

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106317

# 深水地震拖缆数据采集仪器的质量控制方法

黄龙君<sup>1</sup> 张建峰<sup>2</sup> 胡勇<sup>1</sup> 于强<sup>1</sup> 刘延旭<sup>1</sup> 马晓伟<sup>1</sup> 赵凯迪<sup>1</sup>

(1.中海油田服务股份有限公司 天津 300540; 2.中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300540)

**摘要:** 针对深水地震拖缆长缆多道问题,提出一种采集仪器的质量控制方法。该方法通过主动与被动两种模式来实现,包含室内系统运行质量控制方法和水下拖缆数据采集质量控制方法。其中主动模式可以按需产生模拟或数字激励信号送至采集仪器,从而用于评价仪器关键性能参数指标;被动模式则可实时采集仪器运行过程中的各种状态参数,用以实现仪器运行质量的实时评估。基于该独立于采集仪器的完备质量控制方法,可以有效控制采集仪器的质量,保障数据采集的品质,极大地降低了勘探作业的风险。长期的实验室测试和海洋作业的结果均表明了该方法的正确性和可实现性。

**关键词:** 海洋物探;数据采集仪器;质量控制;自检信号;实时监控

**中图分类号:** TP274+.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## Quality control method of data acquisition equipment for deep-water seismic exploration

Huang Longjun<sup>1</sup> Zhang Jianfeng<sup>2</sup> Hu Yong<sup>1</sup> Yu Qiang<sup>1</sup> Liu Yanxu<sup>1</sup> Ma Xiaowei<sup>1</sup> Zhao Kaidi<sup>1</sup>

(1. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300540, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC (China) Corporation Limited, Tianjin 300540, China)

**Abstract:** A quality control method of acquisition instrument is proposed to solve the problem of long cable and multi-channel of large-scale deep-water seismic streamer, including indoor system operation quality control method and underwater streamer data acquisition quality control method, which is realized by active and passive modes. In the active mode, analog or digital excitation signals can be generated on demand and sent to the acquisition instrument to evaluate the key performance parameters of the instrument, in the passive mode, various state parameters in the operation process of the instrument can be collected in real time to realize the real-time evaluation of the operation quality of the instrument. Based on the complete quality control method independent of acquisition instrument, the quality of acquisition instrument can be effectively controlled, the quality of data acquisition can be guaranteed, and the risk of exploration operation can be greatly reduced. The results of long-term laboratory test and marine operation show that the method is correct and realizable.

**Keywords:** marine seismic exploration; data acquisition equipment; quality control; self-test signal; real-time monitor

## 0 引言

海洋油气地震勘探是海洋石油工业的重要基石,拖缆式地震勘探数据采集装备具有作业规模大、指标要求高、可靠性苛刻等特点<sup>[1]</sup>,其研制难度和成本都非常大,目前仅有少数国家能够掌握该项技术。随着规模化生产的要求以及勘探目标的加深,海洋物探拖缆采集装备所需支持的拖缆数量及拖缆长度均不断加大,使得此类仪器的数据采集通道数急剧增加,高达上万通道<sup>[2]</sup>。如果无法正确并有效地控制这些数据的产生及品质,将会

对整个仪器所采集到的数据品质产生影响,严重的时候甚至会导致整个作业完全失败,造成不可挽回的巨大经济损失。结合海洋物探仪器自身的特点,需要对海洋物探采集仪器中的质量控制<sup>[3-5]</sup>(quality control, QC)方法进行专门研究,从设计方法上为开展大型地震勘探装备的研制提供指导。

本文从海上拖缆仪器采集作业的需求出发,对质量控制方法和实现进行介绍,内容包括系统需求及质量控制架构设计、水下数据采集质量控制设计、系统运行质量控制设计,最后介绍了相关测试和验证的实际效果。

收稿日期:2021-04-07

### 1 数据采集仪器质量控制总体设计

海上拖缆式地震勘探数据采集作业是由物探船拖拽多根漂浮于海水中的地震拖缆构成,拖缆中安装有精密的地震波探测、采集和传输处理模块,物探船上则安装有室内数据记录处理箱体和软件系统<sup>[6,8]</sup>。海洋地震勘探一次作业过程可能持续数天甚至数周、数月的时间,从而产生海量的地震数据。无论地震仪器在技术或地震作业及处理解释方法上如何进步,物探仪器作为一台记录数据的复杂、高精密度仪器的核心功能是不变的。

