有 L. Geiger、B. Gutenberg 及 L. Mintrop。他们在地震学理论不同方面的杰出成就为后来的勘探地震学的发展奠定了理论基础。

在第一次世界大战前，科学家们已为地震勘探的诞生作好了充分的理论准备。事实上，第一次世界大战前，地震波的理论研究工作已远远走在实验工作的前头，研究人员已完成了地震波的激发、接收，此时原始的记录方法已具雏形，并且完成了使用初期设备的野外试验。

任何工业方法都是为适应社会经济发展的需要而产生的，地震勘探方法是由战争催生的，并为适应战后经济发展而最终形成。

1912 年 4 月 14 日午夜，Titanic 号在其处女航中撞上冰山沉没，1635 人罹难。在 Titanic 号沉没后，美籍加拿大人 R. A. Fessenden 研究了探测冰山的方法，于同年晚期发明了用声波探测冰山的方法和仪器，还进一步认识到这种方法用于确定地下矿体位置的潜力。1914 年，Fessenden 提出了声波探测器的专利申请，这一方法第一次利用反射波实现了探测。1917 年，Fessenden 在美国获得了“用于确定矿体位置的方法和装置”的专利。

第一次世界大战期间，协约国和德国双方都致力于测定重炮炮群位置的相关方法和仪器的研究。德国力图根据重炮发射时反冲产生的地震波确定重炮炮群位置；美国发展了声学测距法测定重炮炮群位置。双方参加这项工作的有 L. Mintrop、B. McCollum、J. C. Karcher 及 E. A. Eckhardt 等人。战后，这些人都为地震勘探方法的形成做出了开拓性贡献。

第一次世界大战后，经济恢复，市场对石油的需求迅速增长，而用地面地质的方法寻找石油的收益却开始下降，地震找油法便应运而生了。1919年，德国人 L. Mintrop 在德国申请了地震折射波法专利，并和 K. Lehmann 改进了地震仪，成功地进行了测定煤层深度的实验。1921年 Mintrop 成立了一家“Seismos”地震公司，这是地震勘探工业化的正式开始。Mintrop 地震公司于1924年6月在 Orchard 发现了一个盐丘，该盐丘在1926年钻探见油，这是世界上第一个地震勘探的发现。这个成功大大提高了各个石油公司对应用地震勘探的兴趣。1925年至1930年，多家大石油公司先后雇用 Mintrop 地震公司的地震队，发现了一系列盐丘，其中一些被钻探证实产油（有些还是高产井）。这一时期，Mintrop 地震公司使用的地震折射波法获得了巨大的成功，因此，也引发了地震折射波法的大规模应用。

在 Mintrop 地震折射波法兴起和迅速发展的同时，地震反射波法亦在萌发之中。1919年，Karcher 和 McCollum 申请了3项有关地震反射波法的专利。1920年，英国皇家学会会员 J. W. Evans 和 W. B. Whiteley 在英国申请了“地壳内部构造研究方法的改进”专利，这份专利明确地提出了地震反射波勘探方法。1921年，Karcher 和 Haseman 等在美国俄亥拉荷马市附近的 Arbuckle 山一带进行了地震反射波法试验性勘测，他们在已知的 Vines Branch 背斜上作了一条地震反射波法剖面，获得了一些清晰的反射波记录，并作出了 Viola 顶面构造的剖面图。

1925年，Amerade Rycade 与 Karcher 创建了地球物理研究公司（GRC）。1929年，GRC 的一个地震队在 Louisiana 的海湾地区用地震反射波法对已知的 Darrow 盐丘进行详查，从而发现了 Darrow 油田。钻井资料表明，地震反射波法作出的构造图比地震折射波法和扭称法作出的构造图精度都高，自此地震反射波法的优点显示出来。1929年秋，GRC 又在 Oklahoma 州的 Seminole 地区，用地震反射波法找到了几个小构造。1930年，根据钻探结果，在其中的3个构造上发现了3个重要的油田。这些重要的发现证明了地震反射波法的有效性和工业价值。因此，地震反射波法很快成为石油勘探中占主导地位的勘探方法。

