



## 海洋声学地质调查技术现状与展望

方中华, 陆凯, 杨源, 冯京, 于得水, 秦轲, 尉佳

### Current situation and prospect of marine acoustic geological survey technology

FANG Zhonghua, LU Kai, YANG Yuan, FENG Jing, YU Deshui, QIN Ke, and WEI Jia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023110601>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 声学水面无人艇在浅水海底地貌调查中的应用

Application of acoustic unmanned surface vehicle to submarine geomorphology survey in shallow water

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 219-226

#### 冷泉羽状流多波束水体声学探测技术与应用

Acoustic detecting technology based on multibeam water column imaging and its application to cold seep plume

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 222-231

#### 水下考古地球物理技术进展、挑战及建议

Advance, challenge, and suggestion in geophysical technology for underwater archaeology survey

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 191-201

#### 基于无人机倾斜摄影的三亚市蜈支洲岛综合地质调查研究

Comprehensive geological survey and research on Wuzhizhou Island of Sanya City based on UAV tilt photography technology

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 195-208

#### 海底冷泉气泡羽流声学探测参数研究

Research on acoustic detection parameters for bubble plume in cold seeps

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 188-199

#### 科学计量：中国海洋地质40年发展历程与研究热点分析

Forty years development of marine geology in China: Evidence from scientometrics

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 1-14



关注微信公众号，获得更多资讯信息

方中华, 陆凯, 杨源, 等. 海洋声学地质调查技术现状与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 82-89.

FANG Zhonghua, LU Kai, YANG Yuan, et al. Current situation and prospect of marine acoustic geological survey technology[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 82-89.

# 海洋声学地质调查技术现状与展望

方中华<sup>1,2</sup>, 陆凯<sup>1,2</sup>, 杨源<sup>1,2</sup>, 冯京<sup>1,2</sup>, 于得水<sup>1,2</sup>, 秦轲<sup>1,2</sup>, 尉佳<sup>1,2</sup>

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

**摘要:** 海洋声学地质调查技术是揭示海底地形地貌和地球内部构造与性质的重要技术手段。通过回顾国内外海洋声学地质调查技术发展历程, 在整理中国海洋声学地质调查技术现状的基础上分析了存在的问题, 并结合目前和未来一段时期内中国海洋经济建设和海洋开发利用对海洋声学地质调查技术工作的需求, 提出了相应的对策与建议。此外, 对海洋声学地质调查技术发展趋势进行了展望, 以期为我国海洋声学地质调查技术的发展提供参考。

**关键词:** 海洋声学地质调查技术; 地形地貌; 地层探测; 发展展望

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023110601

## Current situation and prospect of marine acoustic geological survey technology

FANG Zhonghua<sup>1,2</sup>, LU Kai<sup>1,2</sup>, YANG Yuan<sup>1,2</sup>, FENG Jing<sup>1,2</sup>, YU Deshui<sup>1,2</sup>, QIN Ke<sup>1,2</sup>, WEI Jia<sup>1,2</sup>

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China

**Abstract:** The marine acoustic geological survey technology is an important technical mean to reveal the topography of the seabed, and the internal structure and the nature of the Earth. By reviewing the development and history of marine acoustic geological survey technology at home and abroad, the existing problems were analyzed by sorting out the present situation of marine acoustic geological survey technology in China. According to the requirement of ocean economic construction and ocean exploitation and utilization in China, countermeasures and suggestions were put forward. In addition, the development trend and prospect of ocean acoustic geological survey technology are summarized. This paper provided a reference for the development of ocean acoustic geological survey technology in China.

**Key words:** marine acoustic geological survey technology; geomorphology; stratum detection; developmental prospect

在海水中, 声波的传播性能要优于光波和无线电波, 能够传播相对较远的距离, 基于声学技术开发的许多海洋声学地质调查装备成为人类认识海洋的“千里眼”和“顺风耳”。海洋声学地质调查技术广泛应用于海洋测绘、海洋环境监测、海洋资源开发、海洋维权、海洋科学研究和军事等方面的活动。

海洋声学地质调查技术主要是以声波在海水以及在海底地层中的传播、散射规律为基础, 研究海底地形地貌以及海底以下地层构造等地质特征的技术, 主要包括海底地形地貌测量技术和地层探测技术两方面, 前者包括单波束测深、多波束测

深、侧扫声呐; 后者包括浅地层剖面、单道地震、多道地震。

## 1 青岛海洋地质研究所的声学地质调查实践

青岛海洋地质研究所于1998年开始正式自行组队, 独立开展海洋地质调查, 当时所用海洋声学地质调查仪器基本上依赖进口, 所用船舶靠租用渔船, 这种“小舢板”安全系数低, 抗风浪能力弱, 因此, 海洋地质调查工作只能局限在近岸, 声学地质调查手段也较为单一, 只能开展地形地貌测量和浅

资助项目: 中国地质调查局项目 (DD20191003, DD20230643)

作者简介: 方中华 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋地质地球物理调查与研究工作, E-mail: 251374144@qq.com

通讯作者: 陆凯 (1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋区域地质调查与研究工作, E-mail: qimg\_luk@126.com

收稿日期: 2023-11-06; 改回日期: 2024-03-01. 文凤英编辑

部地层声学地质调查。

2005 年拥有了自己的调查船“业治铮号”(现更名为“海洋地质七号”),并于 2006 年开始系统地独立开展近海海洋地质调查工作,该船满载排水量 705 t,最大航速 16 kn,自持力超过 20 d,续航力 2 000 n mile,装备有单波束和多波束测深系统、浅地层剖面测量系统,高分辨率多道测量系统等多台套海洋声学地质调查设备,其中部分设备来源于自研和国产(图 1)。

