

引文格式:

江敏, 谢晋兴, 万志颖, 等. 海底原位高分辨率二维时移地震探测系统设计 [J]. 集成技术, 2020, 9(4): 58-67.

Jiang M, Xie JX, Wan ZY, et al. Design of submarine *in-situ* high resolution 2D time-shift seismic detection system [J]. Journal of Integration Technology, 2020, 9(4): 58-67.

海底原位高分辨率二维时移地震探测系统设计

江 敏 谢晋兴 万志颖 黄逸凡

(中国科学院深圳先进技术研究院 先进材料科学与工程研究所 深圳 518055)

摘 要 大规模开采海底天然气水合物存在地质灾害风险, 因此需要对开采过程进行相关监测。时移地震可以反演水合物分解引起的储层沉积物地震反射特性变化。该文首次基于高分辨率多道地震, 提出海底原位激发和采集的二维时移地震系统, 给出了系统及主要组成部分的结构设计、流程设计和关键参数设计, 并对设计过程和相关依据进行详细论述。该系统主要由深水电火花震源、深水多基元接收缆、多通道数据采集系统和电池组及其管理系统组成, 同时还包括深水电机、深水电滑环、自动排缆器等辅助机构。其中电火花震源最大激发能量为 1 000 J, 接收缆采用 16 个耐压 20 Mpa 的深水检波器构成, 基元间距为 1 m, 接收的地震子波经 16 通道采集卡处理后进行原位存储。系统由锂电池进行供电, 采用周期性唤醒的工作模式, 设计水下工作 2 个月, 每小时进行 1 次激发采集, 最大工作水深为 1 500 m, 最大地层穿透深度为 250 m, 最高分辨率为 0.5 m。该系统的海底原位激发和采集可以完美实现采集数据的空间一致性, 确保时移地震数据反演出水合物开采过程中储层沉积物地震反射特性变化。

关键词 时移地震; 海底原位; 天然气水合物

中图分类号 P 754 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20200520001

Design of Submarine *in-Situ* High Resolution 2D Time-Shift Seismic Detection System

JIANG Min XIE Jinxing WAN Zhiying HUANG Yifan

(Institute of Advanced Materials Science and Engineering, Shenzhen Institutes of Advanced Technology,
Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract There is a risk of geological disaster in the large-scale exploitation of submarine hydrate, so it is necessary to monitor the exploitation process. Time-lapse seismic can be used to retrieve the seismic reflection characteristics of reservoir sediments caused by hydrate decomposition. Based on the high-resolution

收稿日期: 2020-05-20 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 深圳市科技研发资金计划项目 (JCYJ20180507182200750); 广东省促进经济发展专项计划项目 (GDME-2018D004)

作者简介: 江敏, 硕士, 工程师, 研究方向为高电压与放电等离子体技术; 谢晋兴, 学士, 研究方向为高电压与放电等离子体技术; 万志颖, 学士, 研究方向为高电压与放电等离子体技术; 黄逸凡(通讯作者), 教授级高工, 博士研究生导师, 研究方向为高电压与放电等离子体技术、海底资源环境调查技术, E-mail: yf.huang@siat.ac.cn。

multichannel seismic technology, a two-dimensional time-lapse seismic system is proposed in this paper. The structure design, flow design and key parameters design of the system and its main components are given, and the design process and relevant basis are discussed in detail. The system is mainly composed of deep water sparker, deep water multi-element receiving cable, multi-channel data acquisition system, battery pack and its management system. At the same time, it also includes deep water motor, deep water slip ring and automatic cable arranging device. The maximum excitation energy of the sparker is 1 000 J, and the receiving cable is composed of 16 deep-water hydrophones with pressure resistance of 20 MPa. The gap distance between the hydrophones is 1 m. The received seismic wavelet is processed by the 16 channel acquisition system and stored *in situ*. The system is powered by lithium battery and adopts the periodic wake-up mode. It is designed to work underwater for 2 months and conduct data acquisition once an hour. The maximum working depth of the system is 1 500 m, the maximum stratum penetration depth is 250 m and the maximum resolution is 0.5 m. The *in-situ* excitation and acquisition of seabed can perfectly achieve the spatial consistency of acquisition data, and ensure that the time-lapse seismic data can reflect the seismic reflection characteristics of reservoir sediments in the process of hydrate mining.

