

小型等离子体声源在水声领域的应用前景分析

孙庆鹏, 张晓兵, 颜冰, 程颖

(海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 简要介绍了液电效应及等离子体声源的一些基本情况, 并根据实验采集到的不同等离子体声源数据, 选取了其中2组进行分析。对实验采集到的等离子体声源单次脉冲声信号和脉冲串声信号进行了时域信号分析, 通过MATLAB软件计算了信号在不同时刻的能量幅值。随后, 在频域对信号进行频谱分析, 通过FFT变换分析了信号在频域范围内的能量分布。之后, 对信号的功率谱进行了估计, 用PSD算法分析了能量在不同频率上的分布信息, 得出了等离子体声源信号频率范围广、低频能量大的结论。最后, 结合等离子体声源信号频率及能量分布情况, 对等离子体声源在水声领域的应用前景进行了分析。

关键词 等离子体; 声源; 脉冲串

中图分类号 TB56

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2020)01-0024-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.01.005

Application Prospect Analysis on Plasma Source in Field of Underwater Acoustics

SUN Qingpeng, ZHANG Xiaobing, YAN Bing, CHENG Ying

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract In this paper, the basic situation of electro-hydraulic effect and plasma sound source is briefly introduced, and two groups of plasma sound source data in the different groups of plasma sound source data collected by the experiments are selected for analysis. The single pulse acoustic signal and the pulse crosstalk signal collected by the experiments are analyzed in time domain. The energy amplitude of the signal in different time are calculated by MATLAB software. Then, the signal in frequency domain is analyzed, and the energy distribution of the signal in frequency domain is analyzed by FFT transformation. Then spectral analysis is conducted on signals in frequency domain, and PSD is used to analyze the energy distribution information at different frequencies. The conclusion is drawn that the frequency range of the plasma sound source signal is wide and the low frequency energy is large. Finally, the application prospect of the plasma sound source in underwater acoustic field is analyzed in combination with the frequency and the energy distribution of the plasma sound source signal.

Key words Plasma; sound source; pulse train

0 引言

自从前苏联科学家尤特金提出“液电效应”理论^[1]以来, 各国各行业关于等离子体声源理论及应用的研究日趋深入, 目前已经研制出相关产品并

应用于部分行业领域。等离子体声源的脉冲放电可以分为脉冲电弧放电和脉冲电晕放电, 其脉冲放电过程受充电电压^[2]、充电电容、温度、电导率、静压力、电极直径、电极间距等的影响。本文将结合前人理论研究及实践的成果, 简要介绍等离

收稿日期: 2019-09-10

作者简介: 孙庆鹏(1990-), 男, 硕士生, 助理工程师, 主要从事武器系统运用与保障工程研究。

基金项目: 国家自然科学基金(51509252)资助项目。

子体声源脉冲信号采集装置, 对实测的几组实验数据进行分析, 并对等离子体声源的信号特性及应用前景进行分析。

1 等离子体声源脉冲信号采集

等离子体声源脉冲信号采集是在透明塑料水箱中进行的, 其采集装置示意图如图 1 所示。等离子体声源和水听器置于水下同一深度, 离水面的距离为 h , 两者的水平距离为 r , 参数 h 和 r 可以根据需要进行调整。等离子体声源控制端用来控制等离子体声源, 并使其按照要求产生脉冲放电信号。信号采集记录设备用来记录水听器采集到的等离子体声源脉冲信号。

