doi: 10.11720/wtyht.2024.0165

第48卷第6期

2024年12月

王洁,王猛,任志滨,等.海洋可控源电磁的任意频率波形产生技术研究[J].物探与化探,2024,48(6):1448-1454.http://doi.org/10.11720/wtyht. 2024.0165

Wang J, Wang M, Ren Z B, et al. Marine controlled-source electromagnetics-based technology for generating arbitrary-frequency waveforms [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1448-1454. http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0165

# 海洋可控源电磁的任意频率波形产生技术研究

# 王洁1,王猛1,2,任志滨1,王宸韬1,王会敏1

(1.中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083; 2.陆内火山与地震教育部重点 实验室 中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要:海洋可控源电磁(marine controlled-source electromagnetic, MCSEM)探测方法通过揭示海底以下的电性差异 来探测油气和天然气水合物等资源,以及深部地质构造。不同的激发频率对应不同的探测深度,为了更好地对海 底以下目标进行电性成像,本文开展了海洋可控源电磁的任意频率波形产生技术的研究,用于灵活改变激发频率, 提升勘探效果和效率。本论文基于直接数字频率合成(DDS)芯片 AD9833,通过单片机和复杂可编程逻辑器件 (CPLD)联合调控,可以在海洋可控源电磁探测中发射 0~100 Hz 的步进 0.01 Hz 的任意单频驱动信号,实现了有限 精度任意频率波形的产生。最后对测试技术指标进行分析后得出,任意频率波形产生技术可以有效提高 MCSEM 的频谱适应性和灵活性。

关键词:海洋可控源电磁法;DDS;任意频率波形;STM32;CPLD 中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2024)06-1448-07

# 0 引言

地球表面绝大部分被被海洋所覆盖,海洋中蕴 藏着丰富的石油、天然气等矿产资源。随着全球经 济的持续发展,陆地资源储备正在迅速减少,能源短 缺成为一个日益严峻的问题。因此,开发海洋油气 资源逐渐上升为全球的重要战略目标<sup>[1-2]</sup>。

海洋可控源电磁探测可以有效探测海底不同电 阻率的异常体,该技术的原理是利用船只拖曳大功 率海洋电磁发射机,在近海底区域发射电磁波,再通 过接收机收集反射的电磁波数据。根据海底岩石电 阻率的差异性对数据进行分析就能得到电性异常体 的分布情况<sup>[3]</sup>。然而海洋环境复杂,海水的高电导 率会加速电磁波的衰减,如:温度和盐度的波动会影 响电导率,从而影响电磁波的有效传播距离;水下声 音和自然电磁等一系列干扰,会降低探测信号的信 噪比,干扰信号的接收和处理。为确保 MCSEM 海 底作业的准确性,MCSEM 发射机需具备强大的频谱 适应性和抗干扰性。研究有限精度任意频率的信号 产生技术,就能有效识别和滤除各种干扰,选择最合 适的发射频率,提高探测数据的准确性和可靠性。

自 19 世纪 70 年代以来,国际上的研究机构已 经开始研发海洋可控源电磁探测技术。美国 Seripps 海洋研究所的 Cox 教授率先提出了利用水 平电偶极子和接收机进行海洋可控源电磁勘查的概 念<sup>[4-5]</sup>,并且进行了相应的海上试验。这些研究成 果促使石油和天然气行业对海洋可控源电磁勘探技 术产生了极大的兴趣,并催生了多家提供专业海洋 电磁服务的公司,开展了数百个探测项目<sup>[1]</sup>。国外 研发的海洋可控源电磁发射系统,主要有 Scripps 的 SUESI 系列<sup>[6]</sup>、OHM 公司的 DASI 系列<sup>[7]</sup> 以及 PGS 和 EMGS 各自开发的发射系统<sup>[8-9]</sup>,以 EMGS 为例, EMGS 的系统可以发射电流高达 10 000A<sup>[10]</sup>,是行 业内的领先技术,公开资料表明,其可实现单频和多 频的信号输出,但在任意频率方面技术保密。国内

收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2024-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42374221)

