

doi: 10.11720/wtyht.2022.1461

吴雯,王猛,杨迪琨,等.页岩气水力压裂分布式微弱电场监测技术初探[J].物探与化探,2022,46(3):557-562.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1461

Wu W, Wang M, Yang D K, et al. Preliminary exploration into the monitoring technology for distributed weak electric field during hydraulic fracturing for shale gas extraction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 557-562. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1461

页岩气水力压裂分布式微弱电场监测技术初探

吴雯¹, 王猛^{1,2}, 杨迪琨³, 陈默¹, 任林彬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. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 南方科技大学地球与空间科学系, 广东深圳 518055)

摘要: 页岩气水力压裂过程中,在远区开展人工源电磁场激励或在自身地电场的激励下,压裂液的注入、返排、滞留和吸收等过程将引起电场的改变,在压裂区上方通过监测微弱电场变化的方法可以反映压裂信息随时间的变化情况。为了满足压裂现场实时监测的需要,本文基于分布式微弱电场节点采集设备开展了监测技术初探。该监测系统仅采集水平正交的两路电场信号,监测一定范围内实时变化的电场信息,并将初步处理后的数据以无线的方式传回数据中心。测试结果表明,该监测系统工作性能稳定、待机时间 10 天以上、密封性能好、适用于复杂的野外环境,可为未来获取压裂液运移成像提供重要的技术支持。

关键词: 页岩气水力压裂; 电场采集; 微弱信号调理; 分布式节点采集; 实时监测

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)03-0557-06

0 引言

页岩气作为典型的非常规油气藏,孔隙十分微小,需要通过水力压裂的方法将其从致密的页岩层中挤压出来^[1-4]。随着压裂液的注入,通过在地面监测物理场的变化,间接推断压裂液的走向,为进一步压裂工作提供技术参考。微地震监测是目前使用最广泛的监测方法,该方法可以获取压裂走向和储层改造体积的信息^[5-6],但该方法仅包含岩石破裂的瞬态信息,且裂缝的走向和压裂液的流向并不能完全等同,不能完全反映压裂液的实时运移情况^[7-8]。为了达到扩张、阻垢、稳定、减阻和增加流动性等目的,压裂液中通常大量添加导电性良好的离子,使得压裂液较围岩呈现低阻异常特征,在外加人工场源或自身地电场的激励下,这种电性异常可能被地面分布式的电场采集设备监测到^[9-11],最终可能通过电场数据来获取到微震方法无法获得的压

裂液流向信息。

地震监测领域已经较早使用分布式仪器来获得大量的观测数据,提高解释的准确性^[12-13]。在电磁探测领域,分布式仪器也是近些年的研究热点。国外有德国 Metronix 公司研制的 GMS-06 电磁观测系统、加拿大凤凰公司的 V8 系统、澳大利亚 Mimex 公司的 MIMDAS 系统和加拿大 Quantec Geoscience 公司的 Titan-24 系统等均支持无线组网,分布式阵列布设^[14]。国内有中南大学何继善院士^[15]、吉林大学林君院士^[16]、中国科学院地质与地球物理研究所的底青云院士^[17]、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所林品荣教授^[18]、中国地质大学(北京)金胜教授^[19]等近 10 个团队分别研发了分布式电磁探测系统。这些分布式仪器功能丰富,支持各种电法以及电磁法测量,性能优越,但是大量阵列布设成本较高,也不够便携。

本文设计了一种低成本、小体积、自供电且采用无线传输的分布式微弱电场节点监测系统(简称微

收稿日期: 2021-08-20; 修回日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“页岩气压裂液长电极电磁法高分辨率成像监测方法研究”(41974087)

第一作者: 吴雯(1999-),女,从事地球物理仪器研发相关工作。Email:2010200030@cugb.edu.cn

通讯作者: 王猛(1984-),男,副教授,博导,从事地球物理仪器研发相关工作。Email:wangmeng@cugb.edu.cn

电仪),专门采集水平井段随着压裂液注入、流动而引发的微弱电场变化。大动态输入范围、分布式阵列采集以及多节点数据处理上传是该监测系统要解决的技术难点。

1 压裂微弱电场监测技术总体方案设计

为了全方位监测压裂液的运移情况,类似于可控源音频大地电磁探测方式^[20],在远区开展人工源电磁激励,同时在井口布设密集的电场监测阵列,来提高数据的准确性,所有的监测仪器通过无线数传模块将经过初步处理的采样数据实时传输到上位机,上位机实时显示波形和设备动态云图。图1给出了压裂微弱电场监测示意图。

