

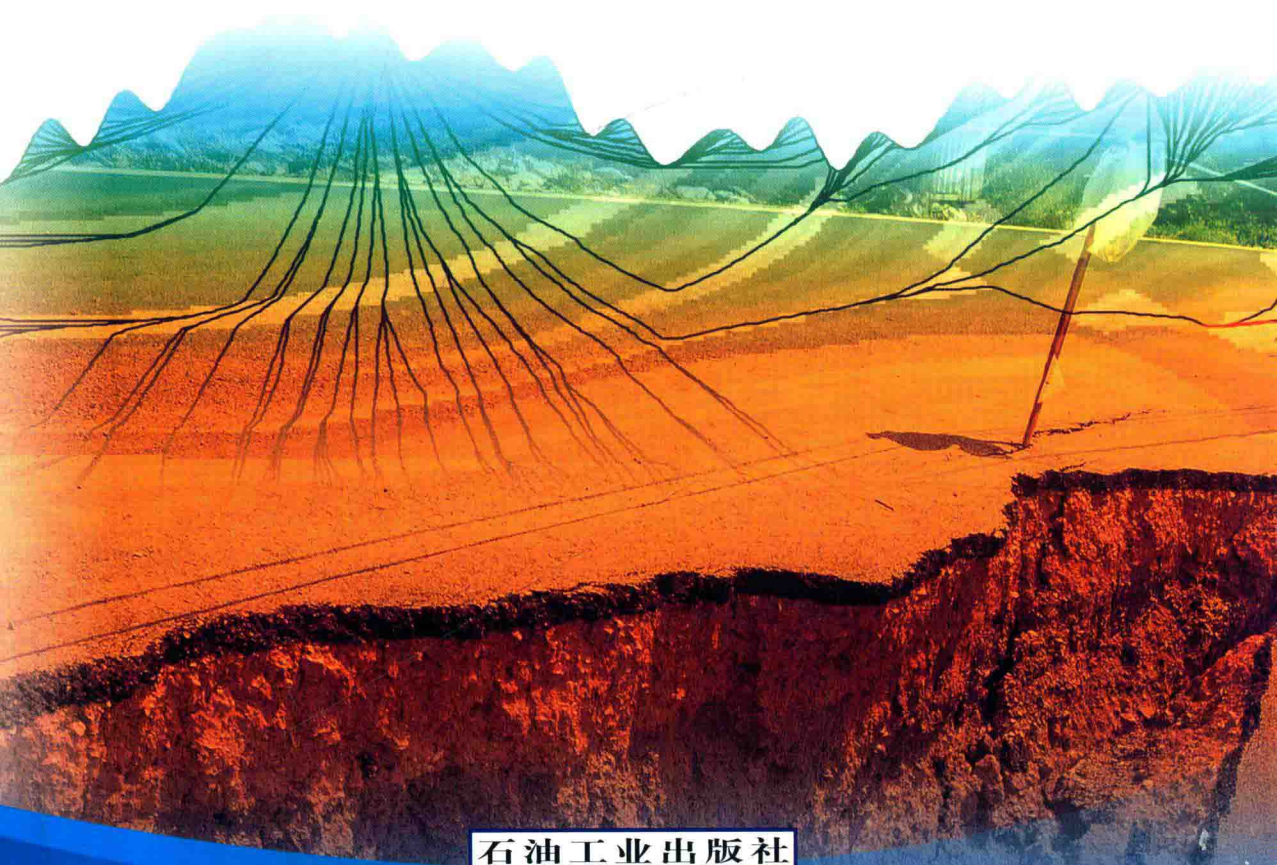


高等院校石油天然气类规划教材

地震勘探概论

(富媒体)

刘文革 赵虎 聂荔 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

地震勘探概论

(富媒体)

刘文革 赵虎 聂荔 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了地震勘探的主要内容和方法,包括地震波的传播原理、时距曲线方程的性质和地质意义、频谱分析、地震记录的分辨率、地震资料采集方式、地震波速度、地震资料数字处理的基本流程及常用方法、地质解释工作流程等。全书深入浅出,结构系统完整,着重突出基本概念、原理和方法的介绍,并在传统出版的基础上,以二维码为纽带,加入了富媒体教学资源,为读者提供更为丰富和便利的学习环境。

本书可作为高等学校资源勘查工程及其他相关专业的学生教材,也可供从事地震勘探的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震勘探概论:富媒体/刘文革,赵虎,聂荔编著. —北京:石油工业出版社, 2017. 7

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5183-1903-9

I. ①地… II. ①刘… ②赵… ③聂… III. ①地震勘探—高等学校—教材
IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 I00566 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 I00011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523579

图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京市密东股份有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:13

字数:332 千字

定价:32.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

地震勘探是利用地下介质的物性差异,通过观测和分析大地对人工激发地震波的响应,推断地下岩层的形态和性质的地球物理勘探方法。地震勘探是勘探石油、天然气资源、固体矿藏的重要手段,此外在煤层勘探和工程地质勘查、区域地质研究和地壳研究等方面也有非常广泛的应用。

