

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.007

基于断路开关的准方波输出脉冲功率源

付佳斌^{1,2}, 谢卫平¹, 伍友成¹, 郝世荣¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所中物院脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999;
2. 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088)

摘要: 为了改善电感储能脉冲功率源的输出波形, 提出一种基于电爆炸金属丝断路开关的准方波输出脉冲功率源。该脉冲源以脉冲电容器为初始储能, 通过脉冲形成网络对电爆炸金属丝开关放电, 当电流达到峰值附近时, 电爆炸金属丝开关断开, 将能量切换到负载上。由于脉冲形成网络中电感电流不能突变, 所以负载上能得到数倍于初始储能电容充电电压的脉冲输出; 由于脉冲形成网络中电容的续流作用, 所以负载上能得到准方波脉冲输出。通过理论分析和电路仿真分析, 确定了脉冲形成网络的电感电容级数和爆炸丝参数。对功率源进行了实验验证, 实验结果表明: 在 1 μF 初始充电电容充电 32 kV 时, 在 10 Ω 负载上得到电压幅值 83 kV, 半高宽 279 ns, 90% 平顶 172 ns 左右的脉冲输出, 证明了该原理的脉冲功率源可行性。

关键词: 准方波; 脉冲功率源; 脉冲形成网络; 电爆炸丝断路开关

Quasi-square Wave Output Pulse Power Source Based on Electric Explosive Opening Switch

FU Jiabin^{1,2}, XIE Weiping¹, WU Youcheng¹, HAO Shirong¹

(1. Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, Sichuan Mianyang 621999, China;
2. Graduate School of CAEP, Beijing 100088, China)

Abstract: To improve the output waveform of the inductive energy storage pulse power source, this paper presents a quasi-square wave output pulse power source based on electric explosive opening switch (EEOS). This kind of pulse power source uses a pulse capacitor for initial energy storage, which discharges to EEOS through the pulse forming network (PFN). The EEOS switches off when the discharge current nearly reaches the peak, thus the energy is switched to the load. Since the current in the PFN's inductors cannot mutate, the load voltage can amount to several times the charging voltage of the storage capacitor. Due to the non-mutated voltages in the PFN's capacitors, the load voltage can be of quasi-square wave. Parameters of the EEOS and the PFN are determined by theoretical analysis and circuit simulation, and the present power source is verified by experiment. When a 1 μF storage capacitor is charged to 32 kV, on the 10 Ω load the present pulse power source obtains the output pulse voltage with 83 kV in amplitude, 279 ns in FWHM, and about 172 ns in full width of 90% amplitude, indicating that the present quasi-square wave output pulse power source is feasible.

Key words: quasi-square wave; pulse power source; pulse forming network; electric explosive opening switch

0 引言

电感储能型脉冲功率源具有储能密度高、结构紧凑、易于小型化等优点, 所以广泛用于诸如等离子体物理、受控核聚变、电磁推进、强激光、强脉冲电磁

辐射等领域^[1-4]; 但是电感储能型脉冲功率源的典型输出电压波形为类三角波, 不利于驱动微波源等类型的负载^[5-9]。为了改善电感储能脉冲功率源的输出波形, 文[9]中提出利用一小段传输线将单个储能电感按一定比例分割成两部分的新型电感储能脉冲功率源; 文[10-11]中提出了利用传输线代替储能电感

收稿日期: 2015-10-09; 修回日期: 2015-11-21

基金项目: 国家高技术发展计划项目。

Project Supported by National High-tech R&D Program of China.

进行储能的脉冲功率源,具有启发性。为了进一步降低结构复杂度、缩小体积,文中提出了一种基于断路开关的准方波输出脉冲功率源,其特点是:采用脉冲形成网络取代传统电感储能型脉冲功率源中的储能电感,脉冲形成网络中的电感储能与断路开关配合达到能量压缩和功率放大的作用,脉冲形成网络中的电容储能可以续流,从而达到改善输出波形的效果。理论分析和实验均表明,采用该种基于断路开关的准方波输出脉冲功率源可以在负载上获得数倍于初始储能电容充电电压的准方波脉冲输出。

