

等离子体震源及在海洋勘探中的应用

严 辉^{1,2}, 黄逸凡^{1,2}, 裴彦良³, 刘 振^{1,2}, 王揆洋³, 刘保华⁴, 闫克平^{1,2}

(1. 浙江大学生物质化工教育部重点实验室, 杭州 310027;

2. 浙江大学化学工程与生物工程学系, 杭州 310027;

3. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 4. 国家深海基地管理中心, 青岛 266061)

摘要: 为了满足现代海洋高分辨率地震勘探对发射震源在声信号特性、重复性、稳定性等方面的要求, 介绍了一种等离子体震源(PSS)系统及其在该方面的应用。针对基于海水中脉冲电晕放电技术开发的等离子体震源设备, 分别从电路基础分析、等离子体放电过程和气泡脉动、脉冲声波辐射 3 个方面进行了理论分析和实验研究, 给出了单电极条件下电源能量效率、气泡脉动、声波辐射的实验结果。同时介绍了近 9 a 来等离子体震源的研发历程, 单脉冲能量为 500 J、10 kJ、50 kJ 等典型样机的设计参数和设备特点, 阐述了设备在高分辨率海洋地震勘探领域的成功应用, 以及在水声领域的应用前景。

关键词: 等离子体震源 (PSS); 海洋勘探; 水中放电; 等离子体; 气泡脉动; 声波辐射

DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.07.026

文章编号: 1003-6520(2012)07-1711-08

Plasma Seismic Source and Its Application in Oceanic Seismic Exploration

YAN Hui^{1,2}, HUANG Yifan^{1,2}, PEI Yanliang³, LIU Zhen^{1,2}, WANG Kuiyang³,

LIU Baohua⁴, YAN Keping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Biomass Chemical Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

4. National Deep Sea Center, Qingdao 266061, China)

Abstract: To meet the requirements of modern marine high resolution seismic exploration where sound source can generate repetitive, stable and specific acoustic emission, plasma seismic source (PSS) for marine high resolution seismic exploration is described which is based on plasma corona discharge in sea water. Intensive shockwaves are produced when electrical energy stored in capacitors is dumped through electrohydraulic discharge. Pulsed power technology, pulsed corona discharge process, dynamics of bubble oscillation and acoustical emissions are theoretically and experimentally studied. Experimental results of power efficiency of power source, bubble dynamics and acoustical emissions are presented and discussed. After 9 years research and development, PSS has been successfully applied in high resolution seismic exploration, showing a good prospect in underwater acoustic applications. Three typical prototypes of PSS with discharge energies of 500 J per pulse, 10 kJ per pulse and 50 kJ per pulse have been developed, their parameters and advantages are also presented.

Key words: plasma seismic source (PSS); seismic exploration; underwater discharge; plasma; bubble oscillation; acoustic emission

0 引言

海洋地质勘探是关系到国民经济发展及国家战略安全的重要活动, 目前, 大多数海洋地质勘探都采用声学探测的方法。在声学探测中, 用于产生强脉

冲压力波的声源, 一般称为震源, 是至关重要的设备。早期工程人员使用炸药进行水下爆炸作为爆炸源来进行海洋地震勘探, 由于安全性和稳定性等问题, 使得爆炸声源逐渐被其他声源系统取代, 如电火花、水枪、气枪等。针对海洋浅地层的高分辨率勘探, 炸药、水枪、气枪等声源往往由于声波波形复杂、无法快速重复发射等原因而无法满足要求。随着高电压技术的发展, 利用水中脉冲放电产生脉动气泡而形成声波辐射的方法逐渐得到发展并应用, 如电火花震源^[1-2]。

基金资助项目: 国家自然科学基金(11005091); 科技部科研院所专项资助(201112B777)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (11005091), Ministry of Science and Technology of China (201112B777).

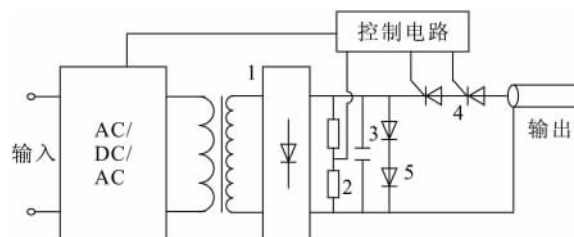
在电火花声源中,脉冲电源产生的高压脉冲经过传输线输送到发射电极并引发水下高压脉冲放电。从放电形式上区分,水中高压脉冲放电可分为脉冲电弧放电和脉冲电晕放电。传统的电火花震源主要采用脉冲电弧放电的形式,其主要特点是在 2 个间距很近的电极之间形成电弧通道。脉冲电弧放电的工作电压高,峰值电压一般 >10 kV,其主开关一般采用火花隙开关,存在电气安全性差、输出波形不稳定以及开关寿命、电极寿命较短的问题。由于诸多原因,基于脉冲电弧放电的电火花震源很难在高分辨率或超高分辨率的地震勘探工程中得到应用。因此新的电火花震源主要采用脉冲电晕放电。国内中科院电工研究所报道了相关脉冲电晕放电的研究成果^[3-5]。脉冲电晕放电电极间没有形成放电通道,等离子体仅形成于场强较大的电极尖端。其放电在电导率高的海水中非常容易形成,并且重复性优于脉冲电弧放电。目前,基于此种形式的放电,国外已有多家公司研制的新一代电火花震源系统用于高分辨率的海洋勘探,如荷兰 Geo-Resource 公司和法国 SIG 公司的产品。