2002年,西南石油大学的聂荔和周洁玲为高校资源勘查工程专业编写了教材《地震勘探——原理和构造解释方法》,其内容在选材上充分体现了学科的系统性和完整性,且结构合理、浅显易懂,受到石油院校非物探专业师生的好评。如今,距该教材出版已经过去了十多年,在此期间国内外的地震勘探技术有了很大的进步。为了适应形势的发展,让高校学生和专业技术人员充分了解当前技术发展的现状,有必要对教材进行重新编写。在编写过程中,我们一方面在保留原书主体结构和特色的同时,根据多年地震勘探教学经验,对原书中的不当之处加以修正;另一方面借鉴国内外地震勘探领域新的理论方法和技术,参考有关文献和专著,对地震勘探的相关知识内容进行了补充和完善。

本教材注重基本概念、基本方法的介绍,注重各章节内容的逻辑性和连贯性。在绪论中主要概述油气勘探的基本方法、地震勘探方法的分类、原理和实现流程,以及地震勘探发展的概况。第1章介绍地震波运动学的一些基本概念、地震波的传播规律,并对各种地震波的时距曲线方程进行推导,说明其性质和地质意义。第2章介绍与地震波动力学有关的一些概念,说明如何利用傅里叶变换对地震信号进行频谱分析,以及地震波在传播过程中影响振幅的主要因素,最后讨论地震记录的分辨率。第3章对地震资料的采集方式和方法进行了说明,其内容涉及地震测线的布设、观测系统、地震激发与接收。第4章介绍地震勘探的重要参数——地震波速度,讨论影响地震波速度的有关因素以及常用的速度概念。第5章是简述地震资料数字处理的基本流程及常用方法,如数字滤波、速度分析、水平叠加和偏移。第6章介绍与地震资料地质解释有关的一般概念和工作流程,说明地震资料的地质解释方法、成果图件的绘制及地震属性解释。

本书由西南石油大学地球科学与技术学院物探教研室承担编写。具体编写分工为:前言、绪论、第1章、第2章和第5章由刘文革博士编写;第3章、第4章、第6章的6.4和6.6由赵虎博士编写;第6章的6.1~6.3和6.5由杨巍博士编写。全书由刘文革博士统稿,聂荔教授审核。在本书编写过程中,物探教研室的朱仕军教授、尹成教授、周路教授给予了大力支持并提出了宝贵的建议,本校研究生何永川、武泗海协助了资料的搜集整理和图件绘制等工作,在此一并感谢。

由于编者在理论和经验上的不足,书中难免存在疏漏之处,恳请读者批评指正。

编著者

2017年1月

目 录

绪论	1
0.1 油气勘探方法概述	1
0.2 地震勘探方法简介	2
0.3 地震勘探发展概况	5
思考题	9
第1章 地震波的运动学基础	10
1.1 地震波的基本概念	10
1.2 地震波的传播规律	19
1.3 地震反射波的时距曲线	27
1.4 折射波的时距曲线	35
1.5 多次波的时距曲线	37
1.6 绕射波的时距曲线	40
1.7 地震波的垂直时距曲线	43
思考题	46
第2章 地震波的动力学特征	47
2.1 地震波的频谱	47
2.2 影响反射波振幅的主要因素	56
2.3 地震记录的分辨率	61
思考题	64
第3章 地震资料采集	65
3.1 地震测线布置	65
3.2 地震观测系统	66
3.3 地震激发与接收	74
思考题	83
第4章 地震波的速度	85
4.1 地震波在岩石中的传播速度	85
4.2 几种速度概念	89
思考题	100
第5章 地震资料数字处理	101
5.1 地震资料处理基本流程	101
5.2 地震资料的数字滤波	109
5.3 地震资料的静校正	118
5.4 速度分析	123
5.5 地震资料的动校正和叠加	132

5.6 地震资料的偏移成像	138
5.7 地震数值模拟	146
思考题	150
第6章 地震资料解释	151
6.1 地震资料解释概述	151
6.2 地震资料解释的主要内容	154
6.3 地震资料的地质解释	160
6.4 地震解释假象	174
6.5 构造图的绘制及解释	178
6.6 地震属性解释及储层预测	190
思考题	199
参考文献	200

富媒体资源目录

序号	名称	页码
1	动态图 1 端点固定时脉冲沿细绳的传播过程	15
2	彩图 1.1.10 均匀介质中的波场快照	15
3	动态图 2 点源所产生的球面波二维动画	15
4	动态图 3 点源所产生的球面波三维剖视动画	15
5	彩图 1.1.12 从 A 到 B 的射线路径与波前相垂直	16
6	动态图 4 惠更斯原理——当切口宽度等于波长时,平面波所产生的衍射	19
7	视频 1 地震转换波的形成过程	24
8	动态图 5 平面纵波	25
9	动态图 6 二维网格内纵波的传播	25
10	动态图 7 平面横波	25
11	动态图 8 二维网格内球面横波的传播	25
12	动态图 9 通过傅里叶级数由谐波合成锯齿波	48
13	动态图 10 通过傅里叶级数由谐波合成方波	48
14	动态图 11 共中心点观测方法	68
15	彩图 3.2.8 海上拖缆观测系统示意图	72
16	彩图 3.2.9 海上环形拖缆观测系统示意图	72
17	动态图 12 对四个波形用六种不同的速率进行采样,两个波形在稀疏采样时会出现扭曲变形	102
18	彩图 5.1.8 速度分析过程	106
19	彩图 5.4.2 不同基本速度函数的比例因子的叠加速度扫描剖面	124
20	彩图 5.4.8 井间层析试验	130
21	彩图 5.4.9 SMAART Pluto 1.5 速度模型反演	131
22	彩图 5.6.6 地质目标精确成像	143
23	视频 2 复杂模型的地震正演	148
24	彩图 6.1.1 地震剖面的不同显示类型	152
25	彩图 6.3.12 相干体层切片	168
26	彩图 6.3.17 生物礁地震反射剖面	172
27	彩图 6.5.8 某探区的构造图	183
28	彩图 6.5.18 某区块变速成图所使用的平均速度场	189
29	彩图 6.6.1 鲕滩储层地震属性特征	195

