

王猛, 邓明, 伍忠良等. 2017. 新型坐底式海洋可控源电磁发射系统及其海试应用. 地球物理学报, 60(11):4253-4261, doi:10.6038/cjg201711113.

Wang M, Deng M, Wu Z L, et al. 2017. New type deployed marine controlled source electromagnetic transmitter system and its experiment application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(11):4253-4261, doi:10.6038/cjg201711113.

## 新型坐底式海洋可控源电磁发射系统及其海试应用

王猛<sup>1,3</sup>, 邓明<sup>1,3\*</sup>, 伍忠良<sup>2</sup>, 罗贤虎<sup>2</sup>, 景建恩<sup>1,3</sup>, 陈凯<sup>1,3</sup>

1 中国地质大学(北京), 北京 100083

2 广州海洋地质调查局, 广州 510075

3 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学, 北京), 北京 100083

**摘要** 利用拖曳式海洋可控源电磁发射系统在探测埋藏较浅的天然气水合物资源时,会遇到一些新问题.如拖曳式轴向发射偶极源不能贴紧海底,发射偶极源和海底间海水的电磁衰减,使得 10 Hz 以上的相对高频能量难以导入至海底以下介质;发射偶极源有可能出现水平或垂向摆动;拖曳式发射时,时间窗口内叠加的数据有限;拖曳路线可能与海底构造走向平行,不利于揭示探测目标体的异常形态.新型坐底式发射系统有望解决上述问题.坐底式发射系统的硬件部分包括甲板端供电和监控单元、长距离电力和数据通信单元,以及水下发射机主体.新型坐底式发射系统的发射电极紧贴海底,没有海水层衰减,有利于相对高频的人工源电磁信号经过海底以下介质传输至接收端;通过超短基线信标更容易精确定位发射机拖体,利用姿态方位参考系统确定发射电极的供电方向,可以精确校正电偶源水平偏角的影响;增加单点供电时间,提高接收信号信噪比;提供两对电偶极源,从两个相互垂直的方向对异常体进行人工源激发.2015 年海洋试验的结果表明,坐底式与拖曳式发射系统联合作业,可从多角度对海底异常体进行宽频带电磁激发,为数据采集提供丰富的场源信息.

**关键词** 海洋可控源电磁法;坐底式发射系统;水平正交电偶极源;天然气水合物;海洋试验

doi:10.6038/cjg201711113

中图分类号 P631

收稿日期 2016-12-22,2017-07-27 收修定稿

### New type deployed marine controlled source electromagnetic transmitter system and its experiment application

WANG Meng<sup>1,3</sup>, DENG Ming<sup>1,3\*</sup>, WU Zhong-Liang<sup>2</sup>, LUO Xian-Hu<sup>2</sup>,  
JING Jian-En<sup>1,3</sup>, CHEN Kai<sup>1,3</sup>

1 China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

3 Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China

**Abstract** There are some problems when using the deep tow Marine Controlled Source Electromagnetic (MCSEM) transmitter system to detect some shallow resources like gas hydrate. For example, the transmitter electrodes could not be towed along the seafloor, which will lead to

**基金项目** 国家自然科学基金(41504138,61531001),国家重点研发计划(2016YFC0303100),中国地质调查局项目(201100307),中央高校基本科研业务费专项(2652015407)等联合资助.

**第一作者简介** 王猛,男,1984年生,博士,讲师,2011年毕业于中国地质大学(北京),主要从事地球物理仪器科研与教学.

E-mail:wangmeng@cugb.edu.cn

**\* 通讯作者** 邓明,男,1956年生,博士,教授,2006年毕业于中国地质大学(北京),主要从事地球物理仪器科研与教学.

E-mail:dengming@cugb.edu.cn

the electromagnetic attenuation of the seawater layer, so the relatively high-frequency over 10 Hz cannot be transmitted beneath the seafloor. The number of data in the time window is limited in the towing process. The towing route may be parallel with the strike of the submarine structure. A new type of deployed MCSEM transmitter system probably could solve the above problems. The deployed transmitter system includes on-board power supply and monitoring control unit, long distance electrical power and data transformation unit, and underwater transmitter main body. The deployed transmitter electrodes are close to the bottom of the seafloor, which is a benefit for the relatively high-frequency long distance transmission below the seafloor. The location and the transmission direction are easy to confirm by using the ultra-short baseline beacon and Attitude and Heading Reference System, respectively. The signal to noise ratio could be promoted by adding the transmitting time in one site. The abnormal target can be detected in two orthogonal directions by using the transmitter electrodes. The test result in 2015 showed that the deployed transmitter and deep tow transmitter can be used jointly to excite the beneath seafloor abnormal body in a wide band and different directions and provide more useful source information for the receivers.

**Keywords** MCSEM; Deployed transmitter system; Horizontal orthogonal electric dipole source; Gas hydrate; Marine experiment

## 1 引言

国际范围内,海洋可控源电磁方法(MCSEM, Marine Controlled Source Electromagnetic)(Cox et al., 1986; Constable and Srnka, 2007)已经被业内广泛认可为海底天然气水合物勘查的有效方法之一(Schwalenberg et al., 2005; Weitemeyer et al., 2006; Zach and Brauti, 2009),可显著降低钻探风险和 提高钻探成功率(Hesthammer et al., 2010; Macgregor, 2012).

发达国家争相研究用于天然气水合物调查的 MCSEM 仪器,并且走在了研究前列.以美国 Scripps Institution of Oceanography 为例,他们研发了拖曳式轴向电偶极源发射和海底若干点静态接收系统(Constable, 2010, 2013),以及海底正交水平源静态发射和海底若干点静态接收系统(Kannberg et al., 2012).

