

# 地震勘探仪器原理

孙传友 潘正良 编著

石油大学出版社

## 内容提要

本书以地震信号为主线,系统阐述了震源、地震检波器、地震数据采集、地震数据传输、地震数据记录、地震数据回放的基本结构和工作原理,并对近年来地震勘探仪器中出现的新技术和新型遥测系统作了较系统的介绍。该书可作为石油和地矿等院校物探及仪器专业师生的教学用书,也可供物探工程技术人员参考。

## 地震勘探仪器原理

孙传友 潘正良 编著

\*

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店发行

泰安师专印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 13.5 印张 346 千字

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—1500 册

ISBN 7-5636-0761-7/TE·141

定价:12.50 元

# 前 言

地震勘探仪器是石油天然气勘探的首要装备。它主要包括激发设备、接收设备和记录仪。地震勘探工作正在朝着不断提高分辨率和勘探精度的方向发展。现代电子技术的飞速发展,为高分辨率地震仪器提供了新技术。进入 90 年代以来,国内外先后推出了具有 24 位 A/D 转换器和高采样率的多道遥测地震仪,为提高地震数据采集质量和实现高分辨勘探奠定了技术基础。本书力图以多道遥测地震仪的共性为主体,以地震信号为主线,全面系统地阐述地震数据采集系统的基本结构和工作原理。同时对地震勘探仪器中出现的新技术和新型遥测地震仪也作了较系统的介绍。该书可作为石油、地质、煤炭等院校大、中专物探及仪器专业师生的教学用书,也可供物探工程技术人员参考。

本书的第一章至第六章由江汉石油学院孙传友副教授编著,其中第六章第二节由石油大学(华东)印兴斌副教授编著,第七章至第九章由石油大学(华东)潘正良副教授编著。全书由石油大学(华东)刘仲一教授主审。

本书涉及的内容十分广泛,笔者理论学术水平有限,书中难免有缺点与错误,诚望读者和同行批评指正。

作者

1995 年 10 月

# 目 录

<b>第一章 概论</b> .....	1
第一节 地震勘探仪器的任务、组成和研究方法 .....	1
第二节 地震勘探对地震仪器的基本要求.....	2
第三节 地震仪的历史、现状与未来 .....	7
<b>第二章 震源</b> .....	12
第一节 陆上震源 .....	12
第二节 海上震源 .....	14
第三节 可控震源 .....	15
第四节 震源同步系统 .....	20
<b>第三章 地震检波器</b> .....	23
第一节 电动式检波器 .....	23
第二节 压电式检波器 .....	29
第三节 检波器组合的电路特性 .....	33
<b>第四章 地震数据采集</b> .....	37
第一节 采集系统的基本组成 .....	37
第二节 前放电路 .....	38
第三节 滤波器 .....	43
第四节 多路转换开关 .....	56
第五节 模数转换器 .....	60
第六节 浮点放大器 .....	66
第七节 串接型模拟-浮点数转换电路.....	72
第八节 合一型模拟-浮点数转换电路.....	85
第九节 子样数据暂存器 .....	91
第十节 多次覆盖方法的实现 .....	92
<b>第五章 地震数据传输</b> .....	95
第一节 电缆传输方式 .....	95
第二节 光缆传输方式.....	104
第三节 无线电传输方式.....	109
<b>第六章 地震数据记录</b> .....	116
第一节 数字磁带机基本原理和组成框图.....	116
第二节 地震磁带记录格式.....	118
第三节 数字磁带记录方式.....	130
<b>第七章 地震数据回放</b> .....	138
第一节 地震数据回放的基本原理及组成框图.....	138
第二节 数字 AGC 和数/模转换 .....	140
第三节 反多路转换和回放滤波.....	143

第四节	显示.....	144
<b>第八章</b>	<b>地震勘探仪器新技术.....</b>	<b>148</b>
第一节	涡流检波器.....	148
第二节	横波检波器.....	151
第三节	三分量地震检波器.....	152
第四节	高频提升技术.....	153
第五节	24 位 A/D 转换器 .....	160
<b>第九章</b>	<b>新型遥测地震仪简介.....</b>	<b>174</b>
第一节	SN-388 系统简介 .....	174
第二节	G·DAPS-4 遥测地震系统简介 .....	187
第三节	Telseis 星系统简介 .....	193
第四节	新型遥测地震系统的特点.....	201
<b>参考文献</b>	.....	<b>209</b>

