



高等院校石油天然气类规划教材

地震勘探仪器原理

袁子龙 狄帮让 肖忠祥 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

地震勘探仪器原理

袁子龙 狄帮让 肖忠祥 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书首先介绍了地震勘探仪器的发展概况，并从地震勘探技术出发提出了对地震勘探仪器的基本要求，介绍了数据采集的基础理论。以地震信号为主线，系统地阐述了地震检波器、地震勘探仪器的数据采集系统、数据记录系统、回放监视系统的组成和原理。本书的重点为地震勘探仪器的数据采集系统。

本书可作为高等院校勘查技术与工程及相关专业的教材，也可供地球物理工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地震勘探仪器原理/袁子龙, 狄帮让, 肖忠祥编.

北京: 石油工业出版社, 2006. 5

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 7-5021-5451-5

I. 地…

II. ①袁…②狄…③肖…

III. 地震勘探-地震仪器-高等学校-教材

IV. TH762.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 019104 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

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.25

字数: 283 千字 印数: 1—2000 册

定价: 18.00 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

地震勘探技术正朝着不断提高分辨率和勘探精度的方向发展，三维地震和高分辨率地震勘探技术的普遍应用对地震勘探仪器提出了更高的要求，比如要求地震勘探仪器具有更大的动态范围、更宽的频带、更多的道数、更高的记录精度和具有高频提升功能等。正是在此情况下，近年来国外地震勘探仪器制造商先后推出了以 SN-388 和 I/O SYSTEM-TWO 为典型代表的新一代分布式遥测地震仪，为提高地震数据采集质量和实现高分辨率地震数据采集奠定了物质基础。

本书以地震信号为主线，全面系统地阐述了地震检波器、地震勘探仪器的数据采集系统、记录系统及回放监视系统的组成和基本原理。同时对地震勘探仪器中的新技术，如 24 位 $\Delta-\Sigma$ A/D 转换技术、频谱整形滤波器技术等作了详细深入的阐述。该书可作为勘查技术与工程及相关专业的教材，也可供地球物理工程技术人员参考。

本书由袁子龙教授（大庆石油学院）、狄帮让教授（中国石油大学）和肖忠祥副教授（西安石油大学）共同编写。第一章、第二章、第三章由肖忠祥编写，第四章由袁子龙编写，第五章、第六章由狄帮让编写。全书由袁子龙统稿，大庆石油学院韩刚老师清绘了书中的全部图件。

进入 21 世纪以后，科学技术迎来了新的迅猛发展阶段，高等教育正面临着一个新的发展期，编写一本适应新形势的地震勘探仪器教材既是迫切的需要，也是要经过长时间的努力工作才能完成的任务。由于编者水平和时间限制，本书在内容选材、系统结构等方面难免有错误及不妥之处，热诚地希望读者提出批评意见。

编者

2005 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 地震勘探仪器的任务、研究方法概况	(1)
一、地震勘探仪器的任务、研究方法	(1)
二、地震勘探仪器的概况	(2)
第二节 地震勘探对地震仪器的基本要求	(6)
一、地震波的形成	(6)
二、地震波的特征	(7)
三、对地震勘探仪器的基本要求	(9)
第二章 数据采集基础	(11)
第一节 信号检测基础	(11)
一、测量与计量	(11)
二、干扰与接地	(15)
三、微弱信号检测基础知识	(22)
第二节 采样、量化与编码	(31)
一、采样及采样定理	(31)
二、量化与量化误差	(35)
三、编码	(36)
第三章 地震检波器	(40)
第一节 电动式地震检波器	(40)
一、运动方程的建立	(40)
二、输出电压方程和固有振动	(42)
三、频率响应	(43)
四、性能参数	(45)
第二节 压电式地震检波器	(46)
一、压电陶瓷的压电效应	(46)
二、变压器耦合式海上检波器	(48)
三、带电荷放大器的海上检波器	(49)
第三节 涡流式地震检波器	(50)
一、涡流检波器的传递函数	(51)
二、涡流式地震检波器的主要技术指标	(52)
第四章 地震勘探仪器的数据采集系统	(54)
第一节 地震数据采集系统的基本组成原理	(54)
一、集中控制式地震数据采集系统	(54)
二、分布式遥测地震仪数据采集系统	(55)
第二节 仪器输入电路	(59)