Keywords time-shift seismic detection; submarine *in-situ*; natural gas hydrate

1 引 言

天然气水合物(以下简称“水合物”)作为一种清洁能源,储量丰厚^[1],是我国新能源战略的重要组成部分。2011年实施的国家天然气水合物勘查与试采专项计划初步探明了我国海域,尤其是南海北部的水合物储量,并分别于2017年5~7月和2020年2~3月成功进行了两次试采^[2-3]。尽管目前我国海域水合物资源开发工作已基本由勘查阶段进入试采阶段,但是离大规模商业性开采还有很长一段路要走^[4]。由于海底水合物成藏较浅,且大多矿体没有完整的圈闭构造和致密盖层,因此开采易引发海底滑坡、地面沉降、甲烷泄漏等次生灾害^[5]。水合物在形成过程中可固化沉积物空隙,有助于提高海底地层的稳定性。而开采主要是通过加温、降压、注入化学剂等方法使沉积物中的固态水合物变成气体并加以释放。这个过程会改变沉积物密度等物理性质,从而导致地层失稳与沉积层滑动。此外,水合物分解也可能使钻井孔压急剧上升,引起井壁失稳,影响

钻探平台与水下工程设施的安全。所以在开采过程中,需要对储层地质条件变化进行监测,以确保开采过程的安全^[6]。我国前期的水合物开采环境监测主要针对甲烷泄露、地面沉降等,监测范围只涵盖海底地表及浅表沉积层。例如,2017年我国南海北部神狐海域水合物试采利用了潜标、遥控无人潜水器(Remote Operated Vehicle, ROV)搭载甲烷传感器、二氧化碳传感器进行海底开采环境的水化参数监测^[7]。“十三五”国家重点研发计划深水专项立项开展在水合物开采过程中,对海底地形和地表沉积层变化监测的技术攻关。但目前对水合物储层地质条件变化的监测工作仍然缺乏系统性。

水合物开采改变了储层沉积物的物理性质,如密度、波速和波阻抗等。因此会明显改变其地震反射特性,该变化过程可以通过时移地震技术进行监测。中国科学院地质与地球物理研究所曾利用模拟计算的方法对此进行了验证^[8]。美国加州大学也曾理论验证了在水合物开采过程中,利用垂直地震剖面对墨西哥湾的储层变化进行时

移地震监测的可行性^[9]。本文提出基于潜标的海底原位高分辨率时移地震探测系统,在开采井口附近海床上布置深水电火花震源和海底小道距多道接收缆,实现了海底震源和采集的同步激发。同时,该系统可采集井口附近的高分辨率地震数据,形成时移地震剖面,从而反映开采行为对储层稳定性的影响。本研究结果可用于评估沉积层滑动、地面沉降以及甲烷泄露等次生灾害发生的可能性并提供预判的科学依据。

2 系统设计

2.1 结构与流程设计

我国南海北部水合物主要试采区域(神狐水域)的平均水深在 1 000 m 左右,前期钻探取样结果显示,含天然气水合物沉积层位于海底以下 153~225 m 深度^[10]。因此本文设计的海底原位高分辨率二维时移地震系统最大工作水深为 1 500 m,地层穿透深度为 250 m,满足神狐水域试采水深和水合物储层深度的基本要求。同时设计最高垂直和水平分辨率达到 0.5 m,满足工程地质风险评价的要求。该装置主要由深海电火花震源(包括震源电子舱和发射头)、深水小道距多道接收缆、多通道数据采集系统(采集电子舱)和电池组及管理系统(电池舱)等单元组成,同时还包括深水电机、深水电滑环自动排缆器等辅助机构,具体结构如图 1 所示。

图 1 装置设计施工流程如下:①在装置入水

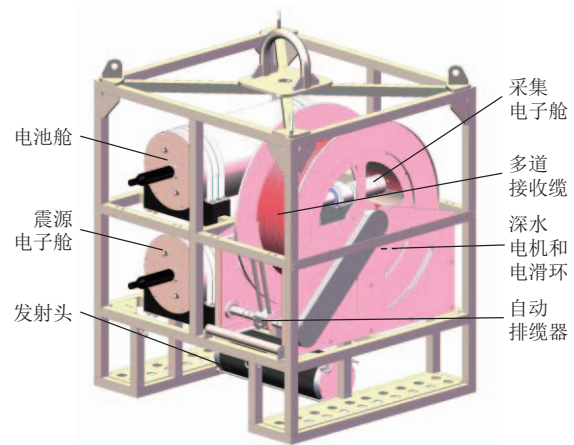


图 1 海底原位高分辨率二维时移地震系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of submarine *in-situ* high resolution 2D time-shift seismic detection system