在利用拖曳式轴向电偶极源探测天然气水合物时,存在以下三个方面问题:其一,拖曳式发射偶极源不能贴紧海底,这是缘于对设备安全性的考虑. Toronto 大学研发了直接在海底拖曳的发射系统,不但对海底地形有严格要求,而且设备自身的安全性也无法保证(Edwards, 1997).通常拖曳式发射偶极源离海底高度控制在 50 m 以内,而近 50 m 厚海水层对 10 Hz 以上相对高频的电磁波产生了严重

衰减(邓明等,2010),在导入海底之前已经被海水衰减殆尽,从而无法对海底以下 100 m 以浅的介质进行较精细电性分层.其二,拖曳式发射系统工作时,时间窗口内叠加的数据有限,一般是每 50 m 作为一个叠加窗口,按照 1 Hz 发射频率和平均 2 节的拖曳速度来计算,50 m 距离内只能叠加约 50 个周期信号.其三,轴向电偶极源的拖曳轨迹若平行于异常体构造方向,则探测效果不佳,不利于揭示探测目标体的异常形态(李金铭, 2005),往往对未知目标探测之前,难以选择最佳路线,这就要求从多个方向对异常体进行激发.这三个问题影响了圈定浅层电性异常目标体位置的准确性,对于重点靶区的精细详查,需寻求更加优化的技术途径.

2012 年新加坡的碳氢化合物国际勘探会议,美国 Scripps Institution of Oceanography 展示了研发的 DUESI 系统(Kannberg et al., 2012),该仪器为解答上述问题提供了较好的技术思路. DUESI 仪器采用类似于接收机的框架,由海面投放,无缆式自由沉底,贴紧海底进行电磁发射的工作方式,有效解决了大于 10 Hz 频段的人工场源难以导入海底的问题;由于静态坐底,仪器的精确位置和姿态方位信息较容易获取;该仪器采用两对水平正交的电偶极源,分时多频供电,在海底建立了两个方向的人工源电磁场,为数据采集提供了不同激发角度的场源信息.因此, DUESI 的新颖性值得肯定.但也存在一些问题,由于采用海面自由投放方式,在水深大于千米环

境下,受运动海水影响,不易将发射机准确投放至预定位置;同时其使用电池供电的方案,导致激发电流不大,难以实现连续多点长时间激发。

德国 GEOMAR 研究中心开发了名为 Sputnik 的仪器(Swidinsky et al., 2015; Hölz et al., 2015),也是采用两个水平正交的发射偶极,与 DUESI 不同之处在于,该仪器采用船载同轴电缆将仪器施放至海底,移动性能和工作效率提升,但是由于其采用了较细的同轴电缆,输送的电能和状态信息总量依然有限。

DUESI 和 Sputnik 都可统称为海洋可控源电磁坐底式发射系统,以区别于采用水平轴向发射电偶极源的拖曳式发射系统。

中国关于 MCSEM 仪器的研发在“十一五”期间启动。中国地质大学(北京)在国家 863 计划和中国地质调查局的支持下,开发完成了海洋拖曳式电磁发射系统(王猛等,2013; Wang et al., 2015)、海底混场源电磁接收系统(邓明等,2010,2013; Chen et al., 2015; 陈凯等,2015)以及拖曳式电场动态采集系统等(陈凯等,2013)。

前已述及,浅层天然气水合物的探测需求为海洋电磁新技术的介入提供了良好契机。经过广泛调研和潜心研究,2013 年自主研发了坐底式发射系统,并从 2014 年开始,开展了多次海洋试验(Wang et al., 2015)。本文将对新型坐底式海洋可控源电磁发射系统及其海试情况展开介绍。

## 2 坐底式与拖曳式电磁探测正演结果对比

为了论证坐底式电磁探测方式的优势,对比研究了坐底式与拖曳式电磁探测的理论正演结果。采用景建恩等(2016)文章中的海底一维水合物地电模型,模型参数为:海水层 1200 m,电阻率  $0.3 \Omega\text{m}$ ;覆盖层 200 m,电阻率  $0.3 \Omega\text{m}$ ;水合物层 30 m,电阻率  $4 \Omega\text{m}$ ;沉积层无限大,电阻率  $1 \Omega\text{m}$ 。借助 Key (2009)介绍的 Dipole 1D 程序,分别计算模型中的坐底式水平正交电偶源和拖曳式水平轴向电偶源电场响应,得到响应随收发距和频率的变化关系。

如图 1 和图 2 所示,背景彩色为不含水合物层的均匀海底模型响应对含水合物模型响应的归一化结果。白色曲线为单位电偶矩激发的轴向电场对数值。目前所用接收机可观测归一化场强理论值为  $0.1 \times 10^{-13} \text{V} \cdot \text{A}^{-1} \text{m}^{-2}$ 。红色曲线所围区域是结合

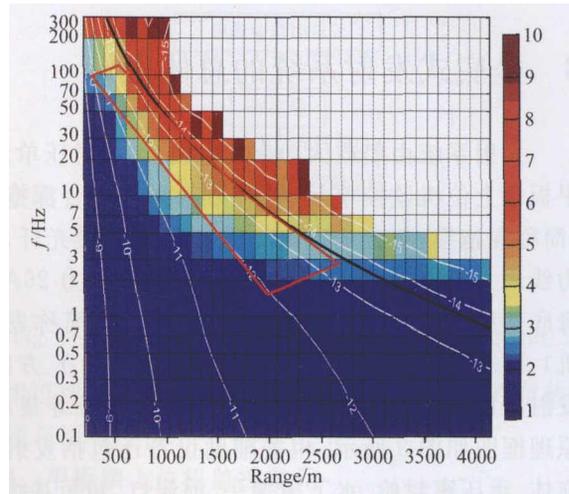


图 1 坐底式激发的水合物模型电场响应随收发距和频率的变化关系

Fig. 1 Horizontal orthogonal field response as a function of frequency and range for the gas hydrate model