1 电路原理

电容器 C 作为初始能源,闭合开关 S_1 闭合后,对脉冲形成网络(PFN)进行放电,负载电阻远大于电爆炸丝电阻,放电电流主要通过电爆炸开关(EEOS),在脉冲形成网络内电感电流达到峰值附近时,断路开关 EEOS 断开,切换电流到负载 R_2 上,由于脉冲形成网络内电感两端电流不能突变,所以在负载上实现能量压缩和功率放大,还由于脉冲形成网络内电容两端电压不能突变,使得输出电压保持一定时间的平顶,形成方波脉冲输出。脉冲功率源电路原理图见图 1。

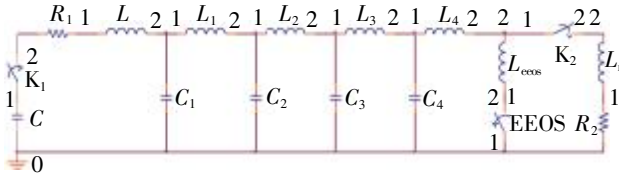


图 1 脉冲功率源电路原理图

Fig. 1 Pulsed power source circuit schematics

2 理论分析

为了便于理论分析,将 PFN 近似为传输线,断路开关近似为理想断路开关,对电路放电过程分析如下。

开关断开前,由于开关闭合时阻抗很低,在分析中近似电阻为 0Ω ,以电流为分析量将传输线输出端放电进行戴维南等效输出为 $2i$ 的等效电流源; Z_0 为传输线阻抗; R 为传输线负载,等效电路图见图 2。

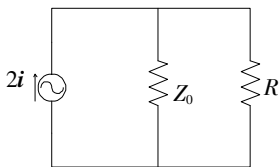


图 2 PFN 放电等效电路

Fig. 2 PFN discharge equivalent circuit

1)根据戴维南等效电路可得

$$\begin{cases} \text{透射系数: } k_{\text{B}} = \frac{2Z_0}{Z_0 + R} = 2 \\ \text{反射系数: } k_{\text{B}} = \frac{R - Z_0}{Z_0 + R} = -1 \end{cases}$$

则电路通解为(T 为传输线电长度):

$$\text{当 } 0 \leq t \leq 2T \text{ 时, } I_{\text{A}}(t) = I_0 e^{-\frac{t}{Z_0 C_1}} = \frac{U_0}{Z_0} e^{-\frac{t}{Z_0 C_1}}, i_{\text{A}} = I_{\text{A}}(t).$$

$$\text{当 } T < t \leq 3T \text{ 时, } I_{\text{B}}(t) = k_{\text{B}} i_{\text{A}}(t - T) = 2 \frac{U_0}{Z_0} e^{-\frac{t-T}{Z_0 C_1}},$$

$$i_{\text{B}} = k_{\text{B}} i_{\text{A}}(t - T) = -\frac{U_0}{Z_0} e^{-\frac{t-T}{Z_0 C_1}}.$$

...

当 $(2n-1)T < t \leq (2n+1)T$ 时,

$$I_{\text{B}}(t) = k_{\text{B}} i_{\text{A}}(t - T), i_{\text{B}} = k_{\text{B}} i_{\text{A}}(t - T).$$

$$\text{当 } 2nT < t \leq (2n+2)T \text{ 时, } I_{\text{A}}(t) = e^{-\frac{t-2nT}{Z_0 C}} \left[\int_{2nT}^t \frac{2i_{\text{B}}(t-T)}{C} \times \right.$$

$$\left. e^{\frac{t-2nT}{Z_0 C}} dt + I_{\text{A}}(2nT) \right], i_{\text{A}} = I_{\text{A}}(t) - i_{\text{B}}(t-T)'. \quad 2) \text{断路开关在 } t_1 \text{ 时刻断开后}$$

$$\begin{cases} \text{透射系数: } k_{\text{B}}' = \frac{2Z_0}{Z_0 + R_{\text{on}}} \\ \text{反射系数: } k_{\text{B}}' = \frac{R - Z_0}{Z_0 + R_{\text{on}}} \end{cases}$$