2017 年“海洋地质九号”船入列,青岛所的海洋声学地质调查从近海挺进深蓝。“海洋地质九号”船总长 87 m,型宽 17 m,最大航速大于 15 kn,设计自持力 60 d,续航力为 10 000 n mile 全电力推进,具有良好的稳性、适航性和操纵性,是一艘适航于无限航区的 5 000 t 级综合科学考察船。该船主要以短道距二维(三维)多道地震为主,同时具备地球物理测量、水文环境测量和地质取样等调查能力,配置国际先进的测深测量系统(单波束和多波束)、侧扫声呐测量系统(四波束)、浅地层剖面测量系统(全海深高分辨率)、大能量电火花震源系统(能量 48 kJ)、地震作业系统(双缆高分辨短道距)等多套装备,具备对海洋水体、海底地形地貌、海底地层(从浅部到中深部)的综合立体探测能力,是深海探测的重要利器。

近 20 年来,青岛海洋地质研究所先后承担并出色完成了“HY126”、“920”、“127”等一系列国家专项地调任务,获得了一系列环境地质、矿产地质、地球物理和地质构造等方面的丰硕成果,有力支撑了我国海洋环境保护、海岸带生态文明建设、海洋矿产资源开发和海防建设,为发展海洋经济和维国家海洋权益做出了贡献。

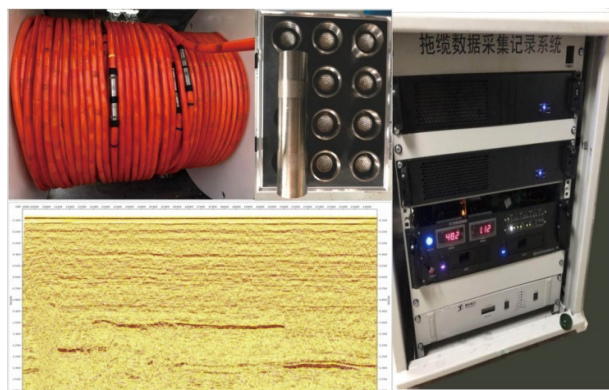


图 1 青岛海洋地质研究所自研小道距多道地震采集系统  
Fig.1 The self-developed trail distance multi-channel seismic acquisition system by Qingdao Institute of Marine Geology

## 2 海洋声学地质调查技术发展历程

20 世纪初,海洋声学地质调查技术在西方萌芽,经过多年的技术沉淀,构建了海洋声学地质调查技术体系。近年来,中国的海洋声学地质调查技术也取得了较快发展。技术的发展进一步拓展了调查空间、丰富了作业手段、提升了调查能力。

### 2.1 海底地形地貌测量技术

#### 2.1.1 单波束测深

1914 年,美国设计制造第一台回声测深仪;1940 年,周同庆研制出中国第一台自动回声测深仪<sup>[1]</sup>。目前,各种测深仪广泛应用于生产、工程和科研的各个领域。常用的测深仪型号繁多,性能各异。美国 ODOM 公司的 Echotrac 系列测深仪、加拿大 KNUDSEN 公司的 KNUDSEN 320 系列测深仪(图 2a)、挪威 Kongsberg 公司的 EA 系列测深仪、我国中海达的 HD 系列测深仪、海鹰 HY 系列测深仪(图 2b)、南方 SDE 系列测深仪是目前国内使用率较高的单波束测深设备。

#### 2.1.2 多波束测深

多波束测深系统由美国 SEABEAM 公司在 20 世纪 80 年代初首先投入商业领域,由于多波束测深系统极大地提高了测深作业效率,具有巨大的科学、商业和军事价值,所以西方发达国家对该技术的开发和应用十分重视<sup>[1]</sup>。目前,国际上知名的多波束测深声呐产品,特别是深水多波束,几乎被挪威、丹麦、德国和美国几个欧美国家垄断,在我国相当一部分科考船上安装了挪威 Kongsberg 公司的 EM 系列<sup>[2]</sup>。各种型号的多波束产品,可以对海底地形测量做到全海深、全覆盖。多波束测深典型发展趋势有三点:一是高精度、高分辨率,提高测量精度;二是超宽覆盖,提升作业效率;三是多功能一体化、小型化,便于携带和安装<sup>[3-6]</sup>。