一、仪器输入电路的基本形式及其要求	(59)
二、几种输入电路原理分析	(61)
第三节 低噪声前置放大器	(64)
一、放大器及其主要指标	(64)
二、仪器噪声对前置放大器的要求	(65)
三、低噪声前置放大器电路分析	(66)
第四节 电模拟滤波器	(70)
一、滤波器的基本概念	(70)
二、低切滤波器	(74)
三、高切滤波器(去假频滤波器)	(76)
四、陷波器	(80)
第五节 多路转换开关(MUX)	(82)
一、多路转换开关的基本功能	(82)
二、道间一致性与道间串音问题	(83)
三、减少道间串音的措施	(83)
四、多路转换开关的电路结构实例	(84)
第六节 瞬时浮点放大器(IFP)	(87)
一、瞬时浮点放大器的功能	(87)
二、瞬时浮点放大器的结构类型和原理	(88)
三、增益比较器	(93)
四、IFP放大器的逻辑控制	(99)
第七节 模数转换器(A/D)	(101)
一、A/D转换器基本类型及原理	(101)
二、逐次逼近型A/D转换器基本电路	(104)
三、DFS-V型A/D转换器	(107)
四、单极性A/D转换器	(109)
五、遥测地震仪中的集成A/D转换器	(111)
第八节 合一型模拟-浮点数转换电路	(112)
一、信号采样阶段	(112)
二、浮点放大阶段	(112)
三、模数转换阶段	(113)
四、零漂采样与校正	(116)
第九节 24位 $\Delta-\Sigma$ A/D转换技术	(118)
一、 $\Delta-\Sigma$ A/D基本理论	(118)
二、高阶 $\Delta-\Sigma$ A/D及应用	(122)
三、 $\Delta-\Sigma$ A/D中的数字滤波器	(123)
第十节 频谱整形滤波器(SSF)	(124)
一、SSF滤波器的作用	(124)
二、SSF滤波器电路原理	(124)
三、频谱整形滤波器的地质效果分析	(126)

第五章 地震勘探仪器的数据记录系统	(131)
第一节 数字磁带机构成原理	(131)
一、数字磁带机整机框图.....	(131)
二、走带机构及控制原理.....	(132)
三、写电路组成框图.....	(134)
四、读电路组成框图.....	(134)
第二节 磁带记录格式	(135)
一、概述.....	(135)
二、SEG - D 格式的标注段.....	(138)
三、SEG - D 格式的数据段.....	(140)
四、SEG - D 格式中的几个参数.....	(144)
第三节 SEG - B 格式写编排电路	(147)
一、DFS - V 型数字地震仪写编排基本原理.....	(147)
二、DFS - V 型数字地震仪写编排基本电路.....	(148)
三、地震道编排计时图及编排原理综述.....	(150)
第四节 磁带记录与写入编码	(150)
一、磁带记录密度及其限制因素.....	(151)
二、常用的地震磁带记录方式.....	(153)
三、NRZI 编码器实例分析.....	(156)
第六章 地震勘探仪器的回放监视系统	(157)
第一节 回放监视系统组成	(157)
第二节 读解编电路	(157)
一、读解编电路的基本组成.....	(158)
二、数据解编的控制过程.....	(159)
第三节 数字自动增益控制 (数字 AGC)	(159)
一、概述.....	(159)
二、数字 AGC 的基本原理.....	(161)
三、数字 AGC 的基本组成.....	(162)
第四节 数模转换器、反多路转换开关和回放滤波器	(162)
一、数模转换器 (D/A).....	(163)
二、反多路转换开关 (DM).....	(164)
三、回放滤波器.....	(165)
第五节 回放显示仪简介	(165)
一、JDS - 751B 型静电绘图仪简介.....	(165)
二、RH559 热敏绘图仪简介.....	(167)
参考文献	(170)

第一章 绪 论

第一节 地震勘探仪器的任务、研究方法及概况

一、地震勘探仪器的任务、研究方法

所谓地震勘探就是用人工方法激发地震波，研究地震波在地层中传播的规律，以查明地下的地质情况，为寻找油气田或其它勘探目的服务的一种物探方法。与其它物探方法相比，地震勘探具有精度高、分辨率高、勘探深度大等优点，因此，已成为石油勘探中一种最有效的勘探方法。在西方发达国家，石油勘探方面总投资的90%用于地震勘探。在我国，自大庆油田发现以来，新发现的油田有90%是用地震勘探的方法找到的。目前在我国的石油物探队伍中，绝大部分是地震队。

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之为地震勘探仪器。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 seismic wave 接收和记录下来。从这个意义上来讲，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。如果我们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。

二、地震勘探仪器的概况

半个世纪以来，随着电子技术、计算机技术、通讯技术和地震勘探技术的飞速发展，地震勘探仪器也在不断发展和完善。从记录内容和工作方式来看，地震勘探仪器大致分为五代。

1. 第一代：模拟光点记录地震仪

国外是从 20 世纪 30 年代初到 50 年代末开始应用的，大体经历了 30 多年。这是地震勘探的初期，也是五代地震勘探仪器中经历时间最长的一代。

新中国建立前我国基本上没有地震勘探，新中国建立后才发展起来。从 20 世纪 50 年代初到 60 年代末，我国应用了模拟光点记录地震仪，简称为 51 型地震仪，使用该仪器初步探明了我国几个大油气田，例如：克拉玛依油田、大庆油田、胜利油田、玉门油田等。

模拟光点记录地震仪的主要缺点：

①地震记录为模拟波形光点感光照相记录。此种记录不能做回放处理，故模拟光点记录地震仪不可作多次覆盖地震勘探。在现场进行生产时，接收记录之前必须选好激发和接收因素，否则无法补救。同时仪器操作比较复杂，记录需经洗相才能完成。