当 $t_1 < t \leq t_1 + 2T$ 时, $I_{\text{B}}'(t) = k_{\text{B}}' i_{\text{A}}(t - T), U_{\text{B}}'(t) =$

$$k_{\text{B}}' i_{\text{A}}(t_1 - T) R_{\text{on}}.$$

对比开关闭合时的通解如下:当 $t_1 < t \leq t_1 + 2T$ 时, $I_{\text{B}}(t) = k_{\text{B}} i_{\text{A}}(t - T), U_{\text{B}}(t) = k_{\text{B}} i_{\text{A}}(t_1 - T) R_{\text{on}}$,所以可得断路开关断开后电流为闭合情况的 $r(r = k_{\text{B}}' / k_{\text{B}})$ 倍, $I_{\text{B}}'(t) = r I(t)$ 。

取储能电容 $C = 1 \mu\text{F}$, 充电电压 $U_0 = 100 \text{ kV}$, 传输线阻抗 $Z_0 = 10 \Omega$, 电长度为 100 ns , 断路开关闭合电阻为 0 , 断开后断路电阻与负载并联后阻抗为 Z_0 , 进行递推计算, 与断路开关一直保持电阻为 0 进行对比见图 3。

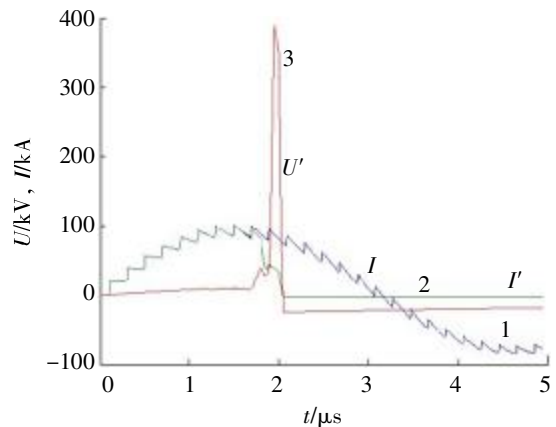


图 3 PFN 放电计算结果

Fig. 3 PFN discharge calculations

图 3 中:1 线为断路开关一直闭合的回路电流;

2线为断路器在 $t=1.7\ \mu\text{s}$ 时断开的回路电流;3线为断路器在 $t=1.7\ \mu\text{s}$ 时断开的负载电压。

负载上得到的电压为 $U_B'(t)=I'(t)R_{\text{on}}=I(t)rR_{\text{on}}=I(t)$

$$(k_{\text{Bi}}'/k_{\text{Bi}})R_{\text{on}}=I(t)(Z_0+R_c)\frac{1}{1+\frac{R_c}{R_{\text{on}}}}$$

负载上得到的功率为 $P_B'(t)=I'^2(t)R_{\text{on}}=I^2(t)r^2R_{\text{on}}=$

$$I^2(t)(k_{\text{Bi}}'/k_{\text{Bi}})^2R_{\text{on}}=I^2(t)(Z_0+R_c)^2\frac{1}{R_{\text{on}}+2Z_0+\frac{Z_0^2}{R_{\text{on}}}}$$

3 电路仿真分析

3.1 PFN 级数优化设计

在常见的 PFN 加闭合开关的应用中,为了在负载上得到较快前沿和较好的平顶,需要使得 PFN 的传输特性接近理想传输线,所以一般 PFN 级数要求不小于 4 级,但是在文中这种 PFN 加断路开关的应用中,存在以下两个问题:

参数:

$t_{\text{c_tran}}=50\ \text{ns}$
 $t_{\text{c_tran}}=10\ \text{ns}$
 $t_{\text{open}}=1\ 200\ \text{ns}$
 $\text{DRC}_1=1\ \mu\text{F}$
 $R_{\text{off}}=30\ \Omega$
 $L_0=250\ \text{nH}$
 $C_0=4.4\ \text{nF}$

