

火工品电磁脉冲发生器研究

连 恺, 刘举鹏, 封青梅, 姚洪志, 纪向飞, 赵 团

(陕西应用物理化学研究所 应用物理化学国家级重点实验室, 陕西 西安, 710061)

摘 要: 为开展电火工品电磁脉冲传导敏感度试验, 利用脉冲功率技术原理, 进行了电磁脉冲发生器设计, 重点开展电磁脉冲发生器的高压、控制、脉冲功率部分的设计研究, 并利用脉冲发生器进行某点火头电磁脉冲传导敏感度试验。本研究为电火工品脉冲电磁环境中的安全性研究提供了评估手段。

关键词: 电火工品; 电磁脉冲; 发生器; 直流高压; 传导; 敏感度; 安全性

中图分类号: TJ450.6 文献标识码: A

Research on Electromagnetic Pulse Generator for EED

LIAN Kai, LIU Ju-peng, FENG Qing-mei, YAO Hong-zhi, JI Xiang-fei, ZHAO Tuan

(National Key Laboratory of Applied Physics and Chemistry, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: Aimed at testing the electromagnetic conduction sensitivity of EED, based on the principles of pulse power system, the electromagnetic pulse generator was designed, the DC high voltage power supply, the control circuit, as well as the pulse circuit were studied in detail. Then, the electromagnetic conduction sensitivity of some electric matchhead was tested by the pulse generator. The study provides the evaluation means for EED in the electromagnetic pulse environment.

Key words: EED; Electromagnetic pulse generator; DC high voltage; Conduction; Sensitivity; Safety

高功率电磁脉冲属于瞬变电磁现象, 具有场强度高、上升沿陡、持续时间短和频带宽等特点, 在强电磁脉冲作用下, 武器系统、电子设备等通过耦合电磁脉冲能量都会受到一定的影响, 甚至会出现系统的误动作 (如早爆)、性能与可靠性降低 (如失效) 等, 严重时系统会遭到破坏陷入瘫痪。因此, 世界各国在研究电磁脉冲的同时, 也在研究电磁脉冲对电力系统、武器系统及其他敏感设备的耦合特性及效应规律, 针对其耦合特性寻求防护措施, 以在未来战场上立于不败之地。

电磁环境对电火工品的耦合途径主要为两种: 传导和辐射。辐射式用于模拟真实电磁环境, 传导式用

于研究效应规律、作用机理、掌握门限阈值。

目前国内脉冲发生器普遍为辐射式, 脉冲能量较小, 难以完成钝感电火工品的电磁兼容测试。为此本文开展电磁脉冲发生器研究, 为典型电火工品电磁脉冲环境下阈值、武器系统电磁脉冲环境下适应性研究工作的开展提供技术手段。

1 电磁脉冲发生器的组成

火工品电磁脉冲发生器 (传导式) 以脉冲功率技术^[1]为基础, 利用脉冲电容器的充电 (长时间)、放电 (瞬态), 通过调整放电回路的参数, 实现指定波形

的输出。基本方案如图1所示。

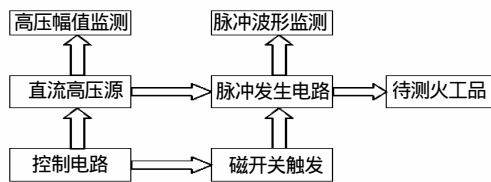


图1 脉冲电磁波发生器结构

Fig.1 Structure of electromagnetic pulse generator

(1) 直流高压源：原理如图2所示，将0~24V直流电压转换为中频（频率范围30~300kHz）交流，经过脉冲变压器放大，再经过倍压电路升压及整流得到5~10kV左右的直流高压电源^[2]（输出连续可调，可调范围在5~10kV间）。

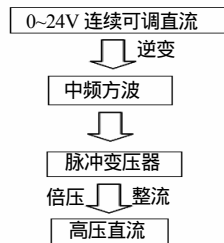


图2 直流高压部分原理

Fig.2 Principle of high voltage DC

(2) 控制电路：采用芯片控制继电器切换，达到输入、输出隔离的目的。

(3) 磁开关^[3]：采用磁电开关触发切换。

(4) 脉冲发生电路：搭建电容储能式脉冲发生回路，调节回路参数优化输出脉冲波形。

(5) 监测部分：采用分压器监测电压、电流传感器监测电流。

2 电磁脉冲发生器设计

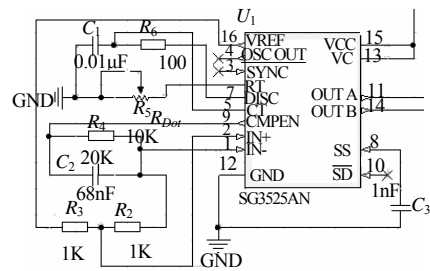
2.1 直流高压源

直流高压源是电磁脉冲发生器的主要部分，其直流稳压情况决定着整套系统的稳定性。

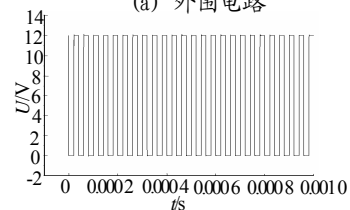
(1) 驱动模块：驱动模块主要是利用SG3525芯片强大的驱动MOSFET的特性来实现。如图3所示，以SG3525A作为驱动电路部分的主控芯片，SG3525输出波形计算结果，其11脚输出如图3(b)所示，14脚输出与11脚输出相位差为180°。