为保证地震仪器高质量、高保真地将震波形数据记录下来,确保仪器可靠运行,需要研究质量控制方法和实现技术,其核心要素是对拖缆数据采集仪器的数据采集质量形成可测量、可量化的指标<sup>[9-10]</sup>,从而形成一种控制标准,用以决定数据采集是否合格。经过分析和对比,本文提出,这些QC指标需要包括:

1)水下仪器采集性能参数:包括模数转换器(ADC)的各项性能指标,如电子学噪声、总谐波失真、道间串扰、共模抑制比、模拟带宽、信噪比、检波器电容电阻等。

2)水下仪器运行状态参数:包括环境噪声、温度压力、拉力、水栈道、水下通信通道的误码率、电子学电路电压功耗、数字逻辑运行状态、采集通道存活性等参数。

3)室内仪器运行状态参数:包括高压电源供电电压功率、采集箱体模块化仪器运行参数、主控与记录软件运行状态等。

这是一套非常复杂的质量控制系统,需要完成对所有这些参数的跟踪和控制以确保仪器整体的可靠性。为配合系统运行,本文所研究的质量控制方法需要能够支持仪器的日月检和正常采集模式,在日月检过程中能够实现对仪器参数质量的评价,而在正常运行过程中,能够实现对仪器运行状态的质量评价。整个质量控制系统的总体架构如图1所示。

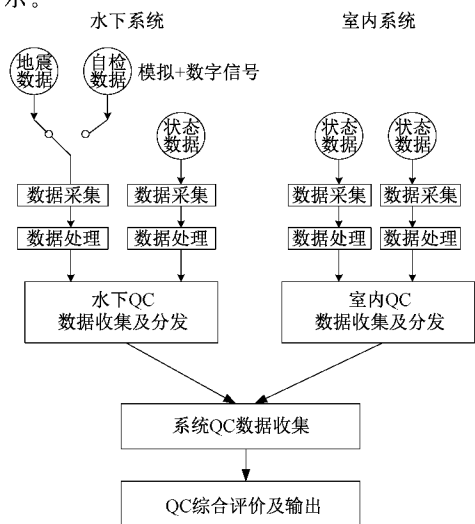


图1 质量控制系统架构

在图1的QC系统架构图中,采用两种思路获得QC所需的数据:一种是主动式,即通过设计主动数据源激励仪器,从而获得QC数据。如水下系统通过自检激励信号产生QC数据,从而获得仪器运行指标数据用以判断其性能状况。另一种是被动式,即通过在仪器各个环节安置QC收集模块以实时获得该仪器运行过程中的状态参数。主动与被动相结合,并与系统工作协议和模式相协同,按需进行QC控制模式的切换,即可全面地实现对该仪器进行QC的评价。

### 2 水下拖缆数据采集质量控制设计

水下拖缆系统是整个深水物探数据采集仪器的核心部件,其由分布于拖缆内部的精密信号采集模块和高性能数据传输模块所构成,同时也包括供电系统。为了获得对超低频地震信号的精密采集,此类仪器普遍采用 $\Delta\Sigma$ 类型的ADC,以获得24 bit的超高分辨能力,采样率可以设置为250、500、1 k、2 k、4 kSPS任意一种。为了能够在线评估此类超高分辨的ADC芯片,从而获得仪器的采集数据质量,需要设计一种在线的模拟信号发生器,产生高品质模拟信号供ADC进行采集分析。

水下数据采集QC控制的结构如图2所示,图中为实现仪器的质量控制,在正常的数据采集模块基础上,添加了3类QC功能模块(如图2中的虚线框),包括自检信号源、伪随机测试码源<sup>[11]</sup>、状态采集及电压监测模块。自检信号是进行地震采集ADC评价的核心关键模块,需要能够产生高品质模拟正弦波,从而能够实现ADC各项性能指标的综合评价。测试信号可以通过模拟开关在系统协议控制下进行切换,当处于QC的时候,开关切换至自检正弦波接入端,从而使地震采集ADC直接采集自检评价信号;反之则接入到检波器的模拟匹配网络上,实现对地震波的直接采集。

为了获得水下电路运行各状态参数的信息,以实现对该仪器运行质量的评价,在水下电路中设置了温度传感器芯片以及压力传感器、拉力传感器模块,可以实时获取水下电路工作时的温度、拉力、电压电流以及压力,压力值可以直接换算成电缆沉放的深度信息。