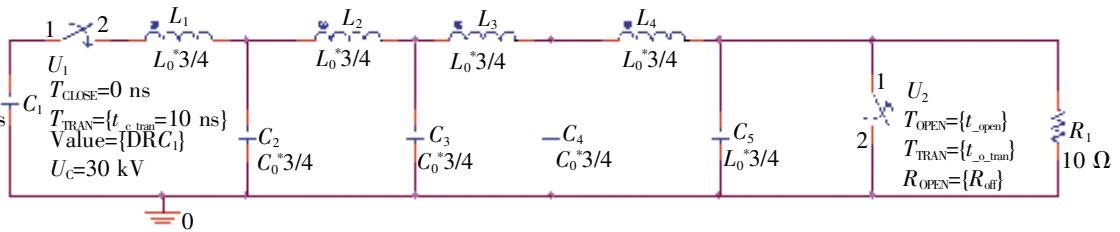


图 4 不同级数 PFN 仿真电路图

Fig. 4 Different stages PFN circuit simulation

其仿真结果见图 5, 从左到右依次为 4、3、2、1 级 PFN 的仿真结果。从图 5 中可看出,增加 PFN 级数可缩短脉冲前沿,改善波形平顶,但是由于实际电路采用 EEOS 作为断路开关,其阻抗变化过程将导致前沿变缓,且电容的大电流放电过程导致存在平顶降,所以根据仿真结果可看出,采用 1、2 级的 PFN 波形平顶较差,3、4 级 PFN 波形平顶较好,3 级 PFN 比 4 级 PFN 更简单紧凑。故选取 PFN 级数为 3 级。

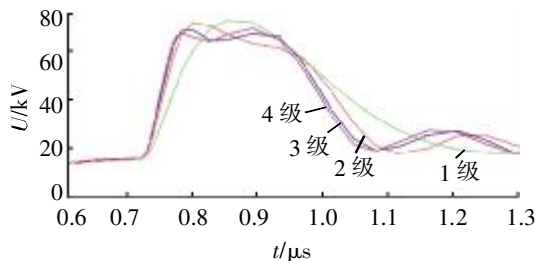


图 5 不同级数 PFN 仿真结果

Fig. 5 The simulation results of different stages PFN

3.2 电爆炸丝开关优化设计

根据理论分析可知,电爆炸丝开关应在储能电容放电电流峰值附近断开,为了确定相应的电爆炸丝开关的丝根数和丝长度,采用电爆炸丝开关的比

1)断路开关的断开时间远大于闭合开关,文中采用的电爆炸丝断路开关其断开时间约为百纳秒量级。在 PFN 级数大于两级时,开关断开时间对波形前沿的影响大于 PFN 级数的影响。为了获得更快的输出波形前沿,可以在负载前串联锐化开关,降低了波形前沿对 PFN 级数的要求。

2)电爆炸丝开关闭合时,初始储能电容处于大电流放电状态,电压波形会出现锯齿状,并非增加 PFN 级数所能改善,这在一定程度上降低了波形平顶对 PFN 级数的要求。

综上所述,为了减小系统复杂度,利于紧凑型设计,更低级数的 PFN 也应纳入考虑范围内。

利用 Pspice 软件进行了 PFN 级数为 1–4 级时该脉冲功率源输出波形仿真研究,其中 4 级 PFN 功率源的仿真模型见图 4。图 4 中: C_1 为储能电容; U_2 为电爆炸丝开关简化的理想断路开关模型; L_1 – L_4 为 PFN 的电感; C_2 – C_5 为 PFN 的电容; R_1 为负载。

作用量模型进行仿真。

电爆炸丝开关的比作用量模型认为同种材料的电爆炸丝的电阻率 ρ 与比作用量 $g(g=\int_0^t j^2 dt, j$ 为电爆炸丝的电流密度, t 为电流流过的时间) 满足一定的函数关系,实验中采用的是银丝,根据文[12–18]中的实验数据,银丝的电阻率与比作用量的函数关系见图 6。

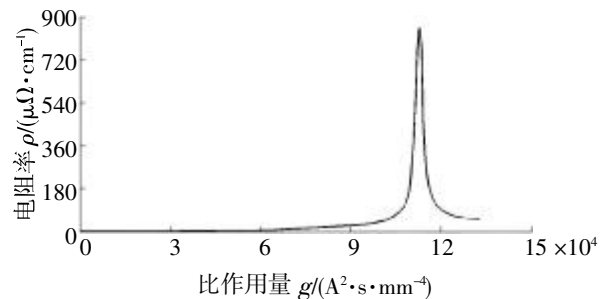


图 6 银的 ρ 与 g 的关系

Fig. 6 Relation between ρ and g of silver

根据银丝的比作用量模型,利用 Pspice 的 ABM (模拟行为建模) 模块对电爆炸丝开关建模,见图 7

粗色框内部分,建立全电路仿真见图 7。电爆炸丝开关电阻的迭代计算流程是:对其中电爆炸丝开关杂散电感 L_2 内流过的电流密度(即电流除以电爆炸丝的总截面积)的平方进行积分,计算出比作用量,再

