

doi: 10.11720/wyht.2022.1462

岩巍.地震勘探节点采集系统设计的要点[J].物探与化探,2022,46(3):570-575.http://doi.org/10.11720/wyht.2022.1462

Yan W.Key points of the design of a nodal acquisition system for seismic exploration[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(3):570-575.http://doi.org/10.11720/wyht.2022.1462

地震勘探节点采集系统设计的要点

岩 巍

(中国石油东方地球物理勘探有限责任公司,河北 涿州 072750)

摘要: 为了对应长期低油价形势,地震勘探采集成本不断降低,同时为了满足越来越严格的环保要求,节点采集设备凭借其低成本、低采集脚印等优势不断推广。节点仪器的设计制造入门门槛偏低。市场上部分产品出于设计或成本等方面的考虑,在一些细节方面的缺失或忽视会造成地震勘探采集作业现场应用的困难。本文结合多年地震勘探设备使用经验,以及当前市场常见节点特性分析,在信号采集、测试功能、电路设计、存储、电池、外形、配套系统、质量控制及配套设备几个方面节点设计需要注意的细节进行阐述。避免由于设计原因出现信号采集的失真、耦合、EMC 等问题。节点设备的采集质量完全依靠每一个节点设备在本地的独立工作性能和工作稳定性。而这两方面完全依靠厂家对于地震勘探采集信号和采集作业的理解,进而产生的设计。设计必须考虑为满足新形势下油气勘探开发需要,油气勘探开发重心不断向深层—超深层、强复杂地表更复杂领域转移,当前地震勘探采集更多地关注深层,要求对于信号拾取高精度、高分辨率,因此也就更需要提高对于弱信号、宽频信号的采集能力。

关键词: 节点仪器;EMC;电路设计

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)03-0570-06

0 引言

2010 年,国内在引进 Firefly 无线(节点)仪器后,甲方油田公司逐渐开始接受非实时数据回传,事后下载的地震数据采集模式。至 2020 年,地震勘探采集行业已加速进入“节点”时代^[1],目前国内陆上应用超过 5 万道的节点仪器已经有中石油 BGP 公司的 eSeis、INOVA 公司的 Quantum、SmartSolo 公司的 IGU、中石化的 I-Nodal、瑞星远畅的 Hardvox 等,还有在国际、国内曾经规模化应用过的 Firefly、Hawk、UNITE、WTU508、WiNG、NuSeis、AutoSeis、Zland、GSR 系列、FlexSeis 系列等节点产品^[2]。各个厂家的产品都凭借各自特点被地震勘探采集服务商所关注和选用,节点采集设备的设计制造已经形成百花齐放的状态。

有线采集设备在设计时需要掌握的关键技术包括:实时传输地震数据,保证设备时序同步,控制命令的下发,进行实时的数据处理、质量控制等工作。

客观地说,与有线仪器相比节点的设计制造入门门槛偏低^[3],最基本模块包括:控制器、采集电路、GNSS (global navigation satellite system,全球导航卫星系统)、授时电路、检波器、电池、接口、下载柜、数据下载合成服务器;选装测试电路、信号发生器、质量控制手簿等^[4]。以上模块都有成熟的供应链提供,厂家更多的精力在于如何将上述模块有机组合成为能够稳定工作、满足地震勘探信号采集需求的产品。但基于设计或成本等方面的考虑,市场上部分产品的某些细节会造成地震勘探采集作业现场应用的困难,如为了保证 GPS 信号稳定,采用额外纽扣电池为定位授时模块供电,增加了故障点;充电接口插针带低压电,造成电化学腐蚀等。

必须承认,节点设备的大规模应用某种程度上是对地震勘探采集作业施工成本的妥协。虽然节点设备在 24 h 连续记录数据、观测系统可随时变更、设备独立工作故障不相互影响等方面对于地震勘探效果提升有一定帮助^[5],但目前最先进的有线采集仪器理论上已经能够实时进行百万道实时采集处