前,通过外设对系统工作参数进行设定,包括工作周期、工作次数、震源激发能量、采集时间长度等;②通过甲板钢缆将装置释放到海底,并由 ROV 将多道接收缆铺设在海床上(接收缆为弱重力缆,尾端固定有沉块),此后装置根据程序设定进入定时自主唤醒、激发采集和自主休眠的周期性工作模式;③设定的激发采集次数完成后,ROV 通过磁性开关启动深水电机将多道接收缆回收至装置内,并将装置与甲板钢缆连接;④装置回收后,通过外设读取原位存储的数据进行结果分析。此外,装置各主要部分的连接如图 2 所示,每个工作周期的流程设计如下:①采集电子舱内的多通道数据时,采集系统根据程序设定自主唤醒,并发出唤醒信号给震源电子舱,启动震源开始储能;②储能完成后,采集系统发

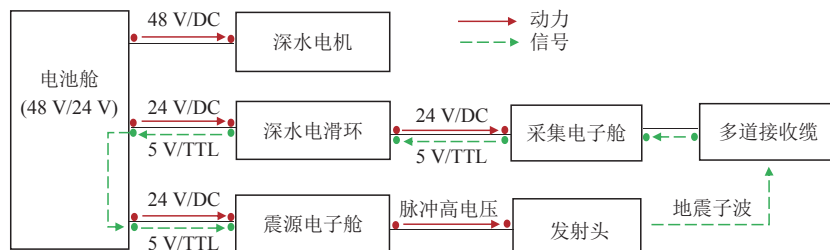


图 2 海底原位高分辨率二维时移地震系统连接示意图

Fig. 2 Connection mode of submarine *in-situ* high resolution 2D time-shift seismic detection system

出激发信号给震源电子舱, 震源电子舱输出脉冲高电压至发射头, 激发产生地震子波, 同时多道接收缆采集地震反射数据, 经滤波和数字化处理后进行原位存储; ③数据采集完毕后, 采集电子舱和震源电子舱自动进入休眠, 至此完成 1 个工作周期。

2.2 关键参数设计

由于传统高分辨率多道地震的穿透深度和分辨率不仅受硬件系统、数据后处理软件等影响, 而且受作业水深、海况、海底底质以及船体噪声等环境参数的影响, 所以硬件系统的相关设计一定程度上依赖海上作业经验。本文设计的装置为海底原位作业, 环境参数相对固定, 且受海况、船体噪声等影响较小, 因此穿透深度和分辨率的设计指标主要取决于硬件系统参数。本文参照水声主动声呐方程^[11]对装置达到设计穿透深度所需的关键参数进行计算, 主要包括震源源级、接收缆通道数等。具体计算公式如下:

$$FOM=(SL-NL+GS+GT-DT)/2 \quad (1)$$

其中, FOM 为优质因素(单位 dB), 传统主动声呐方程中 FOM 代表声呐系统的探测能力, FOM 越大, 探测距离越远, 本文中代表地层穿透深度越深; SL 为震源源级(单位 dB), 主要取决于震源激发能量, 能量越大, 源级越高; NL 为环境噪声级(单位 dB), 传统多道地震水面作业的环境噪声主要取决于海况和船体, 海底原位作业的环境噪声相对小很多, 在 0.2~1 kHz 频段的平均噪声级为 45 dB^[12]; GS 为接收缆空间增益(单位 dB), 主要取决于接收缆通道数 N (单检条件下即为基元数), 计算公式为 $GS=10 \times \lg(N)$ ^[11]; GT 为采集的时间增益(单位 dB), 主要取决于子波带宽 B 和子波时间长度 T , 计算公式为 $GT=10 \times \lg(2BT)$ (根据作者前期工作, 电火花震源产生的子波主频带为 0.3~1.2 kHz, 因此带宽取值 0.9 kHz, 子波时间长度取值 1.5 ms^[13], 则 GT 取值 4 dB)^[11]; DT 为检测阈(单位 dB),

即系统可检测的最小信噪比, 是比较难以确定的量, 在传统水声探测中主要取决于声呐兵的训练水平, 这里主要取决于地震数据后处理的水平等。水合物海底模拟发射层主要来源于水合物与游离气间存在的明显阻抗差异, 与海底界面反射相似, 因此称为似海底反射。参照混响衰减反演海底反射系数最小信噪比要求^[14], 本文 DT 取值为 6 dB; 公式(1)等号右边部分($SL-NL+GS+GT-DT$)即为硬件系统的输出信噪比。因双程反射, 故 FOM 为输出信噪比的 1/2。在 FOM 与穿透深度的关系方面, 除了考虑传播损失外, 还需考虑吸收衰减, 计算方法如下:

$$FOM=TL+AL \quad (2)$$

其中, TL 为传播损失(单位 dB); AL 为吸收衰减损失(单位 dB)。由于电火花震源于海底, 地震子波以球面波扩散, 因此 TL 计算方法^[11]如下:

$$TL=20\lg(H) \quad (3)$$

其中, H 为穿透深度(单位 m)。以 H 最大值 250 m 计算, TL 为 48 dB。除了传播损失外, 子波在地层中的吸收衰减也不可忽略, 其中频率越高衰减越快, 具体的计算方法如下:

$$AL=Ab \times H \quad (4)$$

其中, Ab 为吸收系数(单位 dB), 取值 0.2 dB/波长^[15]。电火花震源产生的地震子波主频范围为 0.3~1.2 kHz, 这里以最高频率 1.2 kHz 进行计算。同时地震子波在不同地层介质的波速有很大差异, 水合物层中波速一般为 1.5~2.0 km/s^[16], 本文保守取值 1.5 km/s, 得到子波波长为 1.25 m, 因此 Ab 为 0.16 dB/m。根据公式(4), 以 H 最大值 250 m 进行计算, AL 为 40 dB。将 TL 和 AL 的值代入公式(2)可得 FOM 需达到 88 dB, 由此硬件系统的输出信噪比需要达到 176 dB。将上述相关参数取值代入公式(1), 可以得到震源源级 SL 和接收缆空间增益 GS 之和, 即 $SL+GS$ 为 223 dB。根据装置绞车设计尺寸和接收缆总体长度限制, 选取 16 基元(单检), 因此 GS 取值为 12 dB, 进

而 SL 取值为 211 dB。

除了穿透深度指标外, 另外一个关键的勘探指标为分辨率, 包括垂直分辨率和水平分辨率。前者主要取决于震源激发的子波波长, 理论最高分辨率为波长的 $1/4$ 。如前所述, 电火花震源子波波长取值 1.25 m, 因此最高垂直分辨率可以达到 0.3 m, 满足要求。后者主要取决于接收缆的基元间距, 理论最高分辨率为基元间距的 $1/2$ ^[17], 所以实现最高水平分辨率为 0.5 m, 基元间距(即道间距)设计值为 1 m。

此外, 本文设计的装置为时移地震系统, 因此工作周期也是非常重要的指标, 周期越短, 时间维度上的分辨率越高。受锂电池系统容量限制, 本文设计的工作周期为 1 h, 即每次系统自主唤醒的时间间隔为 1 h。这样 1 昼夜激发采集 24 次, 以 1 次海底作业 2 个月计算, 可激发采集约 1 440 次。

3 深海电火花震源设计

3.1 结构与流程设计

电火花震源通过液电效应激发地震子波, 本文设计的深海电火花震源包括震源电子舱和发射头。系统结构如图 3 所示, 主要包括单片机控制电路、锂电池管理电路、逆变谐振充电电路、储能电容器、放电电路和发射头。除发射头外, 其他部分均安装在震源电子舱内。震源电子舱由单片机进行控制, 当单片机接收到采集电子舱发来的唤醒信号时, 触发锂电池管理电路, 对锂电池组进行选通并闭合继电器。接着触发逆变谐振充电回路对储能电容器进行充电, 当充电电压达到设定值后系统进入等待。当接收到采集电子舱发来的激发信号时, 系统触发放电开关, 发射头在海底激发地震子波。发射头采用不同于常规线电极的微孔电极发射头, 主要由碳纤维耐压舱、放电电极、带微孔的绝缘介质管组成。其中, 碳纤维耐

压舱内注入海水, 舱盖作为低压极、高压极连接介质管中的放电电极, 并通过介质管上的微孔实现放电。该微孔电极发射头结构, 能够有效地提高发射电极能量效率, 可达常规线电极的 2~3 倍^[18]。

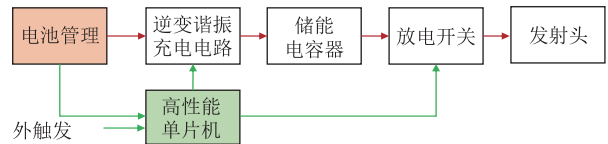


图 3 深水电火花震源系统结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of the deep water sparker

3.2 关键参数设计

本文设计的深水电火花震源与常规电火花震源的主要区别在于采用锂电池供电, 因此其激发能量和储能速率等关键参数受到锂电池系统的输出功率限制。如前所述, 电火花震源的源级设计值为 211 dB。一般而言, 电火花震源的源级主要取决于激发能量, 激发能量越大, 源级越高。在系统能量效率不变的条件下, 两者的关系可以用公式(5)进行计算:

$$SL_1 - SL_2 = 10 \times \lg(E_1 / E_2) \quad (5)$$

其中, SL_1 为深水电火花震源源级; SL_2 为常规电火花震源源级; E 为震源激发能量(单位 J)。由公式(5)可知, 当激发能量增加 1 倍时, 震源源级可增加 3 dB。作者前期依托国家重点研发计划深海关键技术与装备专项子课题研制的深海电火花震源经第三方计量, 当激发能量达到 2 000 J 时, 震源源级为 215.8 dB。因此本文设计的深海电火花震源最大激发能量为 1 000 J, 最大源级可以达到 212.8 dB。当激发能量达到 650 J 时, 源级可以达到系统设计所需的 211 dB。