# 第一章 概 论

## 第一节 地震勘探仪器的任务、组成和研究方法

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,为寻找油气田或其他勘探目的服务的一种物探方法。与其他物探方法相比,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,一个国家一个油田勘探装备的状况,很大程度上反映了这个国家这个油田的勘探水平。

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,我们称之为地震勘探仪器。地震勘探仪器的任务,是在地表激发地震波并把返回地表的地震波接收和记录下来。从这个意义上来讲,地震勘探仪器应包括震源、检波器、地震仪三大部分。其中,震源激发地震波,检波器接收地震波并把它转换成电信号,地震仪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。

地震勘探第一阶段即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。

地震勘探仪器的三大部分是互相联系缺一不可的,但比较而言,地震仪的结构最复杂,对地震勘探效果的影响最大。地震仪实际上是一种记录地震信号的电子仪器。如果把它解剖开来,从“微观”上看,它采用的元器件和基本电子电路与一般电子仪器没有多少差别。但是,把这些基本电子电路组合起来,从“宏观”上看,它的整体组成框图和工作原理与一般电子仪器相比却大不相同。地震仪与一般电子仪器的本质区别就在于它是电子技术与地震勘探技术相结合的产物。

研究地震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:为了保证地震勘探的要求,地震仪整机应由哪些‘块块’组成?各个‘块块’之间有什么联系和影响?整机系统对各个‘块块’的外部功能和技术指标应分别提出什么要求?各‘块块’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。如果我们不了解这些问题,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,顾

小失大。

地震仪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。尽管如此,地震仪整机的基本原理都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技术理论基础,在今后的工作中就能很快掌握所遇到的具体仪器。

就系统组成而言,现代地震仪的结构十分复杂,包含的电路很多,但就内部信号而言,却只有两种信号:地震信号和控制信号。把地震信号所通过的各个“块块”连接起来就组成一条“流水线”似的地震信号通道。把控制信号所通过的各个“层次”连接起来就组成了一套“宝塔”形的控制系统。这样以两种信号为线索,就能把繁杂的地震仪清晰地整理成信号通道和控制系统两大主线。其中,地震信号通道是地震勘探仪器的核心,控制系统则是为地震信号通道服务的。

因此,本书将从地震勘探对仪器的要求出发,以地震信号流程为主线,研究震源、检波器和地震仪整机的基本理论。

## 第二节 地震勘探对地震仪器的基本要求

地震仪把返回地表的 seismic wave 记录下来,为勘探工作者提供推断地下地质情况的依据,为了保证勘探工作者能准确、细致地推断地下的地质情况,就要求地震仪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份,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,让我们先来看看到达地面的地震波是怎样形成的?它有那些特征,然后再研究要把这些特征记录下来,地震仪应具备那些功能?

### 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。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。目前对其被吸收的原因虽看法不一,但一般认为,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  $A_t$ ：

$$A_t = A_0 e^{-\beta t} = A_0 e^{-\beta f \frac{d}{v}} \quad (1-2)$$

式中  $\beta$ ——吸收衰减常数。

吸收衰减为：

$$H = 20 \log(A_t/A_0) = -\alpha f t = -\alpha f \frac{d}{v} \quad (1-3)$$

式中  $\alpha$ ——吸收系数 ( $\alpha = \beta 20 \log e = 8.686\beta$ )。这个常数的值取决于介质的性质，一般来说疏松的岩石  $\alpha$  大，致密的岩石  $\alpha$  小。

由上式可见，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  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ，地震波速度分别为  $V_1$  和  $V_2$ 。入射波振幅是  $A_0$ ，反射波振幅是  $A_1$ ，透射波的振幅为  $A_2$ ，反射系数为  $R$ ，则地震波法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。

一般说来，能够解决某一特定地质任务的一类波称为有效波，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。在进行反射波法地震勘探时，“一次反射”波（简称反射波）是有效波。因此，在这里我们着重研究反射波的特征。

### 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：

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

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

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

上式所表达的  $x$  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  $\varphi$ ,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。