收稿日期:2021-08-20;修回日期:2022-04-01

基金项目:东方地球物理公司局级项目“eSeis 节点仪器高效作业技术与保障能力提升研究”(02-02-2021)

第一作者:岩巍(1983-),高级工程师,主要从事地震勘探采集设备技术与管理相关工作。Email:79972245@qq.com.cn

理,施工中已经应用到 20 万道超级排列实时采集,设备自动机械化收放、故障点数据实时路由回传等功能,远远超过当前地震勘探采集施工设计需求^[3]。除了对于采集脚印有严格限制的地区,市场对于节点设备节省重量、节约人力等优点的认可,相对于有线仪器的数据实时回传、实时质控、实时现场处理等优势取舍的结果,更多出于施工作业成本方面而非采集数据质量方面进行权衡^[1]。

设计厂家理解和关注点不同,制造的节点功能和性能偏重也不一样。当前节点设计制造厂家根据自身产品的功能定位,不同程度地对功能、性能进行“优化组合”,以适应市场对于节点的低成本需求。部分厂家如 DTCC 依据其 SmartSolo 产品的工作高度稳定性,提出对于现场质量控制功能的必要性讨论;部分厂家如 magseisfairfield 依靠外部手簿进行 Zland 节点理论桩号记录,仅取用低成本 GNSS 芯片的授时功能;还有部分厂家如 Stryde 根据真实环境干扰提出了对于内部噪声、动态范围等指标的“优化”,对于检波器、采样间隔、模数芯片的“优选”,提出超低成本节点设备。下面依照个人对于地震勘探信号采集和现场施工作业需求的理解,结合市面上常见的一些节点问题,提出在今后节点采集设备(内置或外接模拟检波器)设计的一些需求和建议,供广大技术人员参考。

1 信号采集方面

1.1 采集通道指标

依照 SY/T 5391—2018《石油地震数据采集系统通用技术规范》标准^[6],地震勘探采集仪器通过

几个指标体现其对地震信号采集的能力:①采样间隔,主要影响能够采集的频率范围,行业内常用的包括 0.25、0.5、1、2、4 ms。②前放增益,对应能够采集的信号范围,行业内常用的包括 0、6、12、18、24、30、36 dB。③动态范围,同样影响能够采集的有效信号范围,为某档前放增益下能够识别的最大输入信号和最小系统噪声的比值。④共模抑制比,体现系统对于共模信号的抑制能力。⑤总谐波畸变,体现信号采集的精度。⑥等效输入噪声,可以简单理解为系统的热噪声,体现系统能够识别的最小信号,能量(幅值)低于等效输入噪声的信号没有应用价值。

行业表中规定的上述除等效输入噪声外的指标参见表 1,等效输入噪声指标参见表 2。表格中地震数据采集系统的功能、特性或技术指标满足常规地球物理勘探需求的用 C 级表示,满足当前高端地球物理需求的用 B 级表示,满足未来 5~10 年地球物理勘探发展需求的用 A 级表示。

市场上的节点设备大多采用 TI(TEXAS instruments,德州仪器)公司的 AD1282、AD1283、AD1284 系列模数转换芯片,或采用基于地震勘探专用 MEMS(micro machined electro mechanical system,微机电系统)芯片的纯数字采集系统^[7],如图 1,以上指标基本都能够满足行业标准要求。需要注意的是,地震信号采集需要评估整个系统设备对信号的采集能力,而非芯片的采集能力。由于电路设计、EMC 性能等原因,节点系统的采集能力大多数无法完全体现芯片的性能。而厂家的宣传手册大多直接列举采用 AD 芯片的信号采集能力。因此在节点设备设计和定型时,还应利用高精度标准信号源进行测试,验证其实际性能^[8]。