利用根据银丝的电阻率与比作用量的函数表查得该时刻的电爆炸丝电阻率,然后根据电爆炸丝的长度和截面积计算出电爆炸丝开关的总电阻,代入电路中求解下一时刻的电路参数,如此循环。

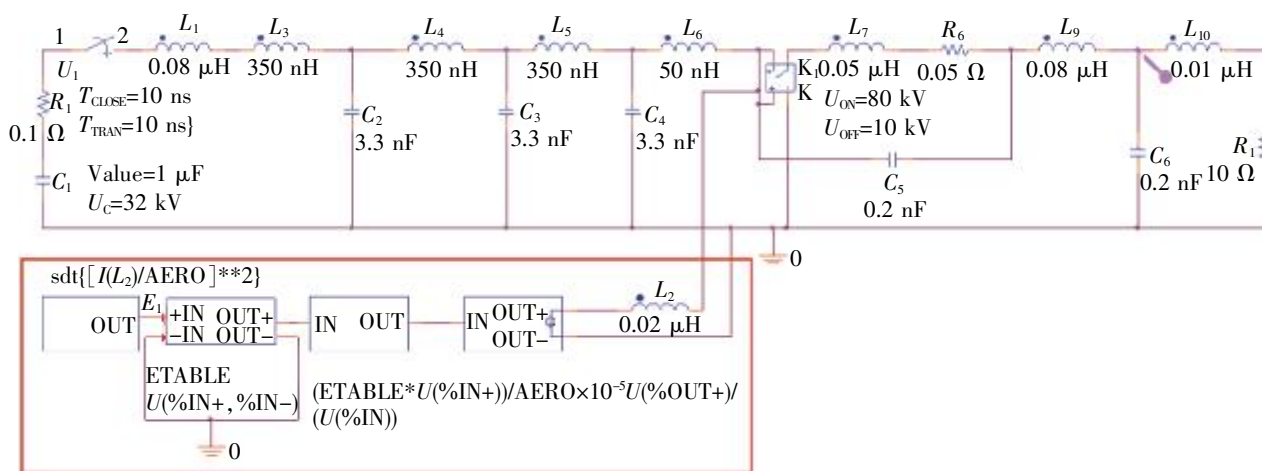


图 7 不同丝根数仿真电路图

Fig. 7 Different number of filaments circuit simulation

图 7 中: C_1 为储能电容; R_1 为电路杂散电阻; U_1 为闭合开关; L_1 为储能电容与 PFN 之间的杂散电感; L_3-L_5 为 PFN 的电感; C_2-C_4 为 PFN 的电容; L_6 为 PFN 与锐化开关之间的杂散电感; K_1 为锐化开关; C_5 为锐化开关杂散电容; L_7 为锐化开关杂散电感; R_6 为锐化开关杂散电阻; L_9 为锐化开关与负载之间的杂散电感; C_6 为负载杂散电容; L_{10} 为负载杂散电感; R_5 为负载电阻。

对丝根数从 10~14 进行参数扫描,电爆炸丝根数为 10、11、12、13、14 情况下负载上得到的电压波形见图 8。可见当电爆炸丝根数为 12,丝长度为 85 mm 时在设计参数下能获得具有较好平顶、峰值为 77 kV、脉宽大于 200 ns 的输出电压。