单个监测装置主要包括电场传感器、采集电路、锂电池组、机械封装和上位机监控等部分,图2给出了监测系统总体结构框图。电场传感器采用传统的不极化电极;采集电路集成有前端信号调理模块、采集控制模块、无线数传模块以及电源转换模块等;采集电路和锂电池组封装到特制的机械外壳中,无需

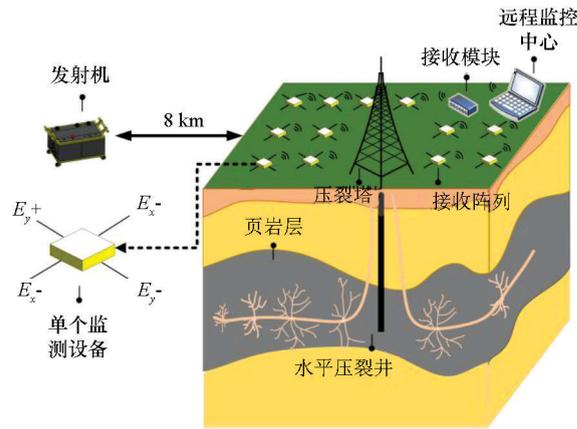


图1 压裂微弱电场监测示意

Fig.1 Schematic diagram of weak electric field monitoring in fracturing

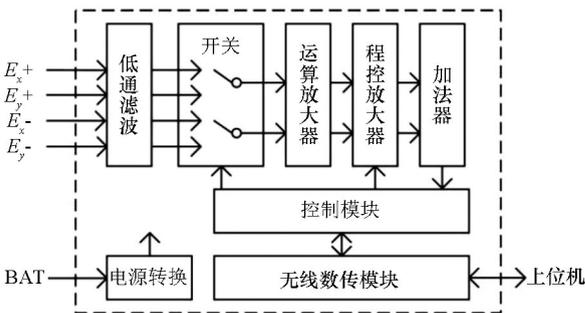


图2 监测系统总体结构框

Fig.2 Overall structure block diagram of monitoring system

外部供电。

1.1 前端模拟信号调理技术

x 方向电场信号调理电路的示意图如图1和3所示, y 方向和 x 方向完全一致。系统选用极差小,性能稳定的固体 $PbCl_2$ 不极化电极作为电场传感器,可以有效抑制微弱信号采集时电极自身的影响^[21-22]。玻璃放电管(SPG)和双向TVS管组成前端防雷电路,避免野外极端天气带来的瞬间高能浪涌脉冲对系统造成破坏性伤害。由于压裂现场工作的用电设备功率均极大,因此在调理电路前端设计二阶低通滤波器(LPF),将截止频率设为25 Hz,以滤除50 Hz工频干扰对采集系统的影响。

第一级运算放大电路选用TI公司的OPA2188芯片,该芯片是一款低噪声、轨对轨、零漂移运算放大器,它具有很高的输入阻抗和共模抑制比,具有2 MHz增益带宽积,出色的直流精度,在采集低频近直流电场信号的情况下,拥有极高的放大上限,作为第一级放大,可以有效降低信号采集系统的噪声干扰。OPA2188芯片搭成三运放差分放大电路的前半部分,高度对称的电路结构可以进一步抑制共模信号,增强对差模信号的放大能力。

为了进一步扩大输入信号的范围,实现放大倍数动态可调。二级放大电路(PGA)选用具有数字可编程增益的零漂移,精密仪表放大器LTC6915,该芯片具有十四级可编程增益,最大增益可达4 096倍。加法器实现调理后的信号和高精度基准电压的相加,使其输出信号满足后续的采集要求。放大倍数实现了从 $1 \sim 10^5$ 可调。总体实测动态范围73 dB。

