

水下等离子体声源的正交试验设计与分析

黄 海, 雷开卓, 黄建国

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 水下等离子体声源在民用和军用领域都有广泛的应用, 其发声机理和系统最优化设计是当前的研究热点。为了使声源的输出峰值压力 y 尽可能大, 设计了放电电极间距(2mm, 3mm, 4mm)、储能电容容量(1 μ F, 2 μ F, 5 μ F)和充电电压(12kV, 16kV, 20kV)的三因素三水平正交试验方案, 严格按照正交试验安排表进行试验, 并用直观分析法对试验结果进行分析。结果表明: 最优化的试验组合方案为 $A_1B_3C_2$, 即放电电极间距 2mm, 储能电容容量 5 μ F, 充电电压 16kV, 估计出其峰值压力为 9.864MPa, 并通过试验验证了平均峰值压力为 10.165MPa, 与正交试验结论相符。该研究成果为水下离子体声源性能试验研究和最优化设计提供了依据。

关键词: 水下等离子体声源; 正交试验; 最优化设计; 液电效应

中图分类号: TM8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-04-0381-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.04.008

The orthogonal experimental design and analysis of underwater plasma sound source

HUANG Hai, LEI Kai-zhuo, HUANG Jian-guo

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Underwater Plasma Sound Source (UPSS) is widely used in civil and military areas. The sound generation mechanism and system optimization design of it are the hot topics in current researches. In order to maximize the output peak pressure (Y) of the sound source, a three-factor and three-level orthogonal experiment program on discharging electrodes spacing (2, 3, 4 mm), capacity of energy storage capacitance (1, 2, 5 μ F) and charging voltage (12, 16, 20 kV) is designed. The experiments are conducted strictly in accordance with the schedule of the orthogonal experiment, and intuitive analysis is used to get the experiment results. The results show that the experiment combination ($A_1B_3C_2$) gives an optimal performance. That is to say, when the discharging electrodes spacing is 2mm, the capacity of energy storage capacitance is 5 μ F, and the charge voltage is 16kV, it is more suitable to get the maximum output peak pressure. The estimated value of the sound source peak pressure is 9.684 MPa, and the experiments verified that the average peak pressure is 10.165MPa, which is consistent with the orthogonal experiment results.

Key words: Underwater Plasma Sound Source (UPSS); orthogonal experiment; optimum design; electro-hydraulic effects

0 引言

水下等离子体声源利用水下高压放电的液电效应来产生脉冲声波^[1], 具有瞬时发射功率大、脉冲窄、频带宽、可聚焦、易控制、反应速度快等诸多优点^[2], 经过半个多世纪的发展, 已广泛应用到工业、医疗等领域, 例如体外冲击波碎石、管道除垢、食品卫生和污水处理等。近年来该声源又被应用于海洋地质勘探与水下目标探测、宽带干扰源和声能

武器等领域^[3]。

为了进一步研究水下高压脉冲放电的产生特性, 得到最优系统参数配置, 以提高输出声压级, 满足更多的应用要求, 需要进行大量的试验。在试验研究过程中, 常常要求同时考察多个试验影响因素, 如系统充电方式、充电电压、储能电容容量、触发方式、触发开关类型和间距、放电电极材料和间距等, 同时还要求分清这些因素的主次关系, 确定这些因素同时存在时的最佳试验条件。

本文采用正交试验原理(Orthogonal Experimental Design)^[4]来优化水下等离子体声源产生条件, 并通过试验数据的科学分析, 计算出了理论上的试验条件的最优组合, 再通过试验验证。这样

收稿日期: 2011-07-12; 修回日期: 2011-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10974154)、西北工业大学科技创新基金(W018105)、国家高技术研究发展计划(863 计划)。

作者简介: 黄海(1986—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 研究方向为水下脉冲放电等离子体技术、聚焦及声场特性分析。