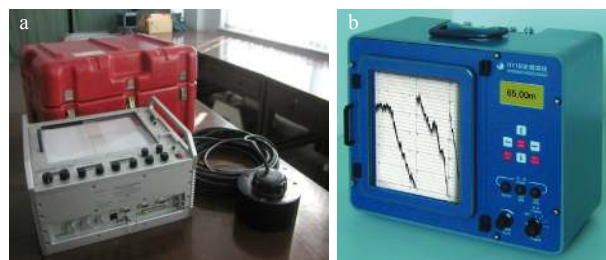


图 2 单波束测深仪

a. KNUDSEN 320M; b. HY160M

Fig.2 Single beam echo sounders

中国对多波束测深技术的研究要晚于西方发达国家,西方在20世纪80年代已经有了相对成熟的商用多波束产品,我国直到20世纪80年代末,才研制出第一套多波束样机,中国科学院声学研究所和海军海洋测绘研究所为此做了大量的工作。此后,大学和企业也对多波束测深系统的研究进行了跟进,哈尔滨工程大学大胆探索创新,1996年成功研制国内首台多波束条带测深仪,并于1997年通过了海试;2006年成功研制国内首台便携式多波束测深仪,主要用于近浅海水下测量;2008年又成功研发便携式高分辨浅水多波束测深仪,该系统测量扇面可达水深的6~8倍,波束数量超过256个。2010年,广州南方测绘公司基于哈尔滨工程大学专利技术,推出一款高性价比、小型化、便携式商用多波束测深系统,哈尔滨工程大学在2年后对该产品实现了软件和硬件升级,进一步提升了该设备的性能。除浅水多波束测量系统外,我国也着手深水多波束测量系统方面的研制,多个单位在进行联合攻关,包括中科院、中国船舶重工集团公司、浙江大学等,已经取得了一些成果<sup>[7-9]</sup>。2017年,中海达旗下子公司江苏中海达海洋信息技术有限公司正式推出新一代高分辨率宽条带多波束测深系统——iBeam 8120(图3)。

### 2.1.3 侧扫声呐

20世纪50年代末侧扫声呐技术开始兴起,60年代开始出现商用产品,由英国海洋研究所研制,70年代后随着数字、信息、材料等技术的发展进入蓬勃发展时期,各种功能的侧扫声呐应运而生<sup>[10-11]</sup>。国外生产侧扫声呐设备的厂家很多,如美国的Teledyne Benthos公司、Edgetech公司(图4a)、Klein公司(图4b)、Jw Fishers公司,英国的GeoAcoustics公司、Tritech公司、STR公司、C-MAX公司,加拿大的IMAGENEX公司,韩国的DSME E&R公司、Sonartech公司等。

中国于1972年研发出第一款舷挂式侧扫声呐系统。后续几年,又相继研发了拖曳式的侧扫声呐系统。1996年,由中科院声学所研制并定型生产的CS-1型侧扫声呐系统<sup>[12]</sup>,得到了广泛的应用。经历了单侧悬挂式、双侧单频拖曳式、双侧双频拖曳式等发展过程。近年来,数字计算机水平大幅提高,水下成像系统的技术水平得到了飞速的发展。如今经常使用的是便携式的高精度系统,在获取图像时可以有多个频率供选择。新型的声呐系统采用相控阵、相干和chirp等技术,适宜搭载于各类水下载体上,包括拖体、水下机器人(AUV)、遥控潜水

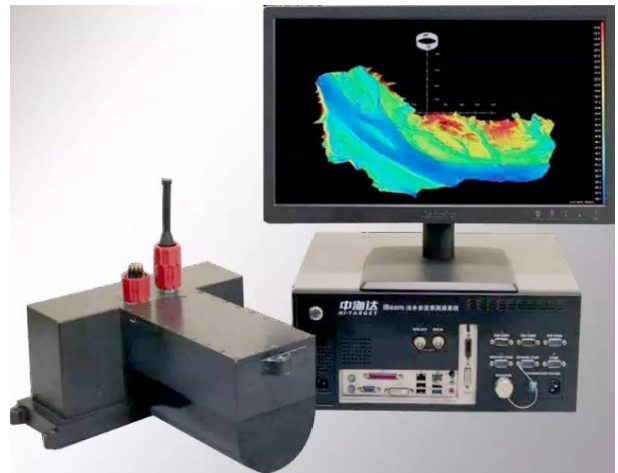


图3 多波束测深仪(iBeam 8120)

Fig.3 Multibeam echo sounder (iBeam 8120)

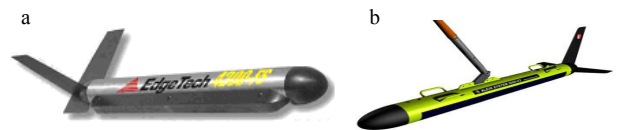


图4 侧扫声呐

a. EdgeTech4200; b. Klein 5000V2

Fig.4 Side-scan sonars

器(ROV)和载人潜水器(HUV),可以进行精细测量<sup>[13-15]</sup>。同时,二维侧扫声呐逐步向三维发展,具有测深功能,能够弥补二维侧扫声呐一些功能上的缺陷。

## 2.2 海底地层探测技术

### 2.2.1 浅地层剖面

20世纪40年代,国外已经开发出海底浅地层剖面仪的样机,20世纪60年代进入应用阶段,出现商用设备<sup>[16]</sup>。受当时技术条件的限制,探测结果只能记录在不能长期保存的热敏纸带上,也不能对采集到的资料进行有效的后处理,影响了浅地层剖面地层探测的精度,增加了解释的工作量和难度。20世纪90年代以来,随着科学技术的飞速发展,浅地层剖面调查系统也相应地进行了技术革新<sup>[17]</sup>。进入21世纪后,三维高精度浅地层剖面仪已经应用于海洋地质调查,获取了精细的海底结构三维图像<sup>[18-19]</sup>。国外成熟的浅地层剖面仪产品有挪威Kongsberg公司生产的TOPAS PS 18/40,德国Innomar公司生产的SES96、SES2000,德国Atlas公司生产的Atlas Parasound P70<sup>[20]</sup>(图5),英国GeoAcoustics公司生产的GeoChirp II、GeoChirp 3-D等。