本教材富媒体资源均由作者刘文革提供。

绪论

0.1 油气勘探方法概述

当今,90% 的运输动力来源于石油。石油因其具有运输方便、能量密度高的特点,成为最重要的运输驱动能源。此外,作为许多工业化学产品的原料,石油是世界上最重要的商品之一。

勘探石油的方法主要有地质法、物探法和钻探法这三类。

0.1.1 地质法

地质法是通过观察、研究出露在地面的地层、岩石,并对地质资料进行综合分析,了解一个地区有无生产石油和储存石油的条件,最后提出对该地区的含油气远景评价。有时在岩石出露的地区,可能会直接发现油气藏。

0.1.2 物探法

物探法(即地球物理勘探方法)是根据地质学和物理学原理,利用电子仪器和信息处理等多领域的技术,建立起来的一种石油勘探方法。物探法通过仪器在地面观测地壳上的各种物理现象,从而推断、了解地下的地质构造和岩性分布特征,最后确定可能的含油气构造和有利区带,它是一种间接找油的方法。

物探法之所以能用来查明地下的地质构造,主要是因为组成地壳的各种岩石或组成地质构造的各岩层具有不同的物理性质,对地面上的物理仪器也就有不同的响应。根据物理仪器的测量结果,经过分析可以推断地质构造的特征。其中,应用于石油勘探的主要方法有:重力勘探(利用岩石的密度差异)、磁法勘探(利用岩石的磁性差异)、电法勘探(利用岩石的电性差异)和地震勘探(利用岩石的弹性差异)。物探法特别适用于海洋、沙漠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,而用钻探法成本高、效率低,所以一般采用物探法。

0.1.3 钻探法

使用物探法可以了解地下地质构造的特征,找到适合于储集油气的地质构造。但是,这些构造是否存储油气,通过物探方法还不能确定,最终还是需要依靠钻探法来实现。钻探法就是根据物探方法提供的井位信息进行钻探,直接取得地下的地质资料,从而确定地下构造及含油气情况。

由此可见,油气勘探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。勘探工程师只有具备良好的地球物理和地质知识,才能对地球物理资料作出正确的地质解释。地震勘探与其他物探方法相比,其主要特点是精度高、分辨率高和探测深度大。地震勘探方法与地质法相比适应面更广,与钻探法相比成本更低,并且它的勘探面积相对更大。目前,地震勘探已成为寻找油气最重要的地球物理方法,并且世界各地油气勘探总投资的 90% 以上用于地震勘探。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。因此,掌握地震勘探的基础知识对于非物探专业的学生是非常必要的。

0.2 地震勘探方法简介

地震勘探是利用人工方法(如爆炸、敲击等)激发的地震波,通过研究振动在地下的传播规律,来定位矿藏(包括油气、矿石、水和地热资源等)、确定考古位置和获得工程地质信息。地震勘探所获得的资料,通常与其他的地球物理资料、钻井资料及地质资料联合使用,并根据相应的物理与地质知识,得到有关构造及岩石分布的信息。

地震勘探是一门较为年轻的学科,它诞生于 20 世纪 20 年代,是最重要的地球物理方法之一。几乎所有的石油公司都依赖地震解释来确定勘探井位。在我国,自大庆油田发现以来,95% 的新油田发现都是靠地震勘探确定含油气构造。世界上的墨西哥湾油田、中东油田以及北海油田等大型油田的发现也是如此。地震勘探是一种间接方法,其主要工作在于探测地下的地质构造,而不是直接寻找油气。但是,随着三维地震勘探技术的进步,通过这种技术能提供丰富的地质信息,极大地发掘油藏工程的潜力。由于金属矿体和围岩之间的界面具有不规则性,地震勘探很少应用于勘探金属矿藏。

与地震勘探有关的理论是由天然地震学发展而来。发生天然地震时,地壳产生断裂,裂缝两边的岩石会发生相对移动,从而产生由断裂面向外传播的地震波。在不同地点用地震仪器记录这些地震波,随后地震学家利用这些资料可以推断地震波所穿过岩石的性质。