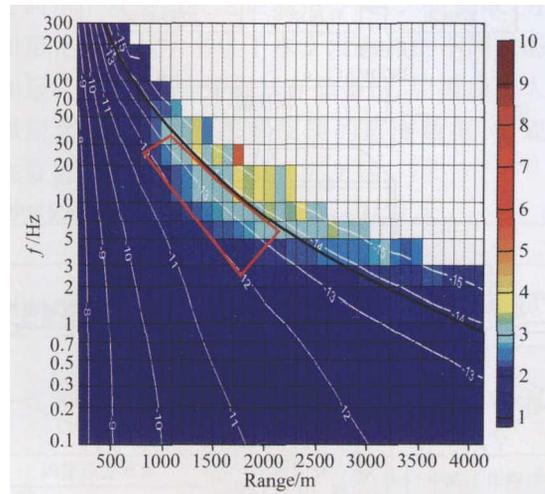


图 2 拖曳式激发的水合物模型电场响应随收发距和频率的变化关系

Fig. 2 Horizontal field response as a function of frequency and range for the gas hydrate model

目前仪器水平的天然气水合物异常有效观测范围。对比图 1 和图 2 看出,海水层对拖曳式电场信号的衰减较大,对高频信号影响更明显。坐底式探测能够在更小的收发距条件下获得相对较明显的高频异常,这有利于提高海底浅层目标体的探测与分辨能力。对于浅层异常体探测,坐底式相对有优势。在同等发射功率的条件下,坐底式的有效探测范围要大于拖曳式;对于同一频率、同一接收点,坐底式相对拖曳式的有效数据采集距离多了近 500 m。这表明,同等发射功率的条件下,坐底式探测具有更大的探测深度。前期的正演工作不仅验证了坐底式探测方式在海底水合物调查中的优越性和开展此项研究的必要性,也为坐底式发射系统的研发提供理论依据。

### 3 坐底式发射系统的总体设计

发射系统由船载大功率发电机、甲板升压单元、甲板端上位机监控单元、铠装万米光电复合深拖缆(简称深拖缆,包含3根电力线和3根单模光纤,电力线最大供电电压2800VDC,最大通流能力26A)、海底变压整流单元、海底电性源发射机(简称发射机)、两个水平正交的发射偶极(X方向和Y方向,发射电极距均是10 m)以及相关辅助设备等集成,原理框图如图3所示.相关辅助设备还包括发射机拖体、承压密封舱、水下摄像头、前照灯、超短基线定位信标、高度计、承重头、终端接线盒、配重块等(王猛等,2013).

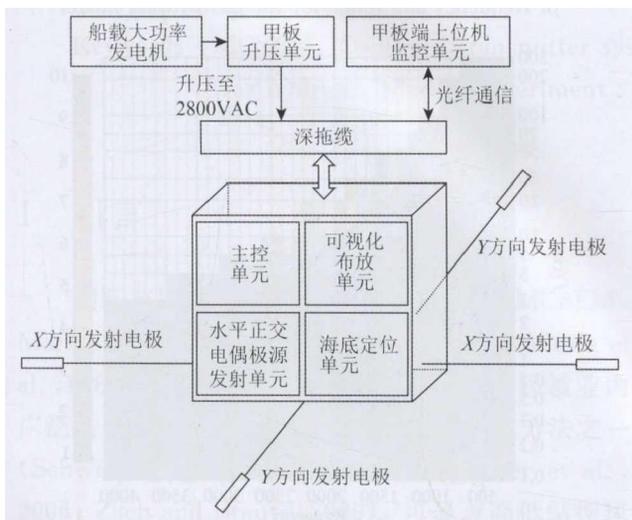


图3 坐底式海洋可控源电磁发射系统原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of the deployed MCSEM transmitter system

发射系统工作时,利用甲板升压单元使发电机输出的380VAC电压提升至2000~2800VAC,通过深拖缆进行长距离电力传输,将电能输送到海底的变压单元并整流.发射机将整流后的电压逆变成大功率多频点矩形脉冲电流信号,最终通过两对水平正交的发射偶极导入到海底介质里.

发射机到达海底以后,在同一点位进行连续发射,保证有足够多周期的信号叠加.与拖曳式相比,坐底式提供了更多数据叠加的可能性,另外发射和接收的相对位置不变,提高了接收信号的信噪比,进而提高探测精度;采用两对水平正交的发射电极,进行交互发射,避免了更换两个拖曳方向而带来的空间误差,也减少了勘探时间,降低了勘探成本.

### 4 坐底式发射系统的工作原理

#### 4.1 主控单元

发射机主控单元利用深拖缆中的光纤通讯接口与甲板端上位机监控单元建立远程通信和信息交互链接,接收来自于甲板监控单元的命令,上传发射机的工作状态信息.发射机主控单元硬件原理框图如图4所示.主控单元根据甲板端传来的命令,利用嵌入式计算机产生水平正交电偶极源发射单元的控制信号;利用光纤通讯接口,直接将发射机辅助信息测量电路和可视化布放单元得到的数据上传至甲板端上位机.