“十五”和“十一五”期间,课题组分别研制开发了基于脉冲电晕放电的单脉冲能量为 500 J 和 10 kJ 的新一代电火花震源,并称之为“等离子体震源”。等离子体震源基于大功率半导体开关器件和多电极发射阵技术,解决了传统电火花震源在工程应用中的缺陷,主要是开关和放电电极的使用寿命短以及辐射声波的重复性差等方面。本文将从基本原理和设备研发应用情况两方面,结合实验室相关基础研究,对等离子体震源进行介绍。

1 基本原理

1.1 等离子体脉冲电源

等离子体震源是一种水下短脉冲声源,其基本过程是电容储能通过水中高压脉冲放电的机械效应产生强脉冲声波。其系统一般由 3 部分组成:脉冲电源、传输线、发射电极(阵)。脉冲电源是其中最为关键的部分,其工作原理是采用电容储能,通过触发放电开关瞬间释放能量,输出高功率电脉冲从而实现在水体中进行等离子体放电。脉冲电源的主要工作原理如图 1 所示。电源首先将工频交流电转换成中高频交流电,再通过变压器升压和硅堆整流形成高压直流输出对储能电容进行充电,充电完成后,由控制电路控制触发大功率半导体开关导通,储能电容通过传输线对负载进行放电。电源采用负高压放



1—充电电路;2—高压分压器;3—储能电容;

4—大功率半导体开关;5—续流二极管

图 1 脉冲电源主回路电路图

Fig. 1 Schematic Diagram of pulsed power source

电,能有效减少放电电极的烧蚀。

由于半导体开关技术的发展与成熟,为使电源能适应复杂苛刻的海上工作环境,本脉冲电源使用大功率半导体开关替代火花隙开关。相对火花隙开关,半导体开关运行电压低,电气安全性好,同时输出更为稳定,器件寿命更长,从而更适合工程应用。

并联在储能电容两端的大功率二极管,可以实现电流的单脉冲输出,消除电流振荡,减少电磁辐射对其他电子设备的干扰。该过程简化电路如图 2 所示, D 为续流二极管。当放电回路处于欠阻尼状态时,电容储能通过 RLC 回路放电完毕,其电压先于电流达到零点,并开始反方向充电,此时二极管两端因存在正向电压而导通,回路电感储能通过 RLD 回路继续放电,由此该电源输出呈现单脉冲特性。放电过程可由以下 2 个方程描述,方程(1)对应于 RLC 放电过程,方程(2)对应于 RLD 过程:

$$L \frac{di(t)}{dt} + (R_0 + R_L)i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = U_0; \quad (1)$$

$$L \frac{di(t)}{dt} + (R_0 + R_L)i(t) = 0. \quad (2)$$

式中, $i(t)$ 为回路中的电流; C 为储能电容; L 为回路电感; R_0 为回路内阻; R_L 为负载阻抗; U_0 为电容充电电压。储能电容 C 和电容充电电压可以进行调整,以实现不同能量放电。在特定的电源配置中,放电时回路内阻 R_0 和回路电感 L 可以确定为定值,不随时间变化。由于水体负载在放电过程中产生加热气化、等离子体产生与溃灭、气泡缩胀等过程,负载阻抗 R_L 随时间变化,先变小后变大。因此上述 2 个方程均为变系数微分方程,若没有 R_L 的确切表达式,则无法得到方程的解析解。在实验中,负载阻抗可由测得的电压电流计算而得,单电极放电、放电能量为 30 J、电极直径 1.4 mm、水体电导率为 53 mS/cm 的条件下,测得负载阻抗的最小值约为 10Ω ,该值明显大于相同条件下脉冲电弧放电时的负载

阻抗。

典型放电电压电流波形如图 3 所示。当储能电容能量为 30 J,即储能电容为 $2 \mu\text{F}$ 、充电电压为 5.5 kV 时,负载上测得的峰值电压约为 3.9 kV,峰值电流约为 230 A,他们的半高宽度(full width half maximum,FWHM)分别为 23、38 μs 。该电路输出在相同的工作条件下具有很高的重复性,从而保证了作为震源使用时输出声信号的重复性。