我国对浅地层剖面仪研究较晚,起步于20世纪70年代,国家把浅地层剖面仪的研制列入国家攻关项目,在科研院所、企事业单位的共同努力下,

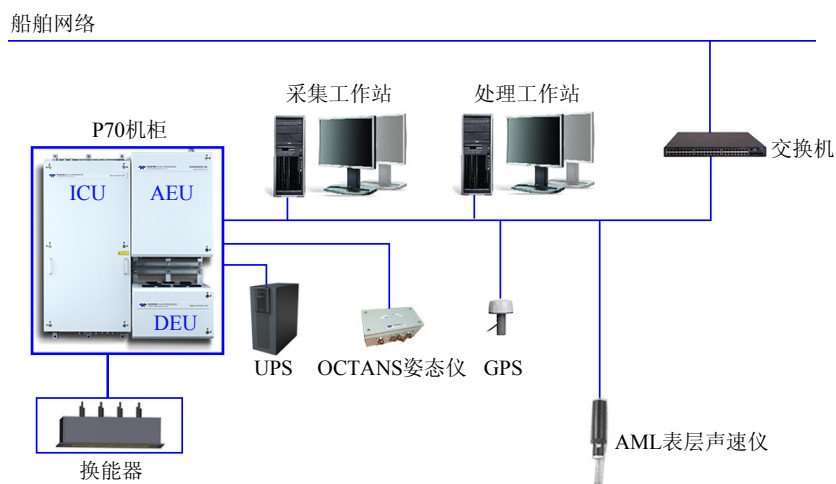


图 5 Atlas Parasound P70 浅地层剖面仪

Fig.5 Atlas Parasound P70 sub-bottom profiler

目前,已经成功研制出多种型号的浅地层剖面仪,部分型号的产品性能优异,可以媲美国外同类产品,如 PGS 型中地层地质剖面仪、PCSBP 型脉冲压缩式浅地层剖面仪<sup>[21-23]</sup>,深拖式超宽频海底剖面仪,但在工艺、稳定性及推广应用方面仍需提高和加强。

### 2.2.2 单道地震

单道地震采集系统主要由接收系统和震源系统组成<sup>[24]</sup>(图 6)。在浅海进行高频地震数据采集时一般使用电火花震源,国外常用的单道地震电火花震源生产厂家主要有英国 AAE 公司、法国 SIG 公司、荷兰 Geo-Resource 公司等。1965 年开发了空气枪震源,气枪震源具有结构简单、施工效率高、寿命长、可靠性高、同步性好以及高环保性的作业特点,主要应用于石油勘探、海洋地球物理调查等领域。气枪震源主要生产家有美国 BOLT 公司、ION 公司和法国 SERCEL 公司。接收系统由接收机和单道水听器组成,单道水听器主要技术指标有

检波器个数、间距、声压灵敏度、接收有效带宽等指标,一般为水面拖曳型,采用压电检波器(灵敏度高,频率响应宽),地层分辨率高。目前常用的单道水听器主要有 20 单元、48 单元组合检波器。

中国的单道地震仪研制起步较晚,但发展较快,特别是在电火花震源方面有较大的突破。部分国产电火花震源已经可以替代进口设备,如浙江大学成功研发的单脉冲能量等离子体震源(500 J 和 10 kJ)<sup>[25]</sup>,广州海洋地质调查局和中国科学院电工所联合研制的电火花震源系统(20 kJ)<sup>[26]</sup>。这些产品已经广泛应用于生产实践,并取得了不错的口碑。

### 2.2.3 多道地震

国外海上地震勘探技术始于 20 世纪 30 年代,是陆地地震勘探向海洋的延伸,只是用小船代替汽车作为运载工具,在海上采用这种施工方式十分费时费力,工作效率极其低下。40 年代,有了压电式检波器,无线电定位技术也有所发展,作业区摆脱了近岸,可以去离岸相对较远的海区进行探测,但在当时还是炸药震源,需要另一条船去投放炸药引爆,因无精确定位系统,受船速及海流影响导致观测系统不够准确,这种有别于陆上传统做法的施工方式工作强度也比较大、效率比较低,勘探精度也不高。50 年代,海上地震开始使用单船作业,作业效率有了提升,逐步形成了一套海上地震连续作业方式。60、70 年代是海上地震调查技术突飞猛进,主要进展为:炸药震源被非炸药震源取代,震源技术的革新,让作业变得更环保、更安全、更高效;多道覆盖技术在海上全面推广,资料信噪比有了大幅提升;卫星导航定位技术得到推广应用,定位精度得到了极大的提升,海上三维地震在这个阶段得到了快速推广。70 年代开发出了计算机综合导航定

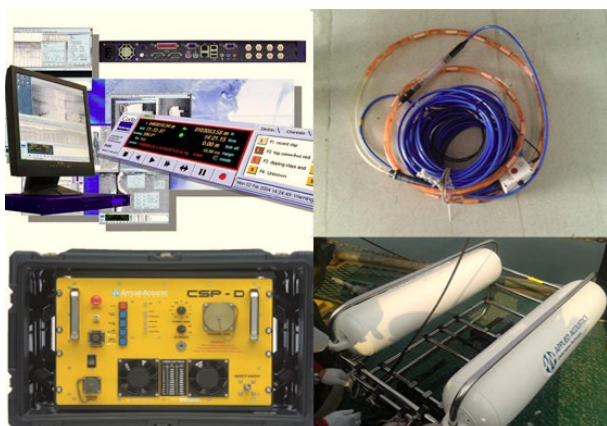


图 6 单道地震采集系统

Fig.6 Single channel seismic acquisition system

位系统,进一步降低了工作强度,提升了作业效率。80年代初,同轴电缆或光导纤维在采集拖缆中得到应用,信号远距离传输问题得到了解决,采集的道数大幅增加,覆盖次数得到进一步提升。80年代中后期,海上地震进入数字化勘探阶段,与此同时野外采集和室内处理数据能力呈现爆炸式增长。90年代,随着新型24位遥测地震仪的诞生,海上地震呈现出勘探效率高、数据品质好等特点。与此同时,海底电缆、4D地震等海上地震采集新技术相继开始应用<sup>[1]</sup>。