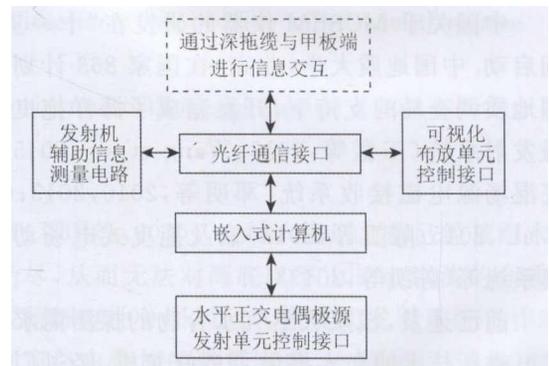


图4 主控单元硬件原理框图

Fig. 4 Hardware schematic diagram of the mail control unit

甲板端发送的命令包括更改发射频率和发射方向、启动或停止发射等.发射机的状态信息包括承压密封舱内部的温度、当前直流供电电压、供电方向、当前的发射频率、拖体所在位置的深度、低压控制单元自带锂电池的剩余电量、实时的供电电流波形、拖体离海底的高度、拖体的姿态方位角度等等.

基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 精简操作系统,开发了嵌入式计算机控制软件,实现了沿水平X和Y轴方向分时建立电偶极子场,在每个激发方向再分频进行激发,直至完成当前某一点位所有方向和频点的发射.供电过程中需要记录两个方向的发射电流,实时将电流全波形数据和高精度时间标识记录在本地的硬盘(王猛等,2009,2015),同时上传至甲板端上位机监控单元.

#### 4.2 水平正交电偶极源发射单元

终端接线盒将深拖缆中的高压交流供电电线和光纤通讯线分开.高压交流电输入至水下变压器进行降压处理,然后利用水密电缆输送至发射舱进行整流,最后给逆变矩形脉冲产生电路提供直流电能.发射单元硬件原理框图如图5所示.

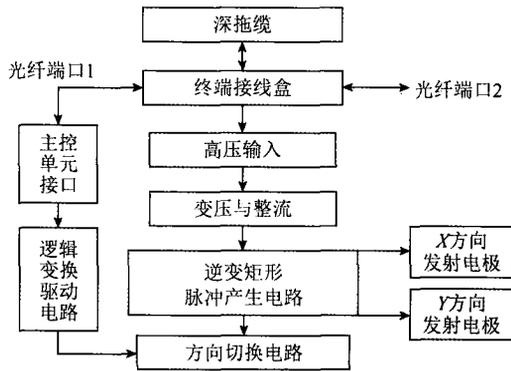


图 5 水平正交电偶极源发射单元硬件原理框图

Fig. 5 Hardware schematic diagram of the horizontal orthogonal electrical transmitting unit

发射系统利用了深拖缆中的两路光纤端口,其中光纤端口 1 送至主控单元,光纤端口 2 送至水下定位及可视化布放单元。主控单元接收光纤传送的控制命令,利用逻辑变换驱动和方向切换电路产生逆变矩形脉冲产生电路的控制信号,把直流电逆变为不同频点的交流矩形电流脉冲,最后将电流脉冲输出至 X 方向或 Y 方向的水平正交发射电极。铜质圆柱形发射电极直径 100 mm、长度 300 mm、壁厚 1 mm,在海水中极间电阻 0.3~0.5 Ω。

### 4.3 水下定位及可视化布放单元

水下定位单元由安装至科考船上的超短基线发射换能器和接收基阵,以及安装于发射机拖体上的超短基线应答器信标组成。坐底式发射点位在施工设计时就已明确,为使发射机能精确到达千米水深以下的预定位置,利用船载 GPS 定位系统来调节作业船舶位置,然后开启船舶动力定位功能,施放发射机,并根据发射机水下定位单元反馈的信息微调船舶位置。

坐底式发射机需要在触及海底的情况下建立人工电磁场。发射机布放之前,尽管海底整体地貌可预先通过多波束扫描获得,但海底预定布放地点的局部微观地貌仍需近距离观测才能得知。借助可视化布放单元,避开如陡立岩石、遗弃渔网、沉船残骸等障碍物,在位置误差可接受范围之内(收发距的 5%),把仪器布放至安全点位。

可视化布放单元由光电转换与信号传输电路、高度计、摄像头和前照灯等组成,其原理框图如图 6 所示。利用光电转换与信号传输电路,接收来自甲板端监控单元的命令,开启或关闭高度计、摄像头和前照灯;借助高度计,可实时获取发射机拖体距离海底的高度;通过摄像头和前照灯,可观测预定布放点位半径 5 m 范围内的局部微观地貌。甲板操作人员可

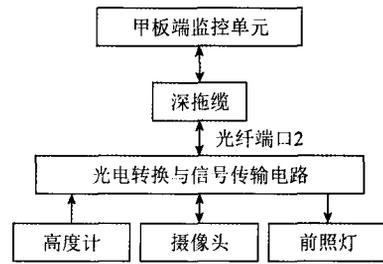


图 6 可视化布放单元原理框图

Fig. 6 Principle diagram of the visual deploying unit

利用可视化布放单元全程监视和记录设备的布放、触底与回收过程。

### 4.4 甲板端上位机监控单元

甲板端上位机监控单元硬件基于光纤转多路串口设备,软件基于 C# 高级编程语言,其功能框图如图 7 所示。监控单元利用其软硬件实现两个功能,其一是向水下发射机发送控制指令;其二是提取、分析和图形化实时显示来自于水下发射机的不同状态信息和运行监测数据,并将其存储备份。甲板操作人员可根据水下作业的要求和反馈的监测数据,实现对海底发射机的远程监控和人机交互。

