2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):1988-2011
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

聂明涛,齐永飞,王井富,等.2026.可控震源地震勘探采集处理技术进展.地球物理学进展,41(5):1988-2011,doi:10.6038/pg2026JJ0401.
NIE MingTao,QI YongFei,WANG JingFu, *et al*. 2026. Advances in vibroseis seismic acquisition and processing technology. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):1988-2011,doi:10.6038/pg2026JJ0401.

可控震源地震勘探采集处理技术进展

Advances in vibroseis seismic acquisition and processing technology

聂明涛[1,2],齐永飞[1,2],王井富[1],宁宏晓[1],周恒[1],刘洋[2*]
NIE MingTao[1,2],QI YongFei[1,2],WANG JingFu[1],NING HongXiao[1],ZHOU Heng[1],LIU Yang[2*]

1. 中国石油集团东方地球物理公司,河北涿州 072750
2. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249
1. *BGP*,*CNPC*, *Zhuozhou Hebei* 072750, *China*
2. *National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*

摘 要 可控震源是石油工业陆上地震勘探核心激发源之一,具有频带、能量可控,绿色环保,安全高效的特点.2024 年"陆上宽频宽方位高密度地震勘探关键技术与装备"荣获国家技术发明奖一等奖,可控震源地震勘探采集技术作为其核心技术,具有广阔的应用前景.本文从可控震源研发历程和工作原理入手,梳理了可控震源信号设计和高效采集作业方法进展,并介绍了配套施工技术和数据处理技术,最后结合可控震源地震勘探采集技术的优势和局限,对未来发展方向做出了展望.

关键词 地震勘探;可控震源;信号设计;高效采集;谐波干扰;TD 规则;分频扫描

中图分类号 P631
文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026JJ0401
CSTR:32085.14.pg2026JJ0401

Abstract The vibroseis is one of the core seismic sources for onshore seismic exploration in the petroleum industry, characterized by controllable bandwidth and energy, environmental friendliness, and safety and efficiency. In 2024, the "Key Technologies and Equipment for Onshore Wideband, Wide-Azimuth, and High-Density Seismic Exploration" was awarded the First Prize of National Technology Invention Award, with the vibroseis seismic exploration acquisition technology as its core technology, which has a broad application prospect. This paper starts with the development history and working principle of the vibroseis, sorts out the progress of the vibroseis signal design and efficient acquisition operation methods, introduces the supporting operation and data processing technologies, and finally makes a prospect for the future development direction in combination with the advantages and limitations of the vibroseis seismic exploration acquisition technology.

Keywords Seismic exploration; Vibroseis; Signal design; Efficient acquisition; Harmonic interference; TD rules; Frequency division sweep

0 引 言

地震勘探作为石油天然气工业探测体系的重要手段,对资源战略储备与开发指导具有重要意义.决定地震采集资料品质的激发、接收和观测系统三个因素中,激发信号品质是决定采集资料品质的基础.

收稿日期 2025-12-01; **修回日期** 2026-05-09. **投稿网址** http://www.progeophys.cn
基金项目 中国石油集团项目"多物理场高精度油气地球物理探测技术与装备研究"(2023ZZ05)之课题"全波场地震采集理论、关键技术与核心装备"资助.
第一作者简介 聂明涛,男,1983 年生,博士研究生,高级工程师,主要从事可控震源高效采集作业方法和质量控制方法研究.E-mail:niemingtao@bgp.com.cn
***通讯作者** 刘洋,男,1972 年生,博士,教授,主要从事地震模拟与成像、多分量地震、人工智能地震资料处理与解释等方面的研究工作.E-mail:wliuyang@vip.sina.com

截止到2024年底,可控震源采集工作量已经占东方地球物理公司(BGP)总工作量的50%,可控震源逐渐成为取代井炮的关键激发方式;在中东沙特、阿曼、阿联酋等作业区,可控震源实施总工作量达到陆上勘探项目的100%,成为绝对主流激发作业方法.可控震源地震采集技术主要面对两方面的矛盾,一是可控震源自身性能和油公司勘探需求之间的矛盾;二是资料品质和施工作业效率之间的矛盾.

尽管可控震源地震勘探采集处理技术的重要性日益凸显,但目前针对该领域的系统性研究梳理仍显不足.一方面,现有文献多集中于技术细节的探讨,缺乏对可控震源研发历程、工作原理、信号设计、高效采集作业方法以及配套施工技术和数据处理技术的系统性整合.这使得初涉该领域的学生或从业者难以快速掌握核心技术要点,而资深从业者也难以从整体上把握技术进展的全貌.另一方面,国内外在可控震源应用上的差异尚未得到充分关注,不同地区的地质条件、勘探需求和技术发展水平对可控震源地震采集技术的影响缺乏深入分析.此外,对于技术未来发展方向的展望也较为零散,缺乏系统性和前瞻性的整合视角.

可控震源地震采集技术的进展,通过压缩震源组间时间间隔,提出施工新方法,带来了施工效率不同程度的提升.效率提升的同时,采集原始资料品质产生新的挑战,如多台组合激发变单台点激发、多次扫描变单次扫描都不同程度的降低了原始单炮信噪比,需要联合高密度和高覆盖提高成像效果;另外,组间谐波和邻炮干扰的影响,需要通过提高配套处理技术来消除或降低对资料的影响.施工效率与资料品质处于数据采集天平的两端,技术进步不断提出创新解决方案,实现在保障资料品质的前提下提升作业效率,实现油公司和地震勘探分包商的双赢,带来可控震源地震采集技术的进展(佟训乾等,2012;魏铁等,2012;马永生等,2016;王海波等,2019;宁宏晓等,2019).

本文从可控震源研发历程和工作原理入手,梳理了可控震源信号设计和高效采集作业方法进展,并介绍了配套噪声压制技术、观测系统优化技术等,最后结合可控震源地震采集处理技术的特点,对未来发展方向做出了展望.

1　可控震源简介

可控震源是一种人工地震震源激发装置,按照产生动力源划分主要有电火花可控震源、落锤式可控震源、电磁驱动可控震源和液压式可控震源.前三种主要应用于VSP测井、工程勘察或者浅层地震勘探,本文所述可控震源主要指用于较深目的层石油天然气勘探领域的大吨位液压式可控震源.

1.1　研发历程

20世纪50年代,美国康菲石油公司克劳福德等人率先研发并将连续振动激发源用于地震勘探,开创了可控震源应用的先河(图1).图2是康菲石油公司克劳福德等人研发的世界上第一台可控震源,它采用的是偏心转动原理设计制造的.该研发团队在1967年研发出第一台液压伺服系统驱动的可控震源,出力在13 kN到19 kN之间,这是当代液压式可控震源的雏形,克劳福德也被誉为"可控震源之父".



图1　康菲公司可控震源研发团队(Wei *et al*., 2024)

Fig. 1　ConocoPhillips vibrator R&D team (Wei *et al*., 2024)

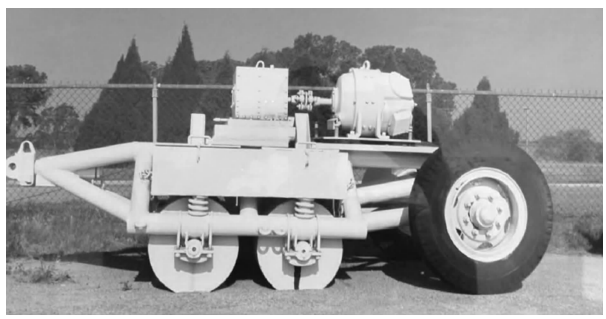


图2　世界上第一台可控震源(Wei *et al*., 2024)

Fig. 2　The world's first vibroseis (Wei *et al*., 2024)

截止到2025年底,全球只有INOVA Geophysical(BGP独资控股子公司)、Sercel(法国的赛舍尔公司)和BGP三家公司从事液压式可控震源的设计和生产制造.INOVA公司AHV系列震源和Sercel公司的Nomad系列震源几乎占居了整个可控震源采集的国际市场,而东方地球物理公司研发的可控震源主要占居着国内陆地勘探市场.表1是各可控震源制造商相关产品的主要研发历程.

表 1 各震源生产制造商主要开发历程

Table 1 Main development History of different vibroseis manufacturers

厂商	Sercel		BGP		INOVA	
年份	产品名称	出力等级	产品名称	出力等级	产品名称	出力等级
1987	—	—	KZ13		—	—
1991	—	—	KZ20	187 kN	—	—
1995	—	—	—	—	AHV-III PLS-362	267 kN
1996	—	—	—	—	AHV-IV PLS-362	267 kN
1998	Mertz 26HD	27 kN	KZ28	267 kN	—	—
2000	—		—	—	XVIB PLS-362/380	267 /356 kN
2002	Nomad 65	267 kN	—	—	—	—
2004	Nomad 90	400 kN	—	—	—	—
2006	—	—	—	—	AHV-IV PLS-380	356 kN
2008	—	—	KZ34	400 kN	—	—
2009	—	—	—	—	AHV-IV PLS-364	267 kN
2011	—	—	—	—	UniVib PLS-326	116 kN
2012	—	—	KZ28LF	267 kN	—	—
2013			BV620LF	267 kN		
2014	Nomad65 Neo	267 kN	—	—	—	—
2015	Nomad90 Neo	400 kN	—	—	—	—
2016	—	—	EV56	267 kN	—	—
2017	—	—			UV2 PLS-334	151 kN
2018	—	—	—	—	TIAN PLS-480	267 /356 kN
2023	—	—	EV (S) 60	267 kN		
2024	—	—	EV80	356 kN		



图 3 各生产制造商代表性可控震源

(a) Nomad65 Neo; (b) EV56; (c) AHV-IV PLS-364.

Fig. 3 Representative vibroseis of main Manufacturers

各震源制造商先后推出过 356 kN 和 400 kN 级的可控震源,由于 267 kN 级可控震源能够满足当前多数油公司勘探任务的需求,在性能和成本之间取得了较好的平衡,因此目前仍占据主导地位. 然而,随着超深层勘探需求的日益增加以及震源相关技术的持续进步,大吨位震源的研发与应用展现出巨大的潜力,2025 年 EV80 大吨位可控震源已成功入选“2025 年度中国石油十大科技进展”.

图 3 是三家厂商 267 kN 级可控震源中的主流产品,表 2 是主要技术指标对比.

表 2 可控震源主要技术指标对比

Table 2 Comparison of main technical specifications of different vibroseis

震源型号	Nomad65 Neo	EV56	AHV-IV PLS-364
峰值出力(kN)	278	249	275
静载压重(kg)	28,294	32,620	28,143
额定频率(Hz)	1 ~ 250	1.5 ~ 160	1 ~ 250
全流量起始频率(Hz)	5.4	3	6
长度(m)	10.64	10.13	10.01
宽度(m)	3.42	3.38	3.4
高度(m)	3.22	3.6	3.5
重锤/平板质量比	3.01	2.9	2.47

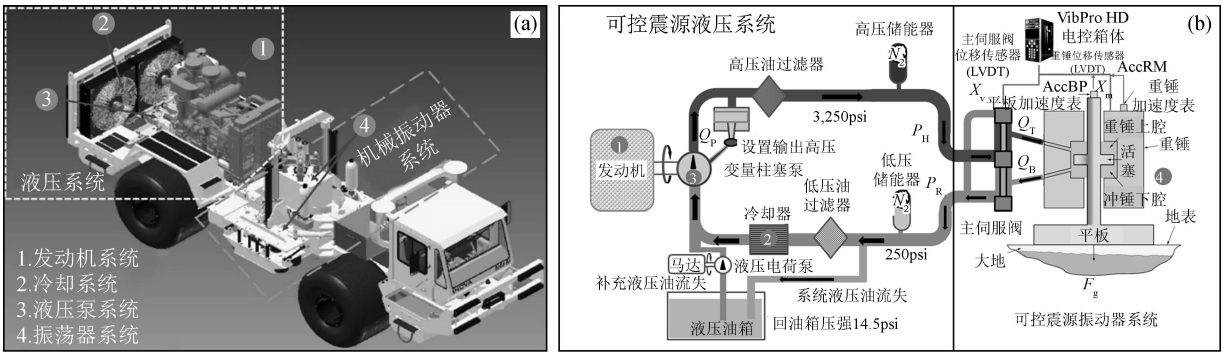


图 4　可控震源系统组成和工作原理(魏周宏等,2015)

(a)系统结构组成;(b)工作原理示意图.

Fig. 4　The composition and working principle of the vibroseis (Wei *et al*.,2015)

(a) Composition of vibroseis system; (b) Schematic diagram of the working principle.

从表 2 看三款可控震源主要参数对比,车体大小和静载压力差异不大,EV56 的全流量起始频率 3 Hz,明显优于另外两款可控震源.

1.2　工作原理

可控震源激发是一个根据地球物理勘探需求设定扫描信号输入,在电子控制系统(箱体)的总控下,以发动机和液压系统为振动源驱动力,以机械振动系统为支撑,输出力的一个过程. 图 4 是可控震源系统组成和工作原理示意图(魏周宏等,2015),可控震源的核心运行机制涉及电控箱体与机械振动系统的协同作业,二者分别承担控制指令生成与机械动作执行的功能.

可控震源连续扫描振动技术能够在地球物理行业取得成功应用的一个重要的原因,就是相关技术的引入和应用. 相关技术最早引自二战期间广泛应用在雷达技术中的相关(Correlation)概念(Lee and Wiener,1950),促成了可控震源的诞生和蓬勃发展(Laing,1989). 连续扫描和相关技术决定瞬时峰值功率远低于炸药,可控震源是一种高能量、低密度激发源.

图 5 上是一个 2 ~ 12 Hz、扫描长度 4 s 的线性升频先导信号(Pilot);图 5 中是检波器接收到的原始信号(蓝色)和反射序列(红色),地层反射序列被表征为具有不同振幅和极性先导信号的复刻信号(即先导信号与反射序列的褶积);图 5 下是参考信号(Reference)与原始信号进行相关后的结果(蓝色),(Dean,2016). 从图 5 下中,地层的各个反射序列对应可控震源相关后地震记录中的波峰. 针对有线仪器施工时,数据采集过程中的相关工作由安装在仪器车上的相关器完成;采用节点仪器施工时,相关工作在室内数据下载合成过程中完成. 相关主要是把野外采集的原始信号与编码器真参考信号做互相关,从而压缩原始信号得到与脉冲激发源等效的原始单炮记录(倪宇东等,2011),图 6 是常见可控震源采集各地震数据(信号)展示.

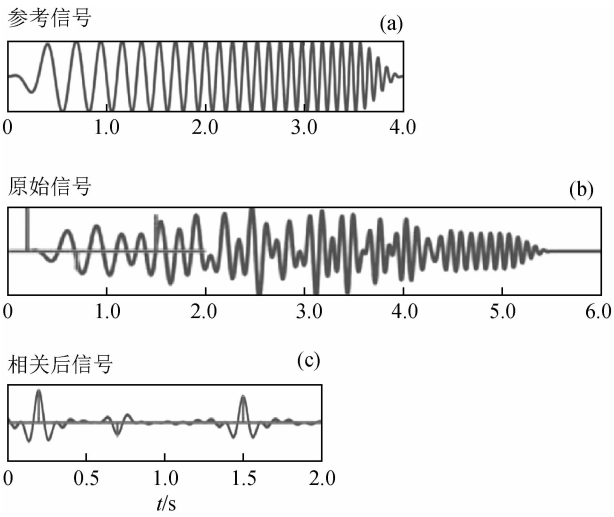


图 5　相关数据表征地层反射序列示意图(Dean,2016)

Fig. 5　Schematic diagram of correlated data reflection sequences (Dean,2016)

1.3　优劣势分析

可控震源具有安全、环保、输出信号可控等特点,通过连续扫描振动取代炸药等脉冲震源的瞬时高能激发. 与传统炸药激发源相比,可控震源具有以下优势:1)在城区、村庄、农田等工农业设施密集区域具有更好适用性;2)可控震源信号可控的优势,可以通过多种类型的高效作业方法提高作业效

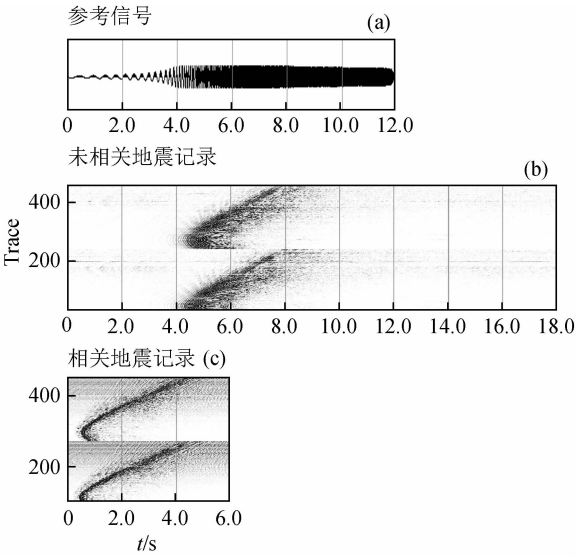


图 6 可控震源采集地震数据展示

Fig. 6 Example of acquired data with vibroseis

率;3)可以根据地质任务的需要,用户自定义信号设计激发能量、扫描频率范围以及子波类型等;4)单炮作业成本低,是炸药成本的 1/10 甚至更低,所以能够支撑更高覆盖次数观测方案的实施,图 7 所示国内某探区对比剖面表明,在与高覆盖、宽方位观测系统联合应用下,可控震源资料对河道砂体的分辨率显著优于井炮.

