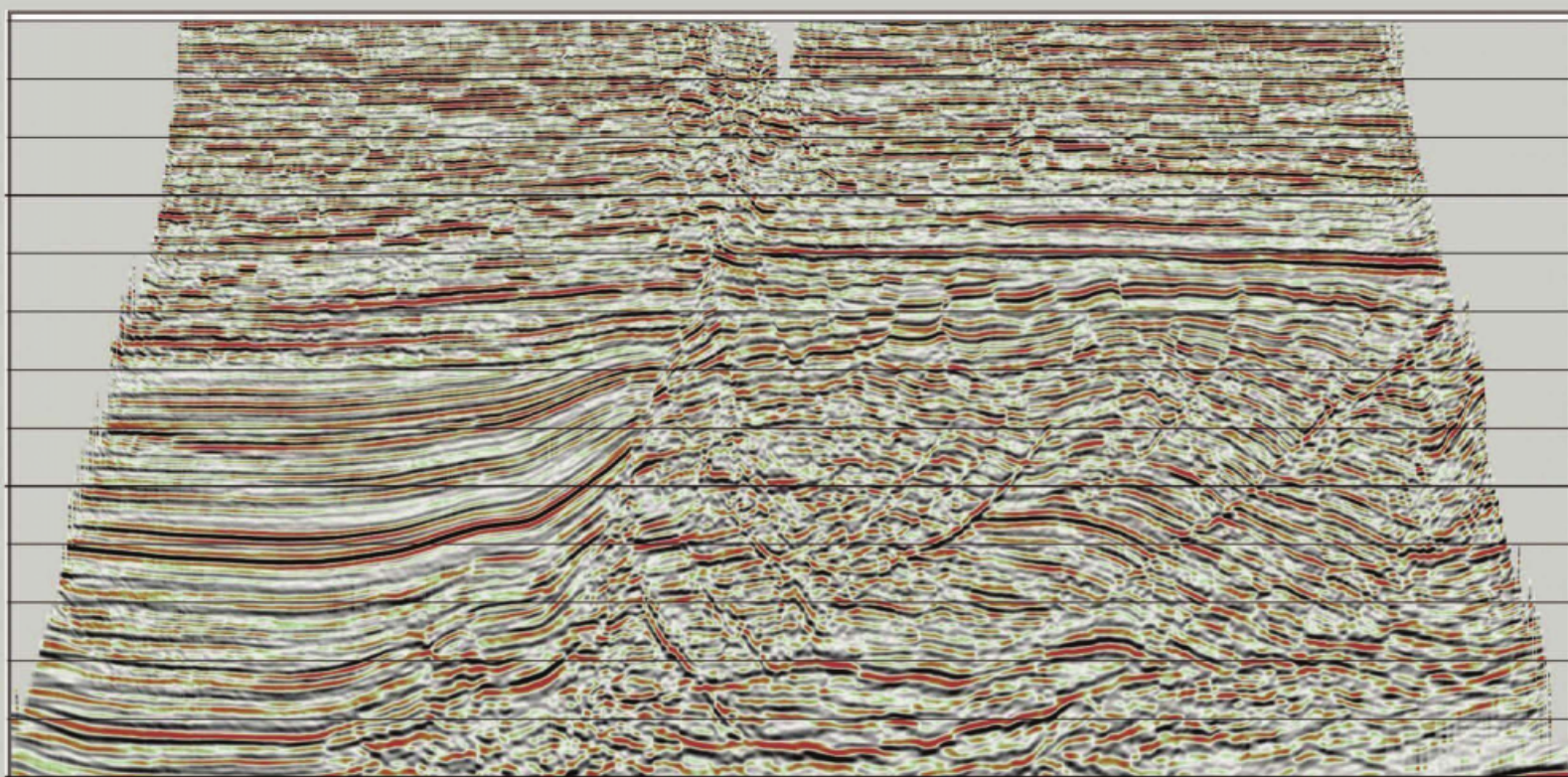
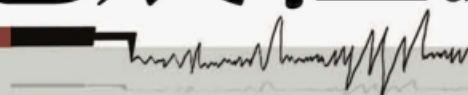


*Seismic Sensing
in Geophysical
Prospecting*

石油勘探地震检波

魏继东 著



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

石油勘探地震检波

◎ 魏继东 著



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

内容提要

地震检波是地震勘探野外采集的三大环节之一,对于保证数据质量具有非常重要的意义。本书第一章介绍了地震采集阶段噪音的类型以及噪音对地震采集效果的重要影响。第二章在回顾检波器-大地耦合系统研究历史的基础上,提出了野外大规模测量并消除耦合响应的方法,有助于降低地震数据的高频段畸变,提高识别精度。第三章通过对比两种典型检波器的数据表现差异并追溯相应的性能指标原因,提出了比较不同检波器应该遵循的方法以及初步的结果,对于检波器选型具有较强的参考意义。最后,在分析地震勘探野外采集阶段有效波以及干扰波特征的基础上,量化分析了不同检波器组合因素对组合压噪效果的影响,提出了具有针对性的建议。本书可作为地震勘探研究人员的参考书籍,也可供高等院校相关专业的师生参考或研讨。

图书在版编目(CIP)数据

石油勘探地震检波/魏继东著. —青岛:中国海洋大学出版社,2013. 12
ISBN 978-7-5670-0517-4

I. ①石… II. ①魏… III. ①油气勘探—地震勘探
IV. ①P618. 130. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 311906 号

出版发行	中国海洋大学出版社	
社 址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码 266071
出 版 人	杨立敏	
网 址	http://www.ouc-press.com	
电子信箱	flyleap@sohu.com	
订购电话	0532-82032573(传真)	
责任编辑	张跃飞	电 话 0532-85901092
印 制	青岛正商印刷有限公司	
版 次	2016 年 10 月第 1 版	
印 次	2016 年 10 月第 1 次印刷	
成品尺寸	185 mm×260 mm	
印 张	10.25	
字 数	180 千	
印 数	1—1 000	
定 价	68.00 元	