通讯作者: 黄海, E-mail: yellowsearfxn@163.com

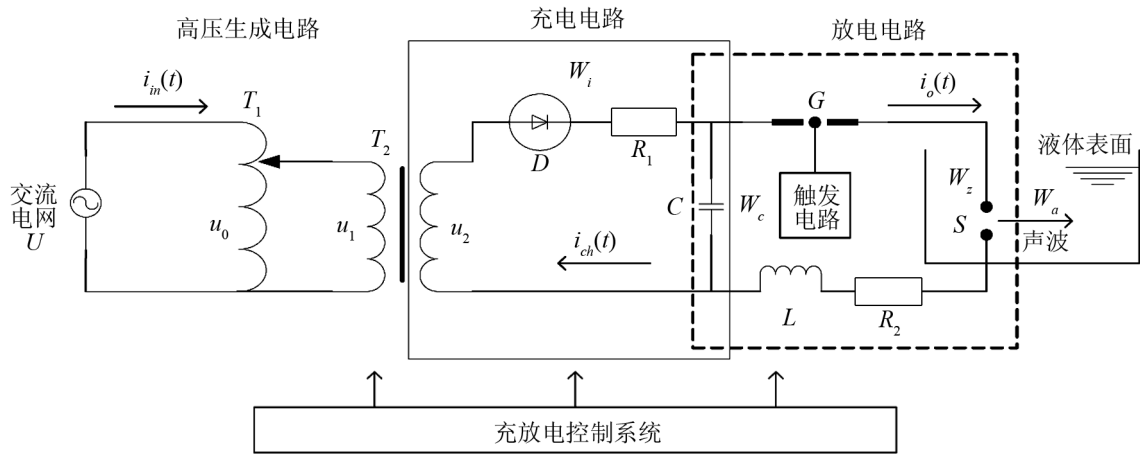


图 1 水下等离子体声源试验装置等效原理框图
Fig.1 Schematic diagram of the UPSS system

就大大缩减了试验时间，既减小了工作量，节约了试验成本，又提高了试验效率，最终达到现有试验系统条件下的最大声压级输出。

1 水下等离子体声源试验系统简介

水下等离子体电声源试验装置等效原理如图 1 所示^[5]。包括调压器 T_1 、升压器 T_2 、整流器 D 、充电回路总电阻 R_1 (包括回路限流电阻和传输寄生电阻等)、高压脉冲储能电容 C 、触发开关 G 、放电回路寄生电感 L 、放电回路总电阻 R_2 (包括放电电极放电时的电阻)和放电电极 S 。整个装置可以分成四大部分，即高压生成电路、充电回路(实线框部分)、放电回路(虚线部分)和充放电控制系统。图中 U 为交流电网供电电压， u_0 为交流电网的有效电压， u_1 为调压变压器输出， u_2 为升压变压器输出， $i_{ch}(t)$ 为充电回路电流， $i_0(t)$ 为放电回路电流。从系统供电到最终产生出声脉冲，其间经历了多个能量传递过程：交流电网输入能量→调压器 T_1 →升压变压器 T_2 →高压整流硅堆 D →充电至电容器 C →触发开关 G 导通→电容器存储的电荷加到放电电极 S →放电电极 S 击穿放电→发出声波→产生声能。其中 W_1 为交流电网输入到水下强声源系统的能量； W_c 为充电回路输出给高压脉冲储能电容 C 的储存能量； W_z 为触发开关 G 导通后放电电极 S 消耗的能量； W_a 为压力传感器在距离声源 1m 处测量的声波能量。

水下等离子体电声源的工作原理为：高压脉冲储能电容器充以一定高压后，经触发开关导通，使置于水中的两个电极间瞬时加上高压，将电极间的水击穿，在放电电极间形成等离子体通道，发生脉冲放电。由于放电时间极短(us 量级)，放电电流很

高(1~10kA 量级)^[6]，通道在极短的时间内获得大量的能量，通道内温度急剧升高，通道受热体积膨胀。由于液体的不可压缩性和惯性，通道的膨胀受到阻碍，从而就会在水中形成巨大的冲击波，并逐渐衰减成声波^[7]。