水下电路各个电子学芯片由可编程逻辑阵列器件FPGA进行控制和数据处理,通过数字电路逻辑的编写实现对各个芯片接口的控制和数据的读出。

### 3 系统运行质量控制设计

为确保物探数据采集仪器系统级的运行稳定可靠,除水下拖缆外,还需要考虑系统运行的质量控制,为此需要在室内系统中增加质量控制的各个功能模块。总体来说,围绕质量控制的需求,在室内采集箱体以及仪器操控软件系统内部,实现了如图3所示的质量控制方法。

在图3中,各类质量控制的数据源,包括水下数据、记

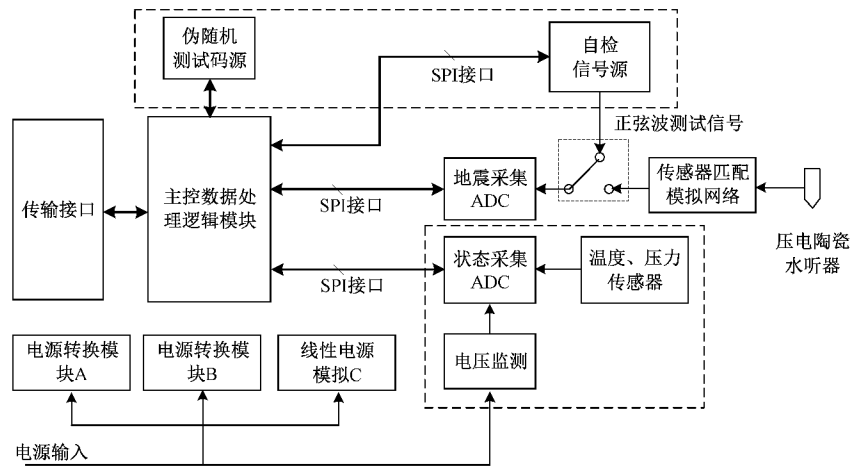


图 2 水下数据采集质量控制结构

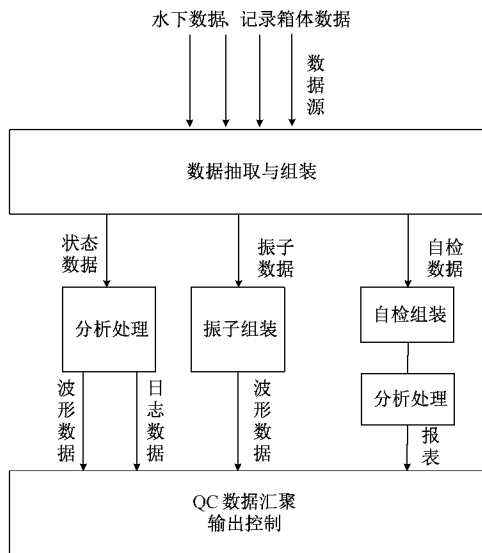


图 3 系统运行质量控制结构

录箱体数据等,首先送至数据抽取与组装模块,以实现对这些数据源的分类控制和格式组装,并重新输出为 3 类数据形式,即状态数据、振子数据和自检数据。其中,状态数据用于实现仪器运行过程中各种质量控制数据的实时监控与显示;振子数据则是通过对水下上传的采集通道实际地震波形数据进行抽样处理<sup>[12]</sup>,以获得对采集通道健康状况的评估。

图 3 中的第 3 类数据是自检数据,这是由采集电路采集到的图 3 中的自检信号源所产生的高品质模拟信号,从而可以实现对采集信号性能的评价。质量控制系统数据抽取与组装模块提取出该部分自检数据后会专门组装后送至分析处理模块,从而获得仪器性能指标的评价,最终形成质量控制报表输出。这些分析包括上文提到的各类采集指标<sup>[13]</sup>,如动态范围、信噪比、总谐波失真等。

#### 4 测试与验证

为了验证本文所研究的质量控制方法,对自检数据

源、系统工作等进行了综合测试。为了实现质量控制完整的功能和流程控制,研制了相应的软件系统,可以通过它对整个仪器的工作过程及质量控制选项进行选择,从而使整个仪器按照配置的参数和选项进行工作,产生相应的激励信号,并完成整个信号的采集和性能指标分析的过程。