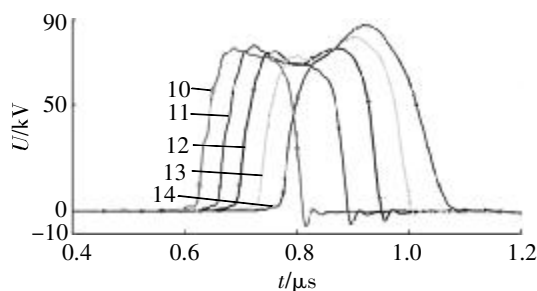


图 8 不同丝根数仿真结果

Fig. 8 The simulation results of different number of filaments

4 实验验证

根据理论分析和仿真结果,搭建了验证性实验平台,见图 9。对基于断路开关的准方波输出脉冲功率源进行原理验证。由于实验装置限制,并未加前沿

锐化开关。

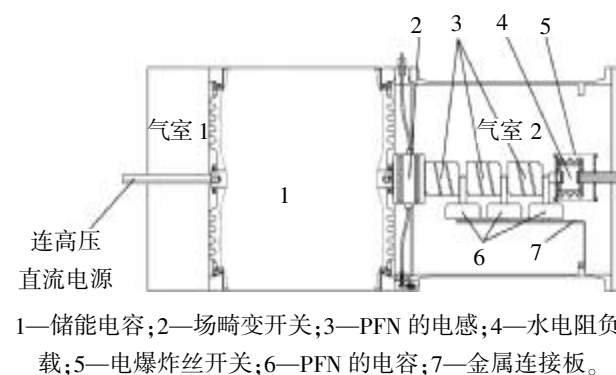


图 9 验证性实验平台结构图

Fig. 9 Confirmatory test platform configuration diagram

实验参数:充电电压为 -32 kV,电爆炸丝开关丝根数为 12 根,丝长度为 83 mm。示波器测得负载电压电流见图 10。

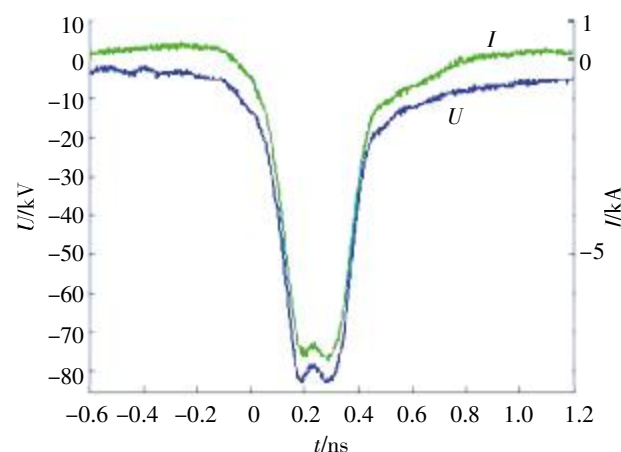
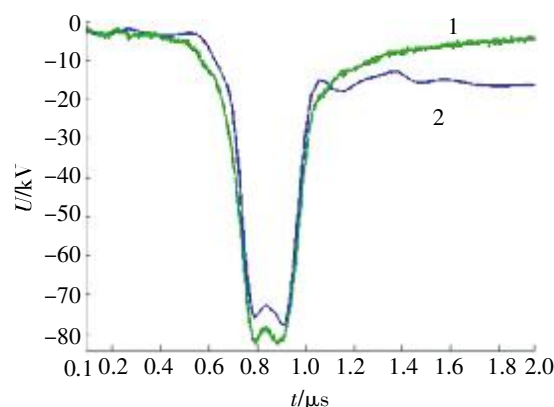


图 10 实验结果

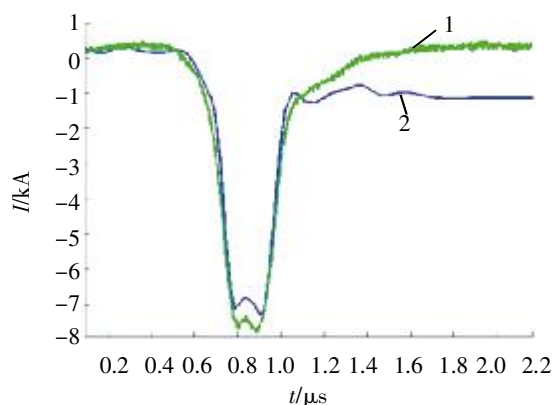
Fig. 10 The experimental results

平顶中有凹陷处,考虑到国家标准对于电力部分使用的冲击电流波形中允许峰值附近存在不大于总幅值 10% 的大小的振荡,平顶为总幅值的 90% 以上的持续时间 t_{90} ,所以文中定义总幅值的 90% 以上的持续时间 t_{90} 为平顶时间。

