

doi: 10.11720/wtyht.2021.1145

谢兴隆, 马雪梅, 龙慧, 等. 基于可控震源的中浅部地震勘探参数选择[J]. 物探与化探, 2021, 45(4): 1004–1013. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1145>

Xie X L, Ma X M, Long H, et al. The parameter selection of middle and shallow seismic exploration based on vibrator[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(4): 1004–1013. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1145>

基于可控震源的中浅部地震勘探参数选择

谢兴隆, 马雪梅, 龙慧, 李秋辰, 郭淑君, 程正璞

(中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘 要: 可控震源已经广泛应用在石油、煤田等地震勘探工作中, 相应的技术手段也较为成熟, 但涉及高频检波器采集的较少, 尤其是使用可控震源进行中浅部地震勘探时参数的选择缺乏参考依据。为了研究如何在中浅部地震勘探中获取高品质数据, 在雄安地区开展了一系列“可控震源激发、高频检波器接收”试验。本文在大量试验数据的基础上, 采用原始单炮定性分析与频谱定量分析相结合的方式, 从原始数据信噪比与分辨率的角度出发, 系统论述了可控震源震动次数、扫描长度、初始频率、终止频率、驱动幅度、斜坡长度以及检波器自然频率等参数的选择对数据质量的影响; 明确了所涉及参数的选择要点及依据, 提出了高截止频率的概念; 最后, 总结了中浅部地震勘探参数选择的策略, 对以后中浅部可控震源地震勘探具有一定的借鉴意义。

关键词: 地震勘探; 可控震源; 激发参数; 高频检波器; 数据采集

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)04-1004-10

0 引言

震源作为地震勘探中的重要组成部分, 在很大程度上影响着勘探质量。目前常用震源分为炸药震源和非炸药震源两大类^[1], 炸药震源存在着安全系数低、破坏性强、有效利用率低等问题, 再加之严格的管控政策, 因此非炸药震源逐渐代替了炸药震源, 尤其是精密主动可控震源近些年得到了较大发展, 已成为国际上地震勘探的重要激发源之一^[2-3]。可控震源通过扫描信号的精确设定可以控制发出信号的频率、相位等参数^[4], 同时还具有施工成本低、安全环保、组织灵活等优点, 在高原冻土、戈壁等众多复杂地区也取得了较好勘探效果^[5-7]。自 20 世纪 90 年代一直持续到现在, 可控震源进入到高效采集阶段, 先后出现了交替扫描、滑动扫描、独立同步扫描、多点同步扫描等高效采集方法^[8-10], 从技术趋势来看, “高效+高保真”是可控震源采集的发展趋

势^[11-12]。

可控震源无论是采集阶段还是处理阶段的技术都较为成熟, 因主要目的是为石油地质服务, 勘探深度较大, 其参数选择也主要围绕着深部目的层进行研究^[5, 7, 12]。随着应用领域的扩展, 可控震源在中浅部勘查也取得了一些成效, 许多文章对可控震源激发参数的选择进行了论述, 取得了一些非常有意义的认识^[13-15]。但在使用可控震源进行参数选择研究时, 涉及的参数还不够全面, 往往忽略了检波器自然频率这一重要参数, 大部分文章中所采用的检波器自然频率为 10 Hz, 涉及高频检波器采集的较少。近年来, 笔者依托中国地质调查项目, 在雄安地区使用可控震源开展了大量中浅部地震勘查工作, 为了探索如何获取高品质地震数据, 对相关参数进行了大量实验, 实验选用自然频率为 40、100 Hz 两种型号的高频检波器进行接收。本文在实验数据的基础上, 系统论述了可控震源叠加次数、扫描长度、初始频率、终止频率、驱动幅度、斜坡长度与检波器型号

收稿日期: 2020-04-10; 修回日期: 2021-01-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFE0201300); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20189630)

第一作者: 谢兴隆 (1989-), 男, 硕士, 从事地球物理勘探与方法研究工作。Email: xxl0306@126.com

通讯作者: 马雪梅 (1990-), 女, 硕士, 主要从事水文地质环境地质调查工作。Email: 247523354@qq.com

等参数的选择对采集数据的影响,发现了可控震源激发、高频检波器接收的规律特点。本文的研究成果有效指导了本区中浅部高精度地震勘探工作,也为其他地区可控源地震勘探的参数选择提供重要参考依据。

1 涉及参数及相关概念

1.1 可控震源激发参数

可控震源的工作原理是在一段时间内连续向地下激发频率不断变化的扫描信号,扫描信号的振幅、频率和时长等参数则是根据勘探需求设计,然后利用相关技术将原始记录变换为类炸药的常规地震记录。常规线性扫描信号是可控震源地震采集常用的扫描方式,它一般是关于时间的正弦函数,数学表达式如下^[16]:

$$S(t) = A(t) \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{f_1 - f_0}{2T} t \right) t \right], \quad (1)$$

式中: t 为时间, A 为信号幅度, f_0 为起始扫描频率, f_1 为终止扫描频率, T 为扫描长度。

为了抑制吉布斯效应,通常在扫描信号的两端加上镶边信号,即斜坡函数,以往主要采用余弦函数,现在主要采用对初始激发能量影响更小的 Blackman 窗函数^[17],数学表达如下:

$$W_t = 0.42 - 0.5 \cos \frac{2\pi t}{T-1} + 0.08 \cos \frac{4\pi t}{T-1}, \quad 0 \leq t \leq T-1. \quad (2)$$

式中: $T-1$ 即为斜坡长度。

可控震源的驱动幅度直接影响震动能量的大小,通俗来讲,驱动幅度可解释为震源出力。总之,可控震源激发参数主要包括叠加次数、扫描长度、初始频率、终止频率、驱动幅度、斜坡长度等参数。

1.2 检波器参数

检波器特性包含动态特性和静态特性,这些特性决定了检波器的品质。衡量检波器性能指标的参数较多,主要包含自然频率、灵敏度、阻尼系数、谐波失真、典型假频、直流电阻等参数^[18]。决定响应特性的主要参数是检波器的自然频率和阻尼比,因此在实际采集中通常需要说明所使用检波器的自然频率。检波器自然频率是检波器自身振动系统的固有频率^[19],数学表达如下:

$$w_0 = \sqrt{k/m}, \quad (3)$$

$$w_d = w_0 \sqrt{1 - \varepsilon^2}, \quad (4)$$

式中: w_0 为无阻尼时的固有频率, m 为系统质量, k

为刚度系数, ε 为检波器阻尼系数, w_d 为有阻尼时的固有频率。

通常在地震勘探中使用的速度检波器在自然频率附近才能线性检测速度,远离自然频率感应的振幅比会随着频率比降低,自然频率为 10 Hz 检波器是地震勘探中最为常用的型号。为了提高高频放大系数,即为了获取更高频率的地震信号,人们又制造了自然频率为 40、60、100 Hz 的高频检波器。

