



·脉冲功率技术·

## 基于能量回收原理脉冲变压器复位系统仿真与实验研究\*

王庆峰, 车永旺, 李相强, 张健穹, 唐先锋

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

**摘 要:** 为提升脉冲功率系统中脉冲变压器的磁芯利用率, 提出了一种基于能量回收原理的脉冲变压器复位系统。根据磁芯磁滞回线分析了基于能量回收原理复位系统在一个周期内磁感应强度的变化过程, 推导给出了脉冲变压器励磁电流、复位电容电压在不同阶段的求解公式。建立了基于能量回收原理脉冲变压器复位系统的仿真模型, 通过仿真结果验证了复位系统理论分析和求解公式正确性。在此基础上构建了基于脉冲变压器升压及能量回收复位系统的脉冲调制器试验平台, 在相同脉冲宽度下对比有复位系统和无复位系统脉冲调制器的励磁电流, 结果表明, 有复位系统脉冲调制器可有效提高磁芯的利用率。对有复位系统的脉冲调制器进行重频实验, 结果表明复位系统可实现 1 kHz 重频稳定工作。

**关键词:** 能量回收; 脉冲变压器; 复位; 磁感应增量; 励磁电流

中图分类号: TM417

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210432

## Simulation and experimental research of pulse transformer reset system based on energy recovery principle

Wang Qingfeng, Che Yongwang, Li Xiangqiang, Zhang Jianqiong, Tang Xianfeng

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To improve the core utilization rate of pulse transformer in pulse power system, a pulse transformer reset system based on energy recovery principle is proposed. Firstly, according to the magnetic core hysteresis loop, the change process of the magnetic induction intensity of the reset system based on the energy recovery principle in one cycle is analyzed, and the solution formulas of the pulse transformer excitation current and reset capacitor voltage in different stages are deduced. A simulation model of the pulse transformer reset system based on the energy recovery principle is established, and the correctness of the theoretical analysis and solution formulas of the reset system is verified by the simulation results. On this basis, a pulse modulator test platform based on pulse transformer boosting and energy recovery reset system is constructed. The excitation currents of the pulse modulators with reset system and without reset system are compared under the same pulse width. The results show that the reset system pulse modulation can effectively improve the utilization of the magnetic core. The repetition frequency experiment is carried out on the pulse modulator with reset system, and the results show that the reset system can realize the stable operation of 1 kHz repetition frequency.

**Key words:** energy recovery, pulse transformer, reset, incremental magnetic induction, exciting current

脉冲功率系统广泛应用于各种领域, 例如粒子加速器、雷达、电磁发射、医疗辐射、消毒系统等<sup>[1-3]</sup>。在这些应用中, 需要产生数百 kV 甚至是 MV 级的脉冲, 单个脉冲的持续时间从几 ns 到几 ms 不等。根据应用需求, 通常情况下对产生的脉冲在上升沿、下降沿、过冲、顶降、效率等方面提出了严格要求, 为此国内外学者对不同拓扑结构脉冲功率系统开展了大量的研究, 并取得可喜的成果<sup>[4-6]</sup>。

目前, 许多脉冲功率系统使用脉冲变压器来提高输出电压, 这与电力电子中广泛使用高频变压器实现升压相

\* 收稿日期: 2021-10-14; 修订日期: 2022-04-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目 (2682021ZT039、2682021GF016、2682021CX072、2682021ZTPY12)

联系方式: 王庆峰, wangqingfeng173@163.com。

类似。但通常情况下脉冲功率系统只产生重复的单极性脉冲电压,此时磁芯为单向磁化,其工作区间为正剩磁( $B_r$ )到正饱和磁通( $B_s$ )之间,即  $B_s - B_r$ <sup>[7-8]</sup>。即使采用低剩磁磁芯材料,其所需要的磁芯体积也是双极性磁化的两倍以上,导致脉冲变压器的磁芯材料性能不能得到有效利用,而且磁芯体积的增大,对脉冲变压器分布参数、损耗、绝缘的设计带来一定难度,不利于输出脉冲波形,特别是在前沿方面的优化设计。

