

爆磁压缩发生器延时控制系统分析及实现*

史云雷,张合,马少杰,顾林,贺海

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏南京 210094)

摘要:针对爆磁压缩发生器高精度延时起爆控制的要求,建立了基于电路控制延时方案的最佳起爆时序模型,分析了其时序误差散布。设计了一种爆轰驱动飞片型高功率放电开关,通过数值仿真分析了开关的耐压能力及飞片变形。实验测试了6发开关的闭合放电性能,数据表明:开关两极间电压5kV时未出现击穿现象,闭合响应时间分布在 $66 \pm 5 \mu\text{s}$ 以内、标准差 $2.7 \mu\text{s}$,开关导通时间 $\geq 900 \mu\text{s}$,放电效率接近90%。采用小型爆磁压缩发生器与延时控制系统进行了联调实验,结果表明:爆磁压缩发生器运行时刻与电流峰值时刻相差 $1.8 \mu\text{s}$,延时误差7.8%,延时控制系统满足高精度起爆控制的要求。

关键词:爆磁压缩发生器;延时控制系统;爆轰驱动放电开关;实验分析

中图分类号: O383; TJ41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2486(2015)03-142-06

Analysis and realization on time-delay control system of magnetic flux compression generator

SHI Yunlei, ZHANG He, MA Shaojie, GU Lin, HE Hai

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Time-delay control system is very important to magnetic flux compression generator's operation. Based on circuit delay scheme, an appropriate model was built to analyze the initiation time sequence, and its errors dispersion was analyzed. A switch driven by detonation was proposed, its voltage endurance capability and plate deformation were analyzed by simulation. On this basis, six switches were tested at high voltage. The data shows that, there is no voltage breakdown at 5kV, response-time distributes in $66 \pm 5 \mu\text{s}$ with standard deviation of $2.7 \mu\text{s}$, conducting time is equal or greater than $900 \mu\text{s}$, discharge efficient is approximately equal to 90%. A mini-type magnetic flux compression generator was used to test the time-delay control system and the results show that, the time difference between magnetic flux compression generator's operation and current peak is only $1.8 \mu\text{s}$ with the error being 7.8%.

Key words: magnetic flux compression generator; time-delay control system; detonation-driving discharge switch; experiment analysis

电磁脉冲武器是未来战争的杀手锏,起着决定战场制电磁权的关键作用。电磁脉冲武器起源于核武器,但核武器杀伤力巨大,大力发展非核电磁脉冲武器有着重要的军事意义^[1-4]。爆磁压缩电磁脉冲弹是目前研究较为深入的一种非核电磁脉冲武器,其作战平台包括飞机、装甲车辆、火炮等,一般作用范围为数十米至数千米^[5]。爆磁压缩发生器(Magnetic Flux Compression Generator, MFCG)是爆磁压缩电磁脉冲弹的关键器件,精确的弹载延时起爆控制技术将决定MFCG的输出性能,是实现电磁脉冲弹作战效能的关键因素之一。

国防科技大学刘建平、钟巍等采用同轴型导爆索延时开关实现电流最大值与MFCG运行时

间间隔 $15 \mu\text{s}$ 、延时误差 $\approx 10\%$ ^[6-7];西安电子工程研究所康小平和陕西庆华汽车安全系统有限公司于绍松改进设计了一种同轴式同步开关,实现控制延时 $95 \mu\text{s}$,实际延时 $96 \mu\text{s}$ ^[8];北京理工大学苏建河分析了使用爆炸闭合开关和导爆索或电子延时器来进行起爆延时控制的可行性,但没有进行实验验证^[9]。

1 延时控制系统分析

MFCG是一种基于磁场冻结效应,利用炸药爆炸压缩磁通,从而将炸药的部分化学能转化为电磁能的一种高能量、大功率的装置。爆磁压缩电磁脉冲弹一般采用螺线圈型MFCG,其工作过程如图1所示:初始能源系统(脉冲储能电容)充

* 收稿日期:2014-09-19

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXLX13_204)

作者简介:史云雷(1987—),男,江苏常州人,博士研究生,E-mail:13770562272@163.com;

张合(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:hezhang@mail.njust.edu.cn

满电后,放电开关闭合,放电回路接通,在 MFCG 定子线圈中建立初始磁通,当电流达到最大值时,装置俘获的磁通最大,撬断开关闭合,MFCG 开始运行,压缩磁通,使回路中电流和能量得以放大^[10-11]。