2 试验场地及布置

我们在雄安多个场地进行了参数选择试验,本文以容城南副村南部试验场地为例进行说明。试验场地布置如图 1 所示,试验排列沿田间土路布置,排列共 120 道,道间距 5 m,可控震源位于 1 道激发。整体上,试验场地地表较为平坦,背景噪声较小,72 道上有高压输电线经过,对附近检波器形成了固定的 50 Hz 工业电干扰。

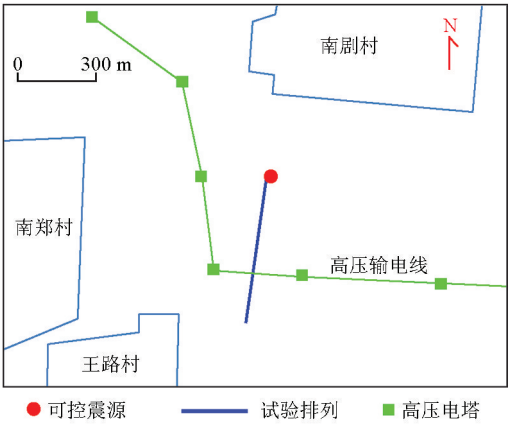


图 1 试验场地布置

Fig.1 The layout of the test field

试验场地被第四系覆盖,厚度在 200 m 以上,岩性由黏土、砂土与细砂、粉细砂、粉砂等组成,不等厚互层,结构松散,对地震波吸收衰减严重,不利于激发宽频带、强能量的地震波。第四系下伏新近系明化镇组,整个新近系深度在 900 m 左右,主要为砂泥岩,内部存在明显波阻抗差异。由于场地位于容城凸起的东缘,基岩埋深较浅,与新近系呈不整合接触关系,两者之间波阻抗差异较大,反射层能量强。基岩为蓟县系雾迷山组岩层,其岩性主要为灰白色、紫红色白云岩、白云质灰岩,内部波阻抗差异小,反射特征不明显。整体上,试验场地的地震地质条件良好,有利于中浅层地震工作的开展。

在本次参数试验中,选用美国 Geometrics 公司

的 StrataVisorNzxp24 型地震仪及其扩展模块 Geode 进行数据采集,选用自然频率为 40、100 Hz 的高精度速度检波器进行数据接收,选择美国 18 t 的 M18-612 型可控震源进行激发。

3 可控震源激发参数分析

本次试验严格按照单一因素变化的原则,对可控震源的震动次数、扫描长度、初始频率、终止频率、驱动幅度、斜坡长度共 6 个激发参数进行了分析。在分析中,除了对原始单炮记录进行定性分析,还采用反射波频谱进行了定量分析。为了突出研究效果,频谱分析时选用的单炮记录均切除了面波、直达波,只保留反射波区域,窗口选择如图 2 所示。

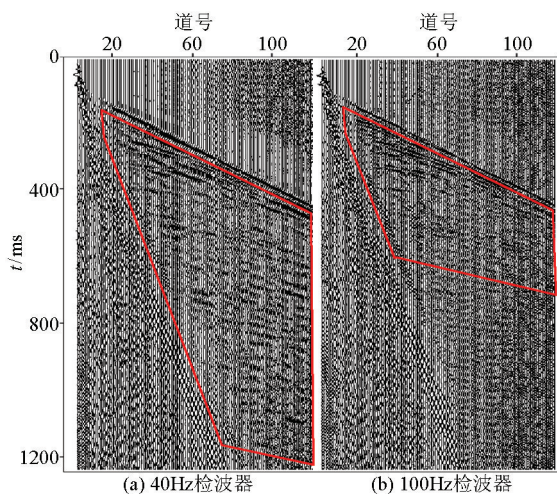


图 2 频谱分析窗口选择示意

Fig.2 The diagram of window selection for spectrum analysis

在参数对比中,规律相似的参数均以 40 Hz 检波器进行说明,部分参数对比为了增强说明效果会适当补充其他对比图例。在频谱分析中,40 Hz 检波器接收的单炮记录选择了 1 200 ms 以内的反射波记录,如图 2a 所示;100 Hz 检波器接收的单炮记录由于深部信噪比极差,为了明确对比效果,只选择了 500 ms 以内的反射波记录,如图 2b 所示。

增加可控震源的台数是加强向地下发射信号能量的常用手段,虽然增加震源台数可以有效提高资料信噪比,但同时也使得反射波主频向低频方向移动,降低分辨率^[13]。由于一台震源已经可以满足本次中浅部地震试验信噪比的要求,因此没有再进行震动台数试验。

3.1 震动次数

震动次数就是指可控源的垂直叠加次数,通过将同一位置激发多次的记录叠加在一起形成单张地

震记录,主要是为了提高信噪比,压制随机干扰,从而提高目的层的反射能量。

固定扫描长度 8 s,驱动幅度 70%,斜坡长度 0.5 s,扫描频率 20~160 Hz,震动次数分别选用 1、2、4、6 次进行对比。试验结果的频谱对比如图 3 所示,由于试验时随机噪声较小,震源出力较大,1 次震动的单炮记录信噪比就较高,随着震动次数的增加,高频段的随机噪声受到压制,但整体改善不大。整体来说,本次试验中 1 次震动即可满足勘探需要,而在实际施工中,每一炮都需要综合考虑随机噪声水平、偏移距大小、固定干扰等因素,适当选择震动次数一般在 1~3 次。

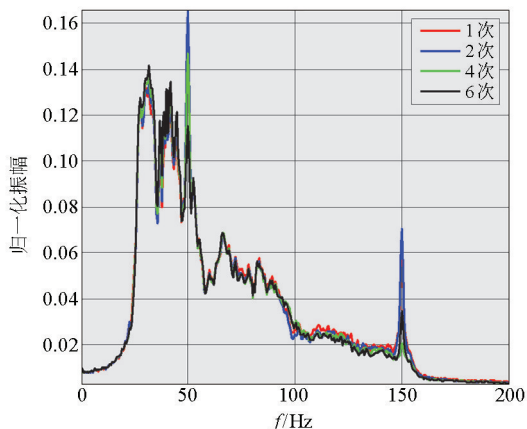


图 3 不同震动次数频谱对比(40 Hz 检波器)