2 正交试验安排

2.1 试验因素水平的确定

试验目的是提高水下等离子体声源的输出峰值压力 Y ，且指标值越大越好。影响因素虽然很多，但在挑选试验因素时，对已经成型的试验系统来讲，系统充电方式、充电电压、触发方式、触发开关类型和触发方式、放电电极材料等因素是一定的，只考虑放电电极间距、储能电容容量和充电电压对系统输出声压级的影响。这三个条件在试验系统中都是可控的，每个因素选取三个不同状态，称为因素水平，如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平表
Table 1 The factors and levels of the orthogonal experiment

因素	放电电极间距 A/mm	储能电容容量 B/uF	充电电压 C/kV
水平 1	2	1	12
水平 2	3	2	16
水平 3	4	5	20

2.2 正交表设计与正交试验

正交试验是利用正交表^[8]，科学合理地安排试验，通过部分试验了解全面试验的情况，方便地找到诸多因素中对试验指标有显著影响的主要因素，确定使试验指标达到最佳的因素水平组合。

正交表记号为 $L_n(t^q)$ ，其中 L 为正交表代号，数码数 t 表示因素的水平数， q 表示最多能安排的因素个数，行数 n 表示要做的试验次数。正交表具有以下两项性质：每一列中不同的数字出现的次数相等；任意两列中数字的排列方式齐全而且均衡。这两点充分说明了正交表“均匀分散性”、“整齐可比性”的两大优越性。通俗地说，每个因素的每个水平与另一个因素的各水平分别相遇一次，这就是正交性^[9]。

现选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验设计，如表 2 所示。如果一个三因素三水平的试验，按照全面试验要求，需进行 $3^3=27$ 种组合试验，且尚未考虑每一组合的重复数。用正交试验表进行试验设计，仅需进行 9 次不同的试验，且大大减少了工作量。

试验安排好后，严格按照各号试验条件进行试验，并认真测定试验结果和记录所得数据及试验情况(见表 2)。表 2 中，数据格式 $i(j)$ 表示各因素的第 i 个水平为 j 。对于没有列入正交表的因素，让其保持固定。

表 2 正交试验安排表
Table 2 The schedule of the orthogonal experiment

试验号	因素				指标峰值压力 y_i /MPa
	放电电极间距 A /mm	储能电容容量 B /uF	充电电压 C /kV		
1	1(2)	1(1)	1(12)		1.671
2	1(2)	2(2)	2(16)		5.493
3	1(2)	3(5)	3(20)		8.010
4	2(3)	1(1)	2(16)		3.388
5	2(3)	2(2)	3(20)		4.477
6	2(3)	3(5)	1(12)		6.903
7	3(4)	1(1)	3(20)		1.550
8	3(4)	2(2)	1(12)		1.480
9	3(4)	3(5)	2(16)		9.455
I	15.174	6.609	10.054		
II	14.768	11.450	18.336		
III	12.485	24.368	14.037		
R	2.689	17.759	8.282		T=42.427

3 试验结果分析

3.1 试验结果的直观分析

试验结束后，利用正交试验的结果分析方法-直观分析法对试验结果进行分析。文献[4]详细论述了正交试验直观分析法的原理和分析方法，在此不再重复描述。通过直观分析综合比较，确定最优试验方案。将水下等离子体声源的峰值压力作为单指

标试验，进行极差分析^[4]。

由表 2 的试验结果可以分析出：(1)计算各因素的水平效应值 I_i, II_i, III_i ，分别为各因素在第 i 水平下试验指标之和，如因素放电电极间距 A 在第 1 水平状态 2 mm 条件下的水平效应值 $I_A=y_1+y_2+y_3=1.671+5.493+8.010=15.174$ ，电极间距 A 在第 2 水平状态 3 mm 条件下的水平效应值 $II_B=y_4+y_5+y_6=3.388+4.477+6.903=14.768$ ，其它依次类推，并将计算结果填入表 2 中相应的栏内。(2) 计算因素的极差 R 。定义 $R_i=\max(I_i, II_i, III_i)-\min(I_i, II_i, III_i)$ 为第 i 列因素的极差，容易得出：

$$R_A=15.174-12.485=2.689,$$

$$R_B=24.368-6.609=17.759,$$

$$R_C=18.336-10.054=8.282.$$

极差 R 的大小反映相应因素作用的大小。极差大的因素，意味着其不同水平给指标造成的影响较大，通常是主要因素。极差小的因素，意味着其不同水平给指标造成的影响较小，一般是次要因素。在本试验中，按极差大小，因素的主次顺序可排列如下： $B>C>A$ 。因此，储能电容容量是影响峰值压力的主要因素，其次是充电电压，在一定范围内放电电极间距对峰值压力的影响较小。将 3 个因素的 3 个水平的平均峰值压力作点图如图 2 所示。

