

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.04.007

全固态组合式陆地电火花震源研制

徐旭哲¹, 孙鹤鸿^{1,2}, 付荣耀¹, 张东东¹, 樊爱龙²

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 文中介绍一种新型全固态组合式陆地电火花震源。该陆地电火花震源由4台子震源组成。每台子震源采用半导体器件可控硅代替传统的三电极气体开关做放电开关,利用限流电感控制放电电流的峰值和上升时间,采用续流二极管抑制反向振荡的放电电流。通过改变放电电流波形,可以适当地改变电声转换的频谱特性。电声换能器采用的是同轴平行式电弧放电电极结构。每台子震源工作电压7 500 V时,储能为28 kJ,总震源储能为112 kJ。4台子震源可以同步放电或延迟放电。在河北衡水武强县进行了一次野外实验,结合地震波反射剖面和当地的地质地层数据分析得出该类型的陆地电火花震源激发的地震波勘探深度可达2 000 m以上。

关键词: 水中放电; 电火花震源; 等离子体震源; 液电效应

Development of the Solid-state Modular Land Electric Spark Source

XU Xuzhe¹, SUN Yaohong^{1,2}, FU Rongyao¹, ZHANG Dongdong¹, FAN Ailong²

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper introduces a new type of all-solid-state land electric spark source which consists of four sub-seismic modules. Every module adopts the silicon control rectifier to replace the traditional gas switch, using the choke coil to limit the peak value and the rising-time of discharge current, using freewheeling diode to suppress reverse oscillating discharge current. By changing the discharge current waveform, the acoustic spectrum characteristics can be changed properly. The structure of electroacoustic transducer is a type of coaxial electrode which can produce the arc discharge. When the working voltage is 7 500 V, the storage of each module is 28 kJ, and the total storage will be up to 112 kJ. Four sub-seismic modules can discharge synchronously or asynchronously. The seismic section plots were obtained from the experiment in Hengshui of Hebei province. It shows that the seismic wave generated by the electric spark source can reach more than 2 000 m.

Key words: discharge in water; electric spark source; plasma source; electro-liquid effect

0 引言

随着国民经济的快速发展,对矿产资源的需求日益扩大,矿产资源的短缺已经成为国民经济持续发展的瓶颈,部分矿产的对外依存度已经到了危险的边缘。非地震方法在近地表矿产勘查中发挥了重要的作用,但随着大型浅层矿床即将开始开发殆尽,可开发的探明储量的矿产资源也越来越少,就需要寻求更深的矿产勘查空间,如500 m以下的“第二富集带”。目前矿产资源开发深度达到了三千

多米,重力、磁、电等非地震方法通常难以锁定埋深上千米的目标体,深部勘探的分辨率较差。地震反射技术一直成功适用于石油勘探^[1-3]、海洋地质勘探^[4-5]、建筑地质勘探^[6],随电火花震源的能量不同,勘探深度从几十米至数千米,是目前开展深部找矿具有潜力和应用前景的方法技术。但是,国内外目前还没有专门针对金属矿探测的地震勘探综合系统。组合形式的地震勘探方法不仅可以带来更轻便多样的形式,在定向勘探领域也有着特殊的作用^[7-9]。

文中研制的全固态陆地电火花震源采用高储能密度脉冲电容器和半导体固态开关,具有模块化

程度高、可靠性高、维护成本低等特点。

1 原理介绍

全固态组合式陆地电火花震源系统电路原理见图 1。全固态陆地电火花震源采用 4 台子震源组合放电形式。4 台子震源既可以同步放电,也可以进行相对延时放电。4 台组合式子震源放电产生的地震波直达波、面波和反射波信号由地震检波器采集后经交叉站送入信号采集和分析系统,尤其是对反射地震波进行分析,获得地震剖面图。

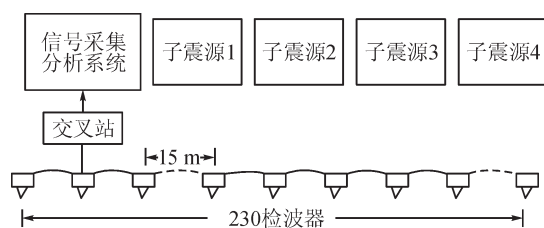


图 1 全固态组合式陆地电火花震源系统

Fig. 1 All solid-state modular land electric spark source system

子震源电路原理见图 2。由于全固态组合式陆地

电火花震源系统在野外环境工作,供电方式采用汽油发电机。充电系统采用传统的工频变压器升压方案。 T_2 是专门为容性负载充电设计的高漏阻抗升压变压器,在电容器初始充电期间限制较大的充电电流。 C_1 采用高储能密度、自愈型的金属化聚丙烯薄膜电容,电容量 1 mF。放电开关选用 4 个大功率快速可控硅 SCR₁~SCR₄ 串联,型号为 Y100KMM。4 组串联最高直流耐压可达 10 kV 以上,在 di/dt 小于 1 200 A/ μ s 的情况下 10 ms 的半波正弦电流峰值最高为 44 kA。