REFACE

前言



在石油勘探野外采集的过程中,震源激发的地震波传播到反射界面后,部分能量会以波动的形式重新返回到地面。地震检波的过程就是拾取地表振动并记录的过程。受技术手段的限制,人们目前无法直接测量到震源激发所带来的大地的真实振动,所以只好把能够将机械信号转换为电信号的检波装置插到地上,间接测量大地振动,从中读取地震波所携带的地球物理信息。地震检波器就是指向以上目的的一种装置。

在石油地震勘探中,检波器的作用是以尽量小的失真产生地面振动单分量或者多分量的电模拟,完整地反映地震波的动力学特征。在这种间接测量的过程中,在两个环节上产生了误差:大地振动与检波器外壳振动之间的误差——耦合效应,检波器外壳振动与检波器输出电信号之间的误差——机电效应。所以,检波器的设计与制造必须最大限度地减小耦合效应带来的耦合噪声以及机电效应带来的电噪声,尽量忠实地记录大地振动。同时,基于石油勘探地质目标的特征以及地震采集阶段有效反射波、干扰波的性质,组合检波因素的选择,对于检波器组合压制干扰波、突出有效波的能力具有重要意义。

本书在分析野外采集阶段有效波与干扰波不同特征的基础上,结合石油勘探地质目标的独特性,首次提出了野外工业规模下监测、衰减检波器-大地耦合效应的解决方案,厘清了检波器选型比较中众多因素对地震数据的影响;认为当前很多新型检波器的努力方向都是改进机电效应,之所以它们难以取代传统的动圈式检波器在野外施工中的主导地位,根本原因是因为石油勘探中以机械噪音为主的噪音太强了。最后,在第四章中,通过量化分析组合因素对检波器组合压噪能力的影响,提出了选择组合因素的分析方法,对于选择合理有效的检波器组合方式具有一定的指导意义。其中,第四章引用了笔者博士毕业论文《地震勘探组合检波技术研究》中的一部分。

该论文是在笔者导师、中国工程院院士、中国海洋大学教授李庆忠先生的指导下完成的。李老师的思想、思路、态度以及对我的启发,贯穿了我论文的所有部分,在此表示感谢!

最后,由于笔者学识有限,书中错误疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正!

中石化地球物理公司胜利分公司

魏继东

2015年12月



第一章	地震采集阶段的信号与噪音	1
	一、有效反射信号的影响因素	1
	二、噪音的分类与衰减	2
	三、近地表是信号与噪音的最关键影响因素	10
	四、地震信号的动态范围决定于噪音	12
第二章	检波器-大地耦合系统	14
	第一节 研究历史回顾	14
	一、国际概况	14
	二、国内概况	16
	第二节 检波器-大地耦合系统的振动力学原理	17
	一、单自由度系统的振动力学模型	17
	二、单位脉冲响应函数与杜哈梅尔积分	19
	三、单自由度系统的传递函数和频响分析	21
	四、振动的隔离和传递	24
	第三节 检波器-大地耦合响应的规模测量与衰减	29
	一、检波器-大地耦合系统的重要性——一个试验	29
	二、测耦检波器	30
	三、基于测耦检波器的野外耦合响应规模测量与衰减	39
	第四节 结束语	50
第三章	检波器性能指标与地球物理效果	51
	第一节 两种典型检波器的工作原理	51
	一、动圈式模拟检波器	52
	二、MEMS 数字检波器	54
	第二节 一个试验中两种典型检波器数据表现不同的原因分析	56
	一、试验概况	56
	二、试验结果分析	60

第三节 补偿动圈式检波器低频损失的方法——检波器反褶积	86
一、允差的影响	88
二、非检波器机械振动系统输出噪声(非系统噪声)	92
第四节 结束语	95
第四章 组合图形的空间展布	98
第一节 横向拉开组合的重要性	98
一、次生干扰波的特点	99
二、检波器横向拉开组合克服次生干扰波	112
三、横向拉开组合在施工过程中遇到的主要障碍	115
四、横向拉开组合的几个实例	116
五、小 结	119
第二节 组内限差的选择	119
一、一个例子	119
二、组内高差对有效波压制程度的理论模型试验	121
三、应该采用什么公式计算组内高差允许值	124
四、小 结	126
第三节 道距与地震信号的可记录性	127
一、影响地震信号可记录性的因素	127
二、小 结	137
第四节 合理的检波器数量	138
一、检波器组合的方向性效应随检波器数量变化的规律	138
二、检波器数量对随机干扰压制能力的影响(统计性效应)	143
三、检波器数量与检波器内部噪音以及耦合噪音的关系	145
四、野外试验	146
五、小 结	147
第五节 检波器组合的摆放形式	148
第六节 结束语	152
参考文献	153

石油地震勘探是根据地质学和物理学的原理,利用电子学和信息学等方法,在地表附近用炸药、机械撞击或者连续振动震源激发产生地震信号并向地下传播,地震信号在具有不同物性的地层分界面上反射后回到地面,再用仪器记录下爆炸后地面上各点的震动情况;通过分析地震波所携带的地质信息,间接推断数百米至数千米下的地质情况,进而寻找可能的储油气单元。石油地震勘探目前主要采用反射波法进行。

“信号(Signal)”一词来源于拉丁语的“Signum”,意为符号或者代码。《韦氏大学词典》(Merriam-Webster's Collegiate Dictionary)将信号定义为信息或者情报可以借以被传送的、可以被检测到的物理量或者脉冲(比如电压、电流或者磁场强度等)。在反射波法石油勘探中,信号指的是有利于目标地质体识别的“有效反射信号”。^[1]

“噪音(Noise)”来源于拉丁语“Nausea”。在古法语中,Noise的意思是 Trouble(麻烦)。在物理学中,噪音指会模糊或者降低信号清晰度的、随机或者持续的干扰。对于反射地震而言,噪音是对有效反射信号识别具有干扰作用的“非有效信号”。噪音与信号的定义是相对的,在某些情况下,二者可以相互转换。^[1]