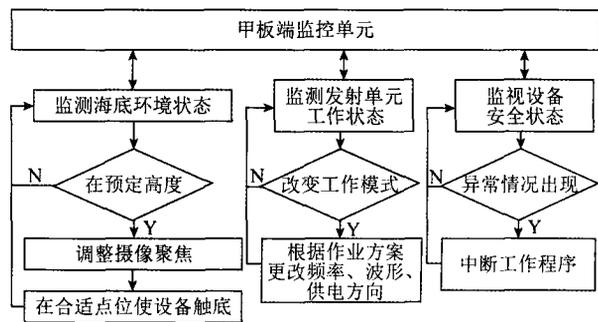


图 7 甲板端监控单元软件工作流程图

Fig. 7 Flow chart of the onboard monitoring control software

## 5 坐底式发射系统的技术指标

我们自主研发了国内首套坐底式可控源电磁发射系统,其性能指标如表 1 所示。

表 1 坐底式发射系统技术指标

Table 1 Technical index of the deployed transmitter system

指标名称	指标内容
发射电流波形	单频和多频波
发射频率范围	0.01~100 Hz
发射波形稳定度	10 <sup>-8</sup> s/s
最大发射电流	150 A
发射电极距	10 m

续表 1

指标名称	指标内容
发射电偶极矩	1500A·m
发射电流监测通道	2
激发方向	水平正交(X和Y方向)
视频监控有效范围	0~5 m
发射电极水下定位方式	超短基线定位系统
距海底高度测量范围	0~300 m
俯仰测量范围及精度	±90°,精度±1°
横滚测量范围及精度	±180°,精度±1°
方位测量范围及精度	0~360°,精度±1°
电力和信号传输通道	万米光电复合缆
远程通信速率	115200 bit/s
最大工作水深	4000 m

## 6 海洋试验应用

2015年,中国地质大学(北京)和广州海洋地质调查局的科研人员携带1套拖曳式电磁发射机,1套坐底式电磁发射机,5台海底混场源电磁接收机,搭乘“海洋六号”科学考察船,开赴南海进行试验.以期通过海上试验,加快我国天然气水合物海洋可控源电磁探测技术的实用化进程.

本次海试工区选择在琼东南海域,水深1300~1400 m,海底地形较为平坦.海试工作区域如图8的红线所示,该红线是接收机点位R1、R2、R3、R4和R5连接而成的测线,也是拖曳式发射机的拖曳路线.拖曳路线实际长度16 km(图8中仅展示了接收机附近的测线).接收站位采集天然场、拖曳式和坐底式人工场源信号.其中T6、T7、T8、T9、T10和

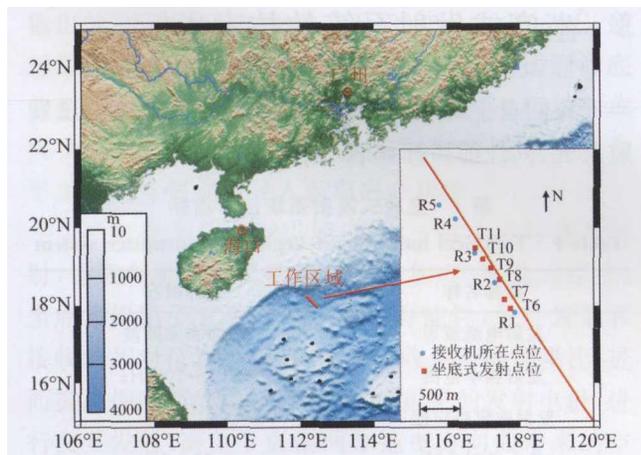


图8 海试位置及拖曳路线图

Fig. 8 Experiment location and the towing trajectory

T11点是坐底式发射机的激发点位.发射电流数据采样率为150 Hz.

到达预定工区后,先投放5台海底混场源电磁接收机,沿接收机阵列形成的测线开展拖曳式人工源激发工作,然后回收拖曳式发射机并准备开始坐底式发射,海试作业示意图如图9所示.待坐底式激发完成以后,最后回收所有设备.

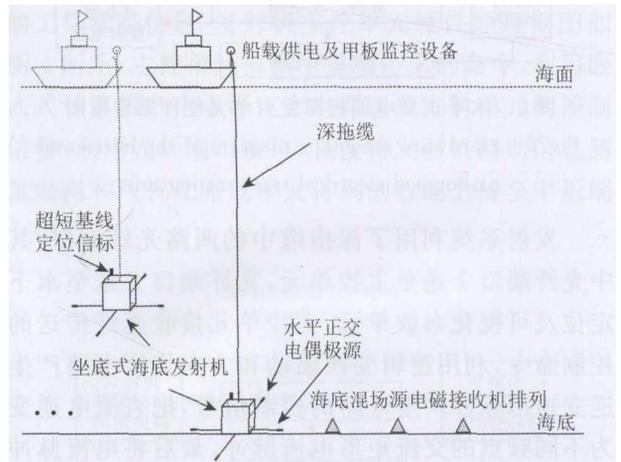


图9 坐底式发射系统海洋试验作业示意图

Fig. 9 Marine experiment operation schematic diagram of the deployed transmitter system

作业船只到达坐底式的预定激发点位以后,依靠船载的多波束声呐系统确定点位附近的整体地形,同时启动船舶动力定位功能.利用船载A型吊将发射机施放于海水中,作业场景如图10所示.首先根据深拖缆已放缆长和工作区域水深估算发射机离底高度,到达高度计的量程以后(300 m),甲板监控单元开启高度计,监测拖体离底高度.当离底高度在20 m时,开启发射机摄像头和前照灯,确定投放点的局部地形,若海底地形符合作业条件,则发射机被施放至海底,并按照预定的作业表启动发射程序.

