

陈玉达,林君,邢雪峰.可控震源技术发展与应用[J].石油物探,2020,59(5):666-682

CHEN Yuda, LIN Jun, XING Xuefeng. Development and application of vibroseis technology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(5): 666-682

## 可控震源技术发展与应用

陈玉达<sup>1</sup>, 林君<sup>1,2</sup>, 邢雪峰<sup>1</sup>

(1. 吉林大学地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林长春 130061; 2. 自然资源部地球探测技术及仪器重点实验室, 吉林长春 130061)

**摘要:**地震勘探作为地球物理勘探的重要方法之一,广泛应用于油气勘探等领域。震源作为地震勘探的重要组成部分,直接影响勘探效果。可控震源是一种非破坏性震源,能够激发能量密度低且波形可控的正弦信号。首先阐述了可控震源勘探原理,然后重点介绍了可控震源主要技术发展,以及在陆地、海洋勘探方面的应用现状,最后结合当前地震勘探热点,展望了可控震源的未来发展趋势。可控震源地震勘探需要综合考虑震源自身性能、激发参数、应用场景等因素。可控震源畸变分析与抑制技术可在一定程度上改善可控震源自身性能,提高振动波形质量与基频出力。合理的震源激发参数可有效提高地震资料信噪比,一般需要结合实际施工环境与工程经验设定参数,并无适用所有地质条件的固定参数组合。目前可控震源应用场景多集中于野外勘探,未来可控震源地震勘探将向城市、海洋勘探领域加速拓展,这将促进震源类型的多样化发展。

**关键词:**地震勘探;可控震源;控制技术;畸变分析;液压式;电磁式;精密式

中图分类号:P631

文献标识码:A

文章编号:1000-1441(2020)05-0666-17

DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2020.05.001

## Development and application of vibroseis technology

CHEN Yuda<sup>1</sup>, LIN Jun<sup>1,2</sup>, XING Xuefeng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geo-exploration Instrumentation of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Key Laboratory of Geo-exploration and Instrumentation of Ministry of Natural Resource, Changchun 130061, China)

**Abstract:** Seismic exploration is an important technique in geophysical prospecting. The choice of the seismic source can significantly affect the exploration results. Vibroseis is a kind of non-destructive seismic source, which can produce a sinusoidal signal with low energy density and controllable waveform. Herein, the principles of vibroseis exploration have been summarized, main technical developments have been introduced, and present status of the application of the vibroseis technology in land and ocean exploration have been described. Furthermore, the trends of future development of the vibroseis technology, and the current targets of seismic exploration have been outlined. Source performance, excitation parameters, application scenarios need to be considered for vibroseis exploration. The analysis of the hydraulic vibroseis distortion and use of the system suppression technology can improve the performance of vibroseis, the quality of vibration waveform, and basic frequency force. The excitation parameters of the vibroseis need to be reasonably set based on the actual environment and engineering experience to improve the seismic SNR, as there is no fixed combination of parameters which is suitable for all geological conditions. The vibroseis technology plays a dominant role in field exploration, and its application is being extended to urban and ocean environments.

收稿日期:2019-12-18; 改回日期:2020-05-31。

作者简介:陈玉达(1994—),男,博士在读,主要从事可控震源控制系统及城市勘探技术的研究工作。Email:chenyd19@mails.jlu.edu.cn

通信作者:林君(1954—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事地球探测技术及仪器的研究工作。Email:lin\_jun@jlu.edu.cn

基金项目:吉林大学高层次科技创新团队建设项目(2017TD-16)资助。

This research is financially supported by the Program of Science and Technology Innovative Research Team from Jilin University (Grant No. 2017TD-16).

**Keywords:** seismic exploration, vibroseis, control technology, distortion analysis, hydraulic driving, electromagnetic driving, controlled accurately

地震勘探利用弹性波推断地下构造信息,广泛应用于油气勘探领域<sup>[1]</sup>。人工震源是地震勘探的重要组成部分,用于将其它形式的能量转换为辐射地下的振动信号。根据激发的弹性波类型不同,人工震源可分为冲击型震源和可控震源。冲击型震源通过大能量短时集中释放激发尖锐脉冲,得到的脉冲信号频域信息较为丰富,但其存在能量利用率低,激发波形难以控制等不足。炸药震源、气枪震源和电火花震源均属于冲击型震源。通过释放高压空气形成强大冲击力的气枪震源以及通过电容在电极间高压放电的新型电火花震源主要应用于海洋、内陆湖泊等水域勘探。随着绿色、安全勘探理念的兴起,危险性高、破坏性大的炸药震源被严格限制在特定区域使用。与上述冲击型震源相比,可控震源能够激发能量密度低且波形可控的正弦扫描信号,通过长时间累积效应实现大能量勘探,其工作原理借鉴了雷达和声纳回声测距采用的脉冲压缩(pulse-compressive)技术<sup>[2]</sup>。经过60余年的发展,可控震源理论及技术有了长足的进步,发展出了多种震源类型<sup>[3]</sup>。根据驱动方式的不同,可控震源分为液压式、电磁式以及精密可控震源3种。液压式可控震源是最早研制并应用于野外勘探的可控震源,具有峰值出力大、环境适应性强的特点,在油气勘探等领域发挥着重要作用<sup>[4-5]</sup>;电磁力驱动的可控震源具有轻便、高频的特点,可有效解决浅层高分辨率工程勘探难题<sup>[6]</sup>;伺服电机带动偏心质量块旋转的精密可控震源产生高度可重复性信号,试验结果表明精密可控震源在地下介质长时监测、建筑物探伤等领域应用潜力巨大<sup>[7-8]</sup>。

当前可控震源在地震勘探领域发挥着重要作用,但受其自身结构的非线性和勘探环境限制,在输出振动信号波形质量控制、工作频带等方面存在以下问题,一方面可控震源输出地震波的波形畸变限制了自身基频的出力水平,且在采集系统部分引入了谐波干扰;另一方面勘探深度和分辨率的不断提高,要求可控震源的工作频带向宽频带拓展。低频勘探、城市勘探、海洋勘探等勘探领域也对可控震源提出了新的要求。本文首先概述了可控震源勘探原理,然后重点介绍了可控震源在系统控制、畸变分析与抑制等方面的技术进展,以及其在陆地、海洋勘探领域的应用现状,

最后展望了可控震源的未来发展趋势。

## 1 可控震源勘探原理

可控震源勘探借鉴脉冲压缩技术,即将连续振动信号压缩为尖锐脉冲信号。在实际勘探中,可控震源首先激发具有某种时间函数关系式的正弦扫描信号  $s(t)$ ,并通过振动平板将振动信号传至地下,在地面铺设高灵敏度检波器获取大地反射或折射振动信号,最终对检波器记录信号  $x(t)$  进行相关处理,进而推断并解释地下介质信息。可控震源勘探原理示意如图1所示。

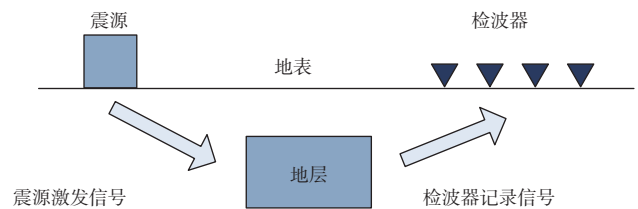


图1 可控震源勘探原理示意

### 1.1 线性扫描信号

与雷达脉冲压缩技术中采用的调频宽脉冲发射信号不同,可控震源激发低频段正弦扫描信号。正弦扫描信号是可控震源实现非破坏性勘探的重要基础,其信号振幅和频带宽度在一定范围内可控。目前,可控震源信号扫描类型主要包括线性扫描、非线性扫描以及伪随机编码扫描<sup>[9-12]</sup>。线性扫描信号具有相对稳定的振幅,信号频率随时间呈线性变化。非线性扫描信号类型包括指数扫描、对数扫描、时间幂函数扫描等,通过增加特定频段扫描持续时间可提高该频段信号的能量和信噪比。非线性扫描多应用于部分频带衰减严重的情况。伪随机编码扫描信号借鉴了通信系统的扫描信号特点以及应用场景,其信号在时间-频域内不呈现某种函数关系,可有效降低谐波干扰,适用于对信号敏感的环境。线性扫描信号在可控震源中应用最为广泛,本文仅对线性扫描信号进行研究,其数学表达式  $s(t)$  为:

$$\begin{cases} s(t) = A \sin 2\pi(f_s + Kt)t & 0 \leq t \leq T_d \\ K = \frac{f_e - f_s}{2T_d} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $A$  为信号振幅； $f_s$  为起始频率； $f_e$  为终止频率； $K$  为扫描频率变化率； $T_d$  为扫描信号持续时间。

图 2 为单位幅值线性升频扫描信号时域和频域波形，频带宽度为 5~40 Hz，扫描时间为 6 s。

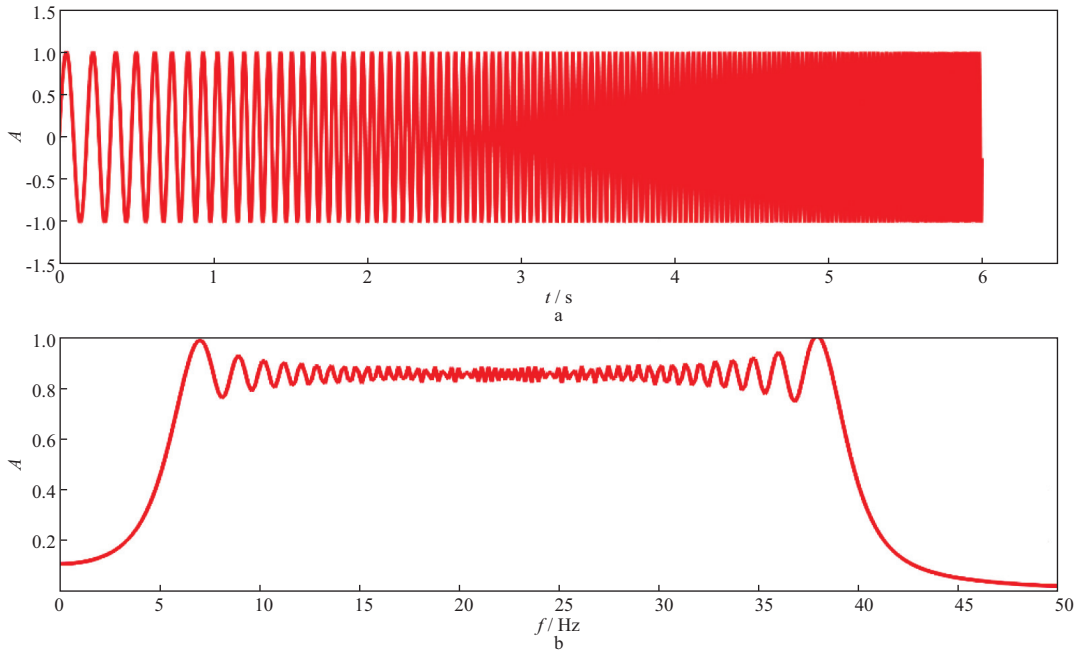


图 2 单位幅值线性升频扫描信号时域(a)和频域(b)波形

### 1.2 相关技术

地震勘探过程可被视为输入输出系统。可控震源激发地震波为系统输入信号  $s(t)$ ，检波器记录信号为系统输出信号  $x(t)$ ，地层特性为该系统的传递函数  $r(t)$ 。 $x(t)$  可表示为  $s(t)$  和  $r(t)$  的卷积：