常规电火花震源用于多道地震作业时, 激发时间间隔一般不超过 5 s。而且相同船速条件下, 激发时间间隔越短, 炮间距越小, 道间距不变条件下的叠加次数也越多, 可以得到信噪比更高的地震反射数据。此时要求震源储能速率较大, 输入功率要求也较大, 尤其对于最大激发能量达到 50 kJ 的超大能量电火花震源, 储能速率

最高可以达到 $10 \text{ kJ/s}^{[19]}$ 。本文设计的深海电火花震源激发时间间隔达到 1 h , 储能速率要求较低, 可以满足锂电池输出功率的要求。以一般单模块 $24 \text{ V}/10 \text{ A}\cdot\text{h}$ 商用锂电池为例, 允许正常工作电流不超过 15 A , 本文电火花震源的设计工作电压和最大工作电流分别为 24 V 和 5 A , 确保电池工作稳定可靠。

除了输入功率较小外, 本文设计的深海电火花震源电子舱容积有限, 故震源电路要求高功率密度, 以此降低电子舱的体积和重量。因此震源主回路分别采用高频逆变电路和高比能电容器作为充电电路和储能介质。其中, 主回路逆变开关选用工作频率达到 40 kHz 的金属-氧化物半导体场效应晶体管开关器件, 比常规电火花震源高 $3\sim 4$ 倍, 由此减小变压器体积, 提高主回路的功率密度。储能电容器选用单只额定电容 $800 \mu\text{F}$, 额定工作电压 3.2 kV 的金属薄膜电容器, 能量密度达到 4 J/CC , 是常规电火花震源的 4 倍以上。为确保电容的器工作寿命和稳定性, 设计最高工作电压为 1.6 kV , 由公式(6)可以计算电容器储能:

$$E=0.5\times C\times U^2 \quad (6)$$

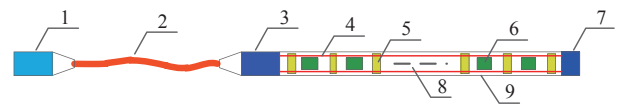
其中, C 为电容器容值(单位 μF); U 为电容器工作电压(单位 kV)。因此, 当工作电压为 1.6 kV 时, 电容器储能达到最大激发能量的设计值 $1\ 000 \text{ J}$, 而工作电压为 1.3 kV 左右时储能可以达到 650 J , 达到穿透深度 250 m 所需震源激发能量的最低要求。

4 深水多基元采集接收系统设计

4.1 结构与流程设计

深水多基元采集接收系统用于定时唤醒和激发电火花震源, 并接收地震反射信号, 经滤波和数字化处理后进行原位存储。其主要结构包括多基元接收缆和采集电子舱, 均由电池舱的 24 V 锂电池供电。本文设计的多基元接收缆为弱

重力, 并在接收缆尾端系有重块, 确保布放在海底时接收缆不易受海底暗流影响。图 4 为接收缆的设计结构图, 主要包括前导段和工作段。前者长度为 35 m , 结构为凯夫拉铠装的多芯缆, 后者长度为 15 m , 如前所述由 16 个间隔 1 m 的检波器组成, 因此接收缆总长为 50 m 。接收缆在布放和回收时会承受一定曳力, 其内部设计有承力绳, 同时内部采用聚氨酯固体胶进行填充。



注: 1-水密连接器; 2-前导段; 3-连接转换器; 4-承力绳; 5-支撑支架;
6-检波器; 7-尾部接头; 8-聚氨酯固体胶; 9-护套

图 4 深水 16 基元接收缆结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of 16 deep water multi-element receiving cable

除了接收缆外, 采集电子舱内部为 16 通道采集卡。采集卡可以定时自主唤醒、激发电火花震源并对接收缆上传的 16 路地震反射微弱信号进行放大、滤波、采集和存储等。采集卡主要结构包括采集调理电路、模数转换电路(ADC)、数字信号放大电路、控制电路以及存储电路等, 具体的系统构成设计如图 5 所示。采集卡的工作流程设计为: 首先, 单片机在每小时的固定时间自主唤醒, 激发电火花震源产生地震子波, 经地层反射的地震信号由接收缆接收; 然后, 经采