气体开关放电时会产生少量的金属蒸汽污染绝缘支撑,同时放电电极会在电弧作用下缓慢的融蚀,放电能力随着放电次数的增加而减小。通流能力在 50 kA 以下的铜电极气体开关在自然换气状态下一般不超过 5 000 次就需要进行维护。同时气体开关为了更快地恢复阻断特性,放电室设计的比较大,根据放电时的气体电离情况还可能引入强迫换气(或通入惰性气体)设备,造成设备体积比较庞大。

采用固态半导体器件可控硅代替传统的气体放电开关,可以大幅度的减小整机的体积,提高放电开关的寿命。

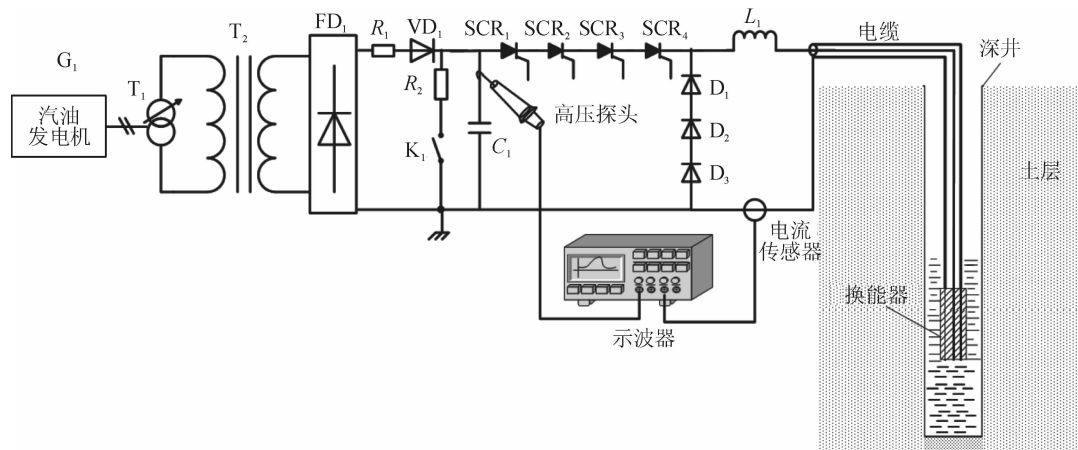


图 2 固态电火花子震源原理图

Fig. 2 The schematic of the solid-state sub-array electric spark source

L_1 是限流电感,主要作用有 2 个,一是限制放电时的放电电流;二是改变电流的上升时间。通过 L_1 、 C_1 、放电电缆的电感和电阻参数可以计算回路阻抗,峰值电流和电流上升时间。随着放电回路电感的增加,放电电流峰值减小,放电电流上升的陡度也减小,放电振荡频率减小。电能往放电电极输送的慢,产生的冲击波幅值减小,但时间常数会增加,激发的地震波频率降低,从而有利于深层勘探^[10]。

D_1 — D_3 是续流二极管,型号为 ZPC120000-65,3 组串联直流耐压可达 10 kV 以上,电流峰值在 10 ms 半波正弦情况下可达 120 kA。 C_1 、 L_1 和放电电缆组

成一个过阻尼振荡电路, L_1 存储的剩余能量需要通过续流二极管继续向放电电极释放。

在地面钻井,直径 100 mm 以上,井深需要达到潜水面以下。电火花子震源的同轴结构放电电极经过 10~20 m 的电缆放入井中潜水面下 2~5 m。全固态电火花震源可以在同一炮点连续放电数十次,进行多次叠加测试。

2 电气参数实验测试

在电容器 C_1 充电 400 V 的低电压下,负载短路状态时对可控硅的均压状态和二极管续流状态进行

了测试。见图3、4。 C_1 充电电压400 V,用4组电压探头测量可控硅两端 U_{AK} 电压波形。初始充电时,4个可控硅都处于阻断状态1,在静态均压网络作用下4个可控硅两端分别为100 V左右,基本一致。可控硅触发信号采用磁环触发方式,触发信号同步性较好。由导通状态可以看到,4个串联可控硅开通速度基本同步,每个可控硅的导通电压大约10 V左右。当放电回路电流小于可控硅的擎住电流或可控硅两端施加反向电压时,可控硅自然关断。从阻断状态2可以看出,串联可控硅的关断并不同步。因为 C_1 和 L_1 回路发生振荡,短路放电时 C_1 上会产生反压,反压的大小取决于续流二极管的正向导通压降。