一、有效反射信号的影响因素

在地震采集阶段,也就是地震信号自震源激发到被记录到磁带上的过程。对于陆上地震勘探来说,影响地震信号振幅、频率等特征的因素主要包括以下几个方面。

(一) 大地吸收衰减

当地震波在地下介质中传播时,由于地下岩层是非完全弹性的不均匀介质,地震波的部分弹性能量不可逆转地会转化为热能而发生耗散,使得地震波的振幅衰减。这种由于介质的非完全弹性而引起的振幅衰减现象称为吸收。较地下致密岩层而言,低降速带对有效波的吸收最为强烈。160 Hz 反射波在地表 15 m 的吸收量相当于地下传播数千米的距离。如果在沙漠或者黄土塬地区,由于巨厚低降速带的存在,大地吸收更为强烈。

（二）组合效应

检波器组合是目前野外采集阶段普遍采用的压制干扰波的方法之一。检波器组合对有效反射波的压制,会因为不同的地质模型、不同的观测系统而不同。如果只是考虑检波器组合效应的话,随着沿排列组合基距的减小,组合对反射波的压制量显著减小。

（三）组内时差

R. E. Sheriff 曾经指出,相对高程的微小变化、埋置条件或表层速度的差异,都极易产生数毫秒的时差,这就构成了一个高截滤波器。野外组合中的时差包括各检波器及可控震源各震点之间相对高程的不同而导致的时差。组合时差越小,越有利于提高有效信号的可记录范围。

（四）爆炸子波

理想震源产生的地震信号应该满足以下几个条件:① 有足够的能量,这样在传播很远距离之后,仍然可以被检测到。② 持续时间较短,以便可以分辨离得很近的两个界面。③ 可重复。④ 不会产生噪音影响反射波的监测。

陆地上产生震源信号的方式包括井中的爆炸震源、大脉冲量地面震源、小型地面震源以及可控震源等。^[2]震源信号的特性,主要是能量以及频谱特征,是决定地震资料分辨率与信噪比的关键因素;而决定震源信号特性的因素除了震源本身的物性、质量等因素以外,还包括周围介质的物性,二者之间的耦合(阻抗耦合、几何耦合),激发位置,爆炸深度,组合形式,激发方式等。

（五）检波器-大地耦合

人们以往假定,检波器能够无畸变地接收激发点产生的、经过地下波阻抗界面反射或折射以及大地吸收衰减等改造后到达接收点的地震波,准确地再现地面的振动。但实际上,安置在地表的检波器与大地共同构成了一个振动系统,其振动方式类似于磁场中的检波器振荡线圈与检波器外壳之间的相对运动,称为检波器-大地耦合系统。检波器接收到的,是经过检波器-大地耦合系统改造后的振动信号。

影响检波器-大地耦合效果的因素主要有地表耦合介质的物性、检波器的性能参数以及环境条件等。研究表明,检波器-大地耦合系统是一个低通滤波器,对地面振动信号具有滤波作用。检波器与大地之间的良好耦合,对于提高地震信号的保真度具有重要作用。

以上几点是地震信号进入检波器之前的主要影响因素。进入检波器之后,检波器以及地震仪的性能、参数也会对地震信号的属性产生影响,将在第三章《检波器性能指标与地球物理效果》中作详细的讨论。

二、噪音的分类与衰减

根据野外采集阶段噪音的出现规律,可以将噪音分为规则干扰波和随机干扰波。前者包括面波、折射波、声波等干扰,后者包括风吹草动等引起的频带宽、速度多变的环境噪

音。^[4]无论是相干噪声还是随机噪声,野外采集阶段均可以通过组合检波、多次覆盖等方法进行衰减。但是,随着地震勘探区域在地表、地下两个方面的复杂化,在某些地区,特别是地表复杂地区,组合检波与多次叠加并没有有效地衰减各类噪声。究其原因,是因为当前地震采集阶段噪声的归类以及衰减方法仍然存在一定的误区。

(一) 相干噪声

面波、折射波、声波等源自炮点的原生噪声是最典型的相干噪声,往往被视为提高信噪比的主要障碍,在采集阶段主要采取沿排列的组合方式进行衰减。沿排列的组合方式在地表条件比较单一的平原地区非常有效,保证了数据的质量。但是,除了源自炮点的噪声以外,还有其他非源自炮点的噪声也属于相干噪声,主要包括两类:由震源激发的次生噪声、具有相干特征的环境噪声。

1. 原生噪声

这类噪声指的是由震源发出的、有一定主频和视速度的规则干扰波,具有很强的相干性,比如面波、声波、浅层折射波等。主要依靠沿排列方向的组合检波以及多次叠加进行衰减。在施工因素设计合理的情况下,可以得到有效衰减。

2. 次生噪声

野外采集时,震源激发后,大地震动引起地表与大地耦合不良的部分产生对地的重新锤击,形成所谓的次生干扰波(图 1-1)。这种次生干扰波之所以在地震记录上经常表现为随机性,是因为干扰源分布的随机性以及次生干扰波之间相互干涉造成的,并非干扰波本身是随机的。次生干扰波不属于随机干扰波,无法根据其统计特性进行有效衰减。