可控震源作为一种激发源也存在一些不足之处:1)工作的同时产生强机械振动和与地表响应产生的谐振干扰,可能会造成小偏移距资料信噪比降低;2)采用高效采集模式生产时,不同震源组之间谐波和邻炮干扰噪声,需要开展专门的处理方法,增加了处理的工作量;3)采集单炮信噪比低,尤其在沙漠、黄土塬等地表吸收衰减严重地区,单炮信噪比影响更为严重.需要大幅度增加激发点密度,来改善剖面品质,一定程度上增加了作业的难度;4)由于可控震源重量大,物理尺寸大,爬坡能力受限,在很多复杂地表区施工受限,需要其他激发方式进行补充和配合.然后,上述不足中除地形限制外,其他均对可控震源推广应用构成不了致命限制,可通过针对性压噪技术降低各种特有噪声的影响(下文详述),通过高覆盖弥补单炮信噪比低的问题,达到获得高品质的地震剖面目的.

2 热点问题研究进展

地层对高频成分具有更严重的吸收衰减,获得高频信息相对难度较大;同时,低频信息具有穿透力强,相对稳定、传播距离远、计算量小等优点,在识别特殊岩性体,薄储层和全波形反演中起到至关重要

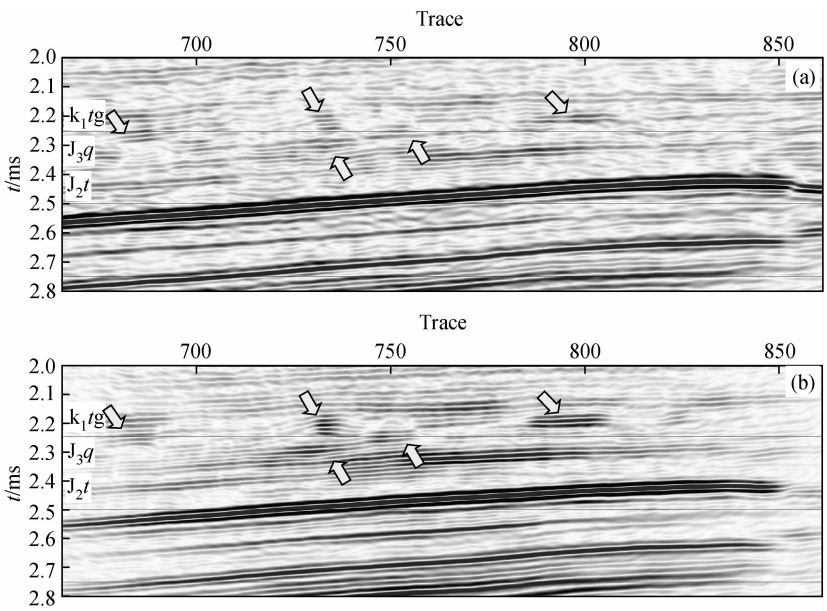


图 7 国内某探区井炮和可控震源采集叠前时间剖面对比

(a)井炮(20L6S192R,25 m×25 m,120 次);(b)可控震源(40L4S246R,12.5 m×12.5 m,400 次).

Fig. 7 Comparison of PSTM stack with explosive and vibroseis

(a) Explosive source (20L6S192R, 25 m × 25 m, 120 times); (b) Vibroseis source (40L4S246R, 12.5 m × 12.5 m, 400 times).

的作用. 低频信息越丰富,地震反演的精度、深层成像质量、准确度、垂向分辨率都会有不同程度的改善(陶知非等,2011).

在高原冻土区,进行低频激发攻关试验,剖面波组特征更加清楚,资料信噪比较以往有较大提高(李桂林等,2019);在柴达木盆地尖顶山地区,利用低频激发技术,精细刻画了小断层及基岩成像,为薄互层油气藏的宽频带处理及方位各向异性的研究提供了有力支撑(周锦钟等,2020);在超深储层油气勘探中,基于低频激发加上超深储层广角反射采集技术,针对复杂表层结构和地下地质构造地区,有效提高了地震资料信噪比,使深层构造清晰呈现,显著改善了成像效果(苏海等,2023);此外,在二连盆地地表零散、破碎、粗糙、不规则的火成岩覆盖区,以低频勘探为基础系列技术的应用,使得新采集的地震数据反射波清楚,地质现象清晰,成像质量有很大提高(王瑞贞等,2020). 这些研究表明,低频信息在不同地质区域的勘探中均取得了显著进展,以低频激发为核心技术的"两宽一高"地震勘探技术支撑深层、复杂构造、地层岩性和非常规储层等高难领域的油气勘探成功率提高 15 ~ 40%,主导发现塔里木 7500 m 深层、准噶尔环玛湖岩性油藏、鄂尔多斯庆城非常规、四川页岩气等 3 个 10 亿吨级油田及 4 个万亿方大气区等一系列重大突破,为保障国家能源安全做出重大贡献.

2.1　EV56 高精度震源

我国在 70 年代引入这项技术,并在 20 世纪 80 年代初由 BGP 生产出 KZ13 可控震源. 从 2012 年开始 KZ28LF 和 LFV3 可控震源先后推出和产业化应用,到 2016 年 EV56 高精度可控震源的亮相,国产可控震源的研发,经历了三代人、40 多年的付出和不懈努力;走出了一条从引进、吸收到全自主研发,实现了该项技术从跟跑、并跑到领跑的创新超越之路,成为中国石油科技创新自立自强的杰出代表和重要标志.

2012 年,低频可控震源项目被列为"国家 863 计划",BGP 推出 KZ28LF 可控震源填补了国内低频激发技术的空白;KZ28LFV3 可控震源在 KZ28LF 的基础上,低频性能和稳定性得到进一步优化,实现了低至 1 Hz 的有效地震波激发输出,全频带输出的能力得到加强;EV56 高精度可控震源实现激发信号从 3 ~ 100 Hz 拓展到稳定的 1.5 ~ 160 Hz,形成高精度可控震源技术和高精度可控震源结构两大系列五项关键核心技术,推动了我国可控震源装备技术全面升级换代(陶知非等,2011; 陶知非, 2017, 2022).

为了解决可控震源激发信号随输出能量增加而变大的畸变水平,BGP 陶知非领衔的研究团队在低畸变 KZ28 可控震源的基础上,先后研发设计了降低重力影响的横置伺服阀、降低震动器对激发介质影响的等张力平板提升机构、降低震动机构晃动的低重心振动器结构、提高/改善与地面耦合效果的四导柱压载结构及改善矩形板边角干涉的圆角平板等技术,来调整振动信号在激发过程中的约束条件,达到改善输出畸变水平目的. 同时,在 EV56 高精度可控震源的研发中,技术人员根据可控震源在激发信号过程中的运动学模型和近地表的土壤动力学模型,尝试用变阻尼的方式降低低频固有频率对激发信号低频端的扰动影响,提高低频地震信号激发过程中的稳定性,使低频地震信号的有效成分得到明显改善(陶知非,2018).

如图 8 是低频可控震源不同起始扫描频率下底层速度反演的结果,可见 1.5 ~ 4.5 Hz 信息在 FWI 过程中起到了非常关键的作用. 另外,由于低频穿透能力强,对深层火成岩成像、低信噪比的山前带和岩下构造成像等方面均取得重大突破(陶知非等,2016).

图 9 中使用 EV56 高精度可控震源在中国东部复杂地表区采集资料时间切片. 通过二次采集资料与 EV56 采集资料的切片对比,可以明显发现,使用 EV56 新采集的资料在断裂归位的准确性方面较二次采集资料有了显著提升,呈现的断裂组合也更为合理,断块识别能力得到了显著增强(苏世龙等,2019).

EV56 高精度可控震源的诞生,开启了"两宽一高"高精度地震勘探的新时代,成为油气勘探开发的新利器,截止到 2022 年底时已累计制造了 130 多台,应用于国内外 300 多个地震勘探采集项目,推动了世界可控震源地震采集技术的进展,同时,为保障我国能源安全做出了重大贡献(陶知非,2022). EV56 高精度可控震源的成功研发和国内各探区的推广应用,实现了物探核心装备国产化,推动了我国地震勘探技术的升级换代,实现了由落后欧美 5 ~ 10 年到全球领先的重大跨越.

2.2　信号设计研究进展

可控震源扫描信号主要分线性和非线性两种方式,线性扫描分为线性升频(图 10a)和线性降频(图 10b);非线性扫描主要包含对数、指数扫描、用户自定义(图 10c)和伪随机(图 10d)四种方式. 指数和

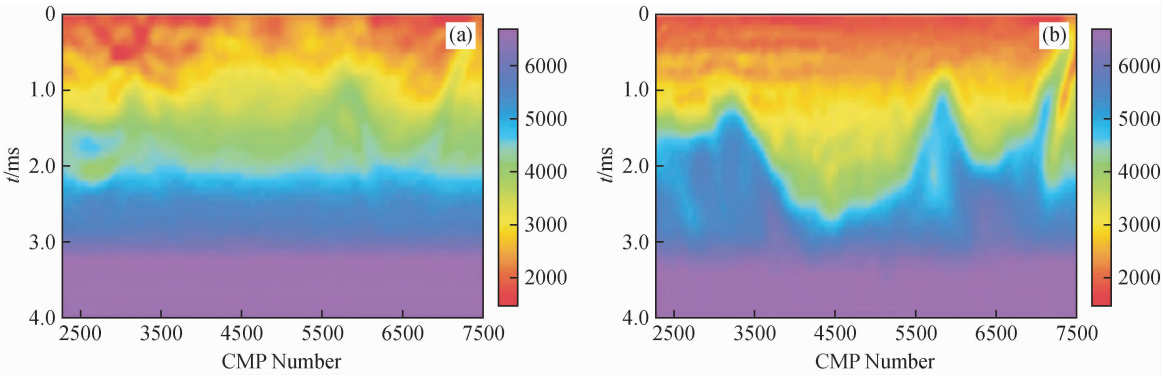


图 8 不同初始频率下地层速度反演的结果(陶知非等,2016)

(a)初始频率 4.5 Hz;(b)初始频率 1.5 Hz.

Fig. 8 Velocity inversion result with different initial frequencies (Tao *et al*., 2016)

(a) From 4.5 Hz; (b) From 1.5 Hz.

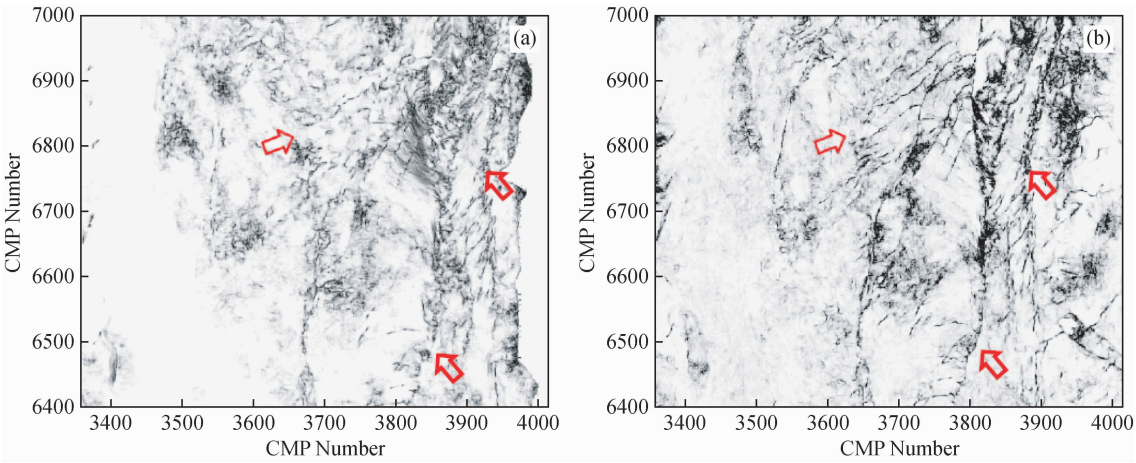


图 9 新老资料相干属性对比(苏世龙等,2019)

(a)二次采集资料(700 ms);(b)EV56 震源采集资料(700 ms).

Fig. 9 Comparison of coherence attributes of old and new data (Su *et al*.,2019)

(a) Re-acquired data(700 ms); (b) Acquired data with EV56(700 ms).

对数扫描信号频率随时间的变化呈现指数或对数函数关系,在补偿地层吸收衰减、增加特定频段(如低频、高频)能量,改善资料整体信噪比和分辨率方面虽然具有一定的优势,但在生产应用中相对较少(柴童等,2018). 线性升频扫描信号是可控震源技术发展早期便被广泛采用的一种扫描方式,因其信号频率随时间线性增加、振幅相对稳定,具有设计简单、易于实现、数据处理方便等优点,长期以来一直是可控震源地震勘探中最常用的扫描类型之一(邱庆良等,2021). 近年来,用户自定义扫描和伪随机扫描在地球物理勘探应用研究中受到了较多关注.

2.2.1 用户自定义信号设计

为了满足油公司低频或者宽频激发要求,一般施工起始频率设置为 1.5 Hz. EV56 可控震源通过硬件优化设计改造达到国际领先水平,可以实现全流量下 1.5 ~ 160 Hz 的低畸变线性扫描. 使用常规可控震源作为“两宽一高”地震采集技术配套的宽频信号激发,尤其是低频激发时,在拓展低频频带和控制激发信号谐波畸变方面都会遇到很大的挑战. 常规可控震源全流量标称最低扫描频率一般在 5 ~ 6 Hz,而实际远高于此. 图 11 展示的是根据震源重锤行程和震动泵流量限制计算得出的几款主要可控震源的低频输出特性曲线,曲线表示震源在低频段各个频率点上的最大理论输出能力. 常规可控震源采用用户自定义扫描信号激发成为一种有效的解决方案. 采用用户自定义扫描信号设计,通过低频驻波技术延长低频段扫描时间,使用常规可控震源标准振动器在弱动力模式下产生足够的低频信号,避免

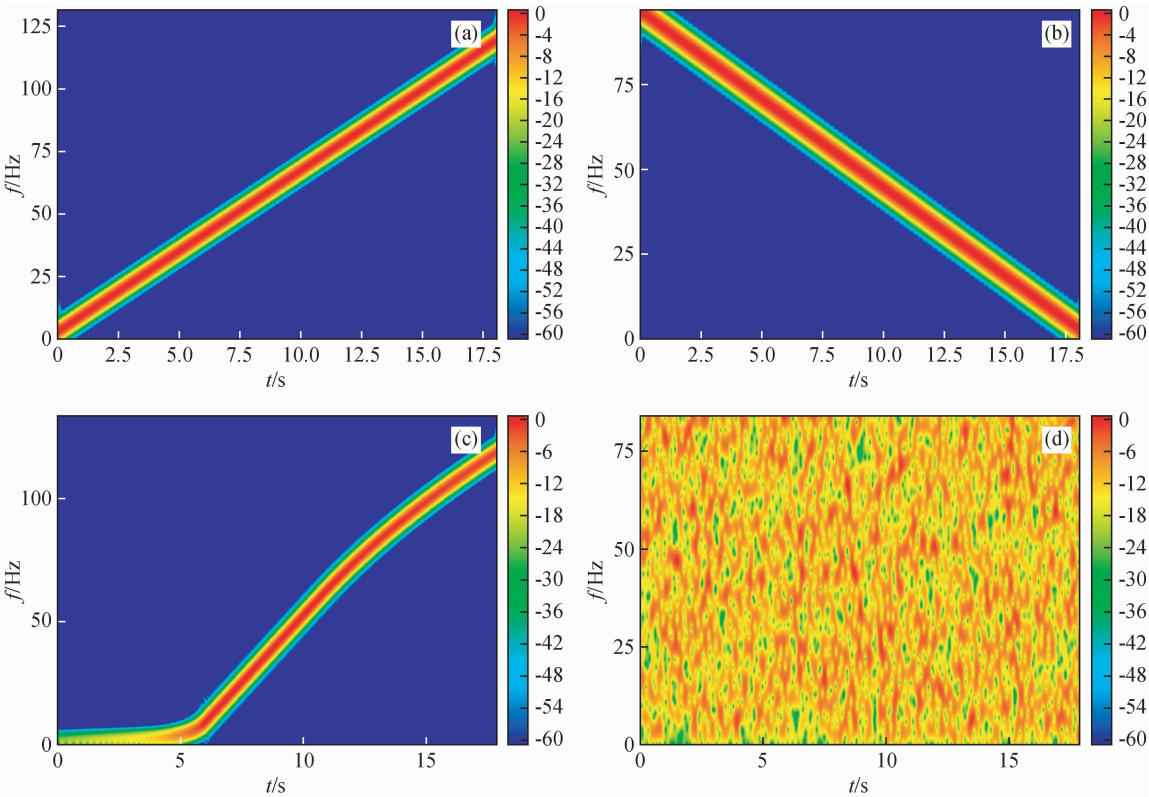


图 10　不同扫描信号时频谱

(a)线性升频;(b)线性降频;(c)用户自定义;(d)伪随机.