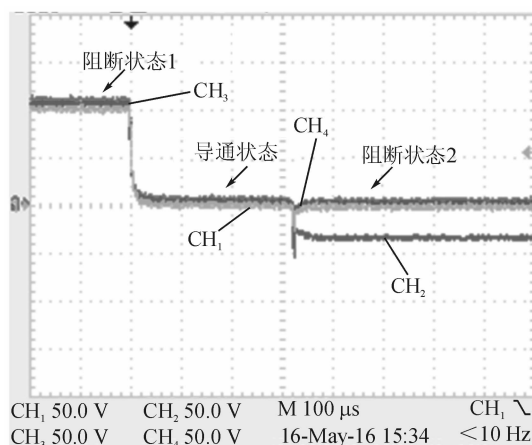


图3 串联可控硅均压状态测试波形

Fig. 3 The waveform of the balancing voltage of the SCR in series-connected

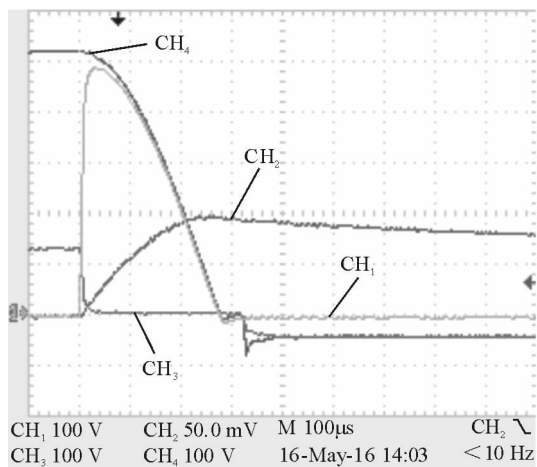


图4 脉冲电源工作时测试波形

Fig. 4 The test waveform of the pulse power supply during discharge

图4中 CH_4 通道测试的是电容器 C_1 上电压 U_{c1} ,垂直灵敏度为100 V/div; CH_1 通道测试的是3个串联续流二极管总的端压 U_D ,垂直灵敏度为100 V/div;

CH_3 通道测试的是4个串联可控硅中先发生关断状态的可控硅的端压 U_{SCR1} ,垂直灵敏度为100 V/div; CH_2 通道测试的是电感电流 i_L ,垂直灵敏度为50 mV/div,采用罗氏线圈测量,变比为38 kA/V。从测试波形中可以看出,初始状态时电容器 C_1 电压充电至520 V左右,其中一组可控硅的端压为130 V左右。续流二极管总的端压为0,电感电流为0。当可控硅导通期间,电容 C_1 端压下降,二极管两端端压与电容器电压相近,两者之间只相差可控硅的导通压降,电感电流开始上升。在可控硅导通期间,电容器 C_1 的端压先降至0 V。电感电流不能突变,电流经过续流二极管续流。经电容器 C_1 也会续流一部分电流,此时电容器 C_1 反向充电。当 C_1 反向电压大于续流二极管正向导通压降,致使可控硅开始承受反压时,可控硅开始反向关断。此过程的快慢取决于可控硅的反向恢复时间。当串联的可控硅中的某一只先恢复关断时,该可控硅的端压就会接近电容器 C_1 上的反压,见图4中开始阻断状态时刻测试的波形。先阻断的可控硅 SCR_1 两端的电压 U_{SCR1} 接近电容器 C_1 上的电压 U_{c1} 。电容器 C_1 反向电压的大小取决于可控硅的恢复时间,以及电容器续流回路阻抗的大小。

在10 m井深条件下,潜水面以下3~5 m,同轴电极放电电流波形见图5。从图5中可以看出不同的激发状态下,放电是存在延迟的。子震源实际工作中的放电延迟甚至达到300 μs以上。放电延迟与放电电压,放电电极的极间距,放电电极所处的液体环境的电阻率密切相关。放电延迟对采用可控硅半导体器件的放电开关是极为不利的。如果放电延迟太长,就需要提高可控硅的触发脉宽,使得可控硅导通电流迅速增长时,触发极仍然有较大的触发电流,否则可控硅会因为硅片的导通面积不够,造成局部过热而损坏。受触发极功率限制,触发宽度一般在几百微秒以内。水中放电产生的导通延迟对气体开关影响不大。