表 1 地震仪器工作方式和参数

Table 1 Working mode and parameters of seismic instruments

项目	技术指标		
	A 级	B 级	C 级
采样间隔/ms	按照用户需求计算确定	0.25,0.5,1,2,4	0.5,1,2
前放增益/dB	按照用户需求计算确定	0,12,24 和 36 中至少有三档	0,12,24 和 36 中至少有两档
道增益一致性	≤0.5%	≤1.0%	≤3.0%
共模抑制比	≥120 dB	≥100 dB	≥80 dB
总谐波畸变	≤0.0001%	≤0.0005%	≤0.001%
动态范围	≥120 dB	≥110 dB	≥95 dB

1.2 同步技术指标

同步分为两方面,一方面是激发采集之间的同步,另外一方面是采集设备之间的同步,也可称为一致性。第一方面属于源激发同步系统的范畴,影响第二方面的在于节点的授时机制。市场上绝大多数

节点都采用 GNSS 授时,因此在宣传手册中标称的同步精度多为 GNSS 芯片的授时精度^[9],完全满足大多数同步激发系统 50 μs 的精度范围。但节点在实际工作期间为了降低功耗、提高系统稳定性、减少电磁干扰等原因大多采用 GNSS 芯片周期性开机校

表 2 地震仪器等效输入噪声

Table 2 Equivalent input noise of seismic instruments

采样间隔/ms 前放增益/dB		最大等效输入噪声/ μV		
		A 级	B 级	C 级
0.25	0	≤ 5	≤ 20	≤ 60
	12	≤ 1	≤ 5	≤ 15
	24	≤ 0.4	≤ 1.3	≤ 4
	36	≤ 0.1	≤ 0.5	≤ 1
0.5	0	≤ 0.8	≤ 3	≤ 3
	12	≤ 0.2	≤ 0.8	≤ 1.5
	24	≤ 0.1	≤ 0.35	≤ 0.6
	36	≤ 0.06	≤ 0.3	≤ 0.5
1	0	≤ 0.5	≤ 2	≤ 3
	12	≤ 0.15	≤ 0.6	≤ 0.75
	24	≤ 0.05	≤ 0.2	≤ 0.36
	36	≤ 0.04	≤ 0.15	≤ 0.3
2	0	≤ 0.4	≤ 1.5	≤ 1.6
	12	≤ 0.1	≤ 0.4	≤ 0.45
	24	≤ 0.05	≤ 0.2	≤ 0.25
	36	≤ 0.04	≤ 0.13	≤ 0.22
4	0	≤ 0.5	≤ 1	≤ 1.5
	12	≤ 0.07	≤ 0.3	≤ 0.4
	24	≤ 0.04	≤ 0.15	≤ 0.2
	36	≤ 0.03	≤ 0.1	≤ 0.15

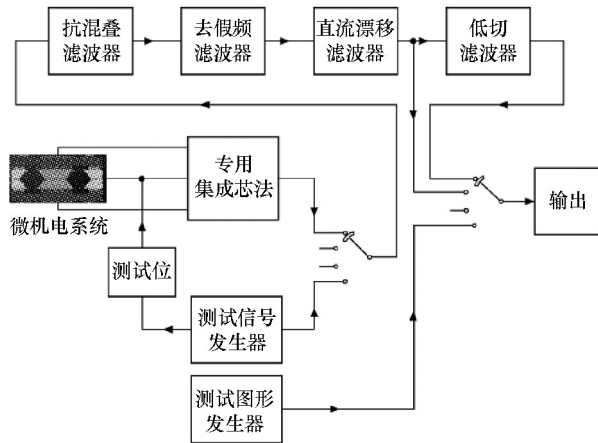


图 1 基于 MEMS 的数字采集设备原理

Fig.1 MEMS based digital seismic instrument

时的方式^[10-11],而在未开机的周期系统精度完全依靠节点系统内部晶振,因此节点设计时需要考虑校时周期对于功耗的影响,或者保证数据同步质量的前提下权衡晶振价格与功耗、电池、体积、重量的成本关系。此外还应考虑对于校时后漂移的数据是否进行了无效数据标识,或者专门开发算法进行校验还原。