$$x(t) = s(t) * r(t) \tag{2}$$

式中： $*$  代表卷积； $t$  代表时间。 $x(t)$  通常为  $s(t)$  的延伸和延时，将  $x(t)$  与  $s(t)$  进行互相关处理以获取地震波旅行时、信号极性与能量强度等信息。互相关结果  $y(t)$  表示为：

$$y(t) = x(t) \otimes s(t) \tag{3}$$

式中： $\otimes$  代表相关。将(2)式代入(3)式，可得：

$$y(t) = [s(t) \otimes s(t)] * r(t) \tag{4}$$

式中： $s(t) \otimes s(t)$  表示扫描信号自相关。以线性扫描函数为例，其自相关函数  $\Phi(\tau)$  可近似为：

$$\begin{cases} \Phi(\tau) \approx \frac{A^2 T_d \sin \pi \Delta f \tau}{2 \pi \Delta f \tau} \cos 2\pi \left( f_0 + \frac{\Delta f}{2 T_d} \right) \tau \\ 0 \leq |\tau| \leq T_d \\ f_0 = \frac{f_s + f_e}{2} \end{cases} \tag{5}$$

式中： $A$  为扫描信号振幅； $f_0$  为中心频率； $f_s$  为起始频率； $f_e$  为终止频率； $\Delta f$  为扫描频带宽度， $\Delta f = f_e - f_s$ ； $T_d$  为扫描信号持续时间。

图 3 为频带宽度为 5~40 Hz，扫描时间为 6 s 的单位幅值线性升频扫描信号的自相关波形。可以看出，扫描信号经过自相关后，达到了类似脉冲压缩的效果。

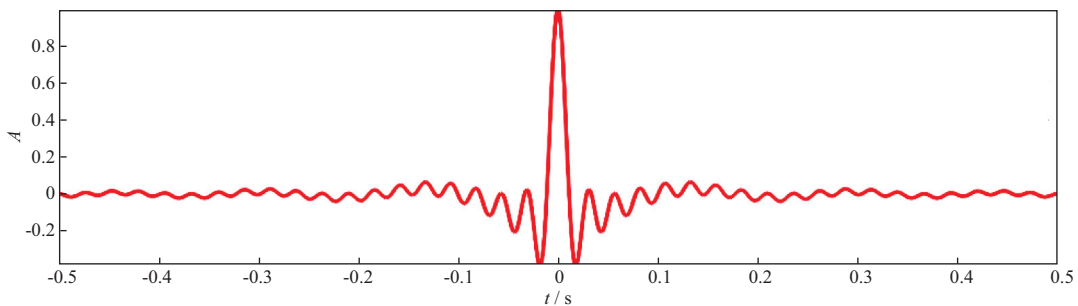


图 3 单位幅值线性升频扫描信号的自相关波形

## 2 可控震源技术

### 2.1 液压式可控震源

液压式可控震源是采用液压驱动的机电一体化设备,地面输出力大,环境适应能力强。震源工作时,液压系统油流跟随设定的电扫描信号不断变化,在振动器上下油缸内部产生油流压强。压强差作用于重锤活塞产生跟随电扫描信号波形的垂直振动。目前,液压式可控震源已较为完善<sup>[13]</sup>,其在系统控制与地面输出力估计、畸变分析与抑制等方面的技术较为成熟。

#### 2.1.1 系统控制与地面输出力估计

受液压、机械以及地面非线性等因素影响,故可控震源控制系统应具备反馈环节以调整振动器输出信号与电扫描参考信号保持一致。震源相位控制器是最早应用于可控震源的闭环反馈系统。振动器相位信息由安装在振动平板上的加速度传感器决定。由于平板加速度传感器反馈信号微弱、噪声较大,低频段相位检测存在一定延时,因此在实际应用中相位控制器控制能力较差。LERWILL<sup>[14]</sup>研究发现重锤加速度传感器反馈信号比平板加速度传感器反馈信号更为稳定,因此提出在控制系统中采用重锤加速度传感器作为震源的反馈环节。SCHRODT<sup>[15]</sup>提出基于地面输出力的自适应闭环幅度控制方法,消除了共振频率下振动平板与地面的脱耦现象,通过对远场信号的分析,证明了该方法比采用重锤或振动平板加速度传感器反馈信号更能实现稳定的下行小波。目前液压式可控震源控制系统使用多种类型传感器反馈信号监测震源的运动状态。当前主流可控震源数字控制系统接收主伺服阀、重锤、振动平板传感器反馈信号,输出相应的力矩马达控制命令,最终控制震源输出较为稳定的振动信号。例如 VE432 控制系统内部采用了最优控制技术,集成了数字式震源模型和卡尔曼滤波器<sup>[16]</sup>,其系统状态环路控制框图如图 4 所示。

采用数字式可控震源模型表征力矩马达输入电流与地面输出力的数学关系。根据力矩马达电流、4 个观测变量(重锤加速度、平板速度、重锤位移、阀位移)以及 10 个状态变量确定数学模型。状态变量的数量及数值与地表环境、振动器和扫描信号有关,可以通过初步试验确定。自适应卡尔曼滤波器作为系统的状态变量和观测器,可以根据震源理论模型的估

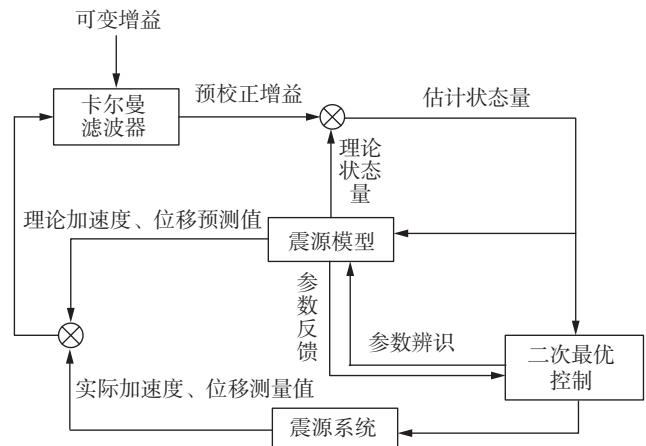
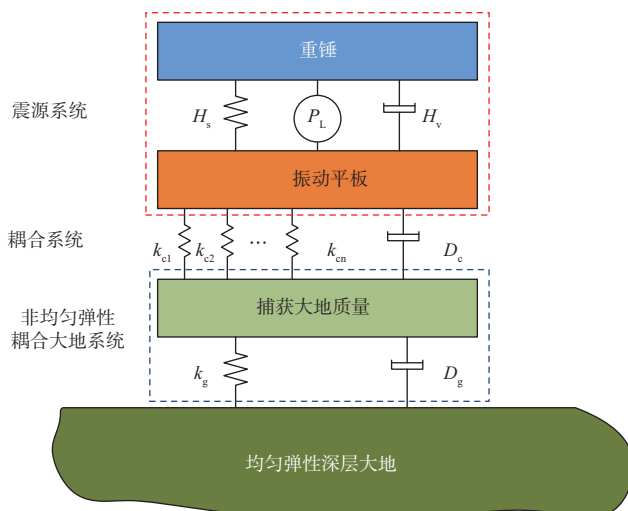


图 4 VE432 系统状态环路控制框图<sup>[16]</sup>

计值与实际观测值的可信度动态调整增益,有效降低传感器噪声、模型误差对系统的干扰,超前优化状态变量和观测变量。二次最优控制器将卡尔曼滤波器优化后的状态变量作为输入信号,采用二次判据最小化准则确定反馈状态指令,并且提供力矩马达合适的输入电流,使震源跟随电扫描信号输出相应振动波形,以降低地表环境及系统自身非线性对地面输出力的影响。目前最新型的 VE464 控制系统继承了 VE432 内部技术,并结合无线传输技术、电子技术和伺服控制技术等手段进一步提高了系统的控制速度与精度<sup>[17]</sup>。

作为可控震源的重要参数,震源地面输出力对系统控制以及检波器记录信号相关处理有着重要影响。由于采用直接测量方法得到的震源地面输出力不准确,因此 ALAIN 等<sup>[18]</sup>提出利用加权力方法估计震源地面输出力。SALLAS 等<sup>[19-20]</sup>通过实验验证了采用振动平板与重锤加速度的加权力方法的有效性,使加权力方法成为估计震源地面输出力的主要方法。由于震源-大地耦合系统不具有理想刚体特性,因此加权力估计值与震源地面输出力存在一定差异。BAETEN<sup>[21]</sup>设计了加权力估计值与直接测量得到的震源地面输出力对比实验,发现二者在部分频段的不一致性主要与震源-大地耦合模型有关。因此,建立合适的震源-大地耦合模型是准确估计真实地面输出力的重要基础。LEBEDEV 等<sup>[22]</sup>建立了表征震源的振动平板与大地耦合的非线性模型,创造性地提出利用弹簧数量表征振动平板与大地耦合刚度。TINKLE 等<sup>[23]</sup>提出了简化的质量-弹簧-阻尼模型,计算了系统耦合模型参数,验证了该模型用于估计震源地面输出力的有效性。WEI<sup>[24-26]</sup>提出的震源-大地耦合模型如图 5 所示,其耦合系统采用一系列弹簧和阻尼表征



注:  $P_L$  为油压;  $H_s$  为重锤与振动平板的刚度系数;  $H_v$  为重锤与振动平板的粘度;  $k_{c1}, k_{c2}, \dots, k_{cn}$  为振动平板与不同地表连接处的局部刚度系数;  $D_c$  为地表介质粘度;  $K_g$  为大地刚度;  $D_g$  为大地粘度

