

doi: 10.11720/wtyht.2020.0237

戚宾,王祥春,赵庆献.海洋电火花震源地震勘探研究进展[J].物探与化探,2020,44(1):107-111.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0237

Qi B, Wang X C, Zhao Q X. Research on the progress of marine sparker seismic exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 107-111. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0237

海洋电火花震源地震勘探研究进展

戚宾¹, 王祥春¹, 赵庆献²

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510760)

摘 要: 电火花震源是一种重要的海洋地震勘探技术装备。它不仅环保、安全、成本低,而且数据具有宽频带优势,能够实现高分辨率地震勘探。但电火花震源在发展初期,存在信号不稳定、勘探深度浅等问题,导致它的发展速度减慢而被气枪震源所取代。后来,随着电力电子技术的快速发展以及数据处理水平的提高,这些问题逐渐得到解决,近年来逐渐又引起了人们的重视。文中概括了电火花震源的硬件、数据处理方法的发展历程,总结了电火花震源发展过程中存在的问题,阐述了前人使用电火花震源地震勘探的应用效果,从数据处理角度提出了解决存在问题的方法,展望了电火花震源对于未来海洋地震勘探的前景以及发展方向,认为电火花震源在未来海洋地震勘探中将会发挥更大的作用。

关键词: 电火花震源;分辨率;数据处理;地震勘探;气枪震源

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)01-0107-05

0 引言

21 世纪是海洋强国战略发展的重要时期,也是海洋地震勘探技术发展的重要阶段。勘探深度从浅层向中深层进军、勘探目标从简单到复杂,这些勘探要求不断推动着海洋地震勘探技术的进步与革新^[1]。电火花震源作为海洋地震勘探重要采集装备,近年来,又引起了广泛关注。

电火花震源利用高压放电效应,使其间的水介质形成通路,电极间放电产生的热能使电极周围的海水汽化而产生巨大的冲击力,激发出地震信号^[2]。它通常由充电单元、脉冲放电单元以及放电电极组成^[3]。由于震源采用多电极气晕放电,有效提高了数据主频及频带范围,因此其数据具有较高的纵向分辨率。电火花震源高效、环保、安全、价格低廉,满足海上地震数据采集的 HSE(健康、安全与环保)要求;电火花震源结构简单、易于控制,利于

施工难度相对较大区域的地震数据采集。但电火花震源在发展初期受电力电子技术发展的限制,激发功率小,导致勘探深度浅;对于一些地质构造复杂的区域,数据不稳定、波形变化大、子波形态不规则,促使数据处理难度非常大,很难达到理想的勘探效果。这一阶段,电火花震源的发展过程变得缓慢、甚至被气枪震源所取代。伴随着电力电子科学技术的快速发展,电火花震源激发功率低、信号不稳定的问题逐步被解决;随着地震资料宽频处理、子波整形等处理技术的出现,电火花震源地震资料的高分辨率优势得以体现,推动了电火花震源技术的进一步发展。

文中总结了电火花震源在海洋地震勘探领域的发展历程,提出了电火花震源数据处理过程中存在的问题以及解决这些问题的常用处理方法,展望了电火花震源在海洋地震勘探领域的发展趋势,对今后海洋地震勘探能力的提高、电火花震源硬件的发展以及电火花震源数据处理方法的进步具有一定的借鉴意义。

收稿日期: 2019-04-28; 修回日期: 2019-11-18

基金项目: 国家重点研发计划课题“天然气水合物高精度三维地震数据处理和成像技术研究”(2017YFC0307405)

第一作者: 戚宾(1992-),男,宁夏平罗人,硕士研究生,主要研究方向为海洋地震数据处理。Email: 444684182@qq.com

通讯作者: 王祥春(1980-),男,辽宁普兰店人,博士,副教授,主要研究方向为深水油气及海洋天然气水合物地震勘探。Email: wangxc@cugb.edu.cn

1 研究历程

1.1 电火花震源的研究

海洋地震勘探过程中,地震数据的采集非常关键。震源直接影响地震勘探的分辨率和穿透深度,根据不同的勘探环境,选择合适的震源对海洋地震勘探数据的采集至关重要^[4]。海洋地震数据采集环境不同于陆地,风浪变化大导致海况复杂,勘探区域可能涉及到渔业和海洋生物的生存区域,需要对它们进行保护,一些狭窄通道、海域的采集难度很大,这就对海洋地震勘探震源的选择提出了更加严格的要求。针对这些特殊采集情况,电火花震源在海洋地震勘探过程中逐渐得到了广泛的应用。根据电火花震源硬件技术发展的情况,其发展可概述为三个阶段。