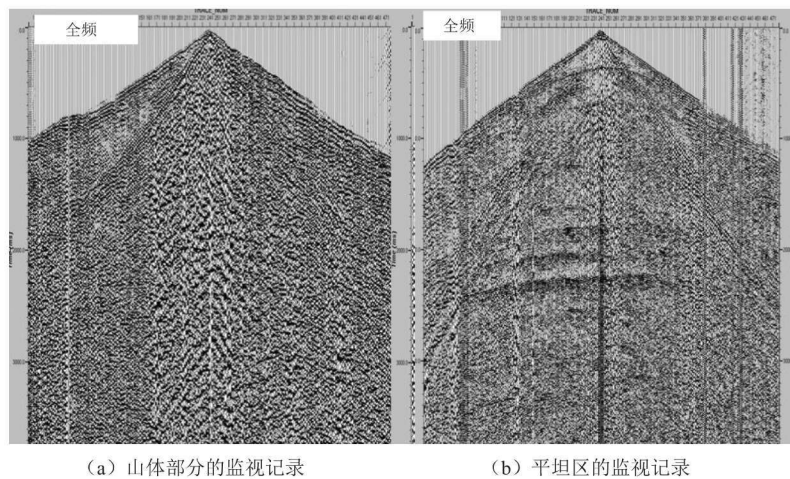


图 1-1 山地勘探中的次生干扰波

3. 具有相干特征的环境噪声

图 1-2 是某地区环境噪音调查的监视记录(道距 2 m)。记录中可以看到很多不同曲率以及强度的双曲线同相轴,说明此类干扰来自调查排列的侧面,位于排列的不同位置且有不同强度。这种环境噪声也不具有随机特性,属于相干噪声,不能按照统计特性进行衰减。

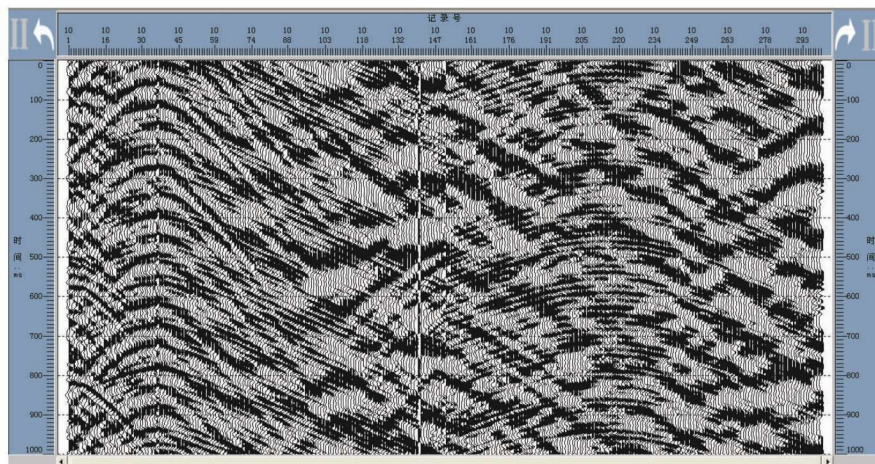


图 1-2 环境噪音不等于随机噪音

次生噪音以及具有相干性的环境噪音都有多波源、多波速的特点,在监视记录上经常因为相互干涉而表现为类似随机噪音的杂乱反射。

所以,地震采集阶段的相干噪音应该包括 3 类:① 源自炮点的原生噪音;② 非源自炮点的次生噪音;③ 可能来自任何方向、具有相干性的环境噪音,而非仅仅是①。后二者的压制方法具有不同于①的特点。

平原地区监视记录中,往往因为面波或者折射波,这类原生噪音比较强,而导致记录面貌较差。但是经过处理后,仍然可以得到较好的剖面。在次生干扰非常严重的工区,则以次生噪音以及具有相干特征的环境噪音为主;此类地区有时甚至连完整的面波与折射波都看不清,这正是次生干扰非常严重的表现。在很多低信噪比地区,所期望的反射信号常被这些视波长可以达到 150~250 m 的噪音所淹没。在一些次生干扰非常严重的地区,甚至在水平叠加剖面中可以清楚地看到强烈的次生干扰波。

就相干噪音而言,最有效的衰减方法是组合检波。但在平原地区,普遍采用的主要沿排列方向(in-line)方向展开的组合方式并不适合地表条件复杂、次生干扰严重的地区,而应该在垂直排列方向(cross-line)上横向拉开组合。^[5]只要沿垂直排列方向拉开大约一个最长干扰视波长的距离,同时配合室内道间混波,就能够较好地压制各种来自不同方向的原生、次生相干干扰,在地表复杂地区得到较好的采集资料。目前,中国西部部分地区采用的宽线大组合施工方法除了兼具横向拉开组合的作用外,还可以在室内先做静校正后再组合;同时,道内组合拉开的距离不必非常大,这样有利于缩小组内高差,从而可以在提高资料信噪比的同时改善分辨率。

(二) 随机噪音

随机干扰的来源是多方面的,包括风吹草动、系统噪音等。文献[3]认为,随机干扰主要是由地面的微震、激发产生的不规则干扰以及仪器接收过程中的噪音引起的干扰(图 1-3)。本书此前谈到,次生噪音具有相干性,应该根据其方向特性、依靠横向检波器组合进行衰减。随机干扰在地震记录上表现为杂乱无章的振动,无一定的视速度,频带很宽,主要利用统计特性进行衰减。

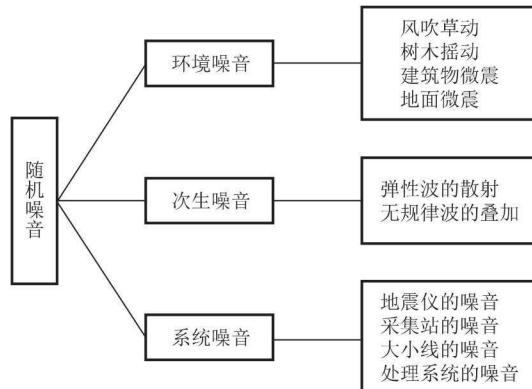


图 1-3 次生噪音被认为是随机噪音的一种

在地震记录上,被视为随机噪音的干扰波至少存在以下 3 种来源:① 系统噪音。因为当前采集设备的系统噪音已经远远低于环境噪音的强度,所以不是影响数据质量的主要方面。但是,当我们希望用反褶积的方法恢复极弱的低频信号时,系统噪音就会起作用(详见第三章《检波器性能指标与地球物理效果》)。② 风吹草动等具有随机特征的、由环境扰动形成的干扰。这一来源因不同的地区、气候、地表条件而存在巨大差异。③ 检波器与地表之间的耦合关系也会产生噪音。当耦合较好时,会产生耦合噪音,但是这种噪音是可测量的,主要表现在高频端(详见第二章《检波器-大地耦合系统》);如果耦合效果较差,尾锥与介质之间存在较大缝隙,检波器振动与大地振动之间的非线性因素增加,这种脱耦噪音是目前难以测量的。其中,第二种噪音以及震源激发的振动是第三种噪音的外在激励,内因则是检波器-大地之间耦合系统的线性以及非线性关系。目前对于前两种噪音的认识是比较明晰的,对于第三种噪音,特别是脱耦噪音,则缺乏明确的认识。

