

CO₂ 激光器高压脉冲触发系统的设计

张兴亮^{1,2}, 郭立红^{1*}, 张传胜¹, 孟范江¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了稳定可靠地触发 CO₂ 激光器旋转火花开关,设计了一套高压脉冲触发系统并且提出了一种新型的绝缘栅双极晶体管(IGBT)驱动与保护方法。根据 CO₂激光器中旋转火花开关的触发结构,应用复杂可编程逻辑器件(CPLD)芯片 EPM3512 开发了可以输出 100~500 Hz 重频脉冲信号以及单次脉冲信号的触发信号源;应用光耦 HCPL-3120 设计了具有过流、过压保护功能兼有电磁兼容(EMC)设计的 IGBT 驱动电路;对高压脉冲变压器进行建模并通过 PSPICE 软件仿真;搭建了实验平台,进行了联机性能测试。实验结果表明:在 500 Hz 的重复频率下,高压脉冲触发系统可连续稳定地输出高于 38 kV 的高压重频脉冲,基本满足 CO₂激光器的旋转火花开关稳定可靠触发的要求。

关键词:CO₂激光器;火花开关;绝缘栅双极晶体管;脉冲变压器

中图分类号:TN248.2; TM89 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120504.0416

Design of high-voltage pulse trigger system for CO₂ laser

ZHANG Xing-liang^{1,2}, GUO Li-hong¹, ZHANG Chuan-sheng¹, MENG Fan-jiang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: guolh@ciomp.ac.cn*

Abstract: To trigger the rotated spark switch in a CO₂ laser stably and reliably, a high-voltage pulse trigger system is designed and a new method for driving and protecting Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT) is proposed. According to the trigger structure of rotated spark switch in the CO₂ laser, a pulsed source which can output 100 – 500 Hz repetition-rate pulses and a single pulse is developed with the EPM3512 CPLD chip and the IGBT drive circuit with over-current, over-voltage protection and Electromagnetic Compatibility (EMC) design is proposed by a optocoupler HCPL-3120. Besides, the model of a high-voltage pulse transformer is simulated by PSPICE software. Finally, an experimental platform is built to test the system performance online. Experimental results indicate that the high-voltage pulse trigger system can output high-repetition-rate pulses higher than 38 kV continuously and stably, which satisfies the requirements of the rotated spark switch in the CO₂ laser for stability and reliability.

Key words: CO₂ laser; spark switch; Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT); pulse transformer

收稿日期:2012-02-16;修订日期:2012-04-15

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目(No. SKLLIM0902-01)

1 引言

近年来,CO₂激光器在工业加工、航天、国防等领域的应用日益广泛。CO₂激光器属于高压电脉冲激励型激光器,其主要工作过程是对高压电容器组反复充放电,其中脉冲形成电路中的大功率开关是核心关键部件。大功率开关通常采用闸流管或火花开关,由于具有导通功率大、放电速度快的优点,火花开关在大功率CO₂激光器中得到了广泛的应用^[1-6]。中科院长春光机所的大功率CO₂激光器采用旋转火花开关作为放电开关,由高压脉冲触发系统控制旋转火花开关的导通与关断。在高气压、高电压下工作的旋转火花开关对高压脉冲触发系统的输出脉冲提出了严格的要求。高压脉冲触发系统工作的稳定性和可靠性直接影响旋转火花开关的稳定性和可靠性,继而严重影响CO₂激光器的稳定性和可靠性。

旋转火花开关放电时电磁干扰非常强烈^[7],高压脉冲触发系统工作的电磁环境条件非常恶劣,因此,电磁兼容(EMC)设计十分重要。

在大功率CO₂激光器的工程研究中,激光器的工作气压、工作电压不断提高,从而对控制旋转火花开关的高压脉冲触发系统提出了更高的要求。为了满足大功率CO₂激光器的工程研究的需要,本文设计了一套高压脉冲触发系统。

2 高压脉冲触发系统的组成结构

旋转火花开关在CO₂激光器中的作用如图1

所示,旋转火花开关主要由高压电极、接地电极和旋转的触发电极组成。当脉冲CO₂激光器工作时,触发系统产生的高压尖峰电压施加到触发电极,开关上下电极间隙中的气体被迅速击穿形成短路,继而引发主放电电极放电^[8]。图1为CO₂激光器主回路充放电回路。

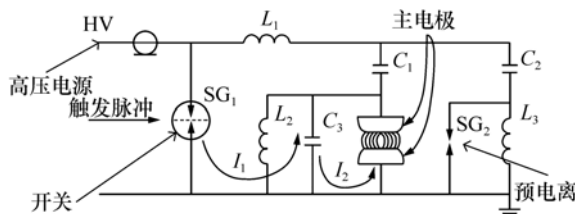


图1 CO₂激光器主回路充放电回路

Fig.1 Charge-discharge circuit of main circuit of CO₂ laser

其中: L_1 为主放电回路分布电感; L_2 为主储能电容充电电感; L_3 为预电离电容充电电感; C_1 为主储能电容; C_2 为预电离电容; C_3 为锐化电容; SG_1 为旋转火花开关; SG_2 为预电离火花间隙。