现代地震勘探使用与天然地震学相似的测量方法。不同的是,现代地震勘探所采用的震源可以控制、移动,震源到接收点的距离相对较小。多数地震勘探是采用连续覆盖方法,并且沿着地表连续采样。在炸药或其他类型的震源激发地震波后,用检波器接收地下介质对地震波的响应。接收到的信号一般以数字形式记录到磁带上,然后利用计算机处理以提高信噪比,从噪声背景中提取有效信号,并绘制成有利于地质解释的图件。

0.2.1 地震勘探方法的分类

当地震波在介质中传播时,其路径、振动强度和波形会随介质的弹性性质及结构的不同而发生变化,所以根据地震波的变化规律,如波的旅行时间和速度信息,可推断波的传播路径和介质的结构。另外,根据波的振幅、频率及地层速度等参数,有可能推断出岩石的性质。地震勘探根据其利用地震波的类型可分为三种:反射波勘探方法、折射波勘探方法和透射波勘探方法。

1. 反射波勘探方法

反射波勘探方法简称反射波法,是在离震源较近的若干位置上,测定地震波从震源传播到不同弹性地层分界面并反射回地面的旅行时间,测线上不同位置地震波的反射时间的变化将

会反映出地下介质的构造特征。在大多数地区,这种方法能确定测线范围内的地质构造,特别是与油气储集有关的背斜、断层和礁体等构造。在理想条件下它能够以较高的精度确定构造的起伏。根据地震波的速度、频率和吸收特性,反射波法也可以用来判别岩性。

假定陆上勘探使用的是炸药震源。实际施工中在选定合适的炮点后,先是在该位置垂直向下打一口浅井,井眼直径为 10~12cm,井深通常为 6~30m。炸药震源的药量为 1~25kg,装入电雷管,然后放到井底。电雷管上有两根引线接到地面的爆炸机上,爆炸机通过引线将电脉冲发送到电雷管,电雷管爆炸后随即引爆炸药。在野外,这个过程称为放炮。

如果是二维情形,在炮点附近会以直线方式在左右两侧各摆放一条 2~6km 长的大线,每条大线内包含有许多对传输线。另外,在大线上有一系列抽头,抽头之间的间隔为 25~100m。每一大线抽头通常连接多个检波器,传回记录仪器的信号是检波器组合的整体输出。炸药震源激发时,每一检波器组合都会输出一个信号,该信号依赖于检波器周围地面的振动。最终得到的地震道记录即是经过炮点的测线上一系列规则点位上所产生的信号。

来自各检波器组合的电信号会被送至相应的放大器,放大器能增强信号的强度,并部分滤除信号中的非期望成分。放大后的信号连同精确的计时信号一起记录到磁带上,从而得到观测记录。每一炮记录包含很多道的数据,分别记录检波器组合在震源激发后随时间变化的振动过程。

一般情况下,数据需要进行去噪处理,即衰减信号中的噪声,突出有效反射能量。去噪后的数据将以便于解释的形式显示出来。根据地震波的到达时间能计算地下界面的深度和产状,最后将所有的结果综合起来便可绘制地质解释所需要的剖面图和等值线图。

2. 折射波勘探方法

折射波勘探方法简称折射波法,是研究在速度分界面(界面下层的传播速度 v_2 大于上层的传播速度 v_1)上滑行波所引起的振动。当地震射线以临界角入射时,透射角为 90° ,射线以速度 v_2 沿界面滑行,从而引起上层介质中的质点发生振动并传播至地表,这种波也称为首波或折射波。这种波不同于光学中的折射波,与炮弹以超音速飞行时在空气中所引起的弹道声波相似。首波到达不同观测点的时间包含速度界面的深度和地层速度信息,虽然不能得到像反射波法那样丰富的信息,但它的速度资料更易于解释。

反射波法和折射波法的主要差异是:折射波会存在一个盲区(小于折射波临界角的区域),因此观测折射波所需要的炮检距(震源到接收点的距离)在很大程度上依赖于探测界面的深度。折射波法中波的传播路径是水平的,而反射波法则是垂向路径占优势。在临界角处,首波或折射波进入高速层,然后以同样的角度离开高速层。只有在介质传播速度比上覆地层大的情形才能用折射波法来探测。因此,在应用折射波法时所受到的限制将比反射波法大。

3. 透射波勘探方法

透射波勘探方法简称透射波法,是研究穿透不同弹性分界面的地震波,它与光学中的折射波相同。该方法要求激发点和接收点分别位于地下弹性分界面或地质体的两侧,大多在有坑道或钻井时才可使用这种方法。根据透射波的传播时间,可以求得波在地层中的传播速度,进而确定地质异常体的形态,并能计算出岩层或地质体的弹性模量等参数。

透射波法和反射波法、折射波法不同,它是观测和研究通过某种岩层的直达穿透波。在实际工作中,透射波法主要是跨孔法和垂直地震剖面(VSP)法。前者激发点和接收点均在井中,应用得较少;后者则是速度测井的延伸,在井与地面之间激发并接收,应用较为广泛。上述三

种方法中,反射波法在油气勘探中应用较多,而透射波法和折射波法因条件限制其适用范围较小。但是因为它们各具特色,所以在解决实际地质问题时需要根据情况选择相应的方法或互相配合。本书主要讨论反射波法。