Fig.3 Spectrum comparison of different vibration times

增加震动次数在压制时变噪声时效果较好,主要指的是随机噪声;对于时不变噪声压制效果较差或没有任何压制效果。从压制噪声的角度考虑,增加震动次数远没有增加覆盖次数效果好^[20],再考虑到叠加次数过多可能会改变地震记录相位及降低主频,因此,震动次数应根据实际情况灵活选择,但不宜过高。

3.2 扫描长度

简单地说,可控震源在向下传播扫描信号时的时间即为扫描长度,扫描长度越长,累计的能量也越强,相应的信噪比也会提升。在实际工作中,需要综合考虑目标层的能量需求及施工效率,合理选择扫描长度,另外,还需要避免相关虚像(二次谐波虚像、“多初至”虚像)对单炮记录的影响。

固定震动次数 2 次,驱动幅度 70%,斜坡长度 0.5 s,扫描频率 20~160 Hz,扫描分别选用 4、8、12、16 s 进行对比。试验结果的频谱对比如图 4 所示,当扫描长度在 8 s 以上时,反射波的分辨率没有明显变化,信噪比提升不明显,综合考虑扫描长度选择 8 s。

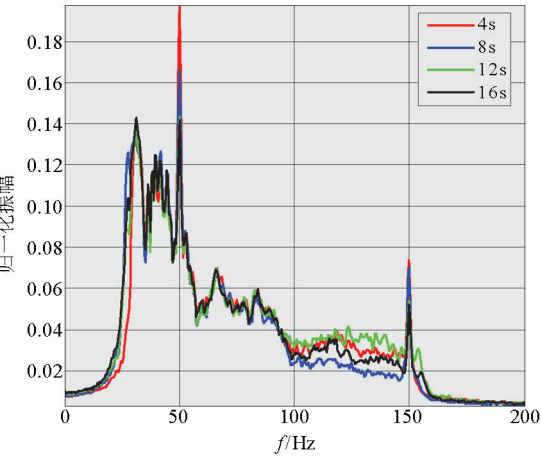


图 4 不同扫描长度频谱对比 (40 Hz 检波器)
Fig.4 Spectrum comparison of different sweep lengths

3.3 驱动幅度

驱动幅度是可控震源一项关键参数,俗称出力。驱动幅度越大,震源给出的扫描信号也越强,但并不是越大越好,过大的驱动幅度容易引起扫描信号的强烈畸变。在实际工作中,还需要考虑到震源底板与地表的耦合情况,尤其是在凹凸不平基岩出露等耦合较差地区,大的驱动幅度容易产生相关假象。因此,在保证地震记录不失真、底板与地面耦合性较好的情况下,可以适当加大震源驱动幅度。

固定震动次数 2 次,扫描长度 8 s,斜坡长度 0.5 s,扫描频率 20~160 Hz,驱动幅度分别选用 30%、50%、70%进行对比。试验结果的频谱对比如图 5 所示,驱动幅度在 50%以上时,记录信噪比随着驱动幅度的增大略微改善,尤其是浅部信息改善效果有限,驱动幅度在 30%时,整体信噪比出现了明显下降。由于试验路段为农田土路,底板与地面耦合性较好,记录无失真现象,故震源驱动幅度选择 70%。

3.4 斜坡扫描长度

斜坡扫描长度分为起始扫描斜坡长度与终止扫描斜坡长度,两者的值可以单独设定,一般情况下两者取相同。扫描信号加了斜坡之后有效抑制了吉布斯效应,但同时也约束了扫描信号的边缘频率。扫描斜坡的选择一般需要考虑起止频率、低频干扰范围与能量,加大斜坡长度可以抑制低频干扰。

固定震动次数 2 次,驱动幅度 70%,扫描长度 8 s,扫描频率 20~160 Hz,斜坡长度分别选择 0.3、0.5、0.8 s 进行对比。试验结果的频谱对比如图 6 所示,斜坡长度 0.5 s 时高频随机干扰明显低于其他两个参数,主要原因为斜坡长度 0.3、0.8 s 采集记录时间晚于斜坡长度 0.5 s 一个小时,后期风速变大导致

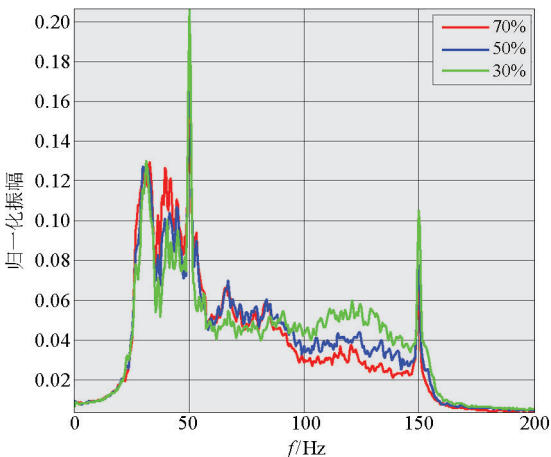


图 5 不同驱动幅度频谱对比 (40 Hz 检波器)
Fig.5 Spectrum comparison of different drive levels

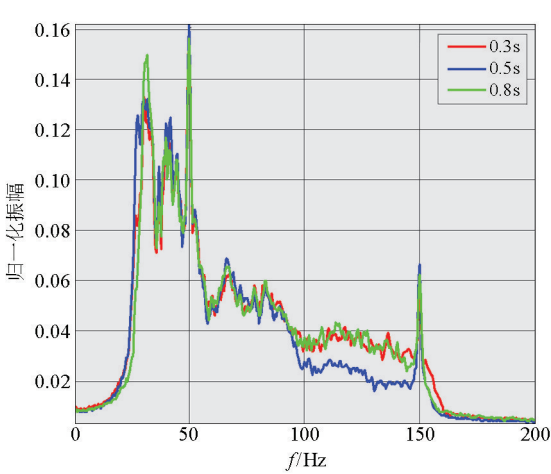


图 6 不同斜坡长度频谱对比 (40 Hz 检波器)
Fig.6 Spectrum comparison of different slope lengths

背景随机噪声增强,与斜坡长度的选择无关。整体来看,斜坡长度在 0.3~0.8 s 之间对地震记录信噪比与分辨率影响都不大,最后选用中间值 0.5 s。

3.5 扫描频率

扫描频率的设计需要综合考虑工区地层的频率响应、干扰波发育情况、检波器性质与采集参数等因素,设计中主要是对扫描最低频率与扫描最高频率这两个参数进行选择。由于目前可控震源绝大多数采用升频扫描进行激发信号,因此所讨论的起始频率指的是扫描最低频率,在本文中起始频率、终止频率分别与扫描最低频率、扫描最高频率一一对应。