进入21世纪,海上地震调查呈现几个发展趋势,从单纯的纵波勘探向多波勘探发展,从常规地震采集向全数字精细地震采集发展,从陆架浅水区向深海复杂区发展,从窄方位角向宽方位角乃至全方位角勘探发展,从二维拖缆采集向三维、四维采集方向发展。在设备上以高端物探船(>12缆)、24位超万道地震仪、数字检波器和网络技术作为支撑。涌现的采集新技术包括立体气枪震源技术、海底双检电缆(OBC)技术、双检波器拖缆技术、上下缆接收技术、斜缆接收技术、多船宽方位角采集技术、环形采集技术等<sup>[27-30]</sup>。

中国的海洋地震调查起步于20世纪50年代末,由渤海湾地区开始,逐步走向黄海、南海、东海。现在,这项技术也应用于深海大洋地质调查<sup>[31-36]</sup>。1973年,引进了适合海上作业的SN338B型数字地震仪,这是中国第一套海上地震数据采集设备。1999年,引进美国Fairfield公司最新研制的BOX采集系统,这套系统使用24位模数转换器、总道数达到1800道的海上地震数据采集系统。目前,海上多道地震船装备的采集记录系统以Sercel 408/428系统

为代表<sup>[1]</sup>(图7)。中国的海上地震勘探仪器尚处于研发起步阶段,目前使用的海上地震勘探仪器基本是国外引进的,对外依赖度依然较高,但自主研发进展较快,已经取得不错的成绩。

### 3 中国海洋声学地质调查技术存在的问题

目前,中国的海洋声学地质调查技术相较于世界先进水平还有一定的差距,但随着时间的推移,这种差距正在缩小。在国家高科技发展计划(863)海洋技术领域资助下,具有自主知识产权的海洋声学地质调查高新技术不断涌现,例如,小道距多道地震勘探系统<sup>[37]</sup>、长排列大震源的地震勘探技术推广应用研究<sup>[38]</sup>、主动源高频OBS研发与应用<sup>[39-40]</sup>、被动源宽频带OBS研发与应用<sup>[41-43]</sup>、“海脉”海底地震勘探采集装备研发与应用、“海经”海洋拖缆地震勘探采集装备研发与应用等。当前,虽然中国海洋声学地质调查技术有了长足进步,但还存在亟待解决的问题,如重模仿轻创新、产业链不完整、产业化不足、市场占有率低、产品稳定性不好、产品可靠性不高等。

在海洋声学地质调查设备研制方面和装备业务化应用方面,除个别类型的声学装备实现了业务化应用,大部分还处在探索应用阶段。与国外先进的海洋声学调查装备相比,差距具体表现在以下4个方面<sup>[44]</sup>。

(1)国产海洋声学地质调查装备创新力不强。由于中国海洋声学地质调查仪器设备研发起步晚,在我们着手研发国产声学设备时,国外已经推出了

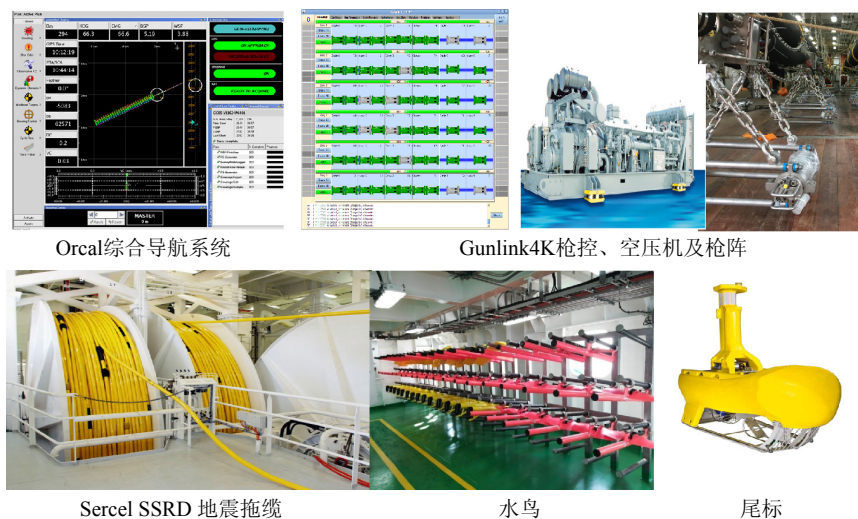


图7 Sercel Seal 428系统

Fig.7 The Sercel Seal 428 system

成熟的商业化产品,我们主要采用跟随、仿制的发展模式,低端重复建设,高端无人问津,缺乏原创性的海洋声学地质调查装备。

(2)国产海洋声学地质调查装备产业化不足。国内的海洋声学地质调查装备大多是在国家科研经费支持下研制出工程样机,离成熟的商业化产品还有差距,成果转化和产品应用严重不足,使得国产海洋声学地质调查装备不能有效地进行产品的迭代升级和优化,产业化发展之路任重而道远。

(3)国产海洋声学地质调查装备市场化不够。由于中国的海洋声学地质装备长期依赖进口,用户对进口产品产生了依赖性,加之国产设备大部分还处在应用迭代改进阶段,存在设备功能不全,可靠性不高,稳定性不好等各种各样的问题,进一步降低了用户的体验感,也降低了用户对国产设备的需求,制约国产海洋声学设备市场化发展。