第一作者: 王洁(2001-),女,内蒙古乌兰察布市,博士研究生,研究方向为控制科学与工程。Email:15754818100@163.com

通讯作者: 王猛(1984-),男,河南省许昌市,博士,副教授,研究方向为地球物理仪器。Email:wangmeng@ cugb.edu.cn

的多个研究和开发机构如中国海洋大学<sup>[11]</sup>、中国地质大学(北京)<sup>[12-13]</sup>、吉林大学、中国科学院以及东方地球物理公司也在海洋可控源电磁探测技术的自主研发中深耕。但现有发射机也只能发射 0.01 ~ 100 Hz 的固定频率的信号,在任意频率方面研究力度不够。

不同的激发频率对应不同的探测深度,为了更 好地对海底以下目标进行电性成像,并且根据国内 外研究现状,结合海洋可控源电磁发射的实际需求, 本论文开展的任意频率波形产生技术对于发射机的 频谱适应性和抗干扰具有重要意义。

1 任意频率波形产生技术的实现

### 1.1 直接数字频率合成技术原理

直接数字频率合成(direct digital synthesizer, DDS)技术的基本原理就是利用可编程时钟信号作 为地址计数器的计时时钟,地址计数器的输出则作 为波形存储器的扫描地址,波形存储器以对应地址 的数字幅度序列为输出,随后经过数模转换成模拟 阶梯波形,最终通过低通滤波器进行平滑滤波以获 得输出波形。

DDS 的基本结构由参考时钟、相位累加器、波 形存储器、D/A 转换器和低通滤波器组成。其中, DDS 的参考时钟源通常由晶体振荡器产生,提供稳 定的时钟信号,确保整个 DDS 系统各个部分的同 步;频率控制字(FTW)是一个二进制编码的值,用 于控制相位累加器的累加步长,进而影响输出信号 的频率;相位累加器由加法器和级联寄存器组成,根 据频率控制字的设定实现相位累加并输出相应的相 位增量;波形存储器用于存储待合成信号的波形数 据,相位累加器的输出作为波形存储器的地址线;数 模转换器将数字波形数据转换为模拟信号,重新合 成输出波形。各部分相互协作,通过数字控制和信 号处理,实现对输出信号频率和相位的精确控制,从 而实现 DDS 的功能。

本设计采用直接数字频率合成(DDS)芯片 AD9833,由 ADI公司生产,带有串行接口功能,具有 高精度、低功耗、结构简单、体积小的特点。AD9833 内部由相位累加器、频率和相位调节器、正弦只读存 储器(SINROM)、数模转换器(DAC)和电压调整器 组成。AD9833 的输入由 FSYNC 引脚、SCLK 引脚、 SDATA 引脚控制,芯片内部有1个控制寄存器、2个 频率寄存器、2个相位寄存器和1个相位累加器。 VOUT 输出波形主要根据10位 DAC 输出正弦波和 三角波,或 MSB 直接输出以及 MSB/2 输出方波。 通过 FSYNC 引脚、SCLK 引脚、SDATA 引脚对寄存 器进行写入,频率寄存器中的值输入到相位累加器 中,再与相位寄存器中的值来进行相位偏移,但输出 会被截断至 12 位,并在 SIN ROM 中寻找对应相位 的 DAC 值,经过 10 DAC 输出或 MSB 直接输出或 MSB/2 输出到 VOUT 上。AD9833 的基本结构原理 图如图 1 所示。



图 1 AD9833 基本结构原理

Fig.1 Schematic diagram of the basic structure of the AD9833

其中:*M* 表示频率控制字, 而 *f<sub>MCLK</sub>* 是芯片所接的晶振频率,本设计采用 1 MHz 晶振, 即 *f<sub>MCLK</sub>* = 1 MHz。通过对正弦信号进行采样、量化和编码, DDS 系统生成一张存储在只读存储器(ROM)中的正弦函数表。利用线性相位累加的方式, 以累加值为地址, 从 ROM 表中获取对应的非线性幅值, 然后通过硬件进行并行处理, 生成波形。这种波形具有更宽的带宽、更短的转换时间、更高的频率分辨率等显著优势。