在工程应用中,为了获得较高的声源级,等离子体震源往往使用多个电容并联以储存更大的电能,如数 kJ 级别或数十 kJ 级别。在大能量放电时,很大部分电能将会在线路中损耗,因而电源能量效率不得不加以考虑。在实验室内,利用较小的储能电容进行单电极放电实验可对小能量等离子体震源样机的电源效率进行考察。该实验使用长为 10 m 的 4 芯传输线,放电电极直径和水体电导率如前所述,电导率用食盐进行调节,储能电容分别使用 $1 \mu\text{F}$ 和 $2 \mu\text{F}$ 2 种,其实验结果如图 4 所示。其中使用 $2 \mu\text{F}$ 储能电容、放电能量为 30 J 时的充电电压与使用 $1 \mu\text{F}$ 储能电容、放电能量为 15 J 时的充电电压相等,以此类推。能量效率定义为负载能量与放电能量的百分比。由图 4 可以看出,负载能量随着放电能量的增加而增加,但是电源的能量效率随之下降。当储能电容为 $2 \mu\text{F}$ 、单脉冲放电能量为 5 J 时,电源能量效率为 76.9%;而当单脉冲放电能量为 30 J 时,能量效率下降为 52.9%。同样,当储能电容为 $1 \mu\text{F}$ 、单脉冲放电能量为 2.5 J 时,电源能量效率为 45.8%;而当单脉冲放电能量为 15 J 时,能量效率下降为 28.2%。这是因为,当充电电压提高时,回路中的放电电流会随之增大,负载中的等离子体放电更为强烈,造成负载阻抗下降,因此负载中所分配到的能量比例下降。同时,由图 4 还可以看出,在相同的充电电压条件下,使用较大的储能电容会使电源效率有非常明显的提高。

1.2 放电过程与气泡脉动

水中放电的理论远没有空气放电理论完善,一般认为由于水分子数密度较大(约 0.05 mol/cm^3),电子在 ps 级的时间尺度上就会发生陷阱化,形成水合电子,电子雪崩理论无法适用,因此有学者提出热模型^[6]和质子迁移理论^[7]。对于电压较低、电极间距较大、水体电导率较高的脉冲电晕放电,热模型的解释较为合理。在电极尖端,由于场强相对较大,电流密度大,尖端附近的水层被电加热汽化而形成气泡,气泡中粒子密度相对较低,电子的平均自由程较

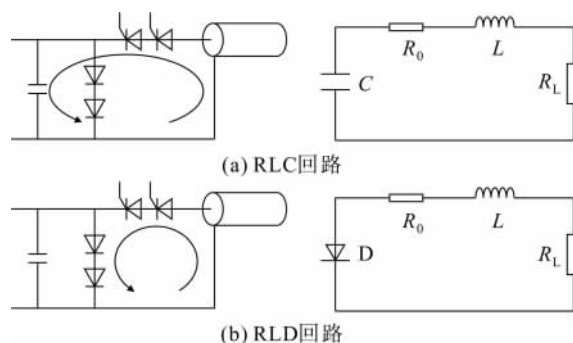


图 2 RLC 回路和 RLD 回路放电示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of RLC and RLD circuit discharge