通过两个试验可以观察耦合噪音的存在及其影响程度。

1. 检波器方形“超小排列”噪音接收试验

在同一种地表耦合介质的情况下,将每 6 个单点检波器放置为一排,共计放置 4 排,形成一个 6×4 的小型排列,检波器间距 1 cm(图 1-4)。然后分为附近有人走动和平静两种情况(分别代表大、小噪音)录制噪音。

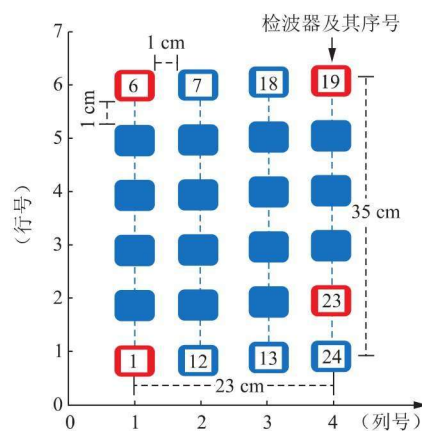


图 1-4 检波器排列方式

从环境干扰的角度来看,无论是相干的噪音还是随机的噪音,在试验所示的狭小空间(35 cm×23 cm)内都是一样的。为了说明这一点,分别挑选了排列四角的4个检波器(红色,编号分别为1、6、19、23),计算记录长度为1 s时4个检波器记录环境噪音的均方差振幅,共计算16个时段,得到图1-5。由图1-5可见,位于排列四角的4个检波器所记录的环境噪音基本上没有差别(即4条曲线基本重合),这说明排列中24个检波器所记录的环境噪音与检波器空间摆放位置没有关系;如果24个检波器接收到的噪音存在差异,则原因只有一个——耦合条件。

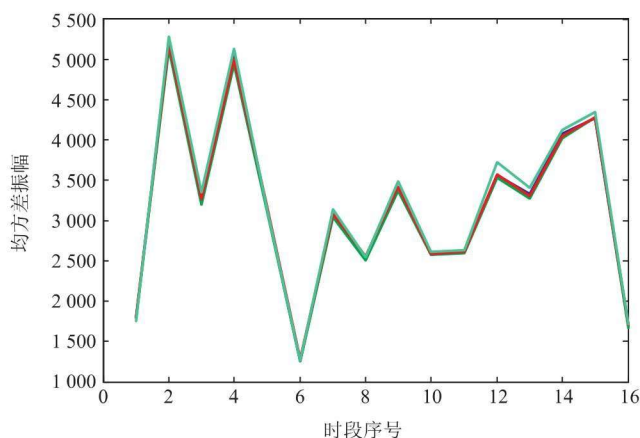


图1-5 位于排列四角的四个检波器(序号1、6、19、23)在16个时段的均方差振幅

图1-6是在9个不同时间段记录的22个(排列中24个检波器坏了2个)检波器接收到的环境噪音(归一化后)。由图1-6可以看出,每个检波器在不同时段录制的环境噪音相对于其他检波器的态势,或者说每条曲线与其他曲线相比,其形状是非常相似的。也就是说,

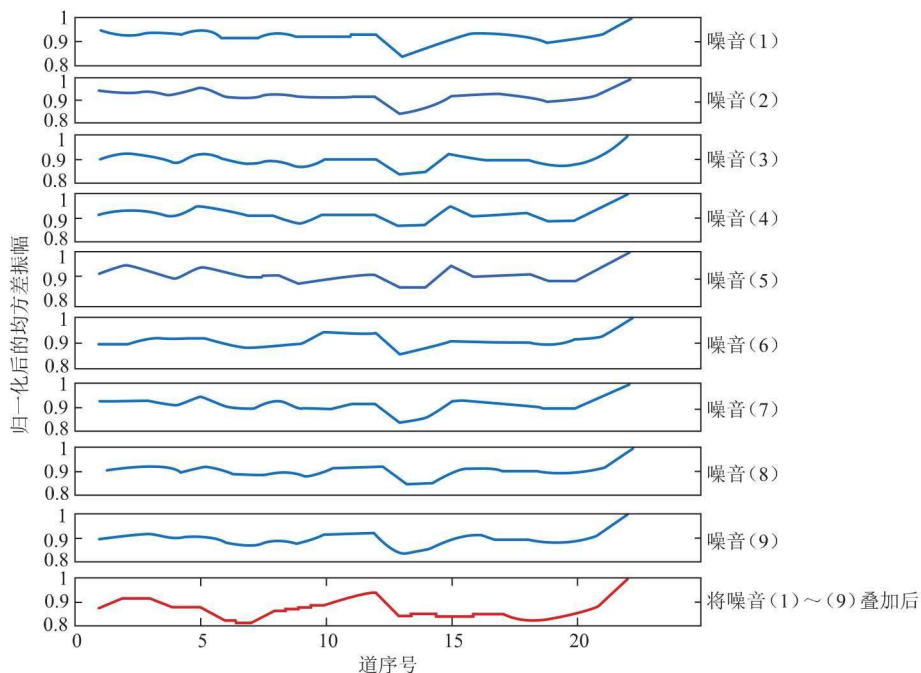


图1-6 9个时段及其组合后的环境噪音(归一化后)