Fig. 10　Frequency spectrum of different sweep signals

(a) Linear upsweep; (b) Linear downsweep; (c) Custom sweep; (d) Pseudo-random sweep.

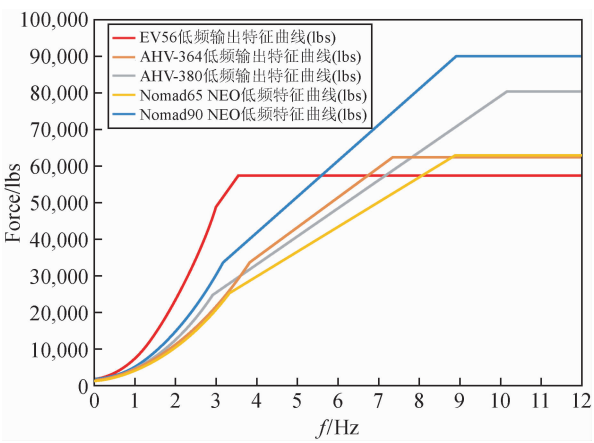


图 11　不同可控震源低频输出特征曲线(魏铁等,2024a)

Fig. 11　Low frequency output characteristic curves of common vibrators (Wei *et al.*,2024a)

对可控震源自身造成破坏.

地球物理从业者们针对拓展低频、优化信号品质方面的研究工作从未停止,按照研发时间大致分为四个阶段. 2006—2010 年线性补偿阶段:Bagaini(2006)提出通过分析震源振动器特性,确定驱动反应质量所需的驱动力;Bagaini(2008)提出 MD-Sweep 技术,以 Sallas 模型为基础,在不超可控震源最大位移的基础上优化出力功率谱密度;Baeten(2014)提出一种通过将信号分成线性和非线性扫描两部分实现加强低频成份方法. 2012—2016 年数据驱动拟合阶段:陶知非等(2015)提出采用等频信号,逐渐增加震源出力,并使用最小二乘法对实测的震源低频样点实际输出最大出力进行拟合,确定可控震源低频输出曲线;于富文等(2015)提出频率域低频能量补偿的非线性低频扫描信号的设计方法;Castor 等(2017)通过对初始扫描信号进行噪声分量修正的方法,减小先导信号的噪声畸变. 2017—2020 年的子波优化联合设计阶段:张剑等在 2017 年提出根据目标区频带要求设置阻尼雷克子波的参数,进而进行扫描信号设计的方法;崔宏良等在 2017 年通过可控震源子波正演的方法评价不同扫描信号优劣;张慕刚等(2019)提出通过高频限幅的方式实现减少畸变的目的;张剑等(2020)根据震源低频段机械限制和高频段大地截止频率响应,获得出力曲线,结合勘探区频率要求,对曲线进行优化获

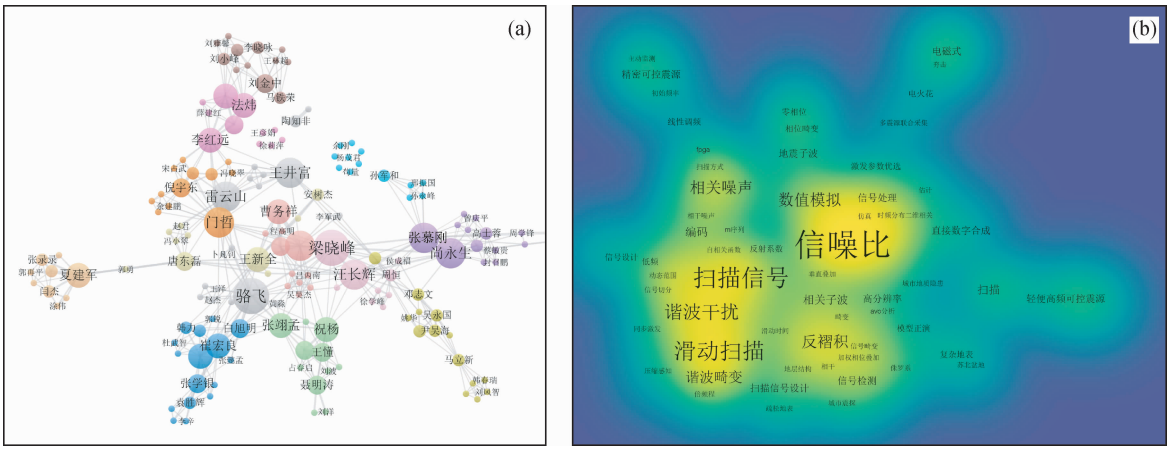


图 12 用户自定义信号设计领域成果分析

(a)中国石油相关专利发明人图谱;(b)信号设计研究成果关键词热力图.

Fig. 12 Achievements analysis in the field of customer signal design

(a) Patent inventors graph of CNPC; (b) Heatmap of keywords in the signal design domain.

得低畸变扫描信号. 2021—2025 年的谐波消除和智能优化阶段:曹国滨等(2024)提出通过将分离的谐波信号进行 180 度相位旋转后与原基波信号合并的方法,获得一种谐波压制扫描信号;骆飞等(2021)提出应用离散余弦变换的去谐波扫描信号设计方法;徐雷良等(2022)提出基于阻尼雷克子波的可控震源非线性扫描信号设计方法;聂振波等在 2025 年提出基于定制高分辨率子波来设计方法,可控震源扫描信号的可行性,通过正演和偏移模拟验证可以提高资料的分辨率;聂明涛等(2025)提出一种提高资料优势频段能量的信号设计方法,经生产应用验证是一种能够有效优化采集资料频谱的方法. 上述研究者所提出的可控震源用户信号设计方法,在补偿低频、优化子波形态或者补偿资料频谱方面取得了很好的效果,部分在生产采集中得到工业化推广应用,推动了常规可控震源高品质低频信号设计与应用技术的推广应用.

鉴于该领域研究成果丰富多样、呈百家争鸣之势,受篇幅限制本文仅列举了部分作者的重要贡献. 图 12a 是 BGP 近 20 年来在信号设计相关领域已有相关专利的主要发明人图谱,其中骆飞在该领域有 6 项发明专利,张慕刚、门哲、雷云山等拥有 5 项发明专利,为 BGP 在该领域进展做出了很大贡献. 图 12b 信号设计研究领域关键词热力图,可知:用户自定义信号设计研究热点主要集中在通过优化扫描信号或者子波,压制谐波干扰、提高资料分辨率和信噪比方面. 为更清晰地呈现自定义信号设计技术的最新进展,下文将聚焦几类代表性方法,系统展示其实际应用成效.

Sallas(1984)首次系统阐明了震源液压-机械系统的非线性谐波机制,为后续谐波控制技术的研究奠定了理论基础. CGG 和 Sercel 分别在 2014 年及 2019 年 SEG 年会上提出 Clean Sweep 和 Smart LF (low frequency)技术. Clean Sweep 技术通过向扫频导引信号中添加一个反失真信号(从地面力计算得出的 180°相移失真),类似于主动降噪耳机的工作原理,从而减少谐波噪声,Clean Sweep 技术不仅在低频段提供了出色表现,并压制各阶谐波噪声都取得很好的效果(图 13). Smart LF 技术嵌入在振动器电子设备中,适用于 4.0 版本以上的 VE464 电控箱体 + 508XT 仪器(占春启等,2020),通过箱体调节伺服阀的叠合开度,预测低频失真并通过修改伺服阀输入信号来避免谐波的产生,达到降低震源低频畸变的目的(图 14),该技术适用于 70 kN 到 356 kN 等多种型号的可控震源(Ollivrin and Tellier,2019).

HDR(Harmonic Distortion Reduction)技术是 INOVA 公司 2010 年提出的谐波畸变压制技术,并申请了美国专利保护;(Wei *et al.*,2013). 如图 15,低频极限控制技术(Phillips *et al.*,2016)在确保不会发生低频振幅触及可控震源机械液压系统的额定工作极限,比如重锤位移不会击打到它的极限位移造成震源出力的冲击效应. 其次,主伺服阀死区非线性控制主要用于补偿在 1 ~ 3 Hz 频率区间主伺服阀死区产生的非线性. 流量-压力非线性控制主要用

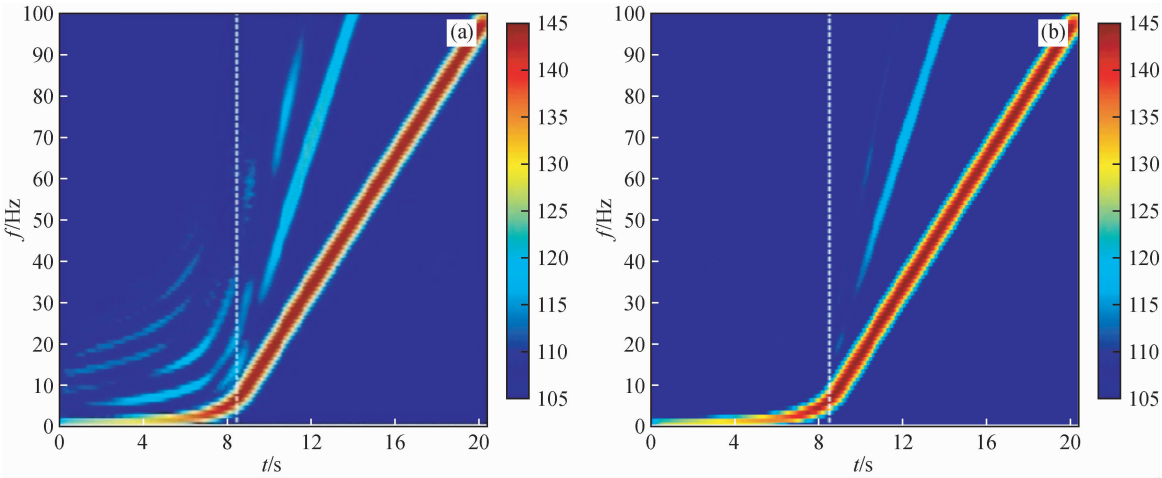


图 13　Clean Sweep 应用前后时频谱对比

Fig. 13　Time-frequency spectrum of with and without Clean Sweep

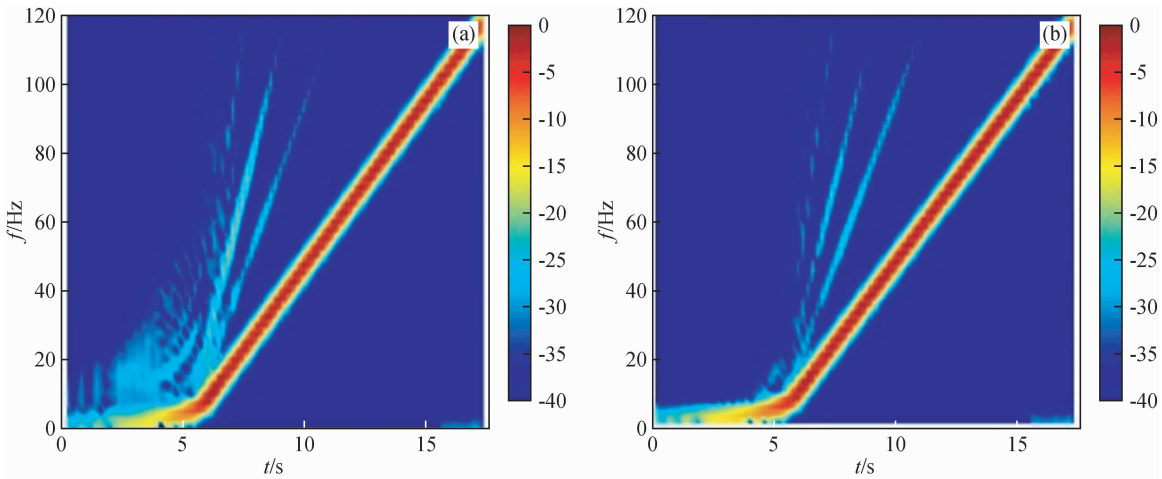


图 14　Smart LF 应用前后时频谱对比(Ollivrin and Tellier,2019)

Fig. 14　Time-frequency spectrum of with and without Smart LF(Ollivrin and Tellier,2019)

于补偿主伺服阀在 3 ~ 20 Hz 频率区间,由于流量和压力之间的平方根关系产生的非线. HDR 技术集成了低频振幅和相位控制、伺服阀液压流量-压力非线性控制、伺服阀零位置非线性控制和伺服阀位置反馈控制几种控制算法(魏周宏等,2015).

图 16 展示的是一个应用 HDR 技术前后的时频谱对比案例,对比采用 1.5 ~ 96 Hz,9 s 长度的用户自定义扫描信号,图 16a 是标准控制力信号时频谱,图 16b 是采用谐波畸变压制技术后的信号时频谱. 通过对比可知,各高阶谐波均不同程度得到控制,尤其是在 2 ~ 4 s 时间段效果非常明显;大约有 30% 的谐波畸变得到控制,同时前 1 s 的低频能量得到明显加强.

Clean Sweep、Smart LF 和 HDR 三种技术在抑制谐波、提升输出力信号信噪比方面均取得很好的效果,然而,它们的推广应用均需依托特定的硬件设备或电控箱体,这在一定程度上限制了其普适性.

低畸变扫描技术 LDS(Low Distortion Sweep)是由 BGP 为使用传统可控震源进行宽频带勘探而研发的,针对性解决了:1)传统低频驻留技术在低频往线性过度位置的畸变问题(图 17 黄框);2)压制低频段段谐波能量问题(图 17 红框)两方面的问题,可获取更优的宽频数据,低频端提升尤为显著.