3.5.1 起始频率

地震低频信号在识别隐伏目标体、地震反演与成像的精度中有重要作用,因此进行低频地震数据采集势在必行^[21-22]。在油气勘探中常使用低频可控震源作为“两宽一高”的激发方式,有些在采集时扫描最低频率可达 1.5 Hz^[23-24]。总之,在深部地震

勘探中希望采集数据的低频频率越低越好。

固定震动次数 2 次,驱动幅度 70%,斜坡长度 0.5 s,扫描长度 8 s,终止频率 160 Hz,起始频率分别选择 10、15、20、25、30、35 Hz 进行对比。试验结果的单炮记录与频谱对比分别如图 7、图 8 所示,当起始频率超过 20 Hz 时,有效频带宽度随着起始频率的升高而明显减小,分辨率下降,由于缺少低频信息,信噪比也随之降低。起始频率在 15~20 Hz 之间频谱曲线产生了突变,突变主要原因如图 7 中的单炮记录所示,当起始频率为 10、15 Hz 时,单炮记录在 40~70 道出现了明显的低频干扰,而震源的面波

干扰在 20 Hz 以下也较为发育。在雄安地区进行中浅部勘探时,经常发生各类线杆因与震源共振而产生干扰面波的现象,起始频率过低不利于低频干扰波的压制。与石油深部勘探目的不同,起始频率 20 Hz 已经可以满足中浅部勘探需求,因此通过综合考虑,本区可控震源的起始频率设置为 20 Hz。

100 Hz 检波器接收有关起始频率的频谱对比如图 9 所示,其试验参数与 40 Hz 检波器一致。起始频率在 20 Hz 以下也出现了低频干扰,但干扰幅度较小。因此从提高中浅部地震勘探信噪比的角度出发,起始频率的选择还需考虑低频噪声的压制效果。

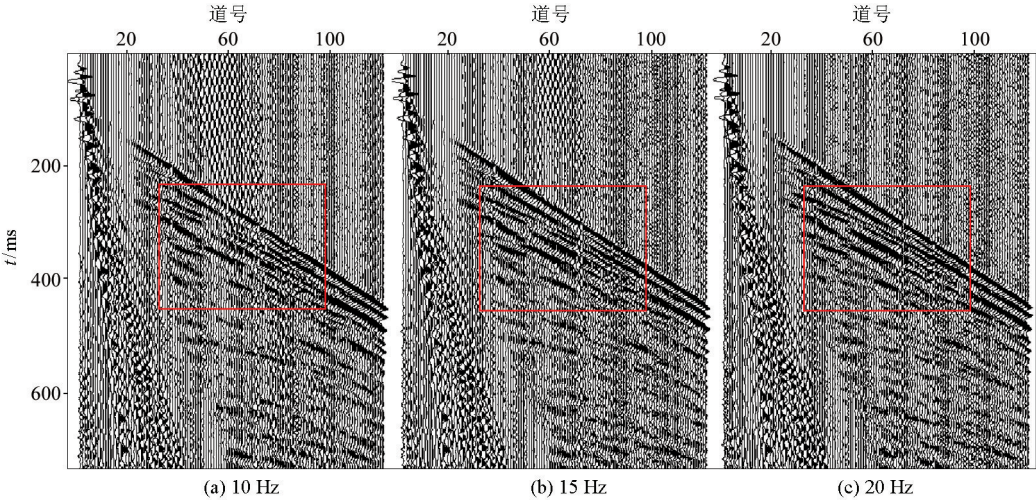


图 7 不同起始频率单炮对比 (40 Hz 检波器)

Fig.7 Single shot record comparison of different starting frequencies

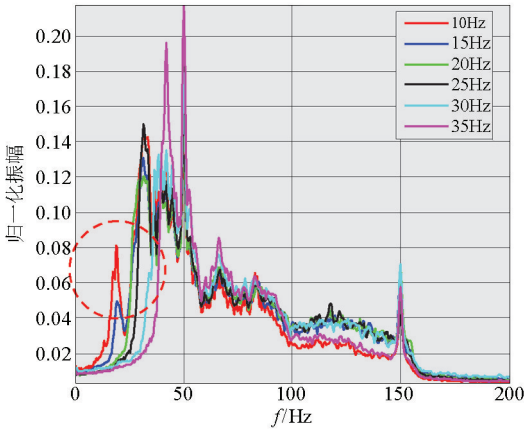


图 8 不同起始频率频谱对比 (40 Hz 检波器)

Fig.8 Spectrum comparison of different starting frequencies

3.5.2 终止频率

固定震动次数 2 次,驱动幅度 70%,斜坡长度 0.5 s,扫描长度 8 s,起始频率 20 Hz,终止频率分别选择 80、90、100、110、140、160、180 Hz 进行对比。在单炮对比记录 (图 10) 的基础上,结合频谱对比图 (图 11) 可以发现,终止频率小于 100 Hz 时,有效频

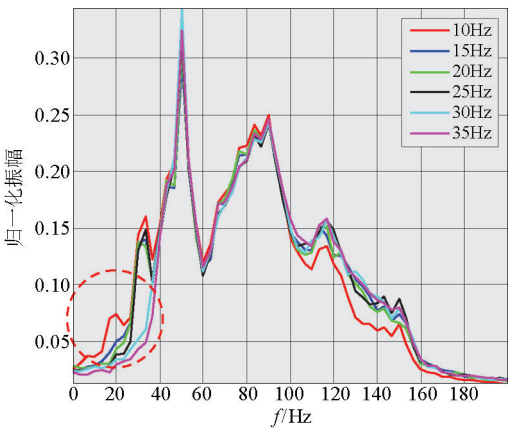


图 9 不同起始频率频谱对比 (100 Hz 检波器)

Fig.9 Spectrum comparison of different starting frequencies

带宽度随着终止频率的升高而升高,分辨率也随之升高;终止频率超过 100 Hz 后有效频带宽度基本无增加,分辨率变化不大,高频随机干扰开始出现。较高的终止频率会降低资料的信噪比,如图 10 所示,终止频率 180 Hz 时高频干扰较为严重,尤其 800~1 000 ms 内的反射波信噪比下降明显。