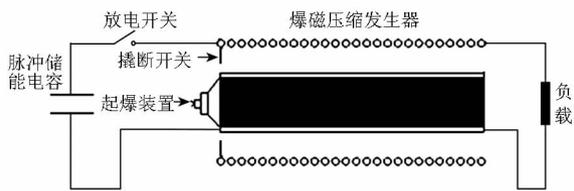


图1 爆磁压缩发生器工作过程

Fig.1 Working process of MFCG

从 MFCG 的工作过程可以看出,需要一个简单精确的延时控制系统通过控制放电开关和 MFCG 启动时间,以实现放电电流达到最大值时间与装置运行时间的匹配。目前对 MFCG 进行延时起爆控制,主要有以下几种方案:火药延时、导爆管延时、导爆索延时、电路控制延时等。火药延时和导爆管延时控制精度达不到要求,导爆索延时应用广泛,但装置结构较为复杂^[6-8]。电路控制延时利用高精度延时电路控制爆轰驱动的放电开关和 MFCG 起爆装置先后工作以实现时序匹配,其结构简单,占用空间小,控制精度高,稳定性好。因此,决定选用该方案来实现 MFCG 工作时序控制。

1.1 最佳时序模型

为建立电路控制延时方案最佳起爆时序,首先分析初始能源系统(脉冲储能电容)瞬态放电过程,MFCG 等效为一个电阻和电感串联形式,等效回路如图2所示。

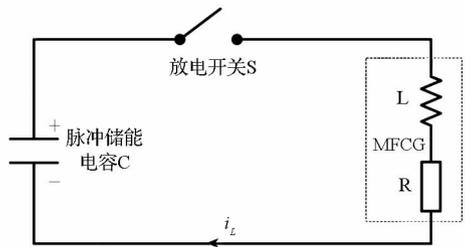


图2 脉冲储能电容瞬态放电等效回路

Fig.2 Equivalent circuit of pulse energy-store capacitor transient discharge

得到微分方程:

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (1)$$

根据器件初始参数可计算得电容放电电流曲线,如图3中c线所示,放电至峰值时间为 $\tau_c/4$,

τ_c 为放电回路时间常数。

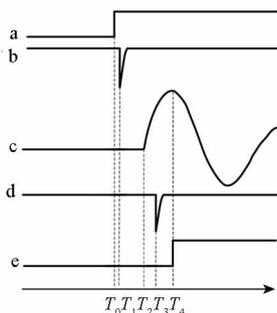


图3 最佳起爆时序

Fig.3 Best initiation time sequence

图3为最佳起爆时序图(微秒级):a为延时电路上电信号, T_0 为上电时刻;b为放电开关初始起爆信号, T_1 为初始起爆时刻;c为脉冲储能电容放电电流信号, T_2 为电容放电起始时刻, T_4 为电流值达峰值时刻;d为MFCG起爆装置初始起爆信号, T_3 为其初始起爆时刻;e为MFCG撬断开关闭合信号, T_4 为其闭合时刻。放电开关收到初始起爆信号至开关闭合的时间 $t_s = T_2 - T_1$;MFCG起爆装置收到初始起爆信号至撬断开关闭合的时间 $t_M = T_4 - T_3$;电路最佳起爆延时 $\tau = T_3 - T_1$; t_s 可通过实验测试得到; t_M 是MFCG起爆装置中雷管作用时间、传爆药作用时间、爆轰波在平面透镜中传播时间以及炸药驱动电枢膨胀至接触撬断开关等时间之和,可通过仿真或实验测试得到;时间常数 τ_c 在确定放电回路参数后可通过计算得到。所以最佳起爆延时可表示为:

$$\tau = t_s + \tau_c/4 - t_M \quad (2)$$

1.2 时序误差散布分析

该时序控制系统导致误差散布的主要因素有:脉冲储能电容容值误差;放电开关起爆药作用时间误差;放电开关闭合机械动作误差;MFCG电参数(包括电感和电阻)误差;MFCG起爆装置作用时间误差;炸药驱动电枢膨胀时间误差等。实际延时 τ 可用相关参变量表示成式(3)所示的函数形式:

$$\tau = \tau(C, t_{s1}, t_{s2}, L, R, t_{M1}, t_{M2}, \dots) \quad (3)$$

应用小偏差法求式(3)中任意一记为 x_i 参变量的散布 σ_{x_i} 引起的延时散布:

$$\sigma_{\tau x_i} = |\tau(x_i + \sigma_{x_i}) - \tau(x_i)| \quad (4)$$

当变量散布比较大或者实际值无法测量时,测量值设为0,相应的误差增加,可以用修正小偏差法计算散布:

$$\sigma_{\tau x_i} = \sum_{j=-N}^{N-1} \left| \tau\left(x_i + \frac{j+1}{2N}\sigma_{x_i}\right) - \tau\left(x_i + \frac{j}{2N}\sigma_{x_i}\right) \right| \quad (5)$$