本次海试作业中,坐底式发射机在海底激发了6个点位,平均一个点位激发20 min.图11展示了



图10 坐底式发射机

Fig. 10 The deployed transmitter

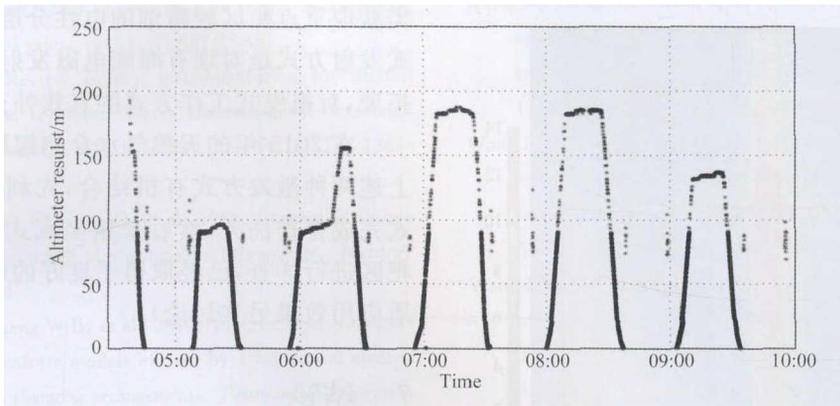


图 11 坐底式发射机拖体离底高度监测结果

Fig. 11 Altimeter monitoring result of the deployed body

坐底式发射机框架离海底高度的情况,从图中可很清楚看到坐底式发射机被放至海底和从海底回收的过程(离海底高度为 0 m,表示发射机正处于着底状态).

待坐底式发射机安全到达海底以后,甲板操作人员开启电磁发射,发射完成后,发射机被提至一定的高度(100~300 m),更换发射站位.由于两对发射电极的极间电阻不同,导致两个方向的激发电流幅值有所差异,X 方向的发射电流幅度有效值为 42A,Y 方向的发射电流幅度有效值为 53 A,发射电流波形的包络图如图 12 所示.该数据来自于发射机的电流采集单元.

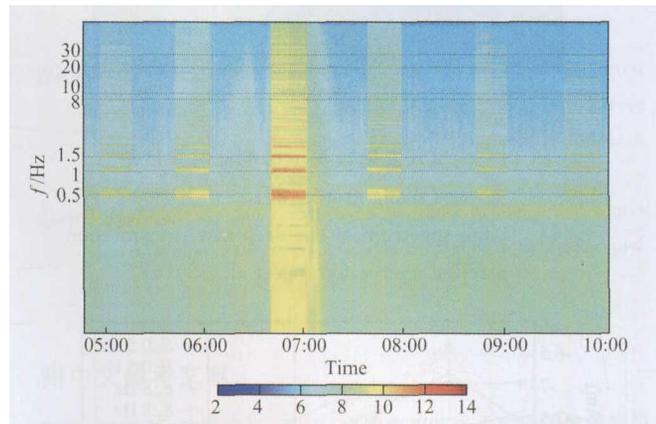


图 13 坐底式发射条件下的人工源信号时频谱图

Fig. 13 Time spectrum of the deployed transmission controlled source signal

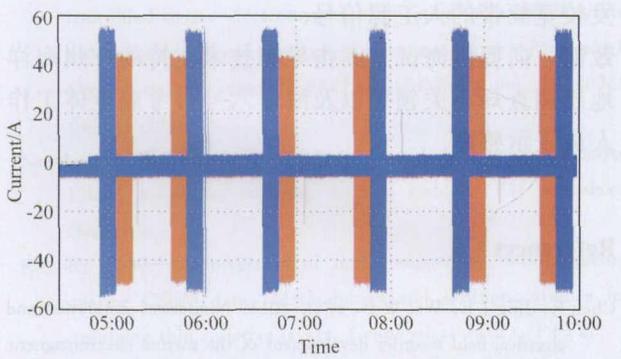


图 12 坐底式发射机在海底激发电流波形的包络图

Fig. 12 The deployed transmitter current envelope

坐底式发射时,先沿着某一个方向激发,发射 30 s 的 8 Hz(240 个周期),停顿 1 s,再发射 540 s 的 0.5 Hz(270 个周期)和 1.5 Hz 合成频率(810 个周期),如图 12 中蓝色曲线所示,然后更换发射方向,再发射 540 s 的 0.5 Hz 和 1.5 Hz 的合成频率和 30 s 的 8 Hz,如图 12 中的红色曲线所示.每次激发都准确记录了供电时间、发射电流和发射方向等信息.

坐底式发射条件下,对 R2 接收机采集到的数据进行短时傅里叶变换,得到如图 13 所示的时频谱

图.该图直观地展示了人工源信号频谱随供电时间变化的分布情况.从图中可以看出,人工源信号清晰,对 10 Hz 以上频段的信号补偿效果明显.与 2014 年拖曳式 8 Hz 供电情况下的图形(如图 14 所示)对比发现,在 8 Hz 基频能量上,拖曳式比坐底式强度要高,但是坐底式优势在于提供了更多的谐波高频场源信息,从而为局部地区浅层电性结构成像提供了可能性.

对 R2 接收机采集到的坐底式人工源电磁场数据进行处理,得到不同发射频率下、不同发射方向的各项电磁场分量振幅随收发距衰减的曲线(Magnitude Versus Offset, MVO).图 15 为 R2 测点 0.5 Hz(低频)和 8 Hz(高频)发送频率下  $E_x$  和  $E_y$  分量的其中一组 MVO 曲线,横轴为水平收发距离,纵轴为对数的电场归一化幅值.从图中可以看出,同一点位低频信号幅度略高于高频信号幅度,低频信号衰减慢,这些 MVO 曲线的变化特征符合 MCSEM 场值衰减规律.