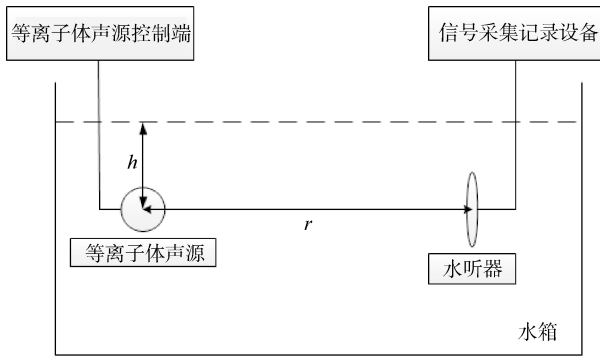


图 1 等离子体声源脉冲信号采集装置

Fig. 1 Acquisition device of Plasma sound source pulse signal

2 等离子体声源时域信号分析

等离子体声源声信号单次脉冲放电持续时间短, 不能被有效利用; 但等离子体脉冲串放电持续时间长, 可以被有效开发使用。本节将对单次脉冲声信号和脉冲串声信号进行时域分析。本节分析所采用的声源数据是作者使用某型水听器采集到的某几型本单位正在使用的等离子体声源的水下脉冲放电实测数据。从采集的信号中可以看出, 不同规格的等离子体声源脉冲放电信号受电极间距、电极尺寸及形状、电容大小、充电电压等因素的影响。

2.1 单次脉冲声信号时域信号分析

选用某次测量的试验数据, 通过 MATLAB 软

件对试验测得的信号进行分析, 画出信号的时域波形如图 2 所示。从图中可以看出, 等离子体声源信号脉冲峰值能达到 2.048 V, 单个脉冲声信号的持续时间约为 150 ms, 其中脉冲放电时间约为 20 ms, 脉冲衰减时间约为 130 ms, 这说明单个水下脉冲声信号持续时间短、声能量有限。

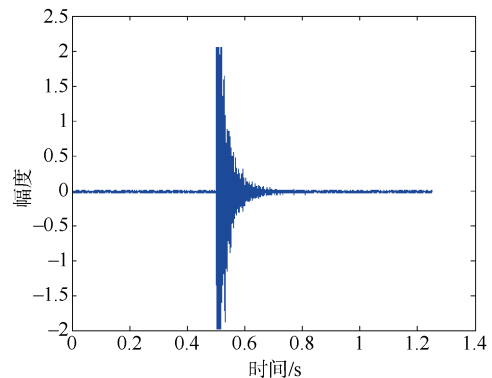


图 2 单个声信号时域图

Fig. 2 Time domain diagram of a single sound signal

2.2 脉冲串声源信号时域信号分析

本小节在进行脉冲串声信号的研究时, 采用的数据是试验获得的另外一种等离子体声源的脉冲放电数据。其目的是与单个信号的时域波形进行比较, 并说明不同参数下的等离子体声源信号的不同。

图 3 是脉冲串声信号及其声源级随时间变化的图形。从图 3 中可以看出, 该型等离子体声源脉冲串声信号的脉冲峰值在时间上相互之间没有影响。这说明只要脉冲放电时间间隔大于每次脉冲放电持续的时间, 脉冲串中的脉冲相互之间就不会产生干扰。当脉冲放电时间间隔过 1 h, 上一次脉冲放电产生的气泡脉动会对本次脉冲放电的气泡脉动产生影响, 信号时域波形也会发生变化。图中所示的脉冲放电时间间隔大约为 4 s。

脉冲串声信号为达到较为理想的效果, 一般脉冲放电时间间隔越小越好、脉冲信号峰值越大越好。但考虑到等离子体声源设备的性能、寿命和应用环境, 在能满足需要的前提下, 脉冲放电时间间隔、脉冲信号峰值选取只要符合使用的条件即可。