总延时散布为:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{\tau_{xi}}^2} \quad (6)$$

当 $\sigma_{\tau} \geq \tau$, 时序控制系统失败。 σ_{τ} 决定放电电流 I 和峰值电流 I_{\max} 的接近程度, 引入参数:

$$\vartheta = \frac{I}{I_{\max}} \quad (7)$$

参数 ϑ 值反映的是时序控制精度, 也从侧面反映系统时序误差散布大小。给出算例参考: 式 (1) 中, MFCG 电参数为 0.4Ω , $47\mu\text{H}$, 6.5kV , $63\mu\text{F}$ 时, 放电种子电流 I_{\max} 约为 5500A , 大于 5000A 的脉宽为 $46\mu\text{s}$ 。当延时散布 σ_{τ} 为 $23\mu\text{s}$ 时, $\vartheta = 5000/5500 = 0.909$ 。

2 爆轰驱动飞片型高功率放电开关

爆轰驱动飞片型高功率放电开关是采用电路控制延时方案中的关键器件, 其主要性能参数包括闭合响应时间误差、导通时间长度、耐压值以及放电效率。闭合响应时间误差影响系统的时序控制精度; 导通时间长度必须满足初级能源系统的充分放电; 耐压值应高于脉冲储能电容两端最高电压, 防止击穿。基于以上参数要求, 设计了一种微秒级电雷管直接驱动飞片型高功率闭合放电开关, 该开关结构简单, 电流导通能力强, 闭合响应时间可以精确到微秒, 因而能够用作 MFCG 充电时的闭合开关, 实现发生器的爆炸同步。

2.1 开关结构设计

爆轰驱动飞片型高功率放电开关结构如图 4 所示, 主要由微秒级电雷管、剪切片、垫片、飞片、绝缘套筒、电极等组成。作用原理: 电雷管上电后发火起爆, 爆轰产物通过狭小空腔后驱动飞片, 飞片切断剪切片后加速飞向两个电极, 一段行程后飞片接触电极实现开关闭合。

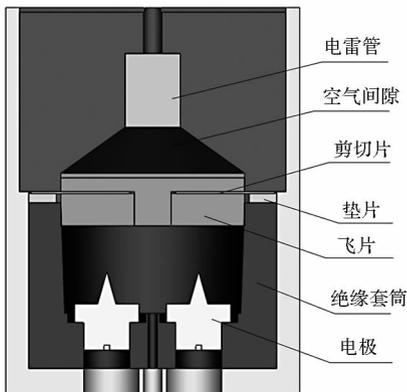


图 4 开关结构设计

Fig. 4 Structure design of switch

常规弹载条件下, 为使开关体积尽量小且防止作用过程中壳体破裂影响其他器件, 仅使用了微秒级电雷管(未使用炸药)驱动飞片, 该方式作用可靠且精度高, 带来的问题是开关响应时间较长, 但只要误差散布较小, 响应时间可通过延时电路进行补偿。电雷管和飞片间引入空腔的目的是使飞片加速过程变得平缓, 飞片在飞行过程中可以保持较好的初始热力学状态和力学性质, 避免飞片中产生层裂现象^[12]。飞片采用硬铝材料, 质轻便于加速且不易变形, 上下飞片通过螺纹连接, 中间夹着剪切片; 剪切片设计为十字状, 便于被剪切且不影响飞片动作。绝缘套筒内腔设有锥度, 飞片接触电极同时与腔壁产生摩擦, 使开关闭合后具有一定的自锁能力; 电极选用紫铜材料且顶端设置为尖锥状, 改善开关高速闭合时的接触抖动。

2.2 开关耐压能力分析

放电开关必须承受电容器所充的电压, 确保导通前不击穿, 因此对开关有一定的耐压要求。由于弹体内部空间限制, 一般用于小型爆磁压缩电磁脉冲弹的储能电容额定电压不高于 10kV 。另外, 储能电容是通过高压直流变换器 DC-DC 实现恒流充电, 所以开关两电极间属于直流高压。利用数值仿真软件 Comsol Multiphysics 对开关充电后的电场分布进行模拟, 所得结果如图 5 所示。