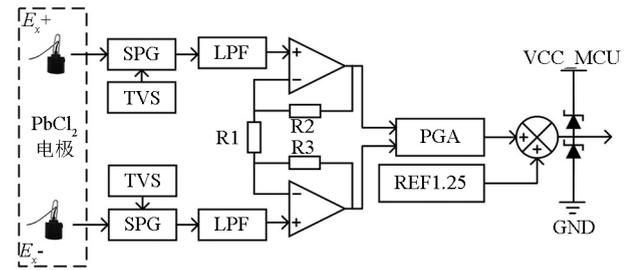


图3 x 方向电场信号调理电路示意

Fig.3 Schematic diagram of x -direction electric field signal conditioning circuit

1.2 分布式微弱电场节点采集技术

控制每个采集单元的成本和大小,以及保证多个节点与主机之间的稳定通信,对于分布式采集仪器来说具有至关重要的意义。论文设计的微电仪在前端加入模拟多路复用器电路,使用单片机控制通道切换,两对差分电场信号共用一套处理电路,缩小

了电路体积和成本。采用 ST(意式半导体)公司的基于 32 位 Cortex-M4 内核的 STM32F373 单片机芯片作为系统的中控芯片。该系列单片机片上资源丰富,集成有多达 3 个 16 位高精度模数转换器(SDAC),数据可以自动存储在 RAM 缓冲区,极大地减少了软件开销,非常适合作为高精度采集系统的处理核心。本监测系统将控制、采集、缓存和上传集中到同一块单片机芯片上,极大地消减了软硬件开销,节省了硬件面积。

整个分布式采集系统采用射频通信方案,配合外部天线在开阔地区最远传输距离可达 1 km。所有的分布式仪器通过射频模块和接收端模块配合使用和 PC 端进行实时通信,上传数据和设备信息,给每个仪器的射频芯片分配不同的信道和地址,防止数据串扰。无线组网模式和传统的线缆传输相比大大节省了布线和收线的时间和人力。最终的核心采集电路板如图 4 所示。

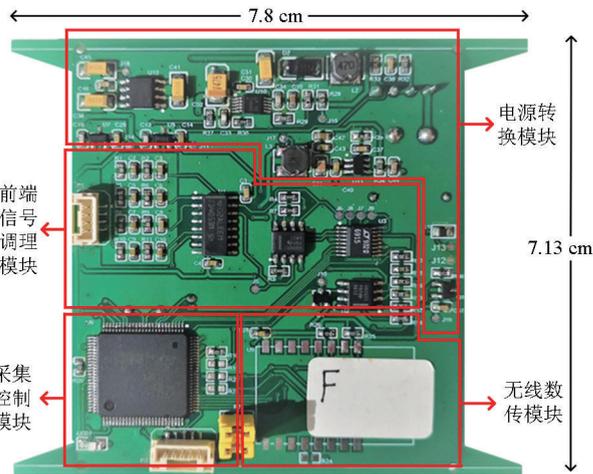


图 4 核心采集电路实物

Fig.4 Physical diagram of core acquisition circuit

机械外壳选用专门定制的铝合金外壳,外部留有电极传感器接口、电源开关、内部锂电池组充电接口和射频天线接口,无需拆卸可以控制内部电路通断,给锂电池组充电。机械封装体积小至 512 cm³,整体重量轻至 500 g,可实现 IP65 级防水,密封性好,可在压裂场地长时间工作,机械外壳实物图如图 5 所示。

1.3 多节点数据处理上传技术

监测系统数据采集处理部分主要包括采集电路的硬件编程和 PC 端的上位机编程。其中硬件编程兼容直流和交流发射方案,对电场数据进行实时采集,分段排序取平均,并将处理后的数据按固定格式传输到上位机,同时上位机实时控制采集增益,图 6 给出了程序框图。

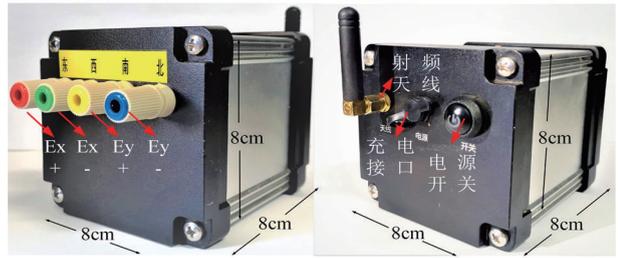


图 5 机械封装正面(左)和背面(右)
Fig.5 Front (left) and back (right) of the mechanical package