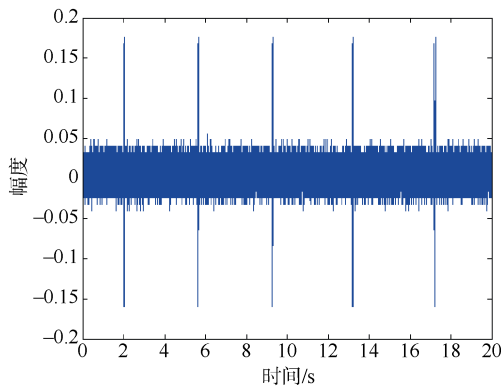


图3 脉冲串声信号时域图

Fig. 3 Time domain diagram of impulse train sound signal

3 等离子体声源频率特性分析

本节将根据上节所选的2组信号及时域信号基本情况,分别对单次脉冲声信号和脉冲串声信号频域特性进行分析。

3.1 单次脉冲声信号频域信号分析

利用快速傅里叶变换,可以将信号从时域转换成频域,并在频域内对信号的频率信息进行分析。图4是对单次脉冲声信号去均值并进行平滑后的频谱图。信号的采用频率是24 kHz。从该图中可以看出,信号频率成分比较丰富,从0~12 000 Hz 都有分布。但信号频率主要集中在800~4 000 Hz 频段内,其峰值频率为1 800 Hz,这个频段也是水下应用较为广泛的频段。

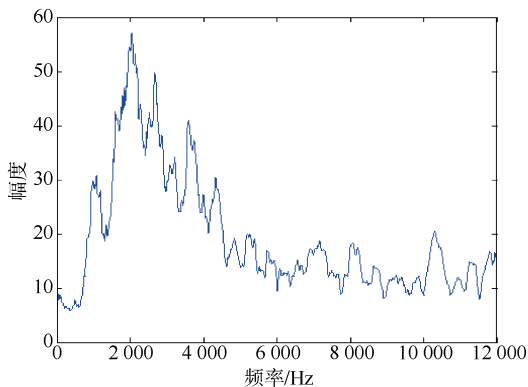


图4 FFT 去均值平滑后变换频谱图

Fig. 4 Fourier transform spectrogram after FFT de-averaging

对单个脉冲声信号进行功率谱估计^[3-5],主要

是看信号在不同频率上的功率分布,同时可以与傅里叶变换的图形进行对比。图5是用 PSD-welch 方法得到的功率谱估计,从图中可以看出,在800~4 000 Hz 信号功率比较强,峰值频率约为1 800 Hz,与傅里叶变化分析的结果相吻合。

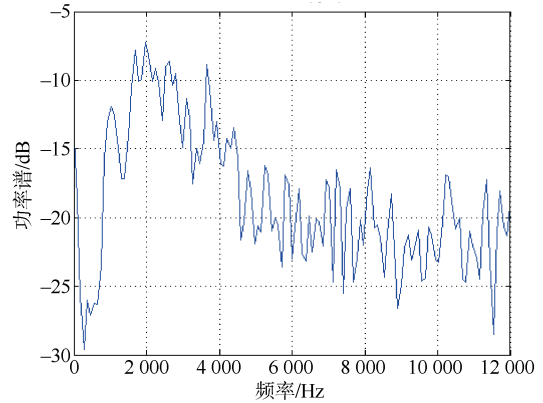


图5 单个信号的 PSD-welch 功率谱估计

Fig. 5 PSD-welch power spectrum estimation of a single signal

3.2 脉冲串声信号频域信号分析

图6是脉冲串声信号去均值并平滑后的频谱图,信号的采用频率为6 250 Hz。从图中可以看出,脉冲串声信号在低频部分能量比较丰富,在频率高的部分能量比较低,信号能量主要集中在2 000 Hz 以内。通过分析不同脉冲放电时间间隔的脉冲串声信号,发现脉冲串声信号的频率分布与脉冲放电时间间隔的选取关系不大。脉冲放电频率越高,在一定放电时间内,信号的总能量越大。