图 18 是两种扫描信号的低频部分(1.5 ~ 3 Hz)剖面对比,LDS 技术采集地震剖面地层反射能量强,反射信息连续性更好. 为了确保可控震源在不同频段输出最大振幅且避免设备损坏,LDS 技术需在信号设计阶段,针对勘探区各类地表条件对每台震源

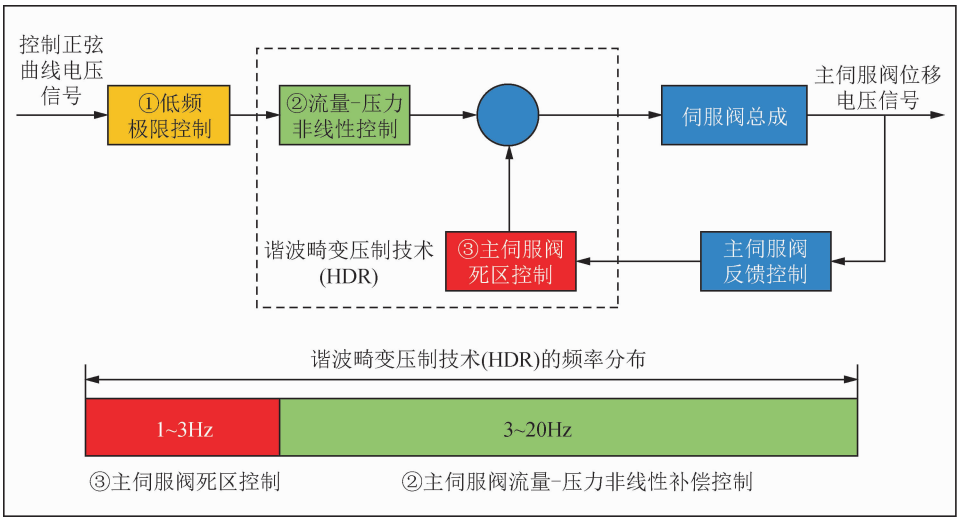


图 15 可控震源谐波畸变压制技术(HDR)(魏周宏等,2015)

Fig. 15 Harmonic distortion reduction technology (HDR) (Wei *et al*., 2015)

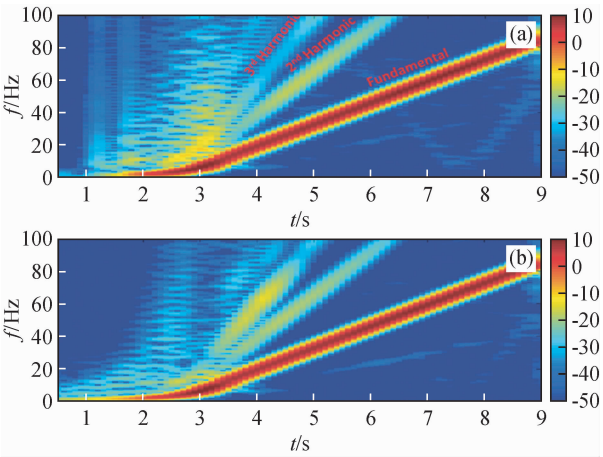


图 16 HDR 应用前后时频谱对比(魏周宏等,2015)

Fig. 16 Time-frequency spectrum with or without HDR (Wei *et al*., 2015)

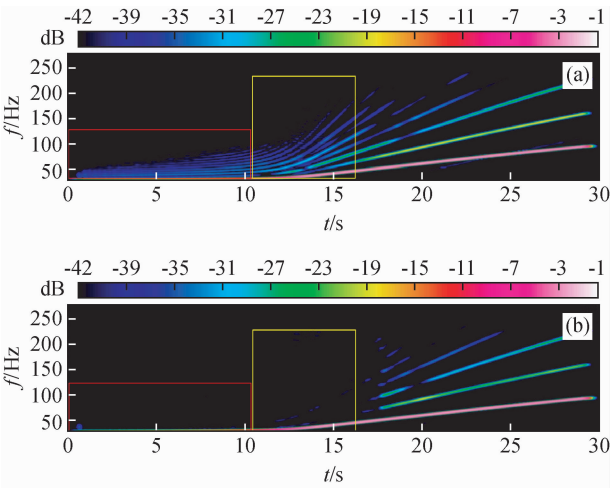


图 17 LDS 应用前后时频谱对比(Wei *et al*.,2024)

Fig. 17 Time-frequency spectrum with or without LDS(Wei *et al*.,2024)

开展定频测试,以确定输出畸变不超标情况下的最大输出振幅(魏铁等,2024a). 基于定频测试的结果,获得每台震源的实际低频输出特征曲线,并以此为依据定制频率驱动幅度约束曲线、频率驱动幅度限制曲线以及频率域振幅谱限制曲线. 随后,计算扫描信号的瞬时频率函数,进而求得瞬时相位. 通过特有设计方法优化后,最终得到适用于每台震源的 LDS 信号,核心技术处于保密阶段. LDS 技术输出力信号低频谐波畸变压制可达 -42 dB,成为 BGP 能够与 CGG 的 Clean Sweep 和 Sercel 的 Smart LF 对标的特色技术.

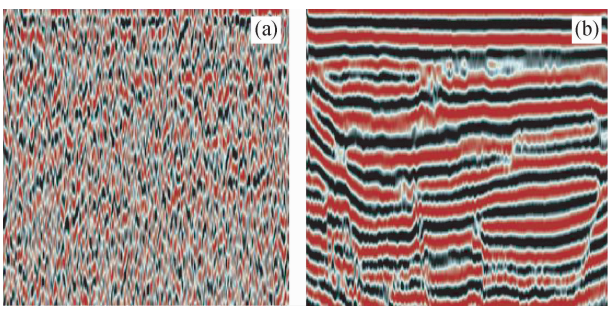


图 18 常规与 LDS 技术成像对比(Wei *et al*.,2024)

Fig. 18 Stack comparison of conventional and LDS sweep(Wei *et al*.,2024)

BGP 常规可控震源低频激发技术在阿联酋、埃

及、尼日尔、阿曼、沙特、阿尔及利亚等多个国家广泛应用,结合 LDS 技术的低频信号技术获得 ENI、ADNOC 等油公司的高度认可.

2.2.2　伪随机信号设计与应用

20 世纪 70 年代,Goupillaud(1976)率先提出可控震源伪随机扫描信号的设计思路,随后 Cunningham(1979)、Sallas 等(2008)和 Dean(2012a)等学者以相位调制为核心,发展出二进制、三进制伪随机序列及整形滤波等多元方案 Nasreddin 等(2012)通过正演模拟验证伪随机扫描方式能够降低组间谐波干扰对地震资料的影响;Dean(2012b)同样认为,伪随机的提出虽然是为了获得理想的地震子波,最有前景的应用将是降低同步扫描时炮间干扰;马铁荣等(2016)通过伪随机扫描信号的实际震动测试,验证信号对可控震源机械液压性能不会产生破坏;李红远等(2019)在二维试验线完成单炮与叠加剖面的全流程对比,初步验证了城区应用的可行性,填补国内在该领域的空白;Nie 等(2026a, b)在复杂城区施工时中,通过线性、自定义和伪随机信号的 PPV 震动速度对比,在相同出力条件下,伪随机信号产生的 PPV 振动速度低于线性扫描,对敏感建筑影响更小;Dmitry 等在 2024 年通过采用伪随机扫描信号数值模拟,提升地震勘探效率基础上,提高资料分辨率、信噪比,并且信号抗噪能力上优于传统线性扫频信号,并为硬件-算法一体化采集系统提供设计依据.

伪随机扫描信号具有以下技术优势:1)波形保真:相较传统线性或非线性扫频,其自相关函数呈“窄主瓣-低旁瓣”理想脉冲形态(图 19),可有效抑制相关噪声,提升地震记录分辨率;2)正交性能:不同伪随机信号之间互相关度低,在同步激发条件下可显著削弱组间干扰;3)频谱可控:通过调整码元参数即可重构频谱分布,例如增强低频能量以满足深层勘探需求;4)环境友好:低振动输出与随机频散特性降低了与城区建筑发生共振的风险,适用于振动敏感区域. 其推广应用主要受以下因素制约:1)技术惯性与成熟度:传统线性扫描已高度成熟,现有设备、作业流程及数据处理体系均围绕其构建,替换成本较高;2)标准缺失:缺乏统一的信号设计、质量控制及安全评估规范,导致项目风险难以量化;3)非独有性:伪随机扫描信号的强度相对较弱,传统扫描信号可以通过调整出力幅度的方式实现降低对敏感设施破坏的风险.

虽然伪随机扫描信号的工业化应用面临诸多挑战,但是由于其子波特性和噪声的不相干性等重要优势,未来在可控震源高效采集应用中具有广阔的前景.

3　作业方法进展

自可控震源地震采集技术实现工业化应用以来,部分油公司因过度重视原始单炮信噪比,长期沿用“多台组合、单组作业”的施工模式(李庆忠,1993). 为削弱地面耦合差异及随机噪声,现场曾普遍采用“定点或动点多次扫描-垂直叠加”策略以提升单炮信噪比(白旭明等,2015). 同时,为了抑制谐波干扰,旋转相位多次扫描技术曾被广泛实施

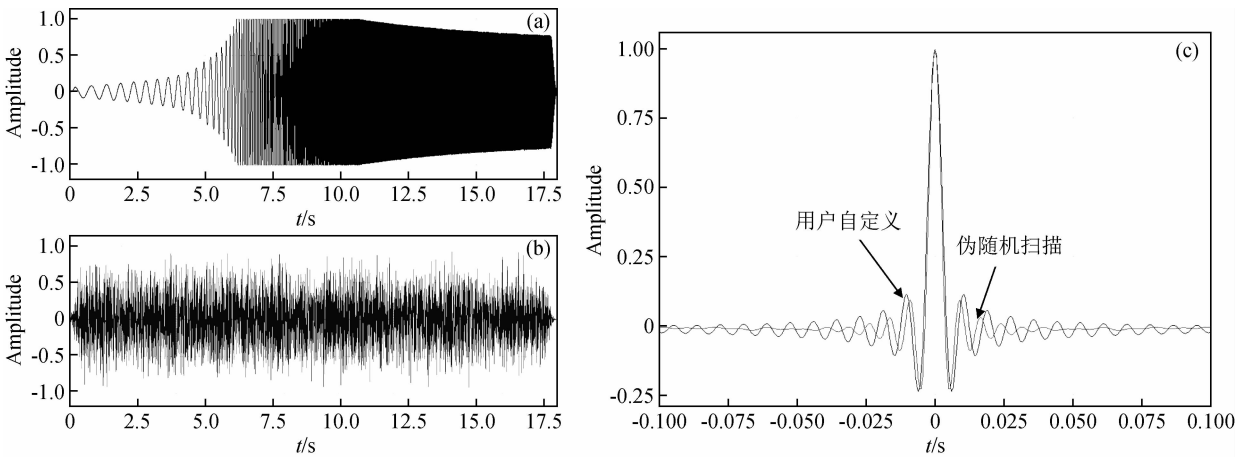


图 19　自定义和伪随机扫描信号对比

(a)用户自定义扫描信号;(b)伪随机扫描信号;(c)子波对比.

Fig. 19　Comparison of customer and pseudo-random sweep signals

(a) Custom sweep signal; (b) Pseudo-random sweep signal; (c) Wavelet comparison.

(Bagaini,2010). 然而,随着"高覆盖"理念对成像质量提升作用得到普遍的认可——即在覆盖次数足够高时,噪声可通过叠加被有效压制,获得高信噪比的地质剖面(尚新民等,2022)——上述以牺牲效率换取单炮信噪比的传统做法,已经逐步退出地震勘探历史的舞台.

由于"两宽一高"(宽频、宽方位、高密度)地震采集技术的成熟和广泛推广应用,要求可控震源作业方法满足高效率的要求,才能实现作业成本经济可行,这就要求通过不断提高震源配置组数和科学压缩组间时间间隔,实现作业效率的不断提升(张慕刚等,2017).

3.1 作业方法介绍

在提高资料品质和分辨率方面:Sallas 等(1998)获得了高保真可控震源(HFVS,High Fidelity Vibratory Seismic)技术专利,同年 Allen 等(1998)公布了 HFVS 技术的基本原理并介绍了其现场试验结果;2007 年,CGG Veritas 公司率先提出了可控震源高效采集技术(HPVA,High Productivity Vibrioses Acquisition),基于地面力实测的谐波噪声降低谐波噪声干扰;Stefani 等(2007)提出了动态抖动扫描技术(DS,Dither-Sweep),在扫描信号中引入微小的时间或相位抖动,破坏谐波相干性、降低邻炮干扰,提高资料品质;Postel 等(2008)提出单台震源采集技术(V1);BGP 的骆飞等(2018)、魏铁等(2024b)引入分频扫描技术,通过将扫描切分、重组实现多震源同时扫描,利用不同频率之间的互不相干特性,降低邻炮干扰,提高作业效率;卢光年等(2022)提出升频降频同步扫描高效采集技术,在保证激发相关子波一致的前提下,突破距离分离同步激发对组间距离的要求,经生产项目验证效率可以比采用滑动扫描提高一倍. 以上作业方法经过试验或者生产应用测试均取得了良好的效果,但是受市场需求和配套技术成熟度限制暂未成为主流作业方法,未来可能具有广阔的应用前景.

通过压缩组间时间间隔提高可控震源作业效率方面:Cunningham(1979)提出了交替线性扫描方法;1991 年和 1995 年阿曼石油公司(PDO)分别对交替扫描(FFS,Flip Flop Sweep)和滑动扫描(SS,Slip Sweep)进行了试验,生产效率提高 1 ~ 2 倍(Rozemond,1996);Howe 等(2008a)给出了单台震源独立工作模式(ISS,Independent Simultaneous Sweep),并在阿尔及利亚试验成功;Bagaini 和 Ji(2010)在动态扫描基础上提出了动态滑动扫描高效采集技术(DSS,Dynamic Slip-Sweep);WesternGeco 公司 Bouska(2010)提出了距离分离同步扫描(DS3,Distance Separated Simultaneous Sweep)并在中东地区进行先导实践并得到工业化推广应用;后来在各大地球物理服务商又将 DS3 的"多组震源同时工作"与滑动扫描的"组内连续激发"相结合,产生了距离分离同步滑动扫描(DS4,Distance Separated Simultaneous Slip Sweep),至今 DS4 仍然是中东地区主要应用的高效采集方法;2017 年,BGP 提出(UHP,Ultra-High Productivity)并在中东地区实现工业化应用,最高日效 5.5 万炮/天(张慕刚等,2021).

以上可控震源作业方法均在全球或区域物探市场得到工业化推广应用,是全球油气勘探可控震源主力技术体系的核心作业方法. 滑动扫描引入了组间谐波干扰;DSS、ISS 及 UHP 等作业方法则带来了不同程度的邻炮干扰,因此,可控震源作业方法的持续进步,引入不同强度的谐波或者邻炮干扰噪声,需要在配套去噪技术保障下,不断寻求作业效率与资料品质动态平衡的过程. 通过表 3 不同作业方法干扰和效率的统计对比表,随着施工效率的提高,谐波或者邻炮干扰整体呈增强趋势,而 TD 规则是决定二者关系的重要函数.

表 3 不同作业方法干扰分布和效率统计对比(张慕刚等,2021)

Table 3 Interference distribution and efficiency statistics of different operation methods(Zhang *et al.*, 2021)

作业方法	时间	距离	组间谐波	邻炮干扰	生产效率
交替扫描	$T \geqslant T_{扫} + T_{听}$	无约束	○	○	500 ~ 2000
滑动扫描	$T_{听} < T < T_{扫} + T_{听}$	无约束	●	○	2000 ~ 5000
DS[3]	小于同步距离时,交替	$D \geqslant 2 * D_{最大偏移距}$,同步	○	●	8000 以上
DS[4]	小于同步距离时,滑动	$D \geqslant 2 * D_{最大偏移距}$,同步	●	●	10000 以上
ISS	无约束	无约束	●●●	●●●	5300 炮(12 h)
UHP	较小约束	较小约束	●●	●●	平均 3 万炮,最高 5.5 炮

注:T 为相邻震次的时间间隔;$T_{听}$ 为听时间或记录长度;$T_{扫}$ 为扫描时间(扫描长度).

3.2　TD 规则研究与应用

TD(Time & Distance)规则是可控震源施工作业中描述震源组间距离和时间间隔(开始扫描时间 T_0 间的时差)关系的重要函数. 如表 3 所示,它直接关系到采集资料中组间谐波和邻炮干扰发育程度和可控震源生产效率. 组间谐波和邻炮干扰直接影响油田公司关注的资料品质,生产效率是决定施工单位项目盈亏的重要因素(聂明涛等,2020). TD 规则的概念是 DS4 在行业内应用后才被提出的(Bouska,2010),而交替和滑动扫描对组间距离无约束限制,组间时间间隔是一个固定值,但是 TD 规则概念同样适用于交替和滑动扫描作业方法.

图 20 是以 12 s 扫描长度 +6 s 听时间为例的几种可控震源作业方法 TD 规则曲线,施工作业过程中,任意两组可控震源之间距离和时间间隔的交点不允许出现在 TD 曲线以下(靠近坐标轴原点方向). 交替扫描 TD 规则是一条等于"扫描长度 + 听时间"的直线,图中为 18 s. 滑动扫描 TD 规则是介于"听时间"和"扫描长度 + 听时间"的一条直线,如图 21 所示,图中为 10 s 间隔;时间间隔的选择需要通过开工前通过生产试验获得采集数据上高阶谐波发育强度确定,一般选择在后一炮高阶谐波干扰对前一炮干扰影响在可接受范围内的最小时间间隔. 张录录等(2024)提出将资料处理过程中高阶谐波压制效果引入时间间隔确定阶段,进一步压缩组间时间间隔;针对现有滑动时间确定方法存在的不足,刘洋等(2024)提出一种利用可控震源特性信号进行干扰模拟的方式快速确定滑动时间间隔. 最初提出的 DS3 作业方法,要求震源间距离大于 12 km 时可以同步激发($D>12$ km,$T=0$ s),要求项目具有足够的工区宽度、且在线设备数量和投入生产震源组数要达到相应的要求,才能发挥优势. DS4 在 DS3 的基础上优化了 TD 规则,在小于同步距离时采用滑动扫描,($D>12$ km,$T=0$ s; $D<12$ km,$T=10$ s),集合了 DS3 的"距离分离"和滑动扫描的"时间分离"思想. 现在普遍应用的 DS4 施工方法中,包含了交替扫描、滑动扫描和距离分离同步激发中两种或者多种,在原台阶式的 TD 规则上增加了斜坡进一步提升作业效率(周松,2017;路交通等,2022). ISS 没有 TD 限制,所以组间谐波和邻炮干扰都非常严重(Howe *et al.*,2008b). UHP 是动态滑动扫描(DSS)和 ISS 技术的一种优化,通过设置很小的 TD 规则,数据质量较 ISS 有大幅提高,作业效率较 DSS 得到显著提升(张慕刚等,2021),同时配合应用基于稀疏反演的混叠噪声压制技术(宋家文等,2019),促进在阿曼 PDO 项目的推广应用.