为此,脉冲功率系统中通过增加复位系统实现脉冲变压器双极性工作,其基本原理是利用反向电流对磁芯进行反向磁化,要求产生足够大的反向电流或者反向伏秒数,反向电流可通过脉冲变压器的初级、次级或者第三绕组作用在脉冲变压器上<sup>[9-10]</sup>。目前对于磁芯的复位方式主要有直流复位、脉冲复位,两者各有特点。由于磁芯磁化的脉宽越短,磁芯的矫顽力越大,因此脉冲复位所需电流峰值更大。直流复位可实现磁芯从负向饱和点开始工作,其工作区间为 $-B_s \sim B_s$ ,脉冲复位则在主脉冲开始前关断复位电流的输出,随着励磁电感上反向电流的下降磁芯工作起点逐渐回到负向剩磁,其工作区间为 $-B_r \sim B_s$ ,因此脉冲复位可利用的磁感应增量一般小于直流复位系统。直流复位在脉冲功率系统工作期间持续输出电流,因此损耗较大使得系统整体效率较低<sup>[11]</sup>。

目前,直流复位系统和脉冲复位系统的能量均是由外部电源提供,不利于脉冲功率系统紧凑化、高效率<sup>[12]</sup>。实际上,该能量可由脉冲变压器励磁电感提供<sup>[13-16]</sup>。本论文首先详细介绍了脉冲功率系统主脉冲期间脉冲变压器励磁电流变化情况,在此基础上分析了基于能量回收原理脉冲变压器复位系统的工作原理和控制方法;建立了脉冲功率系统及其复位系统仿真模型,仿真分析了一个周期内励磁电流、伏秒数、复位电容电压等参数的变化规律,并验证了高重频工作的可行性。最后制作了一台基于能量回收脉冲功率系统原理性样机并开展了相关试验验证。

## 1 脉冲变压器复位原理

### 1.1 磁芯磁滞回线工作原理

脉冲变压器工作期间,根据法拉第电磁感应定律有:

$$N\Delta B(t)S = \int_0^t U(t)dt \quad (1)$$

式中: $N$ 为初级线圈的匝数, $\Delta B(t)$ 为 $t$ 时刻磁芯的磁感应增量, $S$ 为变压器磁芯有效截面积, $U(t)$ 为 $t$ 时刻磁芯线圈两端加载的电压。由式(1)可知,在相同伏秒数需求情况下,增加磁芯的磁感应增量,可减少初级的线圈匝数和磁芯的截面积。脉冲变压器漏感与初级线圈匝数的平方成正比,因此 $N$ 越大漏感越大不利于输出快前沿脉冲;截面积 $S$ 越大则脉冲功率系统的尺寸、体积、重量也就越大,不利于系统小型化,因此实际中应尽可能的提高磁芯的磁感应增量。对于无复位电路脉冲功率系统,当输出的单极性脉冲结束后,随着励磁电流的减小,磁感应强度 $B$ 将回到剩磁点 $B_r$ ,如图1所示,其可利用的最大磁感应增量 $\Delta B_m = B_s - B_r$ ,为提高磁芯利用率,该模式下普遍采用低剩磁磁芯材料。对于带复位电路脉冲功率系统,在施加下一个主脉冲前,反向复位电流最大可实现磁感应强度 $B$ 回到 $-B_s$ ,其可利用的最大磁感应增量 $B_m = 2B_s$ ,该模式下普遍采用高矩形比磁芯材料,可减小磁芯损耗及利用率。

对于带复位电路脉冲功率系统,在施加下一个主脉冲前,反向复位电流最大可实现磁感应强度 $B$ 回到 $-B_s$ ,其可利用的最大磁感应增量 $B_m = 2B_s$ ,该模式下普遍采用高矩形比磁芯材料,可减小磁芯损耗及利用率。

### 1.2 基于能量回收复位系统工作原理

脉冲功率系统输出主脉冲期间,随着施加在脉冲变压器初级侧的伏秒数增大,励磁电流将同步增大,主脉冲结束后励磁电感存储的能量将损耗在吸收电路或者负载上。基于能量回收复位系统的基本原理是将励磁电感上存储的能量通过续流二极管传输到复位电容上,用于主脉冲结束后的磁芯复位。图2给出了基于能量回收复位系统电路示意图,图中 $C_m$ 、 $S_M$ 、 $R_L$ 分别为主电路的储能电容、主开关、负载; $L_M$ 为脉冲变压器励磁电感; $C_r$ 、 $S_R$ 、 $D_2$ 、 $R_{loss}$ 为复位电路的复位电容、复位开关、续流二极管、回路电阻,由于漏感通常要比励磁电感小一个量级,为分析方便忽略系统中漏感影响, $S_M$ 、 $S_R$ 分别用于控制主脉冲、复位电流的输出, $N$ 为变压器变比。