图 5 震源-大地耦合模型<sup>[26]</sup>

振动平板与地表介质的可变刚度, 将非均匀弹性耦合大地系统近似为质量-弹簧-阻尼模型, 将震源地面捕获质量视为振动平板的一部分并使其参与振动, 将较深的地层看作均匀弹性系统, 使其远端速度信号与弹性波信号的时间导数成比例, 然后利用远端参考信号与耦合系统模型输出信号互相关得到零相位地震子波, 最终证实了利用该模型进行地面输出力估计结果的有效性。

### 2.1.2 畸变分析与抑制

液压式可控震源非线性较为复杂, 信号畸变影响因素多, 包括机械、液压系统的非线性、振动平板的

形变等<sup>[27-29]</sup>。在实际勘探过程中, 可控震源控制系统并不能完全抑制畸变, 需要针对性的抑制特定畸变影响因素。现对其中两种主要畸变机理与抑制方法介绍如下。

#### 2.1.2.1 主伺服阀畸变与抑制

在可控震源工作的低频段, 主伺服阀非线性是震源波形畸变的重要影响因素, 主要包括主伺服阀重叠区(零位置死区)以及主伺服阀流量-压力的非线性<sup>[30-34]</sup>。主伺服阀重叠区非线性使震源振动波形的波峰处出现波谷, 在 3 Hz 以下尤为明显。主伺服阀流量-压力的非线性表现为液压油流量与载荷压力之间呈平方根关系, 随震源振动出力的增加其非线性不断增强, 并在 3 Hz 以上的低频段主导振动波形畸变。为抑制主伺服阀畸变影响, 魏周宏等<sup>[35-36]</sup>提出低频谐波压制算法, 其算法框图如图 6 所示。将低频段细分为 3 个频带: 1~3 Hz、3~8 Hz、8~20 Hz, 根据震源非线性特点, 低频谐波压制算法包含多种非线性补偿机制。主伺服阀零位置非线性控制算法将位移反馈信息用于补偿主伺服阀重叠区非线性, 主要作用范围为 1~3 Hz 频段; 在 3~8 Hz 频带范围内, 震源基频出力随频率增加而快速增加, 低频振幅和相位控制算法变得活跃, 利用前馈扫描驱动信号和主伺服阀位移反馈信号调节震源基频出力; 在 8~20 Hz 频带范围内, 主伺服阀零位置非线性控制算法和流量-压力的非线性算法同时作用, 校正主伺服阀位置使液压流量与载荷压力线性化。低频谐波压制算法对地层类型不敏感, 环境适应能力强。

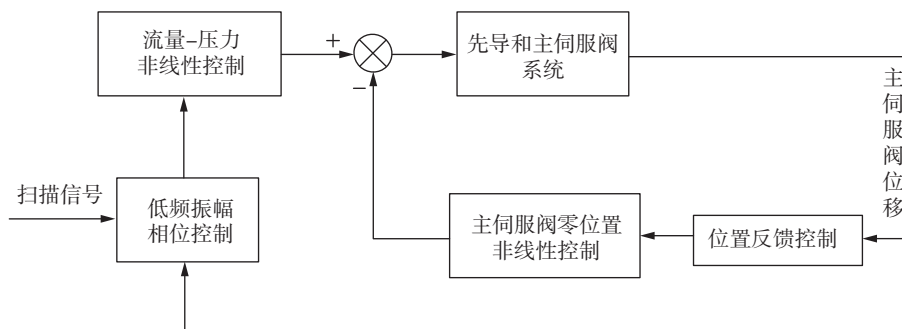


图 6 可控震源谐波压制算法框图<sup>[36]</sup>

#### 2.1.2.2 振动平板畸变分析与抑制

振动平板的低刚度严重影响震源勘探效果。WEI<sup>[24]</sup>利用有限元分析软件 ANSYS 按照振动平板实际结构建立了振动模型, 发现振动平板在低于 100 Hz 的频带存在 6 种振动模式, 分别为震源的前

后晃动、侧面晃动、振动平板扭曲、垂直振动、平板支柱的横向运动以及振动平板垂直振动与地面起伏。由于振动平板结构刚度低, 在较高的工作频段, 振动平板存在一定形变, 并与地面局部脱耦, 为解决上述问题, WEI<sup>[24]</sup>提出了加强振动平板刚度、减轻振动平

板质量的方法,并通过不同刚度的平板振动试验验证了方法的有效性。黄志强等<sup>[37-39]</sup>研究了 KZ-28 可控震源振动平板性能,利用 LS-DYNA 软件发现振动平板在动载荷作用下存在弯曲变形和局部脱耦现象,而后通过分析振动平板的多频响应情况,得到了振动平板加速度、形变和接触力随频率增加而增大的变化规律,进而总结出振动平板的刚度不足是导致振动平板在不同频率下响应存在差异的根本原因。为降低振动平板的畸变影响,提高震源在高频段的表现,郝磊<sup>[40]</sup>提出对振动平板中心的活塞杆底座结构进行改进,使振动平板与地表接触面受力更为均衡,有效降低了振动平板的形变量。马磊等<sup>[41]</sup>通过改变振动平板结构、增加支撑、优化振动平板本体型材截面积以及采用高刚度设计等方法,提高了振动平板的性能。

2.1.3 液压可控震源现状

为提高可控震源的勘探效果和适应复杂环境的能力,可控震源生产厂商不断结合现代技术对可控震源升级改造,使得震源频带宽度、峰值出力、畸变控制等指标不断改善,应用范围拓宽至油气勘探、地壳和区域性地质研究等领域。野外勘探深度的增加对震源峰值出力提出新的要求,大吨位、宽频带液压可控震源已成为重要的发展方向。目前国外已研制最大出峰值出力为 400 kN 的新一代可控震源。国内虽然在最大峰值出力方面还未达到国际先进水平,但已采用新型振动器结构和液压伺服系统,成功研发了具有更高控制精度和更低激发频率的可控震源<sup>[42]</sup>。受制于勘探区的复杂环境,轻便液压震源同样具有一定市场。以小型四驱液压可控震源 UNIVIB 为例,其尺寸约为常规液压震源尺寸的 2/3,多应用于道路狭窄区域。

2.2 电磁式可控震源

电磁驱动式可控震源摒弃了液压传动结构,利用交变电流通过感应线圈在永磁场内所受安培力驱动高能激振器向地下辐射振动信号,具有轻便、高频的特点,在浅层高分辨率地震勘探领域优势明显。针对电磁式可控震源的研究主要涉及到震源控制技术、畸变分析与抑制技术以及相控技术。

2.2.1 控制技术与畸变抑制

2.2.1.1 PID 系统控制技术

PHVS-500 是国内首台峰值出力为 500N 的电磁式可控震源,其系统原理框图如图 7 所示,震源系统内部采用传统比例-积分-微分(proportion integration dif-

ferentiation, PID) 控制技术<sup>[2]</sup>,主控单元通过放置于激振器基座位置的加速度传感器实时获取震源振动状态信息,并计算比例、积分、微分动态参数,根据当前值与历史值估计下一时刻校正并调整信号发生器的输出值,从而实现震源振动相位的动态校正。

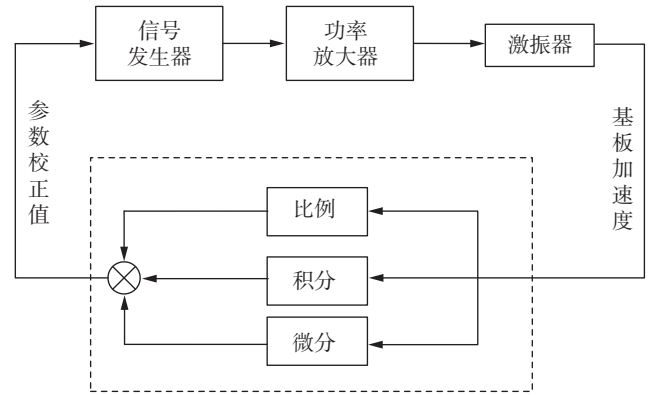


图 7 PHVS-500 震源系统原理框图<sup>[2]</sup>

2.2.1.2 位置反馈控制技术

线性同步电机 (linear synchronous motors, LSM) 震源是一种较为新型的电磁式可控震源<sup>[43-44]</sup>。NOORLANDT 等<sup>[44]</sup>设计的 LSM 震源,内部有 3 组线圈,通过控制 3 组线圈流入电流的幅值和恒定相位差,进而控制震源激发地面输出力,LSM 震源二维结构示意图如图 8 所示。由于震源内部使用空气弹簧,系统共振频率较低。为抑制共振影响,震源内部采用前馈控制设计,通过改变系统输出力提前预测弹簧响应。空气弹簧的变形导致精准预测弹簧响应非常困难。为改进控制系统,NOORLANDT 等<sup>[45]</sup>设计了基于负反馈的位置控制器,通过实时控制震源驱动力保证配重位移跟随预设位置曲线变化,以降低弹簧共

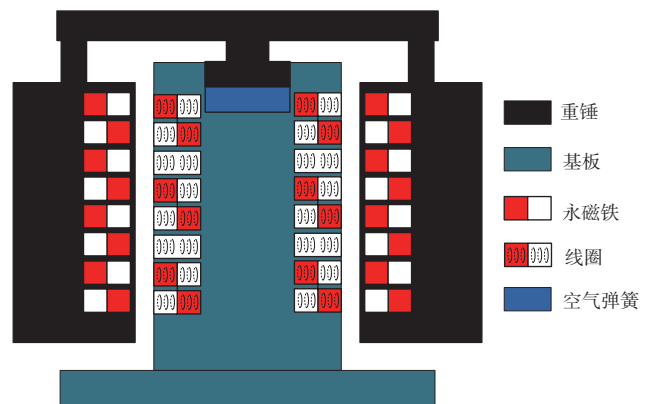


图 8 LSM 震源二维结构示意图<sup>[45]</sup>

振对震源的干扰。该位置控制器可有效降低温度对系统的影响,但震源基板与大地耦合的特性使震源地面输出力中仍存在谐波。

### 2.2.1.3 畸变与抑制技术

电磁式可控震源作为非线性电动装置,其闭环控制系统只能在一定程度上抑制畸变,因此输出振动波形仍存在畸变。姚恩超<sup>[46]</sup>对电磁式可控震源系统的畸变进行了分析,发现在开环条件下振动信号具有很强的二次和三次谐波,认为震源基板与大地耦合条件较差使得低频段谐波严重,而机械谐振等因素导致高频段出现大量奇次谐波,在此基础上,对震源控制系统进行改进,提出广义预测控制方法,并进行了相应的仿真实验。马瑞琪<sup>[47]</sup>研究发现激振器驱动电流与功率放大器电压存在一定相位差,机械系统固有延时、平板与地面不良耦合等均会导致畸变,据此提出了锁相控制与广义预测相结合的系统控制方法。贾