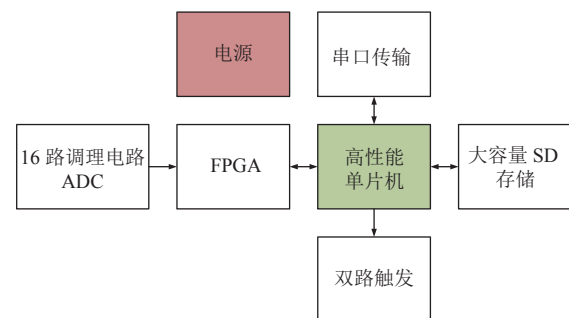


图 5 采集卡系统结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of multi-channel data acquisition system

集卡调理电路和模数转换电路后成为数字信号；最后，采集的数字信号由现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)进行读取、格式转换和合并后，传输给单片机，由单片机写入大容量 SD 存储卡。此外，系统的参数和存储的数据可以通过串口进行设定和读取。

4.2 关键参数设计

如前所述，接收缆由 16 个单检的检波器构成，基元间距 1 m。其中，检波器是接收缆的核心器件，也是与常规多道接收缆的主要区别所在。本文设计采用最大工作水深达到 2 000 m 的国产深水检波器，以确保在 1 500 m 条件下检波器的稳定性。具体选型为无锡宏志的 TL-30，其性能参数如表 1 所示。作者在前期工作中，已对该型号检波器在深水条件下的工作性能进行了第三方标定。结果显示，该检波器在 0.1~10 MPa (目前国内最大标定的工作压力)具有稳定的灵敏度和频响曲线，符合设计要求。

表 1 深水检波器 TL-30 性能参数

Table 1 Performance parameters of TL-30 deep water detector

参数	设计值
灵敏度	-196 dBv re 1 μ Pa
频响范围 (± 1.5 dB)	1~10 kHz
最大工作水深	2 000 m (20 MPa)

多通道采集卡前端的调理电路主要参数包括滤波带宽、信号放大倍数等；后端采集电路主要参数包括 AD 采样率、采样位数和采集时间等。上述参数对于地震反射子波数据的采集和存储质量至关重要。如前所述，深海电火花震源激发子波主频段为 0.3~1.2 kHz，最高信号频率为 5 kHz。因此，本文设计采用低通滤波器，截止频率上限为 5 kHz；滤波前信号由仪表放大器(模拟)进行阻抗匹配及 100 倍放大，滤波后信号再由程控放大器(数字)进行放大，其中放大倍数的 1~200 均可选。采集方面，为确保信号采样的保真度，

同时考虑数据容量和能耗限制等因素，AD 采样率和采样位数分别采用高分辨率地震探测常用的 12 kHz 和 32 位。同时，根据前面所述最大穿透深度 250 m 和波速 1 500 m/s 等参数，双程反射时间约为 0.33 s。为确保能够对震源激发的地震子波进行采集，采集起始时间比震源激发时间提前 0.1 s，采集时间总长设定为 1 s。其中，1 s 的数据量可根据公式(7)进行计算：

$$B=W \times F \times D \times T / 8 \text{bits} \quad (7)$$

其中， B 为采样数据字节数(单位 kB)； W 为采样位数； F 为采样频率(单位 k)； D 为通道数； T 为采样时间(单位 s)。将上述数据代入可知 1 s 采样产生的数据量为 768 kB，由此设计工作次数达到 1 440 次总共产生约 1 080 MB 数据，一般的 SD 数据卡都可满足。

5 锂电池组及管理系统设计

5.1 结构和流程设计

如前所述，本文设计的深水电火花震源和多基元采集接收系统都采用 24 V 锂电池供电。锂电池组由若干单节规格为 24 V/10 A·h、比能达到 350(W·h)/kg 的商用电池组成。由于锂电池不能直接并联使用，因此本文设计了一个电池管理系统，实现的功能主要为系统每次唤醒时对每个电池的电压进行测量。然后选通电压最高的电池进行工作，系统每次休眠时对电池组进行物理关断，从而实现对电池组的有效管理，提高电池的使用寿命。管理系统结构如图 6 所示，分为电池片选电路、电压采集电路及电流检测电路。本系统由单片机控制，其工作流程如下：①每次系统唤醒后，单片机经 10:1 的分压电阻开始对每个电池的电压进行采样；②采样结束后，通过片选电路选择电压最高的电池进行导通；③利用一块内置精密分流器的集成芯片对输出电流进行采样，经内部放大后转换成电压值输出给单