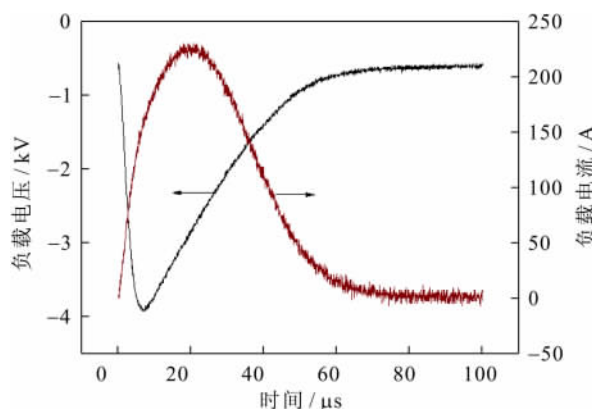


图 3 负载电压电流实测波形

Fig. 3 Typical voltage and current waveforms measured on the load

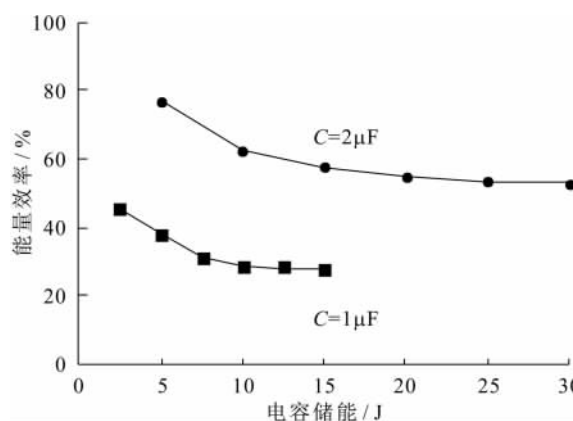


图 4 能量效率与放电能量、储能电容的关系

Fig. 4 Relationships between energy efficiency and discharge energy

长,因而有足够的能量引发电子雪崩而产生等离子体放电。

等离子体生成时,气泡壁因内部高温高压向外膨胀,克服水静压、表面张力、粘滞力等外力对周围水体做功。随着气泡内部等离子体逐渐熄灭,内部温度开始下降,内部压强也随之下降,气泡壁的向外

运动速度变小,直至速度为零,此时气泡内部压强远小于水静压,气泡开始收缩,在收缩过程中,内部压强再次变大,如此往复即形成气泡脉动。

水中气泡脉动的理论模型研究,在空化、水下爆炸等领域已经有相当长的研究历史^[8]。早在 1917 年 Rayleigh 就建立了基于空穴且水体不可压缩的气泡脉动模型^[9]。在此基础上逐渐发展起来的有 Rayleigh-Plesset 模型^[10-11]、Gilmore 模型^[12]和 Keller-Miksis 模型^[13]。Fujikawa 和 Akamatsu 建立了气泡为开放系统、气泡壁上存在传质和传热过程的脉动模型^[14],Vokurka^[15]、Cook^[16]、卢新培^[17]等针对脉冲火花放电产生的气泡(直径介于水下爆炸产生的气泡直径和声空化气泡直径之间)建立了相关模型。

等离子放电产生气泡脉动较为复杂,气泡内存在相变过程,气泡壁也存在传质和传热过程,利用上述理论模型在描述气泡脉动时存在一定偏差,尤其是 2 次及多次脉动。因此,高速相机摄影成了一种行之有效并且被广泛使用的气泡动力学研究方法,目前大多采用阴影法^[18-19]。

图 5 是在实验室中采用高速相机对单电极条件下的气泡脉动过程的摄影记录,采用 NAC 的 Memrecam fx6000 高速相机,拍摄帧速为 10 000 幅/s。图中 t 代表时间,2 cm 为参考尺度。图 6 显示了不同放电能量下气泡的脉动过程,其中 $E_{\text{discharge}}$ 代表放电能量,由此可见,放电能量越大,产生的气泡越大,脉动周期也随之越长。在单电极放电能量为 5~30 J 范围内,气泡的最大直径为 15~25 mm,1 次脉动周期为 1.5~2.5 ms。图 7 显示了气泡体积与负载能量之间的关系,无论使用 1 μF 还是 2 μF 储能电容,气泡体积与负载能量在放电能量为 2.5~30 J 之

间均存在比较好的线性关系,图 7 中方程为气泡体积 y 与负载能量 x 的线性拟合方程,回归系数 R^2 为 0.9991。负载能量只是影响气泡体积的因素之一,此外还有放电电极直径、水体静压、水体温度等。

1.3 脉冲声波辐射

水体中脉冲声波辐射由气泡脉动产生。在气泡膨胀初始和坍塌时,内部压强非常大,产生的是压力波;而气泡半径较大时,内部压强小于水静压,此时产生的是稀疏波,稀疏波集中了低频部分的声能^[20]。气泡脉动过程具有周期性,脉动次数及周期大小由气泡本身具有的能量和水静压条件决定。能量大则脉动次数多,周期长;水静压大则脉动次数少,周期短。一般而言,第 1 个脉动过程较为稳定,产生声波辐射重复性较高,而多次脉动产生的气泡形状不是规则球形,声波辐射较弱,重复性也随之下降。等离子震源采用的单电极能量一般 $< 50 \text{ J}$,以减少气泡脉动过程,提高声波辐射重复性。

图 8 为单电极放电条件下不同放电能量时的声波辐射,放电能量为 5~30 J,测试水听器距离放电电极 8 cm。由图 8 可看出声波具有多个峰值,第 1 个峰值为气泡膨胀阶段的压力波,第 2 个峰值为气泡压缩产生的压力波,且明显强于前者,第 3 个峰值为气泡 2 次脉动压缩产生的压力波,该峰值比前 2 者都弱。由于基础频率为脉动周期的倒数,气泡的脉动周期越长,产生声辐射的基础频率越低。因此,随着放电能量增大,脉动周期延长,声波辐射的频率逐渐降低,主频由约 600 Hz 降为 400 Hz,这在一定程度上使等离子体震源能够利用放电能量来调整震源的频率特性。

