

# 电 火 花 声 源 的 研 制

凌鸿烈 王志诚 冯裕章 彭金宝

(中国科学院东海研究站)

本文介绍了一种供SKY-D1深地层剖面仪用的电火花声源。这是一套高电压大电流换能装置,它具有比较完善的控制、监视、保护和报警装置,而且结构紧凑,操作方便,安全可靠。文中还给出了电火花声源充放电的等效回路,确定声源系统参数的设计方法,以及在海上进行测试和使用的结果。

## 一、前 言

几十年前,已逐步研制了多种高能量低频声脉冲震源(如气枪、电磁脉冲声源、电火花声源和挤压式声源等),以用于海洋地震勘探和地层结构的测绘。其中,电火花声源是一种较常用的震源。它具有操作安全、没有环境污染、成本低廉、声脉冲波形重复性较好,并能实现自动控制等优点。声脉冲波形,和炸药在水下爆炸时十分相似,而且,频谱宽,电声转换效率较高,它不仅可用于海洋地震勘探,也可用于水声方面的多种研究<sup>[1]</sup>。特别在连续测绘地层剖面时,电火花声源是一种较为理想的声源<sup>[2]</sup>。电火花声源不但有一定的穿透海底地层的能力,而且有较好的分辨率,所以电火花声源用于穿透地层不太深(在1—2千米以内)、但地层分辨率要求较高的地层剖面仪中是十分合适的。

电火花声源是利用正负二电极在高电压作用下,使海水介质击穿放电,高压电容器上的贮能迅速通过放电电缆、水下放电电极进行释放,使电极周围的海水迅速受热汽化,形成以水汽为主、并带有少量电极所蒸发出的金属蒸汽气泡。这个气泡不断膨胀,发射激波脉冲,直至内部压力小于静水压才开始收缩。这时,气泡内部压力也跟着增大,到不能再收缩时,气泡又从压缩恢复到膨胀的

过程,声源发射第二个压力脉冲(又称第一气泡脉冲),即由动能转变成势能,再由势能转变成动能,这样周而复始,直至能量耗尽为止。

下面介绍已经研制成功的电火花声源系统及其在海上的测试结果和使用情况。

## 二、声源系统的概述

电火花声源是一套高电压大电流的换能装置。它由控制台、高压柜、四台贮能器、配电箱、警控箱、发射电缆及水下放电电极等10个部分组成(见图1)。每台贮能器由6个MY-140 $\mu$ f/5KV电容器组成,最高工作电压9千伏(三并二串)或4.5千伏(全部并联),最大贮能量为8500焦耳。四台贮能器可按实际需要进行组合,单台或几台并联工作,同时,也可以分为二组,通过拖在船后的二个水下电极进行放电,实行时空组合激发,从而达到控制声辐射特性,改善勘探效果。

在电火花声源连续工作时,为了避免贮能电容器通过空气间隙放电所辐射出的紫外线和“雷击声”对操作人员的影响,可通过与接收机安装在一起的操作台进行遥控。在操作台和控制台上设有各种必需的开关、按钮、电表及指示灯,此外,还设有故障报警及检修指示。如果出现故障会及时报警,并自动切断电源。在甲板上的工作人员,如发现不



图1 声源系统

正常现象,也可以随时切断电源,使电容器上的贮能随即通过高压泄放开关自动泄放。当高压泄放回路出现故障,还可以通过安全钩泄放。平时不工作时,电容器高压端能保证有良好的接地,所以电火花声源系统操作安全,工作可靠,检修方便。