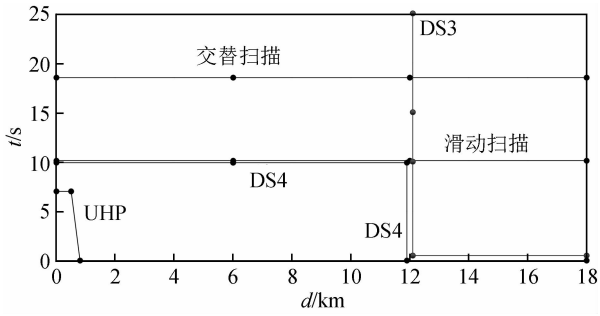


图 20　不同作业方式 TD 规则

Fig. 20　TD rules of different operation method

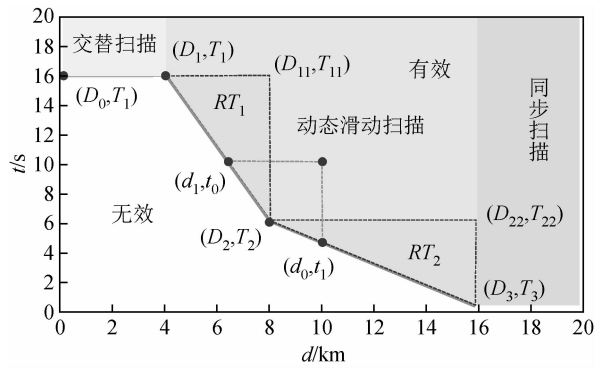


图 21　动态滑动扫描 TD 规则优化示意图(路交通等,2022)

Fig. 21　Schematic diagram of TD rule optimization (Lu *et al.*, 2022)

综上,不管是 TD 规则是单一值的交替或者滑动扫描,还是 TD 规则是数学函数 DS3、DS4 和 UHP,以及没有 TD 规则的 ISS 施工方式,都是可以按照 TD 规则进行可控震源施工方式划分,当 TD 规则中的时间是随距离动态变化的,都可以称为动态滑动扫描(DSS). 通过不断优化可控震源 TD 规则,考虑以时间换空间和空间换时间的施工方式,既提高施工作业效率,又最大限度降低了高效采集带来的噪声影响(曹宏等,2025).

TD 规则的每一次重大变化,都标志着新的可控震源地震采集方法的出现,它用简单的数学曲线把地震采集行业最为重要的"效率"和"质量"联系在一起,是衡量二者的重要函数.

4　采集配套技术进展

可控震源地震采集技术的进步和普及应用,伴随着处理噪声压制技术的进步,同时要求地震采集观测系统向全方位、高密度、高覆盖方向发展,这就

对相应配套技术提出了更高的要求,也带来了相应的发展变化.

4.1 处理噪声压制技术

叠前噪声压制是提高地震资料信噪比的重要手段之一. 本节主要介绍针对可控震源高效采集中产生的组间谐波和邻炮干扰噪声压制技术进展.

可控震源谐波畸变可以分为机械系统谐波和耦合响应两种. 机械系统谐波畸变是由于机械振动系统和液压伺服系统的非线性导致的,产生于可控震源本身的物理特性,而不可避免的. 目前主流应用的线性升频扫描信号,机械系统谐波畸变出现在负时间轴,主要表现为后一炮对前一炮的组间谐波干扰;使用线性升频扫描信号也会出现低频段高阶谐波的深层反射信息与高频段有效信号的浅层反射信息混叠在一起,谐波畸变产生对本炮干扰,但是因为明显弱于组间谐波干扰而常常被忽略(李振春等,2016). 耦合响应谐波是由于震源平板与大地产生共振而产生的谐波,常被称为"谐振",多受地表因素影响,并非普遍存在于可控震源采集资料中,而且可以通过选择合理的扫描参数(起止频率和扫长),实现减弱或者消除谐波目的(刘宏杰等,2015).

4.1.1 谐波干扰压制

针对高效采集组间谐波干扰压制技术:2013 年前,谐波噪声压制方法主要集中为四类:1)基于线性滤波思路的频域/相移滤波法(Li *et al*., 1995; Fleure,2002;李凤磊等,2010;李合群,2013);2)基于基波估值的预测相减法(Meunier and Bianchi, 2003;Moerig, 2007;Martin and Munoz,2010;田新琦等, 2011);3)早期的稀疏反演类(Cao,2010;尚永生等,2015)和 4)基于力信号的谐波压制方法(曹务祥等,2011;倪宇东等,2011;王宝彬等,2013). 但是上述方法主要是以线性假设、局部处理和人工参数调整为基础,无法实现在全波场范围内稳定、自适应地谐波压制. 近十年来,高效采集谐波压制技术有了很大变化(表 4),谐波干扰压制技术从传统方法迈向深度学习驱动的新阶段,显著提升了压制效果和自动化水平.

表 4 近十年主要谐波干扰压制方法展示

Table 4 Presentation of main harmonic distortion suppression methods over the past decade

时间	研究者	方法描述	主要贡献
2015	韩文功等	提出谐波干扰是谐波畸变信号与反射系数的褶积,通过逐炮消除谐波干扰	提供了一种基于物理模型的谐波压制方法
2015	刘宏杰等	提出基于能量差异的谐波压制方法	在准噶尔盆地西部高密度采集资料中取得了良好的应用效果
2016	曲英铭等	提出通过最小二乘思想构建自适应匹配滤波算子,迭代预测谐波干扰	实现了自适应匹配预测谐波干扰,提高了压制效果
2016	宋智强等	提出用近源检波器记录地表振动信号作为相关参考信号,提高相关质量	提高了谐波压制的相关质量,增强了信号的保真度
2018	罗勇等	提出时频域稀疏优化谐波噪声压制方法	对有效信号具有良好的保真性能,优于传统的频率域振幅异常噪声压制方法
2020	蔡敏贵等、马涛等	提出力信号反褶积直接替代参考信号互相关,避免资料中的谐波干扰	避免了资料中的谐波干扰,提高了压制效果
2020	毛海波等	提出基于形态成分分析自适应学习字典的谐波噪声压制方法	在固定字典稀疏优化基础上,进一步提高了谐波噪声压制的效果
2021	Denisov 等	提出自适应相减法与优化递归滤波法结合用于谐波压制	结合了自适应相减法和优化递归滤波法,提高了谐波压制的效率
2021	李波霖等	提出双相移谐波压制方法,针对白噪声和相邻炮信号的处理能力进行了改进	改进了纯相移谐波压制方法,提高了对白噪声和相邻炮信号的处理能力
2022	Li 等	提出基于 AR2U-Net 的双相移谐波压制滤波方法,引入深度学习技术	引入深度学习技术,提高了谐波压制的自动化和效率
2022	Liu 等	提出基于稀疏波形建模的谐波噪声压制方法,利用稀疏波形字典与迭代阈值	在保护有效信号的前提下,实现了谐波噪声的剥离
2024	Sun 等	提出在解析信号域内建立谐波模型并反演分离可控震源力信号的高阶谐波	实现了各阶谐波的一次性剥离,提高了谐波压制的精度
2025	Hu 等	提出自适应字典辨识框架,通过相对稀疏度最小化与遗传算法自动选出最优基函数	实现了无需人工调试参数的高保真谐波压制,提高了自动化程度

4.1.2　邻炮干扰压制

当同步激发距离小于最大炮检距的两倍,或时间间隔小于记录长度时,单炮记录上会出现显著的邻炮干扰噪声,常见于 ISS 和 UHP 高效采集资料中,表 5 是主要混叠噪声压制方法.

表 5　主要邻炮干扰噪声压制技术发展概述

Table 5　Development overview of deblending data separation

时间	研究者	方法描述
2009	Howe 等	随机噪声邻炮干扰压制法
2012	黄明忠等	两步法邻炮干扰压制
2013—2014	徐海等、王文闯等	矢量中值滤波法及改进方法
2018—2020	于富文等、黄德智等、俞岱等	多方位矢量中值滤波、S 变换自适应迭代滤波、多 *t-x* 域联合分离方法
2018—2020	董烈乾等	自适应中值滤波、联合 seislet 阈值法、复曲波变换、奇异值谱约束迭代反演等
2018—2022	周松等、朱立华、宋家文等、魏亚杰等、Jeong 等	稀疏反演方法(L1/L0 正则化、FKK 域、Radon 域、*f-kx-ky* 域)
2022—2024	张翠军等、Wang 等、Cheng 等、Li 等、Luiken 等、童思友等	深度学习方法(DnCNN、ResUNet、自监督学习、Pix2PixGAN、PnP 框架)
2025	魏亚杰等	HDC AU-Net(混合空洞卷积与双注意力机制改进 U-Net 网络)

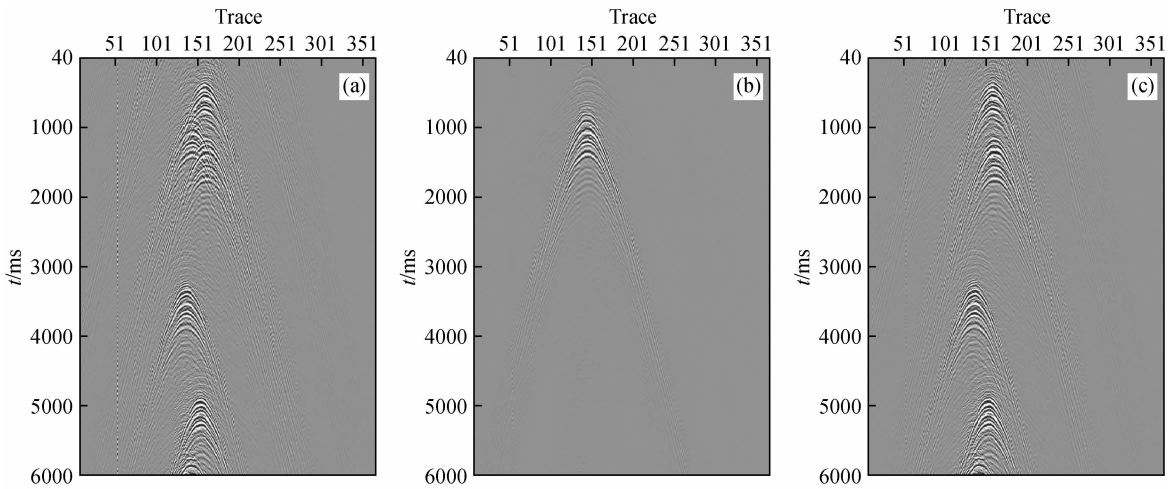


图 22　基于稀疏反演的混叠数据压制对比(张慕刚等,2021)

(a) 原始混叠数据;(b) 混叠噪声压制后数据;(c) 压制的混叠噪声.

Fig. 22　De-blended result comparison of UHP method (Zhang *et al*., 2021)

(a) Original blended data; (b) De-blended data; (c) Suppressed blended noise.

图 22 是通过基于稀疏反演的混叠压制技术(宋家文等,2019)进行混叠数据噪声压制对比,这项技术的应用保证了采集数据的质量,一定程度上促进了 UHP 技术在 PDO 项目的工业化应用.

可控震源采集中的谐波噪声和邻炮干扰噪声压制技术已经取得了显著进展,尤其是深度学习方法的引入,为高效、自适应的噪声压制提供了新的途径. 然而,仍存在一些挑战,如深度学习模型的训练数据需求、模型泛化能力等. 未来,随着深度学习技术的不断发展,结合物理模型和数据驱动的混合方法有望进一步提升噪声压制的效果和效率.

可控震源地震采集技术的发展史,是一部"效率-干扰-压噪技术"三位一体、螺旋上升的工业化应用史;处理噪声压制技术的每一次重大进步,都将采集环节对噪声的容忍阈值推进到一个新刻度,促进可控震源地震采集技术下一轮效率革命的到来.

4.2　观测系统优化

4.2.1　观测系统等效变换

随着可控震源高效地震采集技术的进步,配套的观测系统设计密度越来越高,单炮接收道数越来

越多;地震队实现 24 h 无间断采集所需配置采集设备总道数也不断增加,每日收放线道数递增,采集设备和作业人员配置都面临巨大的压力和挑战. 为了解决这一难题,满足在受限设备配置前提下,实现高密度、全方位、大道数观测系统的生产应用,提出基于"以炮补道的排列拆分技术",通过将观测系统接收模版进行拆分,通过同一炮点多次激发实现观测系统模版的等效变换(张慕刚等,2017). 如图 23 是观测系统等效变换示意图,各观测系统理论属性完全一致,通过增加重复炮实现减少接收线的目的,实现受限设备条件下宽方位观测系统实施,同时获得最优炮道比实现收放线和放炮的平衡,详细对比如表 6.

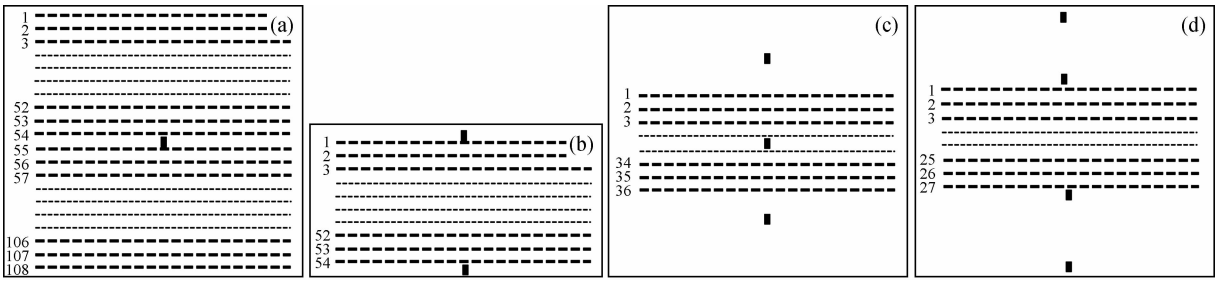


图 23 观测系统等效变换示意图

(a) 108L×4S×432T;(b) 54L×8S×432T;(c) 36L×12S×432T;(d) 27L×16S×432T.

Fig. 23 Schematic diagram of geometry equivalent transformation

表 6 等效变换各观测系统信息统计对比

Table 6 Information statistics of different geometry

观测系统	108L×4S×432T	54L×8S×432T	36L×12S×432T	27L×16S×432T
道距/m	25	25	25	25
炮点/m	25	25	25	25
接收线距/m	100	100	100	100
炮线距/m	100	100	100	100
覆盖次数	2916	2916	2916	2916
模版道数	46,656	23,328	15,552	11,664
炮道比	1.0	2.0	3.0	4.0
最小超级排列(单线 1200 道)	12.96 万道	6.48 万道	4.32 万道	3.24 万道
日收放线道数(日效 2 万)	2 万道	1 万道	6700 道	5000 道
采集设备需求	17 万道	8.5 万道	5.6 万道	4.24 万道

4.2.2 基于压缩感知的方案优化

压缩感知(Compressive Sensing,CS)是一种新兴的信号处理技术,它通过利用信号的稀疏性或可压缩性,在远低于奈奎斯特采样率的条件下实现对信号进行采样和重建. 康菲(李成博和张宇,2018)、阿美(Almaghlouth,2017)、中石化(周松等,2017)、中海油(黄小刚,2019)、浙江大学(陈生昌等,2015)、北京石油大学(温睿等,2018;Liu *et al.*,2019)哈尔滨工业大学(马坚伟,2018)等机构对此做了深入研究,部分企业进行了数据采集先导试验. 基于压缩感知点位优化设计方法主要有样方、Jitter、泊松碟随机和完全随机等(王华忠等,2016). 中国石油集团 BGP 已形成成熟的压缩感知方案设计(骆飞等,2023a,b;门哲等,2024)和配套数据重建技术(董烈乾等,2021,2022,2025;王云雷等,2024;安学勇等,2025),先后为坦桑尼亚国家石油公司、阿曼 PDO 和阿联酋 ADNOC 进行基于压缩感知的三维数据采集任务,图 24 是不同重构方法三维模拟数据时间切片对比图.

