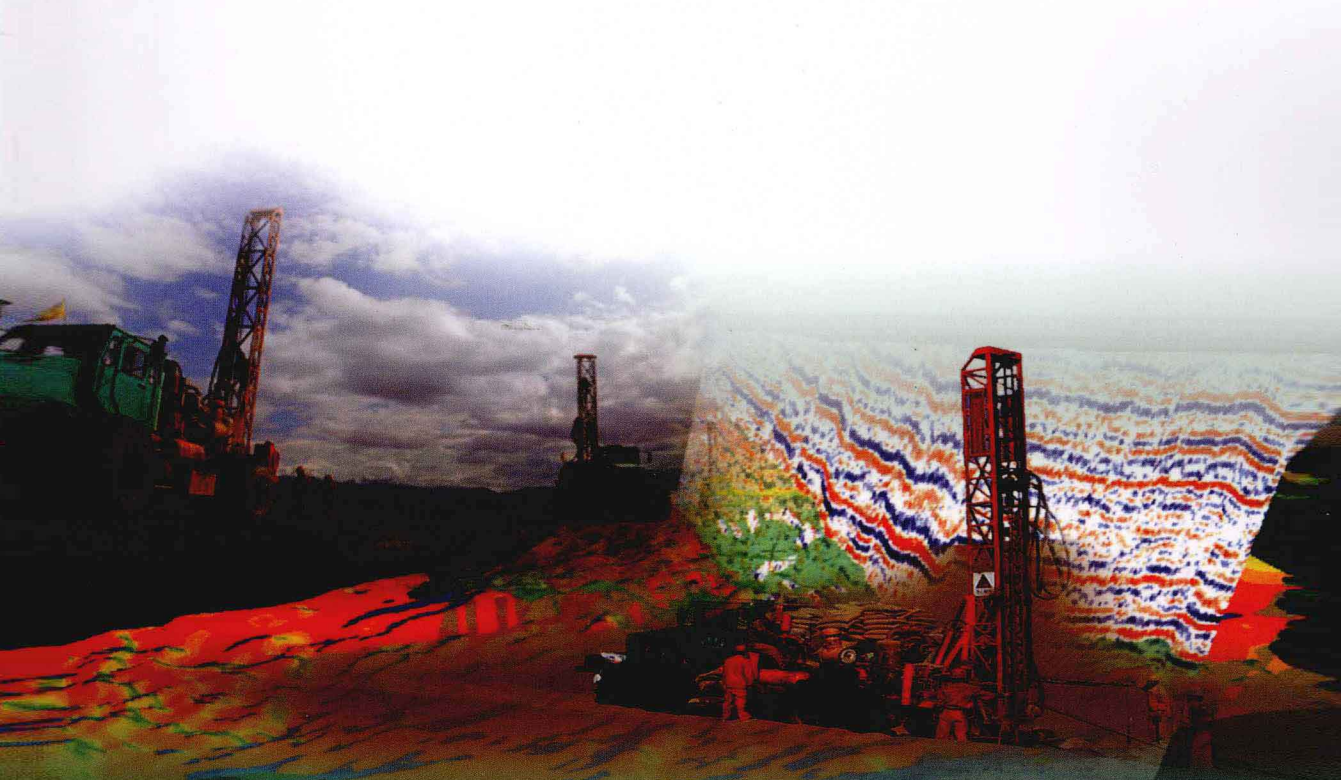


高等学校教材

地震勘探野外生产实习教程

易远元 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

地震勘探野外生产实习教程

易远元 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对地震勘探的仪器、采集技术及施工方法进行了全方位的介绍,理论紧密结合实际。在详细叙述了采集理论知识之后,对实习报告的编写,从内容上进行了指导,在要求上进行了规范。

本书可以作为勘查技术与工程专业学生的地震生产实习指导书,也可以为从事现场地震资料采集的科技人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震勘探野外生产实习教程/易远元编著.

北京:石油工业出版社,2011.12

高等学校教材.

ISBN 978-7-5021-8748-4

I. 地…

II. 易…

III. 地震勘探—生产实习—高等学校—教材

IV. P631.4-45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 212283 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) 64523579 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 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 17

字数: 420 千字

定价: 28.00 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

地震采集理论和实践的发展是推动地震勘探发展的原始动力。地震采集理论的起源可以追溯到 1678 年胡克定律的发表。1914 年, Fessenden 首次提出用地震波进行勘探的思想并获美国专利; 同年, Mintrop 在德国设计出了地震仪。此后, 地震采集技术得到较快发展, 最具代表性的几项技术是组合检波技术 (1933 年)、多次覆盖技术 (1950 年)、模拟磁带记录仪 (1952 年)、数字地震仪 (1963 年) 和三维地震勘探 (20 世纪 70 年代末)。20 世纪 80 年代以后, 多道遥测地震仪、采集站、可实现实时相关的可控震源已大量应用于生产。

自 1927 年地震反射波法勘探进入工业应用阶段以来, 用于地震数据采集的地震记录仪、地震检波器、震源等地震勘探装备和地震采集方法已发生了翻天覆地的变化。目前, 地震采集已在采集理论、观测系统优化、高精度采集、激发和接收研究、地震仪器的更新换代和数字检波器等诸多方面, 取得丰硕成果。近年来, 随着基于 MEMS 的数字检波器 (传感器) 的问世, 地震采集以提高分辨率为目标, 正在酝酿并推行一场新的革命, 即所谓的 Q—Marine 和 Q—Land 地震采集技术。地震采集是地震勘探的先导, 做好采集, 是做好后续资料处理、解释的基础。作为一个地震工作者, 应及时跟踪地震数据采集仪器、地震检波器、现代新型震源、国内外现行使用的采集技术和施工方法的新情况、新发展。