芯片核心是由加法器和相位寄存器组成的 28 位的相位累加器。相位累加器在时钟 *f<sub>MCLK</sub>*控制下 以步长 *M* 进行累加,对应的波形相位变化表示为:

$$\Delta P = \frac{2\pi \cdot M}{2^{28}} \quad , \tag{1}$$

相位寄存器的输出与相位控制字相加后输入到正弦 查询表地址中。正弦查询表包含 1 个周期正弦波的 数字幅度信息,每个地址对应正弦波中 0°~360°范 围内的 1 个相位点。查询表把输入的地址相位信息 映射成正弦波幅度的数字量信号 S(n),经 D/A 转 化器变成阶梯波 S(t),再经低通滤波器平滑后就可 得到合成的信号波形<sup>[14]</sup>。因此,改变相位累加器的 控制字 M,就可以改变相位值  $\Delta P$ ,从而改变合成信 号频率  $V_{out}$ ,即:

$$V_{OUT} = \frac{M \cdot f_{MCLK}}{2^{28}} \quad (2)$$

通过以上分析可以得出以下结论:DDS 的输出 频率仅与频率控制字、系统时钟频率以及相位累加 器位数有关;频率分辨率仅与系统时钟频率和相位 累加器位数有关。若要提高系统的分辨率,可增加 相位累加器位数或降低系统时钟频率。

# 1.2 总体方案

· 1450 ·

DDS 技术提供了一种简便可靠的波形合成方法,其特点是易于控制、可编程性和全数字化操作。本设计选用 AD 公司的 AD9833 进行信号生成, AD9833 是一款性能突出的专用 DDS 芯片,不仅具有较高的工作频率和高精度的 D/A 转换器,还具备

一定的调制功能。综合来看, AD9833 操作简便且 可靠性高,通过单片机和复杂可编程系统联合调控, 产生驱动信号,进而实现海底不同频率的发射。为 提高电路的稳定性和适用性,各硬件采用模块化设 计,整个系统的硬件结构分为两大部分:嵌入式主控 系统和复杂可编程系统。图 2 为总体设计。





由图2可知,嵌入式主控系统是整个硬件设计 的核心,主要负责与上位机和复杂可编程系统通信。 由于发射机工作在海水中,此模块还需监控发射机 舱内的油压、电池电压和发射电压等关键参数。复 杂可编程系统主要负责信号的产生和 GPS 对钟。 通过上位机发送命令给嵌入式主控系统,接收并解 析后通过 SPI向 CPLD 发送控制信号,以进行信号 产生和发射、对钟及获取时钟偏差查询值等功能。 嵌入式主控系统和复杂可编程系统均可拆卸更换, 除时钟输入、供电和下载器相关引脚外,其他引脚通 过排针引出,提高系统板适用性和容错率。

### 2 硬件设计

本设计的主控芯片采用意法半导体公司的 STM32F407ZET6。该芯片拥有极其丰富的片内资 源,并配备 32 位的高性能 ARM Cortex-M4 处理器, 最高时钟频率可达 168 MHz。内置了 192 kb 的 SRAM 和 512 kb 的 FLASH 存储空间以及 16 个支持 FIFO 和突发传输模式的 DMA 通道,满足串口通信 和数据采集。

复杂可编程系统包括核心芯片 MAX10、DDS 芯片 AD9833、1 MHz 高精度恒温晶振、对钟电路等。本设计的主控芯片采用 Intel 公司的 10M08SAE144I7G,

属于 MAX10 系列,内部资源丰富,集成了 PLD 逻辑、RAM、ADC、两个片上 FLASH、锁相环(PLL)、数字信号处理(DSP)等,其 IO 性能优越,支持多种差分电平接入。图 3 为系统组成。

嵌入式主控系统 STM32F407ZET6	控制 信号	复杂可编程系统 10M08SAE144I7G
启动选择 5V供电输入	回复	AD9833 电压转换
串口转换参考电压转换	」 数据	5V供电输入 GPS对钟
程序下载  复位		程序下载  复位

### 图 3 系统组成

#### Fig.3 Block diagram of the system composition

本设计选用 DDS 芯片 AD9833 作为信号产生电路的核心,这是一款由 Analog Devices 公司开发的高性能直接数字合成(DDS)芯片,具有高度的可编程性、低功耗设计以及广泛的输出频率范围等特点, 具备频率和相位可编程的能力。采用1 MHz 的高精度晶振,为 AD9833 提供了一个稳定的时钟源。高精度晶振为系统提供了准确而稳定的时间基准, 使得 AD9833 能够以极高的精度按照指定频率合成 波形。这不仅提高了输出信号的稳定性和准确性, 同时也使得芯片能够更精确地生成各种频率和波形的信号。信号产生电路如图 4 所示。