然而利用单电极放电产生的声波辐射在强度及

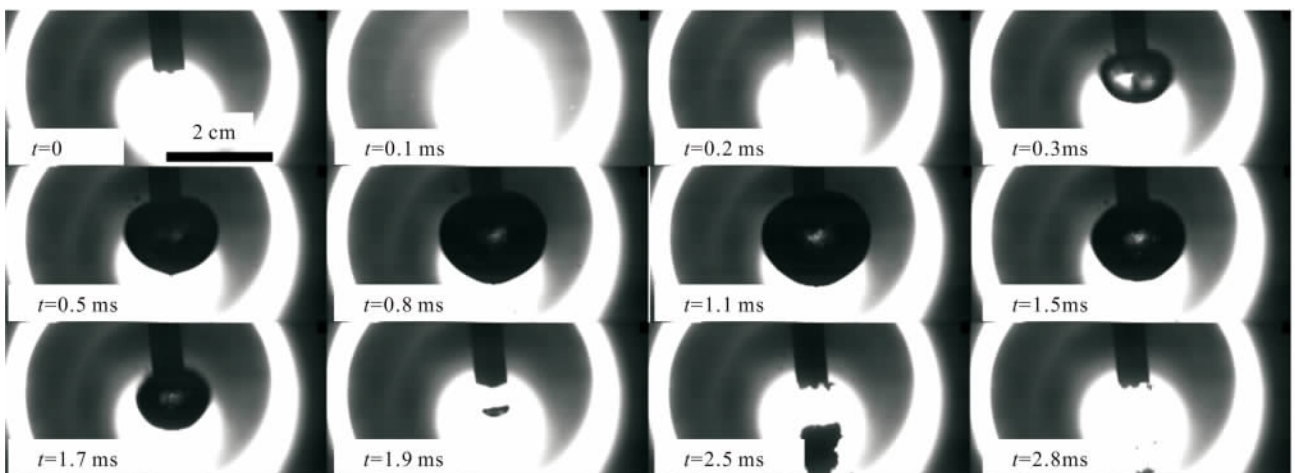


图 5 单电极放电的典型气泡脉动过程高速摄影选幅

Fig. 5 Typical oscillation of a single bubble at the discharge energy of 10 J per pulse

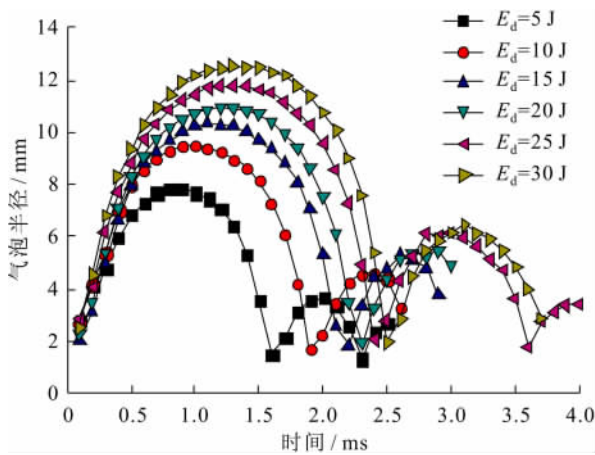


图 6 不同放电能量时脉动过程中的气泡半径
Fig. 6 Bubble radius in bubble oscillations

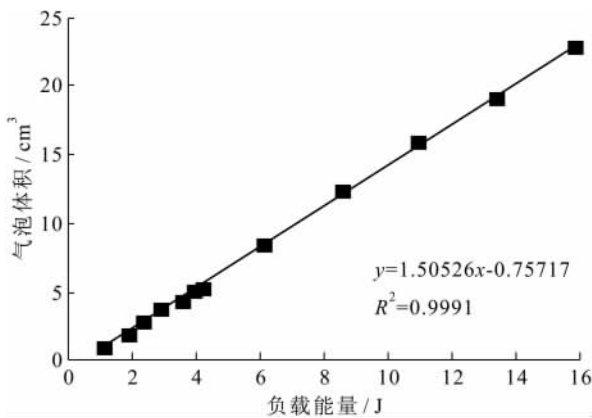


图 7 气泡体积与负载能量的关系
Fig. 7 Relationships between bubble volume and load energy

频率调整范围上都非常有限,并且是无指向性发射,会造成声能量的浪费。因此在实际应用中,等离子体震源利用多电极成阵的原理形成发射阵,以提高声源级并且形成指向性发射。由于等离子体震源采用的是脉冲电晕放电,因此每个电极上能够平均获得能量,并产生气泡脉动和辐射脉冲声波,这是多电极成阵的基础,而以电弧放电为基础的传统电火花声源很难实现这点。发射阵一般可由数十、数百甚至数千个放电电极组成,阵形可以根据实际应用需求设计成平面阵、圆柱阵等多种发射阵。