某些检波器,比如图中的第 22 个(对应排列中序号 24)检波器,其噪音水平始终大于其他检波器;而第 13 个(对应排列中序号 15)检波器的噪音则始终小于其他检波器。这说明即使在外界激励相同的情况下,检波器由于耦合条件不同,接收到的噪音也存在很大差异,并且这种“差异”相互之间具有一定的稳定性。这种由于耦合条件差异带来的噪音可以被称为耦合噪音。

以噪音(2)、(9)为例进行具体分析(图 1-7)。

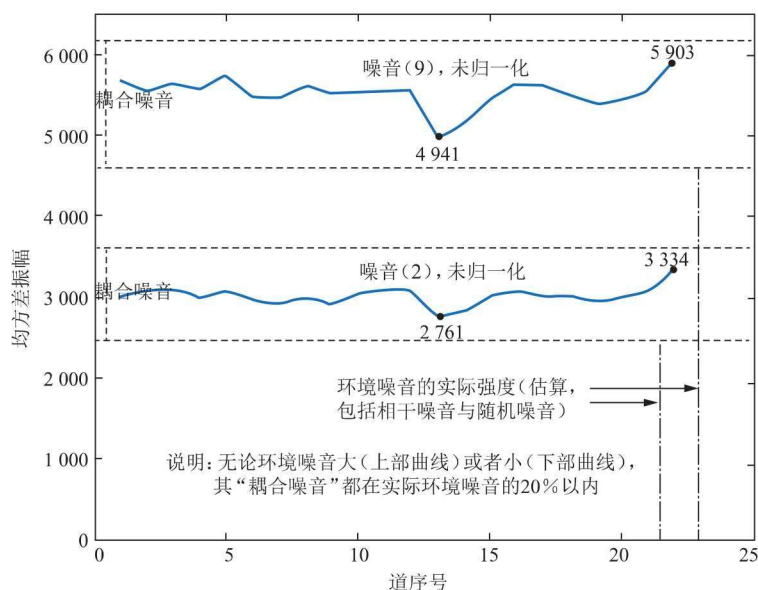


图 1-7 耦合噪音强度大约在环境噪音的 20% 以内(只对试验 1 而言)

目前,检波器与大地介质完全耦合是不可能的。实际的环境噪音要比埋置条件最好的第 13 道稍小一点(因为即使第 13 道也存在耦合噪音,也只不过比其他耦合较差的道要弱一些)。同时,第 22 道(对应排列中检波器 24)是故意埋得较差的检波器,所以耦合噪音比较大。在实际施工中不会出现这种情形,可以视为耦合噪音的上限。

从图 1-7 可以看到,对环境噪音较强的噪音(9)而言,耦合噪音为 1 000 左右(图 1-7 上部曲线);环境噪音较弱的噪音(2)中,耦合噪音则只有 500 左右(图 1-7 下部曲线)。这在一定程度上说明了选择低噪音天气施工具有重要意义。

根据试验(1)可以得到以下结论。

(1) 无论环境噪音大还是小,耦合噪音均为实际环境噪音强度的 5%~20%,并且对埋置好的每个检波器来说,其“相对幅度”是基本稳定的;耦合噪音越小的道(比如第 13 道),耦合效果越好。但是这种耦合噪音在某种程度上不是人为可以操控的。因为施工人员从主观上希望达到相同的耦合效果,但从试验(1)的结果来看,这种期望显然没有实现。耦合噪音之间的不一致性,使得检波器之间道间一致性的意义减小了。因为耦合噪音的差异远远超出了检波器-60 dB 或者-90 dB 的线性畸变范围,这也是数字检波器极低畸变指标难以体现优势的原因。

(2) 多次叠加没有改变每个检波器对应的耦合噪音的相对幅度(环境噪音的 5%~20%)。

(3) 克服随机噪音除了选择低噪音天气施工、利用统计规律衰减环境噪音以外,还要通过改进埋置方法、保证耦合质量等措施来减小耦合噪音。

2. 4 种不同耦合介质、环形“超小排列”噪音接收试验

将 12 个相同的容器分为 3 组(每组 4 个),分别填满沙子、捣结实的硬土、稀泥。然后将其放入一个事先挖好的、宽度略大于容器直径、深度相当于容器高度、半径约为 0.5 m 的环形槽中。3 组交替依次排列。最后将容器缝隙填满土,在圆心处埋置 4 个检波器(图 1-8)。

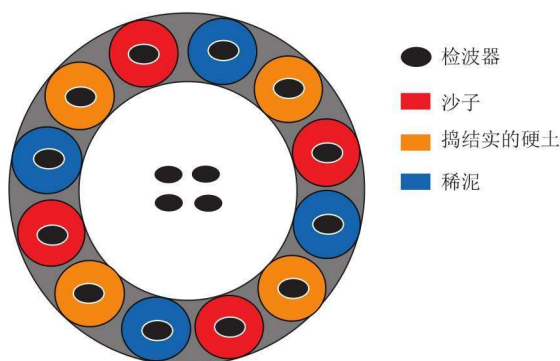


图 1-8 环形“超小排列”示意图

因为圆形在各个方向具有相同的方向特性,同时在半径为 0.5 m 的圆形面积中,环境噪音可以视为完全一致。如果 4 组介质(包括圆心的 1 组)同时接收到的环境噪音有所不同,就是因为介质不同,进而使得耦合条件不同产生的噪音差异,这种差异主要反映了检波器—介质之间耦合条件的不同。