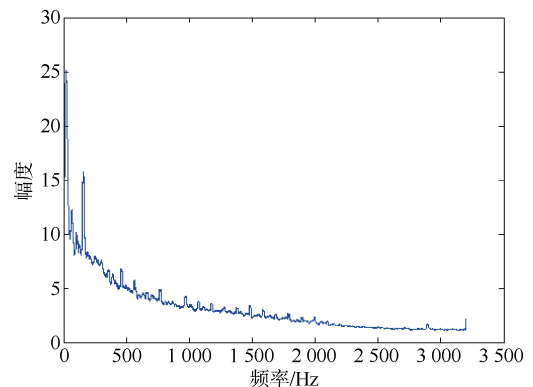


图6 脉冲串 FFT 去均值平滑后变换频谱图

Fig. 6 Fourier transform spectrogram after FFT de-averaging of sound signal impulse train

图 7 是利用 PSD-welch 方法对脉冲串声信号的功率谱估计。从图中可以看出在 0~2 000 Hz 内, 信号能量明显强于其它频率。这说明该种等离子体声源产生的脉冲串声信号在低频范围能量比较丰富。随着频率的增加, 能量是逐渐衰减的。并且, 脉冲放电时间间隔越短, 信号在一定时间内累积的能量越大。其分析结果图傅里叶变化分析的结果相同。

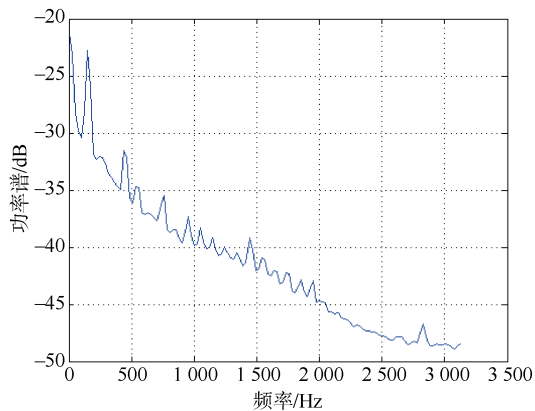


图 7 脉冲串的 PSD-welch 功率谱估计

Fig. 7 PSD-welch power spectrum estimation of sound signal impulse train

4 小型等离子体声源在水声领域的应用前景分析

由前文对单个脉冲声信号及脉冲串声信号的时频特性分析可知, 等离子体声源产生的脉冲声信号频率成分丰富, 通常在某一频率范围内信号能量比较集中。其可以作为水下脉冲声源替代现有的水下炸药爆炸^[6-8]; 作为信号干扰源去干扰敌人的水下探测声呐、水声探测引信; 进行水下探测及定位、水下通信; 充当水下假目标, 应用于水下安防工作; 也可以应用于海洋渔业观察、海洋石油勘探等领域。现就等离子体声源几种简单的应用前景进行分析。

4.1 代替水下炸药爆炸产生声信号

在水下各种声学试验中, 应用较为广泛的声源是水下炸药连续爆炸产生的声信号。尽管水下爆炸会产生很强的声信号, 信号频率也很丰富, 但爆炸产生的各种有害物质会对水域产生污染, 破坏该水

域的生态, 同时大批量使用其经济效益亦不划算。但是, 利用“液电效应”产生声信号的等离子体声源不会对海洋环境产生污染, 并且经济效益较好。两者的频率成分都很丰富, 在低频段都有较高的声功率, 在低频带声源级信号的峰值功率都能达 200 dB 以上。

等离子体声源还可以采用聚束装置增强信号在某一方向的强度, 利用小型等离子体声源制作成小型水下电爆炸声源。将控制端置于水面, 放电电极置于水下, 在控制端可以按照需要使等离子体声源在水下产生电爆炸脉冲放电信号。如果不需要等离子体声源在水下长时间工作, 供电单元可以采用蓄电池代替, 这样可以增加其使用的灵活性。在高电压传输电缆长度足够的情况下, 通过调整电极在水中的深度, 可以模拟不同深度的炸药爆炸声信号。因此, 利用脉冲串声信号代替水下炸药作为水下声源是可行的。