超<sup>[48]</sup>提出了电磁式可控震源扫描信号自适应控制技术:首先在基板与激振器顶端分别放置加速度传感器,然后利用加速度反馈信号,采用最小二乘算法完成震源系统辨识与建模,最后设计相应的自适应控制与辅助策略,有效降低了震源输出波形畸变。

### 2.2.2 相控震源

相控震源设计思想源自于相控雷达,采用阵列组合形式使激发地震波集中于某一方向,可有效解决大倾角勘探难题。陈鹏程<sup>[49]</sup>和姜弢<sup>[50]</sup>对相控震源进行了深入研究,设计了如图 9 所示的相控震源系统结构。相控震源系统由主控站和一定数目的子站构成:主控站通过 RS485 总线向子站发送扫描信号参数、时延等,子站按一定间距排列,依次延时启动,从而实现地震波束定向扫描。相较于单台可控震源和组合震源,相控震源出力更大,能量利用率更高。

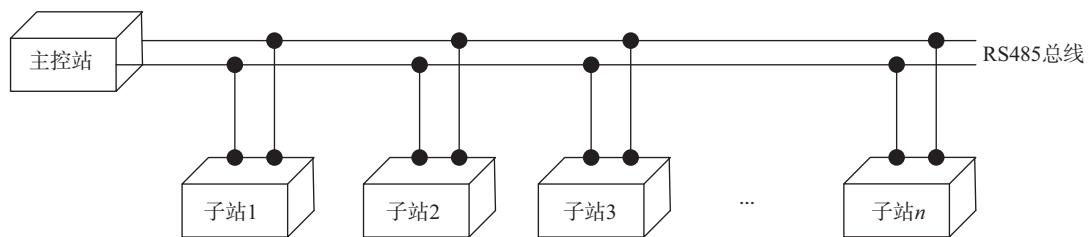


图 9 相控震源系统结构<sup>[49]</sup>

### 2.2.3 电磁式可控震源现状

日本某公司研制的电磁式可控震源在居民区、复垦区、浅层管线探测领域展开了实际应用<sup>[51]</sup>。美国某公司研制的 EMvibe 电磁式可控震源出力较小,多用于教学研究<sup>[52]</sup>。近年来,电磁式可控震源呈现较快发展的趋势,德国某公司设计了 ELVIS 电磁力震源<sup>[53]</sup>;NOORLANDT 等<sup>[45]</sup>设计了满驱频率低至 2 Hz 的 LSM 震源;BREWER 等<sup>[54]</sup>设计了频带为 20~800 Hz、峰值出力为 3900 N 的轻便电磁震源;DEAN 等<sup>[55]</sup>利用市场出售的组件,设计了频带为 15~180 Hz,简单轻便的电磁力可控震源,有效降低了震源成本。上述震源均进行了实际勘探试验,但尚未实现商业化应用,当前只有极少数生产厂商推出了面向市场的电磁式可控震源<sup>[56]</sup>。国内开展电磁式可控震源研究起步较早,已形成不同峰值出力的系列化震源。

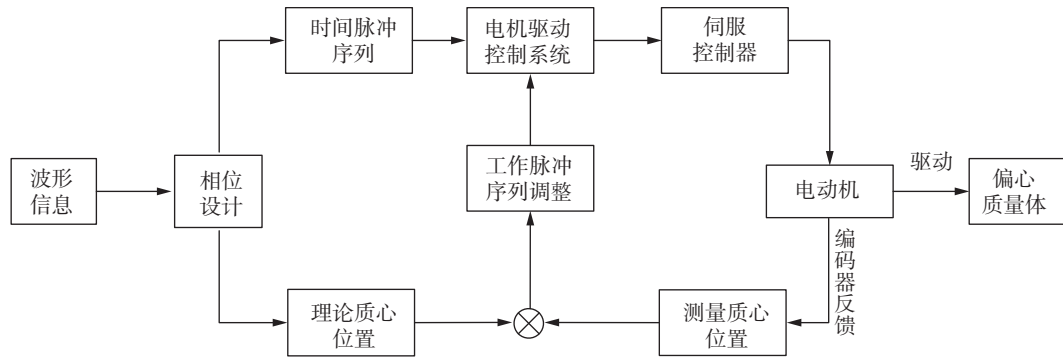
## 2.3 精密可控震源

与上述两种可控震源激振器线性振动不同,精密

可控震源是一种连续旋转型震源,利用偏心重物旋转径向力激发精密振动信号,波形重复性好,可用于地下介质的长时监测<sup>[7-8]</sup>。精密可控震源控制系统结构较为固定,目前针对精密可控震源的研究多集中于扫描信号设计与提取,关于畸变分析与结构优化的研究较少。

### 2.3.1 系统控制技术

YAMAOKA 等<sup>[57]</sup>根据 GPS 提供精准授时并利用从监视器获取的震源振动反馈信号,设计了精密可控震源反馈调节控制系统。目前,精密可控震源系统的组成较为固定,其控制原理如图 10 所示<sup>[58]</sup>。首先根据扫描信号参数信息,主控单元计算出理论质心位置与伺服电机时间脉冲序列,并由时间脉冲序列驱动伺服电机带动偏心质量体转动,再利用安装在电动机转轴位置的编码器实时反馈质心实际位置,最后主控单元通过比较理论与实际质心位置偏差调整时间脉冲序列,保证偏心质量体的高精度运行。

图 10 精密可控震源控制原理<sup>[58]</sup>

### 2.3.2 可控震源信号与结构改进

信号扫描技术对可控震源勘探效果有着重要影响。精密可控震源的扫描信号类型主要包括单频扫描、线性扫描和非线性扫描。为抑制短时突发噪声干扰,崔仁胜等<sup>[59-60]</sup>提出了加权匹配滤波方法以及遵循能量均衡和信噪比均衡原则的离散点拟合扫描技术,一定程度上提高了相关子波的分辨率。刘希康等<sup>[61]</sup>提出了应用于精密可控震源信号检测的 Wigner-Hough 变换方法并验证了该方法的有效性。张正帅<sup>[62]</sup>设计了一种时变窄带滤波器,以获取远端记录信号及提高信号的信噪比。

目前针对精密可控震源结构优化的研究较少。ISE 等<sup>[63-64]</sup>对旋转质量块支撑轴承进行了研究和改进,采用气体轴承代替传统轴承,并证明改进后的轴承可有效抑制偏心质量体的轴向振动。赵春蕾等<sup>[65]</sup>设计了组合轻便的高精度小型精密可控震源,并进行了野外试验。张凯<sup>[66]</sup>对精密可控震源的勘探性能和结构进行了研究,并根据动力学理论将精密可控震源-大地耦合系统转化为质量-弹簧-阻尼模型,对震源结构关键参数进行优化,改进了精密可控震源结构。精密可控震源在实际勘探中还存在波形畸变问题,SAIGA 等<sup>[67]</sup>研究发现精密可控震源对周围的环境因素敏感,在特定频带内变化尤为明显,因此提出需要对敏感频带信号进行特殊处理。YAMAOKA<sup>[57]</sup>研究发现震源与耦合地基接触导致了震源激发信号的相位随时间变化,因此提出利用震源下方表层振动信号修正反演参数的方法。

### 2.3.3 精密可控震源现状

与常规可控震源相比,精密可控震源激发频率低、频带范围窄,传播距离可达百余公里。目前研发、生产精密可控震源并开展野外试验的国家主要有俄

罗斯、美国、日本和中国。俄罗斯精密可控震源具有大吨位、垂直输出力、传播距离远的特点,在东西伯利亚等地区开展了油气监测等试验<sup>[8]</sup>。美国研制的水平精密可控震源已开展了建筑物内部微小结构探测的试验,并建立了关键参数规范<sup>[68-69]</sup>。日本研制的 ACROSS 精密可控震源为单一偏心重物结构,其吨位和出力较小,相位精确度高,已应用于浅层结构检测和油气储层检测试验<sup>[70-71]</sup>。国内精密可控震源目前已发展到第 4 代,可输出 400 kN 垂直线性力,并在绵竹、庐山等地开展了试验研究<sup>[72-73]</sup>。目前已开展的试验研究表明精密可控震源在建筑探伤、地层结构成像、油气监测等领域具有实用价值和应用潜力。

## 2.4 可控震源对比

为满足不同的勘探要求,目前主要发展了液压式、电磁式、精密可控震源 3 种类型。3 种可控震源在系统结构、控制技术、畸变因素、工作参数等方面存在一定差异。

### 2.4.1 系统结构

液压式可控震源以液压油流的形式传递动力,其电控系统是震源核心,一方面提供扫描信号、同步信号以及相关参考信号,另一方面监控震源振动状态;电液伺服振动器实现能量转换,输出垂直振动信号;液压环路系统为振动器等设备提供动力。液压式可控震源常采用车载形式以增强震源在复杂环境下的适应能力。电磁式可控震源摒弃了液压传动机构,以电磁力驱动高能激振器向地下辐射连续振动信号,其震源系统包括主控系统和高能激振器,两者相互独立,通过专用线路连接。精密可控震源系统由机械系统、伺服系统和监控系统组成,机械系统主要包括偏心质量块、精密伺服电机、激振箱体、电机支座和平板等部件;伺服系统实现电机控制与反馈信号的获取;



监控系统用于校正震源运动状态。可以看出,液压和精密可控震源系统较为复杂与庞大,电磁式可控震源峰值出力较小,系统结构较为简单。

#### 2.4.2 控制技术

液压式可控震源通过多种传感器获取振动器状态信息,并在系统内部集成了数字震源模型与最优控制算法,技术最为成熟。电磁式可控震源利用位置信息或激振器加速度信息监测振动位移或稳定的输出力,其传感器类型较为单一,控制效果有限。精密可控震源利用电机编码器反馈信息,实时校正电机的运动状态,这种控制方式已成熟应用于各类电机,故可驱动精密可控震源输出高精度振动信号。

#### 2.4.3 畸变影响因素

液压式可控震源畸变影响因素主要包括两个方面,一是主伺服阀死区以及流量-压力的非线性;二是振动平板的非理想刚度。电磁式可控震源峰值出力较小,振动平板对畸变的影响更容易被抑制,而其内