②地震资料的处理只能用手工进行，工作效率低，质量也难以保证。

③记录器动态范围小，一般只有 20dB 左右。为了适应记录器动态范围小的需要，在地震放大器中用了自动增益控制器（AGC）来压缩地震信号的输出动态范围。但自动增益控制是非线性的，又不能记录下当时放大器的增益值，故不能恢复原信号。因此，使用模拟光点记录地震仪只能解决某些几何地震学的勘探问题。

④地震记录频带窄，一般为 30Hz 左右，使大量有效波丢失。滤波器的中心频率一般为 20Hz、30Hz、40Hz、50Hz 等。通常用滤波 4 挡，其频带为 28~40Hz。

⑤采用电子管电路。与晶体管和集成电路相比，电子管电路有体积大、质量大和耗电量多等缺点。

⑥仪器操作自动化程度低，操作复杂，生产中容易出废品记录，生产效率低。

⑦地震道数少，一般为 26 道，只能作二维地震勘探。

⑧只适用于地震地质条件较简单的地区工作，复杂地区不能获得好的地震资料。

2. 第二代：模拟磁带记录地震仪

国外是从 20 世纪 50 年代初到 60 年代末开始应用的，经历了约十几年。这是地震勘探仪器发展的中期，也是五代地震仪经历时间最短的一代。

我国应用模拟磁带地震仪对原来的油气田作了进一步勘探，又初步探明了一些新油气田，如大港油田、辽河油田、南阳油田、中原油田和江苏油田等。

模拟磁带地震仪在开始时是直接记录式的，即由磁记录器直接记录模拟地震信号。但由于直接记录式的记录动态范围小，很快改为经调制后再记录，它比直接记录式的动态范围稍大一些。

西安石油仪器厂生产的为脉冲调宽式地震仪，重庆地质仪器厂生产的为调频式模拟磁带记录地震仪。

模拟磁带记录地震仪的主要特点：

①所得原始地震资料为模拟磁带记录和热敏纸模拟波形地震监视记录。模拟磁带记录可以回放处理，因此模拟磁带地震仪可以作多次覆盖，但为有限次的多次覆盖，一般为 6 次、12 次。因为模拟磁带记录在回放转录叠加时信噪比要降低，一般每转录一次要降低 6dB，

这就限制了作多次覆盖的次数。模拟磁带记录可以作某些数据处理，如计算速度谱等。

②地震资料处理可以用半自动化的基地回放仪进行，得到模拟波形记录和时间剖面图。比模拟光点地震仪的资料处理进了一大步，但资料处理的速度仍比较低，质量还不高，方法也比较少。

③磁记录器的动态范围稍大些，一般为 40~50dB，但是仍然达不到不失真记录的要求，因此也还是只能作某些构造地震勘探。采用直接记录式要受磁头与磁带磁化非线性的限制，采用脉冲调宽式则受调制器动态范围的限制，超调使地震记录波形失真，降低了地震记录质量。这些均限制了记录的动态范围。

④采用公共自动增益控制（公共 AGC）和程序增益控制（PGC），仍然存在着增益跟踪速度低，有非线性失真的问题。虽然设有增益测量道曲线，但其测量误差大，一般可达 30%，不能做定量计算，只能做定性估计。

⑤记录滤波器频带较宽，一般在 15~120Hz 范围内，回放时可以选择回放滤波挡，得到所需的地震波，比模拟光点地震仪有了较大的改进。

⑥采用晶体管电路，与电子管电路相比，有体积小、质量小和耗电量少等优点。

⑦模拟磁带地震仪的操作为半自动化的，比模拟光点地震仪有了较大的改进，使操作较简单，不易出废品记录，也不再需经洗相即可完成热敏纸模拟波形地震监视记录。

⑧地震道数仍然沿用模拟光点地震仪的道数，一般为 26 道，后来改为 48 道。

总之，模拟磁带地震仪比模拟光点地震仪有了较大的改进，使地震勘探仪器发展到一个新阶段。模拟磁带地震仪主要解决了原始磁带记录可以进行回放处理的问题，但仪器的主要问题还没有解决，所以仍然只适用于在地震地质条件较简单的地区工作，进行构造地震勘探。

模拟磁带地震仪存在的主要问题：

- ①记录动态范围小；
- ②地震道数少；
- ③多次覆盖次数受到限制；
- ④记录精度较低；
- ⑤地震资料处理方法少、效率低和质量差等。

3. 第三代：集中控制式数字地震仪

集中控制式数字地震仪是在前两代地震仪的基础上发展起来的。20 世纪 70 年代初期，基于瞬时浮点增益控制放大技术、模数转换技术、数字磁记录技术、通讯技术的数字地震仪是第三代地震仪。如美国得克萨斯公司 1970 年研制的 DFS-V 型，法国舍赛尔公司研制的 SN-338B 型数字地震仪，增益控制范围均为 0~84dB，每个增益台阶为 12dB。