通常情况下未经使用的磁芯材料磁感应强度位于图1中的原点处,但为分析方便以及统一性,本文假设在施加第一个主脉冲前已经通过复位电路实现磁感应强度位于负剩磁点( $-B_r$ )处,由后续的分析可知该假设是合理并且也很容易实现。根据开关状态可将两个相邻主脉冲之间的一个周期分为四个阶段,如图3所示,其中1代表开

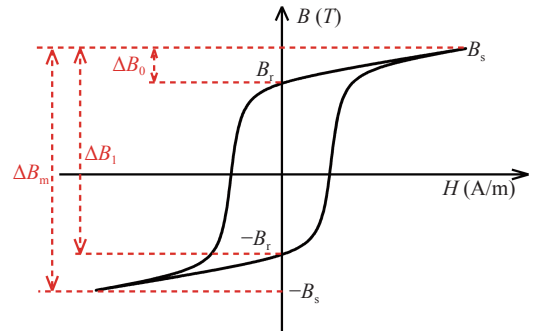


Fig. 1 Diagram of magnetic core hysteresis loop

图1 磁芯磁滞回线示意图

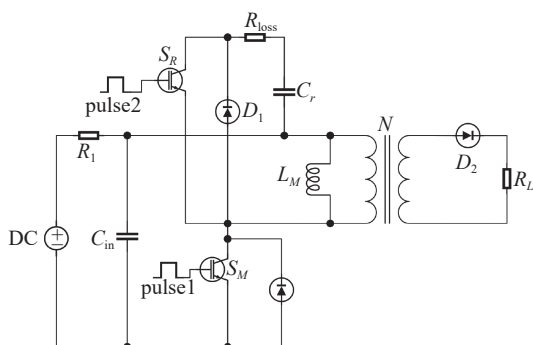


Fig. 2 Diagram of reset circuit based on energy recovery

图2 基于能量回收复位电路示意图

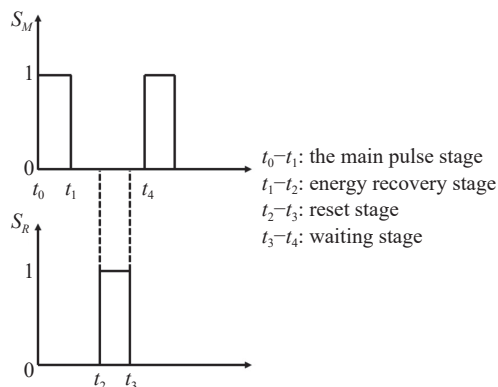


Fig. 3 Switch trigger pulse

图3 开关触发脉冲

关闭合, 0 代表开关断开。

将整个系统的工作过程分为四个阶段, 分别为主脉冲阶段、能量回收阶段、复位阶段和等待阶段, 各个阶段中的电流流向如图 4 所示。

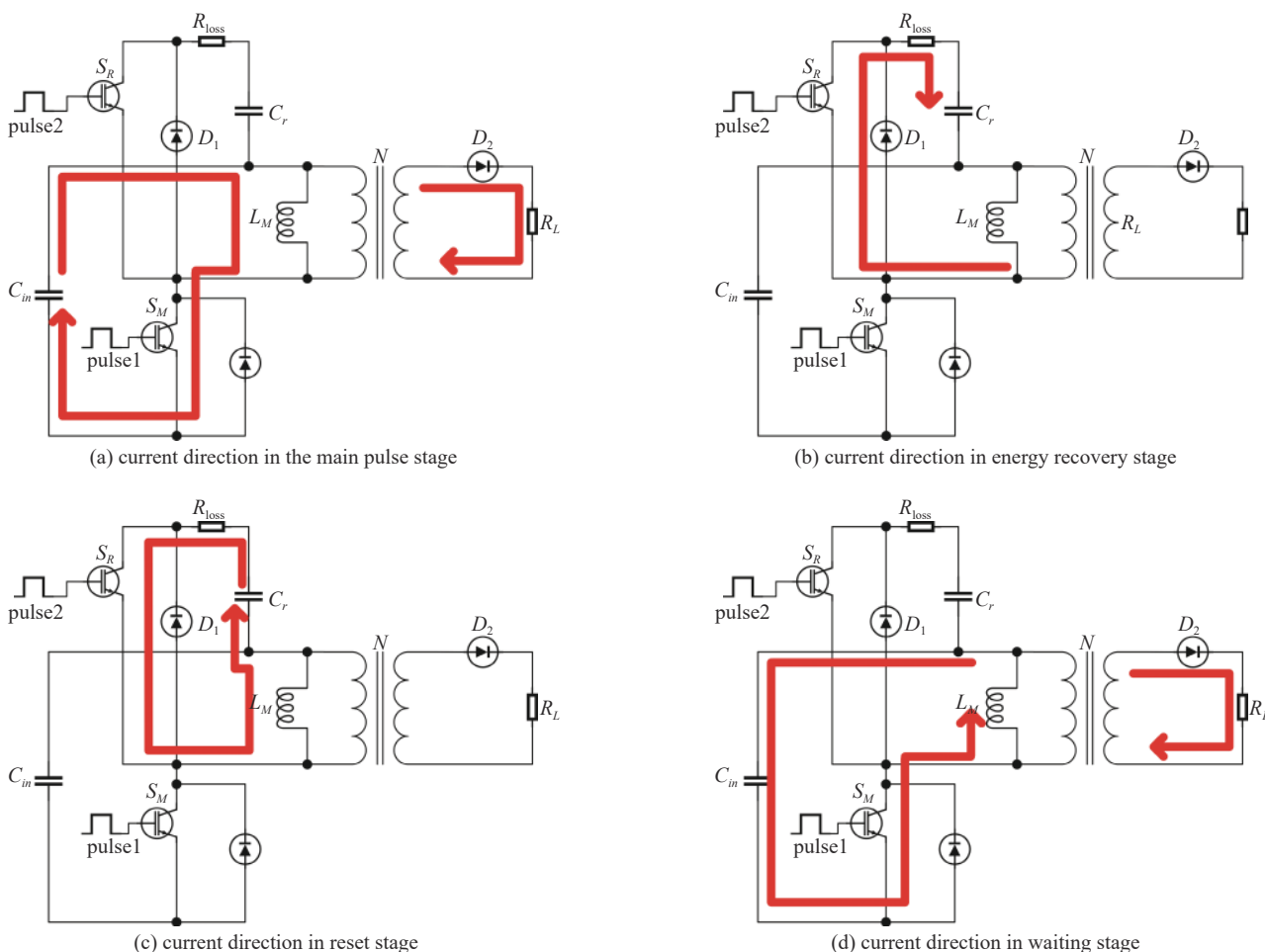


Fig. 4 Working process of reset system

图4 复位系统工作过程