(4)国产海洋声学地质调查装备人才队伍建设有待加强。海洋声学地质调查装备的建设、研发和高效运行,不仅需要领军科学家的引导,更需要稳定、结构层次合理的专业技术队伍支持,特别是海洋声学地质调查工程师们的支持,他们长期在一线工作,了解声学地质调查的技术需求,也了解国产声学装备在应用过程中存在的问题,他们对国产海洋地质调查装备的研发和推广应用有推动作用,但目前海洋声学地质调查工程师们存在收入和认可度偏低、技能提升支持力度不足、上升通道狭窄、流动性大等问题。

## 4 中国海洋声学地质调查技术的突破口

面对快速发展过程中的瓶颈问题,不管是海洋地质调查人员,还是技术装备研发人员,都在思考如何应对,寻求突破。

### (1)增强核心装备自主创新能力

我国大部分声学地质调查仪器,特别是深海声学地质调查仪器,均是进口设备,当前国际形势下极易被“卡脖子”。目前,在海洋声学地质调查领域存在着比较严重的“重购置、轻自主研发、轻应用迭代”问题,应强化“产学研”体系,增强核心装备自主创新能力,给予国产海洋声学地质调查设备犯错、改进、迭代优化的过程和机会,树立科研、业务应用、管理部门对自主海洋声学设备的信心。

### (2)推进“产学研用”深度融合

开展声学地质调查设备攻关工程要充分发挥

中国体制机制优势,以国家立项研发为宏观牵引,聚焦声学地质调查核心装备,实施科研院所、高校与企业的联合攻关,鼓励国产装备优先使用,让用户成为创新的重要推动力量,推进“产学研用”深度融合,逐步实现装备由“学习仿制”向“自主攻关”转变,构建优化与声学地质调查装备相匹配的“研发-设计-制造-运维”-体化产业链。推动声学地质调查装备制造业和其他行业融合发展,同时加强质量管理和品牌建设。

### (3)加强海洋声学地质调查队伍建设。

一支结构合理、人员稳定、技术过硬的海洋声学地质调查工程技术人员队伍,是海洋声学地质调查得以开展的坚实基础。国内海洋单位应当重视工程技术人员的培养,确保队伍稳定、年龄结构合理,防止技术断层。

## 5 海洋声学地质调查技术的发展趋势

进入21世纪以来,随着大数据、物联网、人工智能、无人观测技术和新能源、新材料的快速发展,海洋声学地质调查技术正朝着综合技术、体系化方向发展,呈现出以下3个方面的发展趋势。

(1)向智能化方向发展。操作和控制自主技术将进一步发展,这将大大减轻现场海洋地质调查人员的工作强度,在控制与信息处理系统中,将逐渐提高图像识别、信息处理、精密导航定位等技术,海洋声学地质调查技术向智能化、精准化方向发展。

(2)向海洋无人观测装备系统发展。将来随着无人船,无人潜器技术日趋成熟,海洋声学地质调查设备可以搭载在这些无人设备上,可进行远程遥控和实时传输的无人化作业。

(3)向立体化、协同化方向发展。随着装备技术的进步和科考任务的细化和深入,将会出现海面、近海底、海底立体的海洋声学地质调查系统,有人或无人的多类装备的系统协同作业,共同完成复杂的海洋地质调查任务。

## 6 结束语

我国海洋声学地质调查技术从无到有,历经数十年的发展,不论在理论研究还是工程应用方面都有了长足的进步,但是与国际先进水平相比还有不小的差距。海洋声学地质调查技术在海洋资源开发、海洋经济建设和保护国家海上安全等方面发挥着不可或缺的作用,因此“加快技术创新、赶超先

进水平”显得更为迫切。海洋科技创新是建设海洋强国的根本动力。未来五年,是着力突破海洋核心装备和关键技术瓶颈的最关键时期,希望通过广大科研人员砥砺奋进,能够实现我国海洋声学地质调查技术的跨越式发展。