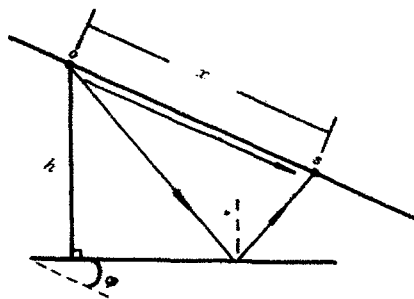


图 1-1 直达波与反射波到达时间

### 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。

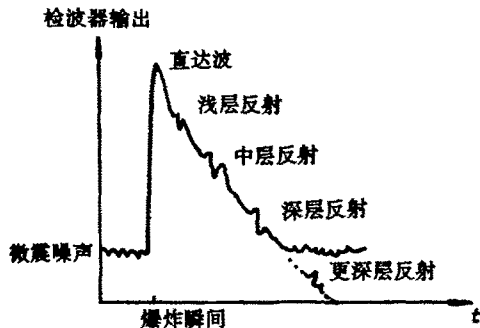


图 1-2 近源检波器输出信号包络的幅度曲线

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器时,这些深层信号便被环境微震噪声所淹没,因此检波器此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,由式(1-3)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,这种勘探我们称为“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与最小地震信号幅度之比的分贝数表示:

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

下面我们来计算地震信号的动态范围。设检波点离震源距离是  $x$ ，最深目的层深度为  $h$ ，令离震源距离  $r_0$  处地震波的初始震幅为  $A_0$ ，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。由(1-1)、(1-2)、(1-4)式可知最深目的层反射波到达检波点时的幅度为：

$$A_{\min} = A_0 R \frac{r_0}{2H} e^{-\beta f \frac{2H}{v}}$$

将上两式代入(1-9)式可得：

$$L_r = 20 \lg \frac{2H}{x} + 20 \lg R + \alpha \frac{2H}{v} f \quad (1-10)$$

若取  $x = 30\text{m}$ ， $h = 6000\text{m}$ ， $R = 0.04$ ， $\alpha = 0.5\text{dB}$ ， $f = 20\text{Hz}$  代入上式，则可计算得  $L_r = 120\text{dB}$ 。当然，如果所设数值有变动，计算出的结果也会不同。但对  $6000\text{m}$  勘探目的层来说，一般认为，目前需要记录的地震信号动态范围为  $100 \sim 120\text{dB}$ 。

## (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  $10\text{Hz}$  以下，上限由有意义的最浅反射界面确定，可高达  $250\text{Hz}$  以上。

## 三、对地震仪的基本要求

### 1. 地震波运动学特征对地震仪的要求

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—— $\tau$  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  $10\text{km}$ ，而达到这样深度的平均地震波速度，至少是  $3500\text{m/s}$ 。因此，通常要求的记录长度为  $6\text{s}$ 。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大。

反射时间的标记是根据磁带上记录的记时信号进行的，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幅度范围。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。据估计,陆地上的最小外界环境噪声(有效值)是  $10^{-9}\text{m/s}$ (海上为  $0.1\text{N/m}^2$ )。离震源  $10\text{m}$  处的检波点直达波幅度约为外界环境噪声幅度的  $10^5$  倍左右。照这样计算,需要记录的地震信号的幅度范围约为  $100\text{dB}$ 。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  $\frac{1}{10}$  的弱信号。因此人们希望把需要记录的地震信号的最小幅度再降低  $20\text{dB}$ ,这就是说,需要记录的地震信号幅度范围要增加到  $120\text{dB}$  左右。

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  $10\text{Hz}$  或  $10\text{Hz}$  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  $125\text{Hz}$  就可以了,进行地震详查时应取  $250\text{Hz}$ ,高分辨率勘探可能需要取到  $500\text{Hz}$ ,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  $\Omega$  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  $H$  来表示:

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

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。高分辨率的地震勘探要求缩短道距至  $25\text{m}$ 、 $10\text{m}$  甚至  $5\text{m}$ ,而为了保持一定的排列长度,自然也要道数多一些。特别是近年来,在三维地震勘探方法的应用日益增多的情况下,更要求地震仪的道数不断增加。因此增多道数是地震仪发展的一个总趋势。

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 $-80\text{dB}$ )。

#### 4. 野外工作条件对地震仪的要求

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、重量轻、耗电省、操作简便、易于维修也是应尽可能满足的基本要求。