为评价采集性能指标,根据国际地球物理学会议器标准,地震仪器概述及其指标分析,需要产生高品质模拟正弦波信号的测试源。为此,采用了 TI 公司的 DAC1282 芯片<sup>[14]</sup>,其是一款全集成数模转换器(DAC),内部集成了 1 个数字信号生成器,1 个 DAC 和 1 个可生成可提供低失真正弦波、直流和脉冲输出电压的输出放大器。输出频率可编程范围为 0.5~250 Hz,并且增益由模拟和数字控制进行计算。模拟增益和数字增益分别可在 6 dB 步长和 0.5 dB 步长内调节。DAC1282 的脉冲输出振幅可由用户进行编程,然后由引脚做出选择并进行精确计时。该芯片提供的高品质数字合成电压输出,适合于测震设备的测试。因此,利用该芯片可以创建一个满足地震数据采集设备严格要求的测量系统,用以评测其高性能  $\Delta\Sigma$  类型的 ADC,其总谐波失真可达 -125 dB,信噪比可达 120 dB。具体测试时,利用主控处理模块,通过 SPI 总线接口控制 DAC1282 产生频率为 31.25 Hz、幅度为 -0.1 dBFS 的高品质正弦波作为自检信号源,并通过协议控制图 2 中的模拟开关,进一步将该自检信号送至地震采集 ADC 的输入端,使待检测的地震数据采集仪器此时仅采集自检评测信号而非水听器接受的外部信号,最终采集到的数据通过 RS232 串口(波特率设置为 115 200 bit/s)传输至上位机,测试方案如图 4 所示。结合地震数据采集系统谐波畸变测试方法<sup>[13-16]</sup>,在上位机上面完成对数据的接受和性能分析,从而得到频谱图如图 5 所示,可见总谐波失真 THD 达到 -127.29 dB。

带宽测试结果显示其低切频率为 2 Hz@1 kSPS,高切频率为 400 Hz@1 kSPS,如图 6 所示。

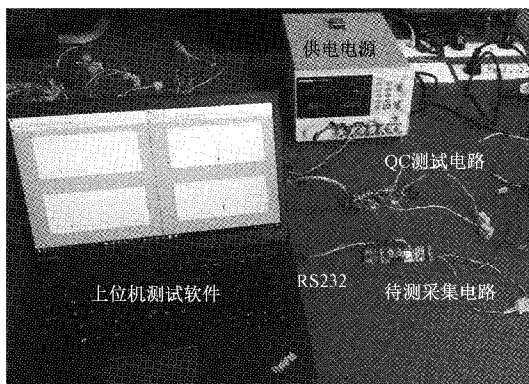
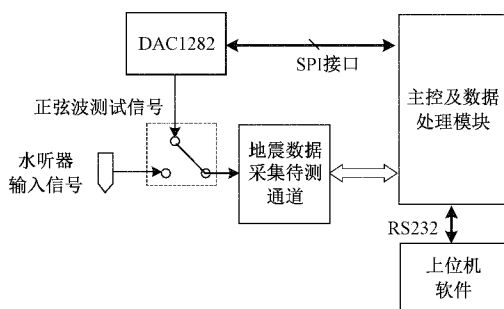


图4 质量控制测试方案(上图)及测试现场(下图)

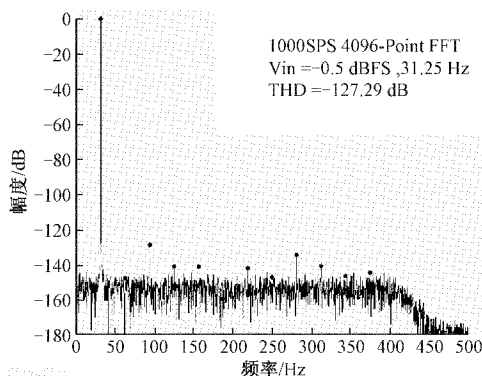


图5 采集信号频谱图

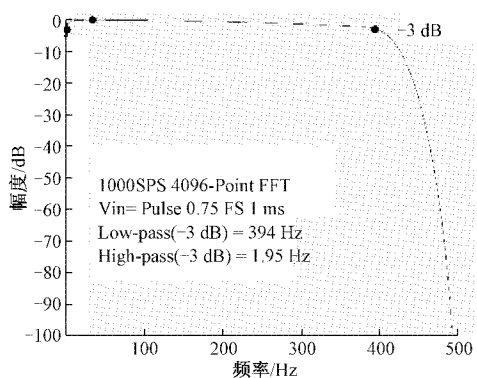


图6 带宽测试结果

为了完整评价本文所设计的质量控制方法在海上油气地震勘探数据采集仪器的实际应用效果,在我国自主研

制海上深水地震拖缆数据采集仪器的过程中,将该方法用于其性能质量控制,并开展了大量的海上试验测试工作。图7是经过本文所研究质量控制方法实测评价过的拖缆采集装备在海上采集到的数据。可见,仪器能够完全有效地采集到高品质合格地震数据,达到了研究和设计目标。

