

◇ 研究报告 ◇

基于大能量火花放电的枪声模拟系统设计*

王 龙[†] 谷平反 王聪丽 李书日 张财谦 崔小叶

(中国人民武装警察部队士官学校 杭州 311400)

摘要 为准确模拟某型枪械实弹射击枪声,设计了一种基于大能量火花放电的枪声模拟系统,理论分析和仿真验证了系统工作原理,并对所模拟枪声的声级以及时域和频域特性进行了试验测试。仿真和测试结果表明:点火电容放电所辐射的电场击穿高能电极空气间隙,可有效控制储能电容组火花放电模拟枪声;模拟与真实枪声的声级误差约为 $-2.1\sim 5.8$ dB(A),标准差为 1.974 dB(A),模拟与真实枪声的时域信号随时间增加均以指数形式迅速减小且频谱分布规律一致;模拟与真实枪声信号在时域进行相关运算后存在着明显的相关峰,二者有较好的相似性。

关键词 枪声模拟,火花放电,声级,频谱,时域相关

中图法分类号: TN973.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)06-0947-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.06.006

Design of simulated gun-shot sound system based on large energy spark discharge

WANG Long GU Pingfan WANG Congli LI Shuri ZHANG Caiqian CUI Xiaoye

(Non-Commissioned Officers School of CAPF, Hangzhou 311400, China)

Abstract In order to accurately simulate the shot sound of the gun firing, a simulated shot sound system based on large energy spark discharge was designed. The operational principle of the system is theoretically analyzed and simulation verified, then the sound level, time-domain and frequency-domain characteristics of the simulated gunshot sound are tested. The simulation and test results show that the electric field radiated by ignition capacitor discharge can break through the air gap of high energy electrode, then it can effectively control the spark discharge of energy storage capacitors which simulating gunshot sound. The error of sound level between simulated and real gunshot is $-2.1\sim 5.8$ dB(A), and the standard deviation is 1.974 dB(A). The time-domain signals of simulated and real gunshot decrease exponentially with time increasing and the spectrum distribution of the two signals is consistent. There are obvious correlation peaks in the correlation calculation of the two signals in time domain, and the simulated gunshot sound is basically consistent with the real gunshot sound.

Key words Gunshot sound simulation, Spark discharge, Sound level, Spectrum, Correlation in time domain

2019-03-05 收稿; 2019-07-01 定稿

*武警士官学校科研基金资助项目(201801)

作者简介: 王龙(1985-),男,山东临沂人,博士,研究方向:光电对抗。

[†]通讯作者 E-mail: wanglong4800533@163.com

0 引言

狙击手因其精确打击和一枪制敌能力,在现代战争中发挥着越来越重要的作用。对狙击手枪声信号的有效探测有利于准确定位和压制敌方狙击手,确保己方牢牢掌握战场主动权^[1]。近年来,枪声信号探测技术得到了广泛研究和应用,美、英、法等国家已在此基础上开发出适合单兵背负、车载、舰载和机载多种作战任务的一系列反狙击装备^[1-3];国内围绕枪声信号特征分析^[4-5]、枪声信号识别算法^[6]、声源定位和测距方法^[7-8]等枪声探测技术中的关键问题进行了深入研究,并取得了丰硕成果。

面对未来战场上枪声探测型反狙击装备的严重威胁,为利用虚假目标欺骗和干扰敌方装备、隐蔽和掩护己方狙击手,准确模拟枪声成为探索枪声探测型反狙击装备对抗方法必须解决的关键问题,遗憾的是关于枪声模拟方法的研究成果鲜有公开报道。本文利用点火电容放电所辐射的强电场击穿高能电极空气间隙,控制储能电容组火花放电发出爆震声实现枪声模拟,设计了一种基于大能量火花放电的枪声模拟系统,对系统的工作原理进行了理论分析和仿真验证,对所模拟枪声的声级以及时域和频域特性进行了试验测试。所模拟枪声与某型枪械真实射击枪声声级吻合、频谱变化规律一致,具有较好的一致性。