1.1.1 电火花震源研究的起始阶段 1957~1980

1957年,阿尔卑斯地球物理公司率先研究了第一台电火花震源系统;美国最早在60年代初期开始电火花的研制工作,并取得了海洋电火花震源的专利^[5]。法国SIG公司从1967年起开展海上电火花震源的研制,生产的Energos系列电火花震源轻便灵活,能量250~5 000 J,穿透能力大,适用于深水勘探。我国在70年代初期,最早由中科院电工研究所与石油部、地质部等单位合作,研制出大功率电火花震源,装载6条勘探船进行了地震数据的采集工作,获得了非常好的深层反射地震记录^[6]。1973年,巴伯(Barbier)发表了研制海洋勘探用的编码电火花震源,虽价格低廉,但勘探效果较气枪震源差^[7]。1974~1979年,美国、欧洲、加拿大、墨西哥、南美、非洲、远东、澳大利亚和新西兰等国家和地区使用电火花震源进行了海洋油气勘探,美国使用的次数相对最多^[8]。但是,随着使用次数的增多,传统电火花震源子波重复性差、充电效率低、性能不稳定等相关问题日益凸显,渐渐难以满足地震勘探的需要,电火花震源也就逐步被气枪震源所取代。

这一阶段属于电火花震源发展的初步阶段,虽然存在诸多问题,但引起了人们对于海洋地震勘探开发研究的兴趣,促进了海洋地震勘探技术的发展与进步。

1.1.2 电火花震源研究的发展阶段 1997~2007

1997~2007年是电火花震源发展的又一个关键时期。伴随电力电子、精密机械加工技术快速发展,电火花震源的电源和发射电极在这一时期都得到了很好的改进^[9],弥补了传统电火花存在的缺陷,电

火花震源在海洋地震勘探领域中又引起了人们的重视。这一时期我国也加速了对电火花震源的研究工作。2000年,我国利用电火花震源装备7条勘探船在渤海、黄海、东海和南海海域采集了近十万公里的地震资料^[10]。2004年,国家海洋局第一海洋研究所成功设计出了一种智能控制复合相干电火花震源装置^[11],这种复合电火花震源可以很好地压制震源子波的第二个压力脉冲,有效地增强了地震资料的品质,提高了地震勘探的分辨率。

这一阶段电火花震源技术的革新,使得电火花震源采集到的震源子波波形得到了有效改善,资料的信噪比也有所提升。电火花功率的提高,增加了电火花震源的勘探深度。但出于安全因素的考虑,激发功率并不能太大,所以,穿透深度依然不高。电火花的宽频优势,对于一些薄层的刻画非常有利,这些跨越式的发展为电火花技术的成熟奠定了重要的基础。由于电火花的激发功率不高,震源的稳定性仍然很差,波形易受海浪、气泡的影响,多次波、线性干扰以及异常强振幅噪声发育明显。这些方面亟需改善。

1.1.3 电火花震源研究的成熟阶段 近10年

近年来,电火花的研制工作日趋成熟,随着海洋勘探难度的增加和勘探要求的提高,电火花震源也成为海洋领域的研究热点。国内由中国科学院电工所与广州海洋地质调查局联合自主研发了海幔20 kJ电火花震源系统,于2009年在南海北部海域进行了试验并获得了成功^[12]。2016年,吴学兵利用电火花震源,借助初至波定位原理,进行检波器定位,实现了准确的定位,验证了电火花震源的技术可行性^[13]。荷兰GEO公司研制的Geo-Spark1600深海多电极电火花发射阵列系统专为水深而设计,探测深度从2~4 500 m,垂直分辨率30 cm,广泛应用于海洋地形调查等方面^[14]。近10年来,长大物探科技有限公司成功研制出了CD-2便携式电火花震源^[5]。电火花震源也在逐步的发展成为海洋地震勘探过程中最主要的震源之一。也正是由于电火花震源的灵活性,面对一些小偏移距、复杂地质特征的地震勘探任务时,电火花震源显得越来越重要。

1.2 电火花震源数据处理方法的研究

1.2.1 电火花地震数据存在的问题和常用的数据处理方法

电火花数据子波重复性差、形态不规则,导致道与道之间存在很大的差异。如果不对子波形态进行有效地处理,会造成地震剖面上出现地质现象模糊、甚至一些虚假层位信息。调整子波形态,一般采用