部功放系统的波形失真、电信号转换为力信号导致的机械延时与非线性位移等均会引起畸变。针对精密可控震源畸变的研究较少,其畸变影响因素还有待分析,其中电机性能在一定程度上决定着振动信号的畸变水平。3种震源的畸变影响因素既有差异,也有相似之处。除震源自身因素外,震源工作参数、大地耦合的非线性等因素也对波形质量存在一定程度的影响。

#### 2.4.4 工作参数

液压式、电磁式、精密可控震源的主要技术指标存在明显差异,如表 1 所示。液压式可控震源峰值出力较大,但工作频带较窄,极限低频与精密可控震源相当。电磁式可控震源频带较宽,具有高分辨率的特性,但其峰值出力较小,适用于浅层勘探。精密可控震源频带最窄,峰值出力与液压式可控震源相当。3种可控震源均可实现线性、非线性扫描的工作方式,但精密可控震源无伪随机扫描的工作方式。

表 1 3种可控震源的主要技术指标

震源类型	液压可控震源	电磁式可控震源	精密可控震源
震源型号	Nomad90	PHVS-1000	CASS-40
峰值出力/kN	400.3	1.0	400.0
额定频率范围/Hz	1~250	5~1 400	2~10
扫描方式	线性、非线性、伪随机	线性、非线性、伪随机	线性、非线性

### 3 可控震源与勘探

#### 3.1 陆地勘探

##### 3.1.1 低频勘探

丰富的低频信息对速度建模与全波场反演具有重要意义,相较于高频信息,其在油气藏勘探与深层目标成像等方面具有明显优势。天然地震通常会产生产低频信号,可以通过铺设低频检波器采集低频振动数据,但这种被动的接收方式需要的研究周期长,并且效果有限,因此研究人员期望利用主动源激发低频信号。实践证明可控震源是低频信号激发最为合适的主动源<sup>[74]</sup>。目前,低频勘探激发频率已低至 1.5 Hz,常规可控震源难以满足频率要求。理想条件下可控震源的峰值出力为:

$$F = 4\pi^2 M X f^2 \quad (6)$$

式中: $F$  为峰值出力; $M$  为重锤质量; $X$  为重锤最大

单边行程; $f$  为振动频率。理论上低频震源的峰值出力受  $M$  和  $X$  影响,因此可以通过增大重锤质量或重锤最大单边行程提高  $F$ 。在重锤质量不变的前提下,增加重锤最大单边行程意味着增加液压油流与功率。由于液压系统非理想系统,故实际情况更为复杂,液压流量与峰值出力关系为:

$$F_1 = \frac{\beta}{V_0} S_p B \int Q_L \quad (7)$$

$$Q_L = K X_v \sqrt{P_s - \frac{X_v}{|X_v|} \left( \frac{F_1}{S_p} \right)} \quad (8)$$

式中: $F_1$  为可控震源地面输出力; $\beta$  为液压油弹性模量; $V_0$  为活塞腔单边液压油初始体积; $S_p$  为活塞杆面积; $Q_L$  为主伺服阀输出的载荷流量; $K$  为孔板流量系数; $X_v$  为主伺服阀位移; $P_s$  为伺服阀总成的供给压力; $F_1/S_p$  为载荷压力。震源系统内的非线性导致了低频段信号畸变,降低了基频能量。此外,低频信号与高频信号之间的机械矛盾以及低频振动所

引发的机械噪声严重限制了常规可控震源在低频勘探中的应用<sup>[75]</sup>。事实上,低频可控震源并非常规可控震源的升级与改造,二者在系统结构、激发参数、采集方法以及数据处理方法等方面均存在差异<sup>[76]</sup>。

为满足低频勘探的要求,研究人员设计了基于最大位移的扫描信号以增强低频段信号能量<sup>[77]</sup>。魏周宏等<sup>[35-36]</sup>分析了主伺服阀流量-压力的非线性和振动平板耦合机理,从低频谐波抑制算法与增强振动平板刚度两方面,提高了可控震源低频段基频出力。上述改进方法,只改善了常规可控震源在低频段的峰值出力,并未从根本上降低震源极限低频。马红伟等<sup>[78]</sup>改进了震源的液压和重锤系统结构,提高了振动平板刚度,使 AHV-IV 364 震源的极限低频被拓展到 3 Hz 以下。我国研制了全球首台可工业化应用的高精度低频可控震源,极限低频为 1.5 Hz,其创新之处包括:①创新振动平板结构,使震源实际模型更契合 Sallas 理论模型;②为液压系统设计了长行程活塞结构,将液压合流控制技术与扰动抑制技术相结合,使得振动器可以进行高精度稳定线性扫频<sup>[42]</sup>。陶知非<sup>[79]</sup>研究了低频可控震源的激发能量,发现单台震源所激发的能量可以满足当前油气勘探的要求,低频地震技术推广主要受限于人们的传统认知。目前,可控震源已应用于冻土区二维勘探、地球深部探测、油气勘探等领域<sup>[80-81]</sup>。

### 3.1.2 不同介质下的震源激发参数

通常需要根据工程经验合理设定不同介质下的震源激发参数,不存在适用于不同介质的固定激发参数。换言之,相同介质下的不同参数激发、不同介质下的相同参数激发对地震勘探效果的影响也不尽相同。可控震源激发参数较多,部分参数在不同介质下对勘探效果的影响有限。目前研究人员更关注于以下激发参数:震源台数、振动次数和扫描信号。

在部分勘探环境下,单震源激发导致的峰值出力不足可以通过多震源组合方式弥补。多震源组合可以应用于埋藏较深的矿产勘探或地下介质的定向勘探。通过多次叠加振动数据,可以有效降低随机干扰,提高地震剖面的信噪比。但实际作业时,受组合震源的台数限制,振动次数的增加可能导致采集信号主频降低,进而降低勘探分辨率<sup>[82]</sup>。扫描信号参数复杂,涉及到信号类型、起止频率、频带宽度、扫描时间、驱动幅值、幅度锥化等要素<sup>[83]</sup>。扫描信号类型包括线性、非线性、伪随机等,选择扫描信号类型时,

需要更多地考虑施工环境的敏感性与滤波特性。起始低频需要考虑震源的低频性能、检波器低频特性以及环境中的低频干扰等因素。终止高频受震源自身机械、液压、大地自身的低通滤波器特性以及检波器采样频率等因素限制。频带宽度的确定要考虑倍频程、目标层分辨率要求和震源工作频带等因素。频率扫描时间影响相关子波分辨率,时间过短会导致激发能量有限,分辨率低;时间过长则影响勘探效率,且造成采集数据出现多次反射干扰。驱动幅值关系到震源下传能量,幅值过大易损坏震源部件,降低震源工作年限,并且导致激发信号失真。

薛海飞等<sup>[84]</sup>在砾石发育的九里山地区,李苏光等<sup>[85]</sup>在碳酸盐岩地区,张玉军等<sup>[86]</sup>在平山湖矿区,吴曲波等<sup>[87]</sup>在砂岩型铀矿区,孙海川<sup>[88]</sup>在戈壁平原复杂地质条件下,均对可控震源的激发参数进行了定量分析。孙跃龙<sup>[89]</sup>研究了震源激发参数对谐振的影响,发现合适的激发参数可以减小谐振。刘小锋等<sup>[90]</sup>提出根据工区地表条件确定合适的可控震源驱动幅度,以及根据谐波畸变情况调节驱动幅值。上述研究表明,可控震源参数很大程度上影响了勘探效果,应根据工区地表条件与工程经验合理设定震源激发参数。

### 3.1.3 城市勘探

虽然弹性波勘探在城市环境中存在振动干扰、测线受环境限制以及检波器与城市地面耦合等问题,但弹性波下传能量强,能达到较深的勘探深度,故在城市勘探中具有一定优势<sup>[91]</sup>。与冲击型震源相比,可控震源的激发波形可控,并且可以利用相关来压制噪声,因此在城市勘探中优势明显。王中圣<sup>[92]</sup>研究发现,可控震源在城市工程物探中抗噪性佳,适用性强;聂明涛<sup>[93]</sup>利用小型液压震源 UNIVIB 在复杂城区进行勘探,弥补了利用大吨位液压震源进行城区勘探的不足;丁美青等<sup>[94]</sup>在城市浅层地质调查中利用纵横波两用震源车进行了横波勘探;马董伟<sup>[95]</sup>利用 3 吨纵横波两用可控震源在 X 市进行了城市活断裂探测。与上述小型液压可控震源不同的是,电磁式可控震源多应用于城市浅层高分辨率勘探。日本某公司研制的电磁式可控震源样机可有效探测城市浅层管线<sup>[6,51]</sup>。孙明等<sup>[96]</sup>将 PHVS-1000 可控震源成功应用于鞍山市隧道工程地质调查项目。当前,适用于城市勘探环境的可控震源还在不断发展。借鉴海上拖缆系统,将可控震源与采集系统结合可组成快速、高

效的陆地拖缆系统,该系统具有良好的发展前景<sup>[97]</sup>。

### 3.2 海洋勘探

在海洋勘探中,占据着主导地位的气枪震源常常以气枪阵列的形式激发信号。气枪激发的能量并非全部向下传播,有大量能量以近似水平角度向外辐射较远的距离,对海洋生物产生负面影响。海洋可控震源的研制初衷是为了替代气枪震源,降低震源对海洋环境的影响。海洋可控震源勘探的优势还包括①震源激发的波形可控;②勘探效率高;③与气枪震源阵列通过总延时修正相位不同,海洋可控震源相控阵延时时间可精确控制,故可实现定向探测;④得益于海水良好的耦合性,海洋可控震源激发信号畸变较小。

海洋可控震源的研制起步较早,近年来又重新引起关注。海洋可控震源与陆地可控震源在结构、载具等方面差异显著。国外研制了由两个激振器组成、分段扫描工作的海洋电磁式可控震源,并进行了海上勘探试验,以验证可控震源在海洋勘探领域的可行性<sup>[98]</sup>。孙锋等<sup>[99-100]</sup>对海洋电磁式可控震源控制系统、震源-海水耦合模型以及扫描信号等关键技术进行了研究,设计了 3 个 PHVS-500 震源组合振动形式,并在实验室及野外环境进行了验证。2013 年,多家海外石油公司共同发起了海洋可控震源联合工业项目<sup>[101]</sup>。LAWS 等<sup>[102]</sup>研发了一种海洋可控震源样机,该样机外形似鼓,采用电液驱动设计,并配备散热器,其控制系统采用基于加速度传感器的闭环反馈。因海洋可控震源存在机械摩擦、反作用力等非线性效应,故难以实现震源的精确控制。因建造高效率、线性动力学的海洋振动器存在困难,故 TENGHAMN<sup>[103]</sup>提出了一种基于振动器位置控制的时间域迭代学习控制算法,但该算法存在模型阶数较高、参数复杂的不足;SOERNMO 等<sup>[104]</sup>提出频率域迭代学习控制算法,可以有效抑制谐波,实现参考信号的准确跟踪。

