

• 采集技术 •

双能量双通道地震采集技术

朱德兵 *

(中南大学信息物理工程学院,湖南长沙 410083)

朱德兵. 双能量双通道地震采集技术. 石油地球物理勘探, 2010, 45(4):473~477

摘要 地震勘探震源激励的地震波具有初始频带特征,该信号经过地层介质扩散吸收、检波器接地耦合、敏感元件的转换、后置模拟信号调理以及模数转换等环节的再造,最后形成地震仪实际记录的数字信号,该记录信号能量主要集中在低主频频带上。双能量双通道采集技术基于一次震源激励,同时在一个坐标点获得高、低两个主频频带的地震记录,充分利用包括检波器的灵敏度、动态范围以及后续模拟电路和数字电路上元器件的动态范围。在低频通道采用适当的增益和信号调理电路获得低频宽频带记录,在高频通道通过高频检波器或高通滤波器以及高频补偿电路,获得以高频为主频的宽频带记录。通过该技术可以保证传统地震勘探中低主频信号的完整采集,地震装备的极限勘探深度也能得到最大限度的增大,两个不同频带能量信号可以相互对比和参考,有利于提高地震资料的处理、解释精度。

关键词 地震勘探 有效频带 双能量双通道采集 信号再造

1 引言

地震数据采集是利用检波器获得坐标点上介质表面振动的模拟电信号,再通过放大、滤波等信号调理电路进入数字信号采集系统,形成振动随时间变化的数字记录。一个采集点上安装一个检波器(组合),检波器具有频率带通选择性,通带外的信号被压制。检波器检测到的信号能量主要是包含面波在内的低频响应成分,在有效频带上其能量占绝对优势。基于模拟信号的前置放大增益考虑到主频信号溢出可能,倍数不能太大。此外,与之相适应的滤波、降噪等信号调理电路也主要针对频率较低的主频带信号。

假设检波器检测到的振动信号能够包含所有的频率成分,而且地震仪也能够不失真地记录所有信号并数字化,从理论上说,基于数字滤波等后期处理,解释工作也能够得到所需的高频带信号,利于高分辨率地震资料处理、解释。但事实上各种数字滤波的算子不可能无限长,且总存在一些“频率泄漏”^[1],从而导致数字滤波后的信号有时不尽人意。实际情况是,作为震源激发产生的地震信号,

在低频段的主频信号与非主频的有用高频信号之间常存在几倍乃至 1~2 个数量级上的振幅差异^[2]。地震波经介质结构扩散、反射、吸收等作用后传递至检波器所在坐标点,在检波器检测到的信号中,低主频信号与相对高频信号之间的能量差异将进一步扩大,甚至可以达到几个数量级的差异。由于自身的幅度差异,作为高频信号采集的出发点,采用基于低频强信号的前置增益或信号调理电路,使用同样的地震仪通道进行高频高分辨率地震数据采集,必然存在硬件动态范围以及小信号调理机制的局限。

综上所述,基于当前地震仪采集系统的硬件局限,本文提出了单个坐标记录点地震数据的双能量双通道地震采集技术,震源一次激励,可同时完成两个频带能量的数字信号采集,其中高频宽带信号可直接用于高分辨率地震资料解释。

2 激励信号的频带特征及信号再造

作为地震仪所获取的数字化记录,决定信号品质的因素很多,包括信号能量大小、频谱特性等,按照信号的传递次序,主要包括如下几个方面:①激励

* 湖南省长沙市中南大学信息物理工程学院,410083

本文于 2009 年 11 月 30 日收到。

源的强度和频谱特征;②地震信号传播过程中各种运动学、动力学因素导致的衰减、吸收以及频谱改变;③检波器与地表耦合特性;④检波器的灵敏度、动态范围及频率响应特性;⑤与检波器采集模拟信号相关的信号调理电路特性,包括元器件的动态范围和频带特性;⑥数字化电路特性,包括采样率和元器件动态范围、频带特性等。