地震采集技术的迅猛发展对地震勘探工作者提出了更高的理论要求, 然而专门针对地震采集理论的书籍十分稀缺, 尤其是适合刚刚接触专业知识的学生用的书籍更是凤毛麟角。本书针对采集仪器、方法、施工, 将采集理论进行了精心整合, 使其自成一体, 从信号分析的角度系统阐释了地震仪器原理、观测系统原理、震源激发原理, 为地震数据处理方法提供了理论基础; 同时在施工方法的介绍上, 笔者结合多年地震生产工作的经验, 从油田实际生产出发, 在介绍完试验工作和生产工作之后, 介绍了油田现行使用的几种采集软件, 如 KLSeis 软件等, 并选取相关地区的采集项目作为示例, 为后面实习报告的编写提供了范例和模板, 进而达到指导理论结合生产实习的目的。

在本书的编写过程中, 得到了长江大学有关领导和同事的密切关注和支持, 王攀、王力、李建雄、夏志刚、祖满等同学参加了文字编排和图件清绘工作; 同时, 相关技术知识的交流与探讨还得到了江汉油田物探公司领导及有关地震队技术人员的鼎力协助, 书中引用了许多其他作者的研究成果和相关文献资料, 在此一并表示最衷心的感谢!

由于书中涉及的内容广泛, 方法繁多, 加之作者水平有限, 书中的不当之处在所难免, 敬请读者批评指正。

编者

2011 年 8 月

目 录

绪论	1
第 1 章 地震资料采集仪器概论	8
1.1 地震仪器概况	8
1.2 地震仪器的电路系统简介	19
1.3 地震仪器新进展	33
第 2 章 地震资料的采集技术	41
2.1 观测系统	42
2.2 激发方式	85
2.3 接收方式	117
2.4 地震资料采集新技术	125
2.5 新型地震勘探技术中的地震采集技术	150
第 3 章 地震资料采集的施工方法	168
3.1 试验工作	168
3.2 生产工作	197
3.3 地震数据采集成果	214
3.4 常用采集软件简介	215
3.5 采集实例	230
第 4 章 地震勘探生产实习报告的编写	262
4.1 实习的目的与任务	262
4.2 实习内容	262
4.3 实习报告的内容	263
参考文献	265

绪 论

地震数据采集的好坏关乎地震数据处理及地震资料解释的成败。地震数据处理及地震资料解释是可以重复进行的,而地震数据采集在一个施工合同期间通常只允许一次性完成,否则的话,勘探成本难以支撑。可见地震数据采集的每个环节均需严格按地震数据采集设计要求进行。

地震数据采集发展简史

自 1927 年地震反射波法勘探进入工业应用阶段以来,用于地震数据采集的地震记录仪、地震检波器、震源等地震勘探装备和地震采集方法已发生了巨大的变化。总的来说,地震数据采集方法发展史上有四次重大技术变革,简单介绍如下:

(1)1933 年,在地震反射波法勘探中采用地震检波器组合技术。原先野外地震数据采集时每道(或每个接收点)只用一个检波器接收地震波,后来在一个道上沿观测排列方向用几个检波器接收地震波。到 20 世纪 50 年代,地震检波器组合技术已经成为地震勘探中例行的工作方法,而地震检波器组合个数及组合图形视工区的地震干扰波发育情况而定。地震检波器组合技术一直被认为是有效地压制面波和微震之类的干扰波、提高原始地震数据信噪比的重要手段。但是从需要保真地震波的振幅观点出发,认为采用地震检波器组合必然对地震波振幅产生损害,故建议在地震数据采集中应尽量少用或不用地震检波器组合。

(2)地震多次覆盖技术是 20 世纪 50 年代初期出现的,直到 1962 年才在地震勘探中广泛应用。这主要得益于模拟磁带地震记录仪的日益成熟,也有了与多次覆盖技术相匹配的共中心点叠加技术。地震多次覆盖技术是地震数据采集方法上一次革命性的变革,原先地震观测方法只能对地下反射点进行一次观测,采用多次覆盖技术之后,可以对地下同一反射点进行重复观测,重复次数由事先根据地质任务要求设计的地震多次覆盖次数确定。多次覆盖技术是地震勘探中压制多次波、随机噪声及提高地震资料信噪比的主要手段,多次覆盖资料也是准确计算地震波传播速度的基础资料。值得引起注意的是,现今不断有人对多次叠加技术提出质疑,认为这种方法也会引起地震波振幅的畸变,应直接采用 AVO 拟合技术。

(3)1965 年,我国地球物理学家李庆忠及俞寿朋等人采用光点照相地震记录仪在山东胜利油田开展了三维地震数据采集试验,由于当时缺少相应的数据处理设备,三维资料无法解释,此项成果直到 1979 年才在《地球物理学报》上发布。而在 20 世纪 70 年代初,国外才出现三维地震勘探技术。我国于 1980 年开始采用数字磁带地震记录仪按照新的思路开展三维地震方法试验,1985 年后三维地震技术在我国逐步展开。三维地震勘探是一种面积勘探方法。进行三维地震数据采集时最常用的观测系统有束状、块状、环状及不规则形状等。三维地震数据采集可为精细的地质构造、地层特性描述及油气田开发提供更可靠的基础资料。

(4)源于 20 世纪 50 年代前苏联人发明的 VSP 技术在 80 年代大放异彩,它不仅可以直接用于标定层位、求取速度及标准子波、确定地层倾角,而且可以在井下进行三分量测量,研究地层的各向异性。如今正在大力推广 VSP 三维联合数据采集试验。

地震数据采集的三个阶段

1. 前期准备阶段

前期准备阶段主要包括以下几方面的工作:

(1)工区详细踏勘,即对工区内可能对正常数据采集施工和采集资料质量产生影响的因素(如地形、地表障碍物等)进行详细的踏勘和了解;

(2)工程技术设计,根据地质任务要求,搜集工区以往施工方法、资料(包括表层和深层),并进行地震采集方法和参数论证,制定本次地震数据采集设计方案(包括测网部署、技术指标及资源配备、HSE 管理方案等);