2 测试功能方面

节点设备应具有对设备本身工作性能进行测试和判断的功能,一般包括:内部通道测试和检波器测

试^[8]。

2.1 内部通道测试

内部通道测试一般使用已知的模拟信号输入采集通道,由节点的采集通道进行采集,再将采集的结果与已知信号源特性从多个方面进行比较,评价其相频、幅频等特性。其中常见内部通道测试的项目见 1.1。在节点设计时根据成本、工作稳定性等因素综合评估采取节点中内置信号源或通过专门的测试设备外接信号源进行测试。

此处需特别考虑信号源接入采集通过程中的 EMC 设计,避免标准信号在传输过程中的失真,进而影响评价结果。通道测试直接反映采集通路性能,因此在相同环境下测试结果应稳定。

2.2 检波器测试

检波器测试指对连接的模拟检波器工作性能的评估。一般采用外部输入脉冲信号驱动检波器磁芯偏离平衡位置,通过采集通道采集由磁芯自由落体和反复震动过程中产生电势差,对比该类型检波器的期望值进行评价。

作为节点设备应能够测试所连接检波器的电阻、通过一定算法验证检波器的倾斜状态。特别是模拟检波器的倾斜状态极大地影响地震信号采集能力,是现场质量控制必不可少的评价项目。

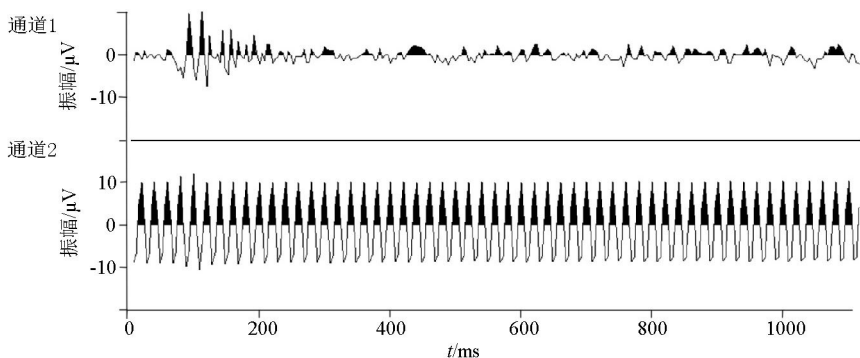
3 电路设计

3.1 屏蔽设计

节点设备在工作中,为了最大程度降低功耗,部分器件会采用间歇式工作状态。因此在设计时必须考虑不同模块在启动时电流变化带来磁场的变化在导体上产生的感应电势。磁缸内线圈,检波器连接线等在高度集中的节点内部都容易受其影响,产生的感应电动势直接接入采集通路,影响地震资料。此外,具备无线通讯功能的节点内部还带有天线,在发射通讯过程中更容易产生感应信号。因此,节点设备设计时必须考虑采集通道的电磁屏蔽,如图 2,作为信号采集设备在这部分任何缺失都是舍本逐末。

3.2 连接器、电线及内部结构

节点设备内部电路中应尽量减少接插件连接而尽量采用 PCB 插排或焊接。首先,野外工作环境恶劣,搬卸震动易造成连接器松动磨损,带来额外故障点;其次,过多的连线在节点设备中不仅带来额外线损,连线间的挤压碰撞也会带来额外的震动,特别是近炮点激发时连线间谐振可能直接被检波器采集进