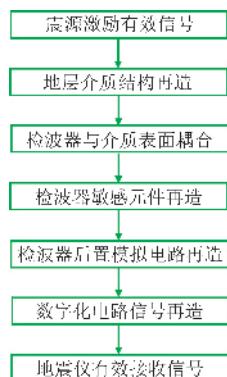


图 1 地震信号的再造过程

将震源激励后能量高于激发前背景噪声的信号均称为有效激励信号。有效激励信号包括经过模拟、数字信号处理后能量高于背景噪声的信号,如通过多次震源激励垂直叠加所获得的振动信号,在垂直叠加前其能量低于噪声。有效激励信号经过一系列信号再造环节(图 1),其能量、频谱特征将发生变化,并与地震仪器记录的信号特征有很大差别。对于地震采集记录或数据,将震源激发前地震仪记录的地表振动统称为背景噪声^[3]。类比有效激励信号定义,将震源激发后地震仪接收到的能量或幅度高于背景噪声的信号统称为有效接收信号。

2.1 震源激励信号频带特征

不论采用何种震源,震源激励后向四周传递的地震波有其固有的频率分布特征。文献[2]指出,高于有限背景噪声的能量在一个很宽的频带范围内分布,作为震源激励振动来说,这部分能量是有效激励信号中的主要信号(这里不涉及受限于检波器和地震仪性能而可能漏采的高频有效信号)。可控震源在扫描频带范围内信号能量均匀分布;非可控震源信号能量则分布极不均匀,可用固有主频和有效频带宽度来描述。作为主频带之外的非主频能量一般很小,而且分布极不均匀。其突出表现是,约为两倍主频频率的非主频高频成分能量与主频能量可达多倍乃至数量级上的差异,但这些高频能量是实际存

在的有效激励信号。下文通过分析炸药爆炸和锤击震源两种非可控震源的振动信号特性对有效激励信号的频带特征作出说明。

图 2 为不同药量炸药震源的频谱,由图中可见:在给定的药量范围内,大药量的激发能量(图 2a)要远远高于小药量(图 2b),而且前者频率成分丰富,高频能量也很强;小药量激发则避开了 50 Hz 以内的低频能量(图 2b),且可以获得较高的主频频率,从而提高分辨率。但小药量激发主频能量低,其勘探深度受到影响。在采用单道全频带采集时,不能将大药量激发时有效的高频成分(图 2a 中所示次主频带)能量体现出来。锤击震源是浅层地震勘探常用的一种震源,图 3 为不同重量锤击震源的频谱,由图中可见,不同重量锤击震源激励主频带、主频带和次主频带之间的能量不同,采用同样的增益进行调理,不同频带信号的信噪比存在较大差异。如用小锤激励时(图 3b),有效激励能量中的高频成分(350~450 Hz)可能在浅层地震勘探中发挥作用,并成为有效接收信号中的一部分,如果采用单道全频带接收,则不能有效突出高频能量。

图 2、图 3 说明,浅层地震仪采集的有效信号频带范围很宽,应尽可能由地震勘探系统成功记录。但高、低频带之间的幅度差异很大,以同样的信噪标准,同时接收从低频到高频的有效激励信号对检波器和地震记录仪来说有难度。从震源有效激励的观点来看,炸药震源的有效频率可以扩展到 150~200 Hz 及以上,锤击震源的有效频率可以扩展到