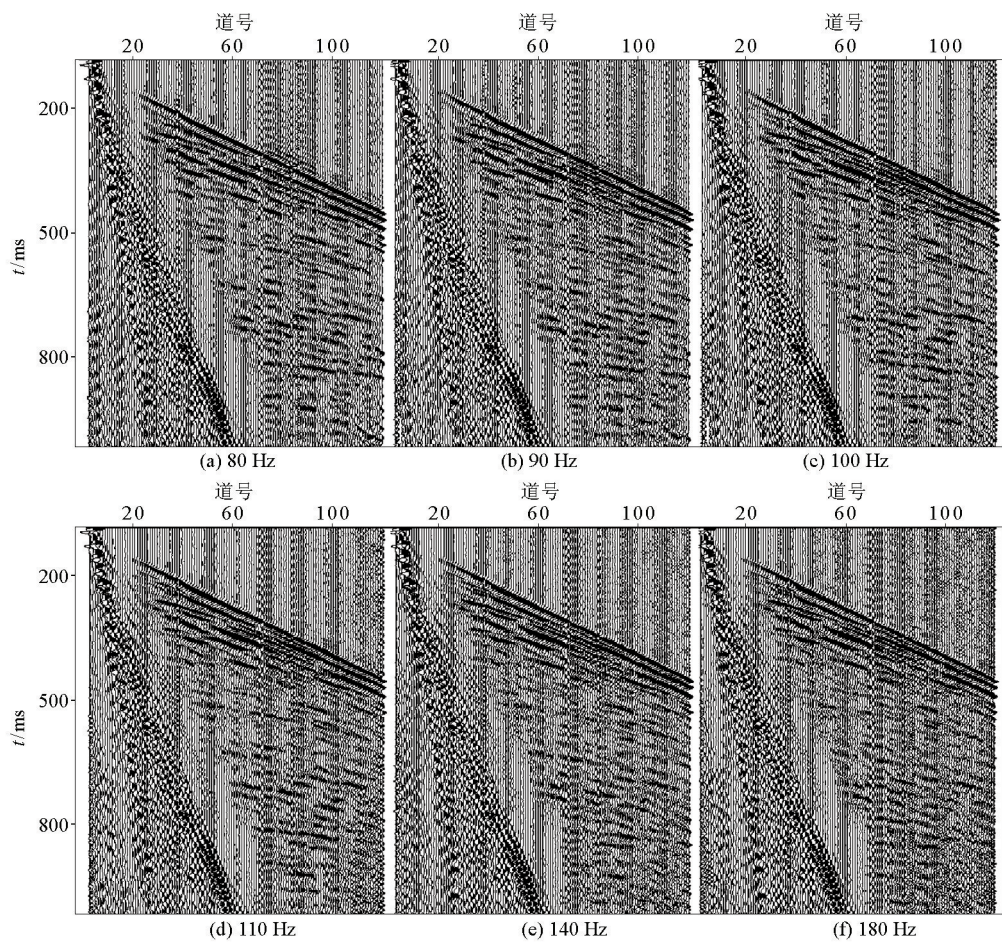


图 10 不同终止频率单炮对比 (40 Hz 检波器)

Fig.10 Single shot record comparison of different ending frequencies

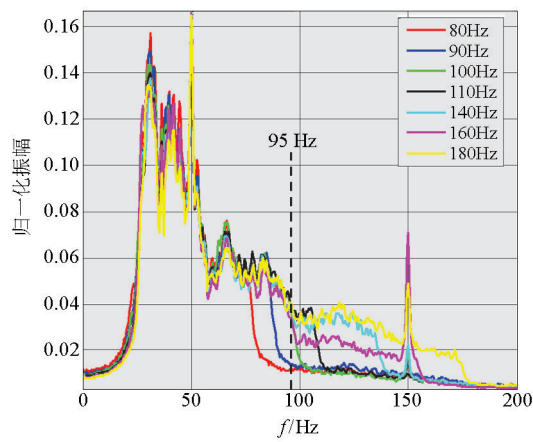


图 11 不同终止频率频谱对比 (40 Hz 检波器)

Fig.11 Spectrum comparison of different ending frequencies

有效频带的高频截止频率随着终止频率的升高会逐渐固定在一个值附近,为了表述方便,把该值称为高截止频率,如图 10 所示,本次试验中 40 Hz 检波器的高截止频率为 95 Hz。为了使得有效频率宽度达到最大,根据试验规律,建议终止频率应至少大于高截止频率 10%。

100 Hz 检波器接收有关终止频率的频谱对比如图 12 所示,其试验参数与 40 Hz 检波器一致。同 40 Hz 检波器规律类似,本次 100 Hz 检波器的高截止频率为 120 Hz。终止频率小于 130 Hz 时,有效频带宽度、分辨率随着终止频率的升高而升高;终止频率超过 130 Hz 后有效频带宽度基本无变化。

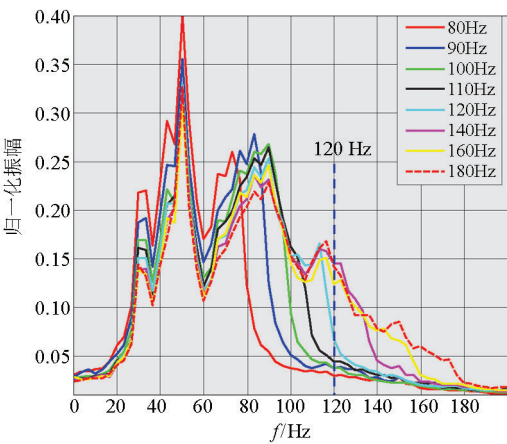


图 12 不同终止频率频谱对比 (100 Hz 检波器)

Fig.12 Spectrum comparison of different ending frequencies

本文所提出的高截止频率主要受检波器的自然频率影响,自然频率越大,高截止频率也越高,当地质背景、目的层信息不同时,相同检波器的高截止频率也会发生变化。高截止频率在以往参数选择中很少涉及,在深部地震勘探中,终止频率一般选择 100 Hz 左右,可以较好地保证 10 Hz 检波器接收信息的有效频带宽度,因此很少出现高截止频率的讨论。而中浅部地震勘探所使用的检波器自然频率较高,因此明确高截止频率对于高品质数据的采集有重要指导作用。

由于大地滤波作用的存在,信号的高频部分对资料信噪比的贡献很小,而同等级的震源能量如果被高频段分掉过多,势必会造成低频段激发能量的减少,从而造成单炮记录信噪比的下降,因此,终止频率不能选择过高。综合各类分析来看,40 Hz 检波器终止频率选择最好大于 120 Hz 而不超过 160 Hz;100 Hz 检波器终止频率选择最好大于 140 Hz 而不超过 180 Hz。本文为了对比研究方便,最终选择 160 Hz 作为终止频率,扫描频率选择 20~160 Hz,在保证信噪比的情况下,两种检波器均可充分发挥自身频带优势。