### 第三节 地震仪的历史、现状与未来

#### 一、地震仪的发展简史

半个世纪以来,随着地震勘探和电子技术的发展,地震仪也在不断地发展、完善和提高。从地震仪的记录内容和方式来看,大致分为三代:第一代是模拟光点照相记录地震仪,简称光点仪;第二代是模拟磁带记录地震仪,简称磁带仪;第三代是数字磁带记录地震仪,简称数字仪。

光点仪使用时间最长,约从30年代开始直到50年代末,采用电子管电路。由于光点感光方式的限制,动态范围仅有 $20\text{dB}$ ,频带宽约 $10\text{Hz}$ ,带通滤波器的中心频率一般为 $20$ 、 $30$ 、 $40\text{Hz}$ 等,增益控制方式为一般的自动增益控制,其记录不能用作数字处理。

磁带仪从50年代开始到60年代,它采用晶体管电路。利用磁带记录的特性,其记录可多次回放并作多次叠加和某些数据处理,如各种滤波、计算速度谱等。但处理速度较慢,信噪比低。磁带仪动态范围只 $45\text{dB}$ ,通频带为 $15\sim 120\text{Hz}$ 。增益控制方式采用公共增益控制或程序增益控制。磁带仪的应用使多次覆盖方法和共深度点叠加技术得以实现。

数字仪是在磁带仪的基础上发展起来的,但它不象磁带仪那样以模拟形式把地震信号记录在磁带上,而是以数字形式把地震信号的离散子样幅值记录在磁带上。它采用集成电路和瞬时浮点增益控制,记录范围大( $160\text{dB}$ 以上),记录精度高,记录频带宽。由于数字地震磁带记录可以直接用数字电子计算机进行处理,所以处理方法更加完善、灵活、精确,资料整理的自动化程度和工作效率都大大提高,成果资料也更加丰富。数字地震仪从60年代开始与数字电子计算机相结合,使地震勘探从此进入数字地震勘探的阶段。

通过地震仪的发展简史可以看出:地震仪发展的基本趋势是越来越好地满足地震勘探对仪器的要求。每一代新仪器的出现都使地震勘探发展到一个新阶段,而地震勘探的新发展又对地震仪提出更新的要求。这些新要求同电子工业发展的新成果相结合,便又会产生出新的仪器。因此,地震仪器的发展同地震勘探事业和电子工业的发展是紧密联系在一起。地震勘探的要求决定了地震仪器的发展方向,而电子工业的发展则是地震仪器发展的基础。这可以说是地震仪器发展的一条规律。

#### 二、地震仪的现状

目前,我国石油系统使用的地震仪全都是数字地震仪。它与过去光点仪和磁带仪的根本区别,就在于它不是以模拟方式而是以数字方式记录地震信号。目前国内外生产和使用的数字地震仪型号很多,基本上可分为两大类型:集中式数据采集型和分布式数据采集型。

##### 1. 集中式数据采集型

这种类型的数字地震仪,大体上由数据采集系统、记录系统、监视系统和控制系统四大部

分组成,如图 1-3 所示。

采集系统的任务是对检波器送来的地震信号进行放大、滤波,然后把地震信号从模拟形式转换成数字形式——地震数据。记录系统将采集到的地震数据按指定的记录格式和记录方式记录在磁带上。勘探施工时,为了便于监视野外生产情况和检查磁带记录的质量,大多数数字地震仪中都设有监视系统。监视系统把记录在磁带上的地震数据回放出来,进行必要的处理,形成可供观察评审的地震监视记录。控制系统按照操作员的命令和一定的程序对采集系统、记录系统、监视系统各部分进行控制,使地震数据采集、记录和回放处理的过程有条不紊、相互协调地进行。