此外,电火花声源各部件之间并有可靠而良好的机柜间的连接线,然后,汇接成一点再与船体连接。高压端与机柜保持一定距离,以免发生电晕放电。

整套系统在船上的安装面积需要 10 米<sup>2</sup> 以上,总重量约为 2.5 吨。

### 三、声源系统的分析

电火花声源基本上由三大部分组成(见图2),即充电回路,放电回路和触发保护装置。

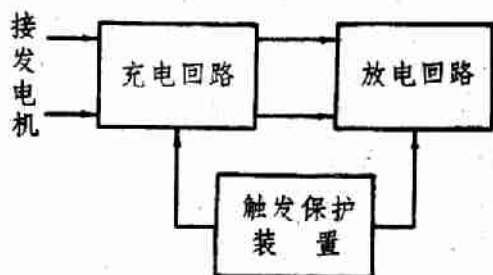


图2 声源系统方块图

充电回路包括升压变压器、高压整流硅堆、高压充电电阻和贮能电容器。

放电回路包括贮能电容器、空气间隙、放电电缆和水下放电电极。

触发保护装置包括定时触发器、高压泄放开关、锁芯开关、自动空气断路器及报警指示装置等。

#### 1. 充电回路的计算

电火花声源采用三相桥式整流,升压变压器按星形连接。为了计算方便,以阻性负载恒流充电近似处理(见图3)<sup>[3]</sup>。

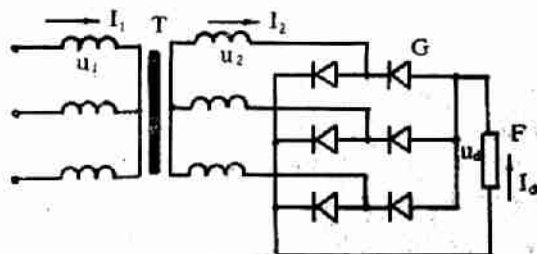


图3 充电回路原理图

设  $I_d$  为流过负载的平均电流,则

$$I_d = \frac{Q}{t} = \frac{CU_d}{t} \quad (1)$$

式中  $Q$  为电容器上的电荷,

$t$  为充电时间。

每一整流臂的平均电流为

$$I_o = \frac{1}{3} I_d \quad (2)$$

变压器的次级相电流有效值

$$I_2 = 0.82I_d \quad (3)$$

变压器的次级相电压有效值

$$U_2 = 0.47U_d \quad (4)$$

变压器的初级相电流有效值

$$I_1 = 0.82I_d \times \frac{n_2}{n_1} \quad (5)$$

式中  $n_2, n_1$  分别为变压器的次级、初级匝数。

变压器的初级相电压有效值

$$U_1 = 0.47U_d \times \frac{n_1}{n_2} \quad (6)$$

变压器的功率(忽略变压器的损耗)

$$P = 3I_2U_2 = 3 \times 0.82I_d \times 0.47U_d = 1.16P_d \quad (7)$$

电火花声源在连续工作过程中, 充电电流基本上按指数脉冲发生变化, 所以各部件要留有充分的余量。

充电回路的主要部件有:

充电电阻  $R_K$

充电电阻  $R_K$  的阻值和功率大小, 由时间常数  $R_K \cdot C$  和最短的每次放炮时间间隔  $\tau$  来决定。通常取  $\tau \geq 3R_K \cdot C$ , 即  $R_K \leq \frac{\tau}{3C}$ 。

这时, 电容上的电压可充到90%以上。而电容器上的贮能量为:

$$E_e = \frac{1}{2}CU_0^2 \text{ (焦耳)} \quad (8)$$

式中  $C$  为电容量(法拉);

$U_0$  为电容器上的电压(伏特)。

电容器上的平均功率为

$$E_e/\tau = \frac{CU_0^2}{2\tau} \text{ (瓦)} \quad (9)$$

这种充电方式简单, 而最大充电效率为50%<sup>[4]</sup>, 也就是约有50%的能量损耗在电阻上, 变为热量。所以, 充电电阻的功率要大于平均功率, 同时, 要考虑到有充分散热的装置。一般用于中小功率的系统里。

另外, 在充电过程中, 改变充电电阻  $R_K$  的阻值、或者改变发电机的输出电压值来控

制充电速度(即改变柴油机励磁电压), 从而达到充电电流基本保持不变, 而后者更为经济有效。

贮能电容器  $C$

在条件许可的情况下, 尽量提高工作电压, 这样, 对于提高电声效率是有利的。通常贮能为10万焦耳以下的电火花声源, 其工作电压可选用5千伏到10千伏之间。但是, 考虑到船上工作的安全, 工作电压不宜太高, 一般工作电压应选为贮能电容器额定耐压的百分之九十以下, 这样可以大大增长电容器的使用寿命。