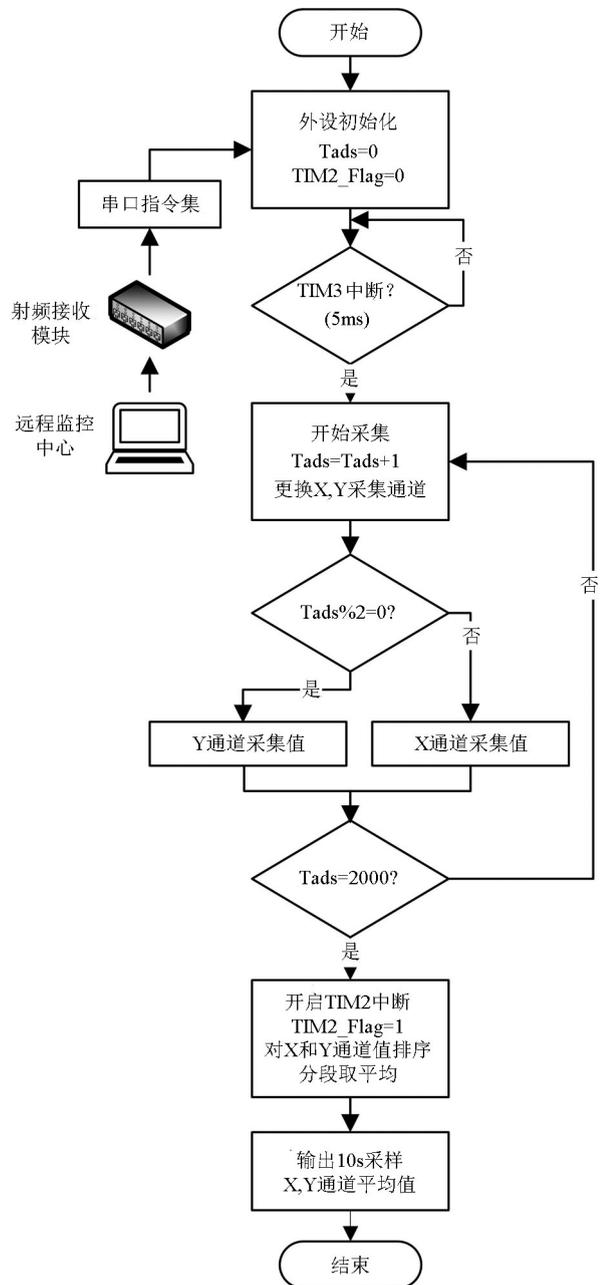


图 6 程序框

Fig.6 Block diagram

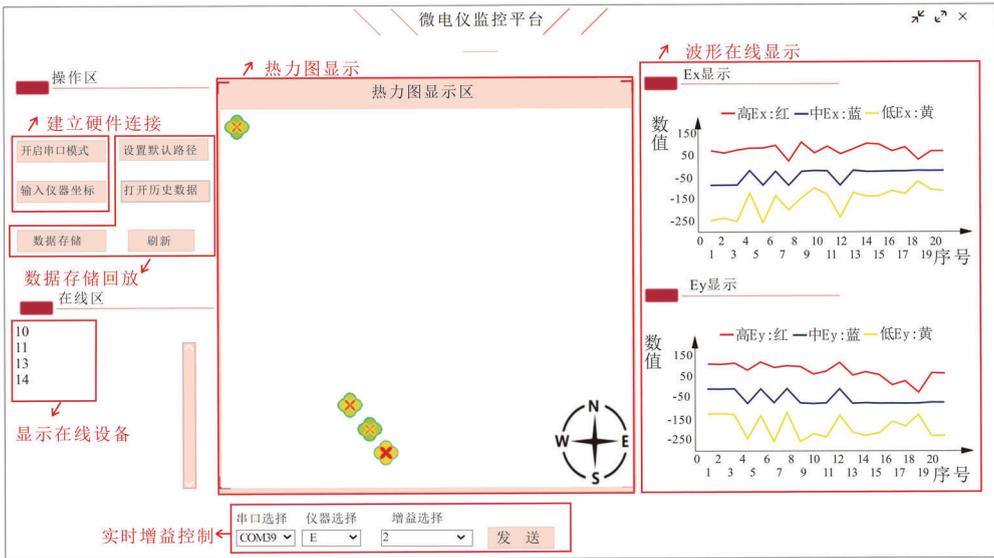


图7 上位机运行界面

Fig.7 Upper computer running interface

上位机软件由交互系统、坐标转换系统、图形显示区和数据处理系统等4个部分组成。上位机可以实现同时对多台仪器进行监控,控制仪器采集增益,记录仪器的地理坐标,显示仪器采集数据热力图,实时显示动态接收波形,并且进行数据回放存储,图7给出了上位机的运行界面。