DUNCAN 等<sup>[105]</sup>模拟浅层大陆架海域、深海等典型场景,对海洋可控震源阵列和气枪阵列分别建模,比较两者在采集端的声级,结果表明相较于传统气枪,海洋可控震源可以提供一种对环境影响较小的海洋地震声源。PRAMIK<sup>[106]</sup>认为海洋电磁式可控震源在操作性、信号处理等方面比气枪震源更具优势。海洋可控震源通常在水下工作,这样有利于减少声波的传输损失,但也面临如何确定震源精确位置的问题。超短基线(ultra short baseline,USBL)水声定位系统是目前水下定位方法中常用的声学定位系统

之一,当震源位置较远时,因受收发信机阵列尺寸限制,容易降低位置测量精度,同时增加勘探成本和故障风险。KUSANO 等<sup>[107]</sup>提出了一种利用地震资料通过双曲 Radon 变换构造最优化问题估计海洋可控震源位置的方法。数值模拟结果表明,对于含有加性高斯噪声的地震资料,该方法可实现震源位置的有效求解。实际地震资料中往往含有非加性高斯噪声,因此该方法的实用性还有待验证。LONG 等<sup>[108]</sup>认为海洋电磁式可控震源还面临着机械耐久性不足、低频输出受限、空气弹簧效应影响等问题,海洋勘探的广阔前景将驱动海洋可控震源不断发展与完善。

## 4 总结与展望

可控震源作为激发波形可控的主动源,在地震勘探领域发挥着重要作用。根据驱动方式的不同,可控震源主要包括 3 种类型:液压式、电磁式和精密可控震源。液压式可控震源技术水平较成熟,机理研究较深入,是目前发展最为成熟的可控震源。电磁式和精密可控震源研究起步较晚,多处于探索阶段,还难以实现规模化应用。事实上,3 种可控震源输出振动波形时均存在畸变现象,这主要受震源结构的非线性以及震源与大地耦合的非线性影响。对于液压震源,其结构非线性包括主伺服阀非线性、振动平板的低刚度等因素,可以通过提高振动平板刚度以及谐波抑制算法等手段加以改善。而电磁式和精密可控震源结构的非线性还有待进一步研究。在可控震源勘探过程中,激发参数在一定程度上影响勘探效果,需结合实际环境与工程经验合理设定参数,目前并无适用所有地质条件的固定参数组合。近年来,陆地低频勘探的兴起带动了低频可控震源的发展。理论上,可控震源低频出力受重锤质量与单边行程限制,但实际情况更为复杂。此外,城市勘探与海洋勘探也对可控震源提出新的要求。

随着可控震源向宽频带拓展,应用场景从野外向城市、从陆地向海洋发展,现有技术难以满足要求,需在以下 5 个方面进行深入研究。

1) 在重锤质量不变的情况下,震源低频峰值出力主要受重锤单边行程影响。目前业界低频可控震源的极限低频已低至 1.5 Hz,并向 1.0 Hz 推进。在保持震源出力不变的情况下,理论上低频 1.0 Hz 的重锤单边行程要远大于 1.5 Hz 时的重锤单边行

程。未来研究的重点应是进一步创新震源结构和控制算法,降低极限低频,同时兼顾震源高频性能,实现宽频带可控震源激发。

2) 城市复杂环境对可控震源勘探提出新的要求,因此未来需要发展小型化的用于城市勘探的可控震源。由于城市勘探目的层多为浅层,激发能量小于常规震源的激发能量,因此在满足城市勘探出力要求的前提下,可以从机械、液压结构着手适当降低震源出力,研制小型化液压可控震源。此外,还可以利用电磁式可控震源轻便、高频的勘探特点,通过增大单台震源峰值出力或以震源组合形式实现城市浅层高分辨率勘探。城市可控震源勘探不仅需要改进震源自身,还需要深入研究城市环境噪声压制与数据资料的处理方法。如何提高可控震源城市勘探的快速性与灵活性也是目前研究的难点之一。借鉴海洋拖缆系统,发展城市拖缆勘探系统是解决上述问题的重要方案,城市拖缆系统通过车载震源与拖缆采集系统悬挂方式,可以满足快速勘探要求。该方案目前仍处于探索阶段,还需解决拖缆结构、检波器耦合等一系列问题,但毫无疑问,拖缆系统是未来城市勘探的重要形式之一。

3) 与气枪、电火花等海洋震源相比,可控震源优势明显。目前海洋可控震源发展尚不成熟。若期望复制可控震源在陆地勘探领域的成功应用,需要解决海洋可控震源非线性、低频激发、震源组合与相位延时等一系列问题,进而建立包括震源系统、拖曳系统、数据采集与处理的完整海洋勘探体系。

4) 可控震源自动化勘探将成为未来重要的研究方向之一,可控震源自动化主要体现在勘探过程中尽量减少人工干预,如震源车自动驾驶、多震源自主协作、激发参数的自动选取等。目前已有关于震源车自动驾驶试验的公开文献,但可控震源的自动化水平还有待全面提升。随着可控震源自动化水平的不断提高以及高效采集技术的进步,可控震源勘探效率必将得到进一步提升。

5) 在陆地勘探领域,液压式可控震源取得了相当成功的应用,电磁式和精密可控震源尚未具备大规模应用条件,仍处于探索与样机试验阶段。究其原因,一方面电磁式和精密可控震源起步较晚,缺乏技术积累,系统控制和机理还有待深入研究;另一方面电磁式和精密可控震源在油气勘探等传统领域应用较少,电磁式可控震源通常面向浅层高分辨率勘探,

精密可控震源在地球深部探测领域颇具潜力。这在一定程度上造成了电磁式和精密可控震源在陆地勘探领域关注度不足,电磁式和精密可控震源在完善自身结构同时,未来应聚焦于应用场景的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 陆基孟,王永刚.地震勘探原理[M].青岛:中国石油大学出版社,2011:2-8  
LU J M, WANG Y G. The principle of seismic exploration [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2011: 2-8
- [2] 林君.电磁驱动可控震源地震勘探原理及应用[M].北京:科学出版社,2004:2-4  
LIN J. The principle and application of electromagnetic vibroseis seismic exploration [M]. Beijing: Science Press, 2004: 2-4
- [3] 陈祖斌,林君,于生宝.浅层地震可控震源系统的设计[J].电子测量与仪器学报,2002,16(1):43-48  
CHEN Z B, LIN J, YU S B. The development of shallow seismic vibrator system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2002, 16(1): 43-48
- [4] 沈明燮.自行式电液伺服可控震源设计和试验研究[D].长春:吉林大学,2018  
SHEN M X. Design and experiment of self-propelled electro-hydraulic servo vibroseis [D]. Changchun: Jilin University, 2018
- [5] 徐书兵.轻便液压伺服可控震源激震系统研究[D].长春:吉林大学,2019  
XU S B. The research on hydraulic servo vibroseis vibration system [D]. Changchun: Jilin University, 2019
- [6] NIJHOF V P B J. Portable, high-frequency vibrator for high-resolution shallow seismic profiling [J]. Expanded Abstracts of 59<sup>th</sup> Annual Internat SEG Mtg, 1989: 670-671
- [7] 杨微,王宝善,葛洪魁,等.精密控制机械震源在地下介质变化监测中的应用研究现状[J].地震研究,2015,38(1):25-34,181  
YANG W, WANG B S, GE H K, et al. Research status of application of accurately controlled routinely operated seismic source on monitoring subsurface medium variation [J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(1): 25-34, 181
- [8] 崔仁胜,周银兴,陈阳,等.我国精密可控震源主动探测研究进展[J].防灾科技学院学报,2016,18(4):21-29  
CUI R S, ZHOU Y X, CHEN Y, et al. Research progress in active monitoring of the controlled accurately seismic source in China [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2016, 18(4): 21-29
- [9] 林君,陈鹏程,姜弢,等.浅层地震探测的可控震源信号设计[J].地球物理学进展,2004,19(4):807-811  
LIN J, CHEN P C, JIANG T, et al. The signal design of