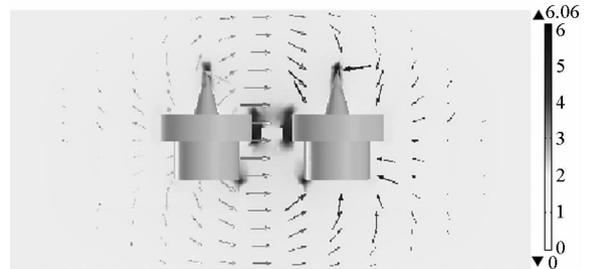


图 5 放电开关电场分布云图

Fig. 5 Electric field distribution around switch electrodes

从图 5 中可以看出, 由于电极形状不规则, 开关内部电场分布不均匀, 在电极棱角处电场较大, 最大场强为 6.06kV/mm , 可能发生高压击穿的区域在电极中部台阶处。一般情况下, 空气介质击穿电压可近似地用 3kV/mm 的击穿场强来估计^[13], 绝缘套筒采用尼龙 11 材料, 其绝缘强度为 29.6kV/mm ^[14], 设计时为保证开关耐压强度, 两电极间距和飞片距电极距离均大于 5mm 。

2.3 开关飞片厚度选取

由于电雷管点起爆且直径小于飞片直径, 外加空腔的引入, 将会导致爆轰产物流场产生一定

的边侧稀疏效应,从而造成飞片偏离一维运动,发生弯曲变形,影响飞片碰击电极时的平面度^[15-16]。为此,采用 Autodyn 软件,根据开关结构特征建立二维轴对称模型,进行电雷管起爆后爆轰产物经空腔驱动不同厚度飞片运动过程的二维数值模拟。微秒级电雷管总药量 180mg,包含多种装药^[17],完全进行数值模拟比较困难,计算中将其等效为半径 $r = 3\text{mm}$,高度 $d = 6\text{mm}$,密度 $\rho = 1.717\text{g/cm}^3$ 的 COMP B 聚黑药柱(威力大于电雷管)。利用多物质 Euler 求解器求解装药起爆后冲击波的形成及传播,利用 Euler-Lagrange 流固耦合分析方法分析爆轰产物作用下飞片的动力学响应。

图 6 为在爆轰产物作用下不同厚度飞片飞行距离约 10mm 时的弯曲变形状态。可以看出:随着飞片厚度的增加,飞片变形量明显变小; $d = 3\text{mm}$ 时,飞片严重弯曲,平面度严重破坏, $d \geq 5\text{mm}$ 时,飞片变形量微小,能够满足开关闭合稳定性的要求。

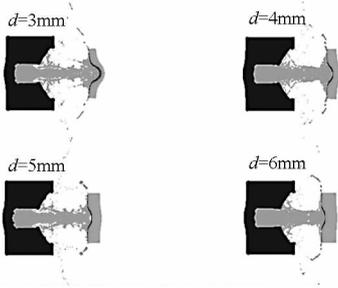


图 6 不同厚度下飞片弯曲变形

Fig. 6 Plate deformation with different thickness

2.4 开关闭合放电性能实验测试与分析

为测试开关高压下闭合放电性能,采用如图 7 所示线路图进行测试(电容充电回路省去),脉冲储能电容直流耐压 $6\text{kV}/60\text{s}$,电容标称值 $47\mu\text{F}$,MFCG 采用多匝模拟线圈替代,双路同步触发电路为开关提供起爆信号同时也为示波器提供触发信号,采用罗氏线圈(R 线圈,标定值 135A/V)测量放电回路中的电流并显示在示波器上。

对 8 只开关进行了不同电压下闭合放电性能的测试,实验前后开关实物如图 8 所示。除去 1 只开关因示波器误触发未采集放电波形,1 只开关因装配失误导致响应不正常,其余 6 只均进行了正常测试。