(3)地震采集设备检测,即按勘探任务要求,对所用各类设备的技术性能进行检测;

(4)进行地震采集试验及地震采集二次方法论证,根据工程技术设计要求,进行点上(或段上)采集参数的试验,以了解工区内资料品质,确定合理的最佳数据采集参数。

2. 数据采集阶段

在前期工作完成后,便可进入正式生产阶段,开始地震数据采集。此阶段主要包括以下几方面的工作:

(1)测量,按工程技术设计要求将激发点和检波点理论坐标放样到野外实际位置上;

(2)近地表调查,即利用小折射、单(双)微测井或其他方法对地表的低降速带厚度、速度进行调查(也包括潜水面深度,地表露头岩性、速度调查),为选择最佳激发参数和静校正数据提供依据;

(3)激发与接收,根据地震采集试验中确定的施工因素,并按照施工顺序要求进行排列布设、钻井、下药和激发,同时利用地震检波器和地震记录仪接收并记录采集的数据;

(4)施工质量检查与监控,通过现场检查施工参数、仪器监控环境噪声,并利用现场处理机对采集的原始资料进行初步分析,以对施工质量进行检查与监控。

3. 资料整理、验收阶段

对一个工区完成数据采集后,便可根据要求进行项目最后验收,资料分类整理、装订和归档。

采集设备

地震数据采集设备主要包括:

(1)测量仪器,主要有全站仪和 DGPS 差分定位仪;

(2)地震记录仪,按照地震数据采集设计要求从有线地震仪、有线遥测地震仪及无线遥测地震仪中任选一种;

(3)震源设备,在平原区进行地震作业时可选用启爆炸药激发的爆炸机和各种机械钻机;在砾石区、沙漠区、山前带、城镇区进行地震作业时宜用可控震源激发;在复杂山地进行地震作业时可选用启爆炸药激发的爆炸机及山地钻机;在海洋和湖泊进行勘探作业时通常采用气枪震源船;

(4)地震检波器,陆地接收一般采用动圈式加速度检波器,水中接收一般采用压电检波器;

(5)现场处理设备,主要用于监控野外地震数据采集质量。

地震数据采集的发展趋势

地震数据采集主要向四个方面发展:

(1)三维数据采集的观测系统逐步向全方位和高密度空间采样发展,以解决各向异性、复

杂地质体成像问题,提高地震勘探分辨率;

(2)时移地震数据采集的工作量将不断增加,以实现油田开发中对油气藏的动态检测,提高采收率;

(3)由常规的纵波地震数据采集,逐步向多波多分量采集发展,以解决纵波勘探难以解决的问题;

(4)向三维 VSP 和井间地震数据采集发展,进一步为油田开发服务。

地震采集方法和参数论证

在地震数据采集过程中所采用的观测方法及所用全部采集参数的依据,使用正确的地震采集方法和最佳的采集参数是获得优质品地震资料的前提。

地震采集方法主要包括地震观测系统、地震激发方式和地震波接收三个部分。地震观测系统是指激发点与接收点排列之间的相互位置关系,不同地震勘探方法有不同的观测系统,相同的地震勘探方法因完成地质任务的需要也允许有不同的观测系统。地震激发方式是指激发人工地震波的方式(激发人工地震波又称人工震源,简称震源),常用的震源有井炮炸药震源、可控震源(机械震源)、气枪震源(高压气体在水中猛烈地释放)、敲击震源(重锤落地)等。地震波接收是指接收人工激发地震波的方法,包括地震勘探记录系统及地震检波器布置方式。

观测系统参数包括道距、接收线距、炮点距、炮线距、最大炮检距、最小炮检距、最大非纵距、覆盖次数、观测方位、束间滚动距等。激发参数包括激发井深、炸药类型、激发药量、激发井数、组合基距、组内距等;可控震源激发时的震源吨位、震动台数、震动次数、扫描频率、扫描方式、扫描长度、震源出力等;气枪震源激发时的气枪组合方式、气枪容积、气压、激发水深等。接收参数包括时间采样间隔、记录长度、检波器类型、组合个数、组合图形、组合基距、组内距等。

参数论证是指对地震采集过程中所采用的参数依据,它直接关系到地震资料的品质好坏、地质任务能否完成、勘探的成本大小,故在地震勘探野外采集前必须对这些参数的合理性进行的论证。参数论证的具体内容包括以下几个方面:

(1)通过虚反射分析原理,对不同的激发井深计算虚反射叠加后的信号响应,从中确定最佳的激发井深、最佳的保护频率及最佳的激发能量方向;

(2)通过计算各目的层的纵横向分辨率、最大炮检距、面元尺寸、偏移孔径和观测系统,确定最佳的观测系统;

(3)分别通过对检波器及震源组合特性计算及理论分析,确定最佳的组合图形及组合参数。

通过以上激发参数、排列参数和组合参数的分析论证,可以基本确定野外的采集方法。在此基础上进行实地采集方法试验,再根据试验数据进行二次采集方法论证,力求采集方法尽量与实际地震地质条件吻合,获得最佳的采集效果。

地震采集试验

根据地震数据采集设计在野外现场开展一系列试验验证工作的过程。其目的是通过采集试验了解所设计的地震数据采集方法能否满足地质任务和采集技术的要求,并在此基础上对采集设计进行适当的调整和优化。地震采集试验工作通常包括点试验和线试验:点试验项目主要有干扰波和环境噪声调查、激发因素及接收因素(包括仪器因素)试验;线试验是将试验点上获得的最佳采集参数用于测线上,并结合地震观测系统对试验段测线的资料及有关参数的使用效果进行评估,从而确定出最佳的地震采集参数。

试验前要充分了解工区内前人所做的工作,在此基础上拟定详细的试验方案,取全取准各项基础资料。试验点和试验线的地震地质条件选取既要有代表性,又要力求分布均匀,以便了解不同地表条件及地下地震地质条件的情况。试验工作要遵循从简单到复杂的原则,并要保持试验因素单一;在取得各项单一最佳因素的基础上再综合选择各种合理因素,要尽可能采用简单因素解决所提出的地质任务。