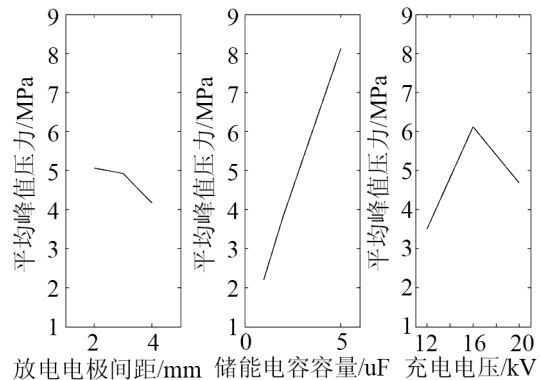


图 2 平均峰值压力与因素对应关系图
Fig.2 The corresponding relationship between the average peak pressure and factors

由图 2 可以看出，放电电极间距对峰值压力的影响相对较小，随着间距的增大，峰值压力有减小的趋势；储能电容容量对峰值压力的影响较大，且峰值压力随着电容容量的增大而增大；在一定范围内，并不是充电电压越高越好，即在一定的放电电极间距和储能电容容量的情况下，峰值压力并不能无限增加，而是存在一个最大值，即存在“最佳电压”的情况。

3.2 各因素的最佳组合

由表 2 直接比较 9 个试验结果，容易看出：第

9号试验的峰值压力为 9.455 MPa, 最高, 其次是第 3 号试验, 为 8.010 MPa, 这些好结果是直接通过试验结果得到的, 称之为“看一看”的好条件。对于正交试验设计, 根据以上计算, 还可能展望出更好的试验条件。本试验中, 水下等离子体声源峰值压力越大越好, 故选取因素效应之比较大的那个水平。即 $A_1B_3C_2$ (放电电极间距为 2 mm, 储能电容为 5 μF , 充电电压为 16 kV), 作为“算一算”的好条件, 它与“看一看”的好条件 $A_3B_3C_2$ 不完全相同。由于“看一看”的好条件是从已做的 9 组试验中得到的, 这 9 个试验的代表性很强, 直接看的结果也是相当不错的, 但这 9 个试验毕竟只是三因素三水平全面试验的 $3^3=27$ 个条件的 1/3。因此, “看一看”的好条件并不一定是全面试验中最好的条件。“算一算”的目的, 就是寻找全面试验中最好的条件。当然在选择最优试验条件时, 还应考虑因素的主次。因为主要因素水平的变化对指标的影响较大, 所以对于主要因素, 一定要按有利于指标的要求来选取因素水平。

按照文献[4]论述的正交试验直观分析法的原理和分析方法, 估计出“算一算”条件下峰值压力的指标值为

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{\text{优}} &= \bar{y} + \hat{a}_1 + \hat{b}_3 + \hat{c}_2 = \\ & \bar{y} + \left(\frac{I_A}{3} - \bar{y}\right) + \left(\frac{III_B}{3} - \bar{y}\right) + \left(\frac{II_C}{3} - \bar{y}\right) = \\ & \frac{I_A}{3} + \frac{III_B}{3} + \frac{II_C}{3} - 2\bar{y} = \frac{15.174}{3} + \frac{24.368}{3} + \frac{18.336}{3} - \\ & 2 \times \frac{42.427}{9} = 9.864 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3.3 再次验证试验