1 枪声模拟系统结构设计

1.1 电路设计

基于大能量火花放电的枪声模拟系统,通过将电容组储存的电量瞬间集中放电来产生高声级爆震声实现枪声模拟,储能电容组放电回路通断的可靠控制是此类系统设计的关键和难点。通常情况下,储能电容组多用真空继电器控制放电回路通断^[9],但该方法成本高且继电器能控制的最大导通电流达不到枪声模拟的要求。

本文采用高压小电流击穿点火电极空气间隙实现点火电容放电回路通断控制,利用点火电容放电辐射的强电场击穿高能电极空气间隙实现储能电容组放电回路通断的控制。该系统的主电路由一组点火电路和两组储能放电电路组成,如图1所示。图1(a)中,点火电路的高压发生器 T_1 将直流低电压输入转换为小电流高压输出以击穿点火电极的空气间隙,控制点火电容 C_1 放电以辐射强电场用于

击穿高能电极空气间隙。点火电路中,市电输入经整流桥 D_3 给点火电容 C_1 充电,高压发生器输出端和电容 C_1 的正负极分别经二极管 D_1 和 D_2 连接至点火电极组的正负极。其中,电阻 R_1 和 R_2 用于控制点火电容 C_1 的充电速度和充电电压,二极管 D_1 用于阻止点火电容 C_1 放电过程中的漏电流窜入高压发生器内部,二极管 D_2 用于保护电容 C_1 的充电回路器件避免被高压发生器 T_1 的输出高压击穿。

图1(b)中,市电输入正周期,电流经继电器 JK_3 、限流电阻 R_3 、整流二极管 D_4 对储能电容组 C_2 充电;市电输入负周期,电流经整流二极管 D_5 、限流电阻 R_3 和继电器 JK_3 对储能电容组 C_3 充电。当高能电极间的空气间隙被击穿时,电容组 C_2 和 C_3 串联升压后进行大能量火花放电,发出爆震声实现枪声模拟。

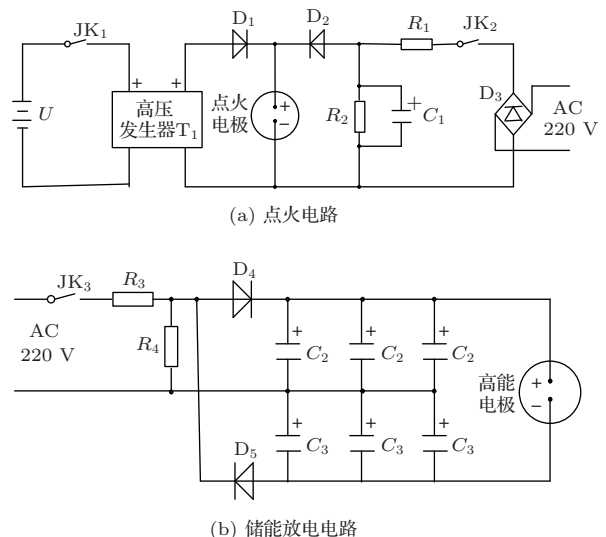


图1 枪声模拟系统的电路结构

Fig. 1 Principle diagram of circuit structure

1.2 放电极组设计

枪声模拟系统的放电极组由两根点火电极和四根高能放电电极组成,结构如图2所示。六根电极共圆心排布,点火电极位于高能放电电极所在圆周的内侧,且点火电极高度低于高能放电电极,相邻两电极间的圆心角为 60° 。两根点火电极分别连接至图1(a)中点火电极组的正负极处,不相邻的两根高能放电电极为一组,连接至图1(b)中高能放电电极组的正负极处。点火正负极空气间隙的长度为 d_1 ,每对高能放电电极空气间隙的长度为 d_2 ,点火电极与高能放电电极之间的高度差为 h 。为便于表述高能放电电极间的空气间隙,以两点火电极中点为坐标原点,原点与点火负电极连线方向为 x 轴

正方向建立直角坐标系,如图2所示。高能放电电极组正负极间的空气间隙1和空气间隙2可以分别表述为

$$\begin{aligned} z = h, y = \sqrt{3}x, x \in (-0.25d_2, 0.25d_2), \\ z = h, y = -\sqrt{3}x, x \in (-0.25d_2, 0.25d_2). \end{aligned} \quad (1)$$