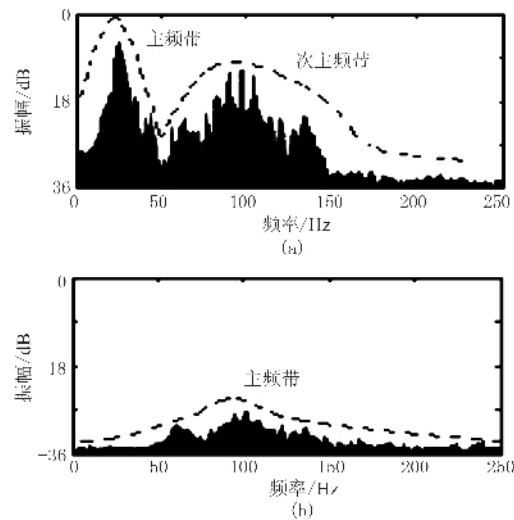
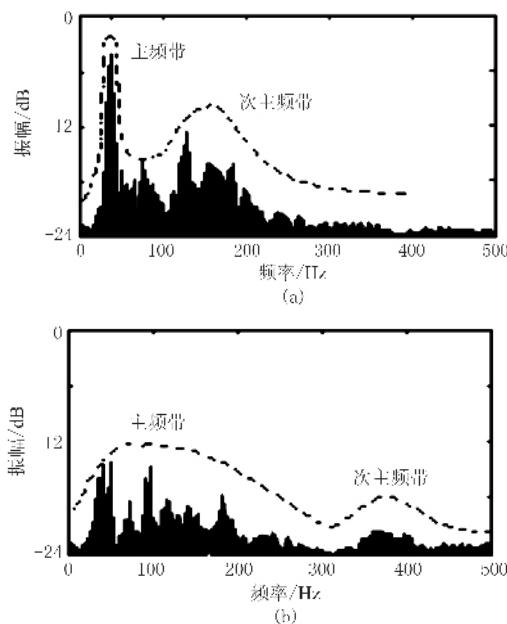


图 2 不同药量炸药震源的频谱^[2]

(a) 150g; (b) 7.5g

图 3 不同重量锤击震源的频谱^[2]

(a) 8.16kg; (b) 2.72kg

300~400Hz 及以上,但该频段内的能量与主频能量相比,就有效激励信号来说,已有了较大差异。

2.2 地下介质结构对震源信号的改造

地下介质结构对在其中传播的地震波通过波前扩散、吸收衰减、散射、转换等实现改造,其规律是:高频成分吸收衰减快、有效传播距离短,低频成分则吸收衰减慢、传播距离远。因此,震源激励的有效信号在改造过程中,将经过一种近似低通滤波的作用。到达接收空间某点的信号与震源激励的有效信号相比,所有能量都存在耗散,即低频能量衰减小,部分高频能量几近耗尽,造成低频和高频之间的能量差异进一步扩大。作为高于背景噪声能量的有效接收信号,其低频主频与其倍频程高频的相对能量一般也存在数量级上的差异。

3 检波器及后置模拟电路对记录信号的影响

地下介质结构对地震激励有效信号的作用无法人为改变。对实际到达某坐标点的信号,尽管高、低频信号之间的差异较大,但只要是成功返回地表的振动信号,在理论上都要求被保真接收。从检波器这一环节来看,检波器接地耦合以及检波器的灵敏度、频响特性、动态范围对地震记录有效信号的影响至关重要,且可以最大限度地人为调控。

3.1 检波器的频响特性

检波器具有频率选择和带通特性,并通过检波器自身的频响特征来体现。从物理机制上讲,当前地震勘探中广泛使用的检波器有磁电式速度检波器、涡流检波器、压电加速度检波器等几种主要类型。其中磁电式速度检波器应用较为普遍,其自然频率在 4~100Hz 范围内有多个档位。国内检波器高频假频一般约为 300Hz,国外超级检波器假频小于 300Hz,大多为 200Hz 左右^[4]。因此传统速度检波器有效频带范围主要集中在相对低频频段。涡流检波器是一款加速度地震检波器,其最大特点是,在速度检波器的高频段,其灵敏度随着频率的增加而提高,工作频带与一般速度传感器相当。理论分析和测试结果表明,其高频响应存在非线性^[5],有效频带的上限约为 200Hz。压电加速度检波器能够实现真正的宽频带,在 500Hz 左右也能实现良好的线性响应,具有较好的相频特性,其动态范围一般约为 100dB,已在油气地震勘探中得到应用^[6]。在提高灵敏度的基础上,通过涡流检波器高频补偿来实现高频能量幅度提升和压制低频干扰也能取得较好的应用效果^[7]。综上所述,检波器的频响特性直接影响有效接收信号的频率特性。