(2) 功率模块：功率部分设计结构如图4所示，主要由MOSFET、脉冲变压器的初级部分以及0~24V

连续可调的直流源构成，辅以驱动电路达到中频方波输出的目的。



(a) 外围电路



(b) 输出波形仿真

图3 SG3525的外围电路图及输出波形仿真

Fig.3 The peripheral circuit and the output waveform of SG3525

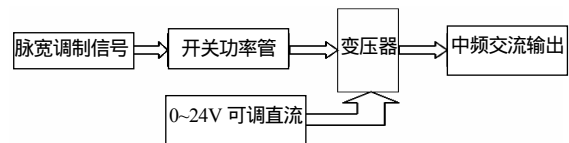


图4 功率部分结构

Fig.4 Structure of pulse power

上级电路SG3525的11脚和14脚输出的相位相差180°的脉宽调制信号被输送到功率管中，从而驱动场效应管的导通与截止，两路信号输送到变压器的两端，在变压器 T_1 的两端产生同频率的脉冲电压，通过功率管源级和漏极间输入0~24V可变的直流电压，从而在变压器的输出端产生随着输入直流幅值变化的交流电压输出。

本文采用压电变压器来设计直流高压电源。因瓷片的长度远大于厚度，故输出端阻抗远大于输入端阻抗，输出端电压远大于输入端电压。一般输入几伏到几十伏的交变电压，可以获得几千伏以上的高压输出。它主要应用于需要高电压小电流的领域^[4]。

(3) 功率模块终端输出：对功率管输出信号、变压器输出端的信号及经过2倍压整流后的信号仿真，如图5所示。由图5可见，变压器输出的交流信号经过倍压电路整流后的波形，幅值达到了10kV左右。

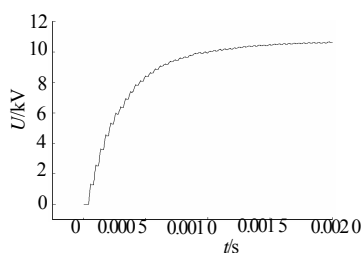


图 5 变压器输出结果仿真

Fig.5 Results of transformer simulation

2.2 控制电路

控制电路主要通过继电器切换以实现输入输出的隔离。控制部分电路使用 24V 直流触发的继电器, 通过按钮开关切断与连接 24V 直流电, 从而控制继电器, 实现电磁脉冲发生器的准备、触发等功能。

2.3 脉冲发生电路

脉冲发生电路由限流电阻、脉冲电容器以及转换开关组成。MIL-STD-461F 中最新的电磁脉冲信号波形如图 6 所示, 通过经验公式^[5], 可计算脉冲功率部分的相关电参数:

$$t_r \approx 2.2 \frac{L}{R} \quad (1)$$

$$t_f \approx 2.2 RC \quad (2)$$

式 (1) ~ (2) 中: t_r 为电磁脉冲信号上升时间, ns; t_f 为电磁脉冲信号下降时间, ns。L 为脉冲电容器到负载的分布电感, R 为脉冲电容器到负载的阻抗值; C 为脉冲电容器电容值。

在电磁波电磁场中, 使用的特性阻抗均为 50Ω。因此可计算出脉冲电容器数值以及线路分布电感的最大值。

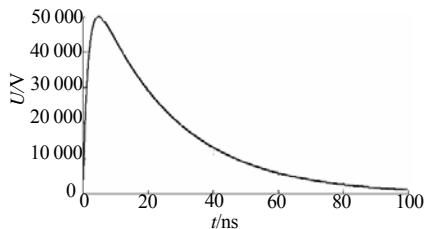


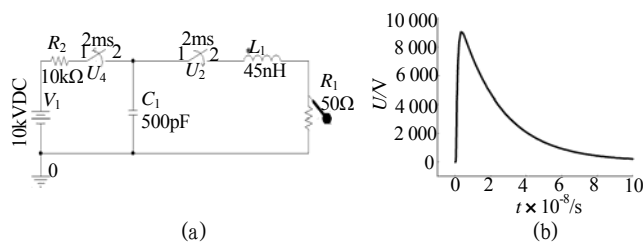
图 6 电磁脉冲波形

Fig.6 Waveform of electromagnetic pulse

根据上升时间 (2.3 ± 0.5) ns, 则 L 为 41~52nH, 故电感决定上升时间是否符合标准参数要求。而实际设计过程中, 系统的分布电感越小越好。

根据下降时间 (55 ± 1.2) ns, 则 C 为 489~510pF 之间, 故选用 500pF 脉冲电容器作为储能装置。

分别选用 500pF 脉冲电容、45nH 电感、50Ω 负载阻值, 仿真得到图 7 输出波形, 符合脉冲波形的标准要求, 可知以上参数选择可行。



(a)