在中东等油气勘探热点地区,地震采集道炮密度已快速增长至千万道/平方千米以上甚至上亿级别,传统的高密度采集方法面临极大的成本压力. 基于压缩感知的观测系统方案优化技术和稀疏信号重构技术的联合应用,在保证地震资料成像效果的前提下,摆脱成本束缚,通过采集相对稀疏的地震数据实现降低野外工作量和作业成本的目的,通过压缩感知数据重构处理,得到期望的更高密度地震数据;或者在一定勘探成本限制的前提下,实现更高密

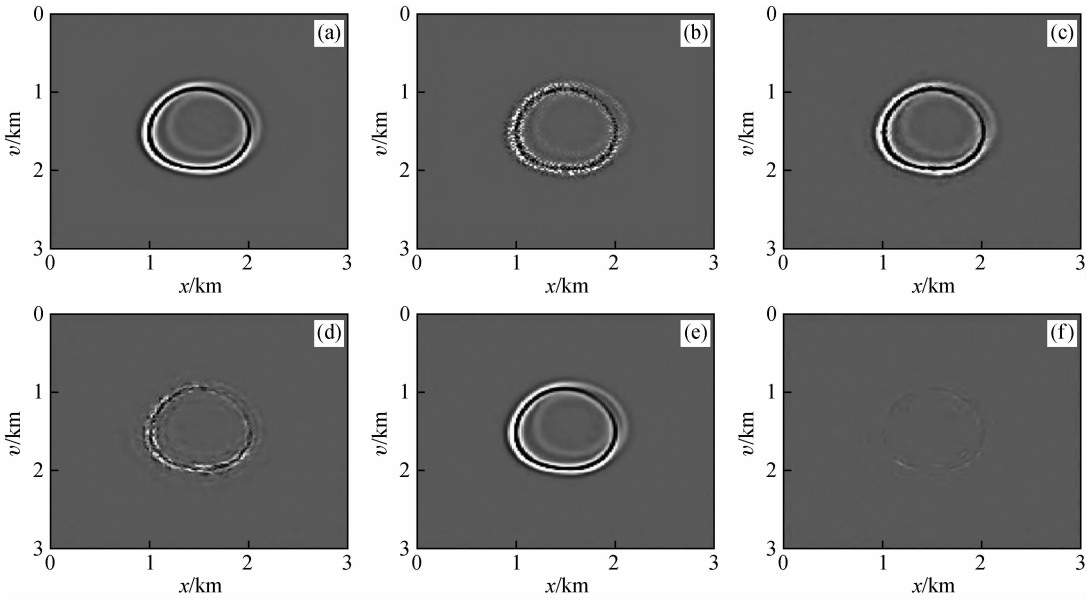


图 24　三维模拟数据时间切片对比图(董烈乾等,2025)

(a)原始数据;(b)非规则欠采样;(c)mask 采样算子重构及(d)重构误差;(e)融合采样算子重构及(f)重构误差.

Fig. 24　Time slice comparisons of 3D simulated data (Dong *et al*., 2025)

(a) Raw data; (b) Irregularly decimated data; (c) Reconstruction result by using mask sampling operator and (d) reconstruction error; (e) Reconstruction result by using merging sampling operator and (f) reconstruction error.

度采集方法的工业化落地.

5　结论与展望

(1)推动采集技术向多维度发展,提升数据质量与勘探精度

采集技术应向单点接收、宽频激发接收、高密度、超高密度、全方位方向拓展,以获取更丰富、更准确的地震数据. 同时,通过技术创新,如谐波干扰压制、TD 规则优化和分频扫描技术改进等,提升信号质量和采集效率,为地震数据的精准处理与解释筑牢基础,推动物探技术的持续进步.

(2)以可控震源为基础,发展新一代石油物探技术

可控震源作为"两宽两高"地震采集技术的核心,已在性能提升、信号优化设计及方案设计等方面取得显著进展. 在此基础上,以理论创新为引领,突破传统物探技术和经典理论的极限,发展全波场地震的新一代石油物探技术,满足"观测更全面、波场更丰富、表征更准确、方式更智能"的新一代地震勘探技术需求,为石油工业提供更精准的指导.

(3)加强智能化与绿色低碳技术应用,提升作业效率

随着人工智能、压缩感知等新技术在物探行业的广泛应用,可控震源自动驾驶、轨迹导航等配套技术将得到进一步研究与应用,为提升作业效率提供有力保障. 未来,应重点研发智能化与绿色低碳技术在可控震源地震采集领域的应用,推动地震勘探向更高效、更环保的方向发展.

(4)聚焦技术创新与一体化应用,降低成本、提高效率

可控震源地震采集处理技术的未来发展方向将聚焦于技术创新与一体化应用. 以市场需求为导向,以解决勘探地质难题为核心,推进地质、物探、井筒一体化以及采集、处理、解释一体化进程. 通过优化整体布局,降低勘探成本,提高生产效率,从而在未来油气勘探开发中发挥更大的技术支撑作用.

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Allen K P, Johnson M L, May J S. 1998. High fidelity vibratory seismic (HFVS) method for acquiring seismic data. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998. New Orleans, Louisiana: SEG, 140-143, doi: 10.1190/1.1820171.

Almaghlouth S. 2017. Seismic acquisition and imaging in Saudi Aramco: Challenges and opportunities. //22nd World Petroleum Congress. Istanbul, Turkey: WPC.

An X Y, Zhai L X, Dong L Q, *et al*. 2025. A robust irregular seismic data reconstruction method. //Proceedings of the 7th Oil and Gas

Geophysics Academic Annual Conference (in Chinese). Xi'an, 145-148, doi: 10.26914/c.cnkihy.2025.016747.

Baeten G J M. 2014-03-25. Method and system for performing seismic surveys with a low frequency sweep: US, 8681589B2.

Bagaini C. 2007. Enhancing the low-frequency content of vibroseis data with maximum displacement sweeps. //69th EAGE Conference and Exhibition. London, UK: EAGE, doi: 10.3997/2214-4609.201401461.

Bagaini C. 2008. Seismic vibratory acquisition method and apparatus: US, 8797826B2.

Bagaini C, Dean T, Quigley J, *et al*. 2008-02-05. Systems and methods for enhancing low-frequency content in vibroseis acquisition: US, 7327633B2.

Bagaini C. 2010. Acquisition and processing of simultaneous vibroseis data. Geophysical Prospecting, 58(1): 81-100, doi: 10.1111/j.1365-2478.2009.00842.x.

Bagaini C, Ji Y. 2010. Dithered slip-sweep acquisition. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010. Denver, Colorado: SEG, 91-95, doi: 10.1190/1.3513927.

Bai X M, Li H D, Chen J G, *et al*. 2015. Single controllable vibrator high-density acquisition technology and its application. China Petroleum Exploration (in Chinese), 20(6): 39-43, doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2015.06.005.

Bouska J. 2010. Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition. Geophysical Prospecting, 58(1): 123-153, doi: 10.1111/j.1365-2478.2009.00843.x.

Cai M G, Ni Y D, Ma T, *et al*. 2020. Improving high-fidelity of seismic data based on deconvolution by force signals. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 59(5): 788-794, 822, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2020.05.012.

Cao G B, Zhang J, Hu L X, *et al*. 2024-12-06. Harmonic suppression vibroseis scanning signal design method based on force signal (in Chinese): CN, 114966829B.

Cao H, Dai S H, Li J F, *et al*. 2025. Seismic exploration technology for tight oil and gas in China and its development direction. Acta Petrolei Sinica (in Chinese), 46(1): 236-254, doi: 10.7623/syxb202501016.

Cao W X. 2010. To attenuate harmonic distortion by the force signal of vibrator. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010. Denver, Colorado: SEG, 157-161, doi: 10.1190/1.3513142.

Cao W X, Yan Z H, Zou X Y, *et al*. 2011. Harmonic interference suppressing by force signal of vibroseis. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 50(1): 89-92, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2011.01.014.

Castor K, Winter O, Bianchi T. 2017. Systems and methods for reducing noise in a seismic vibratory source: US, 9557429B2.

Chai T, Han W G, Bi M B. 2018. A vibrator nonlinear sweeping signal design method and its application. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 42(4): 753-758, doi: 10.11720/wtyht.2018.1217.

Chen S C, Chen G X, Wang H C. 2015. The preliminary study on high efficient acquisition of geophysical data with sparsity constraints. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 54(1): 24-35, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2015.01.004.

Cheng S J, Cheng Z Y, Jiang C, *et al*. 2024. An effective self-supervised learning method for attenuating various types of seismic noise. Geophysics, 89(6): V589-V604, doi: 10.1190/geo2023-0656.1.

Cunningham A B. 1979. Some alternate vibrator signals. Geophysics, 44(12): 1901-1921, doi: 10.1190/1.1440947.

Dean T. 2012a. An extra 10% -Improving the productivity of vibroseis surveys through advanced fleet management. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. Las Vegas, Nevada: SEG, 1-5, doi: 10.1190/segam2012-0220.1.

Dean T. 2012b. Establishing the limits of vibrator performance-experiments with pseudorandom sweeps. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. Las Vegas, Nevada: SEG, 1-5, doi: 10.1190/segam2012-0221.1.

Dean T. 2016. High productivity vibroseis techniques: a review. Preview, 2016(184): 36-40, doi: 10.1071/pvv2016n184p36.

Denisov M S, Egorov A A, Shneerson M B. 2021. Optimization-based recursive filtering for separation of signal from harmonics in vibroseis. Geophysical Prospecting, 69(4): 779-798, doi: 10.1111/1365-2478.13084.

Dong L Q, Wang C H, Li C F, *et al*. 2018. Blending noise removal utilizing an adaptive median filter. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(4): 1475-1479, doi: 10.6038/pg2018BB0360.

Dong L Q, Zhang M G, Zhou D T, *et al*. 2019a. Blended noise suppression using an optimized complex curvelet transform approach. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(2): 517-522, doi: 10.6038/pg2019CC0304.

Dong L Q, Wang Y, Huo Y, *et al*. 2019b. Blending noise suppression based on median filter and seislet domain threshold denoising approach. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 41(6): 705-711, doi: 10.3969/j.issn.1001-1749.2019.06.01.

Dong L Q, Wang Z, Liang X F, *et al*. 2020a. Multi-channel singular value spectrum constrained iterative inversion method for suppressing adjacent shot interference. //Proceedings of the 2020 China Geosciences Union Annual Conference (VIII) (in Chinese). Chongqing, 30-31, doi: 10.26914/c.cnkihy.2020.060946.

Dong L Q, Zhou H, Guo S L, *et al*. 2020b. An optimized blending noise suppression based on seislet domain iterative threshold denoising approach. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 44(3): 568-572, doi: 10.11720/wtyht.2020.1097.

Dong L Q, Zhang M G, Luo F, *et al*. 2021. Blended noise suppression based on SVD constrained iterative inversion. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 56(1): 57-61, 117, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.01.006.

Dong L Q, Zhang M G, Luo F, *et al*. 2022. Irregular data reconstruction approach based on S/N ratio quality-controlled optimized iterative inversion. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(4): 1541-1547, doi: 10.6038/pg2022FF0429.

Dong L Q, Zhou H, Sang Y Y, *et al*. 2025. Seismic data regularization and interpolation approach based on compressive sensing principle. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(1): 276-284, doi: 10.6038/pg2025HH0428.

Fleure T. 2002. Method of reducing interference while using overlapping source point seismic recording techniques: US, 6418079B1.

Goupillaud P L. 1976. Signal design in the "vibroseis"® technique. Geophysics, 41(6): 1291-1304, doi: 10.1190/1.1440680.

Han W G, Qu Y M, Hu L X, *et al*. 2015. Method of suppressing harmonic noise based on reflection coefficient and ground force signal. Progress in Geophysics (in Chinese), 30(6): 2647-2659, doi: 10.6038/pg20150624.

Howe D, Allen A J, Foster M S, *et al*. 2008a. Independent simultaneous sweeping. //70th EAGE Conference and Exhibition. Rome, Italy: EAGE, doi: 10.3997/2214-4609.20147588.

Howe D, Foster M, Allen T, *et al*. 2008b. Independent simultaneous sweeping - a method to increase the productivity of land seismic crews. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008. Las Vegas, Nevada: SEG, 2826-2830, doi: 10.1190/1.3063932.

Howe D, Foster M, Alen T, *et al*. 2009. Independent simultaneous sweeping in Libya-full scale implementation and new developments. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009. Houston, Texas: SEG, 109-111, doi: 10.1190/1.3255044.

Hu Y L J, Xu W W, Wang X K, *et al*. 2025. Adaptive dictionary identification framework and its application to sparsity-optimized harmonic noise separation. Geophysics, 90(2): V161-V177, doi: 10.1190/geo2024-0259.1.

Huang D Z, Han L G, Li H F, *et al*. 2020. Deblending of seismic data based on S-transform adaptive filtering iteration. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 55(6): 1253-1262, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.06.011.

Huang M Z, Li P M, Wang Y J. 2012. Two-step suppressing method for neighboring-shot interference by using vibroseis independent simultaneous shooting data. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 51(5): 464-468, 485, doi: 10.3969/j.issn.1000-

1441.2012.05.007.

Huang X G. 2019. Offshore seismic exploration based on compressive sensing. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 58(2): 162-175, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.02.002.

Jeong W, Tsingas C, Almubarak M S. 2022. Deblending and merging of 3D multi-sweep seismic blended data. Geophysical Prospecting, 70(2): 246-261, doi: 10.1111/1365-2478.13156.

Laing W E. 1989. History and early development of the vibroseis system of seismic exploration: Vibroseis, Geophysics Reprint Series 11, SEG, 749-765.

Lee Y W, Wiener B. 1950. Correlation functions and communication applications. Electronics, 23(6): 86-92.

Li B L, Wang Y C, Liu X Q, *et al*. 2021. Double-phase-shift filtering method for eliminating harmonic distortion in processing slip-sweep vibroseismic signals. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 56(2): 265-272, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.02.007.

Li B L, Wang Y C, Yuan H, *et al*. 2022. Double-phase-shift filtering method for harmonic elimination based on AR2U-Net. Applied Geophysics, 19(2): 271-283, doi: 10.1007/s11770-022-0932-8.

Li C B, Zhang Y. 2018. CSI: An efficient high-resolution seismic acquisition technology based on compressive sensing. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 57(4): 537-542, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.04.006.

Li F L, Liu C Z, Li Z C. 2010. Harmonic suppression in slip-sweep data based on convolution filtering. //Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society (in Chinese). Ningbo, 479.

Li G L, Tian Y K, Yin W H, *et al*. 2019. Low-frequency vibroseis with high density wide line seismic acquisition technology research and application in Xizang Plateau: a case study of low-frequency vibroseis. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(1): 113-118, doi: 10.6038/pg2019BB0044.

Li H Q. 2013-04-24. Method for suppressing harmonic interference in seismic data of controlled source by filtering (in Chinese): CN, 102262243B.

Li H Y, Wang J F, Xiao H, *et al*. 2019. Discussion on pseudorandom sweep technology of vibroseis. //Proceedings of the Geophysical Exploration Technology Symposium of the Chinese Petroleum Society (in Chinese). Chengdu.

Li J, Trad D, Liu D W. 2024. Robust seismic data denoising via self-supervised deep learning. Geophysics, 89(5): V437-V451, doi: 10.1190/geo2023-0762.1.

Li X P, Soellner W, Hubral P. 1995. Elimination of harmonic distortion in vibroseis data. Geophysics, 60(2): 503-516, doi: 0.1190/1.1443787.

Li Z C, Qu Y M, Han W G, *et al*. 2016. Generation mechanism and characteristics of two kinds of harmonic waves for vibroseis. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 55(2): 159-172, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.02.001.

Liu D W, Li X F, Wang W, *et al*. 2022. Eliminating harmonic noise in vibroseis data through sparsity-promoted waveform modeling. Geophysics, 87(3): V183-V191, doi: 10.1190/geo2021-0448.1.

Liu G C, Li C, Guo Z F, *et al*. 2019. Irregularly sampled seismic data reconstruction using multiscale multidirectional adaptive prediction-error filter. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(5): 2909-2919, doi: 10.1109/tgrs.2018.2878402.

Liu H J, Jiang L, Zhang Z H, *et al*. 2015. Method for harmonic noise suppression of slip scan data based on energy difference. Xinjiang Petroleum Geology (in Chinese), 36(1): 98-101, doi: 10.7657/XJPG20150120.

Liu Y, Nie M T, Qi Y F. 2024-12-17. Vibroseis sliding time interval determination method and device, equipment and storage medium (in Chinese): CN, 116500684B.