在实行电容器串联时, 由于电容器的漏电阻不同, 会造成每组电容器上受到的电压不同。为了消除这种现象, 需要在电容器上并接均压电阻(现采用10只120K $\Omega$ /2W碳膜电阻串联)。另外, 贮能器进行组合时, 若组合后的总能量超过2万焦耳, 应考虑到如有一只电容器损坏, 其他电容器会同时对它放电, 而引起电容器爆裂的可能。为此, 通常可以采用特制的熔断丝进行保护。

高压整流硅堆  $G$

本系统采用三相桥式整流。整流硅堆的耐压和电流值都选为最大工作电压和最大工作电流的三倍以上, 并安装在通风较好的位置。

升压变压器  $T$

主要考虑到工作安全可靠, 一般选用电力变压器, 或另行设计。

除此以外, 对发电机也有一定的要求。由于发电机的负荷经常变化, 所以电火花声源要求有一部发电机单独供电。而发电机的容量应是总的平均耗能的三倍以上。对于稳流充电可以低于这个数值。本声源系统安装在“向阳红”07号船上, 由T<sub>2</sub>H-64型发电机供电, 在声源满负载连续工作的情况下, 电源电压最大下降5%左右, 经过一昼夜以上的连续工作, 未发现任何故障。

## 2. 放电回路的计算

放电回路的主要部件有：

高压开关  $K$

一般常用的高压开关有引燃管、空气隙、电磁开关以及可控硅等。其中结构最简单的是空气隙开关(又称三球法放电开关)。在本回路中系采用空气隙，并能根据不同的工作电压，对间隙作一定的微调，但有紫外线、臭氧、金属氧化物粉末和“雷击声”产生。高压开关可等效于电阻和电感串联，而等效电阻与系统中其他电阻相比则可忽略不计。

放电电缆  $D$

放电电缆要具有低电感和小电阻的特点。一般选用同轴形结构，内外导体截面积基本相同，而内外导体间绝缘层的耐压和导体截面积的大小，则应随工作电压和贮能量的不同而不同。电缆外面还要加覆一层耐磨并有一定耐压性能的护套(如橡胶或塑料护套)。由于放电电缆仅有几十米长，所以分布电容可以忽略，放电电缆仅用电感和电阻来表示。

水下放电电极  $E$

放电电极的结构和形式，对声辐射特性有较大的影响。我们在海上对三种电极形式(平行电极、单电极、“尾翼”型同轴电极)和同种电极在二种间距的情况下进行了声脉冲的直接测量<sup>[5]</sup>，结果表明“尾翼”型同轴电极放电特性较好。电极间距对声辐射特性有一定影响，正负极间距存在最佳距离。“尾翼”型，电极由一个小面积的阳极和大面积的阴极所组成，其面积比约一百倍，材料采用硬而不脆的黄铜<sup>[2]</sup>。正电极外面用玻璃钢绝缘，基本上与正电极保持“等速燃烧”。水下放电电极的电感和电容，当与系统中的其他部件相比可以忽略不计，而可用电阻来表示，其阻值大小与电极结构形式有关，还与介质特性有关。

这样，放电回路可简化为图 4<sup>[6]</sup>。

在放电回路中，要特别注意减少连接点的接触电阻和引线长度，否则会影响放电电

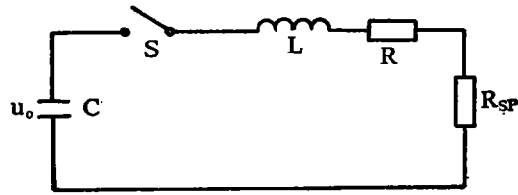


图 4 放电回路等效电路

$U_0$ ——贮能器组二端初始电压； $L$ ——放电回路的总电感； $R'$ ——放电回路的损耗电阻； $R_{sp}$ ——放电电极的等效电阻； $C$ ——贮能器的电容量

