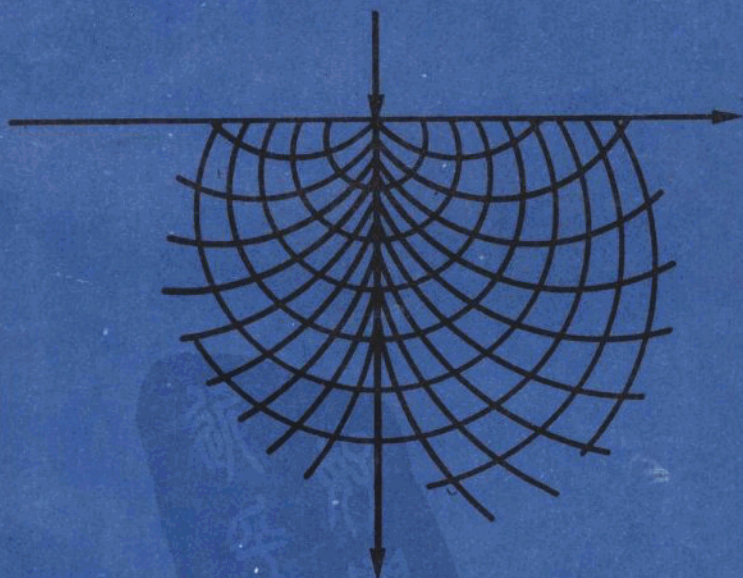

可控震源地震勘探

М. Б. 什内尔索纳 等著



石油工业出版社

可控震源地震勘探

M.Б.什内尔索纳^{*}等著

李乐天 裘慰庭 译

石油工业出版社

(京) 新登字082号

内 容 提 要

可控震源地震勘探是一种正在快速发展的地球物理勘探方法。书中论述了该方法的理论和实践,介绍了可控震源地震勘探的技术设备、野外工作方法、资料处理,列举了不同地震地质条件下成功地采用可控震源方法的一些实例。本书适用于地球物理—地震勘探工作者。

可控震源地震勘探

M. E. 什内尔索纳 等著

李乐天 袁恩庭 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油地球物理勘探局印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米32开本6³/₈印张1插页138千字 印1—1500

1993年10月北京第1版 1993年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-1056-9/TE 981

定价: 5.00元

译 者 的 话

根据我国可控震源地震技术发展的实际情况，本书翻译时对原书第二章中介绍的（前）苏联生产的电控箱体、累加器和第三章第五节的静校正部分以及第五章中有关具体地质成果描述等内容省略未译；第六章可控震源野外生产的组织及措施未译。

本书第一、二、三、五章由李乐天译，裘慰庭校；第四章由裘慰庭译，李乐天校。

全书由高章伟、郝顺元审稿并编辑。

目 录

绪论	(1)
第一章 可控震源地震勘探的理论	(3)
第一节 可控震源地震勘探的物理基础	(3)
第二节 可控震源与大地半空间的相互作用	(6)
第三节 可控震源地震记录道的模型	(15)
第四节 可控震源地震勘探采用的信号及其相关函数	(18)
一、相关函数及其特点	(18)
二、频率调制信号	(20)
三、单极性编码序列	(39)
四、变符号编码序列	(43)
第五节 可控震源地震资料的编码特点	(47)
一、符号位编码基础	(48)
二、全字长相关函数和符号位相关函数	(51)
三、符号位编码的抗干扰能力	(52)
第二章 可控震源地震勘探的技术装备	(56)
第一节 振动震源的分类	(56)
第二节 用于地震勘探的可控震源	(58)
一、偏心式可控震源	(59)
二、液压可控震源	(59)
第三节 记录仪器	(79)
一、累加器	(79)
二、相关器	(79)
第三章 野外工作方法	(85)
第一节 可控震源激发的波场及其特点	(86)