1. 干扰波和环境噪声调查

对于一个新的勘探区,在地震数据采集试验前首先要开展区内干扰波和环境噪声调查。通过“盒子波”、“十字形”、“L形”等方法调查和了解工区内干扰波发育情况,并确定有效波、干扰波和环境噪声的特性。在勘探程度较高的地区,需要收集该区以往干扰波调查资料及以往老资料中干扰波发育情况,制定有针对性的对策。

2. 激发因素试验

根据地震数据采集中使用的激发震源类型不同,试验内容也不尽相同。地震勘探中常用的激发震源多为可控震源、气枪震源和炸药震源等。使用可控震源时,主要进行驱动幅度、扫描长度、震动台次和组合台数等试验;使用气枪震源时,主要进行气枪浸入水中的沉放深度、工作额定压力和气枪组合阵列方式等试验;使用炸药震源时,主要进行激发井深、激发药量和组合井方式等试验,同时应充分考虑炸药周围介质的性质等。通常炸药埋藏深度(井深)宜选择在潜水面和高速层以下的良好岩性中激发。炸药量的选择应保证最深勘探目的层有效反射信号有足够的信噪比,在此基础上尽量考虑采用较小的药量。当药量 Q 达到饱和药量 Q_0 时,炸药爆炸产生的能量对提高穿透地层的作用已很小,多余的能量基本上消耗在炸药对围岩的破坏上。在信噪比较低的地区,单井激发资料品质较差,可采取多井组合激发,旨在提高地震波有效下传能量,压制干扰,拓展有效信号频宽。经验表明,组合井药量和井距的选择要考虑各激发井的爆炸半径,即:

$$R = KQ^{1/3}$$

一般系数 K 取 1.5。

3. 接收因素试验

在干扰波调查基础上合理地设计地震检波器组合方式,不仅能够最大限度地压制干扰波,而且能保证对有效信号压制最小。根据工区内发育的干扰波特征(频率、波长、强度等),设计不同接收参数,如地震检波器类型、数量、串并联方式、组合图形、组合基距的大小和检波器埋置条件等。

检波器类型的选择主要根据工区地质任务要求,考虑检波器的主频大小及与采集系统的匹配情况;检波器组合个数的选择应遵循对资料品质影响较小及在施工方便的情况下尽量采用较少的检波器组合个数;检波器串并联方式选择主要考虑以提高有效信号的信噪比;区内检波器埋置条件要求尽量做到平、稳、正、直、紧,埋置深度要以能最大压制环境干扰为宜;检波器组合图形应以压制方向性干扰波为主,通常包括线性组合和面积组合方式;组合基距原则上以不跨相邻地震道为宜。上述接收因素的最终选定需根据每项因素试验结果,再结合处理参数的选择,对不同因素的资料进行对比分析,才能选出最佳的接收因素。

4. 仪器因素试验

仪器因素的选择原则有两条:一是有利于提高地震信噪比,二是有利于提高地震分辨率。一般根据仪器型号不同和内置有关参数确定试验内容,试验项目主要有:采样间隔、仪

器前置放大器增益、高低截频滤波、记录长度等。其中,仪器采样间隔选择应考虑勘探深度和地质任务对分辨率的要求;前放增益的选择应考虑有效弱信号放大所允许的最低水平,但要防止信号出现畸变;高低截频滤波的选择应考虑从浅到深目的层的有效频宽和低频干扰的频率范围。

5. 仪器、震源和检波器对比试验

在同一工区,由于地表条件不同,或者采用不同的仪器,或者由几个地震队施工,并可能使用不同的激发震源和检波器,这就需要在工区内的同一位置或点上开展对比试验,以便提取不同激发震源的子波、检波器相位和仪器内部记录系统时差,用于子波整形和时差校正,供该区在统一连片资料处理时使用,以确保全区资料的统一和衔接。

6. 观测系统试验

在点试验优选施工参数的基础上进行线试验,试验线采用的观测系统要有较高的覆盖次数、较长的炮检距和较小的面元,以便灵活地进行不同的数据组合。通过室内处理分析,抽取多种观测系统参数(不同的覆盖次数、不同最大炮检距大小、不同面元大小及不同的组合方式等)的地震剖面进行对比,并结合定性和定量分析,同时兼顾勘探成本和施工效益,在保证完成地质任务的前提下,综合优选观测系统参数。对于一些勘探程度较高或开展二次地震数据采集的地区,仍有必要开展线束试验工作。

现场地震处理

在野外使用小型计算机及现场专用地震处理软件对地震资料进行适时的简单处理。它是一种以检验地震数据采集质量为主要对象的地震数据处理方法。基础数据现场地震处理要检验的数据主要包括原始地震数据、观测系统或 SPS 文件、测量数据及静校正数据等一切地震采集数据,具体有不具备自检能力的地震仪器月检记录;分析采集的原始资料噪声水平;炮点、检波点点位的准确性;激发状况(包括 TB 状况)及接收状况(死道、不正常道、反极性道、漏电等);静校正量的效果;采集数据的记录质量及叠加剖面上目的层的成像质量等。

1. 现场地震处理工作的主要工作流程

(1)接受野外原始资料,包括原始磁带、仪器班报(SPS 文件)、野外静校正数据及有关观测系统资料,其重点在于检查各项原始资料是否符合要求、齐全及能否正确机读等。

(2)将野外记录格式磁带数据正确地解编成数据处理系统可以接受的格式数据,同时显示部分单炮记录,以进一步检查数据解编的正确性。

(3)进行观测系统定义,包括定义炮点、检点的野外实际位置及它们的相互关系,并绘制及分析炮点、检波点的平面位置图,CMP 面元的覆盖次数和最小、最大炮检距分布图,用来检验和野外实际情况是否符合。