0.2.2 地震勘探原理

首先,举一个日常生活中的实例。如果人在山谷中或大厅里大喊一声,那么他能听到回声,这是因为声波在空气中传播时遇到墙壁等障碍物后会发生反射。利用声波反射现象可以测量出障碍物的距离。已知声波在空气中传播的速度是 $v=340\text{m/s}$,若测量出从呼喊到听见回声的时间是 $t=4\text{s}$,那么能计算出障碍物的距离 $s=1/2\times v\times t=680\text{m}$ 。

地震勘探的基本原理与上例类似。如图 0.2.1 所示,在地面的一条测线上打井放炮,于是就产生向地下传播的地震波。地震波遇到地层的分界面 1(假设为砂岩和页岩的分界面)就会产生反射。再向下传播又会遇到岩石的分界面 2(假设为页岩和石灰岩的分界面),同样能产生反射。在放炮的同时,地面用仪器将来自各地层分界面的反射波所引起地面振动情况记录下来。根据地震波在地面开始向下传播的时刻(即爆炸时刻)和反射波到达地面的时刻,可以得出地震波从地面向下传播到达地层分界面又反射回地面的时间 t ,再利用其他方法推断出地震波在岩层中传播的速度 v ,即可利用 $s=\frac{1}{2}vt$ 计算出地层分界面的埋藏深度。如果在一条测线上观测,并对记录信号进行数字处理,可以得到反映地下岩层分界面埋藏深度的资料——地震剖面图。再结合其他物探方法和地质、钻井等方面的资料,对地震剖面进行解释,便会查明地下可能含油的构造。

总之,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所具有的旅行时间和波形变化信息,推断地下的地质构造形态和岩性。

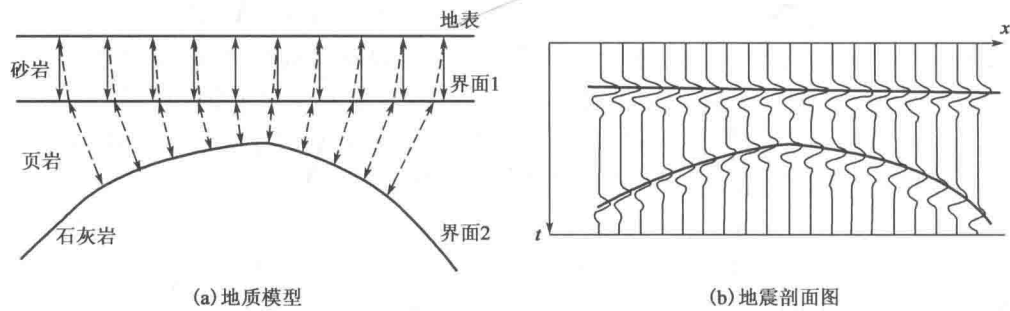


图 0.2.1 地震勘探原理示意图

0.2.3 生产流程

反射波勘探方法的基本流程如图 0.2.2 所示。首先用人工方法使地下质点产生振动,振动在向外传播时会形成地震波,地震波遇到岩层分界面会产生反射返回到地面。反射波到达地面时,又会引起地表质点的振动,检波器将地表质点的振动转变成电信号。电信号输送到地震仪器后被放大,然后通过模数转换器将电信号转变成数字并记录在磁带上,成为地震记录。利用计算机可以对地震记录进行数字处理,提取用于构造、岩性解释的资料和信息,对处理后的地震资料进行地质解释,制作出地震构造图,并且划分有利油气聚集的相带,最后进行油气资源的评价,这就是反射波地震勘探方法的全过程。由此可见,地震勘探的生产工作基本上可分为三个阶段。

1. 野外资料采集

这个阶段的任务是在地质以及其他物探工作初步确定的可能含油气区域内布置测线,人工激发地震波,并用地震仪器把地震波传播的情况记录下来。野外生产工作的组织形式是地震队,其最终成果是记录有地面振动情况的地震数据磁带。

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,利用计算机对野外获得的原始资料进行“去粗取精、去伪存真”的处理工作,并且求取地震波在地层内的传播速度等资料。这一阶段的成果是地震剖面图和地震波速度等。资料处理工作在配备有计算机和专用设备的计算中心完成。

3. 地震资料解释

经过计算机处理得到的地震剖面,虽然在一定程度上能反映地下地质构造的特征,但是地下的情况是复杂多变的。地震剖面上的一些现象,既可能反映地下的真实情况,也可能是假象。如果是二维情形,在地震剖面上只能看到地层沿剖面方向的变化,而没有一个完整的空间概念。地震资料的解释工作是运用地震波的传播理论和地质学原理,综合地质、钻井和其他资料,对地震剖面进行深入的分析研究。总之,该阶段可以对产生地震反射的地质层位给出解释,并对地质构造作出说明,最终查明可能的含油气构造。

随着地震勘探技术的发展,地震资料解释可以分为三个阶段,即地震构造解释、地层岩性解释和开发地震解释。

20 世纪 70 年代以前,油气勘探以地震构造解释为主,就是在构造地质学和地震成像原理的基础上,确定地下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。