2 设备研发与应用

从 2003 年开始研发至今,等离子体震源已经走过近 9 a 的技术研发历程,技术日趋成熟,设备性能日趋稳定,并且已经研制出相关样机。在此期间,2 大关键性问题得以解决:①利用固态储能电容、固态半导体开关实现震源设备的固态化,并利用单片机

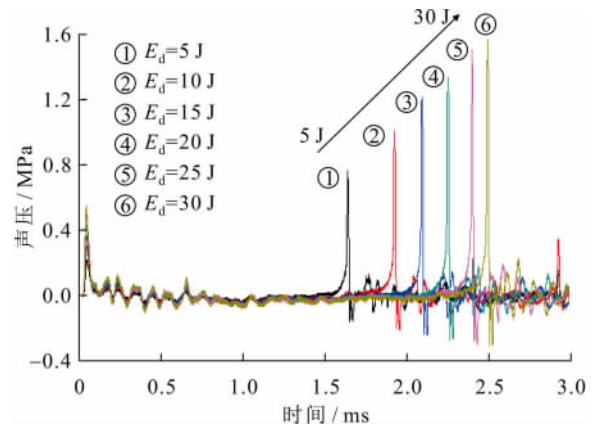


图 8 不同放电能量时的声波辐射
Fig. 8 Acoustic emissions with different discharge energies

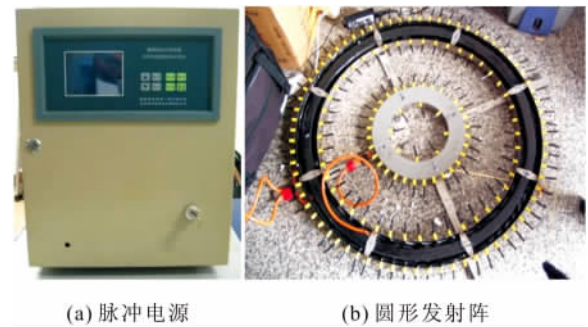


图 9 500 J 等离子体震源系统
Fig. 9 500 J plasma seismic source system

控制震源输出能量和重复频率,使等离子体震源能够在海洋环境中实现长时间稳定;②利用多电极成阵原理设计合理的发射阵,控制震源声源级、频率及指向性,保证等离子体震源在海洋勘探中对于深度、分辨率的要求。

设备研发方面,除了在国家课题资助下研发的单脉冲能量 500 J、10 kJ、50 kJ 系统外,还有单脉冲能量 30 J、50 J、1 kJ、3 kJ、6 kJ、20 kJ 等相关设备。其中几种主要不同能量系统的设计参数及样机实物照片分别如表 1、图 9、图 10 所示。图 9(a)为 500 J 等离子体脉冲电源,图 9(b)为圆形发射阵。图 10(a)为 10 kJ 等离子体脉冲电源,图 10(b)为脉冲传输线,图 10(c)为 800 电极的平面发射阵。

在“十五”和“十一五”期间,针对浅海浅地层和深海浅地层的高分辨率勘探,我们分别在 2005 年和 2008 年成功研发了单脉冲能量为 500 J 和 10 kJ 的等离子体震源系统,不仅摆脱了长期以来依赖进口设备的局面,而且实现了完全国产化。目前等离子体震源主要用于海洋高分辨率地震勘探,已经在国家多个核电厂厂址选址、跨海大桥、海底隧道地质勘探调查等多个重大工程建设中实现了工程应

表 1 等离子体震源设备研发过程和设计参数

Table 1 Parameters of plasma seismic source developed in the recent years

参数	2005 年单脉冲能量 500 J	2008 年单脉冲能量 10 kJ	2009 年单脉冲能量 50 kJ
总电容/ μF	35	500	1 000
电容充电电压/kV	5.6	5.6	10
平均输出功率/kW	1	20	100
脉冲重复频率/Hz	1	0.3~1	0.3~1
芯数	4	8	4×8
传输线	直径/mm	26.5	46.5
	线长/m	50	100
	类型	环形	方阵
发射阵	电极数	156	800
	直径/mm	1.4	1.4
声源级/dB	约 215	约 220	约 223(20 kJ 发射时)
主工作频段/kHz	1~1.5	0.4~1.3	0.4~0.6