(4)通过叠前去噪剔除不正常道记录、炮记录及野值,消除强面波和其他规则干扰,使去噪后的剖面信噪比有明显的提高,波组特征清楚。

(5)通过振幅补偿和反褶积(选做)处理,使地震记录上的浅、中、深的反射能量基本均衡,相邻炮记录之间也无明显的能量差异,地震记录的分辨率有明显提高。

(6)认真检查炮点和检波点高程数据,绘制静校正量平面图,分析静校正量变化的合理性,在此基础上进行静校正,必要时可选做剩余静校正(其时窗应选在反射品质较好的地震层位),使剩余静校正的剖面上不应出现明显的假象、剖面质量至少不低于剩余静校正前的剖面。

(7)速度分析点的密度应根据地质构造情况合理选择,通常情况下每公里选取一个点,三维情况下要求每平方公里选四个速度分析点(每个速度分析点使用的 CMP 面元个数要合理,并尽量包含各种不同炮检距的道,切除参数要正确,速度扫描范围应大于实际资料存在的速度范围),速度拾取要可靠,空间变化要合理。

(8)选做倾角时差校正速度分析,用于速度分析的道集除应符合以上速度分析的原则外,还应采用倾角时差校正后的 CMP 面元道集,所用的偏移孔径应小于最大炮检距的 $2/3$,其倾角应大于实际资料存在的最大倾角,倾角时差校正后的叠加剖面的断面波、绕射波应更丰富,倾斜反射更清晰。

(9)将经动校正后的单炮按共面元进行叠加,获得叠加剖面。

(10)选做叠后去噪声处理,注意选用合适的去噪方法及合适的参数。

(11)通过叠后时间偏移(选做)处理,使同相轴归位,断点清晰(偏移前要做好偏移算法和速度场试验)。

(12)再进行一些修饰性处理(选做),如地震勘探滤波及增益处理,力求使有效反射同相轴的波组特征清楚。

在现场处理工作中,为了选择最佳的处理流程和参数,在执行每个重要的处理步骤之前,应选取具有代表性的资料进行试处理。试处理的项目一般包括振幅补偿、反褶积、剩余静校正、切除、倾角时差校正、偏移速度场、滤波和增益、去噪等内容。在现场处理工作中,每完成一步作业,都应该认真检查作业运行的文件、质量控制图件和中间成果,以确保使用的处理方法、参数正确,作业运行正常,达到各项技术要求。此外,应按工作日向施工质量监督反映现场处理中发现的采集质量问题;每条剖面(每束线)还要填写质量信息(反馈)报告,一式两份,内容包括施工效果初评、存在问题。

2. 现场地震处理的发展趋势

现场地震处理是 20 世纪 70 年代初的产物,它是地震数据采集发展史上一个标志性事件。我国也于 70 年代中期开始研制现场地震处理软件,90 年代初我国自主开发的现场处理商业软件 GRISYS 面世,2000 年由东方地球物理公司自主开发的 KLSeis 新一代地震数据采集工程软件研制成功,有力地推动了我国地震勘探现场数据采集质量的提高。如今现场处理已经成为石油公司或地震承包商对现场采集质量控制的主要手段。随着勘探工区的地震地质条件越来越复杂,对地震数据采集质量的要求越来越严格,对现场处理的要求也越来越高,导致现场处理和室内处理的区别也越来越小,现场处理有代替室内处理中预处理部分的趋势,从而成为室内最终处理不可缺少的组成部分。

地震采集二次方法论证

在地震数据采集设计的基础上进行现场试验或施工,并结合野外实际采集的资料对理论采集参数再进行一次论证的过程称为地震采集二次方法论证其内容主要有以下几个方面:道距,炮点距,CDP 点距或面元尺寸,排列长度,覆盖次数,检波器类型,炮点、检波点组合个数、组合图形、组内距、组合基距,以及激发井深等。通过地震采集二次方法论证,可在正式施工前确定符合实际要求的施工参数。

道距、炮点距的选择和 CDP 点距或面元尺寸的选择是紧密相关的。通常较好的验证方法是在试验中进行点采样,现场处理时再抽取不同的 CDP 点距或面元尺寸剖面进行对比分析,检查理论设计的道距或面元间距是否会引起假频或空间采样的不足,以便确定技术上可靠、经济上合理的道距、炮点距及 CDP 点距或面元尺寸。

覆盖次数的确定通常是由布置一条高覆盖次数采集试验线的最终数据处理结果确定,此时可对处理中通过抽炮或抽道的方法形成不同覆盖次数的剖面进行对比分析,以确定合适的覆盖次数及排列长度(排列长度也可由点试验确定)。至于检波器类型、炮点、检点的组合个数、组合基距等项目,既可在点试验时,也可在线试验时加以分析和论证。点试验时通常采用单点激发,采用不同的检波器类型或组合方式的排列同时接收,确定最好的接收、激发方式。在试验线进行这类项目论证时,虽然分析结论更客观,但试验成本较高。

随着勘探不断深入,需要在野外施工试验期间进行二次论证的内容越来越多,并要求做到以定量分析代替以往的定性分析,力求使采集参数分析更加科学、更具有代表性及更加符合实际。

第 1 章 地震资料采集仪器概论

地震勘探基本上可分为野外数据采集、室内资料处理、地震资料解释三个阶段。每一个阶段都需要使用一定的设备才能完成预期的任务。没有这些设备作为工具和手段,地震勘探理论再完善也不能付诸实施,当然也就达不到勘探的目的。地震勘探装备是地震勘探的物质基础。事实上,一个国家勘探装备的状况,在很大程度上反映了这个国家的石油勘探水平。

地震勘探仪器是野外地震数据采集工作中最精密、最关键的装备,从地震波的激发、接收、加工到记录都是在地震勘探仪器控制与实施下完成的。地震勘探仪器的性能质量和应用措施直接关系到所采集地震数据的地质效果,因此全面掌握地震勘探仪器的特性功能和应用技巧,并能根据不同的地质目标和作业环境科学合理地选配与应用地震勘探仪器就显得十分重要和有必要。