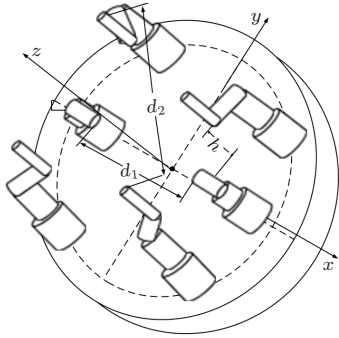


图2 放电电极组结构示意图

Fig. 2 Schematic of electrode group

1.3 工作过程

1.3.1 枪声模拟系统的充电过程

电极间的空气间隙未被击穿前,空气电阻很大^[10],点火电容 C_1 以及储能电容组 C_2 和 C_3 的放电回路处于开路状态。继电器 JK_1 断开、 JK_2 和 JK_3 闭合时,点火电容 C_1 以及 C_2 和 C_3 组成的储能电容组处于充电状态。充电结束时,点火电容 C_1 以及电容组 C_2 和 C_3 的电压值可以表示为

$$\begin{aligned} U_1 = 220\sqrt{2} \times R_2 / (R_1 + R_2), \\ U_2 = U_3 = 220\sqrt{2} \times R_4 / (R_3 + R_4). \end{aligned} \quad (2)$$

1.3.2 枪声模拟系统的放电过程

一旦点火电极间的空气被击穿,空气间隙电阻由几百兆欧迅速减小为几欧^[10],点火电容 C_1 的放电回路随之导通。为确保安全,点火继电器 JK_1 闭合前需先断开充电继电器 JK_2 和 JK_3 。 JK_1 闭合时,高压发生器 T_1 的输出高压加载在点火电极上,当该电压值达到两极针间隙对应的静态击穿电压时,点火电极之间的空气被击穿。由文献[11]知,点火电极的静态击穿电压与极针间隙 d_1 之间需满足

$$U = 25.4d_1 + 6.64\sqrt{d_1}, \quad (3)$$

式(3)中: U 的单位为kV; d_1 的单位为cm。

点火电极间的空气被击穿后,点火电容 C_1 、二极管 D_2 、点火电极、点火电极之间的空气间隙和导线组成的放电回路由开路瞬间转换为导通,点火电容 C_1 储存的电量通过点火电极快速释放,辐射出强电场。假设电容 C_1 放电持续时间内,点火电极之间的空气间隙电阻 R_0 保持不变^[9],根据基尔霍夫定律,电容 C_1 的放电过程满足^[9]

$$R_0 C_1 [du_1(t)/dt] + u_1(t) = 0, \quad (4)$$

式(4)中: $u_1(t)$ 为电容 C_1 两端电压; C_1 为点火电容的容量;点火电极间的空气被击穿后,空气间隙电阻非常小,取 $R_0 = 5 \Omega$ ^[12]。由无输入 RC 电路初始条件求解方程(4)可得

$$u_1(t) = U_1 e^{-t/(R_0 C_1)}, \quad i_1(t) = \frac{U_1}{R_0} e^{-t/(R_0 C_1)}. \quad (5)$$

根据文献[13–14]知,由点火电容的放电电流 $i_1(t)$ 可求解其所辐射电场的时空分布。电容 C_1 放电时,为便于分析高能电极组正负极间空气间隙上各点的电场强度,以点火电极正负极中点为坐标原点,原点与点火正电极连线方向为 η 轴正方向建立柱坐标系,如图3所示。