瞬时浮点放大器于 1970 年由美国得克萨斯公司最先研制出来，以后其它公司也陆续研制出一些别具一格的瞬时浮点放大器。瞬时浮点放大器是指对每一个地震信号，在几十微秒时间内，可以在 0~84dB 或 0~90dB 之间选择其最佳增益，使信号得到接近满量程的放大，以提高仪器的测量精度，扩大仪器的动态范围。短时间的增益调整并确定即“瞬时”，可以大大提高增益跟踪速度。

集中控制式数字地震仪的特点：

①所得地震勘探原始资料为数字磁带记录和模拟波形地震监视记录。这样就使数字地震仪不仅具有模拟磁带地震仪的特点，即可作回放处理和多次覆盖以外，而且可作高次的多次

覆盖,覆盖次数不受限制。因为数字磁带记录在转录叠加时,其信噪比不降低。在实际应用上目前可作12次、24次、…96次的多次覆盖地震勘探。

②主放大器和模数转换器合在一起的动态范围大,理论上可达168dB以上,系统动态范围也在110~120dB,可基本满足地震勘探精度的需要。这样就可以使地震勘探不仅利用地震波的运动学特征进行构造勘探,还可以利用地震波的动力学特征进行岩性勘探和直接找油、找气的综合地震勘探,使地震勘探的水平提高一步。

③地震记录的频带宽,一般前滤波器的通频带在3~250Hz,有的可达3~500Hz。记录频带宽,对低频来说,有利于接收深层反射波,作深层地震勘探;对高频来说,可有利于接收浅层和薄层反射波,提高地震勘探的分辨率,作浅层和薄层地震勘探。

④记录地震波的振幅精度高,一般为0.1%,高的可达0.05%。这样就提高了地震勘探的精度,从而提高了地震勘探质量。

⑤地震资料的处理直接用电子计算机,可以发挥计算机的优势,使地震资料的处理速度快、质量高、方法多和效果好。这样就使数字地震仪与电子计算机成龙配套,并能使地震勘探发挥最大的作用。

⑥采用集成电路,可使复杂的数字地震仪变得体积小、重量轻和耗电小,使数字地震仪的性能稳定可靠,确保仪器正常工作。

⑦地震道数较多,数字地震仪的道数一般为48道、60道、96道、120道、240道。

⑧数字地震仪的操作自动化程度高,使用操作简单、维修方便、提高了工作效率,更不易出废品记录,从而保证了地震勘探的高效率生产。

4. 第四代:分布式遥测地震仪

为了适应三维地震勘探、高分辨率地震勘探、多波地震勘探、超多道超高次覆盖等新方法和新发展起来的层序地层学的需要,并随着数字通讯、遥控遥测、计算机控制处理、磁记录等方面新技术的发展,使得新一代遥测多道数控地震仪应运而生且发展迅猛。

所谓遥测,就是利用电缆、光缆、无线电或其它传输技术对远距离的物理点进行测量。遥测地震数据采集记录系统通常由许多分离的野外地震数据采集站和中央控制记录系统组成。采集站布置在接收地震信息的物理点附近,并以数传方式将信息传输到中央控制记录系统。

陆上电缆遥测地震数据采集系统有:SN-348、SN-368、WAVE-Ⅲ等;国产有:YKZ-480、SK-1004、SK-1005等型号。光缆地震数据采集系统有:MDS-14、MDS-16、MDS-18、DFS-Ⅶ-200、Fiber Seis等型号。无线遥测地震数据采集系统有:Opseis 5586、Telseis、Digiseis-200、Myriaseis等型号。

分布式遥测地震仪的主要特点:

①遥测地震仪没有数据采集电路与检波器之间的大线电缆,而是使用放在检波点上的采集站将检波器输出的模拟信号转变成为数字信号后再向中央控制记录系统传送。由于数字信号传输的抗干扰能力强,避免了传送模拟信号时大线所固有的道间串音、天电干扰、工频干扰等。革除了原有的笨重的大线。

②由于遥测地震仪排除了集中控制式数字地震仪那些限制记录道数的因素,其道数扩展只受到数据传输速率的限制,因此遥测地震仪地震道数可达120道、240道、480道、千道,甚至万道,适用三维地震勘探,施工效率高。

③遥测地震仪由于道数多、采样率高,必须采用高密度的数字磁带机。集中控制式数字

地震仪采用 SEG - B 地震记录格式进行记录, 遥测地震仪则大多采用 SEG - D 格式进行记录。

④遥测地震仪均采用计算机对整个系统进行可编程控制, 要增加系统的新功能, 可不做硬件上的修改, 只要添加新程序就可以了。因此, 采用计算机控制, 系统的功能就大大增强了。

⑤道数的不断扩展和分辨率的提高, 不仅要求解决模数转换速度不适应的问题和提高记录密度, 而且由于总的数据量急剧增加, 也使计算中心的计算机的数据处理工作量几倍甚至几十倍地增加。由于遥测型仪器在野外可用计算机对数据进行部分预处理, 这样就压缩了数据量, 减轻了计算中心的工作负担。