总之,本套发射系统解决了发射中场源与电磁

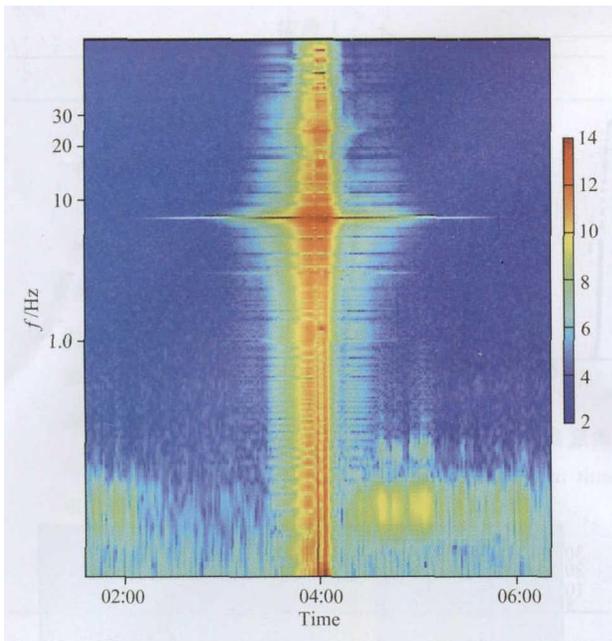


图 14 拖曳式发射情况下的电流时频谱图  
(Wang et al., 2015)

Fig. 14 Time spectrum of the deep tow transmission controlled source (Wang et al., 2015)

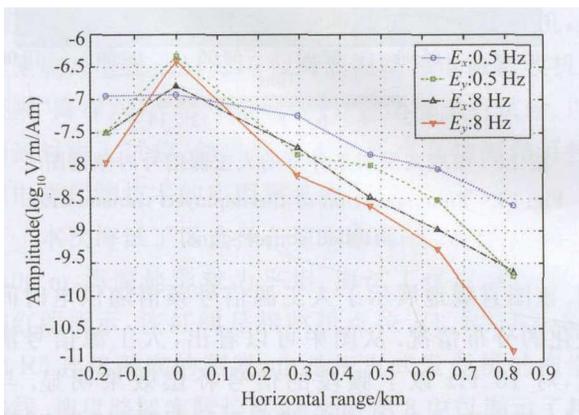


图 15 坐底式发射情况下 R2 点位获得的 MVO 曲线

Fig. 15 MVO curve of R2 under the deployed transmitting

场方向的旋转问题,一次发射可以同时获得两个方向的场值曲线,达到了坐底式水平正交发射的目的。从而间接表明,新型坐底式海洋可控源电磁发射系统工作正常,可满足海洋试验的需求,同时积累了坐底式海洋可控源电磁法的工作经验。

需要注意的是,坐底式发射系统虽然能够提供相对高频的人工源电磁场激发信号,但是由于发射极间电阻和极距的影响,发射电偶源极矩不可能太大,而且激发点的数据总量少于拖曳式工作方式,也就是说,坐底式数据的采集是离散的,而拖曳式是连续的。拖曳式轴向电偶极源因其动态扫面,覆盖区域很大,进行较大面积的普查勘探较为合适。但若继续深入,确定钻孔井位,就不不仅要提供背景轮廓,而是

需获取重点靶区较精细的电性分层信息。因此,坐底式发射方式是对现有海底电磁发射系统的一种技术拓展,对拖曳式工作方式的有效补充。

在 2015 年的天然气水合物探测海洋试验中,将上述两种激发方式有机结合,先利用拖曳式激发方式完成普查任务,然后采用坐底式激发方式对重点靶区进行详查,已经取得了良好的应用效果(具体地质应用效果另文讨论)。

## 7 结论

1) 坐底式发射系统采用深拖缆中的光纤和高压电力线,实现了实时高速数据和大功率电能传输,带缆作业的效率 and 激发能力相对较高,另外借助船舶动力定位和超短基线系统,有效降低了发射点位的位置误差。

2) 坐底式工作方式中,由于发射电极紧贴海底且位置相对固定,因此可向海底提供相对高频的激励信号,同时在同一点位可叠加多个周期,增加采集信号的信噪比。

3) 坐底式发射机利用两对水平正交的电偶极源,在同一个点位提供两个方向的人工源激励信号,避免了更换拖曳方向而带来的空间误差。

4) 坐底式和拖曳式两种发射机相结合,可以激发较宽频带的人工源信号。

致谢 向提供海试方案指导和技术支持的广州海洋地质调查局相关领导以及海洋六号科考船全体人员表示感谢。

## References

- Chen K, Jing J E, Wei W B, et al. 2013. Numerical simulation and electrical field recorder development of the marine electromagnetic method using a horizontal towed-dipole source. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(11): 3718-3727, doi: 10.6038/cjg20131113.
- Chen K, Wei W B, Deng M, et al. 2015. A new marine controlled-source electromagnetic receiver with an acoustic telemetry modem and arm-folding mechanism. *Geophysical Prospecting*, 63(6): 1420-1429, doi: 10.1111/1365-2478.12297.
- Chen K, Wei W B, Deng M, et al. 2015. Low noise E-field acquisition technology for MCSEM receiver. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(4): 1864-1869, doi: 10.6038/pg20150447.
- Constable S, Srnka L J. 2007. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, 72(2): WA3-WA12.