片机, 以此检测当前选通电池运行的电流值。当系统 1 个工作周期结束后, 片选电路全部关断, 系统进入休眠。

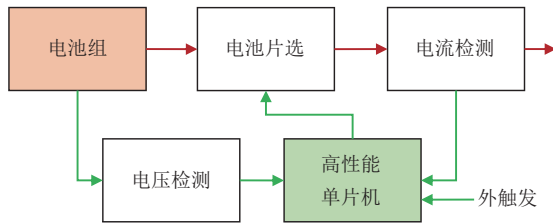


图 6 电池管理系统结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of battery management system

5.2 关键参数设计

对于海底原位运行的装置, 其供电的电池容量是重要参数。科学设计电池容量可以确保装置在设定运行时间内具有比较充足的电源电量。本文设计的装置为周期性唤醒式的工作模式, 因此电池电量需求需要考虑工作功耗和休眠功耗两个方面, 具体计算公式如下:

$$Q_t = I_w \times T_w + I_s \times T_s \quad (8)$$

其中, Q_t 为系统总体电量需求(单位 A·h); I_w 为系统工作电流(单位 A); T_w 为系统工作的总时间(单位 h); I_s 为系统休眠电流(单位 A); T_s 为系统休眠的总时间(单位 h)。

如前所述, 电火花震源最大工作电流为 5 A。与其相比, 多基元采集接收的工作电流小很多, 约为 0.15 A, 因此 I_w 为 5.15 A。一个工作周期内系统的工作时长主要取决于电火花震源储能所需要的时间。以最大工作电流 5 A 计算, 震源的输入功率为 120 W, 保守估算充电电路的能量效率为 50%。因此达到最大储能 1 000 J 所需的时间为 17 s, 再加上接收采集的时间设定为 1 s, 总共至少需要 18 s。为确保系统工作稳定, 本文设定的每个周期工作时间为 30 s, 这样时间较为充足。根据系统每小时为 1 个工作周期、海底运行 2 个月计算, T_w 为 12 h。综上, 系统处于工作状态的总电量需求 $I_w \times T_w = 61.8 \text{ A}\cdot\text{h}$ 。此外, 绝大部分时间系统处于休眠状态, 休眠功耗也十分重

要。本文设计电火花震源和采集接收采用的单片机休眠功耗均为 0.25 W 左右。因此系统总体休眠功耗为 0.5 W, 休眠电流 I_s 约为 0.02 A, 同时 T_s 约为 1 428 h, 计算得到系统休眠状态时总的电量需求 $I_s \times T_s = 28.6 \text{ A}\cdot\text{h}$, 以及系统总体电量需求为 90.4 A·h。为保证系统水下工作电量充足, 并考虑电池舱容积等因素, 本文设计电池组由 11 节 24 V/10 A·h 构成, 总电量为 110 A·h。

除了电火花震源和采集接收需要用电外, 深水电机也需要用电。本文设计采用 48 V/700 W 的深水电机, 因此工作电流大约 14.6 A。考虑到电机只在水下工作 1 次, 保守估计单次工作大约 0.5 h, 总的电量需求约为 7.3 A·h。由于电机工作电流较大, 且需要使用水下磁开关进行控制, 因此采用 2 块 24 V/10 A·h 电池并通过 24 V 转 48 V 模块升压后供电。

6 国内外研究现状对比

在海底水合物时移地震监测方面, 除了前言部分提到的理论工作, 实际工程实施的工作不多。加拿大麦吉尔大学采用单道双缆的常规水面三维地震勘探系统分别在 2000 年和 2005 年于 Bullseye 冷泉区域进行了 4D 时移地震观测, 发现了新流体通道的形成^[20]。然而, 由于海底水合物一般在深海海域, 常规水面地震探测无法得到较高的分辨率, 同时受采集一致性要求限制, 很难获得高重复率的时移地震数据。而基于海底接收缆(Ocean Bottom Cable, OBC)的时移地震监测可以解决这个问题。日本的经济产业省与 JOGMEC 团队在南海海槽使用了全光纤 4C-OBC(4 Component-Ocean Bottom Cable, 4 分量海底接收缆)来对水合物储层进行时移地震监测。在水面激发震源, 利用间距为 26.5 m 的 36 个基元构成的接收缆实时接收海底 OBC 数据得到 2D 或 3D 剖面, 两次采集时间间隔为半年,