⑥遥测型地震仪可用计算机对记录数据及时地在现场进行处理, 能对有效波和干扰波进行定量测量, 随时计算出数据采集的信噪比, 甚至还可以绘制出时间剖面, 这样就能及时地选定最佳的野外方法和最佳的仪器参数, 以获得高质量的地震记录。

⑦由于遥测地震仪配备了成套的诊断和测试软件, 可以使操作人员全面检查各个部件的性能指标, 并且可以很方便地显示出有故障的部件, 有的诊断软件还可以检查出具体的有故障的器件。因此, 便于维护检修, 而且操作方便, 自动化程度高, 可以杜绝因操作不当引起的废炮。

遥测地震仪具有集中控制式数字地震仪所没有的许多优越性。从 1976 年第一台遥测地震仪问世到现在, 遥测地震仪发展趋势良好, 新产品层出不穷, 仪器型号已达 20 多种。

5. 第五代: 新一代分布式遥测地震仪

自从 20 世纪 90 年代, 国外推出了各种型号的新一代遥测地震仪。电缆传输的有: SN - 388、I/O SYSTEM - TWO、I/O SYSTEM - 2000、VISION、ARAM - 24; 无线传输的有: OPSEIS EAGLE、TELSEIS STAR 等, 这些仪器在地球物理方法、微电子、计算机技术等应用方面均代表了当前世界水平, 被称之为第五代地震勘探仪器。

新一代分布式遥测地震仪的主要特点:

①仪器的采样率仍为 2ms, 并兼有 1ms 及 0.5ms。通过提高去假频滤波器的陡度, 扩展频带至 400Hz(1ms) 或 200Hz(2ms), 截频可达 0.8 倍奈奎斯特频率, 有些仪器使用高频提升技术, 高频还可以做倍频 6dB 的提升。

②采集站中使用了 24 位 $\Delta - \Sigma$ A/D 转换器, 这样可大大提高瞬时动态范围, 减少畸变。地震道基本上不采用模拟滤波器, 这就消除了相移及频率畸变, 从而简化了采集站的电路, 使元器件的集成度高、更轻便, 功耗也更低。

③推出总记录容量为千道 (2ms 采样) 以至于 4000 道的系统, 甚至还有号称 19200 道的系统。但比较实用的系统仍为千道左右。

④实用的多道数字地震仪仍以有线数传方式为主。随着传输频率的不断提高, 传输媒介采用了双绞线或细同轴线。但光纤仍较少使用, 站间距可达 600m, 单线采集能力可达 2ms 采样、600 道。普遍使用交叉站以扩展多线能力。

⑤普遍重视人机界面的应用, 小至笔记本或 PC 机, 大至工作站均在使用。软件图形能力越来越强, 多窗口界面的应用日趋普遍。

⑥实时相关处理能力越来越强, 噪声编辑及叠加算法不断改进, 双源的相关技术使用日益广泛, 具有千道实时处理能力的相关器已经出现。

⑦仪器及采集站的设计上, 大量使用了各种专用集成电路。某些专门设计的电路可达数

万门乃至十万门以上的规模。主机的设计中采用了较多的 DSP 芯片, 将数字信号处理功能引入到数据采集过程, 完成了数字滤波、抽取、FFT 及叠加等多种功能。

⑧仪器及采集站设计上, 普遍采用了 SMT (表面贴装技术) 及 FPGA (超大规模门阵列芯片)。

第二节 地震勘探对地震仪器的基本要求

地震勘探仪器把返回地表的 seismic wave 记录下来, 为工程技术人员推断地下的地质情况提供依据。为了保证工程技术人员能准确、细致地推断地下的地质情况, 这就要求地震勘探仪器尽可能真实地把地震波的各种特征如实地记录下来。既不丢失有用的信息也不增添任何不需要的成分, 这是衡量一个地震仪性能好坏的标准, 也是设计和制造地震仪的基本要求。为了深入理解这个问题, 先来看看到达地面的地震波是怎样形成的。它有哪些特征, 然后再研究要把这些特征记录下来, 地震仪应具备哪些功能。

一、地震波的形成

如果把某工区地层看成是一个系统, 把震源激发产生的激发波形看成这个系统的输入信号, 那么达到地面的地震波就是这个系统的输出信号。对同一地层来说, 如果震源和激发条件不同, 它所产生的激发波波形也不同, 那么到达地面的地震波波形也就会不同; 另一方面, 在两个工区即使震源和激发条件完全相同, 但由于地下地质情况不同, 到达地面的地震波波形也不会相同。我们把震源及其激发条件对激发波波形的影响称为“震源效应”, 把地震波在地层中传播时受到的各种影响统称为“地层效应”, 到达地面的地震波波形便可认为是“震源效应”和“地层效应”共同作用的结果。影响地震波振幅、频率特征的“地层效应”主要有以下三种。