值得指出的是，1930年苏联学者甘布尔采夫彻底改进了地震折射波法，创造了“对比折射法”，不仅记录利用初至折射波，还可对比追踪出中深层界面产生的折射波，大大改进了地震折射波法，提高了精度，加深了勘探范围。20世纪50年代中期，地震折射波法达到了鼎盛时期。虽然现在地震折射波法不再是主要的地震勘探方法，但由于它具有能直接计算出折射界面下的地层速度等优点，地震折射波法在低速带测量和地壳测深等方面仍然是不可缺少的方法。

在此期间，地震反射波法的地震仪器也得到了长足发展，到1930年末，地震仪器系统已达到12道，并采用了道间混波，每道用6个甚至更多个检波器组合。到1940年，出现了24道地震仪，具有带通滤波性能的自动增益放大器，具有多道混波能力，并采用了震源组合激发地震波和检波器组合检波法。

1945年第二次世界大战结束后，工业对能源需求的迅速增长使石油物探成了一个繁荣的工业。20世纪50年代初，地震勘探发生了革命性变化：1952年 Mobil 公司制成了世界上第一台模拟磁带地震仪（12道）及相应的室内资料处理用的磁带回放仪。模拟磁带地震仪的出现带动了数据采集方法的重大进展，它使得共深度点（CDP）法得以真正的广泛应用。非炸药震源也因模拟磁带地震仪的出现而迅速发展推广（例如落重震源，锤击震源），最重要的是在1953年由 M. Crawford 等制成并首次使用的可控震源（Vibroseis）。在20世纪60年代中期，海上出现了多种非炸药震源，如空气枪震源、电火花震源、蒸汽枪震源等。这些

新式震源的应用不仅提高了地震生产效率,扩大了地震勘探的适应范围,也保护了自然环境。

模拟磁带地震仪和磁带回放仪的出现,使地震记录得以在室内反复处理和再加工,大大改善了地震资料的质量,明显提高了地震勘探成果的精度和效果,这是地震勘探技术的一次质的进步。在计算机科学技术快速进步的背景下,勘探地球物理学发生了计算机革命。20世纪60年代,Texas 仪器公司和 Mobil 公司等联合开发了数字地震仪。1968年2月,Texas 仪器公司已推出了 DFSⅢ 数字地震记录系统,同时 Leach 提供的最新数字地震记录系统可达到 64 道。地震勘探正稳步向全数字化方向迈进。1978年,Phillips 石油公司推出了新的无线电遥测系统 Opseis 5500,它以无线电遥测电路代替了数据电缆。到 20 世纪 70 年代末,地震数据采集系统已能同时记录 1000 个地震道。近些年来,由于三维(3D)地震,特别是海上三维地震的发展,为降低成本,要求增加拖缆数目和放炮次数,高分辨地震勘探和高质量成像技术也都要求高密度采样,这推动了超多道地震仪的发展。在计算机科学进步的支持下,I/O、Western Geoc、PGS-Tensor 等大公司推出了超万道地震仪。目前超万道地震仪已投入实际应用,陆上已有 3 万道地震仪。

随着磁带地震仪和数字地震仪的发展,地震数据处理技术也随之发展起来。1953年,美国麻省理工学院有人研究应用信息论和电子计算机处理地震资料,此后人们发展了各种处理方法,从噪声背景中提取信号。到 20 世纪 60 年代初期,勘探地震学更广泛地引进了信息和计算机科学的成果,进一步发展了地震资料数字处理方法。地震资料数字处理方法不仅明显提高了构造解释的可靠性,而且可以从地震数据里提取各种信息,使地震勘探不仅可解决构造问题,而且可以研究岩性和储层的某些物性,使勘探地震学演进到开发地震学。

20 世纪 50 年代末,苏联人 Бамах 等已提出关于油—水接触面及气—液接触面产生反射的可能,及反射强度问题。20 世纪 60 年代,Эеицов 等报导了由实验证实,用反射资料根据上述判据发现油气层的可能性,但限于当时苏联的仪器和方法,这些成果没能在生产中应用。1967 年中国胜利油田的地球物理学家们已明确提出开发地震的概念。1968 年,Pennebaker 公布了利用从地震数据中提取的层速度资料预测储层压力的方法,在墨西哥湾地区取得了成功,开创了开发地震的先河。用地震资料直接预测油气储层一直是勘探地震学的主要目标,20 世纪最后的 20 年中出现了多种反演方法力图达到这一目的。20 世纪 90 年代初,中国学者杜世通、钱绍新分别发表了地震多参数模式识别技术的相关文章。尽管目前用地震资料直接预测油气藏的技术还存在各种问题,但已比当年的亮点技术可靠得多,且成功率要高得多。