录制噪音计算每组介质的均方差振幅(共计录制了 5 个时段,每个时段 8 s),得到图 1-9。

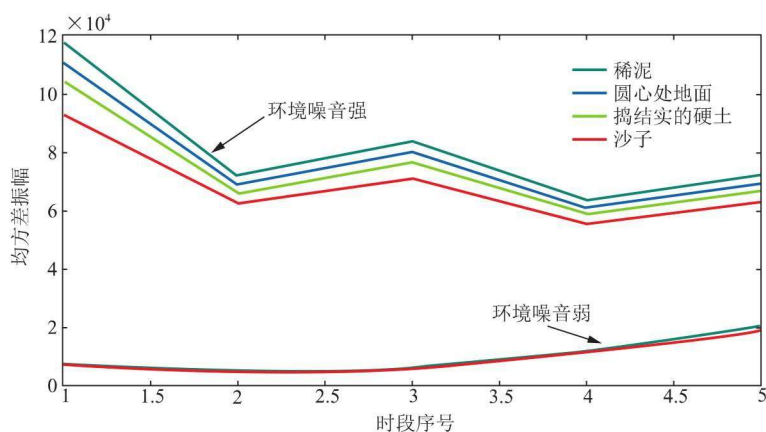


图 1-9 4 种不同介质 5 个时段的均方差振幅

图 1-9 说明:由于耦合介质的不同,即使在环境噪音相同的情况下,因为耦合介质的不同,检波器接收到的噪音也不同。当环境噪音较小时(图 1-9 下部曲线),稀泥、捣结实的硬土、(圆心)普通地面、沙子 4 组介质接收到的噪音依次减小,差异在 102%~106%之间(以噪音最小的沙子为标准);当环境噪音较大时(图 1-9 上部曲线),这种差异则可以达到 110%~

120%，其中，稀泥的耦合噪音要远大于其他3种介质。这可以说明检波器-大地耦合系统对环境噪音的放大作用。

关于耦合噪音产生原因的理论分析以及衰减方法，详见第二章《检波器-大地耦合系统》。

随机干扰主要依靠组合检波与多次覆盖进行衰减，但有以下几点需要注意。

(1) 在其他因素合理的前提下，不必拘泥于组内距大于相干半径的限制。计算表明，在固定组合基距的前提下，增加检波器个数有利于提高信噪比。

(2) 数字检波器单点采集时覆盖次数往往不足以有效衰减随机噪音。我国东部某些地区模拟检波器施工常常采用 $10(\text{纵}) \times 2(\text{横}) = 20$ 次覆盖，采用单点数字检波器，则可以达到 $20 \times 6 = 120$ 次覆盖，甚至更高，看似覆盖次数有了很大提高。但是从压制随机噪音的角度考虑，使用模拟检波器时每道36个检波器，那么对于环境噪音来说，实际参与叠加的次数是 $36 \times 10 \times 2 = 720$ 次。从图1-10可以看出，模拟检波器覆盖720次对压制随机干扰是足够的，而数字检波器120次覆盖在衰减随机噪音方面与模拟检波器相比要差大约10 dB。也就是说，数字检波器120次覆盖对于衰减随机噪音来说是不够的。

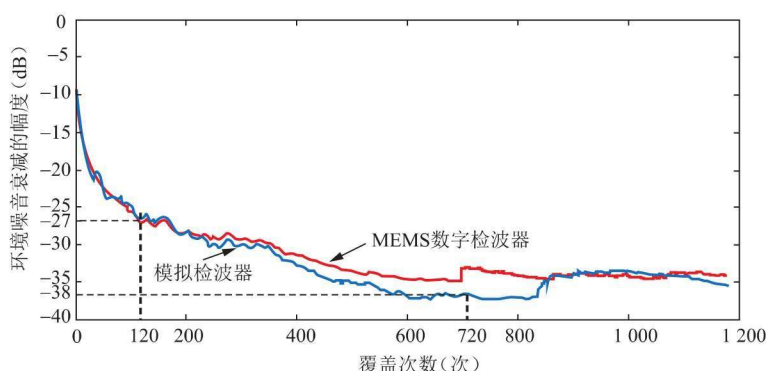


图 1-10 随机噪音衰减与覆盖次数之间的关系曲线

(3) 组合或者多次叠加对于衰减耦合噪音的相对幅度没有明显帮助。在试验(2)数据的基础上，计算4种不同耦合介质接收到的环境噪音在经过不同次数叠加后的均方差振幅（图1-11）。由图1-11可见，多次叠加对衰减环境噪音具有明显的作用，但是耦合噪音的相对幅度与多次叠加前相比并没有明显降低。

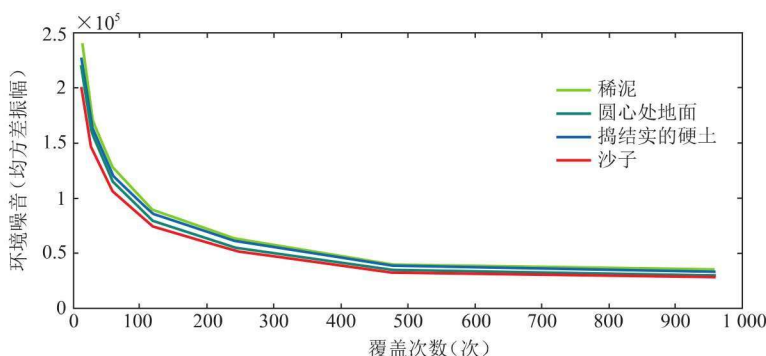


图 1-11 环境噪音随覆盖次数变化曲线

(三) 相干噪音与随机噪音的关系

就像“运动是绝对的,静止是相对的”一样;相干是绝对的,随机是相对的。相对于野外道距这个数量级的空间尺度来说,微观上的相干噪音表现为监视记录上的随机噪音,是因为地震勘探观测尺度相对大。比如,李庆忠院士曾经观测到视波长只有数米的次生低速干扰。这种干扰在道距为数十米时表现是随机的;但是当道距缩小到 1 m 的话,则出现相干的特征。所以,在基于某种道距的基础上,有的噪音是真随机——道间不具有相干性,要利用统计效应进行衰减;有些则是假随机,从现象看是随机的,其实是相干噪音因为道距太大或者众多干扰源相互干涉而造成的随机表现。