4.2 水下攻防对抗中干扰敌人声呐

在水下攻防对抗中, 无论是水面舰艇与潜艇之间的对抗, 还是潜艇与潜艇之间的对抗, 声呐始终是水下对抗的主角。

声呐有主动声呐和被动声呐之分, 被动声呐可以通过接收声信号来判断目标的方位, 主被动联合声呐还可以测定目标的距离。当敌方发现我方水面舰艇或潜艇后, 我方可以采取欺骗手段, 将等离子体声源设备通过小型无人艇布放于预定海域的一定深度。此时, 敌人声呐在较远距离探测目标时, 如果我方等离子体声源信号频率范围宽且信号强度大, 等离子体声源产生的信号与水面舰艇或潜艇产生的声信号叠加后, 敌方水听器接收到的信号是畸变的信号, 该畸变信号可使敌方在远距离情况下无法准确判断目标。并且等离子体声源产生的信号越强, 对声呐接收到的信号畸变越严重。水面舰艇或潜艇机动并逐渐远离敌方声呐的过程中, 在等离子体声源的配合下, 可以逐渐摆脱敌方声呐的跟踪。

4.3 干扰水声探测引信

从前面脉冲串声信号的时频特性分析可知, 等离子体声源声信号由于其功率比较大、频率成分丰

富,在一定距离条件下能够有效干扰使用声信号探测的水声引信,因此使用等离子声源脉冲串声信号可以应用于干扰水声探测引信。通过改变该脉冲串声信号的信号峰值、脉冲放电频率也可以改变其干扰水声探测引信的距离。在与敌方鱼雷或者水雷进行对抗的过程中,如果敌人对我方目标发起攻击,当其使用声制导或者探测设备时,等离子体声源产生的脉冲串声信号会使敌方鱼雷在远距离认错目标或作出错误决策,亦会使水雷引信进入封闭状态或对目标产生误判而不发动攻击,从而有效保存我方战斗力。

4.4 水下探测及定位声源

由于等离子体声信号频率范围比较宽,低频信号能量比较强,因此其水下传播距离比较远。通过测定该信号的收发时间,由水中的声速、传播时间与距离的换算关系就可以测定目标的距离。由于该信号与潜艇声呐使用频段比较接近,因此可以用来探测水下有无潜艇及目标。同时,研制基于小型等离子体声源的水声探测设备,可以对未知海域水下环境进行探测与定位,为我方及时掌握未知海域信息提供决策参考。当采用聚束效应在某一方向增强信号发射强度时,可以增大小型等离子体声源水下探测和定位的距离,此时信号发射具有一定的方向,可以通过增加转动机构实现水下不同方向的探测。

4.5 水声通信信号声源

由前面的分析可知,等离子体声源信号频率分布范围广,不同型号的声源产生的频率也不同。但是,通过分析不同型号、不同参数的等离子声源信号频率分布,可以根据我们的需要,选定符合要求的某些型号、某些参数的等离子体声源进行改造,研制基于这些型号的水下长距离水声通信系统。通过将某种高频信号叠加在该信号上,可以实现水下长距离的通信。如果将该信号在某一方向上聚束,可以提高信号在该方向上的强度、增大其通信距离。

4.6 水下假目标

由于等离子声源声信号频率成分丰富,可以覆盖较大的频带范围,并且能量比较大,当其在水下

工作时,可以作为水下假目标来欺骗敌人的声呐,误导敌方声呐判断,为我方争取有利时机。同时,多个等离子声源可以组合使用,即多个等离子声源通过控制电缆串接在一起,释放入水前预先设定每个声源的脉冲放电时间间隔,根据需要将其置于不同深度,通过系统的自动控制程序给不同的水下放电电极供电,控制程序根据模拟的目标发送相应的指令。但是脉冲串声信号毕竟是脉冲信号,时间间隔再短也不是连续的,这种情况只可以近似模拟水下潜艇目标或者水面大型船舶目标。多个等离子声源的组合方式根据使用的方式不同可以粗略分为水平阵列、垂直阵列、平面矩阵阵列、空间立体阵列、不规则阵列等。