Fig.4 Circuit diagram of signal generation

该芯片在 3V 供电时的功耗仅为 20 mW,可以 输出 0.01~12.5 MHz 之间的频率,这一频率范围可 以通过软件控制来灵活调整,本设计根据海底不同 发射频率的需求,最终确定生成的控制信号频率范 围为 0.01~100 Hz。为了实现高速且稳定的数据通 信,AD9833 采用 SPI 通信协议,通信速率最高可达 40 MHz。这样的高速通信能力确保了数据传输的 高效性,实时调整输出频率和波形。

# 3 软件开发

软件设计主要分为两部分,一是嵌入式主控系 统软件,二是复杂可编程系统软件。图 5 为整体程 序工作流程。

定义 AD9833 的 IO 接口及交叉开关,初始化 AD9833。当 AD9833 初始化时,为避免 DAC 产生虚 假输出,RESET 必须置为 1(RESET 不会复位频率、 相位和控制寄存器),直到配置完毕,需要输出时, RESET 置为 0;RESET 为 0 后的 8~9 个 MCLK 时钟 周期可在 DAC 的输出端观察到波形。然后写频率 寄存器的控制字,输出所需要的波形。



Fig.5 Overall program flow chart

AD9833 芯片通过 VOUT 引脚输出波形,其电源 电压范围为 2.3~5.5 V。进行串行数据传输时,先 拉低 FSYNC 引脚,串行数据会在 16 个时钟脉冲的 SCLK 下降沿移入器件的输入移位寄存器中。在 FSYNC 变为低电平时, SCLK 必须为处于高电平。 D0~D11 构成了频率控制字,用于设置输出频率的 控制参数,通过设定频率控制字的值,可以控制 DDS 的输出频率范围和分辨率。D12 和 D13 是相 位控制位,用于指定相位寄存器的写入,实现输出信 号相位的精确控制和调整。D14 和 D15 是控制位, 用于选择输出波形类型,包括正弦波、三角波和方 波。改变 AD9833 控制寄存器的内容需要把 D15 和 D14 置为低电平。写入相位寄存器时,D15 和 D14 被置为高电平。表1 和表2 为控制位功能。

表 1 D15 至 D8 控制位功能 Table 1 D15 to D8 control bit functions

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
0	0	B28	HLB	FSEL ECT	PSEL ECT	0	RESET

表 2 D7 至 D0 控制位功能	
-------------------	--

Table 2 D7 to D0 control bit functions

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SLE EP1	SLE EP12	OPBI TEN	0	DIV2	0	MODE	0

VOUT 输出包括正弦波、三角波和方波(DAC 数据的 MSB)。当 OPBITEN = 0时,DAC 与 VOUT 相连,MODE 位决定输出是正弦波还是三角波(MODE = 0 则输出正弦波;MODE = 1 则输出三角波);当 OPBITEN = 1时,VOUT 引脚不再提供 DAC 的输出,DIV2 位控制输出的是 MSB 还是 MSB/2(DIV2 = 0 则输出 DAC 的 MSB/2;DIV2 = 1 则输出 DAC 的 MSB)。具体用法如表 3 所示。

表 3 VOUT 波形输出逻辑 Table 3 VOUT waveform output logic

OPBITEN 位	MODE 位	DIV2 位	VOUT 脚
0	0	Х	正弦波
0	1	Х	三角波
1	0	0	方波(DAC 数据 MSB/2)
1	0	1	方波(DAC 数据 MSB)
1	1	Х	保留

写入频率寄存器需要进行两次写操作,以完整载入任一频率寄存器。设定 B28=1 可通过两次连续写入实现一个完整字的载入频率寄存器。首次写入包含频率字的 14 个 LSB,次次写入包含 14 个 MSB。两次全部载入后写入频率寄存器,此时 D12 被忽略。

当 B28=0 时,将与 D12(HLB)配合,28 位频率 寄存器则用作两个 14 位寄存器,分别为 14 个 MSB 和 14 个 LSB,两者更新时只需对相应的频率地址执 行一次写入,互不影响。D12 能连续载入频率寄存 器的 MSB 或 LSB,指示载入的 14 位是传输至所寻 址频率寄存器的 MSB 还是 LSB,以单独更改频率字 的 MSB 和 LSB。HLB=1 允许写入所寻址频率寄存 器的 14 个 MSB,HLB=0 则对应 14 个 LSB。