从而判断开采前后水合物储层的变化^[21]。国内北京大学也在开展基于 4C-OBC 的南海水合物储层监测系统设计,覆盖开采井附近 1 km×1 km 的范围,基元间距 25 m,测线间距 50 m,需要海面震源激发,目前还未开展海试工作^[22]。海底 OBC 基元由于间距较大、分辨率低,不适用于开采过程中因储层地质条件变化而引起的工程地质风险因素识别。除了常规水面地震和海底 OBC 外,井间地震也是水合物储层变化监测的重要技术手段。一般由长期布置在开采井的源阵列和在观测井布置的接收阵列组成,通过测量子波数据间的时间差分析得到水合物储层的力学性质及物质组成的变化^[23]。然而,海底垂直地震剖面和井间地震需要井下布置传感器,技术难度大、装备复杂、工程实施难度大。

7 结论与展望

海底天然气水合物资源储量丰富,是理想的清洁能源。2020 年我国在南海神狐海域实现了第 2 次成功试采,为未来商业开采奠定了基础。然而水合物大规模开采存在着地质灾害风险,迫切需要对开采过程进行相关监测。本文提出了一种海底原位激发和采集的二维时移地震系统,能够长时间地原位监测水合物开采过程中储层的变化,且作业方式灵活。本系统的设计丰富了天然气水合物开发环境长期监测技术与装备,为我国海洋天然气水合物资源开发提供技术支撑,具有广泛的应用价值和前景。

参 考 文 献

- [1] 张光学,黄永祥,祝有海,等.南海天然气水合物的成矿远景[J].海洋地质与第四纪地质,2002,22(1):75-81.
- [2] 李月清.我国首次海域可燃冰试采成功[J].中国石油企业,2017,12:46-47.
- [3] 姜焕琴.我国海域天然气水合物试采再传捷报——创造新的世界纪录,取得重大标志性成果[J].中国矿业报,2020,22(1):96.
- [4] 吴时国,王吉亮.南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考[J].科学通报,2018,63(1):8-14.
- [5] 朱超祁,张民生,刘晓磊,等.海底天然气水合物开采导致的地质灾害及其监测技术[J].灾害学,2017,32(3):51-56.
- [6] 鲁晓兵,张旭辉,王淑云.天然气水合物开采相关的安全性研究进展[J].中国科学:物理学力学天文学,2019,49(3):034602.
- [7] 董一飞,罗文造,梁前勇,等.坐底式潜标观测系统及其在天然气水合物区的试验性应用[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(5):195-203.
- [8] 郝召兵,伍向阳,秦静欣,等.时移地震监测天然气水合物开采可行性分析[J].地球物理学报,2010,53(9):2213-2221.
- [9] Kowalsky MB, Nakagawa S, Moridis G. Feasibility of monitoring gas-hydrate production with time-lapse vertical seismic profiling [J]. SPE Journal, 2010, 15(3): 634-645.
- [10] 张光学,徐华宁,刘学伟,等.三维地震与 OBS 联合勘探揭示的神狐海域含水合物地层声速速度特征[J].地球物理学报,2014,57(4):1169-1176.
- [11] 李启虎.声呐信号处理引论[M].北京:海洋出版社,1985.
- [12] 衣雪娟,林建恒,陈鹏,等. PE 法计算楔形海底环境噪声垂直分布和指向性[C]//中国声学学会全国声学学术会议,2006.
- [13] 王磊,姜晔明,黄逸凡,等.利用等离子体声源测量浅海低频段水声信道特性[J].声学学报,2012(1):3-11.
- [14] 侯倩男,吴金荣,尚尔昌,等.浅海海底反射系数幅值参数的反演[J].声学学报,2019(4):442-451.

- [15] Roger P. High Resolution Site Surveys [M]. London: Spon Press, 2002.
- [16] 薛花, 杜民, 文鹏飞, 等. 南海神狐海域试采区天然气水合物精细速度建模方法 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(7): 8-17.
- [17] 刘馥. 地震勘探导论 [M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [18] Zhu XL, Zhang LC, Huang YF, et al. The effect of the configuration of a single electrode corona discharge on its acoustic characteristics [J]. Plasma Science & Technology, 2017, 19(7): 075403.
- [19] 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, 33(3): 24-25.
- [20] Riedel M. 4D seismic time-lapse monitoring of an active cold vent, northern Cascadia margin [J]. Marine Geophysical Researches, 2007, 28(4): 355-371.
- [21] Asakawa E, Hayashi T, Tsukahara H, et al. Multicomponent seismic for gas hydrate monitoring [C] // Proceedings of 75th EAGA Conference and Exhibition, 2013: 10-13.
- [22] 何涛, 卢海龙, 林进清, 等. 海域天然气水合物开发的地球物理监测 [J]. 地学前缘, 2017, 24(5): 368-382.
- [23] Primiero P, Dreullault V, Sugiyama H, et al. Acoustic monitoring of methane hydrate production: system development, deployment and modeling/measurement evaluation [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, 2008: 1-7.