流的输出，同时会减少辐射声的峰值压力。

由图 4 可见，当开关  $S$  合上时，则电能通过电感和电阻放电。电流的微分方程为：

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I = 0 \quad (10)$$

设  $t=0$  时， $I=0$ ，式中  $R=R'+R_{sp}$ 。

解方程得下列三种情况：

1) 当  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  时，为周期性放电(即欠阻尼)

$$I = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (11)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; \quad \alpha = \frac{R}{2L}。$$

放电电流的最大值，即  $\frac{dI}{dt} = 0$ ，求得

$$I_{\max} = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{\alpha}{\omega} \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha}} \quad (12)$$

2)  $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  时，为临界状态的放电(即)临界阻尼，实际上不存在)

$$I = \frac{U_0}{L} t \cdot e^{-\alpha t} \quad (13)$$

放电电流的最大值为：

$$I_{\max} = \frac{2U_0}{R} e^{-1} = 0.736 \frac{U_0}{R} \quad (14)$$

3) 当  $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  时，为非周期性放电(即过阻尼)——这是我们感兴趣的情况

$$I = \frac{U_0}{\beta L} e^{-\alpha t} \sinh \beta t$$

$$= \frac{U_0}{2\beta L} [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}] \quad (15)$$

式中:  $\beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$

放电电流的最大值为:

$$I_{\max} = \frac{U_0}{2\beta L} \left[ e^{-\frac{\alpha-\beta}{2\beta} \ln \left( \frac{\alpha+\beta}{\alpha-\beta} \right)} - e^{-\frac{\alpha+\beta}{2\beta} \ln \left( \frac{\alpha+\beta}{\alpha-\beta} \right)} \right] \quad (16)$$

电火花声源辐射的总能量为:

$$E_r = R_{sp} \cdot \int I^2 dt = \frac{U_0^2}{4\alpha L^2} \cdot \frac{1}{\alpha^2 - \beta^2} \cdot R_{sp} \quad (17)$$

电火花声源的转换效率 $\eta_0$ 为:

$$\eta_0 = \frac{E_r}{E_e} = \frac{R_{sp}}{R} \quad (18)$$

电火花声源的电声效率等于:

$$\eta_{sa} = K \cdot \eta_0 = K \cdot \frac{R_{sp}}{R} \quad (19)$$

系数 $K < 1$ , 表示有一部分能量转变为化学能, 物质汽化和热能等。 $K$  随介质特性、电极结构形式、工作电压等因素的不同而不同。

对于周期性放电, 其电声效率也能得到上述结果。

从上式可知, 为了提高声能量的辐射, 可采用下述两种方法:

1) 改变介质特性、放电电极结构形式和

正负极间距, 从而增加 $R_{sp}$ ;

2) 尽可能提高储能器上的工作电压, 降低放电回路中的电感量及电路中的损耗电阻。

火花放电可分三个阶段:

1) 泄漏阶段: 当开关 $S$ 接通后到水下电极击穿前的阶段。这时, 未形成放电通道;

2) 击穿阶段: 此时形成放电通道, 电流显著增加, 而电压下降, 当电流达到最大值附近产生冲击波;

3) 气泡运动阶段: 此时放电结束, 但是, 高温高压气团继续作膨胀、收缩运动, 不断地向周围辐射气泡声脉冲, 直至能量耗尽。

水下火花放电声辐射特性, 不但与电极的结构、形式有关, 而且与电极的沉放深度有关, 所以放电电极在工作时应保持在一定深度。电极沉放深度与电极重量、船的航行速度、电缆的放出长度、电缆的拖曳角度及阻力等因素有关<sup>[7]</sup>。

## 四、声源的频谱及实验结果

### 1. 声源的频谱

电火花声源是一种非炸药的宽带低频爆炸震源。本系统的主频在50~90赫之间, 频谱分布在几十赫到几千赫。在多次测量中所得到的水下火花放电声脉冲的典型实测的压力-时间波形, 见图5。