1. 波前扩散

所谓波前扩散是指地震波从震源向四面八方传播, 其散布的面积, 即波前面的面积随传播距离的增加而增大的现象。因此, 即使总能量没有变化, 单位面积上的能量也会越来越小, 从而使地震波的振幅也越来越小。在均匀介质中, 这种波前扩散为球面扩散。设在半径为 r_1 和 r_2 的波前面上, 地震波振幅分别为 A_1 和 A_2 , 则

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{r_1}{r_2} \quad (1-1)$$

即地震波的振幅与其传播距离成反比。

2. 吸收效应

地震波在介质中传播时, 其总能量实际上并不是没有变化的, 而是部分地逐渐被介质吸收。一般认为, 在均匀介质中吸收效应使地震波的振幅呈指数衰减。设地震波的频率为 f , 速度为 v , 起始振幅为 A_0 , 经过时间 t 传播 d 距离后, 由于吸收效应, 振幅将变为 A_t , 则

$$A_t = A_0 e^{-\pi f t / Q} \quad (1-2)$$

式中 Q ——反映岩石吸收衰减特性的品质因数。

吸收衰减的分贝数为

$$M = 20 \log \frac{A_t}{A_0} = \frac{-27.27 f t}{Q} \quad (1-3)$$

由 (1-3) 式可见, 对于同一种岩石来说, 同一频率的地震波在地下旅行的时间越长,

其振幅则越小。在旅行时间相同的情况下，地震波的高频成分比低频成分衰减得要快。因此，浅层反射波到达地面时振幅强、主频（振幅谱尖峰处频率）高，深层反射波到达地面时，振幅弱、主频低。

3. 反射和透射

地震波在遇到不同地层分界面时，会产生反射和透射。在有多个分界面时，将产生多个反射和透射。假如界面上下地层密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 ，地震波速度分别为 v_1 和 v_2 。入射波振幅为 A_0 ，反射波振幅为 A_1 ，透射波的振幅为 A_2 ，反射系数为 R ，则地震波从法线方向入射到界面上时有

$$A_1 = A_0 R \quad (1-4)$$

$$A_2 = A_0 (1 - R) \quad (1-5)$$

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (1-6)$$

反射系数是反射法勘探中的重要参数，反射系数的大小取决于界面两侧的岩性。岩性差异越大，反射系数的绝对值越大，反射波振幅越强。

二、地震波的特征

1. 有效波和干扰波

通常，检波器接收到的地震波有震源激发所产生的一次反射波、折射波、面波、声波、多次反射波等，也有自然界的微震和测线附近的人为干扰，如工业交通的振动干扰等。能够解决某一特定地质任务的这类波称为有效波，而一切妨碍分辨这些有效波的其他波统统称为干扰波。有效波和干扰波是相对的。在进行折射波法地震勘探时，折射波是有效波，但在进行反射波法地震勘探时，折射波就是干扰波。

目前，在地震勘探的实际工作中主要用的是反射波法。在用反射波法进行地震勘探时，“一次反射”波（简称反射波）是有效波。因此，在这里着重阐述反射波的特征。

2. 运动学特征

与反射波到达时间有关的特征，如到达时间、速度等，称为运动学特征。由几何地震学可知，在地面离震源激发点 O 距离为 x 的观测点 S 直达波到达该点的时间为

$$t = x/v \quad (1-7)$$

在图 1-1 中，设反射界面深度为 h ，倾角为 φ ，则该界面反射波到达观测点的时间为

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{x^2 + 4h^2 - 4xh \sin \varphi} \quad (1-8)$$

(1-8) 式所表达的 x 与 t 的关系曲线称为界面的反射波时距曲线。从原则上讲，如果通过观测获得了一个界面的反射波时距曲线，就有可能利用时距曲线方程给出的关系，求出界面深度 h 和倾角 φ ，推测出界面的位置和形态。这种确定地层构造形态的勘探称为构造勘探。