在 20 世纪最后的 30 年里,在大型高速电子计算机发展的支持下,地震勘探技术从单纯研究构造,稳步地扩大到研究储层物性(如砂泥岩含量、孔隙度、地层压力等)、油气分布,并发展到对油气田开发进行监测和管理。

1970 年,Hilterman 发表了“三维地震模拟”的论文。同年,Welton 提出了三维地震勘探的概念。1972 年,Welton 发表了“三维地震方法”的论文。而此时计算机和地震仪的发展已为实施三维数据采集和处理准备好了条件,三维地震时代随之来临了。这标志着地震勘探进入更加精确的时代,在这个时代,地震技术借助各种数学方法、信息处理技术和计算机发展成果而快速发展。这也使得上述各种储层预测及油气田开发、管理的地震方法得以更精确地实现。随着大容量多道(上千道)地震仪的出现,使三维地震作为一种实用的地震数据采集技术在 20 世纪 70 年代确立了自己的地位。三维地震数据处理程序也随之发展起来,

并反过来对大型高速计算机的发展提出了新的要求。

地震工作站的出现是 20 世纪 80 年代地震技术的一个重要进展。地震资料解释工作一直落后于整个地震勘探技术的数字革命，当地震记录系统、野外数据采集技术、地震数据处理技术借助于电子计算机的发展而飞速进步时，地震解释的很多工作仍处于手工业的落后状态。地震解释的落后成为整个地震工作的瓶颈，阻碍了整个地震勘探技术的进一步发展，在此背景下，地震解释工作站（或人机联作解释系统、交互解释系统）应运而生。20 世纪 80 年代初，美国 GSI 公司最先推出 SIDIS 地震解释系统，到 20 世纪 90 年代初，国外已有 20 多个厂家生产地震解释工作站，而 Landmark 和 Geoquest 逐渐成为主流型号。地震解释工作站能提供各种处理成果，不仅大大加快了资料解释速度，而且明显提高了资料解释成果的精度，使庞大的三维地震数据得以充分利用，因此进一步推动了勘探地震学的发展。

到目前为止，地震勘探仍然基本上依靠纵波单一波型。然而人们在地震勘探工业化不久，就曾尝试利用横波进行勘探。20 世纪 80 年代末，这一研究更进一步发展到多波多分量地震勘探的研究，人们企盼多波地震能在油气检测和裂缝研究上得到比单一纵波更精确的结果。目前这些研究都取得了令人瞩目的成果。但陆上多波地震进展较慢，要实现广泛的工业应用还要作出更多努力。近些年来发展迅速的海底电缆（OBC）方法，已使海上地震勘探进入多波多分量时代。目前，研究人员已开发出一套实用的 OBC 数据采集、处理和解释方法，该方法发展迅速，且日臻成熟。

在 20 世纪最后 30 年里，也发展了多种专门的地震勘探方法和技术，如垂直地震剖面法（VSP），地震层析成像法，海底电缆法，垂直电缆法，四维地震，微震监测技术等。这些方法和技术在油气田勘探开发中也都起到了重要作用。

第三节 我国地震勘探发展简史

在我国土地上进行的第一次工业性地震勘探活动发生在 1937 年，当时日本侵占我国东北地区时，为了掠夺中国资源，日本的“满州石油株式会社”在扎赉诺尔（今属内蒙古）和辽宁的阜新为寻找石油进行过地震勘探，但没有发现石油。我国自己的地震勘探起步很晚，直到 1949 年解放以后，才由翁文波主持筹建中国第一个地震队。1951 年 3 月，我国第一个地震队正式成立。这时，离 Mintrop 的地震公司成立已整整 30 年了。这个队一成立，便从上海开赴陕北黄土高原，在延长一带进行地震勘探。经过野外实际工作，第一个地震队培训了人员、积累了经验，于 1952 年先后组建了第二、三、四地震队。这是中国地震勘探事业的初创时期，这一时期的技术人员大多成了后来石油物探的知名学者、专家和技术中坚。