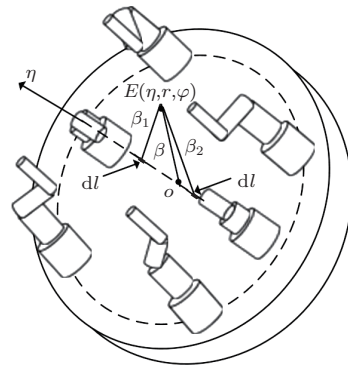


图3 点火电容的放电辐射场模型

Fig. 3 Electric field model caused by radiation of ignition capacitor

对于空间中任意一点 (η, r, φ) ,点火电容 C_1 放电辐射的电场可以表示为

$$\begin{aligned} E(\eta, r, \varphi, t) = E_r \frac{dl}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^2 \frac{r(\eta \pm \eta')}{\beta_j^2} \left[\frac{3Q(t - \beta/c)}{\beta_j^2} + \frac{3i_1(t - \beta/c)}{c\beta_j^2} + \frac{1}{c^2\beta_j} \frac{\partial i_1(t - \beta/c)}{\partial t} \right] \\ + E_\eta \frac{dl}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^2 \left\{ \left[\frac{3(\eta \pm \eta')^2}{\beta_j^2} - 1 \right] \left[\frac{Q(t - \beta/c)}{\beta_j^3} + \frac{i_1(t - \beta/c)}{c\beta_j^2} \right] + \left[\frac{(\eta \pm \eta')^2}{\beta_j^2} - 1 \right] \frac{1}{c^2\beta_j} \frac{\partial i_1(t - \beta/c)}{\partial t} \right\}, \end{aligned}$$

$$Q(t) = \int_0^{\infty} i_1(t') dt' - \int_0^t i_1(t' - \beta/c) dt'$$

$$= U_1 C_1 e^{-(t-\beta/c)/R_0 C_1},$$

$$\eta = -x, r = \sqrt{y^2 + z^2}, \varphi = \arctan\left(\frac{z}{y}\right). \quad (6)$$

联立式(1)、式(5)式(2)和式(6)可求得点火电容 C_1 放电时,高能放电正负极间空气间隙任意位置的电场强度。若某对放电电极针空气间隙上每一点的电场强度均达到空气击穿场强 30 kV/cm ,则该对电极间的空气被击穿^[13],储能电容组 C_2 和 C_3 串联升压后,通过该对电极和电极间空气间隙组成的回路发生大能量火花放电发出强烈的爆震声。

1.4 参数设计

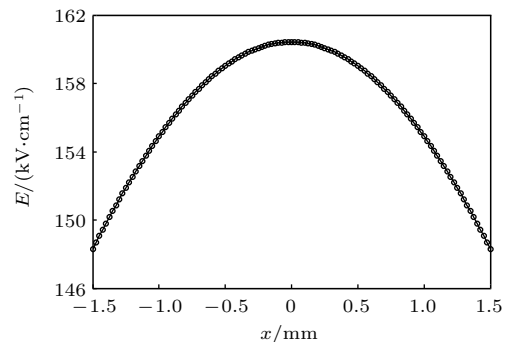
枪声模拟系统设计过程中,电极组结构参数的确定可从以下两方面考虑:(1)高压发生器 T_1 的输出电压需可靠击穿点火电极间的空气间隙;(2)点火电容放电辐射的电场需同时击穿高能电极间的空气间隙1和空气间隙2。图2中的六根电极使用直径为 2.76 mm 的铜材质柱形材料加工而成,电极组的结构参数取 $d_1 = 8 \text{ mm}$, $d_2 = 6 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$ 。

根据电极参数 d_1 和式(3)可求得高压发生器 T_1 输出电压的最小值为 26.3 kV ,为避免 T_1 的输出电流烧毁二极管 D_1 、输出电压击穿二极管 D_2 , T_1 输出电压在满足最小值要求的情况下,优先选用小电流、低电压器件,此处选用 7.4 V 输入、 30 kV 输出的小电流高压逆变器。将电极组结构参数代入式(1)、式(5)式(2)和式(6),并利用空气击穿场强 30 kV/cm 的约束条件,可以确定点火电容 C_1 放电电流的取值范围,此处 C_1 选用 $450 \text{ V}/220 \mu\text{F}$ 电解电容, R_1 和 R_2 分别使用 $100 \Omega/10 \text{ W}$ 和 $300 \text{ k}\Omega/3 \text{ W}$ 电阻;电容 C_2 和 C_3 的选取需综合考虑待模拟枪声的声级以及音质特性, C_2 和 C_3 取值越大所模拟枪声的声级越高但声音越沉闷,此处 C_2 和 C_3 选用 $450 \text{ V}/1000 \mu\text{F}$ 电解电容,电阻 R_3 和 R_4 分别使用 $100 \Omega/10 \text{ W}$ 和 $300 \text{ k}\Omega/3 \text{ W}$ 电阻;二极管 D_1 和 D_2 的选取主要考虑其浪涌电流和击穿电压特性,而整流桥 D_3 和二极管 D_4 的选取主要考虑其正向导通电流和工作电压特性,二极管 D_1 和 D_2 分别选用 $30 \text{ kV}/50 \text{ mA}$ 和 $30 \text{ kV}/75 \text{ A}$ 的高压硅堆, D_3 选用KBL608整流桥, D_4 选用 $1000 \text{ V}/5 \text{ A}$ 的整流二极管。