第二节 选择扫描信号参数.....	(90)
第三节 选择野外方法的主要因素.....	(99)
一、波形图分析.....	(99)
二、震源和检波器组合.....	(101)
三、激发的同步累加.....	(106)
四、观测系统.....	(109)
第四节 可控震源地震勘探的抗干扰能力.....	(110)
第四章 可控震源地震勘探的资料处理	(114)
第一节 第一阶段的资料处理.....	(115)
一、压制(减弱)强振幅干扰的方法.....	(116)
二、强振幅干扰频率切除方法.....	(117)
三、确定可控震源地震记录的零线.....	(120)
四、可控震源地震资料的互相关.....	(121)
五、标准互相关.....	(121)
六、可控震源地震资料的加权互相关.....	(124)
七、可控震源地震资料的振幅均衡.....	(128)
八、可控震源地震资料第一阶段处理流程.....	(130)
九、对组合扫描信号资料的处理.....	(134)
十、用于可控震源地震资料预处理阶段的新方法.....	(135)
第二节 常规处理.....	(138)
一、可控震源地震资料的反滤波.....	(138)
二、可控震源地震资料新的反褶积方法.....	(151)
第五章 可控震源地震勘探在不同地震地质条件下的应用	(167)
第一节 乌兹别克斯坦和土库曼.....	(171)
第二节 宾里海盆地.....	(176)
第三节 波罗的海沿岸台向斜和第涅伯—顿涅茨盆地.....	(180)

第四节	西西伯利亚.....	(181)
第五节	东西伯利亚和萨哈林岛.....	(183)
结束语		(189)
参考书目		(191)

绪 论

用比较容易控制的、安全的、对生态无害且廉价的弹性振动源来代替爆炸震源的愿望导致了非炸药震源地震勘探的创立。这种方法是借助于专门的设备和机制来激发地震波的，而不是用炸药或导爆索。首先发展的是脉冲非炸药震源地震勘探。它用重物短时间内作用于地面或水层产生脉冲振动。脉冲非炸药震源地震勘探虽然简化了生产工作并且对周围环境也比较安全，但它不能解决诸如控制振动的激发过程以及将能量集中到需要的频带范围内等一系列问题。

在发展脉冲震源地震勘探的同时也开发了可控震源地震勘探技术。在石油天然气和其它矿藏的普查详探工作中越来越多地采用这种方法。可控震源地震勘探的物理基础与炸药震源和脉冲震源是一样的，不同之处在于可控震源向地下激发的弹性振动波形是已知的，其作用力较小，但作用时间较长，且可调节变化，所以它不破坏表层土壤和路面，能够定向控制所激发和接收的波的频谱成分，能够用相关法压缩信号并在噪声背景上拾取信号，能够在噪声背景较高的城市及居民点开展工作而不损坏周围环境，所有这些都使可控震源地震勘探比脉冲震源地震勘探更优越。特别是在解决复杂问题，需要对所记录波的波型和频率成分施加一定作用时，可控震源地震勘探的前景更为可观。这种方法引人注目的另一个原因是，它能够利用大量的复杂信号，来激发介质中的弹性振动。其中比较重要的是线性和非线性频率调制信号。此外，脉冲编码序列序号（脉码信号或脉冲振动信号）也得到了一定发展。

可控震源地震勘探于50年代末在苏联^①开始发展。首先研制了偏心轮的振动器(И.С.Чичинин, В.И.Юшин, Г.П.Евчатов, Ю.П.Лукашин),而后又研制了液压式的(В.М.Косов, А.С.Шагинян, А.Г.Асан Джапалов, А.М.Седин, Г.И.Молоканов, А.С.Кастанов, В.М.Шевкунов等)。在这些工作的基础上研制了可控震源地震勘探仪器及设备的工业性和半工业性样机:整套的 ВСК-1, 然后又有 ВСК-2 以及 СВ-5-150 和 СВ-10-100 型可控震源。

在研制可控震源的同时,还进行了野外试验,开发了记录仪器、野外工作方法和资料处理技术(Ю.П.Лукашин, Т.М.Гродзянская, М.Б.Шнеерсон, Г.П.Евчатов, В.А.Гродзенский, Ю.Н.Лугинец, Ю.П.Кострыгин, В.М.Косов等)。在此基础上转向全套可控震源地震勘探技术设备的工业化生产。此外,还发展了以激发编码信号为基础的可控震源地震勘探方法,研究成功了离散作用的振动震源或称编码(脉冲振动)装置(В.В.Ивашин, С.И.Николаев, Ю.А.Бару等)。