所以,存在宏观与微观两种次生噪音。在风等的激励下,由于大地-检波器之间耦合不良导致的脱耦噪音(据李庆忠)是属于微观的次生噪音。风是外界激励,耦合不良则是脱耦噪音存在的内因。另一种是宏观的次生噪音。在震源或者巨大机械振动的激发下,产生次生振动,传播到排列上。这种干扰在记录上表现为双曲线,经常因为相互干涉而显得杂乱无章。

同时,耦合不良的介质往往吸收严重,并常常伴有强烈环境噪音。这 3 种因素的同时作用,对地区的高频勘探形成了一道目前技术条件下难以逾越的门槛,使得高于某个频段的高频勘探效果大大降低。

(四) 小结

地震采集阶段是压制地震噪音的最重要阶段之一。根据噪音出现的规律,非源自炮点的次生噪音以及来自四面八方的具有相干性的环境噪音应该被列为相干噪音。如果不在采集阶段采用横向拉开的组合方式进行衰减,则很难通过室内处理加以有效消除。耦合噪音是随机干扰的重要组成部分,需要通过改进尾锥结构、低噪音条件施工、强化质量管理等措施进行衰减。采集阶段噪音的归类以及衰减方法可以总结为表 1-1。

表 1-1 采集阶段噪音的归类以及衰减方法

相干噪音		野外采集阶段压噪方法	备 注
相干噪音	原生噪音	in-line 组合,多次叠加	与组合、叠加因素有关
	次生噪音	cross-line 组合,多次叠加	横向组合距离要足够
	相干性环境噪音	cross-line 组合,多次叠加	横向组合距离要足够
随机噪音	系统噪音	远低于环境噪音,不考虑	
	风吹草动等环境噪音	组合检波,多次叠加	总的叠加次数要足够
	耦合噪音	改进检波器尾锥, 低噪音施工,严格质量管理	与覆盖次数无明显关联

三、近地表是信号与噪音的最关键影响因素

野外采集阶段影响地震信号以及噪音的所有因素中,一个贯穿始终的重要主线是近地表。近地表结构一般指地球的表层结构,即受大自然环境变化所影响到的部分,其下是真正

地质意义上的岩层结构。它们没有受到大自然环境的影响,保持着原有的地质岩性特征。近地表的岩性特征、层理特征、胶结程度、速度参量、密度参量等由于受大自然环境影响而发生了变化。从地质意义上来说,大气圈渗入岩石圈部分即为表层结构。从地震地质角度来说,这个表层结构制约着地震勘探的成果。近地表地层的地质、地球物理以及空间特征对震源信号的特性、大地吸收衰减、检波器-大地耦合效果、组合图形空间展布因素的选择以及处理阶段的静校正、速度分析、叠加成像等,均具有最重要的影响。近地表的底界,对于石油勘探而言,可以被称为“信号与噪音的空间分界线”。

就我国而言,东西部地区的近地表呈现出不同的特点。

东部沉积平原的地表高程变化普遍比较平缓,表层主要覆盖有第四系松散的没有胶结或者弱胶结的颗粒堆积物,潜水面较浅并且相对稳定。低速带速度一般在 $300\sim 900\text{ m/s}$ 之间,厚度多在 $1\sim 15\text{ m}$ 之间;降速带速度一般在 $700\sim 2\ 100\text{ m/s}$ 之间,厚度多为十几米到几十米;高速层速度一般为 $1\ 600\text{ m/s}$ 以上。各层之间分界明显,厚度较小,所以对有效波的吸收较西部低降速带巨厚的地区要小得多。

西部地区存在大量地表极端复杂的施工区域。所谓复杂,既包括地表自然和人文地理环境方面的复杂性(特殊地貌、恶劣的气候、交通不便、地面建筑群、地表和地下各种设施和障碍物、森林、水域、沼泽、人为环境噪音等),也包括近地表介质在结构和组成方面的复杂性。复杂地表对地震检波的影响主要表现在 3 个方面。

(1) 表层物性复杂。表层介质包含了疏松表土、淤泥、沙砾、岩石等不同类型。各种介质不仅组成、形态不同,力学性质也存在较大差异。这一方面影响了有效波的吸收,因为近地表疏松的(特别是巨厚的)表土对反射波有着严重的衰减作用;另一方面,因为地表介质直接与检波器尾锥接触,所以介质物性的不同也使得大地与检波器之间的耦合关系出现较大差异。当耦合效果较差时,会使得有效信号发生畸变,影响地震信号的精度,降低分辨率。

(2) 低降速带结构复杂。低降速带结构的纵横向变化大,不同地表类型表层结构构成方面存在巨大差异,如“低速层+高速层”(双层结构)、“低速层+降速层+高速层”(多层结构),表层厚度和速度呈连续介质性质——非层状结构等多种结构类型,还表现在低降速带的厚度与速度及下伏高速层的层速度在空间上剧烈变化的非稳定性和巨大的结构分异性。例如,有的地区低降速带中存在一层甚至多层速度很高的薄层。这一方面可能有利于获得频率较高的爆炸子波,另一方面又有可能对有效反射信号产生屏蔽作用。另外,低降速带横向变化产生的波阻抗界面,也是一种典型的次生源,可能产生严重的次生干扰。

(3) 地表产状复杂。在山地、沙漠、黄土塬等复杂地表地区,地表的起伏非常剧烈,常常出现大角度、多方向的地面倾角,很多情况下甚至近于直立,往往在极短的距离内形成很大的高差。^[4]而勘探中出于保护有效波的需要,对于检波器组合内的高差有一定限制。这种地表高程的强烈变化,一方面使得突出地面的山头、沙丘等产生了强烈次生干扰,环境噪音非常发育;另一方面,也使得出于压噪方面的需要而在 in-line 方向以及 cross-line 方向拉开一定距离进行组合检波以便压制干扰波的施工设想无法实施,进一步降低了信噪比(图 1-12)。