FSELECT 位定义相位累加器中使用的是 FREQ0寄存器还是FREQ1寄存器。PSELECT 位定 义是将PHASE0寄存器还是PHASE1寄存器的数据 增加到相位累加器的输出中。

4 实际测试

· 1452 ·

为保证实验测试的完整性,设计了一款上位机 界面,确保设备间的通信可靠、安全和高效,上位机 界面如图6所示。



图6 上位机界面

Fig.6 Upper computer interface

完成 PCB 板的绘制和焊接后进行各模块组装, 在实验室进行实际测试,检查功能是否实现。测试 分 3 部分:直接设置频率值测试、调整频率步进值测 试和误差测试,测试实物图如图 7 所示。

直接设置频率值测试:输入 0.01~100 Hz 范围 内分辨率在 0.01 Hz 的任意频率,状态栏会显示设 置成功标志。如图 8 所示,举例海洋可控源电磁常 用发射频点 0.01、0.04、0.05、0.10、2.00、100.00 Hz 的 波形测试结果。根据实验测试数据分析,本文设计 的任意频率发射符合海洋可控源要求。



图 7 测试实物 Fig.7 Test physical diagram





调整频率步进值测试:上位机逐渐改变发射频率(调整频率-或+)后,状态栏返回调整频率-或+)后,状态栏返回调整频率-或+ 后的实际输出频率值,步进值为0.01 Hz。从1.00 Hz开始,不断调整频率减得到0.99、0.98 Hz,不断调 整频率增得到 1.01、1.02 Hz,输出信号通过示波器 查看,时基均为每格 400 ms,可以看到输出信号峰 峰值均保持在 3.44 V,经过观察,输出信号波形基本 稳定、准确,测试结果如图 9 所示。





误差测试:示波器通道 1 与测试板相连,示波器 通道 2 与外接 GPS 模块相连。将测试板输出频率 和 GPS 的秒脉冲都设置为 1.00 Hz,并将二者的上 升沿对齐。经过实际测试,通过示波器的脉宽测试 可以看到,测试板输出频率脉宽与 GPS 的秒脉冲的 偏移很小;长时间输出超过 24 h 后,会产生一定偏 移,但不超过 20 ppm,满足指标要求。

对本设计的性能指标进行总结,如表4所示。 输出频率范围:基于海洋可控源电磁实际发射,为了 更好地电性成像,本文将任意频率波形发生的最高 输出频率设置为100 Hz。测试结果表明,本设计在 输出0.01~100 Hz方波信号时均能保持较好的波形 形状。

频率分辨率:根据第二章的分析,时钟晶振为1 MHz时,在理论上 AD9833 的输出频率分辨率能达 到0.004 Hz。根据海洋可控源电磁发射信号的需 求,实际测试时的频率分辨率为0.01 Hz,通过上位 机直接设置频率或以0.01 Hz步进调制步进,可以 直接在示波器观测。

表 4 性能技术指标

 Table 4
 Performance specifications

主要参数	技术指标
输出频率范围/Hz	0.01~100
频率分辨率/Hz	0.01
频率步进值/Hz	0.01
频率稳定度(常温)	±20 ppm(25±2 °C)

频率稳定度:DDS 芯片 AD9833 产生信号时的 频率稳定度主要取决于晶振的温漂。该晶振在常温 (25±2 ℃)条件下频差为±20 ppm。从示波器测试 数据来看,满足指标要求,对于发射机的频谱适应性 和抗干扰具有重要意义。

# 5 结论

本文基于海洋可控源电磁对任意频率发射技术 进行了研究。在硬件设计方面,采用 DDS 芯片实现 了海洋可控源驱动发射信号的输出,通过嵌入式主 控系统和复杂可编程系统联合产生频率可调的时频 域波形。在软件开发方面,通过串口输入频率值,由 主控板接收通信命令并控制复杂可编程系统上的 DDS 波形产生模块进行波形生成,从而产生驱动信 号并输出。实现开启、停止、更改发射频率和调整脉 宽等功能。

### 参考文献(References):

 [1] 沈金松,陈小宏.海洋油气勘探中可控源电磁探测法(CSEM) 的发展与启示[J].石油地球物理勘探,2009,44(1):119-127, 130,11.