注:声源级指的是距声源 1 m 处的辐射声压与水中基准声压(10^{-6} Pa)之比的常用对数乘以 20。

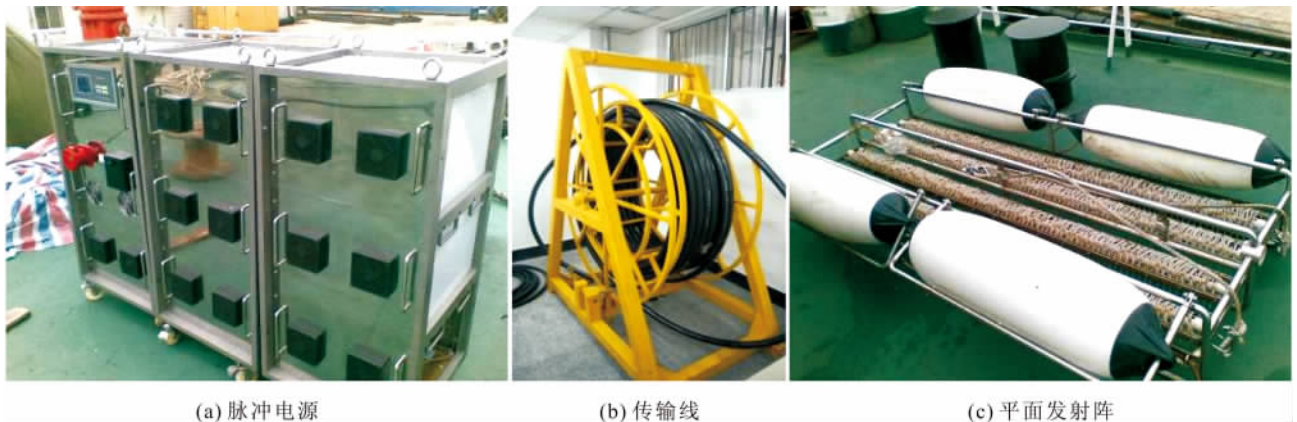


图 10 10 kJ 等离子体震源系统

Fig. 10 10 kJ plasma seismic source system

用。图 11 为 2010-09 在我国南海北部某海域利用等离子体震源测得的地震剖面图。

除了在海洋地震勘探上的应用外,等离子体震源在水声领域也有很广的应用前景,如远程探测、远程通讯、强声对抗、信道测量等。

3 结论

1) 等离子体震源实现了单脉冲输出,能量效率随储能电容充电电压升高而下降,并且提高储能电容能提升电源效率。

2) 放电能量影响气泡脉动的强度与脉动周期,并且气泡体积与负载能量在一定能量范围内存在线性关系。

3) 气泡脉动所产生声辐射的频率特性由气泡脉动周期决定,其基频为脉动周期的倒数,周期越长,

声辐射频率越低。而脉动周期受到放电能量影响,能量越大,气泡脉动周期越长。利用调整放电能量或多电极发射阵可以调节等离子体震源的声源级或声波频率特性。

4) 等离子体震源采用基于固态电容、固态半导体开关的全固态技术,实现了设备的全固态化,以满足海洋环境应用的要求,不仅填补了国内相关设备的空白,而且很好地服务了国民经济。在水声和其他相关领域,等离子体震源也有很好的应用前景。

5) 在等离子体震源的未来发展中,提高设备单位体积能量密度、进一步探索电声转化机理、提高震源声源级和扩大频率调节范围等方面有着非常大的发展空间。

参考文献 References

[1] Cannelli G B, D'Ottavi E, Santoboni S. Electroacoustic pulse

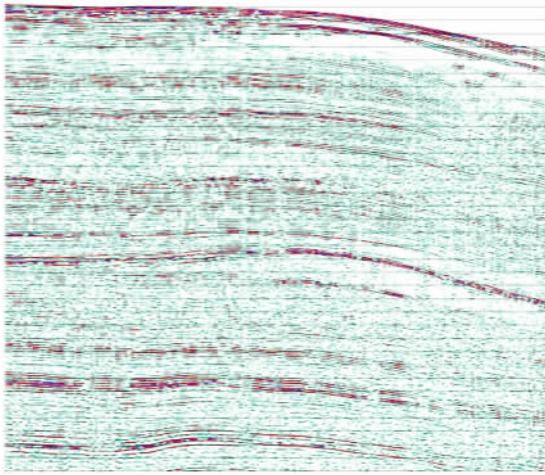


图 11 地震剖面图实例(2010年9月南海北部海域)

Fig. 11 Example of seismic profile image (measured in the north of South China Sea in September 2010)

source for high-resolution seismic explorations [J]. Review of Scientific Instruments, 1987, 58(7): 1254-1261.

[2] 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. Pulsed high voltage discharge and its application[M]. Beijing, China: Beijing Industrial University Press, 2000.

[3] 左公宁. 水中脉冲电晕放电的某些特性[J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 37-38.
ZUO Gongning. Some properties of the impulse corona discharge in water[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(8) : 37-38.