①主脉冲阶段 ( $t_0-t_1$ ): 主开关  $S_M$  闭合, 复位开关  $S_R$  断开。主电路储能电容  $C_{in}$  通过脉冲变压器升压输出高压脉冲, 可等效为电容对电阻、电感并联放电。此时电路中的电流流向如图 4(a) 所示。在此阶段中复位电容电压保持不变。励磁电流的值可由式 (2) 求得。

$$I_{mag}(t) = c_1 e^{k_1(t-t_0)} + c_2 e^{k_2(t-t_0)} \quad (2)$$

式中:  $t$  为主脉冲阶段中的任一时刻,  $t_0$  为主脉冲阶段初始时刻,  $t_1$  为主脉冲阶段结束时刻,  $c_1$  和  $c_2$  为常数, 可根据主脉冲初始时刻和结束时刻的励磁电流求出。  $k_1$  和  $k_2$  为常数, 可由以下公式求得

$$k_1 = \frac{\frac{L_M}{R} - \sqrt{\left(\frac{L_M}{R}\right)^2 - 4L_M C_{in}}}{2L_M C_{in}} \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{\frac{L_M}{R} + \sqrt{\left(\frac{L_M}{R}\right)^2 - 4L_M C_{in}}}{2L_M C_{in}} \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{N^2} R_L \quad (5)$$