70年代末,可控震源地震勘探获得了工业性应用,开始批量生产 СВ 型液压可控震源。目前,生产的震源有好几种不同的型号,并正在研制专门适用于苏联北部地区的可控震源。由于可控震源的技术性能不断改善,因此,在解决探区地质结构、勘探矿藏等各种问题时,其工作效果也不断提高。在苏联,可控震源地震勘探的规模相当大,并且近期内还会有更大的发展。因此,有必要系统地阐述可控震源地震勘探理论和实践方面的基本问题,以便更有效地使用这种方法,特别是用来解决复杂的非常规问题。

①本书中的“苏联”均指“前苏联”,下同。

第一章 可控震源地震勘探的理论

第一节 可控震源地震勘探的物理基础

可控震源地震勘探的基础是以可变荷载激发振动。振动持续时间远远大于反射波或折射波到达分界面的传播时间。在可控震源地震勘探的实践中,采用的荷载主要是准简谐波的频率可调信号,其持续时间一般为20~30s,频带从10~15Hz到200~250Hz。没有畸变的频率平缓递增或递减的信号是压缩信息以及拾取规则波到达时间的必不可少的标准信号。

除了用频率可调信号外,也有用单极性序列信号的,在许多情况下还用不同极性的脉冲编码序列信号。它们以不同的或者相同的时间间隔一个接一个地排列在一起。在跟随脉冲的平均频率为5~25Hz的情况下,序列的持续时间可达几十秒,这时,脉冲之间时间间隔的变化或者不同符号脉冲跟随顺序的变化可作为压缩信息的标准信号。

描述可控震源荷载作用的信号称为扫描信号。扫描信号的一次发射持续时间比脉冲震源激发情况下大地固有振动及地震波的周期长许多倍。它满足以下条件: $FT \gg 1$

式中 F ——信号的频率参数,等于信号的平均频率或者频带;

T ——扫描信号或脉冲序列的持续时间。

依据这一标志,可控震源信号是复杂型信号,它不同于脉冲震源激发的振动。对于后者有:

$$F'T' = (1/T')T' = 1$$

式中 F' 和 T' ——振动的平均频率和周期。

在长时间的和变化的负载作用下,介质中会激发出面波、纵

体波和横体波。这些波在物理分界面上发生反射和折射，并互相干涉，形成相当复杂、无法分辨的振动场。在这个场中，无法用肉眼识别与反射面和折射面对应的规则波波组，也无法确定其到达地面的时间。由单个检波器或者沿测线布置的一组检波器所接收的并且由地震仪记录的大地振动就是振动道，振动道的综合就是振动记录，把振动记录存储到磁带上就构成可控震源地震勘探的原始资料。

要压缩信号和识别规则波，需作专门处理。这种处理可以有两种方法，它们大体上是相同的，这就是：相关法（时间法）和波谱法^[31]。最常用的是相关法，因为它简单，比较容易在计算机上运行。因此，本书将讨论这种方法。该方法的基础是计算信号的互相关函数，并将函数值与给定的门槛值加以比较。在地震勘探中通常只限于积分计算，而不把它与任何门槛值比较。在统计无线电技术中，这种处理被称作最佳滤波或匹配滤波^[26]。最佳滤波的工作方法是使信号的所有谱分量都延迟一定时间并同时到达输出端，形成叠加振动的强振幅峰值。

对于可控震源地震勘探，匹配滤波在于寻求扫描信号与经检波器和地震仪记录的振动之间的互相关函数的归一化值。

数学上，该步骤表示为相关积分式：

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T a(t)S(t+\tau)dt \quad (1.1)$$