Lu G N, Sun X Y, Sun M, *et al*. 2022. High efficiency acquisition technology for synchronous scanning of vibroseis up/down frequency and its application effect. Technology Supervision in Petroleum Industry (in Chinese), 38(10): 20-23, doi: 10.20029/j.issn.1004-1346.2022.10.005.

Lu J T, Zhang Q H, Meng X S, *et al*. 2022. Application and quality control of an improved dynamic slip sweep technique. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 61(4): 591-598, 693, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2022.04.002.

Luiken N, Ravasi M, Birnie C. 2024. Integrating self-supervised denoising in inversion-based seismic deblending. Geophysics, 89(1): WA39-WA51, doi: 10.1190/geo2023-0131.1.

Luo F, Shi S H, Deng Z W, *et al*. 2018. Implementation and application of vibroseis acquisition using frequency-separated simultaneous sweep technology. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 57(1): 28-32, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.01.003.

Luo F, Zhang M G, Wang C H, *et al*. 2021-07-16. Scanning signal correction method and device (in Chinese): CN, 113127799A.

Luo F, Liang X F, Zhang M G, *et al*. 2023a-04-25. Method and device for generating seismic acquisition and observation system based on compressed sensing (in Chinese): CN, 111474574B.

Luo F, Zhang M G, Guo S L, *et al*. 2023b-11-28. Scanning signal automatic correction method and device based on force signal feedback (in Chinese): CN, 113138417B.

Luo Y, Liu H J, Mao H B, *et al*. 2018. Harmonic noise suppression in the time-frequency domain via sparse optimization and application to high-density seismic exploration in Junggar Basin, China. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 57(1): 79-85, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.01.011.

Ma J W. 2018. Compressive sensing in geophysical exploration. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 57(1): 24-27, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.01.002.

Ma T, Wang Y C, Liu X G, *et al*. 2020. Application of deconvolution method with ground force in vibroseis raw shots calculation. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(4): 1438-1444, doi: 10.6038/pg2020EE0175.

Ma T R, Wang G D, Liu J Z, *et al*. 2016. The application of pseudo-random sweeps application in vibrator seismic technology. Equipment for Geophysical Prospecting (in Chinese), 26(5): 319-323.

Ma Y S, Zhang J N, Zhao P R, *et al*. 2016. Requirement analysis and research direction for the geophysical prospecting technology of SINOPEC. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 55(1): 1-9, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.01.001.

Mao H B, Ma J Y, Wang X T, *et al*. 2020. Harmonic noise suppression of vibroseis data based on adaptive dictionary learning. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 59(5): 725-735, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2020.05.006.

Martin F D, Munoz P A. 2010. Deharmonics, a method for harmonic noise removal on vibroseis data. //EAGE workshop on Developments in Land Seismic Acquisition for Exploration. Cairo, Egypt: EAGE, doi: 10.3997/2214-4609-pdb.159.b08_p.a._munoz_ppt.

Men Z, Ning H X, Li W B, *et al*. 2024-09-27. Seismic exploration method and device based on compressed sensing (in Chinese): CN, 112859161B.

Meunier J, Bianchi T. 2003-08-05. Method of reducing harmonic noise in vibroseis operations: US, 6603707B1.

Moerig R. 2007-08-21. Method of harmonic noise attenuation in correlated sweep data: US, 7260021B1.

Nasreddin H, Dean T, Iranpour K. 2012. The use of pseudorandom sweeps to reduce interference noise in simultaneous Vibroseis surveys. //ASEG Extended Abstracts. ASEG, 1-4, doi: 10.1071/ASEG2012ab256.

Ni Y D, Wang J F, Ma T, *et al*. 2011. Advances in vibroseis acquisition. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 46(3): 349-356, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2011.03.020.

Nie M T. 2017. Application of UNIVIB vibroseis in complex urban exploration. Equipment for Geophysical Prospecting (in Chinese), 27(6): 360-363, 368.

Nie M T, Wei T, Qi Y F, *et al*. 2020. Research and application of TD rule in vibroseis high efficiency acquisition. Technology Supervision in Petroleum Industry (in Chinese), 36(8): 1-5, doi: 10.3969/j.

issn.1004-1346.2020.08.002.

Nie M T, Ye P P, Guo S L, *et al*. 2025-05-30. Ground surface area point location optimization layout method and device based on compressed sensing (in Chinese): CN, 120068348A.

Nie M T, Wei Z H, Qi Y F, *et al*. 2026a. Improvements in vibroseis source technology towards low frequencies. Applied Geophysics, 23(1): 285-296, doi: 10.1007/s11770-025-1353-2.

Nie M T, Wei Z H, Fang T, *et al*. 2026b. A novel method for low-frequency quality control of seismic vibrator ground force. Journal of Seismic Exploration, 35(1): 171-183, doi: 10.36922/jse025410086.

Ning H X, Tang D L, Pi H M, *et al*. 2019. The technology and development of "WBH" seismic exploration in land, China. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 58(5): 645-653, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.05.002.

Ollivrin G, Tellier N. 2019. SmartLF for robust and straightforward reduction of low-frequency distortion. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. San Antonio, Texas: SEG, 17-21, doi: 10.1190/segam2019-3214978.1.

Phillips, Wei Z, Chen R. 2016. Methods of seismic vibratory limits control at low frequencies: US, 9488742B2.

Postel J J, Meunier J, Bianchi T, *et al*. 2008. V1: implementation and application of single-vibrator acquisition. The Leading Edge, 27(5): 604-608, doi: 10.1190/1.2919577.

Qiu Q L, Cao N W, Bai Y. 2021. Optimization of vibroseis excitation parameters and its application effect. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 45(3): 686-691, doi: 10.11720/wtyht.2021.1395.

Qu Y M, Li Z C, Han W G, *et al*. 2016. The elimination technology for special interference in vibroseis efficient acquisition data. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 55(3): 395-407, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.03.010.

Rozemond H J. 1996. Slip-sweep acquisition. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996. Denver, Colorado: SEG, 64-67.

Sallas J J. 1984. Seismic vibrator control and the downgoing P-wave. Geophysics, 49(6): 732-740, doi: 10.1190/1.1441701.

Sallas J J, Corrigan D, Allen K P. 1998-02-24. High fidelity vibratory source seismic method with source separation: US, 5721710.

Sallas J J, Gibson J B, Lin F, *et al*. 2008. Broadband Vibroseis using simultaneous pseudorandom sweeps. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008. Las Vegas, Nevada: SEG, 100-104, doi: 10.1190/1.3054767.

Shang X M, Wang Y G, Wang S G, *et al*. 2022. Comparison of two different high-density seismic technologies in Junggar basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(4): 1585-1592, doi: 10.6038/pg2022FF0055.

Shang Y S, Liang X F, Zhang M G, *et al*. 2015-04-29. Sliding scanning harmonic suppression method based on sparse inversion (in Chinese): CN, 102798894B.

Song J W, Li P M, Wang W C, *et al*. 2019. High-productivity blended acquired data separation by sparse inversion. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 54(2): 268-273, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2019.02.004.

Stefani J, Hampson G, Herkenhoff E F. 2007. Acquisition using simultaneous sources. //69th EAGE Conference and Exhibition. London, UK: EAGE.

Su H, Qiao J, Zhang Z N, *et al*. 2023. Wide-angle reflection acquisition technology for ultradeep reservoirs based on large-scale low-frequency vibroseis. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 47(2): 377-383, doi: 10.11720/wtyht.2023.1110.

Su S L, Zou Q W, Zheng G J, *et al*. 2019. Application of EV56 vibroseis in complex areas of eastern China. //Proceedings of the 2019 Oil and Gas Geophysics Academic Annual Conference (in Chinese). Nanjing, 145-148, doi: 10.26914/c.cnkihy.2019.022887.

Sun Y, Mubarak M, Marzooq H. 2024. An effective harmonics decomposition method for Vibroseis ground-force signals. //85th EAGE Annual Conference & Exhibition. Oslo, Norway: European Association of Geoscientists & Engineers, 1-5, doi: 10.3997/2214-4609.202410004.

Sun Y M, Almubarak M S, Marzooq H. 2024. Separating harmonics in the ground-force signal of a seismic vibratory source. Geophysics, 89(5): A29-A34, doi: 10.1190/geo2024-0070.1.

Tao Z F, Zhao Y L, Ma L. 2011. Low frequency seismic and low frequency vibrator. Equipment for Geophysical Prospecting (in Chinese), 21(2): 71-76, doi: 10.3969/j.issn.1671-0657.2011.02.001.

Tao Z F, Liu Z G, Wang J F, *et al*. 2015-08-19. Method determining controllable vibration source best low-frequency scanning signal (in Chinese): CN, 103323876B.

Tao Z F, Luo F, Ma L, *et al*. 2016. LFV3-low frequency vibrator. Petroleum Science and Technology Forum (in Chinese), 35(S1): 9-12, 237-238.

Tao Z F. 2017. New-generation high-precision vibrator EV-56 successfully rolled off production line. Natural Gas Industry (in Chinese), 37(6): 92.

Tao Z F. 2018. High-precision vibroseis to meet demands and challenges of current geophysical prospecting. Natural Gas Exploration and Development (in Chinese), 41(3): 1-6, doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2018.03.001.

Tao Z F. 2022. Broadband high-precision vibroseis sets a model of innovation and excellence. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 57(3): 746.

Tian X Q, Zhou T, Wang Z M, *et al*. 2011. Method of eliminating harmonic noise for vibroseis data in slip sweep technique. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 50(6): 565-574, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2011.06.005.

Tong S Y, Liu G, Xu X G, *et al*. 2024. Ocean bottom seismic based on generation of countermeasure network of Unet structure data aliasing noise suppression method. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 54(8): 123-131, doi: 10.16441/j.cnki.hdxb.20230136.

Tong X Q, Lin J, Jiang T, *et al*. 2012. Summary of development of land vibrator. Progress in Geophysics (in Chinese), 27(5): 1912-1921, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.011.

Wang B B, Li H Q, Zhao B, *et al*. 2013. Harmonic noise removal on vibroseis slip-sweep data. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 48(1): 37-41, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2013.01.006.

Wang B F, Li J K, Han D. 2022. Iterative deblending using MultiResUNet with multilevel blending noise for training and transfer learning. Geophysics, 87(3): V205-V214, doi: 10.1190/geo2021-0341.1.

Wang H B, Zhang W, Zhang H, *et al*. 2019. Deep seismic reflection acquisition with high-precision vibroseis. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(5): 1910-1916, doi: 10.6038/pg2019DD0314.

Wang H Z, Feng B, Wang X W, *et al*. 2016. Compressed sensing and its application in seismic exploration. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 55(4): 467-474, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.04.001.

Wang R Z, Bai X M, Wang J K, *et al*. 2020. Seismic exploration methods for igneous rock-overlain regions in the Chaokewula Sag. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 59(3): 382-395, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2020.03.007.

Wang Y L, Dong L Q, An X Y, *et al*. 2024. Case study analysis of seismic data reconstruction technology based on compressive sensing. //Proceedings of the 2nd China Petroleum Geophysics Academic Annual Conference (Volume I) (in Chinese). Wuhan, 82-85, doi: 10.26914/c.cnkihy.2024.001569.

Wei T, Zhang M G, Wang C H, *et al*. 2012. High-productivity vibroseis techniques and their application in international seismic projects. Oil Forum (in Chinese), 31(2): 7-10, 74, doi: 10.3969/j.issn.1002-302x.2012.02.002.

Wei T, Wang W, Zhu Y, *et al*. 2024a. Research and application of low-frequency excitation technology with conventional vibroseis in Niger exploration area. //Proceedings of the 2nd China Petroleum Geophysics Academic Annual Conference (Volume I) (in Chinese). Wuhan, 327-329, doi: 10.26914/c.cnkihy.2024.

001632.

Wei T, Zhu Y, Li P M, *et al*. 2024b. Vibroseis frequency blending simultaneous sweep method. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 59(5): 948-956, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2024.05.003.

Wei T, Zhu Y, Liu Z G, *et al*. 2024. Design of low frequency sweep signals for conventional vibrators. //Fourth International Meeting for Applied Geoscience & Energy. Houston, Texas: SEG, 282-286, doi: 0.1190/image2024-4090586.1.

Wei Y J, Zhang P, Xu Z. 2019. Separation of 3D blending seismic data based on sparse constrained inversion. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(10): 4000-4009, doi: 10.6038/cjg2019M0501.

Wei Y J, Zhu Y J, Cao J J, *et al*. 2025. Research on simultaneous-source data deblending based on improved U-Net. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(4): 1428-1439, doi: 10.6038/pg2025II0555.

Wei Z H, Phillips T F. 2013. On the generation of low frequencies with modern seismic vibrators. Geophysics, 78(2): WA91-WA97, doi: 10.1190/geo2012-0342.1.

Wei Z H, Ma H W, Pan Y Z. 2015. Low frequencies HDR (Harmonic Distortion Reduction) technology of seismic vibrators. Equipment for Geophysical Prospecting (in Chinese), 25(5): 293-296, 305, doi: 10.3969/j.issn.1671-0657.2015.05.004.

Wen R, Liu G C, Ran Y. 2018. Three key factors in seismic data reconstruction based on compressive sensing. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 53(4): 682-693, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2018.04.004.

Xu L L, Zhang J, Zhao G Y. 2022. Design technology of nonlinear sweep signal of vibroseis based on damped Ricker wavelet. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 57(3): 540-549.

Yu F W, Zhang J, Hu L X, *et al*. 2015-12-23. Design method for frequency domain low frequency compensation scanning signal (in Chinese): CN, 105182405A.

Yu F W, Di Z X. 2018. Suppressing of inter-record harmonic-noise in vibroseis simultaneous shooting acquistion. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(1): 292-296, doi: 10.6038/pg2018BB0013.

Zhan C Q, Wei T, Wang G D, *et al*. 2020. How SmartLF works and applications. Equipment for Geophysical Prospecting (in Chinese), 30(3): 206-210.

Zhang C J, Hu J X, Wei Y J, *et al*. 2022. Study of simultaneous source data deblending based on improved DnCNN. Journal of Hebei GEO University (in Chinese), 45(6): 41-48, doi: 10.13937/j.cnki.hbdzdxxb.2022.06.006.

Zhang J, Hu L X, Zhao G Y, *et al*. 2020-12-22. Low-distortion wideband scanning signal design method (in Chinese): CN, 109782335B.

Zhang L L, Xia J J, Li X M, *et al*. 2024. Quantitative optimization design of vibroseis dynamic sweep time-distance rule and its application. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 63(3): 535-547, doi: 10.12431/issn.1000-1441.2024.63.03.002.

Zhang M G, Luo F, Wang C H, *et al*. 2017. Industrialization progress of Wide-azimuth, Broadband, and High-density (WBH) seismic acquisition technique. Natural Gas Industry (in Chinese), 37(11): 1-8, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.11.001.

Zhang M G, Luo F, Wei G W, *et al*. 2019. Planning and integration of acquisition technologies for ultralarge seismic exploration project, the United Arab Emirates. Natural Gas Exploration and Development (in Chinese), 42(2): 66-75, doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2019.02.008.

Zhang M G, Zhu Y, Dong L Q, *et al*. 2021. Ultra-high productivity acquisition technology and its application. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(3): 1176-1186, doi: 10.6038/pg2021EE0147.

Zhou J Z, Zhang J H, Niu Q B, *et al*. 2020. The key technique application research on low frequency vibrator "two-wide and one-high" seismic data processing in Jiandingshan area of Qaidam Basin. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 44(2): 313-320, doi: 10.11720/wtyht.2020.1280.

Zhou S. 2017. Slip sweep time-distance curve acquisition design and application by vibroseis. Reservoir Evaluation and Development (in Chinese), 7(5): 54-57, 84, doi: 10.3969/j.issn.2095-1426.2017.05.011.

Zhou S, Lü Y, Lü G H, *et al*. 2017. Irregular seismic geometry design and data reconstruction based on compressive sensing. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 56(5): 617-625, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2017.05.001.

Zhou S, Huo S D, Hu L X, *et al*. 2018. Denoising for seismic data from vibroseis independent simultaneous sweeping. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 57(5): 691-696, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.05.008.

Zhu L H. 2018. Deblending simultaneous-source seismic data using sparse inversion. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 57(2): 208-212, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.02.005.

附中文参考文献

安学勇, 翟立新, 董烈乾, 等. 2025. 一种鲁棒型非规则地震数据重构方法. //第七届油气地球物理学术年会论文集. 西安, 145-148, doi: 10.26914/c.cnkihy.2025.016747.

白旭明, 李海东, 陈敬国, 等. 2015. 可控震源单台高密度采集技术及应用效果. 中国石油勘探, 20(6): 39-43, doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2015.06.005.