[4] 金明剑,孙鹤鸿. 不同参数条件下水中脉冲放电的电学特性研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 46-49.
JIN Mingjian, SUN Yaohong. The electrical characteristics of underwater pulsed discharge under different experiment parameters[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 46-49.

[5] 刘 强,孙鹤鸿. 水中脉冲电晕放电等离子体特性及气泡运动[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 54-56.
LIU Qiang, SUN Yaohong. Plasma characteristics of pulsed corona discharge in water and moving process of the bubble[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 54-56.

[6] Lisitsyn I V, Nomiya H, Katsuki S, et al. Thermal processes in a streamer discharge in water[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(3): 351-356.

[7] Rogers R L, Espinosa J C, Fisher D L, et al. Plasma sound source basic research[R]. Austin, Texas, USA: The University of Texas at Austin, 1999.

[8] Lauterborn W, Kurz T. Physics of bubble oscillations[J]. Reports on Progress in Physics, 2010, 73(10): 106501.

[9] Lord Rayleigh. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. Philosophical Magazine Series 6, 1917, 34(200): 94-98.

[10] Plesset M S, Prosperetti A. Bubble dynamics and cavitation [J]. Annual Review on Fluid Mechanics, 1977, 9: 145-185.

[11] Lauterborn W, Bolle H. Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighbourhood of a solid boundary [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 72(2): 391-399.

[12] Gilmore F R. The growth or collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid[R]. Pasadena, California, USA: Hydrodynamics Laboratory, California Institute of Technology, 1952.

[13] Keller J B, Miksis M. Bubble oscillations of large amplitude [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68 (2): 628-633.

[14] Fujikawa S, Akamatsu T. Effects of the non-equilibrium condensation of vapour on the pressure wave produced by the collapse of a bubble in a liquid[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 97(3): 481-512.

[15] Vokurka K. A model of spark and laser generated bubbles[J]. Czech Journal of Physics B, 1988, 38(1): 27-34.

[16] Cook J A, Gleeson A M, Roberts R M, et al. A spark-generated bubble model with semi-empirical mass transport[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101(4): 1908-1920.

[17] LU Xinpei, PAN Yuan, LIU Kefu, et al. Spark model of pulsed discharge in water [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(1): 24-31.

[18] HUANG Yifan, YAN Hui, LI Shuran, et al. Multi-electrode electrohydraulic discharge for sterilization and disinfection[C] //IEEE Pulsed Power Conference. Washington D. C., USA: IEEE, 2009; 886-891.

[19] YAN Hui, HUANG Yifan, LIU Zhen, et al. Plasma-generated multibubbles in water and their dynamics[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 2656-2657.

[20] Martin E A. Experimental investigation of a high-energy density, high-pressure arc plasma[J]. Journal of Applied Physics, 1960, 31(2): 255-267.



YAN Hui
Ph. D. candidate

严 辉
1984—,男,博士生
研究方向为水中脉冲放电及在海洋领域的应用
E-mail: 11028007@zju.edu.cn



HUANG Yifan
Post-doctorate

黄逸凡
1982—,男,博士(后)
研究方向为水中脉冲放电及在海洋领域的应用
E-mail: huangyf@zju.edu.cn



裴彦良
1977—,男,博士,高工
研究方向为海洋地球物理
电话:(0532)88967483
E-mail: peiyanliang@fio. org. cn

PEI Yanliang
Ph. D.
Senior engineer



刘保华
1960—,男,博士,研究员、博导
研究方向为海洋地球物理
电话:(0532)88963627
E-mail: bhliu@fio. org. cn

LIU Baohua
Ph. D. , Professor



刘 振
1978—,男,博士,副教授
研究方向为脉冲功率技术
电话:(0571)88273897
E-mail: zliu@zju. edu. cn

LIU Zhen
Ph. D.
Associate professor



闫克平
1962—,男,博士,教授,博导
研究方向为应用低温等离子体,电除尘和脉
冲功率技术
电话:(0571)88220340
E-mail: kyan@zju. edu. cn

YAN Keping
Ph. D. , Professor



王揆洋
1949—,男,研究员
研究方向为海洋地球物理
电话:(0532)88961063
E-mail: wangkuiyang@yahoo. com. cn

WANG Kuiyang
Professor

收稿日期 2012-05-29 修回日期 2012-06-20 编辑 左文霞

《特高压输电技术资料汇编(2007—2010年)》编辑完成

《特高压输电技术资料汇编(2007—2010年)》(交流卷、直流卷、综合卷)编辑完成。该汇编搜集了2007—2010年间1300余篇中、外文献7000余页,可作为特高压输电建设与运行的参考。