3. 动力学特征

地震波的波形特征称为动力学特征，它包括振幅特征和频率特征。

如果不考虑检波器接收到的干扰波，只考虑接收到的一次反射波，那么根据震源效应和

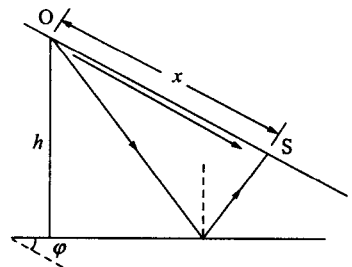


图 1-1 直达波与反射波到达时间关系

S—观测点；O—震源激发点；
x—观测点到震源激发点的距离；
h—反射界面深度； φ —倾角

地层效应的假设，可示意性地画出近源检波器输出的反射信号包络幅度随时间变化的曲线，见图 1-2。

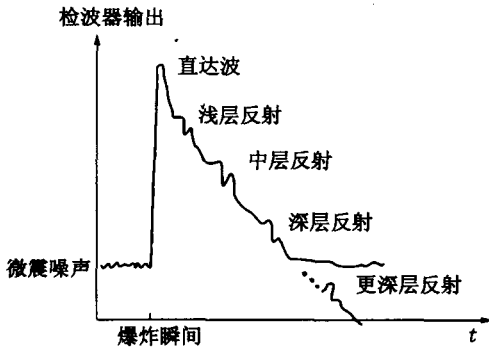


图 1-2 近源检波器输出信号包络的幅度曲线

在震源激发之前，地面由于风雨雷电、人畜活动、机器震动等产生一些微弱的振动，称为“环境微震噪声”。环境微震噪声使检波器产生微弱的输出电压。震源激发后，最先到达检波器的波是直接从震源传到检波器的直达波。由于直达波传播距离最短，能量最强，所以使检波器的输出电压突然增加。直达波过后，检波器电压急剧下降。在检波器电压持续下降的过程中，每当一个界面的反射波到达检波点时，检波器输出电压就在下降背景上发生一次跳变。可以认为，信号整体衰减的总趋势是波前扩散和吸收效应造成的。而叠合在整体衰减曲线上的起伏，则是由各

界面反射波的到达所致。当幅度比环境微震噪声还低的深层反射信号到达检波点时，这些深层信号便被环境微震噪声所淹没，因此检波器在此以后的输出基本上是环境微震噪声电压。

由 (1-6) 式可知，界面两侧岩性决定了该界面反射的强弱，由 (1-3) 式可知，相邻两界面间的岩性和距离将影响两界面反射的振幅衰减。总的来说，地层的构造和岩性将决定着反射波的形状。地震波的波形特征，称为地震波的动力学特征。如果地震仪在记录地震信号时，能将其波形不失真地记录下来，即完好地保留地震波的动力学特征，那就有可能设法从仪器得到的地震记录上测定出各界面的反射系数、相邻反射之间的振幅衰减，从而推测出界面两侧的岩性，甚至可直接确定在该地层中是否有油气存在，这种勘探称为“岩性勘探”和“直接找油找气”。

(1) 振幅范围

地震信号的振幅范围称为地震信号的动态范围，通常用最大地震信号幅度 A_{\max} 与最小地震信号幅度 A_{\min} 之比的分贝数表示

$$D_R = 20 \log \frac{A_{\max}}{A_{\min}} \quad (1-9)$$

设检波点离震源距离为 x ，最深目的层深度为 h ，设离震源距离 r_0 处地震波的初始振幅为 A_0 ，由于到达检波点的直达波只受到波前扩散的影响，因此，由 (1-1) 式可得直达波幅度为

$$A_{\max} = A_0 \frac{r_0}{x}$$

从震源传到最深目的层然后反射回来到达检波点的反射波，其幅度将受到波前扩散，吸收效应和反射三种因素的影响，因此，由 (1-1) 式、(1-2) 式、(1-4) 式可知最深目的层反射波到达检波点时的幅度为

$$A_{\min} = A_0 \cdot R \cdot \frac{r_0}{2h} \cdot e^{-\frac{\pi f}{v} \cdot \frac{2h}{v}}$$

将上两式代入 (1-9) 式可得

$$D_R = 20 \log \frac{2h}{x} - 20 \log R + \frac{27.27}{Q} \cdot \frac{2h}{v} \cdot f \quad (1-10)$$

(1-10) 式反映了决定地震信号动态范围的各种因素, 这些因素分别是: 偏移距、反射界面深度、反射系数、波速、岩石品质因数和地震信号频率。这些参数中任何一个有变动, 计算结果就不同。但对 6000m 以下的目的层来说, 目前普遍认为需要记录的地震信号的动态范围应达到 120dB。

(2) 频率范围

地震信号的频率范围随震源及其激发条件、地层的选频吸收作用、反射界面的深度和性质等因素的改变而改变。一般认为, 其下限由有意义的最深反射界面确定, 可低至 10Hz 以下, 上限由有意义的最浅反射界面确定, 可高达 500~1000Hz。

三、对地震勘探仪器的基本要求

1. 地震波运动学特征对地震勘探仪器的要求

为了利用地震波的运动学特征来推测地下反射界面的位置和形态, 就要求记录多道地震信号, 以便进行波的对比, 识别同相轴; 记录震源激发信号作为计算反射时间的起点; 记录计时信号作为计算反射时间的标尺; 在采用炸药震源时还要记录井口信号, 以测定地震波从炮井井底的炸药爆炸点传到炮井井口的时间—— τ 值, 进而依据已知的炮井深度 h 来推算表层的速度 $v = h/\tau$, 为今后地震资料处理时进行静校正提供依据。除地震信号以外的这些需要记录的信号统称为辅助信号。通常所说的地震仪记录道数指的是地震道的道数, 辅助道不包括在内。