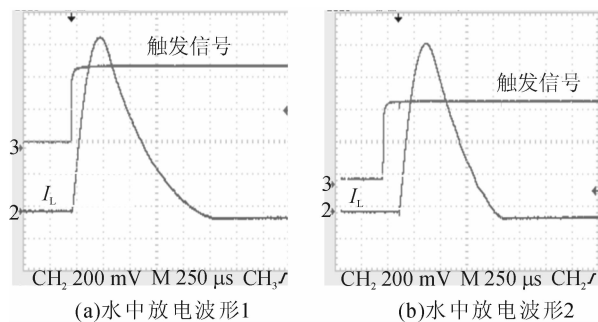


图5 水中放电电极放电时产生的延迟差异

Fig. 5 The different of the delay time between discharge in water

所以,采用脉冲可控硅作为放电开关的陆地电火花震源在实际使用过程中应关注放电延迟特性。

同轴放电电极放电前和放电后的照片见图 6。同轴电极的内电极采用黄铜材料,同轴电极的外电极采用不锈钢材料。黄铜电极在大电流放电状态下有比较明显的烧蚀现象。



图 6 同轴放电电极放电前和放电后对比图

Fig. 6 The contrast diagram of the transducer before discharge and after discharge

3 地震波测试结果

在河北衡水武强县进行的组合式全固态电火花震源实测地震波剖面图见图 7。结合图 1,测线南北排列,布置检波器 230 道,总长 3 km 左右。总共 17 个炮点,炮距 180 m。每个炮点进行 5 次垂直叠加测试。子震源成一字型排列,与测线排列方向一致。4 个子震源相距 1 m,距离测线垂直距离大约 3 m。子震源所处井深 10 m,放电电极投放深度 8 m,潜水面距地面 4~5 m 左右。

子震源采用同步放电模式,单台子震源工作电压 7 500 V,子震源释放能量 28 kJ,4 台组合式固态电火花震源总的释放能量 112 kJ。从地震剖面图 7(a)可以看出,固态组合式电火花震源的直达波可达 2 000 m 以上,从图 7(b)可以看出,5 次垂直叠加即可在 1 500 ms 处出现比较明显的地层反射信号。

4 结语

全固态组合式陆地电火花震源有 2 个优点,一是采用组合式震源方式,减小了单台震源的重量,震源的数量可以根据地震勘探需要的能量进行合理的配置;二是采用固态可控硅半导体器件可以减小整机体积,大幅提高放电开关的使用寿命。