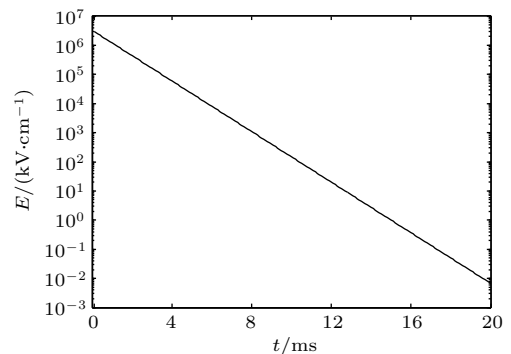
2 仿真及实验结果分析

2.1 高能电极空气间隙场强的仿真分析

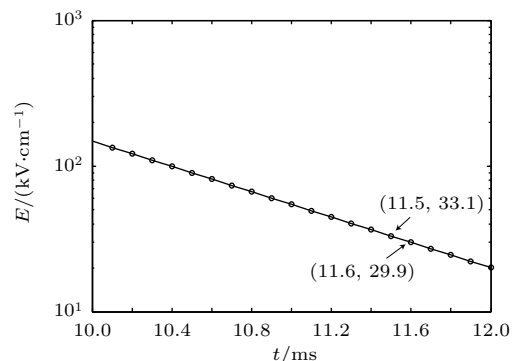
将 $R_1 = 100 \Omega$ 、 $R_2 = 300 \text{ k}\Omega$ 、 $C_1 = 220 \mu\text{F}$ 、 $R_0 = 5 \Omega$ 、 $d_1 = 8 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 6 \text{ mm}$ 、 $h = 10 \text{ mm}$ 代入式(1)、式(5)式(2)和式(6),做出电容 C_1 放电 10 ms 时,高能电极间的电场强度随位置变化曲线如图4(a)所示,其中空气间隙上各点沿 x 方向以 0.015 mm 为步长递增。以高能电极间场强最小位



(a) $t = 10 \text{ ms}$, $y = \sqrt{3} x$, $h = 10 \text{ mm}$



(b) $x = 1.5 \text{ mm}$, $y = 2.6 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$



(c) 电场强度时域展宽

图4 点火电容放电时的辐射电场强度

Fig. 4 Electric field intensity radiated by discharge of ignition capacitor

置(1.5 mm, 2.6 mm, 10 mm)为例,以0.1 ms为步长做出其场强随时间的变化曲线图4(b)和场强的时域展宽曲线图4(c)。

由于空气间隙1和空气间隙2关于点火电极的空气间隙成轴对称分布,空气间隙1和空气间隙2上x坐标相同的两点电场强度相同。图4(a)曲线表明,点火电容放电10 ms时,高能电极空气间隙上各点的电场强度关于中心对称,在空气间隙中心处取极大值,电场强度随各点偏离中心距离的增加而逐渐减小。

储能电容组放电回路的通断状态取决于高能电极空气间隙1和空气间隙2上各点是否被点火电容放电辐射的强电场击穿,当空气间隙上任意点的电场强度均大于30 kV/cm时,储能电容组放电回路导通;当空气间隙上各点的电场强度逐渐小于空气击穿电压时,储能电容组放电回路转换为开路状态。从图4(b)可以看出,点火电容放电回路导通的瞬间辐射出强电场,随着放电时间的增加,高能电极空气间隙上的电场强度迅速减小,在20 ms时间内由约为 10^6 kV/cm急剧减小为0.1 kV/cm以下。为进一步分析高能电极间空气间隙的击穿特性,对图4(b)中的场强变化曲线在10 ms~12 ms范围内进行局部展宽,如图4(c)所示。从图4(c)可以看出,对于空气间隙1上场强最小的点(1.5 mm, 2.6 mm, 10 mm),在点火电容放电11.6 ms时其电场强度由11.5 ms时的33.1 kV/cm减小为29.9 kV/cm,高能电极间的空气间隙由导通状态转换为开路状态。