反褶积技术。反褶积要求数据是最小相位的,而电火花数据是混合相位的,所以,需要对电火花数据进行最小相位化处理。1983年,施德丰等人通过对电火花数据的重采样,利用CILTR模块将混合相位子波变为最小相位子波,使反射波最小相位化,然后利用反褶积技术,取得了很好的处理效果^[15]。2007年,Mathieu等人利用电火花震源对第四系沉积进行了地震地层学评价,并对沉积和基岩界面进行了成像;他们还利用电火花震源的资料测试了3种不同的反滤波方法(脉冲反褶积、匹配滤波以及VSP反褶积技术),认为对于电火花资料,应用相同的算子长度,匹配滤波可以提高资料信噪比,VSP反褶积提高了资料的垂直分辨率,而同样的算子对于脉冲反褶积技术却没有应用效果^[16]。2018年,Kluesner等人通过电火花单道和多道数据,对两种不同组合形式的数据进行了研究,形成了初步的电火花数据处理流程,利用剩余静校正、确定性反褶积、叠后预测反褶积等技术提高了电火花数据的分辨率^[17]。

综上所述,反褶积技术和宽频技术是处理电火花数据的关键技术。反褶积不仅可以整形子波,解决电火花数据子波形态不规则的问题,还可以对鬼波效应有很好地压制效果。宽频技术可以通过拓宽频带有效提高地震数据的分辨率,提升同相轴的识别能力,增强地质现象的刻画程度。

1.2.2 电火花震源数据处理的效果

1981年,黄佩智等人采用电火花震源在我国海域完成近九万公里的地震勘探工作,得到了分辨率高、连续性好、地质现象清楚、深层能量强等特点的地震剖面^[18]。1983年,施德丰等人利用电火花震源资料,获得了比空气枪震源分辨率更高的地震剖面^[15]。2007年,裴彦良等人利用电火花震源激发、高频水听器拖缆接收的浅层反射记录,经过数据处理后,剖面高频成分丰富,分辨率可达2~3 m,各种地震相的形态非常清楚^[11]。2014年,Anitha等人通过对电火花数据的解释推测了印度某地区的浅海环境特征^[19]。2017年,于富文等人在水库地区利用电火花数据弥补了资料的缺口、达到了补天窗的作用^[20]。2018年,任立刚等人应用电火花震源在平原水域区进行了采集试验,得到了信噪比高、同相轴连续性好的三维地震数据体^[21]。同年,蒋辉等人对电火花数据与气枪震源数据进行了对比分析,认为2500 ms以内,两种震源叠加剖面质量相当,大于2500 ms,气枪震源叠加剖面信噪比更高^[22]。通过前人对电火花震源地震资料的处理结果,可以发现,电火花数据能够达到非常好的地震勘探效果,尤其

针对浅层部分,不仅分辨率高,而且频带宽,地质信息丰富,有利于海洋地质调查的研究与使用。

2 研究现状

进入21世纪,我国对于海洋强国战略的提出,加速了海洋地震勘探的进程,高精度、高分辨率的成像要求促进了电火花震源的发展。它的发展体现在两个方面:应用频率和使用范围。从二维到三维、从大偏移距到小偏移距;从小倾角到大、陡倾角的成像;从常规拖缆到OBS,电火花震源在海洋领域应用的频率越来越高;从原始的地质调查,到现阶段海洋天然气水合物的开发、海底隧道等工程领域在海洋物探中的应用,电火花震源使用的范围也越来越广泛。电火花震源水平的发展,使得海洋地震勘探的精度、分辨率得到了有效的提高,也使得人们对于海洋资源的开发与利用变得更有信心。

通过现阶段的研究,电火花在以下3个方面已取得了卓越的成就。①探测深度越来越深:它的探测深度从之前的几米甚至几十米,到现在,600 KJ的震源探测深度可达到5 000~6 000 m^[23];②电火花数据相较于其它震源数据更加全面:它在石油勘探、海洋勘探补天窗方面得到了很好的应用,从叠加剖面上可以看出,它能对空白数据区域形成很好的弥补效果,有利于数据的分析与解释^[20];③推动微测井技术的发展:电火花是微测井技术的一种新技术和新方向,它在微测井技术上已取得了很好的应用效果,在环保的条件下能为社会带来巨大的经济效益^[25]。

到目前为止,在硬件方面,我国电火花震源的研究已经处于国际领先水平^[23]。已成功研制大能量的电火花震源,打破了国际上对于电火花震源技术的垄断,这对于海洋地质、海洋工程以及国防都有重大的研究意义^[24]。下一步研究的重点主要集中在硬件设备的工业化生产以及海洋三维小偏移距数据的采集。在处理方面,已经形成了基本的处理流程,通过子波整形技术,改善了电火花震源子波的形态不规则;通过CRP道集速度分析,改善了小偏移距速度谱能量不集中的缺陷;通过叠前与叠后预测反褶积技术压制鬼波,消除了陷波效应。