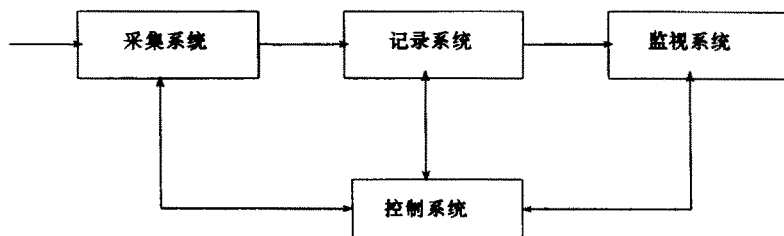


图 1-3 集中式数据采集型的组成框图

这类地震仪的基本特点是:采集系统同其他部分紧密联结一起,通常是几个电路箱体安装在一个仪器车内,排列上各道检波器接收的地震模拟信号,通过多芯电缆(通常称为“大线”)传送到仪器车上,集中由同一个采集系统进行数据采集。目前国内使用的这类集中数据采集型地震仪的型号有:引进的 DFS-V、SN338、MDS 10 和国产的 SDZ-120、SK-83、SDZ-751B 等。由于目前国内大部分地震队还都使用集中式数据采集型地震仪,所以这类地震仪通常称为常规地震仪。

## 2. 分布式数据采集型

这类地震仪是在集中式数据采集型地震仪基础上发展起来的。与前一类地震仪相比,它大大增加了采集系统的数目,而且把采集系统从仪器车上分离出来,构成一个个采集站,分布在排列上,每个采集站只负责采集与它相连的一道或几道检波器接收的地震信号。各采集站把采集的数据通过数字传输系统传送到仪器车上,由记录系统记录下来和监视系统显示出来。这类地震仪因其数据采集系统不在仪器车上,而是分布在排列上,故称为遥测地震仪。遥测地震仪在仪器车内的部分通常称为主机,在仪器车外的部分主要是分布在排列上的一个个采集站,采集站与主机之间通过数字传输系统相连系。因此,遥测地震仪的基本组成如图 1-4 所示。

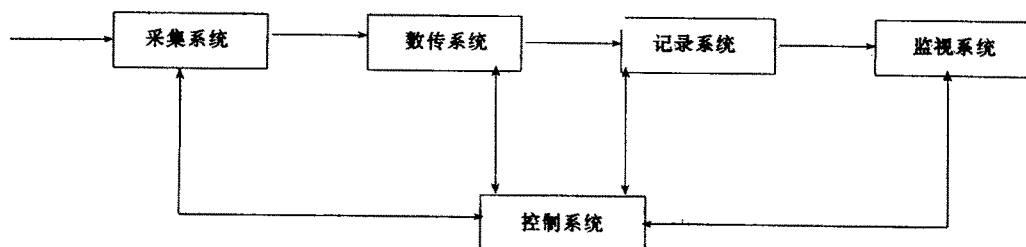


图 1-4 分布式数据采集型的组成框图

目前国内使用的遥测地震仪有引进的 SN368、SN388、MDS-16、Opseis、I/O System-I、I/

O System- I、Myriaseis、Digiseis 和国产的 SKZ-480、SK-4、SK-48 等。

### 三、地震仪的未来

虽然目前集中式数据采集型地震仪在我国大多数地震队仍然还在使用,但是国内外的地震仪制造厂都已停止生产这类地震仪,而把研制和生产的重点转向遥测地震仪。因此,可以断言,目前使用的集中式数据采集型地震仪将逐步被遥测地震仪所淘汰和替换。遥测地震仪势必将成为未来的常规地震仪。

为什么会这样呢?这是由地震勘探的发展方向所决定的。

我们知道,经过多年的勘探工作之后,一些埋藏较浅、表层地质条件简单的构造圈闭油田大多已被发现,现在等待人们去寻找的都是一些埋藏较深,地质条件较复杂的小构造油田或岩性圈闭油田,这就要求我们增大勘探深度和提高勘探的精度与分辨率。

增大勘探深度的问题,对勘探仪器来说基本上是一个信噪比问题,只有在深层信号的能量达到和超过施工现场的外界环境噪声水平时,才有可能把深层信号记录下来。提高地震信号能量与随机噪声之比的主要方法是多次覆盖。如果覆盖次数为  $K$ ,则理想情况下信噪比可以提高  $\sqrt{K}$  倍,但是实际工作中所能达到的覆盖次数恰恰决定于地震仪的道数  $N$ 。假定每次放完一炮后,炮点与排列同时向前移动的道数为  $a$ ,则对单边放炮而言, $K = \frac{N}{2a}$ ,显然  $a$  的最小值为 1,因此最大覆盖次数为

$$K_{\max} = \frac{N}{2} \quad (1-13)$$

因此地震仪道数增加  $m$  倍,就可利用多次覆盖技术使信噪比提高  $\sqrt{m}$  倍,信噪比的提高,增大了深层信号的抗干扰能力,有利于增大勘探深度。