1.1 地震仪器概况

1.1.1 地震勘探仪器的任务与研究方法

地震勘探装备种类很多,涉及的范围很广,其中直接用于野外地震数据采集的专用设备称为地震勘探仪器。地震勘探仪器的任务是将由震源激发的,并经地层传播反射回地表的地震波接收和记录下来。从这个意义上讲,地震勘探仪器主要包括检波器和记录仪器。检波器接收地震波并把它转换成电信号,记录仪器对地震电信号进行放大滤波再把它记录下来,成为野外地震记录。

地震勘探第一阶段(野外数据采集阶段)的最终成果,就是地震勘探仪器产生的野外地震记录。这些野外地震记录是地震勘探的资料处理和资料解释的原始依据和工作基础。地震勘探仪器本身性能好坏和使用是否恰当,直接影响地震记录质量,也就必然影响到后期资料处理和资料解释工作,最终势必影响到地震勘探效果。所以,地震勘探仪器是地震勘探装备中最基础的设备,也是最关键、最重要的设备。正是由于地震勘探仪器在地震勘探中有很重要的地位和作用,所以地震勘探仪器原理历来是地震勘探这门学科中一个不可分割的内容。

研究地震勘探仪器不应该单纯从电子技术角度去分析地震仪的局部电路,而应该把电子技术与地震勘探原理紧密结合起来,着重研究下列内容:为了满足地震勘探的要求,地震仪整机应由哪些模块组成?各个模块之间有什么联系和影响?整机系统对各个模块的外部功能和技术指标应分别提出什么要求?各模块的性能对整机的性能有什么影响?仪器的工作参数应怎样选择才能发挥仪器的效率和提高勘探效益?诸如此类的问题就是地震仪整机的基本理论问题。如果不了解这些问题,即使会分析和计算地震仪的几个具体电路,那也只能是舍本求末,因小失大。

地震勘探仪器的一个突出特点就是型号很多而且更新很快,具体电路千差万别,使用器件不断更新。但是地震仪整机的基本原理是基本相同而且变化不大的。如果既掌握了仪器整机的基本原理又具有扎实的电子及计算机技术理论基础,那么在今后的工作中就能很快掌握所

遇到的具体仪器。

1.1.2 地震勘探仪器技术进展

地震勘探仪器是地震勘探装备中最精密和关键的设备。地震波的激发、接收与记录都是在地震勘探仪器控制下完成,地震勘探仪器的技术水平、性能指标与应用效果还直接关系到地震采集数据的质量,地震勘探采集的新技术、新方法又是通过地震勘探仪器实现的。所以,地震勘探仪器的技术进步也就成为地球物理勘探技术进步的重要组成部分。

1.1.2.1 地震勘探仪器发展概况

地震勘探仪器是集传感技术、电子技术、计算机技术、数据传输技术、通信技术、工艺材料技术等为一体的综合系统。随着地震勘探技术的不断发展地震勘探仪器也在不断更新换代,从 20 世纪 30 年代诞生第一代模拟光点记录地震仪器开始,大致可分为以下六代:

第一代是模拟光点记录地震仪器,其中以 51 型仪器为代表。此种仪器以光点感光照相记录作为地震生产资料,记录是直接可视的模拟波形,其特点在于记录为一次性的模拟波形,不能回放与重复利用,记录的地震信号的动态范围小。

第二代为模拟磁带记录地震仪器,其中以 DZ663 型仪器为代表。此种仪器以永久性记录到磁带的模拟信号为地震生产资料,记录是磁性的,可回放并多次利用,但关键电路没有实质性改善所以记录地震信号的动态范围也较小。

第三代是数字磁带记录地震仪器,如 DFS-V, SN338, MDS-10 等。这类仪器是将地震信号进行数字化后再记录到磁带上,其特点是仪器将地震信号进行前置放大采样、瞬时浮点放大,最后经过 A(模拟)/D(数字)转换器转换为数字信号记录到磁带。由于记录的是数字信号,所以抗干扰能力强,且可重复利用,同时电路技术有实质性突破,所以记录地震信号的动态范围也有较大提高。

第四代是遥测数字地震仪器,如 SN368、SYSTEM ONE 等。这类仪器与第三代仪器有同样的工作原理,所不同的是它们在计算机管理下完成地震数据采集,即通过控制布设在排列上的采集站采集地震数据。其特点是系统除主机外还包括地面站单元,电缆传输的是数字信号(本道除外)。这类仪器简化了主机的硬件构成并甩掉了笨重的模拟大线,其采集道能力与抗干扰能力都有显著提高。

第五代是 20 世纪 90 年代才推出的采用 $\Delta-\Sigma$ 技术的 24 位 A/D 型遥测数字地震仪器,如 SN388、SYSTEM TWO、BOX、ARIES、IMAGE、408UL 等。这代仪器较第四代不同的是它没有瞬时浮点放大器,经前置放大器放大后的地震数据直接进入 A/D 转换,突出的特点是瞬时动态范围大且实时采集能力强。

第六代是 21 世纪初开始面向勘探市场的全数字地震仪器,其代表是美国 ION 地球物理集团公司(以下简称 ION 公司)产的系统 IV(VC 或 VR)和 SERCEL 产的 408UL-DSU。这类仪器与前一代仪器的不同点在于:系统中包含了以 MEMS 技术为核心的加速度数字传感器(检波器),突破了模拟检波器长期以来制约系统瞬时动态范围进一步提高的瓶颈作用,真正实现了完全数字化,抗电磁干扰能力强,为今后实现宽频带万道多波采集创造了条件。

1.1.2.2 主流地震勘探仪器简介

遥测数字地震仪器众多,目前国内外勘探市场比较流行的仪器主要有:SN388、408UL、408DSU、SYSTEM TWO、IMAGE、SYSTEM FOUR、ARIES、BOX 等。下面将针对目前普