选用检波器,应该首先确认地表振动的有效信号特征,只要是高于背景噪声的信号,应该不论其频率高低,以能得到完整的记录最为理想。从检波器的种类来说,要想通过一种或某个检波器将所有到达记录点的信号都记录下来有难度,可能需要分别用两个不同频响特性的检波器分别记录低主频频带信号和高频频带信号。用压电加速度检波器可以解决宽频带问题,但其动态范围可能成为一个要考虑的因素。

3.2 检波器接地耦合

不论使用哪种检波器,其与介质表面密切接触的耦合刚度直接影响到检波器频响特性及灵敏度,同时也关系到检波器对各种噪声干扰信号的抑制程度^[1]。检波器接地耦合差直接影响检波器对地表振动的响应,这种响应在频率特性上一般是非线性的,这就使得各个频率的信号都受到不同程度的削弱,尤其是高频信号得到较大的压制^[8]。通过组合检波器以及加长检波器尾锥,对检测信号有一定程度的改变,但却能够达到较好的应用效果。检波器接地耦合特性直接影响有效接收信号的特征,从检波器

耦合的角度来看,能够提高检波器的高频响应性能,也应该是高频带信号能够完美体现其高分辨率的必要条件之一。

3.3 检波器的灵敏度

各类检波器的基本原理决定了检波器的灵敏度特性,而且对于不同频带信号,其灵敏度特征又会有差别。目前对于独立的检波器,内装 IC 加速度检波器的灵敏度可以在较大范围提高,但由于其动态范围的限制,较高的灵敏度将使其极限响应幅度减小。也就是说,相对高的灵敏度和高频响应特性有利于地表振动的高频有效信号被检波器接收;但由于检波器灵敏度的提高,噪声信号也同样被检波器灵敏地检测到,因此噪声的监测和压制问题也凸显出来,这就出现了如何有效压制高频宽频带信号噪声的问题。从检波器灵敏度来说,虽然照顾了高能量的低主频频率信号,但实际存在的有效高主频信号也会被忽略。

3.4 检波器及后置模拟电路的综合影响

震源有效激励的信号通过“艰难”的旅程回到地表,尽管经过再造后,高频能量被大大削弱乃至湮没,但其有效频带范围依然很宽,有效频带信息是否能够转化为地震仪记录的有效信号是检波器及后置模拟电路所决定的。最理想的结果是地表振动的有效信号能被检波器完全接收并有效地转换成数字信号。事实情况是,由于检波器的接入以及后续模拟、数字电路的引入,单道信号地震记录有如下局限:①检波器与模拟电路的匹配问题;②后置模拟信号调理以及数字信号转换电路动态范围和频带范围有限;③后置模拟信号的调理对高低频能量相差悬殊的有效信号没有区别对待;④后置模拟信号的调理对噪声信号的压制没有区别对待。由于上述局限,单道地震记录要么基于低频主频,采用高灵敏度检波器,用较小的增益得到低主频宽频带炮集记录,要么采用较大的增益、高的低截频率或高频补偿获得高主频宽频带炮集记录。考虑到现有元器件的频响特性和动态范围,目前通过一条通道难以同时实现。

对于有效接收信号和有效激励信号的区别本文不做研究,借用文献[9]中的资料来说明相对高频有效接收信号的可靠性。文献[9]基于煤田地震勘探,有效频带为 300~400Hz,视主频为 150~200Hz,其中的高频能量近似为视主频的倍频,该频率范围恐