4 检波器对比

固定震动次数 2 次,驱动幅度 70%,斜坡长度 0.5 s,扫描长度 8 s,扫描频率 20~160 Hz 不变,分别使用 40、100 Hz 及 3 个/串 40 Hz 检波器进行同线同点对比观测。3 个/串 40 Hz 检波器采用间距 0.3 m,方向与测线一致的线性组合方式进行接收。单炮记录对比如图 13 所示,频谱对比如图 14 所示,由于

100 Hz 检波器深部信噪比较差且受工业电干扰严重,为了突出频谱对比效果,频谱分析窗口的选择如图 2b 所示,并对所选区域 50 Hz 工业电干扰进行了压制。

在单炮记录中,40 Hz 组合检波器与 40 Hz 单只检波器的信噪比和分辨率均无明显差别,仅在 72 道附近组合检波器表现出略好的压制工业电干扰的能力,两者的频谱曲线也较为接近,仔细对比可以发现,单只检波器的有效频谱宽度略高一点且高频干扰略大一些。在频谱图中,40 Hz 检波器的优势频率为 45 Hz,有效频带宽度 22~95 Hz;100 Hz 检波器的优势频率为 85 Hz,有效频带宽度 28~130 Hz。100 Hz 检波器的优势频率、有效频带宽度均较大幅度高出 40 Hz 检波器,从单炮记录中也可看出 100 Hz 检波器浅部分辨率非常高,但同时 100 Hz 检波器抗干扰能力较差,尤其是在 72 道附近的工业电干扰,正常信号被严重干扰,500 ms 以下难以看到有效反射波。当震源出力降至 30%时,如图 15 所示,40 Hz 组合检波器表现出了较高的信噪比,即使是最简单的组合方式,其抗干扰能力也远胜过单检波器。

保持检波器对比试验中的激发参数不变,在同一位置采用相同的地震采集方式,分别使用 40、100 Hz 及 3 个/串 40 Hz 检波器进行叠加剖面对比。地震采集方式如下:偏移距 100 m,炮间距 20 m,道间距 5 m,72 道滚动接收,共 13 炮。

叠加剖面如图 16 所示,900 ms 附近绿色层位为新近系底界面,下伏蓟县系雾迷山组岩层。雾迷山组及其下部岩层地震反射规律性差,本次主要针对雾迷山组以上部分的信噪比和分辨率进行讨论。

与单炮记录对比结果类似,40 Hz 组合检波器与

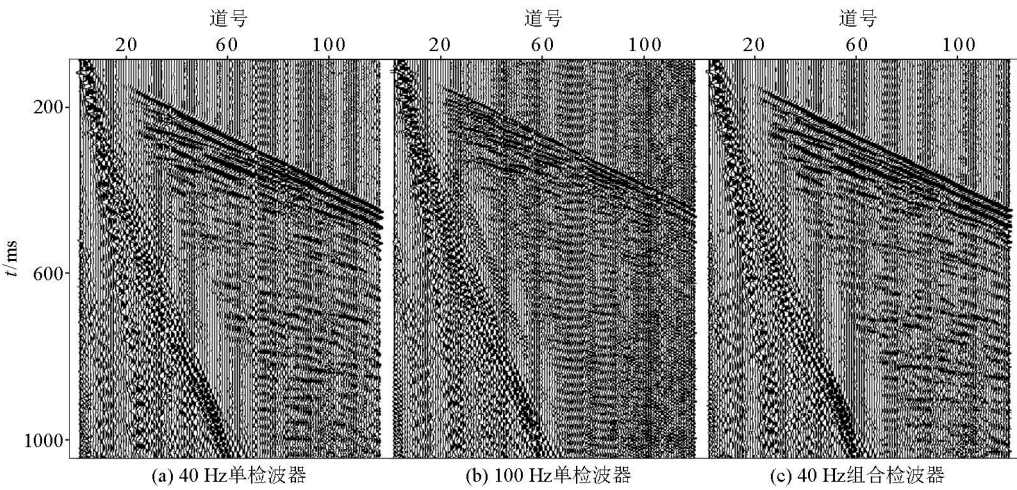


图 13 不同检波器单炮对比

Fig.13 Single shot record comparison of different geophone

单只检波器在叠加剖面上的信噪比和分辨率无明显差异,均可满足本区勘查需求。100 Hz 检波器在分辨率上明显高于其他两者,但 500 ms 以下信噪比明显变差。多次覆盖减少了随机干扰,使得 500 ms 以下开始出现反射轴,但难以满足实际需求。由于大地滤波作用,深部高频信号返回较少,高频检波器对深部低频信号感应振幅较小,即使再增加震源出力,对于提高高频检波器的勘探深度也收效甚微。