70 年代到 90 年代,随着数字地震技术的发展,地震剖面的质量有明显提高,解释人员根据地震剖面特征和结构划分沉积层序,分析沉积相和沉积环境,预测沉积盆地的有利油气聚集带。地层岩性解释是通过提取地震属性参数,综合利用地质、钻井和测井资料,研究特定地层的岩性、厚度、孔隙度和流体性质等,为部署探井提供地质依据。

90 年代至今,开发地震解释是进入开发阶段之后,以地震资料为基础,综合利用可能获得的其他资料,采用可行的方法和手段,合理判断地震信息所代表的地质含义,为油田勘探开发提供依据。其主要任务是查明确切的含油气范围,估算含油气储量,提供油藏模型等。总之,开发地震解释的目的在于明确发现井所揭示的油气藏细节,包括油藏精细描述、油藏动态监测等,为指导剩余油的开采、调整开发井的部署和提高采收率提供地质依据。

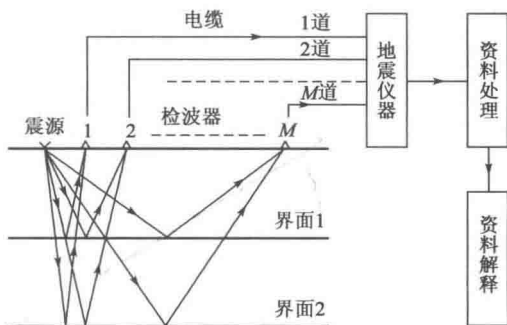


图 0.2.2 反射波勘探方法流程图

0.3 地震勘探发展概况

地震勘探作为一门科学,是地震学的产物。地震是地球上经常发生的一种自然现象,我国在公元前 1177 年(商朝)就有关于地震的记载。此外,我国是第一个设计观测地震仪器的国

家。公元 132 年东汉时期的张衡发明世界上第一台观测地震的仪器—候风地动仪[图 0.3.1 (a)]。该仪器原先设置在洛阳,曾记录到发生在千里之外的甘肃地震,还能测定发生地震的方向,其原理如图 0.3.1(b)所示。仪器中间有一个倒立摆,重心很高,当某方向发生地震并且有地震波传来时,摆由于惯性就会倒向波传来的方向,敲击杠杆连动机构,使波传来方向龙嘴里的小球掉出来,指示发生地震的方向。

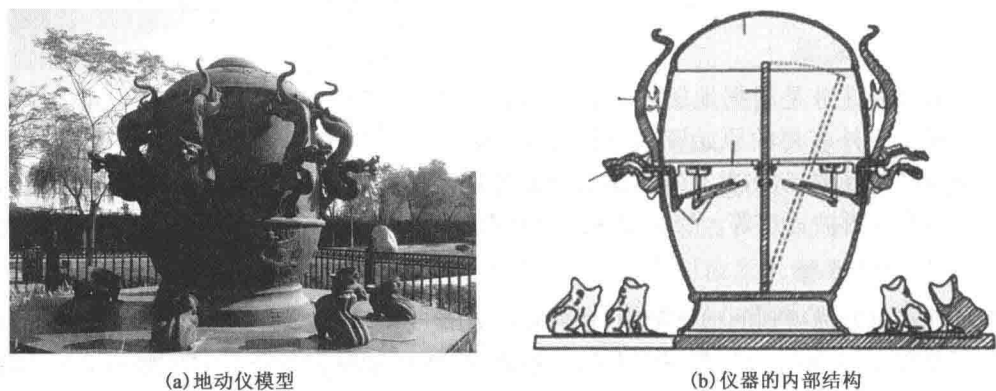


图 0.3.1 观测地震的候风地动仪

0.3.1 近代地震勘探发展概况

关于地震波的理论能追溯到 1678 年 Robert Hooke 所发表的虎克定律。但是,在 19 世纪以前,大部分的地震波弹性理论还没有发展起来。1818 年 Cauchy 发表了关于波传播的论文,并因此获得法国学会大奖。1828 年, Poisson 在理论上指出纵波(P 波)和横波(S 波)的独立存在。1899 年 Knott 发表论文讨论地震波的传播及其反射和折射。Rayleigh(1885)、Love(1927)和 Stoneley(1924)则分别对表面波理论进行了研究。

地震波的实验最早出现于 19 世纪初,但进入 20 世纪才开始进行地震勘探。1848 年 Mallet 首先从事地震波的实验。他使用黑炸药作为震源,并在碗中盛入水银以探测地表的振动,从而计算得到地震波的速度。1885 年 Milne 使用下落的重物作为震源,并在一条直线上摆放两个检波器,随后他进行了一系列的地震波研究,这算得上是最早的地震排列。1900 年 Harker 在测线上用 9 个机械式的水平检波器同时记录到了 P 波和 S 波。1914 年 Mintrop 在德国设计出一种地震仪,可以观测炸药震源所产生的波,其测量精度使地震勘探成为可能。

1921 年,最早的地震公司在美国成立,开始从事地球物理勘探,当时主要采用折射波法。在得克萨斯州作业期间,地震公司发现了休斯敦西北部的 Orchard 穹隆,人们一般认为这是利用地震勘探方法(折射波法)的第一个油气发现。1927 年在美国科罗拉多矿业学校首次开设地球物理勘探课程。