3 展望及结论

伴随电子信息技术的发展、仪器研发水平的进一步提高,电火花震源的应用范围也会更加广泛。

可能从最初的仅针对海洋,到以后的地面、井下、江河湖海等领域。同时,电火花震源解决问题的领域也会进一步扩大,包括对第四纪地质、构造地貌学、基底流体流动学、海底滑坡生成等近地表过程的研究,对活动构造和海洋地质灾害以及海洋天然气水合物的勘探及开发的研究,以及利用微测井进行的表层调查^[25]。随着地震勘探要求的提高,高分辨率岩石物性参数反演也越来越重要获取的高精度的岩石物性参数,会成为研究岩石构造、地层物性、提升地球物理勘探能力的一种重要手段。在未来的发展过程中,处理水平肯定也会有大幅度的提升,针对不同条件下的数据应用具有针对性的处理流程、合理应用宽频处理技术、反褶积技术,尽最大限度地提高电火花数据的分辨率是未来电火花震源发展的主要方向。

参考文献 (References):

- [1] 杜向东.中国海上地震勘探技术新进展[J].石油物探,2018,57(3):321-331.
Du X D.Progress of seismic exploration technology in offshore China[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(3):321-331.
- [2] 陆基孟,王永刚.地震勘探原理[M].东营:石油大学出版社,2009:63-135.
Lu J M,Wang Y G.Principles of seismic exploration[M].Dongying:Petroleum University Press,2009:63-135.
- [3] 史孝侠,高迎慧,孙鹁鸿,等.重频脉冲下海洋电火花震源的研制[J].电源技术,2013,37(4):646-649.
Shi X X,Gao Y H,Sun Y H,et al.Development of an underwater sparker with repetitive pulse[J].Chinese Journal of Power Sources,2013,37(4):646-649.
- [4] 李振五.海洋地震震源有效能量的研究[J].海洋地质与第四纪地质,1986,6(1):105-120.
Li Z W.Study on effective energy of marine seismic energy source[J].Marine Geology and Quaternary Geology,1986,6(1):105-120.
- [5] 王中原,罗明璋,王军民,等.基于物联网的电火花震源电力参数实时记录系统设计[J].长江大学学报:自科版,2018,15(5):37-40.
Wang Z Y,Luo M Z,Wang J M,et al.Design of real-time recording system of electric spark source power parameters based on internet of things[J].Journal of Yangtze University:Natural Science Edition,2018,15(5):37-40.
- [6] 樊爱龙,孙鹁鸿,徐旭哲,等.单通道电火花震源及其放电实验研究[J].电工电能新技术,2016,35(5):48-54.
Fan A L,Sun Y H,Xu X Z,et al.Single channel electric spark source and discharge experimental study[J].Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2016,35(5):48-54.
- [7] 万芑,牟泽霖,冯强强.海洋单道地震勘探震源技术[J].中国科技信息,2015(8):65-67.
Wan F,Mou Z L,Feng Q Q.Marine single-channel seismic exploration source technology[J].China Science and Technology Information,2015(8):65-67.
- [8] 左公宁.国外电火花震源应用概况[J].电工电能新技术,1986(1):32-34.
Zuo G N.Foreign sparker source application overview[J].Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,1986(1):32-34.
- [9] 裴彦良,刘保华,王揆洋,等.智能控制复合相干电火花震源技术研究[J].高技术通讯,2006,16(7):697-700.
Pei Y L,Liu B H,Wang K Y,et al.Study on the technique of intelligent controlled multiplex and interferential sparker source[J].Chinese High Technology Letters,2006,16(7):697-700.
- [10] 秦曾衍,左工宁,王永荣,等.高压强脉冲放电及其应用[M].北京:北京工业大学出版社,2000:113-183.
Qin Z Y,Zuo G N,Wang Y R,et al.High-voltage pulsed discharge and its application[M].Beijing:Beijing University of Technology Press,2000:113-183.
- [11] 裴彦良,王揆洋,李官保,等.海洋工程地震勘探震源及其应用研究[J].石油仪器,2007,21(2):20-23.
Pei Y L,Wang K Y,Li G B,et al.Application study of marine engineering seismic sources[J].Petroleum Instruments,2007,21(2):20-23.
- [12] 中国科学院电工研究所.海洋勘探电火花震源[P].中国,2009,CN200810239219.1.
Institute of Electrical Engineering,Chinese Academy of Sciences. Marine exploration sparker source[P].China,2009,CN200810239219.1.
- [13] 吴学兵.电火花震源在浅海检波器定位中的应用研究[J].物探装备,2016,26(1):12-14.
Wu X B.Application study on spark source for hydrophone positioning during exploration on shallow sea[J].Equipment for Geophysical Prospecting,2016,26(1):12-14.
- [14] 吴漩流.大功率电火花震源的研究与设计[D].武汉:长江大学,2016:1-50.
Wu X L.Research and design of high power sparker[D].Wuhan:Yantze University,2016:1-50.
- [15] 施德丰,王清源,孙林,等.海上浅层高分辨率地震勘探[J].石油地球物理勘探,1983,18(2):134-140.
Shi D F,Wang Q Y,Sun L,et al.A high resolution seismic prospecting system for marine shallow[J].Oil Geophysical Prospecting,1983,18(2):134-140.
- [16] Mathiu J,Duchesne,Gilles B,et al.Strategies for waveform processing in sparker data[J].Marine Geophysical Research,2007,28:153-164.
- [17] Kluesner J,Brothers D,Hart P,et al.Practical approaches to maximizing the resolution of sparker seismic reflection data[J].Marine Geophysical Research,2018.
- [18] 黄佩智,陈首桀.海洋地震勘探电火花震源的研究[J].石油地球物理勘探,1981,16(5):74-83.
Huang P Z,Chen S S.Can the spark source for marine seismic exploration[J].Oil Geophysical Prospecting,1981,16(5):74-83.
- [19] Anitha G,Ramana M V,Ramprasad T,et al.Shallow geological en-