图 9 给出了 6 发开关高压下放电实验波形,图 9 中阶跃信号为开关电雷管起爆信号,周期性

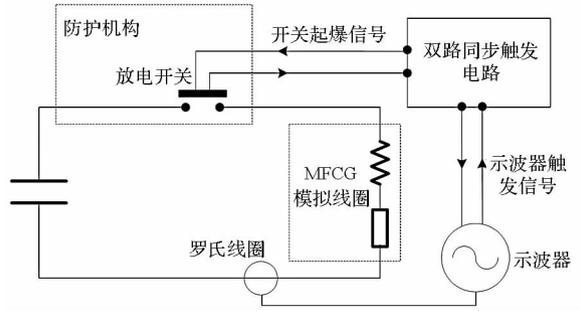


图 7 开关高压放电性能测试线路图

Fig. 7 Circuit diagram of switch discharge performance test at high voltage

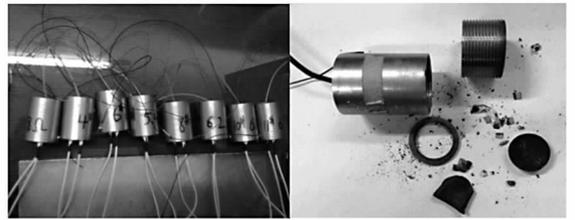


图 8 开关实物图

Fig. 8 Detonation-driving-flyer discharge switch

振荡衰减信号为电容放电波形。表 1 为相应的实验测试数据,表 1 中充电电压为电容初始放电电压,响应时间为开关收到起爆信号至开关闭合时间,电流峰值为放电电流最大值(即第一个波峰峰值),导通时间表示开关闭合后稳定放电时间。开关上的损耗主要集中在闭合放电瞬间,引入电

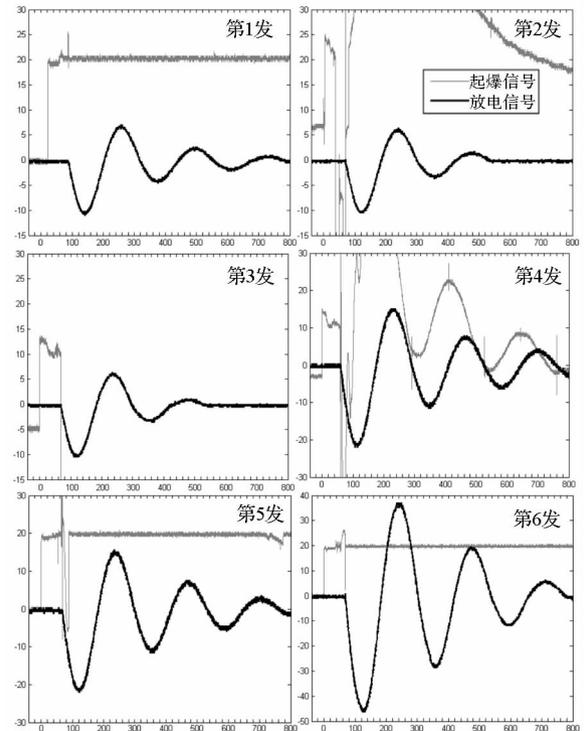


图 9 开关高压下闭合放电性能测试波形

Fig. 9 Waveform of switch test at high power

荷转移率 k 表征开关的放电效率:

$$k = \frac{Q'}{Q_0} = \frac{\int_0^{\tau/4} i(t) dt}{UC} \quad (8)$$

其中, Q' 为首个 1/4 放电周期内开关转移电荷量, Q_0 为电容内初始储存电荷量, τ 为放电周期, U 为电容充电电压, C 为电容量额定值。

表 1 开关高压放电性能实验数据

Tab. 1 Experimental data of switch test

编号	充电电压/ kV	响应时间/ μs	电流峰值/ kA	导通时间/ μs	电荷转移率/ %
1	1.214	66	1.485	完全闭合	91.0
2	1.227	66	1.431	≥ 900	89.3
3	1.214	70	1.440	≥ 900	90.9
4	2.560	62	2.970	完全闭合	87.8
5	2.565	68	2.970	≥ 900	87.6
6	5.130	68	6.264	完全闭合	89.6