2.2 枪声模拟系统性能的试验测试

在空旷场地上,天气晴朗且无风的条件下对枪声模拟系统的性能进行测试,试验装置如图5所示。

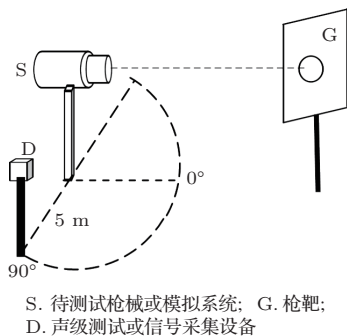


图5 枪声模拟系统性能测试装置示意图

Fig. 5 Experimental setup used to ability test of this simulated shot sound system

为确保安全,声音测试和采集设备架设在与射击方向成90°、距离枪口5 m的位置,且声音测试和采集设备与枪口处于同一高度。

2.2.1 模拟枪声的声级分析

某型枪械单发射击10次,用GM1353型声级计测试枪声声级并计算平均值E记为该枪声的声级真值。将枪械替换为枪声模拟系统,控制模拟系统鸣枪30次测试其声级值,记为样本数据 $[x_1, \dots, x_n]$,其中 $n = 30$ 。

模拟枪声的声级误差为

$$\varepsilon = [x_1 - E, x_2 - E, \dots, x_n - E]. \quad (7)$$

模拟枪声的声级标准差为

$$s = \sqrt{[(\bar{x} - x_1)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2]/(n - 1)}. \quad (8)$$

根据式(7)做出枪声模拟系统的声级误差曲线如图6所示,可以看出系统所模拟枪声与真实射击枪声的声级误差约为-2.1 ~ 5.8 dB(A),将样本数据代入式(8)求得模拟枪声的声级标准差为1.974 dB(A),系统所模拟枪声的声级稳定且与真实射击枪声声级吻合。

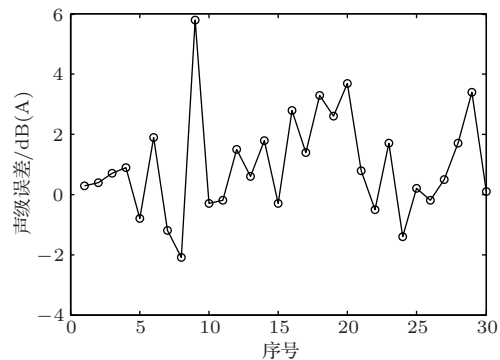


图6 模拟枪声的声级误差曲线

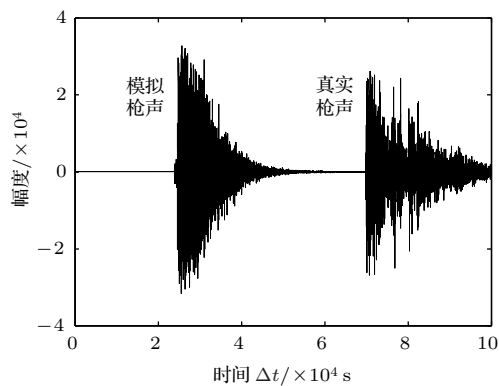
Fig. 6 Deviation curve of sound level for simulated shot

2.2.2 模拟枪声的波形分析

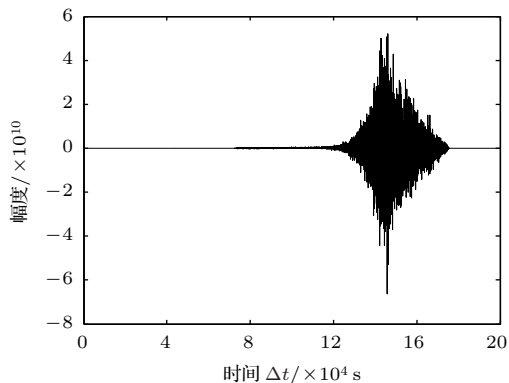
枪械真实射击和模拟系统发出的枪声经适当衰减后使用录音笔采集枪声信号,并任取一组录音从时域和频域将模拟与真实枪声对照分析,如图7~8所示。