2 野外实验验证

2021年5月底至6月初,在四川盆地某页岩气采集场地水平压裂井的上方投放了A、B、C、D四台监测装置。图8是实地测试示意图,其中红色标志处为监测装置投放位置,黄色标志位置为南方科技大学电场接收仪器投放位置。

本次野外测试不极化电极间距40 m,测试了仪

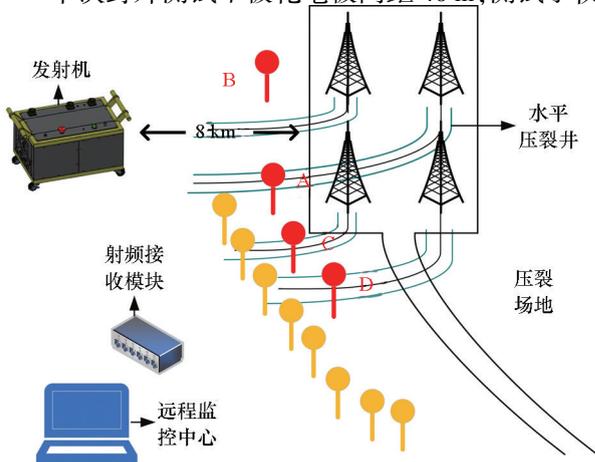


图8 实地测试示意

Fig.8 Schematic diagram of field test

器的工作稳定性以及能否适应野外复杂的环境,无线通信是否符合要求等。5月29日中午11:31页岩气井开始压裂,图9给出了29日中午A仪器东西方向的采集数据,由于当前时间段发射机关闭,仪器监测的是在自身地电场的激励下,压裂场地附近的电场信号,仪器采样率为100 Hz,并且对10 s内的数据按照从大到小的顺序排序,按照25%,50%,25%的百分比分段去除最大、最小值后取平均,分别对应图中的 E_x 高采样值, E_x 中采样值和 E_x 低采样值。图中可以看出11:40~12:00左右数据呈现明显的包络,和压裂前进行比较,电场值明显增大。后续将对这个包络异常进行进一步分析,并将分析结果与地震仪器的反演结果进行进一步比对验证。从图9中也可以看到压裂现场极强的干扰噪声。

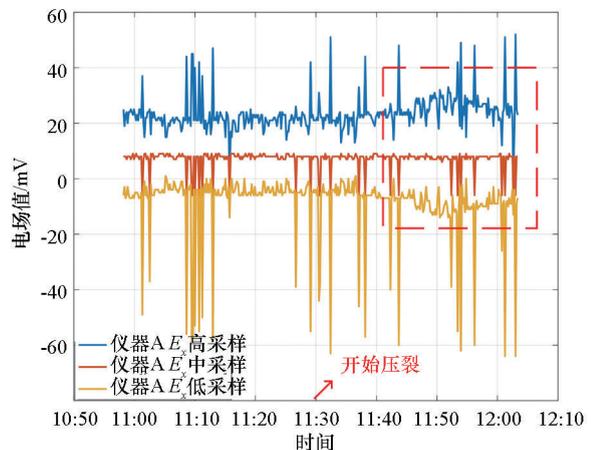


图9 5月29日A仪器东西方向测试数据

Fig.9 East West test data of instrument A on May 29

3 结论

经过一系列的测试,该压裂电场监测系统达到了预定采集功能,实现了放大倍数从到 $1 \sim 10^5$ 可调;73 dB 的动态范围;数据实时采集、处理和无线上传;上位机实时显示波形和设备动态云图;机械封装体积小、质量轻、密封性好且适用于野外复杂的环境。单个采集站成本在 500 元以内。但还是存在一些不足,上位机需要工作在笔记本端,但是野外无法及时给笔记本充电,无法获得长时间的监测数据,在后期的工作中将增加集中的本地接收和数据存储模块。另外,后续将加强微电仪本身边缘计算的内容,减少数据传输量。