实验过程中,开关内部未发生高压击穿现象,满足 5kV 耐压要求;实验完成后,开关仅上下端面有一定隆起,开关外形保持完整,不影响系统其他部分;开关闭合瞬间放电电流波形稳定,未出现抖动现象;6 发开关的闭合响应时间分布在 $66 \pm 5\mu\text{s}$ 以内,平均值为 $66.7\mu\text{s}$,标准差为 $2.7\mu\text{s}$,满足 MFCG 时序控制精度的要求;编号 1,4,6 开关作用后,开关完全闭合,放电波形完整,编号 2,3,5 开关放电时间超过 $900\mu\text{s}$,6 发开关导通时间均满足系统要求;采用首个 1/4 放电周期内电荷转移率表征开关的放电效率,6 发开关放电效率均稳定在 90% 左右,未出现明显偏差。该开关与同轴型导爆索开关相比^[6-8],响应精度和闭合稳定性均不逊色,且外形小巧,长度固定,无须改变导爆索长度,能够实现对 MFCG 的放电控制。

3 延时控制系统实验与分析

为考察 MFCG 延时控制系统的工作情况,进行初级能源系统、高精度延时电路、爆轰驱动飞片型高功率放电开关和小型 MFCG 的联调实验,实验在爆炸塔内进行。

开关控制电容 ($5\text{kV}, 47\mu\text{F}$) 对静态 MFCG 和负载的放电波形如图 10 所示,首个 1/4 周期为 $24.8\mu\text{s}$ 。通过式 (2) 计算最佳起爆延时 τ ,并装入高精度延时电路。

动态 MFCG 实验线路在图 8 上稍作改动:双

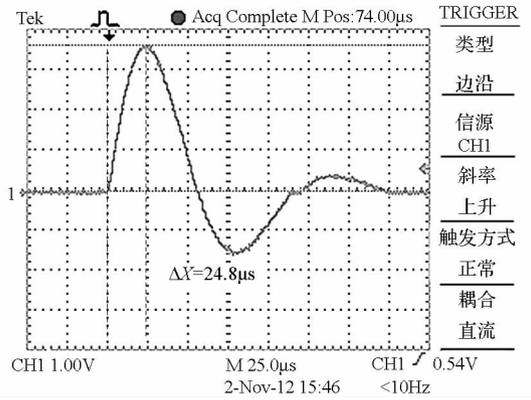


图 10 电容器静态放电波形

Fig. 10 Waveform of capacitor current at static state

路同步触发电路改为高精度延时电路,一路起爆放电开关,一路延时起爆 MFCG;在 MFCG 后级加上感性负载,并用罗氏线圈测试通过负载上的电流。

动态 MFCG 实验放电电流波形如图 11 中通道 1 所示,A 点时刻放电开关导通,电容器开始向 MFCG 及负载放电,电流波形稳定,B 点时刻 MFCG 开始运行,电流瞬间放大,A, B 时间间隔 $23\mu\text{s}$,B 点时刻与电流最大值时刻相差 $1.8\mu\text{s}$,延时误差 $\approx 7.8\%$,满足 MFCG 延时起爆控制精度的要求。

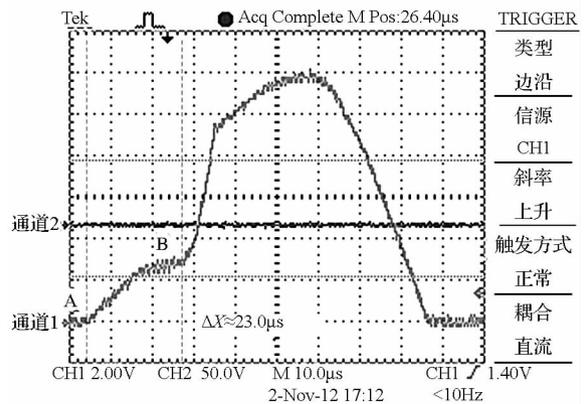


图 11 爆磁压缩实验电容器放电波形

Fig. 11 Waveform of capacitor current in the MFCG experiment

4 结论

爆磁压缩发生器的延时起爆控制是影响其输出性能的关键因素之一,电路控制延时方案可自由装定延时时间,精度高且无须改变导爆索长度,方便安装;文中对最佳起爆时序的分析,可分离出关键参数并对累计误差进行计算,预估时序控制精度;微秒级电雷管直接驱动飞片型高功率放电开关,外形小巧且结构简单,实验测试表明其性能满足对 MFCG 的放电控制,缺陷在于微秒级电雷

管的价格较高,但近几年已有明显下降。总体而言,电路延时方案能够很好满足 MFCCG 高精度延时起爆控制的要求。

参考文献 (References)