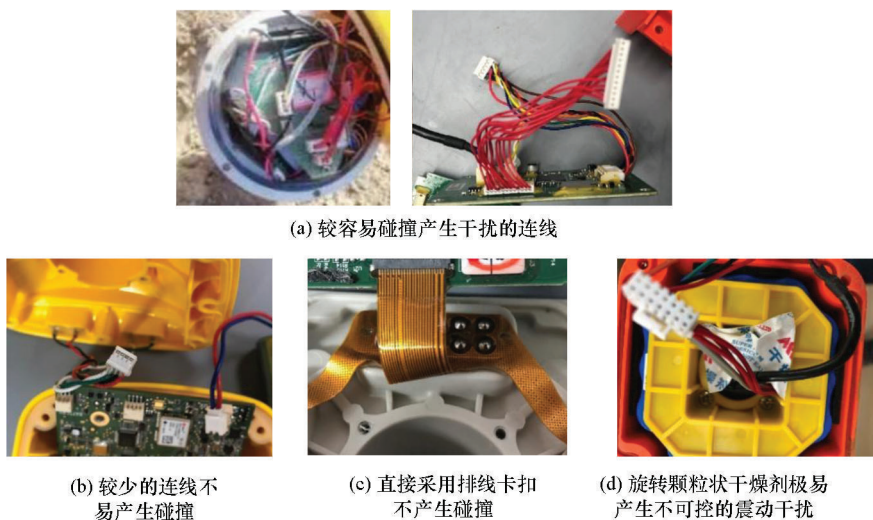


通道 1—对检波器磁缸屏蔽;通道 2——未对检波器磁缸屏蔽

Channel No.1—geophone with magnetic cylinder shield; Channel No.2—geophone without magnetic cylinder shield

图 2 高压线下相同位置同时间两个通道采集的记录

Fig.2 Records collected by two channels at the same position and time under the high-voltage line



(a) 较容易碰撞产生干扰的连线

(b) 较少的连线不易产生碰撞

(c) 直接采用排线卡扣不产生碰撞

(d) 旋转颗粒状干燥剂极易产生不可控的震动干扰

图 3 各种节点内部排线和防潮示例

Fig.3 Examples of wiring and moisture-proof

而影响有效信号,如图 3;再次,更多的连线也更容易感应外部电磁干扰。

3.3 功耗及续航

节点电路设计应考虑在不同状况,特别是在极寒地区下电池输入能力下降后的续航时间。通过各模块周期性启停、电路板优化、原器件优选等方式降低功耗,保障地震勘探采集作业的持续性。

3.4 接地

节点电路接地时一定考虑雷击、高压线等能量可能串入电路造成的设备损坏。设计时避免数字地线与模拟地线共用,特别注意要与屏蔽地线分离设计。

4 存储设计、电池、外形等

4.1 存储设计

节点设备存储大小应匹配电池工作时间。此外

需结合工作逻辑设计合适的数据滚入、滚出原则,避免造成设备无法回收(工农扣押),但持续采集造成有效数据被无效数据覆盖;或设备在正常工作过程中存储满无法采集地震数据的事故发生。

4.2 电池

节点设备电池应结合地震勘探实际工作环境进行选择,如地震勘探作业在俄罗斯、内蒙古自治区等探区可达到 -40°C 左右,在中东、新疆维吾尔自治区等探区可达到 70°C 。电池应在此温度范围内工作性能衰减可控,并保证日常存储、满电状态下颠簸运输安全,并具备基本的抗碾压防护设计。

此外依照多年地震勘探项目编排,节点设备电池和电路设计应具备较低的自放电水平,至少应保持3~4个月的存储免维护。

4.3 外形设计

节点外形设计最容易忽视,但外形其实影响着节点的采集能力,工作稳定性等方面。如外接检波

器式节点设计不当容易造成放置不稳,丢失 GPS 信号中断采集;而一体式节点外形设计应考虑检波器与节点外壳的耦合,特别应考虑在不同地形下,外壳对地面的耦合,尤其当前地震勘探推崇“体耦合”概念,如何真实地拾取地面震动信号,耦合状态至关重要。部分节点站体形状方正巨大,尾椎与站体半径