(b)

图 7 仿真结果

Fig.7 Results of simulation

3 电磁脉冲发生器调试

制作完成的电路板如图 8 所示。采用示波器检测输出波形, 通道 1 测量压电变压器输出波形, 通道 2 测量开关功率管输出波形, 如图 9 所示。

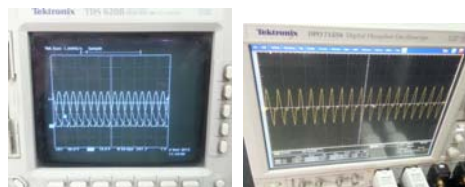


(a)

(b)

图 8 焊接完成的电路板

Fig.8 Circuit board



(a)

(b)

图 9 示波器采样波形

Fig.9 Waveform of oscilloscope

图 9 (a) 中, 功率管输出波形为近似方波, 其幅值可由可调直流源输出电压控制, 在压电变压器谐振频率下, 压电变压器输出波形为标准正弦波, 其幅值同样由可调直流源输出电压控制。图 9 (b) 为示波器 DPO71254 采样的是另一种压电变压器的输出波形, 这种变压器较前一种变压器线圈匝数比高, 从而输出幅值更大的输出波形。因此, 选用更高匝数比的压电变压器, 比如多层压电变压器, 得到幅值更大的交流正弦波输出, 再经过倍压电路倍压整形得到高压直流, 从而满足脉冲电磁波发生器直流高压源的需要。

将直流高压电路和脉冲发生电路搭建成原理样机,检测脉冲电磁波发生器的输出波形,实测电路输出脉冲波形如图10所示。

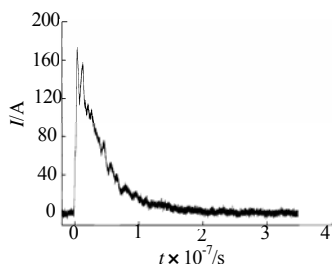


图10 实测电路输出脉冲波形

Fig.10 Output waveform of the test circuit

4 电磁脉冲传导敏感度试验

依据研制的电磁脉冲发生器对某点火头进行了传导敏感度效应试验,试验过程中为了保证电磁脉冲发生器的行波输出状态,串联1个40Ω电阻进行匹配^[6]。测试基本框图见图11,测试结果见表1。

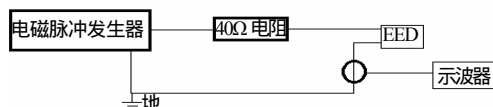


图11 测试框图

Fig.11 Diagram of test

表1 电磁脉冲传导敏感度测试结果

Tab.1 Results of electromagnetic pulse conduction sensitivity test

电压 /kV	能量 /J	测试 数量/ 发	发火 数量/ 发	发火 概率 /%
<5.6	<1.8×10 ⁻⁴	5	0	0
5.6~5.9	1.8~2.0×10 ⁻⁴	10	1	10
5.9~6.3	2.0~2.2×10 ⁻⁴	20	10	50
6.3~6.6	2.2~2.4×10 ⁻⁴	10	7	70
>6.6	>2.4×10 ⁻⁴	5	5	100

由表1可见,随着发生器电压幅值的上升,电磁脉冲能量增大,电点火头的发火概率逐渐变大,最终

得到导致其发火的能量为 $2.4 \times 10^{-4} \text{J}$ 。

5 结论

通过直流高压部分、控制部分、脉冲功率部分设计,研制适用于火工品传导敏感度研究的电磁脉冲发生器,并针对某点火头进行效应试验研究,得出以下结论:(1)采用SG3525产生脉宽调制信号,驱动功率开关管输送到变压器整流得到直流高压信号的方案可行,其中压电变压器线圈匝数及倍压电路的级数将决定输出直流幅值的大小,从而得到符合要求的直流高压源。(2)控制电路采用直流触发的继电器设计可完成发生器的准备、发火等功能。(3)脉冲发生电路参数选择:选用500pF脉冲电容,45nH电感,50Ω负载阻值。(4)利用搭建完成的脉冲发生器原理样机进行传导敏感度试验,可以完成既定试验方案。

参考文献:

- [1] H Bluhm. 脉冲功率系统的原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [2] 陈炜峰.电磁脉冲模拟器用纳秒脉冲源的研制[D].南京:东南大学,2006.
- [3] 江伟华.高重复频率脉冲功率技术及其应用:磁开关的作用[J].强激光与粒子束,2012(6):1269-1275.
- [4] 白辰阳,桂治轮,李龙土.压电变压器的研究和开发进展[J].压电与声光,1998,20(3):175-179.
- [5] 周璧华,陈彬,石立华.电磁脉冲及其工程防护[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [6] 李锦荣.电火工品电磁敏感性测试技术研究[C]//全国电磁兼容学术会议论文集.莱州:中国电子学会,1997.