1930 年,勘探地球物理学家学会(SEG)在美国休斯敦成立,并于 1936 年开始出版期刊《地球物理学》(Geophysics)。欧洲地质学家与工程师协会(EAGE)成立于 1951 年,1953 年出版专业期刊《地球物理勘探》(Geophysical Prospecting)。上述两个协会还分别出版有另外两本杂志《前缘》(The Leading Edge)和《初至》(First Break),主要提供勘探实例以及技术发展的最新动态。

1937 年,反射波法采用 6~8 道仪器进行接收,在第二次世界大战后增加到 24 道。1950 年发明地震勘探多次覆盖技术。在随后的油气勘探中,围绕怎样突出有效波和压制干扰波等一系列问题,地震勘探的基本理论、仪器设备、野外工作方法、处理技术和综合解释等方面得到全面发展。地震勘探的发展过程大致可以分为四个阶段。

第一阶段(1927—1952 年):该阶段的特点是光点记录,利用人工进行资料整理。所谓光点记录,就是采用电子管元件,把地面振动的情况用照相方法记录下来。该记录是“死”的,不能重新处理,更不能做多次叠加,并且动态范围小。因此,原始资料质量低、频带窄。资料由人工整理,所以效率低且结果不便于保存。

第二阶段(1953—1963 年):该阶段的特点是模拟磁带记录,并使用模拟电子计算机整理资料,在野外采用多次覆盖的工作方法。模拟磁带记录是采用晶体管元件,把地面振动情况以模拟的方式录制在磁带上。在室内可以使用模拟磁带回放仪反复处理,也就是初始的“死”记录,在回放处理时可以变“活”,从而使资料整理工作实现了半自动化,资料整理的质量有较大的提高,可以得到反映地下地质构造的地震剖面。多次覆盖方法是指适当地布置多个激发点和接收点,使得各激发点和接收点组合能得到来自地下同一点的反射。这种方法能大幅提高地震资料的质量。但是由于地震剖面叠加次数少,干扰波得不到应有的压制,所以地震资料质量不够高,影响地震解释的精度。

第三阶段(1964—1979 年):该阶段的特点是数字磁带记录,采用高次覆盖观测,并用数字计算机整理资料。所谓数字磁带记录,是指野外记录的是地震波振幅的离散值,而不是记录连续波形。高次覆盖是指对地下的同一反射点进行很多次观测,并且每次的激发点与接收点并不相同。采用数字磁带记录和高次覆盖能极大地提高原始资料的质量。此外,使用数字计算机后,资料处理方法更加灵活、精确,资料整理的自动化程度和工作效率都得到提高,成果资料也更加丰富。

第四阶段(1980 年至今):该阶段的特点是从数据采集、资料处理和资料解释到地震勘探设备研制等方面都形成一套成熟的技术系列。

地震勘探技术同时也在不断创新和发展(表 0.3.1),已形成一个复杂、庞大并且完整的科学体系。从起初研究地下的地质构造特征,发展到能了解地层岩性圈闭、提供储层内部参数、进行储层横向预测和开发地震解释等方面。

表 0.3.1 地震勘探技术的发展历程

时间	代表技术	数据维数	主要解决的问题
20 年代	折射波地震法	1D	落实构造单元、有利盆地以及 查明区域构造特征
30 年代	反射波地震法		
50 年代	多次覆盖	2D	
60 年代	数字处理技术		
70 年代	偏移成像技术		预测和识别油气圈闭
80 年代	三维地震勘探技术	3D	查明复杂构造、隐蔽油气藏
90 年代	深度偏移	3D/3C	
21 世纪	各向异性技术	4D/9C	精细油藏描述

0.3.2 我国物探技术发展概况

我国的石油物探技术从1939年起步,物探界的前辈翁文波最先在国内大学开设地球物理勘探课程,1945年创建了我国第一个重力勘探队。1951年我国成立第一个地震队。60年代后期,我国成功研制模拟磁带地震仪,实现模拟记录磁带化,并推广应用多次覆盖技术。70年代初,我国设计的第一台百万次数字计算机及地震资料处理的专用外围设备开始投产,为海洋石油勘探、古潜山高产油气田的勘探提供了支撑。80年代数字磁带地震仪正式投产,并研制成可控震源,陆续建成20多个计算站进行地震资料数字处理,使地震勘探成果质量有显著提高。90年代之后,物探仪器厂商开始推出遥测地震数字采集系统,其性能更加完善可靠。遥测数字地震仪具有以下特点:①检波器接收到的模拟信号直接转化成数字信号,避免模拟信号在电缆传输中的衰减,也免除传输过程中的各种干扰;②遥测地震仪的采集能力,如记录道数和时间采样间隔较常规数字地震仪提高1~2个数量级。