由测得波形可以得出:电压幅值为 -82.7 kV,平顶时间为 172 ns,半高宽为 279 ns,上升时间为 208 ns,电压的实验与仿真结果对比见图 11(a),电流幅值为 -8.16 kA,平顶时间为 162 ns,半高宽为 275 ns,上升时间为 173 ns,电流的实验与仿真结果对比见图 11(b)(线 1 为实验测得波形,线 2 为仿真计算波形,为了对比,将实验测得波形沿时间轴进行了平移)。可见实验与仿真结果符合得较好,而且实验结果的电流电压幅值大约为 6% 左右,分析原因是电爆炸丝开关模型中所采用 TUCKER 等人的实验数据是由大气压条件下测得的,而实际试验中银丝周围充入了高压绝缘气体,使得电爆炸丝开关的断路电阻更大,从而使得负载上电压电流更大。



(a)电压的实验与仿真结果



(b)电流的实验与仿真结果

图 11 实验与仿真结果对比图

Fig. 11 The experimental results

5 结语

根据理论分析可以看出,基于断路开关的准方波输出脉冲功率源可以在负载上获得数倍于初始储

能电容充电电压的准方波脉冲输出,在验证实验中从 10 Ω 水电阻负载上获得了约 2.6 倍初始储能电容充电电压,半高宽 279 ns,90% 平顶 172 ns 左右的准方波输出,证明了这种基于断路开关的准方波输出脉冲功率源的可行性。在下一步的工作中,将提高储能电容充电电压和增加初始储能电容的容量以提高脉冲功率源的输出功率,并在负载和电爆炸丝开关之间加入前沿锐化开关以缩短脉冲功率源输出波形的前沿。

参考文献:

- [1] BLUHM H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
BLUHM H. Pulsed power systems principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [2] 王莹,孙元章,阮江军. 脉冲功率科学与技术[M]. 汕头:汕头大学出版社,2010.
WANG Ying, SUN Yuanzhang, RUAN Jiangjun. Science and technology on pulsed power[M]. Shantou: Shantou University Publishing House, 2010.
- [3] 邓桃,吴广宁,周凯,等. 一种纳秒级高压脉冲发生器的研制[J]. 高压电器,2007, 43(2): 131-132.
DENG Tao, WU Guangning, ZHOU Kai, et al. Development of a high voltage nanosecond pulse generator[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 131-132.
- [4] 伍友成,杨宇,耿力东,等. 脉冲变压器紧凑型脉冲功率源设计[J]. 高压电器,2011, 47(2): 88-92.
WU Youcheng, YANG Yu, GENG Lidong, et al. Design of compact pulsed power supply with pulse transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 88-92.
- [5] 孙奇志,刘伟,刘正芬,等. 紧凑型爆炸脉冲电源[J]. 强激光与粒子束,2010, 22(4): 782-786.
SUN Qizhi, LIU Wei, LIU Zhengfen, et al. Compact explosive pulsed power source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 782-786.
- [6] 郝世荣,谢卫平,丁伯南,等. Marx 发生器驱动的电感储能型脉冲功率源[J]. 高电压技术,2009, 35(3): 657-660.
HAO Shirong, XIE Weiping, DING Bonan, et al. Inductive-energy-storage pulsed power source energized by a Marx generator[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 657-660.
- [7] 谢卫平,郝世荣,王敏华,等. 一种基于电感储能技术的紧凑型高功率脉冲源[J]. 高电压技术,2004, 30(1): 41-42.
XIE Weiping, HAO Shirong, WANG Minhua, et al. A compact high power pulsed source basing on inductive energy storage technique[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 41-42.
- [8] 张军,钟辉煌,杨汉武. 高功率微波脉冲功率驱动源研究进展[J]. 高电压技术,2004, 30(6): 45-48.