提高勘探精确度的实质是提高分辨率。地震分辨率包括横向分辨率(能分辨的最小反射界面长度) $l_{\min}$ 和纵向分辨率(能分辨的岩性单元的最小厚度) $d_{\min}$ ,

$$l_{\min} = \sqrt{\lambda h} \quad (1-14)$$

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4} \quad (1-15)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1-16)$$

式中  $h$  ——界面深度;

$\lambda$  ——地震反射波波长;

$v$  ——地震反射波的传播速度;

$f$  ——地震反射波的频率。

可见,提高地震分辨率的核心问题是增大地震信号的频带宽度,特别是提高高频成分的能量。在后面我们将看到,它要求地震仪相应提高采样速率,即缩短采样周期  $T_s$ 。

对地震信号频率的要求决定了对道间距的要求,为了保证不产生空间假频,在面波存在的条件下,要求道间距  $\Delta x$  小于或等于地震信号最小波长的  $1/4$ ,即

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{4} \quad (1-17)$$

速度是地震勘探的重要参数。为了求准深层速度,仅仅提高信噪比,得到深层记录还不够,

还必须有足够的排列长度,才能保证有足够的正常时差。为此一般认为,最大炮检距应与界面深度相当。这样,为了扩大勘探深度就应增加排列长度,而提高分辨率又要求缩小道间距,因而就需要增加道数。

多测线记录的三维地震勘探和纵、横波同时采集的地震勘探等新方法,也要求大量增加数据采集系统的记录道数。

仪器道数的增加和采样周期缩短,要求常规地震仪的浮点放大器和模数转换器的工作速度(单位时间内转换的子样数)应大大提高,然而,浮点放大器和模数转换器的工作速度总是有限的,当道数的增加和采样周期缩短超过其工作速度极限时,只由一个浮点放大器和模数转换器进行那么多子样的浮点转换就转换不过来了。为此,一些常规地震仪采用扩展箱体的办法(即多个数据采集部件、多个磁带机并行工作)使道数扩展到 96 道、120 道。1984 年美国推出的 MDS-15B 甚至还采取了扩展大线的办法(即多条大线、多个采集部件并行工作,并配用高密度磁带机),使道数扩展到 960 道。但它们仍然没有跳出用大线电缆传送各道模拟信号到仪器车上集中进行数据采集的框框,因而不能根本上解决由此产生的问题。我们知道,每道检波器的输出送至地震仪需用两根芯线,道数增多,电缆芯线相应增多,长度也相应加长,这不仅使大线加粗、加重,使用不方便,而且使芯线折断的故障率增高,检修更困难。道数增多,近道远道大线长度差异加大,道间一致性更难保证。更为严重的是,地震信号在大线上长距离地以模拟量的形式传输很容易受到工频电网、大气静电感应、天电等各种电磁干扰的影响和道间串音的影响,使信噪比下降。因此,一般一条大线电缆的道数限制在 120 道以内。

遥测地震仪没有数据采集电路同检波器之间的大线电缆,而是使用放在检波点上的采集站,由各采集站将检波器输出的模拟信号转变为数字信号后向主机传送。由于数字信号传输的抗干扰能力较强,因此在检波点与仪器车之间取消大线后,不仅减轻了野外工作的负担,而且也避免了大线所固有的道间串音、天电干扰、工频干扰等问题。由于遥测地震仪排除了常规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,因此遥测地震仪的道数可多达上千道甚至上万道。

遥测地震仪由于道数多,采集数据量大,其记录系统不能象集中式数据采集型地震仪的记录系统那样,采用中等记录密度的数字磁带机,而必须采用高密度的数字磁带机。此外,为了适应地震勘探的新发展,遥测地震仪也不再象集中式数据采集型地震仪那样,采用传统的 SEG-B 格式,大多采用新的地震磁带记录格式——SEG-D 格式。

为了提高深层的勘探分辨率,要求能记录深层反射信号中幅度很弱的高频分量,因此,目前一些新型的遥测地震仪采集系统,开始采用频谱整形滤波器和 24 位模数转换器等新技术。