针对野外采集的数据,目前能够说明仪器本身工作正常,操作便捷,但数据的后续分析尚需要多次野外测试验证,本论文仅可作为页岩气水力压裂分布式微弱电场监测的技术初探成果。

参考文献 (References):

- [1] 朱维耀,陈震,宋智勇,等.中国页岩气开发理论与技术研究进展[J].工程科学学报,2021,43(10):1397-1412.
Zhu W Y, Chen Z, Song Z Y, et al. Research progress in theories and technologies of shale gas development in China [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(10): 1397-1412.
- [2] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J].石油勘探与开发,2015,42(6):689-701.
Zou C N, Dong D Z, Wang Y M, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 689-701.
- [3] 王世谦.页岩气资源开采现状,问题与前景[J].天然气工业,2017,37(6):115-130.
Wang S Q. Shale gas exploitation: Status, issues and prospects [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(6): 115-130.
- [4] 刘振武,撒利明,杨晓,等.页岩气勘探开发对地球物理技术的需求[J].石油地球物理勘探,2011,46(5):810-818.
Liu Z W, Sa L M, Yang X, et al. Needs of geophysical technologies for shale gas exploration [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(5): 810-818.
- [5] 张永华,陈祥,杨道庆,等.微地震监测技术在水平井压裂中的应用[J].物探与化探,2013,37(6):1080-1084.
Zhang Y H, Chen X, Yang D Q, et al. The application of Micro-Seismic monitoring technology to the study of horizontal well fracturing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6): 1080-1084.
- [6] 田建涛,赵超峰,张伟,等.水力压裂井中监测方法不对称压裂裂缝分析[J].石油物探,2019,58(4):341-345
Tian J T, Zhao C F, Zhang W, et al. Analysis of asymmetric hydraulic fracture for borehole microseismic monitoring [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 341-345.
- [7] 芮拥军.地面微地震水力压裂监测可行性分析[J].物探与化探,2015,39(2):341-345.
Rui Y J. Feasibility analysis of surface micro-seismic hydraulic fracturing monitoring [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 341-345.
- [8] 杨松霖,袁博,李帝铨.高陡双复杂地区多种页岩气勘探方法效果对比[J].物探与化探,2016,40(5):941-946.
Yang S L, Yuan B, Li D Q. An analysis of some different exploration methods in complex terrain area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(5): 941-946.
- [9] 周印明,刘雪军,张春贺,等.快速识别页岩气“甜点”目标的时频电磁勘探技术及应用[J].物探与化探,2015,39(1):60-63.
Zhou Y M, Liu X J, Zhang C H, et al. The TEEM technology for quick identification of “sweet spot” of shale gas and its applications [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 60-63.
- [10] 田巍,李旭兵,王保忠.大地电磁测深在湘东南坳陷页岩气勘探中的应用[J].物探与化探,2019,43(2):281-289.
Tian W, Li X B, Wang B Z. The application of magnetotelluric sounding to shale gas exploration in Southeast Hunan Depression [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(2): 281-289.
- [11] 凌帆,朱裕振,周明磊,等.广域电磁法在南华北盆地长山隆起页岩气资源潜力评价中的应用[J].物探与化探,2017,41(2):369-376.
Ling F, Zhu Y Z, Zhou M L, et al. Shale gas potential assessment of Changsan uplift area in southern North China basin by using wide field electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 369-376.
- [12] 林君.分布式无缆遥测地震勘探系统的设计与应用[M].北京:科学出版社,2016.
Lin J. The design and application of distributed cableless telemetry seismic exploration system [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [13] 刁瑞,吴国忱,尚新民,等.地面阵列式微地震监测关键技术研究[J].岩性油气藏,2017,29(1):104-109.
Diao R, Wu G C, Shang X M, et al. Key techniques for surface array microseismic monitoring [J]. Horologic Reservoirs, 2017, 29(1): 104-109.
- [14] 吴海成.中国物探仪器发展博览——地球物理学会 60 年发展之见证[J].地球物理学进展,2007,22(4):1338-1343.
Wu H C. The progress of the instruments of exploration geophysics in China——An overview of the past sixty years of CGS [J]. Progress In Geophysics, 2007, 22(4): 1338-1343.
- [15] 王永兵,何继善.WSJ-4 多功能高精度数字化伪随机信号接收系统及应用[J].物探与化探,2014,38(5):1012-1017.
Wang Y B, He J S. Development and application of the WSJ-4 multifunction digital IP instrument receiving system based on pseudo-random signal [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(5): 1012-1017.
- [16] 张文秀,林君,刘立超,等.分布式电磁探测宽频数据采集系统设计与实现[J].吉林大学学报:工学版,2012,42(6):1426-1431.