验证试验的目的, 在于考察较优试验条件的再现性。在安排验证试验时, 一般应将通过试验分析所得到的较优试验条件与已做试验中最好方案即“看一看”的好条件同时验证, 以确定其优劣。在实际验证试验中, 试验条件为 $A_1B_3C_2$ (即放电电极间距为 2 mm, 储能电容为 5 μF , 充电电压为 16 kV), 在相同的试验条件下重复试验 6 次, 统计得到平均峰值压力为 10.165 MPa, 接近于预测值 9.864 MPa, 与正交试验结论相符。

4 结 论

本文利用正交试验方法进行水下等离子体声源性能试验研究, 用尽可能少的试验次数, 找出了在现有试验系统条件下使输出峰值压力 y 尽可能大的最优试验条件, 从而节约了大量的时间、人力和

试验成本。水下等离子体声源性能的影响因素很多且相互影响, 只单独研究某个因素的影响不能获得有效的试验结论, 而正交试验可以很好地解决这个问题, 而且研究方法科学简单。用直观分析法对试验结果进行了分析, 确定了各因素的主次顺序为: $B \rightarrow C \rightarrow A$ (即储能电容容量 \rightarrow 充电电压 \rightarrow 放电电极间距); 并通过理论预测出了本系统较优的试验条件组合 $A_1B_3C_2$ (即放电电极间距为 2 mm, 储能电容容量为 5 μF , 充电电压为 16 kV) 和对应的指标值峰值压力 9.864 MPa, 最后通过验证试验得到的平均峰值压力为 10.165 MPa, 说明了正交试验结论的正确性。本文的研究成果对水下离子体声源性能试验研究和技术发展具有参考价值, 为最优化设计提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 尤特金(苏). 液电效应[M]. 于家珊, 译. 北京: 科学出版社, 1962. Yutkin(USSR). The electrohydraulic effect[M]. YU Jiashan. Trans. Beijing: Science Publish House, 1962.
- [2] 李宁, 陈建峰, 黄建国, 等. 各种水下声源的发声机理及其特性[J]. 应用声学, 2009, 29(4): 1-8. LI Ning, CHEN Jianfeng, HUANG Jianguo, et al. Sounding mechanisms and characteristics of various underwater sound sources[J]. Applied Acoustics, 2009, 29(4): 1-8.
- [3] 雷开卓, 邱前宝, 张群飞, 等. 水下等离子体声源的电磁辐射特性研究[J]. 声学技术, 2010, 28(6): 99-103. LEI Kaizhuo, QIU Qianbao, ZHANG Qunfei, et al. Study on electromagnetic radiation characteristics of underwater plasma sound source[J]. Technical Acoustics, 2010, 28(6): 99-103.
- [4] 师义民, 徐伟, 秦超英, 等. 数理统计(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 172-180. SHI Yimin, XU Wei, QIN Chaoying, et al. Mathematical statistics (The third edition)[M]. Beijing: Science Publish House, 2009, 172-180.
- [5] 李宁, 雷开卓, 黄建国, 等. 基于时变电阻的水下高压放电模型[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3060-3064. LI Ning, LEI Kaizhuo, HUANG Jianguo, et al. The model of the underwater high-voltage discharge base on time-varying resistance[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3060-3064.
- [6] Grinenko A, Krasik Ya E, Efimov S, et al. Nanosecond time scale, high power electric-al wire explosion in water[J]. Physics of Plasmas, 2006, 13(4): 1-14.
- [7] Madhavan S, Doiphode P, Kunda M, et al. Modeling of shock wave generation in water by electrical discharges[C]// Proc.12th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Monterey, CA, USA: IEEE, 1999: 605-608.
- [8] 郝拉娣, 于化东. 正交试验设计表的使用分析[J]. 编辑学报, 2005, 17(5): 334-335. HAO Ladi, YU Huadong. On use of orthogonal experimental design[J]. Acta Editologica, 2005, 17(5): 334-335.
- [9] 施贞. 基于 SolidWorks/COSMOS 的正交试验优化设计[J]. 精密制造与自动化, 2009(2): 51-52. SHI Zhen. SolidWorks/COSMOS Based Orthogonal Experimental Optimization Design[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2009(2): 51-52.