式中:  $L_M$  为脉冲变压器励磁电感,  $C_{in}$  为储能电容,  $N$  为脉冲变压器变比、 $R_L$  为负载阻抗。

②能量回收阶段 ( $t_1-t_2$ ): 主开关  $S_M$  与复位开关  $S_R$  均为断开状态。励磁电感  $L_M$  与复位电容  $C_r$  通过二极管形成单向谐振回路, 即励磁电感释放能量到复位电容  $C_r$  中, 给复位电容  $C_r$  充电, 当励磁电流降为零时复位电容上电压达到最大值, 而后由于复位开关、续流二极管的阻断, 能量将存储在复位电容上。在此阶段中复位电容电压以及励磁电流可由式(6)、(7)求得, 此时电路中的电流流向如图 4(b)所示。

$$I_{mag}(t) = e^{\alpha t} \{c_3 \cos[\beta(t-t_1)] + c_4 \sin[\beta(t-t_1)]\} \quad (6)$$

$$U_{C_r} = L_M \frac{dI_{mag}}{dt} \quad (7)$$

其中  $\alpha$  和  $\beta$  的意义如下

$$k_3 = k_4^* = \alpha + j\beta \quad (8)$$

$$k_3 = \frac{\frac{L_M}{R_{loss}} - \sqrt{\left(\frac{L_M}{R_{loss}}\right)^2 - 4L_M C_r}}{2L_M C_r} \quad (9)$$

$$k_4 = \frac{\frac{L_M}{R_{loss}} + \sqrt{\left(\frac{L_M}{R_{loss}}\right)^2 - 4L_M C_r}}{2L_M C_r} \quad (10)$$

式中:  $R_{loss}$  为复位电路中损耗电阻为脉冲变压器励磁电感,  $C_r$  为复位电容。  $c_3$  和  $c_4$  为常数, 可以根据在能量回收阶段初始时刻  $t_1$  和结束时刻  $t_2$  的励磁电流大小求得。根据  $LC$  谐振回路原理, 为了保证能量回收阶段励磁电感  $L_M$  中的能量能全部转移到复位电容  $C_r$  同时不会再次回到励磁电感, 能量回收阶段的总时间  $T$  应为励磁电感  $L_M$  和复位电容  $C_r$  组成的  $LC$  谐振回路周期的四分之一, 即

$$T = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_{mag} C_r} \quad (11)$$

③复位阶段 ( $t_2-t_3$ ): 主开关  $S_M$  断开, 复位开关  $S_R$  闭合。此时复位电容  $C_r$  与励磁电感  $L_M$  同样形成谐振回路, 复位电容释放能量到励磁电感中, 复位电容放电。此时电路中的电流流向如图 4(c)所示。复位阶段过程中复位电容两端电压与励磁电流的求解方法与回收能量阶段相似, 这里不再赘述。为了能够让反向励磁电流出现最大值同时电流不会出现正值, 应保证复位阶段总时间不小于  $T$  同时不大于  $2T$ , 防止磁芯的磁通密度从  $-B_s$  逐渐增大变为正值, 导致达不到复位效果。

④等待阶段 ( $t_3-t_4$ ): 主开关  $S_M$  断开, 复位开关  $S_R$  断开。此时等待下一个主脉冲到来, 由于复位开关  $S_R$  断开时刻  $t_3$  与主开关  $S_M$  闭合时刻  $t_4$  之间存在延迟间隔  $\Delta T$ , 期间励磁电感  $L_M$  与储能电容  $C_{in}$  形成回路, 励磁电感中的能量将缓慢减小, 其能量将损耗在负载电阻中。此时可等效为励磁电感与负载电阻组成的  $LR$  放电电路, 电路中的电流流向如图 4(d)所示, 根据基尔霍夫定律可以得到在等待阶段励磁电流  $I_{mag}$  的满足

$$I_{mag}(t) = I_{mag}(t_3) e^{-\frac{R_L/N^2}{L_M}(t-t_3)} \quad (t_3 \leq t \leq t_4) \quad (12)$$

之后的周期内均重复以上的工作阶段。

## 2 仿真结果与分析

根据应用需求设计的基于脉冲变压器全固态脉冲调制器参数如表 1 所示。

表 1 脉冲调制器参数

Table 1 Parameters of pulse modulator

$V_{DC}/kV$	$V_{out}/kV$	pulse width/ $\mu s$	repetition frequency/kHz	$N$	$R_L/k\Omega$	$C_r/\mu F$	$L_M/mH$
1	50	50	1	50	2	4.7	0.2