- Zhang W X, Lin J, Liu L C, et al. Design and implementation of broadband data acquisition system for distributed electromagnetic exploration [J]. Journal of Jilin University; Engineering and Technology Edition, 2012, 42(6): 1426–1431.
- [17] 黄大年, 于平, 底青云. 地球深部探测关键技术装备研发现状及趋势[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(5): 1485–1496.
- Huang D N, Yu P, Di Q Y. Development of key instruments and technologies of deep exploration today and tomorrow [J]. Journal of Jilin University; Earth Science Edition, 2012, 42(5): 1485–1496.
- [18] 林品荣, 郭鹏, 石福升, 等. 大深度多功能电磁探测技术研究[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 149–154.
- Lin P R, Guo P, Shi F S, et al. A study of the techniques for large-depth and multi-functional electromagnetic survey [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31(2): 149–154.
- [19] 陈凯, 金胜, 魏文博, 等. 坑(井)一地多参数电磁接收系统[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3803–3818.
- Chen K, Jin S, Wei W B, et al. Surface tunnel borehole multi-parameter EM receiver [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3803–3818.
- [20] 高雅, 底青云, 付长民, 等. 巷道 CSAMT 法的目标体分辨能力研究[J]. 地球物理学报, 2019, 62(9): 3591–3600.
- Gao Y, Di Q Y, Fu C M, et al. Research on resolving ability of deep subsurface targets from mine roadway using CSAMT method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(9): 3591–3600.
- [21] 刘长胜, 马金发, 朱文杰, 等. 深井电场测量不极化电极特性研究[J]. 物探与化探, 2020, 44(4): 816–819.
- Liu C S, Ma J F, Zhu W J, et al. A study of the characteristics of non-polarized electrode in deep well electric field measurement [J]. Geophysical and Geo-chemical Exploration, 2020, 44(4): 816–819.
- [22] 陆阳泉, 梁子斌, 刘建毅. 固体不极化电极的研制及其应用效果[J]. 物探与化探, 1999, 23(1): 65–66.
- Lu Y Q, Liang Z B, Liu J Y. Development and application of solid non-polarized electrode [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(1): 65–66.

Preliminary exploration into the monitoring technology for distributed weak electric field during hydraulic fracturing for shale gas extraction

WU Wen¹, WANG Meng^{1,2}, YANG Di-Kun³, CHEN Mo¹, REN Lin-Bin¹

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In the process of hydraulic fracturing for shale gas extraction, the injection, flowback, retention, and absorption of fracturing fluids will cause changes in electric fields in the case of the excitation by the electromagnetic field from an artificial source in a far area or the excitation by the geoelectric field. The time-dependent change in the information on fracturing can be reflected by monitoring the change in weak electric fields above the hydraulic fracturing area. To meet the needs of the real-time monitoring of the fracturing field, this study focuses on the preliminary study of the monitoring technology based on the nodal acquisition devices of distributed weak electric fields. The monitoring system only collects two horizontally orthogonal electric field signals, monitors the real-time information on the electric field within a certain range, and transmits the preliminarily processed data back to the data center in a wireless way. Test results show that the monitoring system has stable performance, a standby time of more than 10 days, and high sealing performance, and is applicable to complex field environments. Therefore, this monitoring system can provide important technical support for obtaining images of fracturing fluid migration in the future.

Key words: hydraulic fracturing of shale gas; electric field acquisition; weak signal conditioning; distributed node acquisition; real-time monitoring

(本文编辑:王萌)