- Constable S. 2010. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, 75(5): 75A67-75A81.
- Constable S. 2013. Review paper: Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding. *Geophysical Prospecting*, 61: 505-532, doi: 10.1111/j.1365-2478.2012.01117.x.
- Cox C S, Constable S C, Chave A D, et al. 1986. Controlled source electromagnetic sounding of the oceanic lithosphere. *Nature*, 320(6057): 52-54.
- Deng M, Wei W B, Zhang W B, et al. 2010. Electric field responses of different gas hydrate models excited by a horizontal electric dipole source with changing arrangements. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 37(4): 438-442.
- Deng M, Wei W B, Sheng Y, et al. 2013. Several theoretical points and instrument technology of magnetotelluric data acquisition in deep water. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(11): 3610-3618, doi: 10.6038/cjg20131102.
- Edwards R N. 1997. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using sea-floor transient electric dipole-dipole methods. *Geophysics*, 62(1): 63-74.
- Hesthammer J, Stefatos A, Boulaenko M, et al. 2010. CSEM performance in light of well results. *The Leading Edge*, 29(1): 34-41.
- Hölz S, Swidinsky A, Sommer M, et al. 2015. The use of rotational invariants for the interpretation of marine CSEM data with a case study from the North Alex mud volcano, West Nile Delta. *Geophysical Journal International*, 201(1): 224-245.
- Jing J E, Wu Z L, Deng M, et al. 2016. Experiment of marine controlled-source electromagnetic detection in a gas hydrate prospective region of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(7): 2564-2572, doi: 10.6038/cjg20160721.
- Kannberg P, Weitemeyer K, Constable S. 2012. Tests of a deployed CSEM transmitter to study seafloor hydrate. EM workshop. Singapore.
- Key K. 2009. 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers. *Geophysics*, 74(2): F9-F22.
- Li J M. 2005. *Electric Field and Electrical Prospecting* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- MacGregor L M. 2012. Integrating seismic, CSEM and well log data for reservoir characterization. *The Leading Edge*, 31(3): 268-277.
- Schwalenberg K, Willoughby E, Mir R, et al. 2005. Marine gas hydrate electromagnetic signatures in Cascadia and their correlation with seismic blank zones. *First Break*, 23: 57-63.
- Swidinsky A, Hölz S, Jegen M. 2015. Rapid resistivity imaging for marine controlled-source electromagnetic surveys with two transmitter polarizations: An application to the North Alex mud volcano, West Nile Delta. *Geophysics*, 80(2): E97-E110.
- Wang M, Deng M, Zhang Q S, et al. 2009. The technique of time synchronization operation to control marine electromagnetic emission. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 24(4): 1493-1498, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.04.043.
- Wang M, Zhang H Q, Wu Z L, et al. 2013. Marine controlled source electromagnetic launch system for natural gas hydrate resource exploration. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(11): 3708-3717, doi: 10.6038/cjg20131112.
- Wang M, Wu Z L, Deng M, et al. 2015. The high precision time stamp technology in MCSEM transmission current waveform. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(4): 1912-1917, doi: 10.6038/pg20150452.
- Wang M, Deng M, Zhao Q X, et al. 2015. Two types of marine controlled source electromagnetic transmitters. *Geophysical Prospecting*, 63(6): 1403-1419, doi: 10.1111/1365-2478.12329.
- Weitemeyer K A, Constable S C, Key K W, et al. 2006. First results from a marine controlled-source electromagnetic survey to detect gas hydrates offshore Oregon. *Geophysical Research Letters*, 33: L03304.
- Zach J J, Brauti K. 2009. Methane hydrates in controlled-source electromagnetic surveys—Analysis of a recent data example. *Geophysical Prospecting*, 57(4): 601-614.

#### 附中文参考文献

- 陈凯, 景建恩, 魏文博等. 2013. 海洋拖曳式水平电偶源数值模拟与电场接收机研制. *地球物理学报*, 56(11): 3718-3727, doi: 10.6038/cjg20131113.
- 陈凯, 魏文博, 邓明等. 2015. 海底可控源电磁接收机的电场低声观测技术. *地球物理学进展*, 30(4): 1864-1869, doi: 10.6038/pg20150447.
- 邓明, 魏文博, 张文波等. 2010. 激励及地电条件与天然气水合物的电偶源电场响应. *石油勘探与开发*, 37(4): 438-442.
- 邓明, 魏文博, 盛堰等. 2013. 深水大地电磁数据采集的若干理论要点与仪器技术. *地球物理学报*, 56(11): 3610-3618, doi: 10.6038/cjg20131102.
- 景建恩, 伍忠良, 邓明等. 2016. 南海天然气水合物远景区海洋可控源电磁探测试验. *地球物理学报*, 59(7): 2564-2572, doi: 10.6038/cjg20160721.
- 李金铭. 2005. *地电场与电法勘探*. 北京: 地质出版社.
- 王猛, 邓明, 张启升等. 2009. 控制海底电磁激发脉冲发射的时间同步技术. *地球物理学进展*, 24(4): 1493-1498, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.04.043.
- 王猛, 张汉泉, 伍忠良等. 2013. 勘查天然气水合物资源的海洋可控源电磁发射系统. *地球物理学报*, 56(11): 3708-3717, doi: 10.6038/cjg20131112.
- 王猛, 伍忠良, 邓明等. 2015. MCSEM 发射电流波形的高精度时间标识技术. *地球物理学进展*, 30(4): 1912-1917, doi: 10.6038/pg20150452.

(本文编辑 汪海英)