### 参考文献 (References)

- [1] 张训华, 赵铁虎. 海洋地质调查技术 [M]. 北京: 海洋出版社, 2018. [ZHANG Xunhua, ZHAO Tiehu. Survey Technologies of Marine Geology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018.]
- [2] Kongsberg S. EM710Operator manual[M]. Norway: Kongsberg Simrad, 2001: 254-275.
- [3] 赵建虎, 刘经南. 多波束测深及图像数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008. [ZHAO Jianhu, LIU Jingnan. Multi-beam Sounding and Image Data Processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008.]
- [4] 刘经南, 赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势 [J]. 海洋测绘, 2002, 22(5): 3-6. [LIU Jingnan, ZHAO Jianhu. The present status and developing trend of the multibeam system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002, 22(5): 3-6.]
- [5] 刘忠臣, 周兴华, 陈义兰, 等. 浅水多波束系统及其最新技术发展 [J]. 海洋测绘, 2005, 25(6): 67-70. [LIU Zhongchen, ZHOU Xinghua, CHEN Yilan, et al. The development in the latest technique of shallow water multi-beam sounding system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2005, 25(6): 67-70.]
- [6] 赵建虎, 李娟娟, 李萌. 海洋测量的进展及发展趋势 [J]. 测绘信息与工程, 2009, 34(4): 25-27. [ZHAO Jianhu, LI Juanjuan, LI Meng. Progress and future trend of hydrographic surveying and charting[J]. Journal of Geomatics, 2009, 34(4): 25-27.]
- [7] 李海森, 周天, 徐超. 多波束测深声纳技术研究新进展 [J]. 声学技术, 2013, 32(2): 73-80. [LI Haisen, ZHOU Tian, XU Chao. New developments on the technology of multi-beam bathymetric sonar[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(2): 73-80.]
- [8] 周天, 欧阳永忠, 李海森. 浅水多波束测深声纳关键技术剖析 [J]. 海洋测绘, 2016, 36(3): 1-6. [ZHOU Tian, OUYANG Yongzhong, LI Haisen. Key technologies of shallow water multibeam bathymetric sonar[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(3): 1-6.]
- [9] 张同伟, 秦升杰, 唐嘉陵, 等. 深水多波束测深系统现状及展望 [J]. 测绘通报, 2018(5): 82-85. [ZHANG Tongwei, QIN Shengjie, TANG Jialing, et al. Technical status and development trend of deep-sea multi-beam bathymetry system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(5): 82-85.]
- [10] 许枫, 魏建江. 第七侧扫声纳 [J]. 物理, 2006, 35(12): 1034-1037. [XU Feng, WEI Jianjiang. Side-scan sonar[J]. Physics, 2006, 35(12): 1034-1037.]
- [11] 吴自银, 郑玉龙, 初凤友, 等. 海底浅表层信息声探测技术研究现状及发展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(11): 1210-1217. [WU Ziyin, ZHENG Yulong, CHU Fengyou, et al. Research status and prospect of sonar-detecting techniques near submarine[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(11): 1210-1217.]
- [12] 魏建江, 尹东源, 刘桂兰, 等. CS-1 型侧扫声纳系统 [J]. 海洋技术, 1997, 16(1): 1-13. [WEI Jianjiang, YIN Dongyuan, LIU Guilian, et al. Model CS-1 Sidescan sonar[J]. Ocean Technology, 1997, 16(1): 1-13.]
- [13] Fish J P, Carr H A. Sound Underwater Image: A Guide to the Generation and Interpretation of Side-Scan Sonar Data[M]. Massachusetts: Lower Cape Publishing, 1990.
- [14] Key W H. Side scan sonar technology[C]//Proceedings of OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Providence: IEEE, 2000: 1029-1033.
- [15] 鱼京善, 成二丽. 侧扫声纳系统及其在海洋环境监测和保护中的应用 [J]. 海洋测绘, 2004, 24(2): 63-66. [YU Jingshan, CHENG Erli. Applications of side scan sonar in ocean environment monitoring[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2004, 24(2): 63-66.]
- [16] 杨国明, 朱俊江, 赵冬冬, 等. 浅地层剖面探测技术及应用 [J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 147-162. [YANG Guoming, ZHU Junjiang, ZHAO Dongdong, et al. Development and application of sub-bottom profiler technologies[J]. Marine Sciences, 2021, 45(6): 147-162.]
- [17] Theuillon G, Stephan Y, Pacault A. High-resolution geoacoustic characterization of the seafloor using a subbottom profiler in the Gulf of Lion[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(3): 240-254.
- [18] Schock S G, LeBlanc L R, Mayer L A. Chirp subbottom profiler for quantitative sediment analysis[J]. Geophysics, 1989, 54(4): 445-450.
- [19] Vardy M E, Dix J K, Henstock T J, et al. Decimeter-resolution 3D seismic volume in shallow water: a case study in small-object detection[J]. Geophysics, 2008, 73(2): B33-B40.
- [20] 杨慧良, 尉佳, 李攀峰, 等. 九州-帕劳海脊两侧深海盆地浅部地层结构特征与分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(1): 14-21. [YANG Huiliang, WEI Jia, LI Panfeng, et al. Characteristics of the stratigraphic architectures of the shallow sections in Deep Sea Basin on both sides of Kyushu-Palau ridge[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(1): 14-21.]
- [21] 金翔龙. 海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1243-1249. [JIN Xianglong. The development of research in marine geophysics and acoustic technology for submarine exploration[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1243-1249.]
- [22] 李守军, 陶春辉, 初凤友, 等. 浅地层剖面在富钴结壳调查研究中的应用 [J]. 海洋技术, 2007, 26(1): 54-57. [LI Shoujun, TAO Chunhui, CHU Fengyou, et al. A practical application of sub-bottom profile system to cobalt-rich crust investigation in Middle Pacific Ocean[J]. Ocean Technology, 2007, 26(1): 54-57.]
- [23] 冯京, 赵铁虎, 刘怀山, 等. 高分辨率浅剖数据采集参数分析 [J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(2): 200-206. [FENG Jing, ZHAO Tiehu, LIU Huaishan, et al. Analysis on high-resolution sub-bottom profile data acquisition parameters[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(2): 200-206.]
- [24] 褚宏宪, 杨源, 张晓波, 等. 高分辨率单道地震调查数据采集技术方法 [J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(12): 70-74. [CHU Hongxian, YANG Yuan, ZHANG Xiaobo, et al. Data acquisition technique for high resolution single-channel seismic survey[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(12): 70-74.]