根据图 2 建立仿真电路图。由式(11)以及表 1 参数可知, 为了保证在复位阶段励磁电流能达到负的最大值以及回收能量阶段励磁电感中的能量能全部转移到复位电容中, 根据公式(11)计算设置复位开关的触发脉冲脉宽为 48.2  $\mu s$ , 主开关的触发脉冲脉宽为 50  $\mu s$ , 周期为 1 ms, 同时复位开关相对主开关触发脉冲延迟 150  $\mu s$ 。

在 Matlab/Simulink 中进行仿真, 仿真结果如图 5 所示。图 5(a) 给出了在 1 kHz 重复频率下励磁电流仿真结果。根据设置时间以及式(12)可知, 在复位结束后励磁电流将下降为峰值的 4.1%, 与图 5 仿真结果相吻合, 图 5(a) 中励磁电流峰值为 239.4 A, 在下一个主脉冲来临时下降为 9.8 A。图 5(b) 给出了 1 kHz 重复频率下复位电容电压变化情况, 由仿真结果可知复位电容电压出现略微波动, 其主要原因在于下一个主脉冲来临之前励磁电流并非严格下降到零。

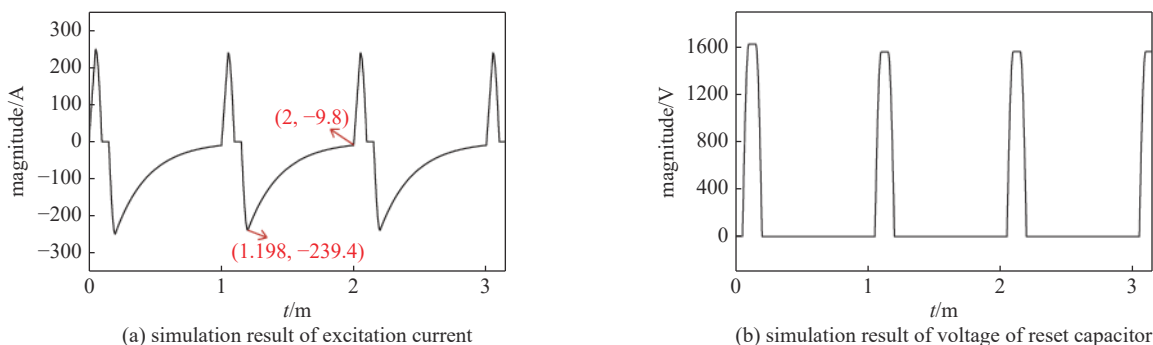


Fig. 5 Excitation current and reset capacitor voltage simulation results

图 5 励磁电流和复位电容电压仿真结果

## 3 实验结果与分析

根据仿真原理图搭建带复位电路脉冲功率系统原理性样机, 如图 6 所示, 分别对无复位电路和有复位电路的功率系统样机进行 1 kHz 重频实验。样机所用磁芯剩磁为 120 mT, 饱和磁通密度为 380 mT, 有效截面积为 260 mm<sup>2</sup>, 匝数比为 2:4。因此根据式(1)可知, 磁芯工作在未饱和状态的理论上最大伏秒积为 135.2 V· $\mu s$ 。实验样机的相关参数如表 2 所示。

对图 6 所示实验样机分别进行由复位电路和无复位电路进行试验。利用示波器以及电流探头对变压器磁芯的一次侧绕组和二次侧绕组的电流进行测量, 励磁电流可由下式计算得到。

$$I_{mag} = I_{pri} - NI_{sec} \quad (13)$$

式中:  $I_{mag}$  即为励磁电流,  $I_{pri}$  为一次侧电流,  $I_{sec}$  为二次侧电流,  $N$  为变压器的匝数比, 实验样机中变压器的匝数比为 2。根据式(13)计算得到的励磁电流如图 7 所示。

对于变压器磁芯是否饱和, 通常将励磁电流作为判断依据。判断原理如式(14)和式(15)所示。

表 2 实验样机参数

Table 2 Parameters of experimental prototype

$V_{DC}/V$	$V_{out}/V$	pulse width/ $\mu s$	repetition frequency/kHz	$N$	$R_L/k\Omega$	$C_r/\mu F$	$L_M/mH$
24	45	13	1	2	0.2	0.22	660