Shen J S, Chen X H.Development and enlightenment of controlledsource electromagnetic (CSEM) surveying method in marine oil/ gas exploration[J].Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(1):119 -127, 130, 11.

[2] 刘慧,高新伟.国家能源安全视角下的海洋油气资源开发战略 研究[J].理论探讨,2015(6):103-106. · 1454 ·

Liu H, Gao X W.Research on development strategy of offshore oil and gas resources from the perspective of national energy security [J].Theoretical Investigation, 2015(6):103–106.

- [3] 邓明,景建恩,郭林燕,等.MCSEM 电磁场能流密度分布特征研究[J].地球物理学报,2017,60(11):4149-4159.
   Deng M, Jing J E, Guo L Y, et al. The distribution characteristics of the energy flow density of MCSEM[J]. Chinese Journal of Geophysics,2017,60(11):4149-4159.
- [4] Cox C. Electromagnetic induction in the oceans and inferences on the constitution of the earth[J].Geophysical Surveys, 1980, 4(1): 137-156.
- [5] Cox C S.On the electrical conductivity of the oceanic lithosphere
   [J].Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1981, 25 (3):
   196-201.
- [6] Constable S, Cox C S. Marine controlled-source electromagnetic sounding:2. The PEGASUS experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101 (B3):5519-5530.
- [7] Sinha M C, Patel P D, Unsworth M J, et al. An active source electromagnetic sounding system for marine use [J]. Marine Geophysical Researches, 1990, 12(1):59-68.
- [8] Enstedt M, Skogman J, Mattsson J. Propagation of uncertainty associated with towed streamer EM system data acquired 2012 into a 3D inversion model[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013.
- [9] Hanssen P, Nguyen A K, Fogelin L T T, et al. The next generation

offshore CSEM acquisition system [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2017.

- [10] Duan N N, Wang M, Wang G X, et al. Research on the isolation and collection method of multi-channel temperature and power supply voltage under strong marine controlled source EMI[J]. IEEE Access, 2019,7:6400-6411.
- [11] 刘颖.海洋可控源电磁法二维有限元正演及反演[D].青岛:中国海洋大学,2014.
   Liu Y.Two-dimensional finite element forward modeling and inversion of marine controlled source electromagnetic method[D].Qing-dao;Ocean University of China,2014.
- [12] 王猛,张汉泉,伍忠良,等.勘查天然气水合物资源的海洋可控源电磁发射系统[J].地球物理学报,2013,56(11):3708-3717.
  Wang M,Zhang H Q,Wu Z L, et al.Marine controlled source electromagnetic launch system for natural gas hydrate resource exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11):3708-3717.
- [13] Wang M, Deng M, Wu Z L, et al. The deep-tow marine controlledsource electromagnetic transmitter system for gas hydrate exploration [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 137:138-144.
- [14] 覃晓,蒋荣萍.基于 DDS 芯片 AD9833 的低频信号发生器[J]. 大众科技,2008,10(10):29-30,17.
   Qin X, Jiang R P. Low frequency signal generator based on DDS chip AD9833[J].Popular Science & Technology, 2008, 10(10): 29-30,17.

# Marine controlled-source electromagnetics-based technology for generating arbitrary-frequency waveforms

## WANG Jie<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1,2</sup>, REN Zhi-Bin<sup>1</sup>, WANG Chen-Tao<sup>1</sup>, WANG Hui-Min<sup>1</sup>

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Intraplate Volcanoes and Earthquakes, Ministry of Education, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Marine controlled-source electromagnetics (MCSEM) is used to explore resources such as oil and gas hydrates, as well as deep geological structures, by revealing resistivity differences below the seabed. Different excitation frequencies correspond to varying detection depths. To enhance the resistivity imaging of targets beneath the seabed, this study investigated the MCSEM-based technology for generating arbitrary-frequency waveforms to flexibly alter the excitation frequency and improve the exploration effectiveness and efficiency. Using the direct digital frequency synthesis (DDS) chip AD9833 and the joint control of a microcontroller and a complex programmable logic device (CPLD), this study achieved the generation of arbitrary-frequency waveforms with limited precision. The test results indicate that this technology can effectively enhance the spectral adaptability and flexibility of MCSEM.

Key words: marine controlled-source electromagnetics (MCSEM); direct digital frequency synthesis (DDS); arbitrary-frequency waveform; STM32; complex programmable logic device (CPLD)

(本文编辑:王萌)