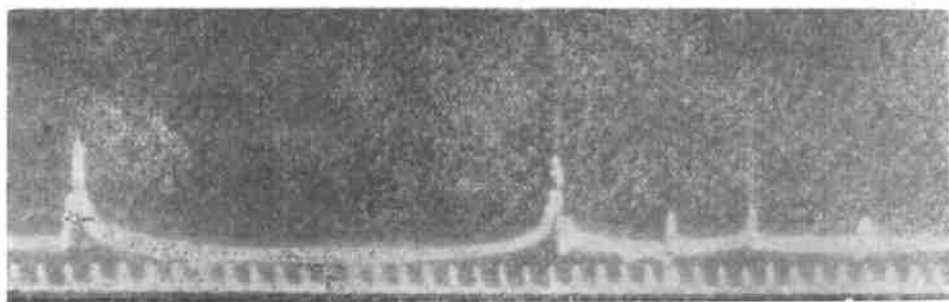


图5 典型的实测压力-时间波形(时标每格1毫秒)

图中第1个脉冲是激波，第2个脉冲开始是气泡脉动辐射出的声脉冲。

在“向阳红”07号船上，由1/3倍频程滤波器直接测量了相同沉放深度、相同工作电

压、不同贮能量的声压谱级；相同贮能、相同工作电压、不同沉放深度的声压谱级等。在贮能为21000焦耳，工作电压为8.2千伏，沉放深度为4.5米，测得的声压谱级见图6。

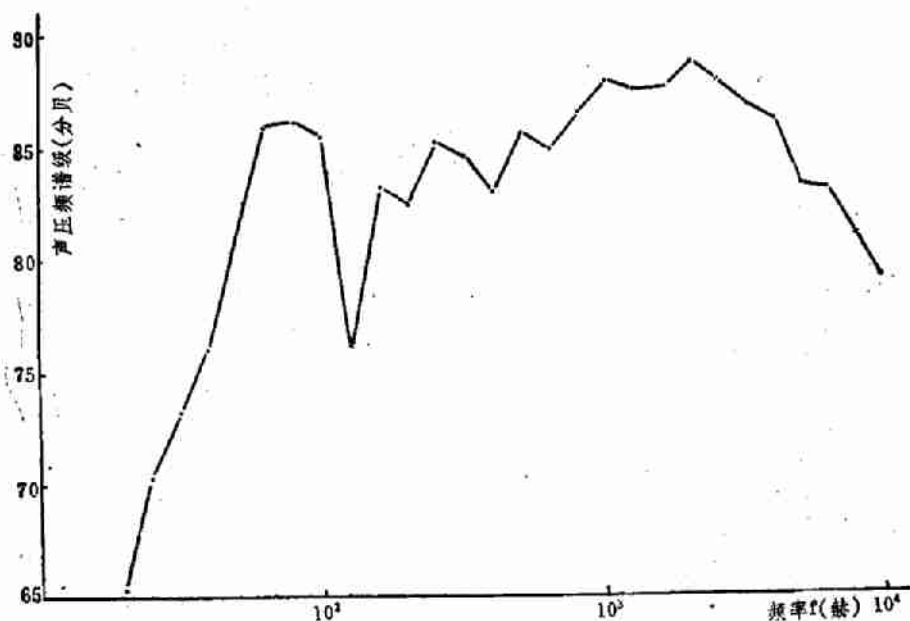


图6 声压频谱图

实测的声压谱级在300赫以内与用“斜率法”及“指数函数近似法”计算所得的声能谱级能较好地符合<sup>[5]</sup>。

## 2. 试验结果

KQY-D1深地层剖面仪装上“向阳红”07号船之后，于去年年底进行了第一次海上地层勘探试验。在贮能量为21000焦耳、工作电压8.2千伏、船的航速4.3节、水深30米以上情况下，由单道接收，模拟纪录，直接在干式纪录纸上连续描绘出地层结构，见图7。