怕一般的检波器也难以保真记录,表明有效接收高主频宽带信号确实有挖掘潜力,可以在地震勘探尤其是浅层地震勘探中应用。

4 薄层分辨能力与双能量双通道地震数据采集

薄层分辨能力是考察地震勘探高分辨率的一个标志,不论是基于高频检波器还是模拟信号高通滤波,在采用了模拟信号高频补偿或大的前置增益后,都获得了较好的高分辨率地震记录^[9~11]。其中基于高的低截频率的模拟信号调理必然会直接影响到记录信号的相频和幅频特性,这些响应特性与相关的调理电路直接关联,必要时可以通过理论校正来解决。

4.1 雷克子波特征影响薄层分辨能力

为了使地震勘探资料对薄层具有较高的分辨能力,要求检波器检测信号为宽频带。严格地说,需要以高频为主的宽频带信号。如图 4 所示,以雷克子波为例,主频分别为 2.5,5 和 10Hz(图 4b),其相应的雷克子波视波长呈近等比例缩减变化(图 4a)。显然,高主频的宽频带信号将具有更高的薄层分辨能力。从图中可以看出,所谓的高分辨率宽频带应该是以高频为主频的宽频带。满足这一要求需要震源最大限度地提供高频有效激励信号,需要检波器与地表最佳耦合,需要检波器自身较好的频带特性和高灵敏度,需要模拟电路和数字化电路具有优越的高频响应性能和较小的系统噪声。

实现双能量采集的难处是如何划分频带,以及根据信号频带特性设计压制噪声的模拟和数字化电

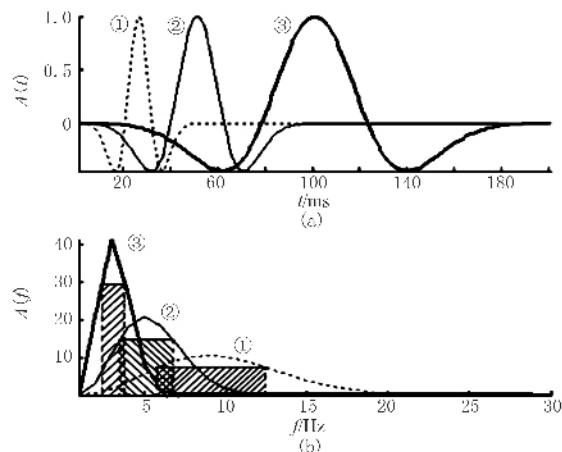


图 4 不同主频雷克子波(a)及其幅频特性(b)

①,②,③分别代表主频 10,5,2.5Hz 雷克子波

路。基于垂直叠加来提高信噪比的方法可以在浅层地震勘探中应用, 其好处是能真正提高有效接收信号的信噪比, 当然也提高了高频信号的信噪比。

4.2 单坐标点双能量采集技术

双能量双通道采集技术基于一次震源激励, 同时在一个坐标点获得高、低两个主频频带的地震记录, 充分利用包括检波器的灵敏度、动态范围以及后续模拟电路和数字电路上元器件的动态范围。在低频通道采用适当的增益和信号调理电路获得低频宽频带记录; 在高频通道通过高频检波器或高通滤波器以及高频补偿电路、高频信号的信号调理电路获得以高频为主频的宽频带记录。

由高、低两个主频的检波器或检波器组构成双能量双检检波器, 可以通过单体检波器(如压电加速度检波器)或两个独立的检波器实现这类双检检波器。对于理想宽频带检波器, 在检波器模拟信号输出后, 采用分频方式, 使两个频带信号分别进入各自独立的调理通道进行调理。由于检波器灵敏度的增大, 必然需要引入大动态范围的信号处理硬件, 通过双频频带的通道处理, 低频带信号和高频带信号可以在不同的采集通道上各自享用高灵敏度检波器和相应通道内元器件的动态范围。前置增益提高后, 硬件系统产生的白噪声相对变小, 从而提高了有效高频信号的信噪比。通过相关的小信号调理补偿以及非有效频带信号压制、滤波处理, 又可以将目标频带有效信号信噪比进一步增大。主要通过模拟器件的选用采集到高频带地震记录, 使其信号与后期数字滤波信号相比, 在相位特征上具有明显的优势, 自然会在薄层分辨方面得到更好体现。由于同时保留了低主频频带信号, 地震装备的极限勘探深度也能得到最大限度地增大。