4.7 水下安防工作

水下安防^[9]工作十分重要。目前,各国港口的安防主要通过布设水听器设备,大型船舶的安防(如航空母舰)主要通过反蛙人声呐,这2种途径都能在一定程度上保证自己的安全。但是,这2种途径只能及时发现目标,应对目标的威胁还需要一定的反应时间,不能达到发现即摧毁的效果,并且不具备即刻反击的能力。

当前水下等离子体声源的能量输出平均达到160 dB以上,峰值功率部分可以达到200 dB以上。在低频范围能量比较集中的情况下,其能在一定水域范围内对入侵的潜水员或蛙人进行有效打击。

在港口附近或大型船舶不同水下位置布设若干个大功率的等离子体声源,可对港口附近或大型船舶周围海域实现水下强声声波覆盖,距离声源越近声强越大。此时等离子声源声信号需要定期脉冲放电,发出的声脉冲信号可在一定范围内对潜水员或蛙人有影响或刺激,而且距离越近刺激越强,最终迫使潜水员或蛙人改变航行或者上浮出水。

4.8 海洋渔业观察

等离子体声源产生的脉冲串声信号无污染,可以作为水下图像声呐的声源,并且可用于水下渔业观察。由于水下等离子体声源信号频率成分丰富,在信号能量较大且低频成分丰富时,其水

下探测距离远,信号衰减小。研制基于低频成分丰富的等离子体图像声呐,并将该种声呐装置布置在渔业养殖区域或者渔船上,可以对水下渔业状态进行观察,为渔业养殖、捕捞等提供参考和技术支持。同时,在远海捕鱼作业时,可对陌生水域水下鱼群的状态进行探查,为捕鱼活动提供参考。

4.9 海洋石油勘探

由于等离子体声源可在某一方向聚束,聚束后的声源信号强度比较大,因此可以研制基于等离子体声源的小型声呐勘探设备。该型声呐勘探设备可以在海洋石油勘探领域发挥重要作用。当在水下钻井过程中,如果大型水声勘察设备因尺寸过大无法进行勘探作业,则可采用基于小型化等离子体声源的声呐设备进行探测作业,这为海洋石油勘探提供了新的探测装置。当前,国内外已有在陆地、海洋石油勘探中使用等离子体声源的相关报道。

5 结束语

本文首先介绍了液电效应的基本情况和等离子体声源脉冲信号采集装置。然后,根据不同类型的等离子体声源实测的几组水下脉冲放电试验数据,选取2组数据进行了时域信号分析和频域信号分析,并对这2种信号进行了傅里叶变化分析和功率谱估计,得出了等离子体声信号频率范围广、低频能量大的结论。最后,从水下爆炸、干扰敌方声呐、干扰水声探测引信、水下探测及定位声源、水

下通信信号声源、水下假目标、水下安防工作、海洋渔业观察、海洋石油勘探等几个方面就小型等离子体声源在水声领域的应用前景进行了分析。结果表明:等离子体声源应用前景广阔,值得我们在后续深入进行研究。

参考文献

- [1] 周彬. 等离子体声源在水声对抗中的应用技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] 张连成. 等离子体震源电声特性及深拖研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [3] 陈亚勇. MATLAB 数字信号处理详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [4] 沈再阳. MATLAB 信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [5] 魏鑫. MATLAB R2014a 从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [6] 裴善报. 水下连续爆炸声干扰器相关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [7] 刘清宇, 马树青, 杨华. 爆炸声源声源级数据分析方法[J]. 声学与电子工程, 2014, 116(4): 2-4.
- [8] 李宁, 陈建峰, 黄建国. 各种水下声源的发声机理及其特性[J]. 应用声学, 2009, 28(4): 241-248.
- [9] 周友援. 气爆声源装置在水下安防中的应用[J]. 机械研究与应用, 2011(1): 28-30.

(责任编辑: 曹晓霖)