vironment of Krishna-Godavari offshore, eastern continental margin of India as inferred from the interpretation of high resolution sparker data[J]. Journal of Earth System Science, 2014, 123(2): 329-342.

[20] 于富文, 蒋辉, 杨德宽. 电火花震源在石油勘探补天窗方面的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2017, 43(9): 107-110.

Yu F W, Jiang H, Yang D K. The application of spark source in complement top-opening of oil industry[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2017, 43(9): 107-110.

[21] 任立刚, 杨德宽. 电火花震源在平原水域区地震采集中的应用及效果分析[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2581-2587.

Ren L G, Yang D K. Application and effect analysis of sparker in seismic acquisition in plain water area[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2581-2587.

[22] 蒋辉, 李海军, 高斌, 等. 电火花震源在石油地震勘探中的应用[J]. 物探装备, 2018, 28(1): 42-44.

Jiang H, Li H J, Gao B, et al. The application of sparker source for seismic exploration[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2018, 28(1): 42-44.

[23] 冯强强, 吴衡, 赵庆献. PPS-50kJ 电火花脉冲震源应用试验[J]. 地质装备, 2016, 17(3): 24-25.

Feng Q Q, Wu H, Zhao Q X. The application test of PPS-50kJ sparker pulse source[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2016, 17(3): 24-25.

[24] 郝小柱, 赵庆献, 裴彦良. 用于天然气水合物勘探的大能量等离子体震源[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(1): 35-40.

Hao X Z, Zhao Q X, Pei Y L. Large-energy plasma seismic source for gas hydrate exploration[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36(1): 35-40.

[25] 涂伟, 宋娜, 刘飞, 等. 电火花震源在微测井调查中的作业流程及实例[J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(10): 75-78.

Tu W, Song N, Liu F, et al. Operation flow and examples of sparker source in micro-logging investigation[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2018, 44(10): 75-78.

Research on the progress of marine sparker seismic exploration

QI Bin¹, WANG Xiang-Chun¹, ZHAO Qing-Xian²

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey of China Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: Sparker is an important equipment for marine seismic exploration technology. It not only is environmentally friendly, safe and low-cost to use, but also has broad frequency advantages for data, which can improve the resolution of seismic exploration. However, in the early stage of its development, there existed some problems such as unstable signals and shallow penetration depth, which caused its development speed to slow down or even to be replaced by air gun source. Later, with the rapid development of electronic technology and data processing level, these problems have been solved very well, and it also has attracted people’s attention once again. This paper reviews the development of sparker source hardware and data processing methods, summarizes the problems existing in the process of sparker source development, expounds the application effect of sparker source used by previous researchers, proposes a solution from the data processing, and predicts the future and important developing direction of the sparker source in marine seismic exploration. The authors hold that sparker source will play a much more important role in marine seismic exploration and this will have significant studying meanings for the improvement of marine seismic exploration, sparker source hardware and source data processing methods.

Key words: sparker; resolution; data processing; seismic exploration; air gun source

(本文编辑: 叶佩)