差大,特别容易形成空洞,在地表砂石向空洞塌陷时影响地震信号,如图 4。

节点外形还应考虑日常搬运,装卸过程中的震动方向,由此合理铺设电路板方向,结合对电路板合理的固定、抗震设计减少震动带来的无谓损坏。



图 4 几种节点的耦合部分设计

Fig.4 Examples of coupling parts

4.4 配套系统

节点设备的下载、合成效率应匹配日常地震队生产设备收发周期^[12]。以西北某应用 8 万道三维超级地震队为例,大多为 1 周左右排列翻滚一个周期。配套此类地震队的节点下载、合成系统应具备 24 h 内下载、测试(包括装卸时间)1 万道;合成单炮 40 000 道@ 1ms、10s 采样长度的 1 500 炮的工作效率,即每日需下载 25 TB 新数据,处理 176 TB 原始数据,生成 2.2 TB 单炮数据。还需配套能够对整个工区原始数据进行备份的存储设备。

4.5 质量控制及其他配套设备

当前节点设计大多采用三防手簿安装配套控制软件实现设备启停、现场测试、测试数据回收,部分节点还具备地震数据回收功能,部分节点舍弃定位功能还依靠手簿记录节点放置的实际坐标^[13]。此类配套设备设计中应充分考虑节点设备的工作逻辑,具备一定防呆设计,防止因为误操作造成节点设备进入休眠、循环测试等无法采集的状态。

5 总结

在当前经济形势不明朗、油价持续走低的市场形式下,由于相同的勘探投资可以获得更大面积的

勘探资料,或者对同样区块的勘探投入可以不断压低或者面对同样区块的单位面积勘探投资不断降低等经济方面原因,引导采集设备技术发展方向显得尤为重要。节点设备相对于有线设备质量或体积节省来源于没有线缆;相对最大的功能缺失,在于实时数据回传(质控)。因此节点设备的采集质量完全依靠每一个节点设备在本地的工作性能和工作稳定性。而这两方面完全依靠厂家对地震勘探采集信号和采集作业的理解,进而产生的设计。但归根结底其设计一定要考虑为满足新形势下油气勘探开发需要,油气勘探开发重心不断向深层—超深层、强复杂地表更复杂领域转移,要求对信号拾取高精度、高分辨率,因此也就更需要提升对弱信号、宽频信号的采集能力,这方面的性能在设计中是不能妥协的。

参考文献 (References):

- [1] 易碧金,袁宗军,甘志强,等.浅谈节点地震仪器原理及一体化采集站设计要点[J].物探装备,2021,31(6):351-355,360.
Yi B J, Yuan Z J, Gan Z Q, et al. Introduction to the principle of node seismic instruments and the design points of integrated acquisition stations[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2021, 31(6):351-355,360.
- [2] 施继承,史子乐,黄艳林,等.全球陆上节点地震数据采集设备现状与市场需求分析[J].物探装备 2019,29(1):5-9.
Shi J C, Shi Z L, Huang Y L, et al. The status and development