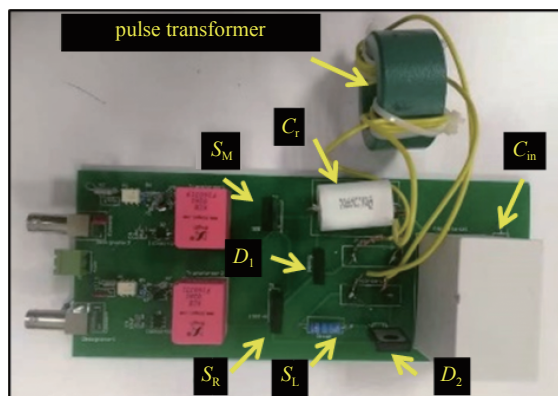


Fig. 6 Picture of experimental prototype

图 6 实验样机

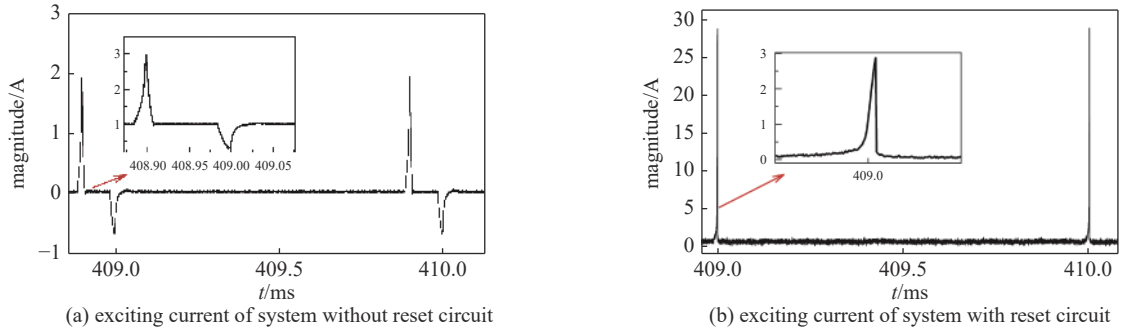


Fig. 7 Experimental results of excitation current

图 7 励磁电流实验结果

$$L_M = \frac{N\varphi}{I_{mag}} = \frac{NBS}{I_{mag}} = \frac{N\mu HS}{I_{mag}} \quad (14)$$

$$I_{mag} = \frac{U_M}{\omega L_M} \quad (15)$$

以上式中： $L_M$  为励磁电感， $I_{mag}$  为励磁电流， $U_M$  为励磁电感两端电压， $N$  为变压器匝数比， $\varphi$  为磁通量， $B$  为磁感应强度， $\mu$  为磁导率， $H$  为磁场强度， $\omega$  为角频率。当变压器磁芯工作进入饱和区间时，由图(1)可知， $B-H$  的斜率急剧变小趋于 0，即磁导率  $\mu$  迅速变小趋于 0，从而导致励磁电感急剧减小。由于励磁电感两端的电压  $U_M$  基本恒定不变，其值为变压器磁芯的一次侧电压，因此由式(15)可知，当励磁电感  $L_M$  减小， $U_M$  不变时，励磁电流会急剧增大。因此判断变压器磁芯是否饱和，可以通过励磁电流的变化率来判断。

从实验结果上来看，当脉宽为 13  $\mu s$  时，无复位电路的脉冲功率系统的励磁电流呈现线性急剧上升到 28 A 左右，变压器磁芯达到饱和。有复位电路的脉冲功率系统的脉宽同样为 13  $\mu s$  时，其励磁电流没有呈现线性快速增加，且励磁电流最大值仅 2 A 左右，此时变压器磁芯未饱和。基于能量回收原理复位电路脉冲功率系统稳定后复位电容两端的电压如图 8 所示，系统稳定后复位电容两端电压在回收能量阶段后基本稳定在 28 V 左右。