式中 $a(t)$ 和 $s(t)$ —— 分别表示接收信号和扫描信号；

τ —— 相关信号之间的时移。

一个观测点的 $R(\tau)$ 值序列构成一个相关道，全排列相关道的总和构成一张相关记录。

相关道和相关记录是可控震源原始地震资料的处理成果，因此，需要进行详细的研究。

如果不考虑向大地传输负载的特点以及波的传播特点, 则认为: 所记录的振动可以表示为扫描信号 $S(\theta)$ 与滤波因子 $h(\theta)$ 的褶积积分。滤波器为沿地层剖面分布的反射系数。这时, 接收信号

$$a(t) = \int_0^{\infty} h(\theta) S(t - \theta) d\theta \quad (1.2)$$

式中 $h(\theta)$ —— 滤波因子。

将 (1.2) 代入 (1.1), 并变换积分顺序, 可得:

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T h(\theta) \left\{ \int_0^{\infty} S(t - \theta) S(t + \tau) dt \right\} d\theta \\ &= \int_0^{\infty} h(\theta) r(\tau - \theta) d\theta \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中 $r(\tau - \theta) = \frac{1}{T} \int_0^T S(t - \theta) S(t + \tau) dt$ 表示扫描信号的自相关函数。

可见, 可控震源地震资料的相关处理就在于寻求因子 $h(\theta)$ 与扫描信号自相关函数的褶积部分, 这个褶积可以看作是加载到地面的某一“脉冲”负载。这样, 可控震源地震勘探就类似于脉冲震源地震勘探。也可用振动信号与滤波器的褶积积分来表示脉冲震源激发而由检波器接收的振动。该滤波器为沿地层剖面分布的反射系数。根据这一点, 可以说用可控震源和脉冲震源激发, 原则上是一致的。不过, 可控震源发射到大地的复杂信号的自相关函数与脉冲震源所激发信号的时间特征是不同的, 这决定了两者之间的振动波形及其频率成分既有相似性又有差异。

积分式 (1.1) 的计算是将各个振动位移 τ , 在扫描长度 T 范围内每一个 t 时刻的 $a(t)$ 与 $S(t + \tau)$ 相乘, 然后将乘积相加。互相关函数值决定所分析的两个波的相互关系或相似程度。因

此, 当其波形吻合得最好时, 互相关系数也最大。因为式(1.1)中的接收信号 $a(t)$ 代表一组波形与扫描信号 $S(t)$ 相似的波叠加在一起, 所以, 互相关积分值会逐渐增大。当相关函数之间的时移 τ 等于波的延迟时间时, 积分值最大, 这个时间对应于扫描信号的起点。这与脉冲震源激发起点的瞬时时刻相似。也就是说, 最大的相关函数值 $R(\tau)$ 对应的就是波至时间。可见, 在可控震源地震勘探信号的相关处理过程中, 两个相关振动间的时移 τ 类似于脉冲震源地震勘探的波至时间。 τ 值由勘探深度决定, 因此, 不应该小于最深目的层的预期波至时间。

由于互相关函数能量的再分配, 并集中在经过时移后其值增大的范围内, 使相关函数极其突出。而时移值又等于规则波的到达时间, 所以, 相关记录的外部特征与脉冲震源地震记录看起来很相似。相关函数的形状和性质由式(1.1)中原始信号参数决定。如果扫描信号没有发生畸变并已准确地知道, 那么它在向大地发射、在介质中传播以及用接收设备将其记录的过程中会发生重大变化。这些问题, 以及扫描信号及其相关函数的特点将在本章随后几节中加以研究。

第二节 可控震源与大地 半空间的相互作用

可控震源地震勘探是通过在一定时间内直接向大地施加可变负载来激发振动的。震源的发射部件是一块硬金属平板。平板在振动力的作用下产生振动, 或垂直地面或平行地面, 这取决于所要激发波的类型。平板产生的负载被一部分土壤吸收, 这部分土壤称作耦合带, 它们在非炸药震源激发理论中有重要作用。在外力的作用下, 耦合带在一定时间内会产生体积形变(线性的)或者剪切形变(角度的)。它们使质点脱离平衡状态而激发出弹性