地震勘探的进一步发展,要求地震仪为资料处理和解释工作提供高质量的地震记录。然而过去传统的野外监视方法只是将磁带上回放出的地震数据经简单的 AGC 处理后,用照相示波器显示成监视记录,借此定性地检查仪器的工作情况和野外生产情况,而对记录质量的判断完全凭人们的经验,并没有什么定量的依据。目前越来越多的数字地震仪开始配备地震质量监控系统,用计算机对记录数据及时地在现场进行处理,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。

集中式数据采集型地震仪的控制系统,大多采用固定程序的逻辑控制电路,而遥测地震仪的控制系统全部采用计算机或计算机网络,因此又称为数控型地震仪。数控型地震仪自动化程度高,操作简便,可以杜绝因操作不当引起的废炮。此外,由于数控型地震仪配备有成套的诊断

和测试软件,可以使操作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,有的诊断软件还可检查出具体的有故障的元器件,因此维护检修十分方便,大大提高了仪器的稳定性和可靠性。

可以预言,今后为适应新的勘探方法和复杂地区地震勘探工作的需要,随着高新技术的引进,地震仪还将不断革新和发展。

## 第二章 震 源

在地震勘探的野外工作中,第一步是要用人工方法激发地震波。由于海上和陆上的表层激发条件不一样,所以惯用的震源也不一样。陆地勘探主要使用炸药震源,其次是可控震源,国外也有少数使用重锤、陆地空气枪和气爆震源,以及适宜于作浅层高分辨率勘探的小型机械震源米尼索西(Minisosie)。海上勘探的主要震源是:空气枪、蒸气枪、水枪和电火花等,电火花震源主要用于浅层高分辨率勘探。

### 第一节 陆上震源

#### 一、炸药震源

从20年代开始到现在,地震勘探一直采用炸药作为主要震源。炸药震源的突出优点是产生的脉冲尖锐、频率范围较宽、能量较强。目前采用的炸药震源有成型炸药和爆炸索两种。

##### 1. 成型炸药

成型炸药是预先封装成一定形状和重量的炸药包(通常炸药量为10kg,药包直径6cm,长2.5m)。激发方式有井中爆炸、水中爆炸、坑中爆炸和空中爆炸等几种。井中爆炸效果最好,是陆地勘探中最常用的一种激发方式。

井中爆炸是在地面钻一口井(井径约10cm,井深10~40m),把炸药包装上电雷管压入井底,电雷管引线通过专用双绞线(俗称炮线)接到爆炸点火装置(俗称爆炸机)的点火接线端上,当爆炸机接到地震仪发出的启爆指令时,给雷管通电,引爆炸药。

炸药爆炸的瞬间压强高达几十万个大气压,炸药包附近的岩石在强压力的作用下发生永久形变(岩石被破碎、粉化),形成一个实际的空穴区,如图2-1(I)所示。(随着炸药量的不同,这个空穴的范围一般为1米至几米)。在此空穴之外,压力迅速衰减,空穴区以外的一定范围内,岩石虽然不象空穴区那样被破碎、粉化,但由于压力仍然超过岩石的弹性限度而使岩石的形变不能全部恢复,产生了所谓塑性形变区,如图2-1(II)所示。过了这个区域,压力衰减到没有超过岩石的弹性限度,虎克定律便得到满足,岩石的形变就能全部恢复,即进入弹性形变区。如图2-1(III)所示。

实际空穴区(永久形变区)和塑性形变区都不满足虎克定律的条件,都属于非弹性区。因此,我们把塑性区以内的范围称为等效空穴区。等效空穴区的边缘(也就是弹性区的起始界限)所产生的岩石质点扰动才是地震波的起始扰动,我们称之为地震激发波。这种扰动是一种弹性波,服从固体介质中弹性波的传播规律,在均匀介质中,它的波前面是一个球面,如图2-1(III)所示。

理论分析和实际经验表明,激发条件对激发波的振幅和频率的影响大致有如下规律:在致密的介质中,激发产生的激发波形比在疏松介质中激发产生的波形其频率高而振幅低,在深井中激发产生的激发波形比在浅井中激发产生的波形其频率高而振幅低,小药量激发比大药量激发产生的激发波形频率高而振幅低。

井中爆炸的优点是:能减低面波的强度;消除声波在记录反射时造成的困难;爆炸时在直达波中形成很宽的振动频谱,可以大大减少炸药量,缩短准备爆炸的时间。不过要确保这些优