双能量地震数据采集, 需要在地震仪设计时采用双通道技术, 分别针对不同频带、不同能量特征的信号, 可以在原有地震仪通道上增加一个高频道数据采集通道。高频道数据采集通道与原有地震采集通道相比, 主要区别在于模拟信号调理部分, 可以通过程控开关实现必要的参数调整。对于数字遥测检波器, 相应的模拟电路或数字电路在检波器内部实现。高频带模拟通道主要有如下几个特点: ①充分发挥检波器的灵敏度和动态范围; ②充分考虑检波器的接地耦合刚度; ③检波器具有高频带响应或基

于高灵敏度的高频补偿功能; ④设置高通滤波器, 考虑其倍频程; ⑤充分利用硬件动态范围, 采用大增益; ⑥有高频补偿电路和针对高频带信号调理电路。

5 结束语

地震激励有效信号被再造后, 可用的高频能量与低主频能量差异被拉大, 现有的单道地震采集系统, 包括检波器、模拟电路、数字电路有必要对高、低两个宽频带信号分别对待。双能量双通道采集技术基于一次震源激励, 同时在一个坐标点获得高、低两个主频频带的地震记录。通过该技术可以保证传统地震勘探中低主频信号的完整采集, 地震装备的极限勘探深度也能得到最大限度地增大。获得的两个不同频带能量信号可以相互对比和参考, 提高地震资料的处理、解释精度。理论上认为, 通过高频检波器获取的高频带信号记录有压制表面波等干扰以及在一定勘探深度具有高分辨率优势。由于条件限制, 笔者未能对特定地震记录低主频或“全频道”采集记录经过高频带数字滤波后的结果进行完整比对和分析。

参 考 文 献

- [1] 李庆忠. 地震高分辨率勘探中的误区和对策. 石油地球物理勘探, 1997, 32(6): 751~783
- [2] 潘纪顺, 刘保金, 朱金芳等. 城市活断层高分辨率地震勘探震源对比试验研究. 地震地质, 2002, 24(4): 524~532
- [3] 朱德兵. 广义地球物理背景与异常识别. 桂林工学院学报, 2002, 22(3): 359~364
- [4] 付清锋, 周明. 地震检波器的进展. 石油仪器, 2000, 14(2): 25~27
- [5] 赵永红, 谢石林, 胡时岳. 涡流检波器动特性的研究. 西安交通大学学报, 2003, 37(3): 260~264
- [6] 谭绍泉, 余钦范, 徐锦玺等. 新型陆用压电检波器在滩浅海地区地震勘探中的应用及效果. 石油物探, 2004, 43(2): 106~111
- [7] 赵殿栋, 郑泽继, 吕公河等. 高分辨率地震勘探采集技术. 石油地球物理勘探, 2001, 36(3): 262~271
- [8] 朱德兵, 任青文. 惯性式传感器性能特点与原位测试试验分析. 水利水电科技进展, 2004, 24(5): 29~33
- [9] 霍全明, 汪洋, 赵克荣. 高分辨率地震勘探数据采集及其影响因素分析. 煤炭学报, 2001, 26(2): 117~121
- [10] 陈道宏, 姚念江, 许建军. 高分辨率纵波采集方法研究. 石油地球物理勘探, 1999, 34(2): 123~137
- [11] 赵殿栋, 谭绍泉, 徐锦玺等. 地震采集中低截滤波的试验分析. 石油物探, 2001, 40(2): 92~97

(本文编辑:刘勇)