波。只有在地面或井中记录到这种弹性波才能完成地震勘探所面临的任务。

由于发射平板的线性尺寸远远小于在介质中所激发波的主波长，所以实际震源以及由它们产生的力可以认为是点状的。

对于弹性半空间来说，垂直力的作用导致在半空间中激发出面波(R)、纵体波(P)和横体波(S)。纵波传播速度为 v_p ，并且在力作用方向的垂直面上强度最大。离开垂直轴，纵波强度按余弦定理减小并且在地面方向变为零。

横波以速度 v_s 传播，其能量分布相当复杂，取决于波的垂直方向与振幅所要测定的那一点之间的夹角 θ 。在 $\theta \approx 40 \sim 50^\circ$ 的范围内，横波强度最大。在 $\theta = \arcsin(v_s/v_p)$ 的角度内以及在自由表面附近，横波强度最小^[26]。纵波和横波的衰减与观测点到力的作用点之间的距离成正比。

面波的传播速度大致等于 v_s ，其强度衰减与 $\sqrt{R}$ 成反比。所以，在地面观测的记录上，面波显得很强。这已为非炸药震源的实际工作所证实。

如果向弹性半空间施加一个集中力，力的方向指向水平轴 x ，那么在介质中也将激发出面波和体波，不过它们具有另一种振幅分布特征并且不具备轴对称。在 xoz 平面内存在着纵波、横波和面波。纵波在垂直方向不发生辐射，并且在与垂直轴成 $40 \sim 60^\circ$ 夹角内强度最大。横波SV在垂直平面内偏振，其振幅分布相当复杂。

在 $yo z$ 平面内可以看到平行于作用力方向偏振的横波。

当向地面施加一个指向水平轴 y 的力时， xoz 平面内将只出现横波SH，它在垂直于波的传播方向的平面内偏振。

在可控震源的负载作用下，大地将发生形变。这个作用力不大，可与地层最上部岩石的弹性极限相比拟。在应力作用下的岩石性状由其压缩曲线决定，该曲线表示一定体积内岩石形变与应

力的关系。在负载小于岩石弹性极限的情况下，加载和卸载按同一规律发生作用，且应力和形变之间为线性关系。我们把岩石受到简单纵向挤压而横向能拉张情况下应力与相对形变之间的比例系数称为岩石的弹性模量 E 。

以粒度成分、密度和弹性性质而互相区别的岩石或土壤，其弹性模量值也各不相同。同时也已认识到，弹性模量与施加负载的速度有关。

由于固体颗粒在其接触点的变形使岩石骨架出现弹性压缩，在压缩曲线上表现为直线。这时，骨架没有被破坏，去掉负载之后，所有粒子都恢复原位，应变具有可逆性。根据试验资料，大部分岩石的弹性极限都不大，为 $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$ 。冻土和永久冻土具有相当大的弹性极限值。

当向地面施加准谐波作用力时，靠近振动平板的土壤颗粒受激后产生振动运动，这些运动随时间在岩石内传播。大多数情况下，振动器产生的单位荷载不大 ($\sigma \leq 0.04 \sim 0.1 \text{ MPa}$) 且不会超过岩石的弹性极限。因此，土壤表现为弹性介质，多数形变都具有可逆性并且在地面不会留下痕迹。当在特别松散的土壤中激发振动时，可能会出现例外情况。如掘松的田地、流沙、干沙等等。多数情况下形变不很大，只有用工具才能测出来。

为使可控震源的振动平板同与其相连的大地形成一个统一系统，平板应该紧密压靠到地面。因此，各类可控震源的结构设计中都考虑到将运载工具（车辆）的重量连同平板一起以超出作用力 P 的力量 Q 紧压到地面上。如果 $P < Q$ ，则平板与大地能紧密耦合，构成一个与所加荷载相适应的统一振动系统。然而，在改变加载方向时，由于岩石惯性力的影响，大地相对于平板的运动可能出现不大的延迟。如果 $P > Q$ ，振动平板将会脱离地面，这将导致产生敲击性荷载，出现畸变，并改变大地振动性质。以激发脉冲序列方式工作的可控震源所产生的荷载一般不超过岩石弹