综合本次对比结果并结合施工效率,本区中浅部地震勘探选择 40 Hz 单检波器较为适宜,如若进行 500 m 以浅的高精度勘查,则可以使用 100 Hz 检波器。

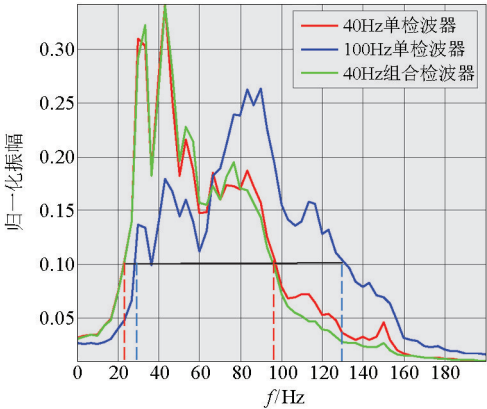


图 14 不同检波器频谱对比

Fig.14 Spectrum comparison of different geophone

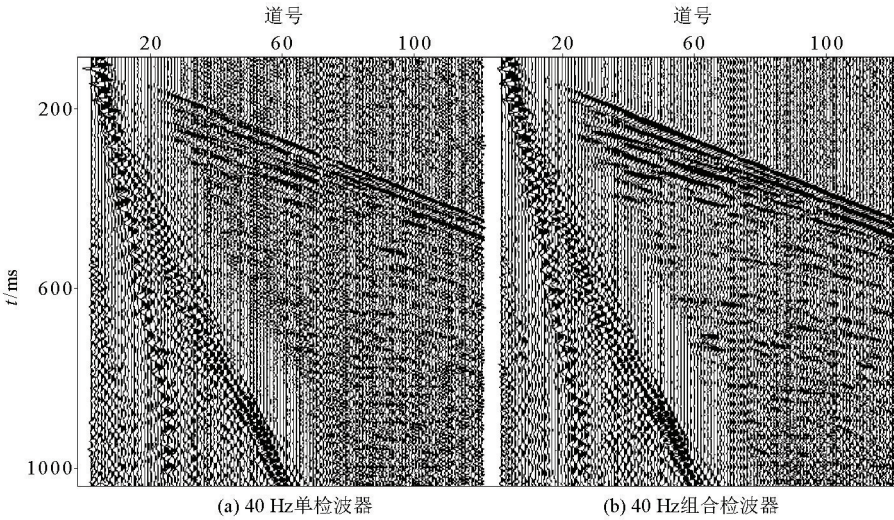


图 15 出力 30%时单只与组合检波器单炮对比

Fig.15 Single shot record comparison of different geophone at vibrator output of 30%

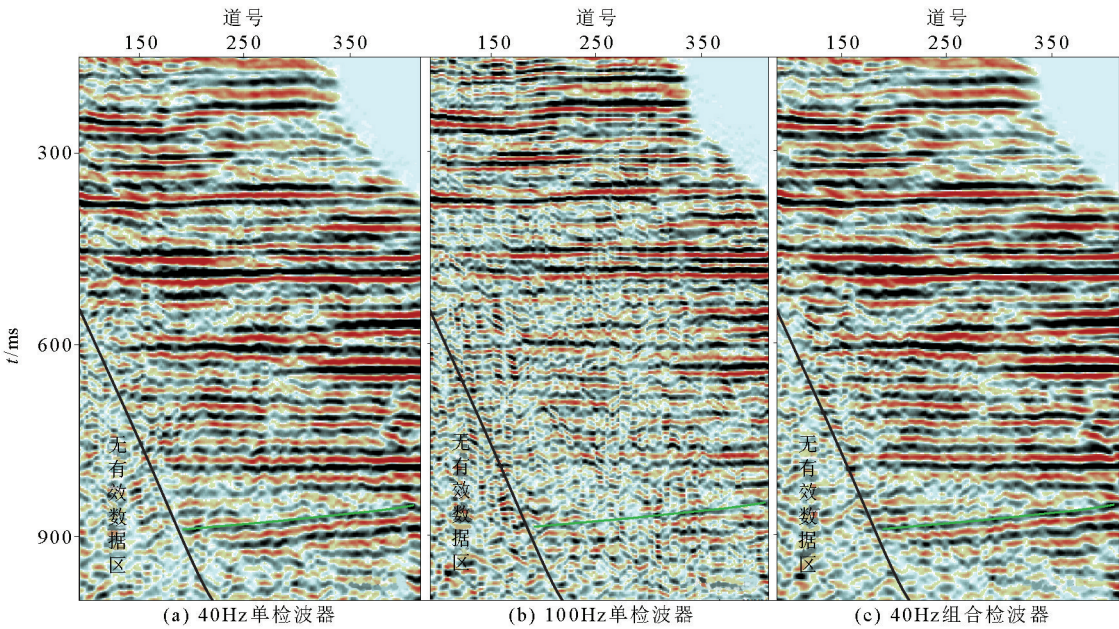


图 16 不同检波器叠加剖面对比

Fig.16 Seismic stack profile comparison of different geophone

5 结论

可控震源激发参数与检波器自然频率的选择直接影响了中浅部地震勘探的分辨率与信噪比,综合可控震源激发参数和检波器自然频率的研究结果,本文的主要认识如下:

1)中浅部地震勘探参数的选择不应盲目借鉴石油物探选择依据,需根据勘探目标并结合施工背景条件进行灵活选择。总体上,震动次数、扫描长度、驱动幅度主要影响地震数据的信噪比,扫描频率、检波器自然频率主要影响地震数据的分辨率,斜坡长度对信噪比与分辨率影响较小。

2)中浅部地震勘探对于起始频率的选择应兼顾低频噪声的压制与勘探目标的要求,不应按照深部地震勘探的习惯直接选择较低频率。终止频率的选择需要充分考虑检波器自然频率的特点,适当的终止频率可以让检波器发挥最大效果,过高的终止频率非但对分辨率的提升无任何意义,反而会降低数据的信噪比。

3)检波器自然频率越高,浅部分辨率越高,但抗干扰能力下降,勘探深度变小。即便是最简单的检波器组合方式对噪声的压制也远胜于单检波器,但在保证信噪比的情况下,中浅部地震勘探仍可使用单检波器达到较好效果。

4)中浅部地震勘探应结合勘探目标,首先保证地震资料的信噪比。在提高信噪比方面,应该首先考虑提高震源的出力及增加覆盖次数,其次增加扫描长度,干扰特别大的地区可以考虑组合检波器,叠加次数根据实际情况灵活选择。

5)本文提出了高截止频率的概念,高截止频率随着检波器的自然频率增大而增大,还与地质背景和目的层信息相关。对于不同的检波器,本文建议终止频率应至少大于高截止频率 10%,在本文试验中,40 Hz 检波器的高截止频率为 95 Hz,100 Hz 检波器的高截止频率为 120 Hz。

参考文献 (References):

[1] 佟训乾,林君,姜弢,等.陆地可控震源发展综述[J].地球物理学进展,2012,27(5):1912-1921.
Tong X Q, Lin J, Jiang T, et al. Summary of development of land vibrator[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 1912-1921.

[2] 倪宇东,王井富,马涛,等.可控震源地震采集技术的进展[J].石油地球物理勘探,2011,46(3):349-356.
Ni Y D, Wang J F, Ma T, et al. Advances in vibroseis acquisition [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(3): 349-356.

[3] 凌云,高军,孙德胜,等.可控震源在地震勘探中的应用前景与问题分析[J].石油物探,2008,47(5):425-438.
Ling Y, Gao J, Sun D S, et al. Analysis of vibroseis in seismic exploration and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(5): 425-438.

[4] 周如义,魏铁,张新峰,等.可控震源高效交替扫描作业技术及应用[J].石油地球物理勘探,2008,43(s2):15-18.
Zhou R Y, Wei T, Zhang X F, et al. High-efficient alternative sweeping technique of vibroseis and application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(s2): 15-18.

[5] 柳兴刚,刘志刚,张健宸,等.低频可控震源在苏丹复杂探区中的应用[J].物探装备,2019,29(2):71-75.
Liu X G, Liu Z G, Zhang J C, et al. Application of low-frequency vibrator in complex exploration area in Sudan[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2019, 29(2): 71-75.