地震仪对地震信号的数据采集过程从震源激发时刻开始, 一直持续到最深目的层反射信号完全到达时为止。采集过程的持续时间称为记录长度, 采用炸药等冲激震源时, 记录长度 T 为

$$T = 2h/v \quad (1-11)$$

式中 h ——勘探目的层最大深度;

v ——地震波的平均速度。

在地震勘探中, 有意义的最大反射界面的深度很少超过 10km, 而达到这样深度的平均地震波速度, 至少是 3500m/s。因此, 通常要求的记录长度为 6s。深钻、地质解释和地震信号穿透力等技术改进后, 需要的记录时间还可能增加。

反射时间的标记是根据磁带上记录的计时信号进行的, 如果计时信号本身不精确的话, 依据它测出的反射时间也就不精确, 由此推测出的反射界面的位置也就不准确, 因此, 一般要求计时信号的可重复性和绝对准确度都应保持在 $\pm 0.05\%$ 的容许范围内。

2. 地震波动力学特征对地震仪的要求

为了能利用地震波的动力学特征来推测地下岩性, 甚至直接找油找气, 就要求地震仪高保真、高信噪比、高分辨率地把地震波记录下来。具体来说, 应满足以下几项基本要求:

①地震仪允许输入的幅度范围(简称仪器的动态范围)必须大于需要记录的地震信号的动态范围。需要记录的地震信号的最大幅度是从震源直接传到离震源最近的检波点的直达波幅度, 它与偏移距的大小有关; 需要记录的地震信号的最小幅度是最深目的层反射波传到地表时的幅度, 由勘探深度要求决定。目的层越深, 反射信号则越弱, 当反射信号幅度比外界环境噪声的幅度还小时, 就会被外界环境噪声淹没。因此, 一般认为需要记录的地震信号最小有意义幅度是外界环境噪声的幅度。目前通过地震资料的数字处理, 有可能从环境噪声背景中提取幅度仅有环境噪声幅度 1/10 的弱信号。考虑上述三方面因素, 人们普遍认为地震勘探仪器的动态范围应达到或接近 120dB。

②地震仪应该设置滤波器，在记录之前对接收进来的妨碍有效波记录的干扰波进行压制。这些滤波器给地震仪限定的记录频率范围应该尽可能大于需要记录的地震信号的频率范围。由于地层的选频吸收效应，使得越是深层的反射信号，其主频越低。因此，需要记录的地震信号最低频率由勘探深度要求决定，可能需要延伸到 10Hz 或 10Hz 以下。需要记录的地震信号最高频率由勘探分辨率要求决定。一般来说，在进行地震普查时取 125Hz 就可以了，进行地震详查时应取 250Hz，高分辨率勘探可能需要取到 500Hz，甚至更高。

③在所能记录的幅度范围和频率范围内，地震仪应该基本上是一个线性系统。所谓线性系统就是当输入为单一频率的正弦波时，输出也是同频率的单一正弦波。如果给一个系统输入一个频率为 Ω 的正弦波，其输出中出现很多频率为 $k\Omega$ (k 为正整数) 的新的频率分量，那么我们就认为这个系统是非线性系统或者说存在非线性失真。实际上，完全线性的系统是不存在的。一个实际系统的非线性失真程度通常用谐波失真系数 δ_L 来表示

$$\delta_L = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}} \quad (1-12)$$

式中 A_1 ——基波振幅；

A_k ——第 k 次谐波 (频率为 $k\Omega$) 的振幅。

因为谐波次数越高，振幅越小，所以谐波失真系数也常用 A_2/A_1 或 A_3/A_1 来表示。地震仪的非线性不仅会使地震信号本身的记录产生谐波失真，而且还会使面波产生谐波对地震信号形成干扰。所以一般要求地震仪的谐波失真小于 0.05%。

④数字地震仪把地震信号从模拟量转换为数字量时，应该有足够高的转换精度 (小于 0.05%)，在把地震数据记录到磁带上时，丢错码的概率应该足够小，一般要求小于 10^7 。

3. 多道记录对地震仪的要求

最早的地震仪是单道的，为了便于进行波的对比和提高野外生产效率，后来发展成为多道地震信号同时记录。随着多次覆盖技术的推广和覆盖次数的提高，要求进一步增加道数。高分辨率地震勘探要求缩短道距至 25m、10m 甚至 5m，而为了保持一定的排列长度，自然也要求道数多一些。三维地震勘探方法的普遍应用更是要求地震仪的道数多达几千道。

在多道记录的情况下，为了确保地震记录的质量，还必须要求地震仪内部各地震道电路的振幅特性和相位特性保持良好的一致性，道与道之间的相互干扰 (即道间串音) 应很小 (一般要求小于 -80dB)。

4. 野外工作条件对地震勘探仪器的要求

地震仪长年在野外工作，工作环境与室内仪器大不相同。由于野外环境条件差，造成仪器发生故障的外部原因很多。而地震仪一旦发生故障，轻则影响地震记录的质量，重则使整个地震勘探队的工作陷于停顿，所以特别要求地震仪有很高的稳定性和可靠性，并且具有一定的自检能力和野外监视功能。除此之外，体积小、质量小、耗电省、操作简便、易于维修也是应尽可能满足的基本要求。