声音信号的采样频率记为 f_s (Hz),以时间间隔 Δt (s) ($\Delta t = 1/f_s$)为步长做出模拟与真实枪声的时域波形和相关运算曲线如图7(a)和图7(b)所示。图7(a)表明,模拟与真实枪声的时域变化规律一致,

信号幅度随时间增加以指数形式迅速减小,由于枪声模拟系统的点火电极未进行机械封装,储能电容组火花放电生成的爆炸波直接向空间辐射,与真实枪声相比缺少了爆炸波经枪管反射产生时延后进入空间的杂散波,因此图7(a)中的模拟枪声与真实枪声相比能量更加集中、衰减速度更快且杂散波更少。从图7(b)可以看出,两信号相关运算后存在着明显的相关峰,进一步说明了模拟枪声与真实枪声在时域有较好的相似性。



(a) 模拟与真实枪声的时域波形对照



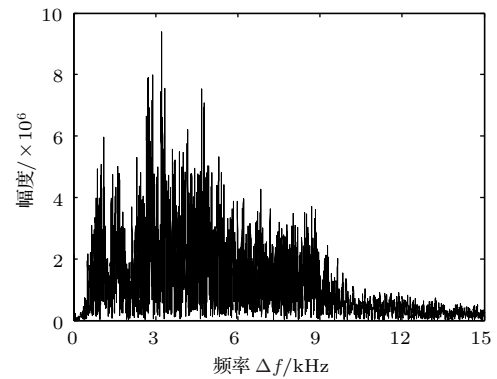
(b) 模拟与真实枪声的时域相关运算

图7 模拟与真实枪声的时域对照分析

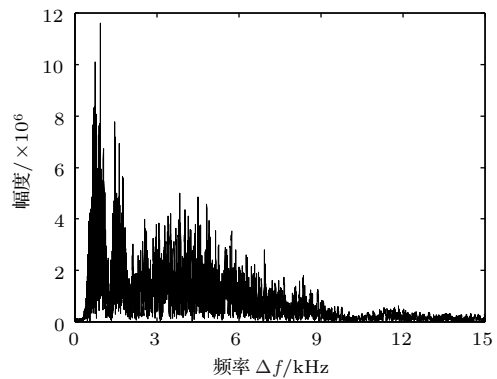
Fig. 7 Compare analysis in time domain for simulated and real shot sound

分别对包含真实和模拟枪声的单帧 $T(s)$ 声音信号进行傅里叶变换,以频率间隔 $\Delta f (\Delta f=1/T)$ 为步长做出频谱曲线如图8(a)和图8(b)所示。结果表明,模拟枪声与真实枪声的能量都是主要集中在 $400\Delta f \sim 1200\Delta f$ 、 $1200\Delta f \sim 1900\Delta f$ 和 $1900\Delta f \sim 10000\Delta f$ 三个频带范围内,模拟枪声和真实枪声在三个频带范围内的频谱质心依次为 $910\Delta f$ 和 $1582\Delta f$ 、 $4736\Delta f$ 和 $840\Delta f$ 、 $1592\Delta f$ 和 $4436\Delta f$ 。但真实枪声频谱的低频分量幅度比模拟枪声大,而高频分量幅度比模拟枪声小,这与模拟枪

声更加短促和明亮的试验现象相吻合。



(a) 模拟枪声频谱



(b) 真实枪声频谱

图8 模拟与真实枪声的频谱对照分析

Fig. 8 Compare analysis of spectrum for simulated and real shot sound

3 结论

本文设计了一种基于大能量火花放电的枪声模拟系统,理论分析和仿真验证了系统的工作原理,试验测试了所模拟枪声的声级和波形特性。研究结果表明:

(1) 点火电容在高压小电流逆变器控制下,通过辐射电场击穿高能电极空气间隙的方式,可有效控制大容量储能电容组火花放电模拟枪声。

(2) 仿真结果表明,点火电容开始放电时,高能电极间的空气间隙由绝缘变为被击穿,储能电容组放电回路由开路变为导通;在点火电容放电 11.6 ms 以后,高能电极间各点的场强逐渐小于空气击穿强度,空气间隙由导通状态恢复为开路状态。