遍应用的仪器从技术特性、物理结构、适用环境等方面做简单的介绍。

SN388 仪器是法国 SERCEL 公司继 SN368 之后推出的采用 $\Delta-\Sigma$ 技术的集中供电有线遥测仪器。这种仪器采用 24 位 ADC 和 workstation 操作界面,仍是目前全球用量最大的有线陆地系统之一。它的主机由采集处理箱 (APM 或 PAM)、SUN 工作站、盒式磁带机 (STC) 与绘图仪等组成,地面设备主要有采集站 (单站 1 或 6 道)、电源站、交叉站、数据传输电缆等。本系统的主要优势是稳定性强、故障率低、数据传输率高、噪声低、失真小、道一致性好等。多年的应用效果表明其可靠性好、实时采集能力较强,很适合沙漠、平原、丘陵、过渡带和丛林等工区。

408UL 是法国 SERCEL 公司继 SN388 之后近年推出的产品,这种仪器继承了 SN388 的主要技术特性,所不同的是它采用了网络遥测技术并以采集链形式使采集站与电缆成为一体。网络遥测技术的应用使得排列的布设更为方便,又因其首次采用了采集链作为地面设备的基本单元,所以就进一步减轻了排列的总体重量,同时也为此后一体化检波器、电缆与采集站提供了基础。本系统仍然是有线遥测数字地震仪器,有海上和陆上等多种类型,适用范围更广。

ARAM24 是加拿大 GEO-X 公司生产的陆用有线遥测地震仪器。它也采用了 24 位 A/D 转换器,并首次将网络技术与重采样技术应用到地震数据采集系统。该系统的采集站为单站 8 道,且采集站实行分布供电。网络节点遥测技术的应用使野外施工十分方便,不再与传统仪器那样不同测线之间不能采集站互联,可视需要任意布设排列 (需在主机正确定义站点物理位置),这就为排列穿过河流、公路等障碍提供了便利。近些年 GEO-X 公司又推出了新一代的 ARAM ARIES 产品,这一产品继承、发展了 ARAM24 仪器的特点,相比之下优势主要表现在系统更为轻便、实时采集能力更强、质量控制更完善、传输率和单站道数可以随道间距作相应调整等。

SYSTEM TWO (第二代“系统—II”) 是美国 ION 公司于 20 世纪 90 年代初通过改进原有 System Two (第一代“系统—II”) 之后推出的继承型产品。本系统的采集站有多种类型,如有线型、无线型和海上型,在我国以 MRX 型采集站为多。本仪器系统的主体也是采集站,单站 6 道。与其他仪器相比,该系统还有许多独特的技术,主要是拥有高频提升、随机陷波、大线快车与自动超前测试等功能。实际应用效果表明本类仪器适合在沙漠、平原、过渡带等工区作业,也是我国勘探市场最较广泛应用的地震仪器之一。

与第二代“系统—II”兼容的后续产品是 IMAGE。这种仪器的采集站与第二代“系统—II”完全兼容,二者的区别只在主机和软件,后者主机的集成度更高 (没有 LIM 箱体),采集软件更加完善齐备,例如第二代“系统—II”一个 LIM 箱体在 1ms 采样时只有 504 的道容量,但 IMAGE 用一个综合箱体就有 3000 道的采集能力。在 IMAGE 系统基础上,ION 公司最近又推出了电线与采集站一体的模拟 (AC) “系统—IV”,该仪器的特性指标和关键技术和 IMAGE 相当,所不同的是系统的集成度更高、体积更小且是单站三道结构,主要优势是进一步提高了系统的采集能力 (10000 道/ms),并真正实现模拟与数字的完全兼容以及网络遥测通信技术。

TELSEIS STAR 是美国 FAIRFIELD 公司生产的无线遥测数字地震仪器。该仪器为单站 4 道,站中除采集电路外还有收发信号机与 12V 可充电电池。它主要是针对水上作业设计的 (也可在陆上使用),采集站具有体积小重心低等特点。由于是无线遥测系统,所以就不再有交叉站和笨重的大线等地面设备。采集站由主机通过无线电波直接控制、管理,站内的数据由电台发回到主机。与其他无线仪器一样,本仪器也拥有频率合成、站内叠加、软件相关、多频道回收等技术。继 TELSEIS STAR 之后 FAIRFIELD 公司又推出了 BOX 仪器。该仪器的主要技术特性与 TELSEIS STAR 相当,所不同是 BOX 系统有更高的技术指标且采用了全新的

调制技术(16QAM),因而数据传输率更高且抗干扰能力更强,另外其采集站可水陆两用(单站4或8道可选),因而较先前无线仪器有更广泛的环境适应性。

目前,最先进的地震仪器是以 SYSTEM FOUR(VC 或 VR)、408UL—DSU 为代表的全数字式第六代采集系统。这一代仪器采用了高精度的 MEMS 传感技术,使得检波器的动态范围达到 99dB 以上。它摒弃了模拟检波器的工作机理,在整个系统中不再有机电传感部件和任何模拟电路,有很高的信号保真度,且不受电磁干扰的影响。因此,这一代仪器是今后进行多波多维多道勘探的首选。

1.1.2.3 地震勘探仪器关键技术

20 世纪 90 年代以来,特别是最近 5 年,地震勘探仪器的技术得到了空前的发展,一般每隔 2~3 年就有全新独特的技术问世,每隔 8~10 年就诞生一代全新的仪器。地震勘探仪器的技术进步主要体现在技术指标越来越高、工作速度越来越快、采集能力越来越强、可靠性与稳定性越来越好、自动化与智能化程度越来越高、单道设备成本越来越低等。近年来的技术进步与创新主要体现在 A/D 技术($\Delta-\Sigma$ 技术)、数字传感技术、网络遥测技术、数字存储技术、高速超大规模硬件技术、硬件功能软件实现技术、超强道容量采集技术等方面。