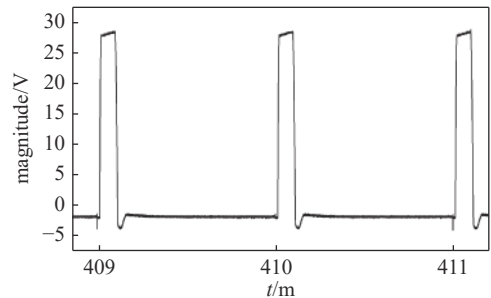


Fig. 8 Voltage of reset capacitor

图 8 复位电容电压

## 4 结 论

针对脉冲功率系统中磁芯利用率问题，本文利用能量回收原理建立了脉冲功率系统仿真模型，并对整体系统的各个工作阶段进行了详细的分析以及相关理论的推导，通过仿真分析确定了本文所用方案的可行性。搭建脉冲功率系统原理性样机，通过实验验证了该带有复位电路的脉冲功率系统可以在 1 kHz 重频下稳定工作，并能够有效地提升磁芯利用率。本文为解决脉冲功率系统中磁芯利用率低问题提供了一种行之有效的方法。

### 参考文献：

- [1] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (6)代表性的应用[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 030201. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its application: (vi) Typical application[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 030201)
- [2] 马伟明, 肖飞, 聂世雄. 电磁发射系统中电力电子技术的应用与发展[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 1-10. (Ma Weiming, Xiao Fei, Nie Shixiong. Applications and development of power electronics in electromagnetic launch system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society., 2016, 31(19): 1-10)
- [3] 刘永芳. 紧凑型高性能脉冲调制器的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. (Liu Yongfang. Study of a compact and high-performance pulse modulator[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019)
- [4] 董守龙, 姚陈果, 杨楠, 等. 基于Marx电路的全固态纳秒脉冲等离子体射流装置的研制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 35-44. (Dong Shoulong, Yao Chenguo, Yang Nan, et al. The development of solid-state nanosecond pulsed plasma jet apparatus based on Marx structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 35-44)
- [5] 冯宗明, 冯元伟, 李洪涛, 等. 20kV固态Marx脉冲调制器研制[J]. 现代应用物理, 2016, 7(02): 40-45. (Feng Zongming, Feng Yuanwei, Li Hongtao, et al. Design of a 20 kV solid state Marx pulse modulator[J]. Modern Applied Physics, 2016, 7(02): 40-45)

- [6] 陈仁金, 孙小杨, 杨波, 等. 医用直线加速器高压脉冲调制系统的研究[J]. *机电工程技术*, 2017, 46(6): 104-106. (Chen Renjin, Sun Xiaoyang, Yang Bo, et al. The structure and principle of high voltage pulse modulator for the medical linear accelerator[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2017, 46(6): 104-106)
- [7] Adler R J, Stein J, Ashcraft B, et al. Improvements in pulse transformer performance achieved using pulsed reset circuitry[C]. Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No. 97CH36127). IEEE, 1997, 1: 616-620.
- [8] 陈鑫玉. 脉冲功率系统中有源复位电路的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018. (Chen Xinyu. Research on active reset circuit in pulse power system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.)
- [9] Biela J, Bortis D, Kolar J W. Reset circuits with energy recovery for solid-state modulators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(05): 2626-2631.
- [10] 黄子平, 蒋薇, 叶毅. 多脉冲直线感应加速器外接复位系统[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 045101. (Huang Ziping, Jiang Wei, Ye Yi. Reset system of multiple linear induction accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 045101)
- [11] Bortis D, Biela J, Kolar J W. Optimal design of a DC reset circuit for pulse transformers[C]//APEC 07—Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2007: 1171-1177.
- [12] 徐海鹏, 杨兰均, 张志远, 等. 脉冲变压器磁芯重复频率复位电路的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 015002. (Xu Haipeng, Yang Lanjun, Zhang Zhiyuan, et al. Repetitive reset circuit of magnetic core of pulse transformer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 015002)
- [13] Bortis D, Biela J, Kolar J W. Design and control of an active reset circuit for pulse transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, 16(04): 940-947.
- [14] 潘龄鹤, 曹德彰, 侯荣华. 脉冲变压器自偏置复位电路[J]. *原子能科学技术*, 2001(4): 373-374. (Pan Linghe, Cao Dezhang, Hou Ronghua. A self-reset circuit of pulse transformer[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2001(4): 373-374)
- [15] Redondo L M, Silva J F, Tavares P, et al. Solid-state Marx generator design with an energy recovery reset circuit for output transformer association[C]//2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2007: 2987-2991.
- [16] 陈鑫玉, 王庆峰. 有源复位电路的理论分析与实验研究[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(13): 39-43. (Chen Xinyu, Wang Qingfeng. Theoretical analysis and experimental study of active reset circuit[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(13): 39-43)