以中国东方地球物理公司(BGP)为例,2015年公司拥有428XL、408XL等陆地及浅海采集设备129台套,累计55.1万道;NOMAD65、SM-26等震源420台;TRIMBLE、LEICA等测量仪1710台;MI-9S、WTZ-300等物探钻机1260台。拥有“BGP先锋号”六缆船、“东方勘探一号”二维船,BGP CHALLENGER二缆船和一支深海OBC船队。拥有IBM、SUN等地震资料处理解释大型计算机,共15668个CPU,运算速度达到320TFops。此外,公司有物探队158支,其中陆地地震队129支,VSP测井队8支。

由此可见,我国目前已成为世界范围内石油地球物理勘探的大国,地震勘探技术也进入世界的先进行列。在野外数据采集方面则形成一整套成熟方法,包括计算机野外采集参数设计、GPS数据无线传输技术、可控震源非线性扫描技术和障碍区的三维采集技术等。在地震资料处理技术上也已达到非常高的水平,主要体现在处理方法和处理软件的发展。地震资料解释则进入数字化和自动化时代。现代化的解释工作主要表现在以下两个方面:

(1)人机联作解释工作站的广泛应用。人机联作解释工作站的应用是地震勘探技术的一项重要突破。人机联作解释不仅大大提高了解释工作的效率,而且能提高资料的分辨率和可解释性,使地震资料解释从过去以人工为主的单一构造解释,向应用现代地质构造理论和层序地层学原理,利用人机联作技术综合地质、地震、测井和测试等信息,进行构造精细解释、储层横向预测等深层次发展。

(2)储层横向预测技术的推广应用。实际应用的技术包括:①地震资料的精细处理技术;②薄互层精细标定技术;③人机联作解释技术;④地震反演技术;⑤储集层孔隙度、渗透率和含油饱和度的预测技术。

如今,地震勘探以数字化技术为标志迅速发展。在仪器方面正向遥控遥测、高采样率和多道发展。在野外工作方面则是发展非炸药震源,用更高的覆盖次数观测,发展高分辨率勘探、横波勘探和垂直地震剖面以解决复杂构造、地层岩性圈闭和直接找油气等地质问题。在数据处理方面,为了适应地震数据采集量激增的需要,正大力提升计算机的处理能力和扩展专用设备。另外,为了充分利用地震波的动力学信息,正在发展精确求解波动方程的计算方法及处理技术。总之,地震勘探已从构造成像向层序成像和岩石物理成像发展,从油气勘探向油藏描述和油藏监测发展,从油气间接检测和监测向直接检测和监测发展;理论基础也正在实现由声波向弹性波的转变,由单相介质到多相介质的转变,由只考虑各向同性到考虑介质各向异性的转变。

思 考 题

1. 全球油气资源的现状如何?
2. 油气资源勘探的基本方法有哪些?
3. 地球物理勘探方法有哪些?
4. 简述地震勘探的基本原理。
5. 地震勘探包括哪些生产环节?
6. 石油地震勘探与天然地震研究有何异同?

第1章

地震波的运动学基础

地震勘探的基本内容是通过研究地震波的运动形式及变化规律,推断地下介质的地质构造以及相关属性。地震波的运动规律与传播介质之间有着密切的联系。为了探测地下构造的形态、了解地层结构及其性质,研究地震波在弹性介质中的传播规律是必要的。具体研究内容包括地震波的产生、性质、传播、分裂、转换和旅行时间等方面的特点,这些能为正确地运用地震资料解释地下的地质现象奠定必要的理论基础。

在这一章中,首先讨论地震波的基本概念以及地震波的传播规律。其次,研究地震波在时间-空间中的运动规律,即地震波运动学理论。时间、空间以及传播介质之间的关系是不可分的,因此根据地震波运动的时间和空间关系,可以推断出介质结构。另外,地震波的时距曲线是地震波的运动学特征之一,研究时距关系可以为地震资料的定量解释奠定基础。

1.1 地震波的基本概念

1.1.1 地震波的性质

1. 地震波的概念

波是一种常见的物理现象,例如声波、水波和地震波等。敲鼓时因鼓面振动会带动周围的空气振动,该振动通过空气向外传播形成声波。石子投入水中,水面质点发生振动,并且振动沿着水面由近及远向外传播形成水波。在地震勘探中,当炸药在岩层中激发时,岩层质点也会产生振动,此时振动通过岩层传播出去便形成地震波。

综上所述,可以得出一个概念:波就是振动在介质(空气、水和岩层等)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,所以首先要有激发振动的震源存在。在地震勘探中,人工激发地震波的形式有多种(图 1.1.1),主要有炸药震源、落锤式震源、横向力震源、水枪震源和气枪震源。在陆地勘探时一般使用炸药震源。非炸药震源包括可控震源、蒸气枪和电火花震源等。虽然震源的激发形式不同,但其目的都是为了引发岩层质点的振动,从而产生地震波。

2. 弹性和塑性

物体在外力作用下会发生形变,当外力去掉以后,物体能立刻恢复原状,这样的特性称为弹性。具有这种性质的物体叫做弹性体,如皮球、弹簧等物体。在外力作用下弹性体所发生的体积或形状的变化叫做弹性形变。如果去掉外力作用后,物体仍旧保持受外力时的形状,这种物体叫做塑性体,它所发生的形变称为塑性形变或永久形变。弹性和塑性是物体所具有的两