- [1] Clay W. High altitude electromagnetic pulse(HEMP) and high power microwave (HPM) devices; threat assessments [R]. Washington D. C. : Library of Congress, 2006.
- [2] Ertekin N. E-bomb: the key element of the contemporary military-technical revolution[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.
- [3] Yurtoglu E. Simulated E-bomb effects on electronically equipped targets [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2009.
- [4] 黄裕年,刘杨,刘淑英. 近期高功率微波武器技术的思路与成果[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(3): 161-166.
HUANG Yunian, LIU Yang, LIU Shuying. Recent thought and achievement for high power microwave weapon technology[J]. Information and Electronic Engineering, 2008, 6(3): 161-166. (in Chinese)
- [5] 肖金石,刘文化,张世英,等. 爆磁压缩电磁脉冲弹的杀伤能力分析仿真[J]. 弹道学报,2009,21(1):91-94.
XIAO Jinshi, LIU Wenhua, ZHANG Shiyang, et al. Analysis and simulation on killing ability of cascaded flux compression electromagnetic pulse bomb [J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(1): 91-94. (in Chinese)
- [6] 刘建平,孟志鹏,曹胜光,等. 爆磁压缩发生器延时控制系统的分析与改进[J]. 国防科技大学学报,2007,29(1): 39-43.
LIU Jianping, MENG Zhipeng, CAO Shengguang, et al. Analysis and improvement of timing control system of magnetic flux compression generator[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007,29(1):39-43. (in Chinese)
- [7] 钟巍. 轴线起爆式螺线管型爆磁压缩发生器研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
ZHONG Wei. Investigation of flux compression generator with coaxial initiation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] 康小平,于绍松,金兆鑫,等. FCG 延时控制系统的改进[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(3): 70-74.
KANG Xiaoping, YU Shaosong, JIN Zhaoxin, et al. Improvement of time delay control system for flux compression generator[J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(3): 70-74. (in Chinese)
- [9] 苏建河. 飞片型爆炸闭合开关的设计与应用[J]. 含能材料,2004,12(A02):604-606.
SU Jianhe. Design and applications of flyer explosive closed switch[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(A02):604-606. (in Chinese)
- [10] Altgilbers L L, Brown M D J, Grishnaev I, et al. 磁通量压缩发生器[M]. 孙承纬,周之奎,译. 北京:国防工业出版社,2008.
Altgilbers L L, Brown M D J, Grishnaev I, et al. Magnetocumulative Generators [M]. Translated by SUN Chengwei, ZHOU Zhikui. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [11] 孙奇志,龚兴根,谢卫平,等. 高能爆磁压缩电流发生器理论分析与实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 51-55.
SUN Qizhi, GONG Xinggen, XIE Weiping, et al. Theoretic and experimental study of an explosive magnetic flux compression generator with high energy output[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 51-55. (in Chinese)
- [12] 金柯,李平,吴强,等. 爆轰产物驱动飞片运动数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 419-424.
JIN Ke, LI Ping, WU Qiang, et al. Numerical simulation on acceleration process of flyer driven by detonation product through an air cushion [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 419-424. (in Chinese)
- [13] 贺其元,刘尚合,施荣绪. 空气间隙固定和连续变化时的空气静电放电事件研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1746-1751.
HE Qiyuan, LIU Shanghe, SHI rongxu. Study on the air electrostatic discharge event at constant and alterable air gap[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1746-1751. (in Chinese)
- [14] 电气电子绝缘技术手册编辑委员会. 电气电子绝缘技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008: 192,438.
Editorial Committee of Handbook of Electrical & Electronic Insulation Technology. Handbook of electrical & electronic insulation technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2008; 192, 438. (in Chinese)
- [15] 王刚华,钟敏,赵剑衡,等. 带空腔爆轰产物驱动准等熵加载技术与反积分数据处理技术[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 620-624.
WANG Ganghua, ZHONG Min, ZHAO Jianheng, et al. Qwasi-isentropic compression techniques driven by detonation products with a cavity and data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(6): 620-624. (in Chinese)
- [16] 赵剑衡,赵锋,文尚刚,等. 带空腔爆轰加载装置对驱动飞片的影响[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4): 307-310.
ZHAO Jianheng, ZHAO Feng, WEN Shanggang, et al. The effects of explosive device with a cavity on flyer driving[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4): 307-310. (in Chinese)
- [17] 李庆中,徐鸿翔,许勇. 微秒电雷管的设计[J]. 火工品, 2007,1: 38-41.
LI Qingzhong, XU Hongxiang, XU Yong. The design of microsecond electric detonator [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2007,1: 38-41. (in Chinese)