- [25] 严辉,黄逸凡,裴彦良,等.等离子体震源及在海洋勘探中的应用[J].高电压技术,2012,38(7): 1711-1718. [YAN Hui, HUANG Yifan, PEI Yanliang, et al. Plasma seismic source and its application in oceanic seismic exploration[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1711-1718.]
- [26] 吕国涛,温明明,吴衡,等.海鳗20kj电火花震源声学特性分析[J].内江科技,2013,34(1): 49-50. [LV Guotao, WEN Mingming, WU Heng, et al. Acoustic characteristics analysis of 20kj electric spark source of moray eel[J]. Neijiang Science & Technology, 2013, 34(1): 49-50.]
- [27] 江怀友,赵文智,裘恂楠,等.世界海洋油气资源现状和勘探特点及方法[J].中国石油勘探,2008,13(3): 27-34. [JIANG Huaiyou, ZHAO Wenzhi, QIU Yinan, et al. Current state of marine oil and gas resources in the world and its exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2008, 13(3): 27-34.]
- [28] 王炳章,王丹,陈伟.油气地震勘探技术发展趋势和发展水平[J].中外能源,2011,16(5): 46-55. WANG Bingzhang, WANG Dan, CHEN Wei. Trends and development level of petroleum seismic exploration technology[J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(5): 46-55.]
- [29] 吴志强,闫桂京,童思友,等.海洋地震采集技术新进展及对对我国海洋油气地震勘探的启示[J].地球物理学进展,2013,28(6): 3056-3065. [WU Zhiqiang, YAN Guijing, TONG Siyou, et al. New advances in marine seismic data acquisition technology and enlightenment to domestic offshore petroleum seismic exploration[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3056-3065.]
- [30] 刘振武,撒利明,董世泰,等.地震数据采集核心装备现状及发展方向[J].石油地球物理勘探,2013,48(4): 663-675. [LIU Zhenwu, SA Liming, DONG Shitai, et al. Current status of kernel seismic acquisition equipment and its development direction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(4): 663-675.]
- [31] 刘光鼎.海洋物探二十年[J].石油物探,1979(2): 13-19. [LIU Guangding. The marine geophysical exploration of China[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 1979(2): 13-19.]
- [32] 王光宇,高哲民. The Beginning and Development of Marine Seismic Exploration in China[M]. 北京:科学出版社,1998. [WANG Guangyu, GAO Zhemin. Technical Status and Development Trend of Deep-sea Multi-beam Bathymetry System[M]. Beijing: China Science Press, 1998.]
- [33] 谢剑鸣.海上地震勘探的发展[J].石油地球物理勘探,1984(3): 193-199. [XIE Jianming. Developments of offshore seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1984(3): 193-199.]
- [34] 刘光鼎.海洋物探的成长与发展[J].石油物探,1989,28(3): 8-15. [LIU Guangding. Growth and development of China's marine geophysical exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1989, 28(3): 8-15.]
- [35] 张向林,陶果,刘新茹.油气地球物理勘探技术进展[J].地球物理学进展,2006,21(1): 143-151. [ZHANG Xianglin, TAO Guo, LIU Xinru. Progress in oil geophysical exploration[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 143-151.]
- [36] 侯方辉,秦轲,陆凯,等.九州-帕劳海脊中段及两侧盆地构造沉积特征及俯冲起始:多道反射地震综合研究[J].海洋地质与第四纪地质,2022,42(5): 187-198. [HOU Fanghui, QIN Ke, LU Kai, et al. Tectono-sedimentary characteristics and subduction initiation in the Middle Kyushu-Palau Ridge and adjacent basins: a comprehensive study of multichannel seismic reflection profiles[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 187-198.]
- [37] 王揆洋,黄逸凡,连艳红,等.海洋浅地层高分辨率多道地震探测技术及应用[M].北京:海洋出版社,2011. [WANG Kuiyang, HUANG Yifan, LIAN Yanhong, et al. High-Resolution Multi-Channel Seismic Detection Technology in Shallow Ocean and Its Application[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011.]
- [38] 陈洁,温宁,罗文造,等.海试引发深水油气综合地球物理采集的几点思考[J].地球物理学进展,2009,24(1): 102-112. [CHEN Jie, WEN Ning, LUO Wenzao, et al. Several ideas on deep water oil and gas comprehensive geophysical data acquisition from marine experiments[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 102-112.]
- [39] 丘学林,赵明辉,叶春明,等.南海东北部海陆联测与海底地震仪探测[J].大地构造与成矿学,2003,27(4): 295-300. [QIU Xuelin, ZHAO Minghui, YE Chunming, et al. Ocean bottom seismometer and onshore-offshore seismic experiment in northeastern South China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(4): 295-300.]
- [40] 徐行.我国海洋地球物理探测技术发展现状及展望[J].华南地震,2021,41(2): 1-12. [XU Xing. Development status and prospect of marine geophysical exploration technology in China[J]. South China Journal of Seismology, 2021, 41(2): 1-12.]
- [41] 李江,庄灿涛,薛兵,等.宽频带海底地震仪的研制[J].地震学报,2010,32(5): 610-618. [LI Jiang, ZHUANG Cantao, XIE Bing, et al. Development of broadband ocean bottom seismograph (OBS)[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 610-618.]
- [42] 郭衍龙,胡昊,阮爱国,等.海底地震仪(OBS)被动源接收函数的意义和方法[J].华南地震,2016,36(4): 20-26. [GUO Yanlong, HU Hao, RUAN Aiguo, et al. The significance and methods of OBS receiver function[J]. South China Journal of Seismology, 2016, 36(4): 20-26.]
- [43] 刘思青,陈洁,曹骏,等.滨海型宽频带海底地震仪的技术特点及其数据质量分析[J].华南地震,2020,40(1): 73-80. [LIU Siqing, CHEN Jie, CAO Jun, et al. Technical characteristics and data quality analysis of coastal type wide-band ocean bottom seismometer[J]. South China Journal of Seismology, 2020, 40(1): 73-80.]
- [44] 唐庆辉,范开国,徐东洋.海洋无人观测装备发展与应用思考[J].数字海洋与水下攻防,2021,4(5): 401-404. [TANG Qinghui, FAN Kaiguo, XU Dongyang. Thoughts on development and applications of marine unmanned observation equipment[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2021, 4(5): 401-404.]