全固态组合式陆地电火花震源的数个子震源可以采用延时控制功能,改变地震勘探的激发状态,达到定向勘探的目的。

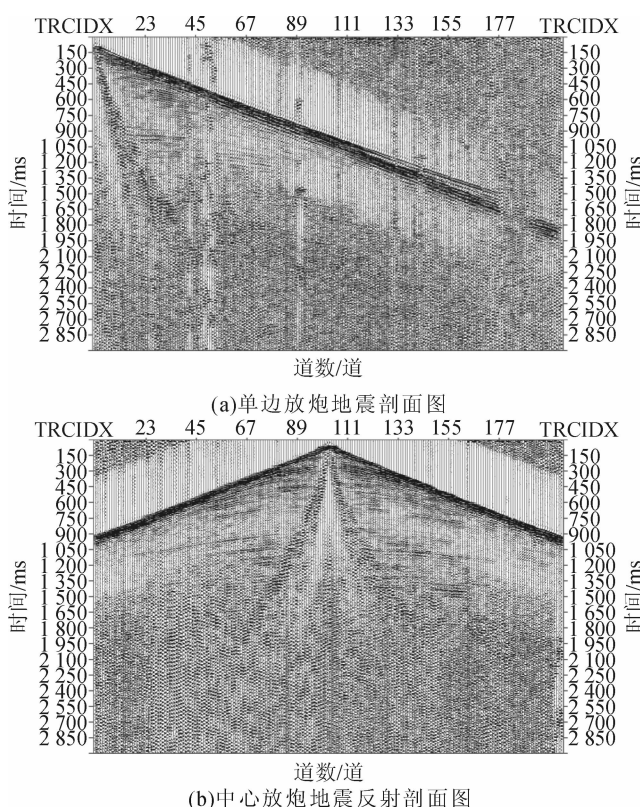


图 7 单边放炮和中心放炮地震剖面图

Fig. 7 Seismic section plot when unilateral and central shooting

致谢

该文由国家重大科研仪器装备项目《金属矿地震探测系统》支助。文中地震波勘探实验和地震波剖面图的绘制工作是在中国科学院地质与地球物理研究所梁光河、李志远、徐善辉等工作人员的大力支持下完成的,在此向他(她)们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] SUN Yaohong, FU Rongyao, GAO Yinghui, et al. Development of a phased array sparker[C]//2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference(IPMHVC). [S.l.]:IEEE, 2014:348-351.
- [2] 孙鹞鸿,左公宁. 传输式电火花震源电气参数的测试与研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(3):39-41.
SUN Yaohong, ZUO Gongning. Experimental study of the electrical parameters of the transmission spark source[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3):39-41.
- [3] 裴彦良,刘保华,赵月霞,等. 脉冲等离子体震源及其海洋地震勘探方面的应用[J]. 科技导报, 2007, 25(19):48-52.
PEI Yanliang, LIU Baohua, ZHAO Yuexia, et al. Research on pulsed plasma source and its application in the Marine seismic[J]. Review Science & Technology, 2007, 25(19):

- 48-52.
- [4] 严 辉,黄逸凡,裴彦良,等. 等离子体震源及在海洋勘探中的应用[J]. 高电压技术,2012,38(7):1711-1718.
YAN Hui, HUANG Yifan, PEI Yanliang, et al. Plasma seismic source and its application in oceanic seismic exploration[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1711-1718.
- [5] 卢 松,于维刚,陈俊栋. 1万焦耳电火花震源在大距离地层CT中的应用[J]. 声学技术,2013,32(6):452-457.
LU Song, YU Weigang, CHEN Jundong. Application of 10 kJ ZDF-3 sparker on large distance layer CT[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 452-457.
- [6] 樊爱龙,孙鹁鸿,徐旭哲,等. 单通道电火花震源及其放电实验研究[J]. 电工电能新技术,2016,35(5):48-54.
FAN Ailong, SUN Yaohong, XU Xuzhe, et al. Single channel electric spark source and discharge experimental study [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(5): 48-54.
- [7] 葛利华,姜 弢,林 君,等. 相控震源在矿产勘探中应用的数值模拟研究[J]. 地球物理学报,2012,55(12):4266-4276.
GE Lihua, JIANG Tao, LIN Jun, et al. Numerical simulation of application of the phased-array vibrator system in mineral exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 4266-4276.
- [8] 李文彬,王晓鸣,赵国志,等. 延时叠加震源激发地震波能量的研究[J]. 爆破器材,2004,33(1):9-11.
LI Wenbin, WANG Xiaoming, ZHAO Guozhi, et al. Study on energy of seismic wave from shock of superimposed seismic source in vertical direction[J]. Explosive Materials, 2004, 33(1): 9-11.
- [9] 黄 海,吴 衡. 电火花震源激发的声波频谱分析[J]. 南海地质研究,2012(1):39-48.
HUANG Hai, WU Heng. The study of acoustic spectrum generated by the sparker systems[J]. Geological Research of South China Sea, 2012(1): 39-48.
- [10] 秦曾衍,左公宁,王永荣,等. 高压强脉冲放电及其应用[M]. 北京:北京工业大学出版社,2000.
QIN Zengyan, ZUO Gongning, WANG Yongrong, et al. High voltage impulse discharge and its application[M]. Beijing: Beijing University of Technology, 2000.
- 徐旭哲(1979—),男,硕士,工程师,主要从事高压特种电源、脉冲功率技术方面的工作。

(上接第35页)

- during high-frequency electrical-thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 389-395.
- [12] 刘 洋,王建国,方春华,等. 复合绝缘子转轮法老化试验系统设计与开发[J]. 高压电器,2012,48(5):69-74.
LIU Yang, WANG Jianguo, FANG Chunhua, et al. Design and development of tracking wheel aging test system of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 69-74.
- [13] YI X, WANG Z D. The influences of solid surface on the propagation of creepage discharge in insulating liquids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 303-312.
- [14] SIMONI L, MAZZANTI G, MONTANARI G C, et al. A general multi-stress lifespan model for insulating materials with or without evidence for thresholds[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(3): 349-364.
- [15] KIM Y H, LEE H, LEE O, et al. Dielectric characteristics of solid insulation materials with respect to surface roughness[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1-4.
- 袁端磊(1973—),男,高级工程师,主要从事配电网开关设备研究。
- 程 显(1982—),男,副教授,主要从事智能高压电器研究。