- electrodynamic vibroseis for subsurface imaging [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(4): 807-811
- [10] 刘玉海,尹成,潘树林,等.基于非线性扫描技术的可控震源地震勘探分辨率提高方法[J].*东北石油大学学报*, 2013, 37(2): 55-61, 90  
LIU Y H, YIN C, PAN S L, et al. A high resolution research with nonlinear signal to improve vibrator exploration based on nonlinear scanning [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2013, 37(2): 55-61, 90
- [11] DEAN T. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis surveys [J]. *Geophysical Prospecting*, 2014, 62(1): 50-74
- [12] 李红远.可控震源伪随机扫描信号设计方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东), 2015  
LI H Y. The research of pseudo random sweep signal design [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015
- [13] 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
- [14] LERWILL W E. The amplitude and phase response of a seismic vibrator [J]. *Geophysical Prospecting*, 1981, 29(4): 503-528
- [15] SCHRODT J K. Techniques for improving vibroseis data [J]. *Geophysics*, 1987, 52(4): 469-482
- [16] 陶知非,王迎春,吕雯节. VE432 控制系统与可控震源培训手册(二) [J]. *物探装备*, 2001, 11(2): 124-147  
TAO Z F, WANG Y C, LV W J. VE432 control system and vibroseis training manual (2) [J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2001, 11(2): 124-147
- [17] BOUCARD D, OLLIVRIN G. Developments in vibrator control [J]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 59(1): 33-40
- [18] ALAIN C, MICHEL L. Vibrator controlling system: US, 3208550 [P], 1965-9-28
- [19] SALLAS J J, WEBER R M. Comments on "The amplitude and phase response of a seismic vibrator" by WE Lerwill [J]. *Geophysical Prospecting*, 1982, 30(6): 935-938
- [20] SALLAS J J. Seismic vibrator control and the downgoing P-wave [J]. *Geophysics*, 1984, 49(6): 732-740
- [21] BAETEN G J M. Wave field of a vibrator on a layered half-space: Theory and practice [J]. *Expanded Abstracts of 58<sup>th</sup> Annual Internat SEG Mtg*, 1988: 92-96
- [22] LEBEDEV A V, BERESNEV I A. Nonlinear distortion of signals radiated by vibroseis sources [J]. *Geophysics*, 2004, 69(4): 968-977
- [23] TINKLE A, ROWSE S L. Toward a simplified model of vibrator seismic source performance: preliminary results [J]. *Expanded Abstracts of 80<sup>th</sup> Annual Internat SEG Mtg*, 2010: 116-120
- [24] WEI Z H. Modelling and modal analysis of seismic vibrator baseplate [J]. *Geophysical Prospecting*, 2009, 58(1): 19-32
- [25] WEI Z H, PHILLIPS T F. Break through the limits of vibroseis data quality [J]. *Geophysical Prospecting*, 2012, 60(2): 373-393
- [26] 魏周宏, T·F·菲利普斯. 基于耦合振动器的大地模型的地震数据滤波: 中国, 103238087A [P], 2016-05-04  
WEI Z H, PHILLIPS T F. Seismic data filtering based on coupled vibrator geodetic model: China, 103238087A [P], 2016-05-04
- [27] 刘斌, 张志林, 赵国勇, 等. 可控震源谐波影响因素分析及对策 [J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(6): 1053-1060  
LIU B, ZHANG Z L, ZHAO G Y, et al. Harmonics and its attenuation on vibroseis data [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(6): 1053-1060
- [28] 李振春, 曲英铭, 韩文功, 等. 可控震源两种谐波产生机理与特征研究 [J]. *石油物探*, 2016, 55(2): 159-172  
LI Z C, QU Y M, HAN W G, et al. Generation mechanism and characteristics of two kinds of harmonic waves for vibroseis [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(2): 159-172
- [29] 陶知非, 徐小刚. 再论可控震源输出信号畸变的问题 [J]. *物探装备*, 2017, 27(6): 351-355  
TAO Z F, XU X G. Study on vibrator output distortion [J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2017, 27(6): 351-355
- [30] LIU X, HUANG Q, CONG D, et al. Analysis of performance effect factors of three-stage electro-hydraulic servo valve [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2009, 4(12): 1216-1222
- [31] WEI Z H, PHILLIPS T F. Harmonic distortion reduction on seismic vibrators [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(3): 256-261
- [32] SALLAS J J. How do hydraulic vibrators work? A look inside the black box [J]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 58(1): 3-18
- [33] 魏周宏, 潘远洲. 可控震源的低频性能分析 [J]. *物探装备*, 2015, 25(4): 211-214  
WEI Z H, PAN Y Z. Analysis of seismic vibrator's low-frequency performance [J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2015, 25(4): 211-214
- [34] 黄志强, 欧倩茹, 代茂林. 可控震源液压伺服阀滑阀流态扰动规律研究 [J]. *机械科学与技术*, 2019, 38(10): 1482-1489  
HUANG Z Q, OU Q R, DAI M L. Study on flow state disturbance law of sliding valve in vibroseis hydraulic servo valve [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2019, 38(10): 1482-1489
- [35] WEI Z H, PHILLIPS T F. Enhancing the low-frequency amplitude of ground force from a seismic vibrator through reduction of harmonic distortion [J]. *Geophys-*

- ics, 2013, 78(4): P9-P17
- [36] 魏周宏, 马红伟, 潘远洲. 可控震源低频谐波畸变压制技术[J]. 物探装备, 2015, 25(5): 293-296, 305  
WEI Z H, MA H W, PAN Y Z. Low frequencies HDR (Harmonic Distortion Reduction) technology of seismic vibrators[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2015, 25(5): 293-296, 305
- [37] HUANG Z Q, LI G, HAO L. Study on dynamics of vibrator baseplate at low and high frequencies[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(4): 2413-2426
- [38] 黄志强, 彭珣, 李刚. 可控震源振动器平板多频响应分析[J]. 工程设计学报, 2017, 24(6): 648-654  
HUANG Z Q, PENG X, LI G. Analysis of multi-frequency response of vibroseis vibrator baseplate[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(6): 648-654
- [39] 黄志强, 彭珣, 李刚. 可控震源振动器平板-大地接触性质与能量传递研究[J]. 工程设计学报, 2019, 26(1): 102-109  
HUANG Z Q, PENG X, LI G. Study on contact property and energy transfer between vibrator baseplate and ground[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(1): 102-109
- [40] 郝磊. 可控震源平板性能研究及改进[D]. 成都: 西南石油大学, 2014  
HAO L. Research and improvement of vibroseis baseplate performance[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014
- [41] 马磊, 季颖, 夏鹏翎. 可控震源振动平板设计的研究探讨[J]. 物探装备, 2015, 25(5): 297-301  
MA L, JI Y, XIA P L. Design for vibration baseplate of seismic vibroseis[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2015, 25(5): 297-301
- [42] 陶知非, 刘志刚, 马磊, 等. EV-56 高精度可控震源技术[J]. 物探装备, 2018, 28(5): 281-282, 288  
TAO Z F, LIU Z G, MA L, et al. EV-56 high precision vibroseis technology[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2018, 28(5): 281-282, 288
- [43] UNGER R. A seismic transmission system for continuous monitoring of the lithosphere: A proposition[D]. Delft: Delft University of Technology, 2002
- [44] NOORLANDT R, DRIJKONINGEN G, SCHNEIDER R. A seismic vertical vibrator driven by linear motors[J]. Expanded Abstracts of 74<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition, 2012: 61-65
- [45] NOORLANDT R, DRIJKONINGEN G, DAMS J, et al. A seismic vertical vibrator driven by linear synchronous motors[J]. Geophysics, 2015, 80(2): EN57-EN67
- [46] 姚恩超. 电磁式可控震源系统畸变分析与控制[D]. 长春: 吉林大学, 2014  
YAO E C. Distortion analysis and control of electromagnetic vibrator system[D]. Changchun: Jilin University, 2014
- [47] 马瑞琪. 电磁式可控震源锁相控制与广义预测控制方法[D]. 长春: 吉林大学, 2016  
MA R Q. Research on phase-locked control and generalized predictive control of electromagnetic vibrator[D]. Changchun: Jilin University, 2016
- [48] 贾超. 电磁式可控震源扫描信号自适应控制技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016  
JIA C. Study on adaptive control for electro-magnetic vibroseis sweeping signal[D]. Changchun: Jilin University, 2016
- [49] 陈鹏程. 相控可控震源控制系统的设计与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005  
CHEN P C. Study and design of control system of phased array vibroseis[D]. Changchun: Jilin University, 2005
- [50] 姜弢. 基于相控震源的地震波定向方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006  
JIANG T. Study on seismic beam-forming method based on phased-array vibrator system[D]. Changchun: Jilin University, 2006
- [51] KAIDA Y, MATSUBARA M, GHOSE R, et al. Very shallow seismic reflection method using a portable vibrator present status and future potential in application to characterization of an active fault[J]. Active Fault Research, 1996(15): 87-92
- [52] HAINES S S. Design and application of an electromagnetic vibrator seismic source[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2006, 11(1): 9-15
- [53] KRAWCZYK C M, POLOM U, BEILECKE T. Shear-wave reflection seismic as a valuable tool for near-surface urban applications[J]. The Leading Edge, 2013, 32(3): 256-263
- [54] BREWER K, CARTWRIGHT T, PUGIN A. The Microvibe, a new multi-component portable seismic vibrator[C]// Exploration Geophysicists and Environment and Engineering Geophysical Society. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2013. Colorado: Environmental & Engineering Geophysical Society, 2013: 786
- [55] DEAN T, NGUYEN H, KEPIC A, et al. The construction of a simple portable electromagnetic vibrator from commercially available components[J]. Geophysical Prospecting, 2019, 67(6): 1686-1697
- [56] NAMELESS. Lightning[EB/OL]. [2019-11-20] <https://seismic-mechatronics.com/seismic-sources>
- [57] YAMAOKA K, KUNITOMO T, MIYAKAWA K, et al. A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system[J]. Island Arc, 2001, 10(3/4): 336-347
- [58] 王洪体, 庄灿涛, 薛兵, 等. 精密主动地震监测[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1808-1815