蔡敏贵, 倪宇东, 马涛, 等. 2020. 力信号反褶积运算对于提高地震资料保真度的研究分析. 石油物探, 59(5): 788-794, 822, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2020.05.012.

曹国滨, 张剑, 胡立新, 等. 2024-12-06. 基于力信号的谐波压制可控震源扫描信号设计方法: 中国, 114966829B.

曹宏, 代双和, 李金付, 等. 2025. 中国致密油气地震勘探技术及其发展方向. 石油学报, 46(1): 236-254, doi: 10.7623/syxb202501016.

曹务祥, 闫智慧, 邹小燕, 等. 2011. 利用可控震源的力信号压制谐波干扰. 石油物探, 50(1): 89-92, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2011.01.014.

柴童, 韩文功, 毕明波. 2018. 一种可控震源非线性扫描信号设计方法及应用. 物探与化探, 42(4): 753-758, doi: 10.11720/wtyht2018.1217.

陈生昌, 陈国新, 王汉闯. 2015. 稀疏性约束的地球物理数据高效采集方法初步研究. 石油物探, 54(1): 24-35, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2015.01.004.

董烈乾, 汪长辉, 李长芬, 等. 2018. 利用自适应中值滤波方法压制混叠噪声. 地球物理学进展, 33(4): 1475-1479, doi: 10.6038/pg2018BB0360.

董烈乾, 张慕刚, 周大同, 等. 2019a. 一种优化的复曲波变换压制混叠噪声方法. 地球物理学进展, 34(2): 517-522, doi: 10.6038/pg2019CC0304.

董烈乾, 王岩, 霍禹, 等. 2019b. 基于中值滤波和 seislet 阈值法联合压制混叠噪声方法. 物探化探计算技术, 41(6): 705-711, doi: 10.3969/j.issn.1001-1749.2019.06.01.

董烈乾, 王泽, 梁晓峰, 等. 2020a. 多道奇异值谱约束迭代反演压制邻炮干扰方法. //2020 年中国地球科学联合学术年会论文集(八)—专题二十二: 地震波衰减与深部成像、专题二十三:地震灾害防治与应急管理、专题二十四:区域地震构造与地震地质灾害. 重庆, 30-31, doi: 10.26914/c.cnkihy.2020.060946.

董烈乾, 周恒, 郭善力, 等. 2020b. 一种改进型 seislet 域迭代阈值压制混叠噪声方法. 物探与化探, 44(3): 568-572, doi: 10.

11720/wtyht.2020.1097.

董烈乾, 张慕刚, 骆飞, 等. 2021. 应用SVD约束的迭代反演混叠噪声压制方法. 石油地球物理勘探, 56(1): 57-61, 117, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.01.006.

董烈乾, 张慕刚, 骆飞, 等. 2022. 基于信噪比质控的优化迭代反演非规则数据重构方法. 地球物理学进展, 37(4): 1541-1547, doi: 10.6038/pg2022FF0429.

董烈乾, 周恒, 桑运云, 等. 2025. 基于压缩感知的地震数据同时规则化和插值方法. 地球物理学进展, 40(1): 276-284, doi: 10.6038/Pg2025HH0428.

韩文功, 曲英铭, 胡立新, 等. 2015. 基于反射系数和地面力信号的谐波干扰消除法. 地球物理学进展, 30(6): 2647-2659, doi: 10.6038/pg20150624.

黄德智, 韩立国, 李辉峰, 等. 2020. 基于S变换自适应滤波迭代的多源地震数据分离. 石油地球物理勘探, 55(6): 1253-1262, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.06.011.

黄明忠, 李培明, 王彦娟. 2012. 独立同步激发数据两步法邻炮干扰压制技术研究. 石油物探, 51(5): 464-468, 485, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2012.05.007.

黄小刚. 2019. 浅谈海上压缩感知地震勘探. 石油物探, 58(2): 162-175, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.02.002.

李波霖, 王彦春, 刘学清, 等. 2021. 双相移滑动扫描谐波压制方法. 石油地球物理勘探, 56(2): 265-272, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.02.007.

李成博, 张宇. 2018. CSI: 基于压缩感知的高精度高效率地震资料采集技术. 石油物探, 57(4): 537-542, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.04.006.

李凤磊, 刘成斋, 李振春. 2010. 基于褶积滤波的滑动扫描谐波压制. //中国地球物理2010——中国地球物理学会第二十六届年会、中国地震学会第十三次学术大会论文集. 宁波, 479.

李桂林, 田玉昆, 尹吴海, 等. 2019. 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. 地球物理学进展, 34(1): 113-118, doi: 10.6038/pg2019BB0044.

李合群. 2013-04-24. 一种滤波法可控震源地震数据谐波干扰压制方法: 中国, 102262243B.

李红远, 王井富, 肖虎, 等. 2019. 可控震源伪随机扫描技术探讨. //中国石油学会2019年物探技术研讨会论文集. 成都.

李庆忠. 1993. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析. 北京: 石油工业出版社.

李振春, 曲英铭, 韩文功, 等. 2016. 可控震源两种谐波产生机理与特征研究. 石油物探, 55(2): 159-172, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.02.001.

刘宏杰, 蒋立, 张仲祜, 等. 2015. 基于能量差异的滑动扫描数据谐波压制方法. 新疆石油地质, 36(1): 98-101, doi: 10.7657/XJPG20150120.

刘洋, 聂明涛, 齐永飞. 2024-12-17. 可控震源滑动时间间隔确定方法、装置、设备和存储介质: 中国, 116500684B.

卢光年, 孙晓英, 孙梦, 等. 2022. 可控震源升降频同步扫描高效采集技术及其应用效果. 石油工业技术监督, 38(10): 20-23, doi: 10.20029/j.issn.1004-1346.2022.10.005.

路交通, 张庆淮, 孟祥顺, 等. 2022. 一种改进的动态滑动扫描和质控方法及应用效果. 石油物探, 61(4): 591-598, 693, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2022.04.002.

骆飞, 石双虎, 邓志文, 等. 2018. 可控震源分频同时扫描采集方法实现与应用. 石油物探, 57(1): 28-32, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.01.003.

骆飞, 张慕刚, 汪长辉, 等. 2021-07-16. 一种扫描信号校正方法及装置: 中国, 113127799A.

骆飞, 梁晓峰, 张慕刚, 等. 2023a-04-25. 基于压缩感知的地震采集观测系统的生成方法及装置: 中国, 111474574B.

骆飞, 张慕刚, 郭善力, 等. 2023b-11-28. 一种基于力信号反馈的扫描信号自动校正方法及装置: 中国, 113138417B.

罗勇, 刘宏杰, 毛海波, 等. 2018. 时频域稀疏优化谐波噪声压制方法及其在准噶尔盆地高密度地震勘探中的应用. 石油物探, 57(1): 79-85, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.01.011.

马坚伟. 2018. 压缩感知走进地球物理勘探. 石油物探, 57(1): 24-27, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.01.002.

马涛, 王彦春, 柳兴刚, 等. 2020. 力信号反褶积方法在可控震源单炮资料提取中的应用. 地球物理学进展, 35(4): 1438-1444, doi: 10.6038/pg2020EE0175.

马铁荣, 王光德, 刘金中, 等. 2016. 伪随机扫描在可控震源上的应用探讨. 物探装备, 26(5): 319-323.

马永生, 张建宁, 赵培荣, 等. 2016. 物探技术需求分析及攻关方向思考——以中国石化油气勘探为例. 石油物探, 55(1): 1-9, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.01.001.

毛海波, 马俊彦, 王晓涛, 等. 2020. 基于自适应字典学习的可控震源数据谐波噪声压制方法. 石油物探, 59(5): 725-735, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2020.05.006.

门哲, 宁宏晓, 李伟波, 等. 2024-09-27. 基于压缩感知的地震勘探方法及装置: 中国, 112859161B.

倪宇东, 王井富, 马涛, 等. 2011. 可控震源地震采集技术的进展. 石油地球物理勘探, 46(3): 349-356, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2011.03.020.

聂明涛. 2017. UNIVIB可控震源在复杂城区勘探中的应用. 物探装备, 27(6): 360-363, 368.

聂明涛, 魏铁, 齐永飞, 等. 2020. 可控震源高效采集中TD规则的研究与应用. 石油工业技术监督, 36(8): 1-5, doi: 10.3969/j.issn.1004-1346.2020.08.002.

聂明涛, 叶朋朋, 郭善力, 等. 2025-05-30. 基于压缩感知的地表区点位优化布设方法及装置: 中国, 120068348A.

宁宏晓, 唐东磊, 皮红梅, 等. 2019. 国内陆上"两宽一高"地震勘探技术及发展. 石油物探, 58(5): 645-653, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.05.002.

邱庆良, 曹乃文, 白烨. 2021. 可控震源激发参数优选及应用效果. 物探与化探, 45(3): 686-691, doi: 10.11720/wyht.2021.1395.

曲英铭, 李振春, 韩文功, 等. 2016. 可控震源高效采集数据特征干扰压制技术. 石油物探, 55(3): 395-407, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.03.010.

尚新民, 王延光, 王胜阁, 等. 2022. 准噶尔盆地两种不同高密度地震方法对比. 地球物理学进展, 37(4): 1585-1592, doi: 10.6038/pg2022FF0055.

尚永生, 梁晓峰, 张慕刚, 等. 2015-04-29. 一种基于稀疏反演的滑动扫描谐波压制方法: 中国, 102798894B.

宋家文, 李培明, 王文闯, 等. 2019. 基于稀疏反演的高效混采数据分离方法. 石油地球物理勘探, 54(2): 268-273, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2019.02.004.

苏海, 乔金, 张忠楠, 等. 2023. 基于大型低频可控震源的超深储层广角反射采集技术. 物探与化探, 47(2): 377-383, doi: 10.11720/wtyht.2023.1110.

苏世龙, 邹启伟, 郑桂娟, 等. 2019. EV56 型可控震源在东部复杂区的应用. //2019 年油气地球物理学术年会论文集. 南京, 145-148, doi: 10.26914/c.cnkihy.2019.022887.

陶知非, 赵永林, 马磊. 2011. 低频地震勘探与低频可控震源. 物探装备, 21(2): 71-76, doi: 10.3969/j.issn.1671-0657.2011.02.001.

陶知非, 刘志刚, 王井富, 等. 2015-08-19. 一种确定可控震源最佳低频扫描信号的方法: 中国, 103323876B.

陶知非, 骆飞, 马磊, 等. 2016. LFV3 低频可控震源. 石油科技论坛, 35(S1): 9-12, 237-238.

陶知非. 2017. 新一代高精度可控震源 EV-56 成功下线. 天然气工业, 37(6): 92.

陶知非. 2018. 应对当今地震勘探需求与挑战的高精度可控震源. 天然气勘探与开发, 41(3): 1-6, doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2018.03.001.

陶知非. 2022. 宽频高精度可控震源树立了创新超越的典范. 石油地球物理勘探, 57(3): 746.

田新琦, 周彤, 王志明, 等. 2011. 滑动扫描可控震源地震数据谐波干扰的消除方法. 石油物探, 50(6): 565-574, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2011.06.005.

童思友, 刘岗, 徐秀刚, 等. 2024. 基于 UNet 结构生成对抗网络的海底地震勘探数据混叠噪声压制方法. 中国海洋大学学报(自然科学版), 54(8): 123-131, doi: 10.16441/j.cnki.hdxb.20230136.

佟训乾, 林君, 姜弢, 等. 2012. 陆地可控震源发展综述. 地球物理学进展, 27(5): 1912-1921, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.011.

王宝彬, 李合群, 赵波, 等. 2013. 滑动扫描地震数据的谐波干扰压制. 石油地球物理勘探, 48(1): 37-41, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2013.01.006.

王海波, 张伟, 张宏, 等. 2019. 高精度可控震源在深反射地震采集中的应用. 地球物理学进展, 34(5): 1910-1916, doi: 10.6038/pg2019DD0314.

王华忠, 冯波, 王雄文, 等. 2016. 压缩感知及其在地震勘探中的应用. 石油物探, 55(4): 467-474, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.04.001.

王瑞贞, 白旭明, 王金宽, 等. 2020. 朝克乌拉凹陷火成岩覆盖区地震勘探方法研究. 石油物探, 59(3): 382-395, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2020.03.007.

王云雷, 董烈乾, 安学勇, 等. 2024. 压缩感知地震数据重构技术的实例应用分析. //第二届中国石油物探学术年会论文集(上册). 武汉, 82-85, doi: 10.26914/c.cnkihy.2024.001569.

魏铁, 张慕刚, 汪长辉, 等. 2012. 可控震源高效采集技术及在国际项目中的应用. 石油科技论坛, 31(2): 7-10, 74, doi: 10.3969/j.issn.1002-302x.2012.02.002.

魏铁, 王伟, 祝杨, 等. 2024a. 常规可控震源低频激发技术在尼日尔探区的研究应用. //第二届中国石油物探学术年会论文集(上册). 武汉, 327-329, doi: 10.26914/c.cnkihy.2024.001632.

魏铁, 祝杨, 李培明, 等. 2024b. 可控震源混频同步激发方法. 石油地球物理勘探, 59(5): 948-956, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2024.05.003.

魏亚杰, 张盼, 许卓. 2019. 基于稀疏约束反演的三维混采数据分离. 地球物理学报, 62(10): 4000-4009, doi: 10.6038/cjg2019M0501.

魏亚杰, 朱煜嘉, 曹静杰, 等. 2025. 基于改进 U-Net 的混合震源数据分离研究. 地球物理学进展, 40(4): 1428-1439, doi: 10.6038/pg2025II0555.

魏周宏, 马红伟, 潘远洲. 2015. 可控震源低频谐波畸变压制技术. 物探装备, 25(5): 293-296, 305, doi: 10.3969/j.issn.1671-0657.2015.05.004.

温睿, 刘国昌, 冉扬. 2018. 压缩感知地震数据重建中的三个关键因素分析. 石油地球物理勘探, 53(4): 682-693, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2018.04.004.

徐雷良, 张剑, 赵国勇. 2022. 基于阻尼雷克子波的可控震源非线性扫描信号设计方法. 石油地球物理勘探, 57(3): 540-549.

于富文, 张剑, 胡立新, 等. 2015-12-23. 频率域低频补偿扫描信号的设计方法: 中国, 105182405A.

于富文, 邸志欣. 2018. 可控震源同步激发采集交涉干扰压制. 地球物理学进展, 33(1): 292-296, doi: 10.6038/pg2018BB0013.

占春启, 魏铁, 王光德, 等. 2020. SmartLF 工作原理和应用介绍. 物探装备, 30(3): 206-210.

张翠军, 胡家昕, 魏亚杰, 等. 2022. 基于改进 DnCNN 的混合震源数据分离研究. 河北地质大学学报, 45(6): 41-48, doi: 10.13937/j.cnki.hbdzdxxb.2022.06.006.

张剑, 胡立新, 赵国勇, 等. 2020-12-22. 低畸变宽频扫描信号设计方法: 中国, 109782335B.

张录录, 夏建军, 李献民, 等. 2024. 可控震源动态扫描时距规则定量优化设计及应用. 石油物探, 63(3): 535-547, doi: 10.12431/issn.1000-1441.2024.63.03.002.

张慕刚, 骆飞, 汪长辉, 等. 2017. "两宽一高"地震采集技术工业化应用的进展. 天然气工业, 37(11): 1-8, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.11.001.

张慕刚, 骆飞, 魏国伟, 等. 2019. 阿联酋超大型地震勘探项目采集技术规划与集成. 天然气勘探与开发, 42(2): 66-75, doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2019.02.008.

张慕刚, 祝杨, 董烈乾, 等. 2021. 可控震源超高效混叠采集技术及应用. 地球物理学进展, 36(3): 1176-1186, doi: 10.6038/pg2021EE0147.

周锦钟, 张金海, 牛全兵, 等. 2020. 柴达木盆地尖顶山地区低频可控震源"两宽一高"地震资料处理关键技术应用研究. 物探与化探, 44(2): 313-320, doi: 10.11720/wtyht.2020.1280.

周松. 2017. 可控震源高效采集滑动时距曲线设计技术. 油气藏评价与开发, 7(5): 54-57, 84, doi: 10.3969/j.issn.2095-1426.2017.05.011.

周松, 吕尧, 吕公河, 等. 2017. 基于压缩感知的非规则地震勘探观测系统设计与数据重建. 石油物探, 56(5): 617-625, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2017.05.001.

周松, 霍守东, 胡立新, 等. 2018. 可控震源独立同步扫描高效地震采集资料噪声压制方法. 石油物探, 57(5): 691-696, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.05.008.

朱立华. 2018. 基于稀疏反演的多震源地震混合采集数据分离技术. 石油物探, 57(2): 208-212, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2018.02.005.