1. $\Delta-\Sigma$ 技术

$\Delta-\Sigma$ 技术是通过提高采样密度改善样点的精度,20 世纪 90 年代初被引入到地震勘探仪器中。 $\Delta-\Sigma$ 技术的应用,使地震勘探仪器的 A/D 转换器从传统的 15 位发展到 24 位,也就使仪器的瞬时动态范围从不足 80dB 升至 110dB 以上。24 位 A/D 转换器具有足够的分辨率,因此就不再需要模拟的瞬时放大器,进而全面提高仪器系统的技术指标,特别是系统的谐波失真度可控制在 0.001%之内。正是由于 $\Delta-\Sigma$ 技术的应用,才使地震勘探仪器能够更有效地保护并记录大信号背景下的高频弱小信号。

2. 数字传感技术

由于数字传感技术的应用便产生了数字传感器(检波器),以数字传感器为核心的仪器就是全数字化的第六代地震勘探仪器(如 VC 或 VR 系统—IV、408UL—DSU)。数字传感器的技术特性主要包括以下几方面:

- (1)传感器直接输出一个 24 位样点的数字信号;
- (2)振幅频率特性曲线在 500Hz 内是平坦的直线;
- (3)信号失真度低于 0.003%,即瞬时动态在 90dB 之上;
- (4)无模拟电路和模拟信号,不受电磁干扰。

数字传感器是高度集成的独立单元,在野外一般不作组合,还具有故障率低、总重量与总体积小、排列布放方便、不漏电、排查故障和建立排列便利等优点。从而减轻了野外的劳动强度并提高了生产效率。数字传感器的应用为多波三维勘探、精细目标勘探,以及解决疑难地质问题和进一步提高勘探质量与效果等创造硬件条件。

3. 网络遥测技术

网络遥测技术就是计算机的网络通信技术在地震勘探仪器中的应用。仪器系统将整个地面排列(主要由固定物理地址的站单元构成)作为一个完整的局域通信网,每个站都是网络的节点,实际通信时计算机(服务器)便自由地在网络中对任何一个节点(单元)进行信息交换。这项技术的应用为野外排列(一般是三维排列)提供传输路径自由选择与通信资源自动分配,其优势在于可随意设计排列连接关系(适合跨越障碍),并能在个别路径中断时重新选择其他

路径来实现信息传输,即在野外施工时(一般是三维作业时)能按需要自由地选择排列连接方式,进而为跨越道路、建筑、河流等实现绕路传输提供可能。目前,408UL 与系统—IV 等多种仪器具备了完善的网络遥测功能。

4. 硬件功能软件实现技术

当今的地震勘探仪器之所以能够越来越轻巧紧凑,功能却越来越完备,技术指标也越来越高,主要得益于硬件功能软件实现技术。此项技术使得地震勘探仪器的部件特别是模拟部件越来越少,运算速度与精度却越来越高,同时自动检测与自动校验功能、质量分析控制功能等也越来越强。另外,地震仪器所用标准件与通用件越来越多,且硬件比重减少而软件比重增加。在地震数据采集时,数据的精度更高,地震道一致性更好,现场质量控制分析能力更强。

5. 超大规模集成技术

地震勘探仪器的硬件技术的突破性发展,使得仪器的结构越来越紧凑,稳定性与耐用性更强,适应性与通用性更好,性能指标更优异。正是由于新工艺(如 SMT 技术)、新材料(如优质光导纤维)的应用,地震勘探仪器的体积与功耗成倍下降,数据传输速率成几何级数提高(从每秒几兆位上升到每秒 100 兆位)。也正是由于超大规模集成电路的应用,使得地震勘探仪器的工作速度和能力成倍提高,而单个地震道设备的成本却成倍下降。

6. 数字存储技术

20 年以前地震数据存储用的磁带还是 0.5in 宽 9 个轨道的开盘带,最高记录密度也只有 6250bpi。不久很快就发展了盒式磁带(3480、3490、3580、3590、3592)。磁带的存储容量也从几百兆字节发展到十万兆字节以上,其存取速度提高了近百倍。在存储介质上,随着工艺与材料的发展,目前推出了在地震勘探中实用的光盘或硬盘存储介质,如系统—IV 与 408UL 就可选择磁带或硬盘两种存储介质。此外,当今的地震勘探仪器所用数据存储技术除了速度与容量达到国际先进水平外,存储数据的可靠性与安全性也达到最佳。与过去相比,所面临的数据丢失风险要小得多,这是因为新存储技术有更好的环境适应性和防错纠错能力等。地震勘探仪器数字存储技术的发展对地震数据采集工作的主要贡献就在于提高了施工速度和数据安全性,并降低了生产成本等。

7. 实时万道采集技术

实时万道采集技术包括数据传输技术、硬件技术、软件技术、存储技术、编码技术等。地震勘探正朝着多波、多维、多道采集方向发展,而且油公司也逐步要求地球物理公司进行万道甚至数万道接收的地震数据采集。目前,国际最先进的仪器(如系统—IV 和 408UL)已具备了这项能力。一般每隔 3~5 年,仪器的道接收能力就增加一倍,20 年前 2ms 采样的道接收能力还在 300 道之内,至今,仪器的道接收能力少则几千道,多的达几万道。道接收能力主要取决于地震数据的传输速度、处理速度与记录速度等。万道采集记录技术的问世使地震勘探仪器实现了超大规模地震数据采集能力,更重要的是为获得更丰富地下地质信息、降低勘探成本、提高施工效率等提供了可能。

除以上所述的几项关键技术外,近年来在地震勘探仪器系统中得到成功应用的新技术还有蜂窝通讯技术、16QAM 技术、高精度同步控制技术、数据压缩技术、高压直流供电技术、GPS 授时技术等。所有这些技术的进步、发展和应用,都是地震勘探仪器综合技术水平和能力整体提高的组成部分。

1.1.2.4 国内地震勘探仪器应用和研发

虽然目前的地震勘探仪器几乎都是从国外引进的,且地震勘探仪器的关键技术也基本都