性极限。因此，形变具有可逆性并且实际上在地面不留痕迹。这时，介质点不是强迫振动，而是固有振动。但是，由于脉冲序列是密集的敲击脉冲，它们所产生的波相互干涉，形成一个复杂的振动场，所以只有采用资料的相关处理才能将波检测出来。

我们来看一下在震源近区，也就是与振动平板直接相连的区域内工作过程的特点。

假设向大地作用一个力 $F = F_0(t) \sin \omega(t)t$ ，这里的 $F_0(t)$ 和 $\omega(t)$ 表示力的振幅和频率，它们通常是时间的函数。质量为 $M_{\text{пл}}$ 的平板激发的振动传递给质量为 $m_{\text{нп}}$ 的大地。可以认为，在外部荷载的作用下，大地将产生一些由于岩石的惯性、弹性和非弹性而引起的阻力。这时，应力和形变之间的关系是线性的，而大地的非弹性阻力却与它在运动过程中的位移速度成正比。通过对作用在质量为 $M = M_{\text{пл}} + m_{\text{нп}}$ 的力的分析，可以列出震源—大地系统在垂直面的运动微分方程。对质量 M 作用惯性力 Ml'' ，弹性恢复力 ClS 和非弹性阻力 $\eta l'$ ，其中， C 表示弹性均匀压缩系数（弹性）； η 表示非弹性阻力系数； S 表示振动平板的面积； l ， l' 和 l'' 表示平板与大地的位移及其导数。可见，压缩系数 C 在垂向加载情况下与弹性模量 E 有以下简单关系^[30]。

$$C_z = \kappa \frac{E}{1 - \mu^2} \frac{1}{\sqrt{S}} \quad (1.4)$$

式中 μ ——泊松比；

κ ——一个系数，取决于振动平板结构。对于正方形和圆形平板来说，它分别等于 1.06 和 1.13。

取系统内的所有作用力之和等于零，得到一个波动微分方程，它决定着变频率作用下的大地运动状态

$$Ml'' + \eta l' + ClS = F_0 \sin \omega t \quad (1.5)$$

将式 (1.5) 除以 M 并变为标准形式：

$$l'' + 2hl' + n^2 l = (F_0/M) \sin \omega t \quad (1.6)$$

式中 $2h = \eta/M$, $n^2 = CIS/M$ ——平板—大地系统的振动阻尼和固有频率。

根据式 (1.6), 振动器—大地系统将完成强制性振动和固有振动。固有振动快速衰减, 而所加荷载的作用时间相当长 ($t < 5$ 秒), 所以, 可以认为: 振动器—大地系统的状态主要是强制性振动。这时, 方程 (1.6) 的解为:

$$l = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.7)$$

式中 A 和 φ ——分别为振动振幅以及力和位移之间的相位移。

A 和 φ 的值由下列关系式确定:

$$A = F_0 / [M \sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}], \quad (1.8)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 2h\omega / (n^2 - \omega^2)$$

结合 (1.8) 解方程 (1.6), 可得:

$$l = \frac{F_0}{M \sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}} \times$$

$$\times \sin\left(\omega t + \arctg \frac{2h\omega}{n^2 - \omega^2}\right) \quad (1.9)$$

由式 (1.9) 可得: 在周期性力的作用下, 平板—大地系统作简谐振动, 其频率和振幅由外部荷载的参数及大地物性决定。当荷载的频率有变化时, 系统中可能出现谐振现象 (当 $\omega_0 = n$ 时)。这时, 平板—大地的振动振幅取决于阻尼 h 并且可能非常大。于是, 可控震源—大地系统就成为一个谐振系统, 其固有频率既可由振动激发点的岩石物理特性来确定, 也可由振动器的参数来确定。可控震源的工作经验表明, 实际上在 25~30Hz 的范围内到处都能观测到谐振。系统的振幅特性与岩石结构和成分有一定关系。并且在可控震源平板附近测得的振幅—频率特征曲线也具有复杂形态, 在上述频带内清楚地显示出谐振 (图 1)。许