20 世纪 60 年代，我国地震队的数量迅速发展，仅石油系统就达到 100 个，到 20 世纪 70 年代，我国地震队数达到顶峰，石油系统已达 290 多个。

1956 年 8 月，西安石油仪器厂试制成功我国第一台地震仪——电子管光点地震仪 DZ—571 型，批量生产了 91 台，装备了全国地震队，并试制成 DJ—571 型地震检波器。1965 年 923 厂成功研制出 DZ—651 型 24 道模拟磁带地震仪，西安石油仪器厂在此基础上试制了 DZ—663 型模拟磁带仪，并陆续批量生产 DZ—663 型模拟磁带仪 194 套、DZ—664 型磁带回放仪 103 套、DZ—701 型模拟磁带仪 114 套。到 1973 年，全国石油系统的 243 个地震队全部实现了模拟磁带化。1973 年我国从法国引进第一批 SN338 数字地震仪——这是我国首次引进数字地震仪，开始了地震资料采集的数字化的进程。1973 年 3 月，江汉油田物探处

成功地开发出用国产小型电子计算机 121 机处理地震资料的一套软件，处理出我国第一张数字处理的地震剖面。1975 年地矿系统地震队全部模拟磁带化。1978 年 12 月西安石油仪器厂试制成功 48 道数字地震仪 SDZ—751A 型，并批量生产，迅速装备了我国地震队。1985 年，西安石油仪器厂从美国得克萨斯仪器公司引进的 DFS—V 数字地震仪生产线投产，批量生产 SDZ—120 型数字地震仪，加速了地震资料采集的数字化进程。通过自己生产和从国外购置数字地震仪，1985 年全国地矿系统地震队全部数字化，到 1987 年，全国石油系统 262 个地震队也全部实现数字化。这是我国地震勘探史上一个重大技术进步，为地震技术的进一步发展奠定了物质基础。

1969 年，由国务院批准，列为国家重点工程的“150 工程”，由石油工业部有关生产单位和院校（原地球物理勘探局、原华东石油学院）与北京大学数力系、四机部 738 厂等协作，研制用于地震资料处理的大型电子计算机。1973 年 7 月 DJS—150 型计算机研制成功，研究人员编制了地震资料处理软件，1974 年该设备投入使用。

20 世纪 70 年代前后，我国地震勘探在技术方法上取得了一系列重大进步。第一是多次覆盖方法。早在 1966 年 11 月，地质部属江苏第六物探大队在国内率先进行多次覆盖方法试验。到 1970 年，已通过 500km 的多次覆盖试生产，并取得成功。从 1970 年开始，多次覆盖方法在全国陆上和海上迅速推广开来。第二是三维地震。1974 年春，江汉油田物探处（当时称南方石油地质勘探研究所）在国产小型机 121 机上用自己研制的软件进行处理，于 1977 年夏获得了三维偏移剖面，这次试验虽然面积很小，但是一次真正的三维地震试验。到 20 世纪 80 年代末，三维地震技术在国内已逐渐完善，特别是 20 世纪最后几年，三维地震采用的高覆盖次数、全三维处理、精确成像、多信息利用和可视化技术，使三维成果的精度进一步提高，已成为一项成熟的技术。第三是地震地层学的应用。20 世纪 70 年代后期，石油和地矿系统都已开展了地震地层学应用研究，为以后地震资料解释从单一构造解释上升到同时作地层和储层物性研究，寻找非构造油气藏准备了良好的基础。

我国多波地震勘探研究始于 20 世纪 80 年代初，石油工业部四川石油管理局地调处在四川遂南进行了横波勘探试验。1998 年 6 月，中国海洋石油总公司在莺歌海完成了海上地震四分量（4C）数据采集，继而完成了处理和解释，取得了明显的地质效果。

我国海洋地震勘探起步于 20 世纪 50 年代末。1958 年，由地质部、石油工业部、中国科学院海洋研究所、中国科学院地球物理研究所等单位组成联合海洋地震队。1959 年，该队在渤海湾开始野外工作，我国海洋地震工作从此起步。首次海上地震四分量采集是 1998 年 6 月在莺歌海进行的，包括数据处理都由挪威 GECO 公司承包，中方自己也同时进行地震 4C 处理研究，资料解释由中国海洋石油总公司所属南海西部公司研究院负责，共作了 135km 的 4C 剖面，取得了相当好的地质效果。