- WANG H T, ZHUANG C T, XUE B, et al. Precisely and actively seismic monitoring[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1808-1815
- [59] 崔仁胜. 精密控制震源发射信号设计和信号提取方法研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2011
- CUI R S. Study on the design and signal extraction method of precise control source signal[D]. Beijing: CEA Institute of Earthquake Forecasting, 2011
- [60] 崔仁胜, 周银兴, 陈阳, 等. 精密可控震源非线性扫描信号优化设计[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(1): 117-124
- CUI R S, ZHOU Y X, CHEN Y, et al. Optimal design of nonlinear sweep signal of CASS[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(1): 117-124
- [61] 刘希康, 崔仁胜, 王洪体, 等. 用 Wigner-Hough 变换检测精密可控震源信号[J]. 地震, 2013, 33(3): 33-42
- LIU X K, CUI R S, WANG H T, et al. Detection of controlled accurate seismic source signal using Wigner-Hough transformation[J]. Earthquake, 2013, 33(3): 33-42
- [62] 张正帅. 基于时变窄带滤波技术提取可控震源扫频信号方法研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2015
- ZHANG Z S. Waveform retrieval from the CASS experiment based on time-varying narrow band-pass filtering technique[D]. Beijing: CEA Institute of Earthquake Forecasting, 2015
- [63] ISE T, TORII T, MORITA N, et al. Hydrostatic asymmetric journal gas bearings for largely unbalanced rotors of seismic ACROSS transmitters[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2007, 1(1): 93-101
- [64] ISE T, TORII T, MORITA N, et al. Hydrostatic asymmetric journal gas bearings for seismic ACROSS transmitters[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2007, 1(5): 681-689
- [65] 赵春蕾, 卢川, 郝天珧, 等. 高精度组合式轻便小型可控震源的研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3690-3698
- ZHAO C L, LU C, HAO T Y, et al. A study of the high-precision modular lightweight small vibrator[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3690-3698
- [66] 张凯. 精密可控震源勘探性能研究与结构优化[D]. 成都: 西南石油大学, 2018
- ZHANG K. Research on the performance of precision vibroseis exploration and structural optimization[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018
- [67] SAIGA A, YAMAOKA K, KUNITOMO T, et al. Continuous observation of seismic wave velocity and apparent velocity using a precise seismic array and ACROSS seismic source[J]. Earth, Planets and Space, 2006, 58(8): 993-1005
- [68] IKUTA R, YAMAOKA K, MIYAKAWA K, et al. Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(13): 51-55
- [69] NIU F, SILVER P G, NIGBOR R. Assessing the role of fluids in episodic tremor and slip events using active seismic sources: Results from a prototype experiment in Cascadia[J]. 2009 AGU Fall Meeting Abstracts, 2009; <https://abstractsearch.agu.org/meetings/2009/FM/S14A-06.html>
- [70] SOMA T, WATANABE T, IKUTA R, et al. Detection of reflected waves from plate boundary using ACROSS source and seismic array[J]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2005; <https://abstractsearch.agu.org/meetings/2005/FM/NG33B-0177.html>
- [71] IKEDA T, TSUJI T, NAKATSUKASA M, et al. Imaging and monitoring of the shallow subsurface using spatially windowed surface-wave analysis with a single permanent seismic source[J]. Geophysics, 2018, 83(6): EN23-EN38
- [72] 杨微, 葛洪魁, 王宝善, 等. 由精密控制人工震源观测到的绵竹 5.6 级地震前后波速变化[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1149-1157
- YANG W, GE H K, WANG B S, et al. Velocity changes observed by the precisely controlled active source for the Mianzhu Ms 5.6 Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(5): 1149-1157
- [73] 刘明辉, 彭朝勇, 周银兴, 等. 芦山震中区上地壳剖面二维波速结构模型反演[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(1): 69-78
- LIU M H, PENG C Y, ZHOU Y X, et al. Inversion of 2-D velocity structure model of upper crust section in the Lushan epicentral region[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(1): 69-78
- [74] 陶知非, 刘兴元, 王志杰. 可控震源低频能量激发在低频地震数据采集应用中的误区[J]. 物探装备, 2012, 22(4): 211-217
- TAO Z F, LIU X Y, WANG Z J. Pitfalls of vibroseis application in Low frequency seismic data acquisition[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2012, 22(4): 211-217
- [75] 陶知非, 苏振华, 赵永林, 等. 可控震源低频信号激发技术的最新进展[J]. 物探装备, 2010, 20(1): 1-5
- TAO Z F, SU Z H, ZHAO Y L, et al. The latest development of low frequency vibrator for seismic[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2010, 20(1): 1-5
- [76] 陶知非, 赵永林, 马磊. 低频地震勘探与低频可控震源[J]. 物探装备, 2011, 21(2): 71-76
- TAO Z F, ZHAO Y L, MA L. Low frequency seismic and low frequency vibrator[J]. Equipment for Geophys-

- ical Prospecting, 2011, 21(2): 71-76
- [77] BAGAINI C. Low-frequency vibroseis data with maximum displacement sweeps [J]. *The Leading Edge*, 2008, 27(5): 582-591
- [78] 马红伟, 潘远洲. AHV-IV 364 可控震源低频应用实例 [J]. *物探装备*, 2015, 25(4): 235-240  
MA H W, PAN Y Z. Application of seismic vibrator AHV-IV 364's low frequencies performance [J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2015, 25(4): 235-240
- [79] 陶知非. 低频地震激发中的能量问题 [J]. *物探装备*, 2018, 28(2): 71-73  
TAO Z F. Study on low frequency seismic energy [J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2018, 28(2): 71-73
- [80] 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
- [81] 吴多平, 顾文沛, 刘阳, 等. 低频可控震源在地球深部探测中的应用及效果 [C] // 中国石油学会. 2019 年物探技术研讨会论文集. 北京: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有限公司, 2019: 1613-1616  
WU D P, GU W P, LIU Y, et al. Application and effect of low frequency vibroseis in deep earth exploration [C] // Chinese Petroleum Society. Conference Proceedings of 2019 Annual Geophysical Technology Mtg. Beijing: China Academic Journal (CD) E-Magazine Co. Ltd, 2019: 1613-1616
- [82] 郭彦民. 利用可控震源进行高分辨率地震勘探 [J]. *中国煤田地质*, 1996, 8(3): 72-73, 77  
GUO Y M. High resolution seismic exploration with vibroseis [J]. *Coal Geology of China*, 1996, 8(3): 72-73, 77
- [83] 孙军和. 地震资料与可控震源激发参数间的关系 [C] // 中国地球物理学会. 2019 年油气地球物理学术年会论文集. 南京: 科学出版社, 2019: 276-279  
SUN J H. Relationship between seismic data and vibroseis excitation parameters [C] // Chinese Geophysical Society. Conference Proceedings of 2019 Annual Chinese Petroleum Geophysical Society. Nanjing: Science Press, 2019: 276-279
- [84] 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): 185-190  
XUE H F, DONG S H, TAO W P. Parameter selection in vibroseis seismic exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(2): 185-190
- [85] 李苏光, 蒋福友, 胡伟光. 碳酸盐岩出露区地震资料采集激发方式探讨 [J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(6): 717-721  
LI S G, JIANG Y F, HU W G. Study on seismic data collection method in carbonate area [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 35(6): 717-721
- [86] 张玉军, 田雪丰, 冷广昇. 可控震源在地震勘探激发条件复杂地区的应用 [J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(5): 108-112  
ZHANG Y J, TIAN X F, LENG G S. Application of vibrator in the region with complex seismic excitation conditions [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(5): 108-112
- [87] 吴曲波, 潘自强, 李子伟. 砂岩型铀矿地震勘探中可控震源激发参数试验 [J]. *铀矿地质*, 2016, 32(6): 371-375  
WU Q B, PAN Z Q, LI Z W. Parameter test of vibroseis seismic exploration for sandstone-type uranium deposits [J]. *Uranium Geology*, 2016, 32(6): 371-375
- [88] 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
- [89] 孙跃龙. 可控震源勘探施工参数对谐振的影响 [J]. *石化技术*, 2017, 24(5): 101-102  
SUN Y L. Effect of construction parameters of vibroseis on resonance [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2017, 24(5): 101-102
- [90] 刘小峰, 槐永军, 刘会林, 等. 根据工区地表条件确定合适的可控震源驱动幅度 [J]. *物探装备*, 2018, 28(6): 399-403  
LIU X F, HUAI Y J, LIU H L, et al. How to determine the appropriate driving level of vibroseis according to the surface conditions of the work area [J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2018, 28(6): 399-403
- [91] 李学军. 我国城市物探的应用与发展 [J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(6): 2221-2231  
LI X J. Applications and development of city geophysical prospecting in China [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(6): 2221-2231
- [92] 王中圣. 可控震源在城市工程物探应用中的抗噪声分析与实验 [C] // 中国地球物理学会. 2016 年中国地球科学联合学术年会论文集. 北京: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有限公司, 2016: 23-26  
WANG Z S. Anti-noise analysis and experiment of vibroseis in urban engineering geophysical prospecting [C] // Chinese Geophysical Society. Conference Proceedings of 2016 Annual Chinese Geoscience Union. Beijing: China Academic Journal (CD) E-Magazine Co. Ltd, 2016: 23-26
- [93] 聂明涛. UNIVIB 可控震源在复杂城区勘探中的应用 [J]. *物探装备*, 2017, 27(6): 360-363, 368  
NIE M T. Application of UNIVIB vibroseis in complex



- urban exploration[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2017, 27(6): 360-363, 368
- [94] 丁美青, 胡泽安, 李建宁, 等. 城市地下断裂构造可控震源地震勘探试验研究[J]. *物探化探计算技术*, 2017, 39(4): 565-572  
DING M Q, HU Z A, LI J N, et al. Experimental study on vibroseis seismic exploration in urban underground fault structure[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 39(4): 565-572
- [95] 马董伟. 地震勘探方法在薄覆盖层区城市活断裂探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2019, 43(5): 1038-1045  
MA D W. The application of seismic exploration method to active faults detection in urban thin overburden area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(5): 1038-1045
- [96] 孙明, 林君. 高分辨率轻便可控震源系统实现评价城市地质隐患[J]. *物探与化探*, 2009, 33(4): 440-443, 457  
SUN M, LIN J. The assessment of civil hidden damage using a high-resolution portable electromagnetic vibrator seismic source [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 33(4): 440-443, 457
- [97] 李万伦, 田黔宁, 刘素芳, 等. 城市浅层地震勘探技术进展[J]. *物探与化探*, 2018, 42(4): 653-661  
LI W L, TIAN Q N, LIU S F, et al. Progress in the study of shallow seismic exploration technology in urban areas [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(4): 653-661
- [98] TENGHAMN R. An electrical marine vibrator with a flex tensional shell [J]. *Exploration Geophysics*, 2006, 37(4): 286-291
- [99] 孙锋. 海洋电磁式可控震源关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009  
SUN F. Study on key technique of marine electromagnetic vibrator [D]. Changchun: Jilin University, 2009
- [100] 孙锋, 陈祖斌, 林君. 海洋电磁式可控震源信号扫描方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2009, 39(2): 536-540  
SUN F, CHEN Z B, LIN J. Sweep technique of electrical marine vibrator [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2009, 39(2): 536-540
- [101] FELTHAM A, GIRARD M, JENKERSON M, et al. The marine vibrator joint industry project: Four years on [J]. *Exploration Geophysics*, 2018, 49(5): 675-687
- [102] LAWS R M, HALLIDAY D, HOPPERSTAD J F, et al. Marine vibrators: The new phase of seismic exploration [J]. *Geophysical Prospecting*, 2019, 67(6): 1443-1471
- [103] TENGHAMN R. Control system for marine vibrators and seismic acquisition system using such control system: US, 7974152B2 [P]. 2011-07-05
- [104] SOERNMO O, BERNHARDSSON B, KROELING O, et al. Frequency-domain iterative learning control of a marine vibrator [J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 47(2): 70-80
- [105] DUNCAN A J, WEILGART L S, LEAPER R, et al. A modelling comparison between received sound levels produced by a marine vibroseis array and those from an airgun array for some typical seismic survey scenarios [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119(1): 277-288
- [106] PRAMIK B. Marine vibroseis: Shaking up the industry [J]. *First Break*, 2013, 31(11): 67-72
- [107] KUSANO T, YATABE K, OIKAWA Y. Localization of marine seismic vibrator based on hyperbolic Radon transform [J]. *Acoustical Science & Technology*, 2018, 39(3): 215-225
- [108] LONG A, TENGHAMN R. Marine vibrator concepts for modern seismic challenges [J]. 2018 Australasian Exploration Geoscience Conference Expanded Abstracts, 2018: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1071/ASEG2018abW92A>

(编辑: 朱 珠)