- trend of the global land nodal system[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2019, 29(1):5-9.
- [3] 夏颖,刘卫平,甘志强,等.节点仪器面临的挑战与发展趋势[J]. *物探装备*, 2017, 27(5):281-284.
Xia Y, Liu W P, Gan Z Q, et al. Challenges and development trend of node instruments[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2017, 27(5): 281-284.
- [4] 易碧金,穆群英,王苏华,等.无线技术在地震仪器中的应用及展望[J]. *石油管材与仪器*, 2015, 1(6):16-20.
Yi B J, Mu Q Y, Wang S H, et al. Application and prospect of wireless technology in seismic instruments[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2015, 1(6):16-20.
- [5] 易碧金,穆群英,岩巍,等.地震勘探仪器发展的机遇、挑战及研发分析与展望[J]. *物探装备*, 2016, 26(6):351-357.
Yi B J, Mu Q Y, Yan W, et al. Looking forward to seismic data acquisition system and its technologies[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2016, 26(6): 351-357.
- [6] 国家能源局.石油地震数据采集系统通用技术规范[S]. 中华人民共和国石油天然气行业标准, SY/T 5391—2018.
National Energy Administration. General technical specification of the petroleum seismic data acquisition system[S]. *Petroleum and Natural Gas Industry Standards of the People's Republic of China*, SY/T 5391—2018.
- [7] 岩巍,李铮铮,李正冉,等. AccuSeis SL11 数字检波器工作及测试原理[J]. *物探装备*, 2019, 29(4):214-217.
Yan W, Li Z Z, Li Z R, et al. Working and testing principle of AccuSeis SL11 digital geophone[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2019, 29(4) 214-217.
- [8] 易碧金,仲明惟,郭延伟,等.地震仪器性能指标对高精度勘探的影响[J]. *石油管材与仪器*, 2020, 3(6):51-54.
Yi B J, Zhong M W, Guo Y W, et al. The influence of seismic instrument performance indices on high precision exploration[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2020, 3(6):51-54.
- [9] 陈联青,贾艳芳,顾兴莉. GPS 授时(网络)地震仪[J]. *物探装备*, 2006, 16(S):1-7.
Chen L Q, Jia Y F, Gu X L. GPS clock (network) seismograph[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2006, 16(S): 1-7.
- [10] 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司. 井炮源激发同步系统的检验、使用与维护[S]. 东方地球物理勘探有限责任公司企业标准, Q/SY BGP K2740-2020.
BGP, CNPC. Tset. Usage and maintenance for dynamite synchronization system[S]. Q/SY BGP K2740-2020
- [11] 岩巍,陈洪斌,崔红英,等. 基于时间槽分隔的井炮独立激发节点仪器采集技术及质控方法讨论[J]. *物探装备*, 2020, 30(1):1-4.
Yan W, Chen H B, Cui H Y, et al. Acquisition technology of independent source control based on time slot[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2020, 30(1):1-4.
- [12] 岩巍,夏颖,朱萍. Hawk 节点仪器井炮作业优化[J]. *物探装备*, 2016, 26(4) 226-228.
Yan W, Xia Y, Zhu P. Operation optimization for node instrument[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2016, 26(4) 226-228.
- [13] 夏颖,周德茂,王艳,等. GPS 技术在地震勘探仪器中的应用及发展[J]. *物探装备* 2010, 20(2):78-82.
Xia Y, Zhou D M, Wang Y, et al. The application and development of GPS technology in seismic exploration instrument[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2010, 20(2):78-82.

Key points of the design of a nodal acquisition system for seismic exploration

YAN Wei

(Equipment Service Department, BGP Inc., China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072750, China)

Abstract: The requirements for the design and manufacturing of nodal devices are relatively low. The most basic modules of a nodal device include controllers, acquisition circuits, GNSS timing circuits, geophones, batteries, interfaces, downloading cabinets, data downloading & compositing servers, optional testing circuits, signal generators, and QC manuals. As mature supply chains are available for all the above modules, manufacturers pay more attention to organically integrating the above modules into products that can stably work and meet the needs for the signal acquisition of seismic exploration. However, the absence or neglect of some details in some products on the market due to design or cost considerations will cause difficulties in the field application of seismic data acquisition. The data acquisition quality of the nodal devices relies entirely on the independent performance and stability of each nodal device, which further rely entirely on the manufacturers' understanding of signal acquisition for seismic exploration and data acquisition operations and the resultant design. The requirements of oil and gas exploration and development in new situations must be considered in the design of nodal devices. The focus of oil and gas exploration and development is constantly shifting to deep and ultra-deep parts with more complex ground surfaces, and thus high precision and resolution are required for signal pickup. As a result, nodal devices should be more capable of acquiring weak signals and broadband signals, which cannot be compromised in the design. This paper elaborates on the fundamental details of signal acquisition, test functions, circuit design, storage, batteries, profile, auxiliary systems, quality control, and auxiliary devices in order to avoid problems such as signal distortion, coupling, and EMC.

Key words: nodal device; EMC; circuit design

(本文编辑:王萌)