20 世纪的最后 10 年里，我国地震勘探技术进步很快，尤其在地震软件的研究开发、开发地震、储层及油气预测等方面表现突出。在资料解释方面，也已从单一构造解释发展到构造、地层、岩性、储层物性直至油气预测和储量计算。也就是说，我国的地震工作已不是单纯的勘探工具，而是能为油气田的勘探和开发的整个过程的各个层面提供服务。对油气田监测和管理的地震勘探研究也已起步。随着我国地震勘探工业整体水平的逐步提高，我们已具备技术出口能力，这表现在地震勘探装备出口和技术服务出口两方面。国内多家物探公司，先后到秘鲁、厄瓜多尔、巴基斯坦、蒙古、苏丹、菲律宾、伊朗、委内瑞拉、科特迪瓦及美国、加拿大等十多个国家进行地震勘探服务。

半个世纪以来，经过几代物探工作者的不懈努力，我国已形成完整的地震工业体系，具有在各种复杂条件下进行地震数据采集、地震资料处理和地震资料解释的能力，还具有地震软件研制、独立进行科研开发的能力，并具有承揽国际地震勘探项目的能力。尽管如此，我国的地震勘探总体水平与世界先进水平相比还有相当的差距，我们仍需继续努力。

第一章 几何地震学

几何地震学又称地震波运动学，主要研究波前的空间位置与传播时间之间的关系，通过引入波前、射线等几何概念来描述波的传播规律。在地震勘探中，对地震波传播特征的研究，即对地震波波前或射线的空间位置和旅行时以及能量变化关系的研究，是地震勘探的一个重要部分，是进行定性和定量解释的依据。

第一节 地震波的传播

一、地震波传播的基本原理

波是振动在介质中的传播，表现为两个方面，一方面表现为质点的振动，另一方面表现为振动以一定的速度向前传播，振动在弹性介质中的传播称为弹性波。本节主要描述波传播的基本理论。

1. 惠更斯—菲涅尔原理

惠更斯原理：在弹性介质中，波前面上的各点都可看作新的点波源，并产生子波，这些子波的包络面就是下个时刻新的波前面。

根据惠更斯原理，若已知波在某时刻 t_1 的波前位置，则可确定出不同时刻新的波前位置。例如，已知波在均匀介质中 t_1 时刻的波前位置为 Q_1 ，(图 1-1-1)，假如要确定在时刻 $t_1 + \Delta t$ 时波前的位置，可以 Q_1 面上的各点为圆心，以 $v \cdot \Delta t$ 为半径 (v 为波速) 作出一系列的圆形子波，再作正切于各子波的包络线 Q_2 、 Q_0 ，则 Q_2 代表后一时刻 $t_1 + \Delta t$ 的新波前面位置，而 Q_0 则代表前一时刻 $t_1 - \Delta t$ 的波前面的位置。于是，用惠更斯原理可以确定波前到达介质中任意点的时间。

惠更斯原理只给出了波传播的空间几何位置，而没有涉及波到达该位置的物理状态。菲涅尔补充了惠更斯原理，他指出，从同一波阵面上的各点所发出的子波，经传播而在空间相遇时，可以相互叠加而产生干涉现象，空间各点波的强度，由各子波在该点的相干叠加所决定。这就是惠更斯—菲涅尔原理，该原理具有更明确的物理意义。

惠更斯—菲涅尔原理可以应用于均匀介质，也可以应用于非均匀介质，图 1-1-2 是将该原理用于三种不同介质中平面波的传播情况。[图 1-1-2 (a) 为均匀介质，图 1-1-2 (b)、图 1-1-2 (c) 为非均匀介质]。

惠更斯—菲涅尔原理是一种用来确定下一个时刻波前面位置的几何方法。一个波动的传播可通过某一时刻波前面的位置来确定。在实际中，用波前面描述波的传播并不方便，常用沿波的传播方向一系列带箭头的射线来表示波的传播，这些射线称为波射线，或简称为射线。