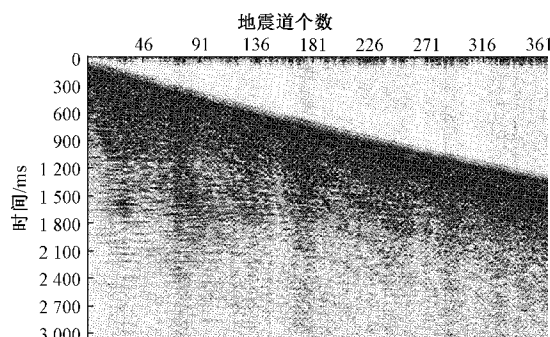


图7 海上测试采集到的地震数据

### 5 结 论

海洋物探装备是一套极其复杂的高精密仪器系统,其作业过程中会产生数量和种类繁多数据流,如何实现对整个仪器的可靠质量控制,直接关系到仪器研制的成败和地震采集资料的品质。本文针对海洋地震勘探仪器的特点,提出用于此类仪器的质量控制方法,并基于此给出一种独立于数据采集仪器的质量控制系统总体架构和核心模块实现方法。本文所设计的质量控制方法及实现由软硬件协调工作运行,可以实现对于超大规模深水油气地震勘探拖缆数据采集仪器的运维监控,从而确保数据采集的品质,极大地降低了勘探作业的风险。长期的实验室测试和海上作业的结果均表明了本方法的正确性、有效性和可用性。本文方法同样适用于其它如数据采集、物联网等领域对于仪器质量控制有严格要求的应用场合。

### 参考文献

- [1] 王守君, 吴秋云, 朱耀强, 等. 海上单检波器高密度拖缆地震采集系统技术特点与测试效果[J]. 中国海上油气, 2012, 24(6):6-11.
- [2] 曾翔, 阮福明, 曹平, 等. 大型多通道海洋地震勘探系统的同步采集方法研究[C]. 中国石油学会物探技术研讨会, 2012, 2(3):360-364.
- [3] 李国昌, 刘章平. 地震采集仪器的采集质量控制过程探讨[J]. 江汉石油职工大学学报, 2016, 29(5):5-7.
- [4] 王增波, 黄少卿, 尚民强, 等. 深海拖缆地震数据采集实时质量控制[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(S1):9-14,4.
- [5] 韦秀波. 拖缆地震数据采集实时质量控制系统的开发与应用[J]. 长江大学学报(自科版), 2015(12):28-31.
- [6] 胡婷婷. 海上高精度拖缆地震采集系统质量控制与记

- 录软件设计与实现[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2009.
- [7] 周杰. 海上地震勘探多缆采集系统主控软件研究与设计[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2010.
- [8] 杨午阳, 魏新建, 何欣, 等. 地震野外采集质量监控软件系统 V2.0[J]. 石油科技论坛, 2016, 35(S1): 1-4, 237.
- [9] 罗福龙. 地震仪器概述及其指标分析(一)[J]. 物探装备, 2004, 14(3): 204-204.
- [10] 冯宏. 24位移道遥测数字地震仪的技术指标年, 月检[J]. 地学仪器, 1997(1): 19-19.
- [11] 束礼宝, 宋克柱, 王砚方. 伪随机数发生器的FPGA实现与研究[J]. 电路与系统学报, 2003, 8(3): 121-124.
- [12] 孙哲, 王梅生, 王建锋, 等. 地震采集异常道实时监控技术与应用[J]. 石油管材与仪器, 2017, 3(2): 67-72.
- [13] 叶卸良. 遥测地震数据采集系统性能指标分析与计算[J]. 物探装备, 1996(1): 10-17.
- [14] 李建良, 王亚伟, 苏晓剑, 等. 差分式地震检波器测试仪的失真度测试研究[J]. 自动化仪表, 2017, 38(6): 93-96, 103.
- [15] 郝小柱, 伍忠良, 王伟巍. 高频海底地震仪性能检测[J]. 热带海洋学报, 2015, 34(4): 54-58.
- [16] 刘益成, 易碧金, 罗福龙. 地震数据采集系统谐波畸变测试方法研究[J]. 石油物探, 2006(4): 7, 110-113.

### 作者简介

黄龙君, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋地球物探勘探装备研制与产业化研究。

E-mail: huanglj6@cosl.com.cn