[6] 李桂林,田玉昆,尹吴海,等.西藏高原地区低频可控震源高密度宽线地震采集技术攻关与应用——以尼玛盆地低频可控震源采集为例[J].地球物理学进展,2019,34(1):113-118.
Li G L, Tian Y K, Yi W H, et al. Low-frequency vibroseis with high density wide line seismic acquisition technology research and application in Tibet Plateau: A case study of low-frequency vibroseis [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 113-118.

[7] 陈鹏,于常青,韩建光,等.低频可控震源在哈拉湖冻土区二维地震勘探试验研究[J].地球物理学进展,2018,33(2):562-570.
Chen P, Yu C Q, Han J G, et al. Low-frequency vibroseis experimental study of 2D seismic exploration for Hala lake's permafrost region[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 562-570.

[8] Gibson J, Lin F, Egreteau A, et al. The case for longer sweeps in vibrator acquisition[J]. The Leading Edge, 2010, 29(6): 648-652.

[9] Jean-Jacques, Postel, Julien, et al. V1: Implementation and application of single-vibrator acquisition[J]. The Leading Edge, 2008, 27(5): 604-608.

[10] 曲英铭,李振春,韩文功,等.可控震源高效采集数据特征干扰压制技术[J].石油物探,2016,55(3):395-407.
Qu Y M, Li Z C, Han W G, et al. The elimination technology for special interference in vibroseis efficient acquisition data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(3): 395-407.

[11] 曹务祥,孙哲,刘丽丽.高保真可控震源采集能量分析[J].石油地球物理勘探,2011,46(4):535-537.
Cao W X, Sun Z, Liu L L. Energy analysis of high fidelity vibroseis acquisition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(4): 535-537.

[12] 郭勇.可控震源高效采集噪音特点及其压制方法研究[D].成都:西南石油大学,2016.
Guo Y. Study on noise characteristics and suppression methods of vibroseis efficient acquisition [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

[13] 薛海飞,董守华,陶文朋.可控震源地震勘探中的参数选择[J].物探与化探,2010,34(2):63-68.
Xue H F, Dong S H, Tao W P. Parameter selection in vibroseis seismic exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(2): 63-68.

[14] 武骄阳.浅层地震勘探在城市活断层勘查中的应用技术[D].成都:成都理工大学,2012.
Wu J Y.The Technology of seismic exploration in the exploration of active fault in cities[D].Chengdu:Chengdu University of Technology,2012.

[15] 孙海川.可控震源地震采集技术在 H 探区煤炭勘查中的实验[J].物探与化探,2020,44(1):42-49.
Sun H C.Experimental study of vibroseis seismic acquisition technology on coal exploration in H prospecting area[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(1):42-49.

[16] Tsaig Y,Donoho D L.Extensions of compressed sensing[J].Signal Processing,2006,86(3):549-571.

[17] 周大同,周恒,张慕刚,等.可控震源施工效率估算方法[J].石油地球物理勘探,2008,43(s2):50-54.
Zhou D T,Zhou H,Zhang M G,et al.Evaluating method of vibriseis operation efficiency [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43 (s2):50-54.

[18] 梁运基,李桂林.陆上高分辨率地震勘探检波器性能及参数选择分析[J].石油物探,2005,44(6):640-644.
Liang Y J,Li G L.The geophone property and preferences in land high-resolution seismic survey[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2005,44(6):640-644.

[19] 吕公河.地震勘探检波器原理和特性及有关问题分析[J].石油物探,2009,48(6):531-543.
Lyu G H.Analysis on principles and performance of seismic geophone and relevant issues[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2009,48(6):531-543.

[20] 曹务祥.可控震源技术使用误区分析[J].石油地球物理勘探,2006,41(3):341-345.
Cao W X.Analysis of aspects in mistaken use of vibroseis technique [J].Oil Geophysical Prospecting,2006,41(3):341-345.

[21] 邹志辉,张翊孟,卞爱飞,等.常规检波器低频数据的评价与恢复及其在地震成像中的应用[J].石油地球物理勘探,2016,51(5):841-849.
Zou Z H,Zhang Y M,Bian A F,et al.Low-frequency evaluation and recovery of conventional geophone data and applications in seismic imaging [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51 (5):841-849.

[22] Ziolkowski A,Hanssen P,Gatliff R,et al.Use of low frequencies for sub-basalt imaging[J].Geophysical Prospecting,2010,51(3):169-182.

[23] 汪恩华,赵邦六,王喜双,等.中国石油可控震源高效地震采集技术应用与展望[J].中国石油勘探,2013,18(5):24-34.
Wang E H,Zhao B L,Wang X S,et al.Application and outlook of vibroseis acquisition techniques with high efficiency of CNPC[J]. China Petroleum Exploration,2013,18(5):24-34.

[24] 张丽艳,李昂,裴江云,等.低频可控震源“两宽一高”地震处理技术研究[J].地球物理学进展,2018,33(4):1629-1636.
Zhang L Y,Li A,Pei J Y,et al.Low frequency vibrator "Two-wide One-high" seismic processing technique research [J].Progress in Geophysics,2018,33(4):1629-1636.

The parameter selection of middle and shallow seismic exploration based on vibrator

XIE Xing-Long,MA Xue-Mei, LONG Hui,LI Qiu-Chen, GUO Shu-Jun, CHENG Zheng-Pu

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey,CGS,Baoding 071051,China)

Abstract: The vibrator has been widely used in petroleum, coal field and other seismic exploration, and the corresponding technical means are relatively mature; nevertheless, there is no reference basis for the parameter selection of middle and shallow seismic exploration with vibrator. In order to study how to obtain high quality data in middle and shallow seismic exploration, the authors carried out a series of "vibrator excitation, high frequency geophone reception" experiments in Xiong'an. Based on a large number of experimental data and using qualitative analysis of original single shot and quantitative analysis of frequency spectrum, this paper systematically discusses the influence of the selection of parameters such as vibration number of vibrator, sweep length, starting frequency, ending frequency, drive level, slope length and natural frequency of geophone on data quality. This paper clarifies the key points and basis of parameter selection, puts forward the concept of high cutoff frequency, and summarizes the strategy of parameter selection for middle and shallow seismic exploration, which provides some reference for the use of vibrator in middle and shallow seismic exploration.

Key words: seismic exploration; vibrator; shooting parameters; high frequency geophone; data acquisition

(本文编辑:叶佩)