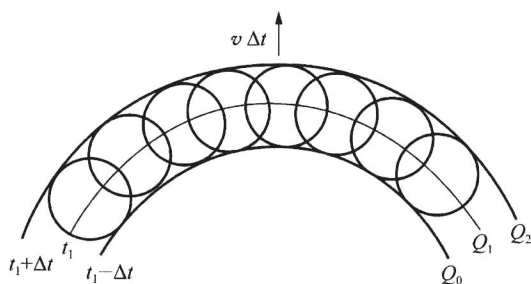


图 1-1-1 惠更斯原理图

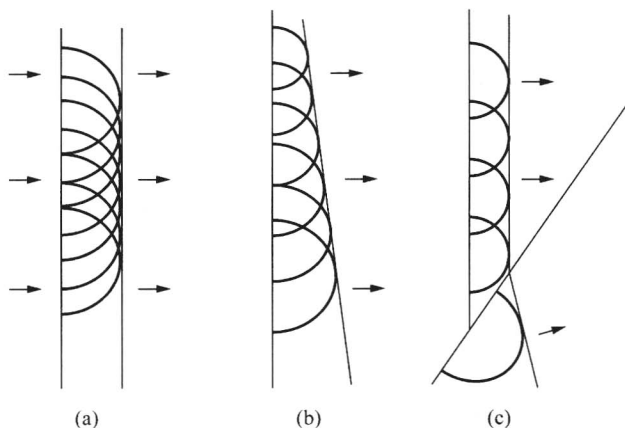


图 1-1-2 平面波在三种不同介质中的传播

线。用射线来描述波的传播比用波前面更为方便。波射线总是与波前面垂直。在均匀介质中，波射线是直线，而在非均匀介质中，波射线是曲线或折线。

2. 费马原理

地震波沿射线的旅行时间与沿任何其他路径的旅行时间相比为最小，亦是波沿旅行时最小的路径传播，这就是费马原理。费马原理与惠更斯—菲涅尔原理一样，在几何地震学中有很重要的意义，它从射线角度描述波传播的特点。在几何地震学中，用波射线

和波前面来表示时间场，地震波射线垂直于一系列波前面。根据费马原理，在均匀各向同性介质中，射线应是从震源出发的直线，因为地震波只有沿这样的射线方向传播到观测点，旅行时间才是最小的。

3. 互换原理

所谓互换原理，是指震源和检波器的位置可以互相交换，此种情况下，同一波的射线路径保持不变。如图 1-1-3 所示，在介质 A 点施加一个力 $F(t)$ ，该力引起另外一点 B 的瞬时位移为 $D(t)$ ，相反，若在 B 点施加一个外力 $F(t)$ ，则在 A 点也会引起同样的瞬时位移 $D(t)$ 。

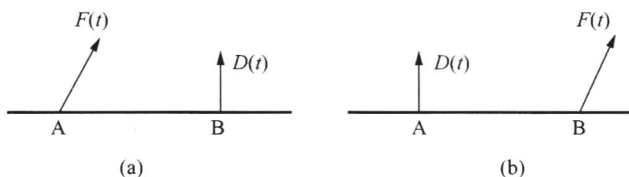


图 1-1-3 互换原理示意图

互换原理具有普遍性，除适用于均匀各向同性完全弹性介质外，也可用于任意形状界面的弹性介质、不均匀介质和各向异性介质。该原理在地震勘探中应用较广，其中相遇时距曲线观测系统就是以互换原理为基础的。

4. 叠加原理

若有几个波源产生的波在同一介质中传播，且这几个波在空间某点相遇，那么相遇处质点的振动是各个波所引起的分振动的合成，介质中的某质点在任一时刻的位移便是各个波在该点所引起的位移的矢量和。换言之，每个波都独立地保持自己原有的特性（频率、振幅、振动方向等），对该点的振动给出自己的一份贡献，即波传播是独立的，这种特性称之为叠加原理。