从而可以看到在船的自身辐射噪声较大的情况下，测出600米左右的地层反射纪录，而且层次清楚，连续性好。

## 五、结束语

经过一昼夜的海上连续工作（放炮间隔

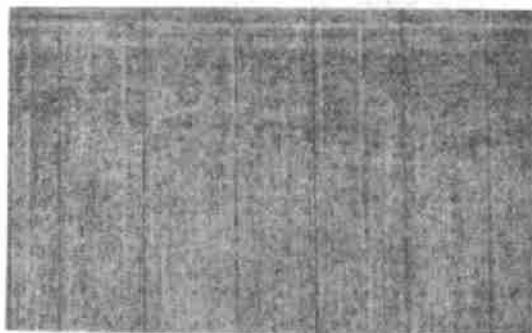


图7 海底地层剖面图

为6秒)，未出现故障，从而表明电火花声源系统安全可靠。对于海洋开发来说，电火花声源是一种较常用的震源，特别对于中浅层剖面仪来说，电火花声源是十分适用的。

随着电火花声源的广泛应用，现在较多的采用比较复杂的多电极结构形式，以提高声辐射效果。经过初步试验表明，若贮能量相同，多电极在100赫以下辐射的声压谱级

(下转第31页)

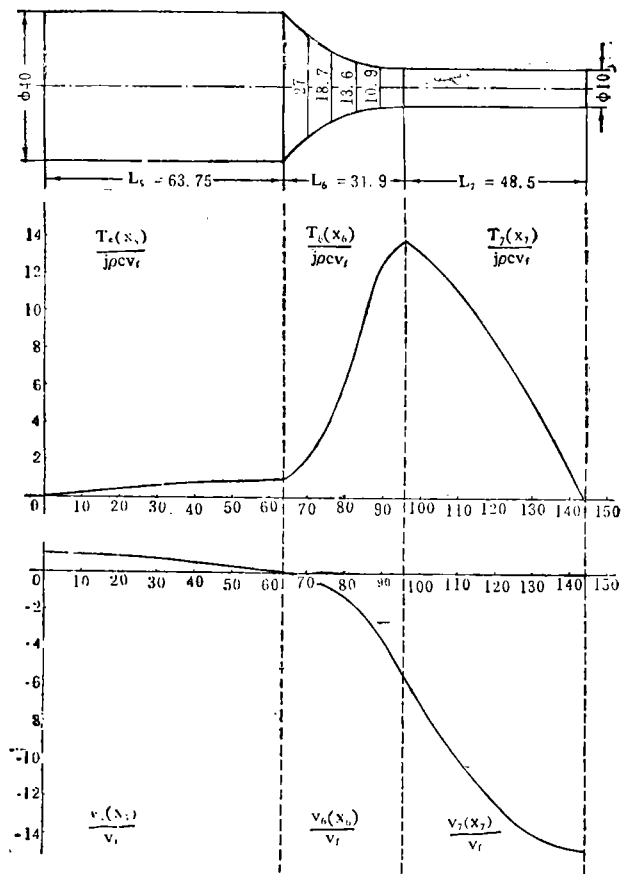


图 13 用双曲函数形平滑的阶梯形聚能器振速和应力分布图

(上接第 20 页)

可提高 2—6 分贝，而且第一气泡脉冲与激波的幅度比下降约一半。

最后，对在电火花声源的整个研制和测试过程中曾给以指导和帮助的张叔英、任来法、郑昌武、朱圣钦、华祖根、孙林和酆斌等同志表示衷心的感谢。还有海洋局三所陈金根同志也参加了电火花声源研制工作。

### 参 考 文 献

[1] Weston, D. E., "Underwater Explosions as Acoustic Sources" *Pro. Phys. Soc.* 26(1960) pp.233-249

[2] Caulfield, D. D., "Improvements in the Continuous Seismic profiler" *Geophysics* 30 (1965) pp133-138.

[3] 海洋石油勘探指挥部地质调查处, 中国科学院电工研究所“电火花震源”, 《海洋石油》, 第 1 期(1977)第 1—25 页。

[4] 浙江大学电机工程系, 《电工学》人民教育出版社, 1960 年第 41—43 页。

[5] 凌鸿烈等, “水下火花放电声辐射特性的实验研究” 《海洋技术》, 第四期(1982)。

[6] Caulfield, D. D., "Predicting Sonic Pulse Shape of Underwater Spark Discharge" *Deep-Sea. Res.* 9(1962) pp339-348.

[7] Pote Leonard, "Tables for Computing the Equilibrium Configuration of A Flexible Cable in A Uniform Stream" AD-607448.