(3) 试验结果表明,所模拟的枪声与某型号枪械射击枪声的声级误差约为 $-2.1 \sim 5.8 \text{ dB(A)}$,标准差为 1.974 dB(A) ,模拟枪声的声级与真实枪声吻合度高且性能稳定;除此以外,模拟枪声波形在时

域和频域均与真实枪声有较好的相似性,但真实枪声频谱的低频分量幅度比模拟枪声大,而高频分量幅度比模拟枪声小,下一步将对放电极组的封装组件进行优化设计以进一步提高枪声模拟的准确性。

参 考 文 献

- [1] 许志勇, 赵兆, 沈曙明. 单兵反狙击声频探测与定位技术概述[J]. 电声技术, 2015, 39(2): 38-40, 54.
Xu Zhiyong, Zhao Zhao, Shen Shuming. Review of soldier-worn acoustic gunfire detection and localization systems[J]. Audio Engineering, 2015, 39(2): 38-40, 54.
- [2] Mäkinen T, Pertilä P. Shooter localization and bullet trajectory, caliber, and speed estimation based on detected firing sounds[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(10): 902-913.
- [3] Sallai J, Hedgecock W, Volgyesi P, et al. Weapon classification and shooter localization using distributed multi-channel acoustic sensors[J]. Journal of Systems Architecture, 2011, 57(10): 869-885.
- [4] 栾少文, 龚卫国. 公共场所典型异常声音的特征提取[J]. 计算机工程, 2010, 36(7): 208-210.
Luan Shaowen, Gong Weiguo. Feature extraction of typical abnormal sounds in public places[J]. Computer Engineering, 2010, 36(7): 208-210.
- [5] 李伟红, 田真真, 龚卫国, 等. 改进的ESMD用于公共场所异常声音特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2429-2437.
Li Weihong, Tian Zhenzhen, Gong Weiguo, et al. Developed ESMD for the feature extraction of abnormal sound in public places[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2429-2437.
- [6] 张克刚, 叶湘滨. 基于短时能量和小波去噪的枪声信号检测方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(S1): 130-132, 138.
Zhang Kegang, Ye Xiangbin. A method of the gunfire signal detecting based on short-time energy and wavelet denoising[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(S1): 130-132, 138.
- [7] 吕玉涛, 安亚亮, 衣锦辉. 狙击手声被动定位模型仿真分析[J]. 系统仿真技术, 2012, 8(1): 138-143.
Lyu Yutao, An Yaliang, Yi Jinhui. Simulation of sniper localization by acoustic technical[J]. System Simulation Technology, 2012, 8(1): 138-143.
- [8] 党存禄, 于光祖, 郭永吉. 基于对称麦克风基阵的枪声定位算法研究[J]. 测试技术学报, 2016, 30(1): 74-79.
Dang Cunlu, Yu Guangzu, Guo Yongji. Research on gunshot location algorithm based on symmetric microphone array[J]. Journal of test and Measurement Technology, 2016, 30(1): 74-79.
- [9] 张云明, 刘庆明, 宇灿, 等. 大能量电点火系统设计与火花放电特性实验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1267-1274.
Zhang Yunming, Liu Qingming, Yu Can, et al. Design of a big energy electric ignition system and experimental study on its spark discharge characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1267-1274.
- [10] 鲁林. 火花放电能量的实验与研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 12, 15.
- [11] 原青云, 张希军, 刘尚合, 等. 影响空气式静电放电特性的相关因素分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2500-2506.
Yuan Qingyun, Zhang Xijun, Liu Shanghe, et al. Analysis on the relative factors affecting the characteristics of air electrostatic discharge[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2500-2506.
- [12] 李伟晔. 火花放电能量的测量控制与数据处理[D]. 沈阳: 东北大学, 2012: 7.
- [13] 盛松林, 田明宏, 刘尚合. 改进型偶极子模型的静电放电相关电场计算[J]. 高电压技术, 2002, 28(10): 8-9, 12.
Sheng Songlin, Tian Minghong, Liu Shanghe. Electric fields calculation related to ESD based on improved dipole model[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(10): 8-9, 12.
- [14] 盛松林. 静电放电电磁场时空分布理论模型及测试技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2008: 17-22.