二、地震波的描述

1. 波前、波后、波面与波线

设波源在某一时刻 t_0 开始在介质中产生振动，经过一段时间，波源的振动停止了，经过一段时间到 t_1 时刻，波动传播了一段距离，这时介质中分成几个区域如图 1-1-4，在 V_1 和 V_2 的分界面 S 上，介质中的各点刚好开始振动，这一曲面叫做波在 t_1 时刻的波前，也叫波阵面。在 V_1 和 V_0 的分界面 S' 上，介质中各点的振动刚好停止，这一曲面叫做波在 t_1 时刻的波后，也叫波尾。

在图 1-1-5 中, S_1 是波在 t_1 时刻的波前, S_2 是波在 t_2 时刻的波前, 可见, 在传播过程中, 波向前推进, 但 S_1 这一曲面有着重要意义, 因为在介质中 S_1 上各点是同时振动的, 即振动是同相的。在介质中每一个这样的曲面都叫做一个波面, 也叫做等相面。在介质中任取一点, 都可以找到和该点同时开始振动的那些点, 这些点的轨迹就是过该点的波面。

按照波面的形状, 可以对波进行分类: 如果所有的波面都是球面, 就叫做球面波; 如果所有的波面都是平面, 就叫做平面波; 如果所有的波面都是柱面, 就叫做柱面波。

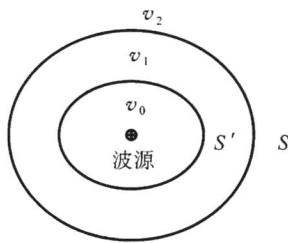


图 1-1-4 波前与波后示意图

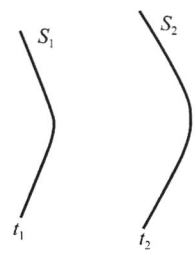


图 1-1-5 波面示意图

2. 振动图与波剖面 (振动曲线与波形曲线)

波是质点的振动在介质中的传播, 这有两个方面的含义, 一是质点的振动, 二是振动在空间的传播, 因此, 质点振动的位移既是时间 t 的函数, 又是空间位置 r 的函数, 可表示为 $u(r, t)$ 。在某一确定的距离 ($r = r_1$), 观察该处质点位移 $u(r, t)$ 随时间变化规律的图形, 可以用 $u(r, t)_p - t$ 坐标系表示介质质点位移随时间的变化, 横坐标表示时间 t , 纵坐标表示质点位移, 这种用 $u(r, t) - t$ 坐标系表示介质质点位移振动的图形, 称为振动图形。此图形表示该点振动随时间的变化规律, 如图 1-1-6 所示 (t_0 为初至时间, Δt 为延续时间, A 为记录点, T 为可见周期)。确切地说, 振动图是表示介质中的某一质点在振动过程中介质质点的位移与时间关系的曲线。在地震记录中的每一条曲线就是地震波到达该检波点的振动图形。因此, 在地震勘探中, 振动图又叫地震记录道。

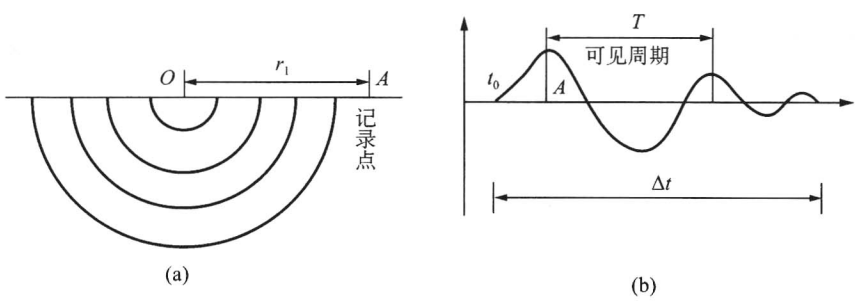


图 1-1-6 振动图示意图

如果在某一确定的时刻 $t = t_1$, 也就是把时间 t 固定, 来看“扰动”在 $u(r, t) - r$ 坐标中的分布。若是球面纵波, 只要看一条射线就够了。横坐标表示波离震源的距离 r , 纵坐标表示介质质点离开平衡位置的位移 $u(r, t)$, 这种用在 $u(r, t) - r$ 坐标系中表示质点位移与波传播距离的关系的图形, 称为波剖面, 如图 1-1-7 所示 (λ 为视波长)。也就是说波剖面是描述同一瞬间振动随距离的变化情况, 即振动与空间的关系, 它是由整个介质质