- ZHANG Jun, ZHONG Huihuang, YANG Hanwu. Developments of pulsed power technology for driving HPM sources[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6):45-48.
- [9] 李志强, 钟辉煌, 樊玉伟, 等. 新型电感储能脉冲功率驱动源[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4):735-738.
- LI Zhiqiang, ZHONG Huihuang, FAN Yuwei, et al. Novel inductive energy storage pulsed power source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 735-738.
- [10] EUGENY V C, FORTOV V E, KIRILL V G, et al. Accelerator for high power microwave Generation[C]// Proceedings of the 11th International Conference on High Power Particle Beams.[S.l.], IEEE: 1996:457-460.
- [11] FORTOV V E, KAMENSKY V A, MIHAILOV V M, et al. Development of accelerator for high-power microwave applications based on the forming line supplied with current [C]//Proceedings of the 12th International Conference on High-Power Particle Beams.[S.l.], IEEE: 1998:658-661.
- [12] TUCKER T J, TOTH R P. EBW1: A computer code for the prediction of the behavior of electrical circuit containing exploding wire elements[R]. NTIS:SAND750041, 1975.
- [13] 杨宇. 金属丝电爆炸特性及应用研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005.
- YANG Yu. The electrical wire explosion characteristics and application research[D]. Mianyang: Graduate School of CAEP, 2005.
- [14] 杨宇, 伍友成, 耿力东, 等. 电爆炸丝和脉冲变压器驱动低阻抗负载研究[J]. 高压电器, 2010, 46(2):39-41.
- YANG Yu, WU Youcheng, GENG Lidong, et al. The investigation of the pulse over low-impedance load excited by electric exploding wire and pulse transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(2): 39-41.
- [15] 杨宇, 谢卫平, 王敏华, 等. 含电爆炸元件电路的 PSpice 模拟和实验研究[J]. 高压电器, 2007, 43(6):457-459.
- YANG Yu, XIE Weiping, WANG Minhua, et al. Pspice simulation and experiment of the circuit with electric exploding component [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43 (6): 457-459.
- [16] 张华赢, 杨兰均, 李良书, 等. 投切电容器组专用真空断路器性能研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 38-44.
- ZHANG Huaying, YANG Lanjun, LI Liangshu, et al. Study on the performance of special vacuum breaker for switching capacitor banks[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3):38-44
- [17] 于钦学, 任文娥, 李文杰. 便携式局部放电在线检测系统的研制[J]. 陕西电力, 2012, 40(9):34-37.
- YU Qinxue, REN Wen'e, LI Wenjie. Development of partial discharge diagnosis technology based on ultra wide band detection technology [J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(9):34-37.
- [18] 祁海清, 罗静, 郑重. 基于超宽带检测的局部放电在线诊断技术[J]. 陕西电力, 2013, 41(2):36-39.
- QI Haiqing, LUO Jing, ZHENG Zhong. Online partial discharge diagnosis technology based on ultra wide band detection technology [J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(2): 36-39.
- 付佳斌(1987—), 男, 助理研究员, 从事脉冲功率技术研究。
- 谢卫平(1964—), 男, 研究员, 从事脉冲功率技术研究(通讯作者)。

(上接第 43 页)

- WANG Jiansheng, ZHOU Huigao, FENG Changyuan, et al. Resistive impedance divider used for transient enclosure voltage measurement in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(6):17-19.
- [21] WANG Jiansheng, FENG Changyuan, KIM I K S, et al. Laboratory and on-site measurements of TEV generated by disconnect switching in 362 kV GIS [C]//Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Arlington, USA: IEEE, 1998:681-684.
- 苟杨(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压测量、脉冲功率技术方面的研究工作。
- 范川(1989—), 男, 硕士, 主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作。
- 王亚楠(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压测量、脉冲功率技术方面的研究工作。
- 陈维江(1958—), 男, 教授级高工, 博士生导师, 主要从事电力系统防雷、过电压与绝缘配合、电磁环境和特高压建设等方面的研究工作。
- 李志兵(1975—), 男, 高工, 主要从事高压开关设备和串补装置研制、GIS 中 VFTO 研究等方面的工作。
- 丁卫东(1976—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事高电压测量、气体绝缘与气体放电、脉冲功率技术方面的研究工作。