根据旋转火花开关工作在较高气压(0.08 ~ 0.14 MPa)的要求,所需高压脉冲触发系统的技术参数如下:

- 脉冲电压幅值: ≥ 38 kV;
- 脉冲宽度: ≤ 120 μ s;
- 重复频率: 100 ~ 500 Hz; 单次。

高压脉冲触发系统主要由电源、脉冲信号源、IGBT功率管驱动与保护电路和高压脉冲变压器等部分组成。高压脉冲触发系统的组成如图2所示。

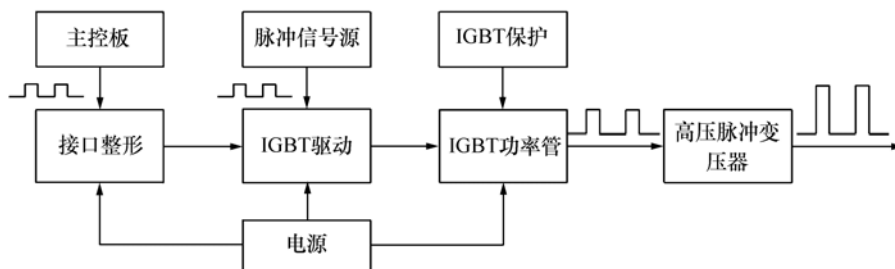


图2 高压脉冲触发系统的组成

Fig.2 Composition of high-voltage pulse trigger system

在图2 高压脉冲触发系统的组成中,脉冲信号源采用 CPLD 芯片 EPM3512,可以输出 100 ~ 500 Hz 的重频脉冲信号和单次脉冲信号;IGBT 驱动与保护电路保证 IGBT 稳定可靠的工作;高压脉冲变压器实现升压变换,获得满足要求的触发脉冲;对比各个设计模块,IGBT 驱动、保护电路和高压脉冲变压器是高压脉冲触发系统的关键。

3 高压脉冲触发系统的设计

3.1 IGBT 驱动电路

理想的 IGBT 驱动电路应具有以下要求:

- (1) 能为 IGBT 栅极提供具有陡峭前后沿的驱动脉冲;
- (2) 输入输出无延迟并具有电隔离能力;
- (3) IGBT 处于过流状态时,实现 IGBT 的软关断。

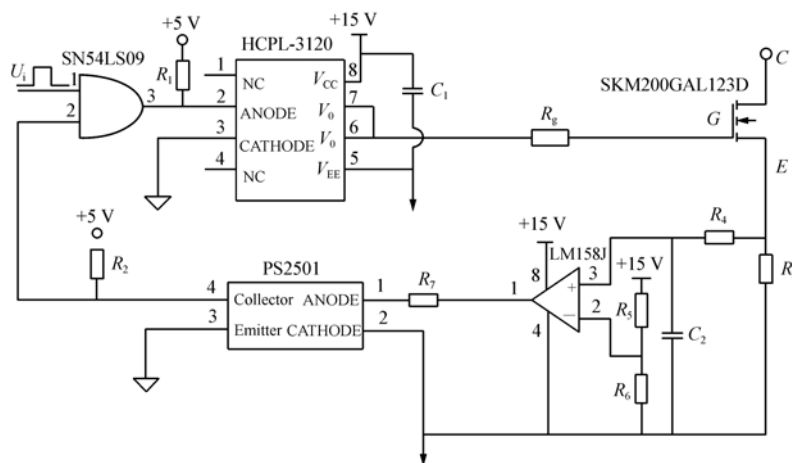


图3 IGBT 驱动电路

Fig. 3 IGBT drive circuit

3.2 高压脉冲变压器设计

高压脉冲变压器是触发电路系统中重要的元件,主要作用是通过磁耦合实现能量传递、电压变换、初级和次级电气隔离等^[9-11]。旋转火花开关采用高电压工作方式,要求高压脉冲变压器的输出波形上升沿陡、脉宽窄、下降速度快、反冲小。

3.2.1 高压脉冲变压器的匝数设计

高压脉冲变压器要求铁芯材料具有较高的磁感应强度增量和较低的剩磁,为此选用了铁基非晶合金材料。铁芯截面参数的选取需要综合考虑磁感应强度的增量、漏感、励磁电感、脉冲波形前

沿和顶降等因素。经过优化设计^[12-13],选取环形铁芯,截面为 30 cm^2 。根据如下公式来确定初、次级匝数。

IGBT 驱动电路一般采用 3 种基本形式:直接驱动电路;脉冲变压器隔离驱动电路;光耦隔离驱动电路。其中,光耦隔离驱动电路以其自身的优越性能得到了广泛的应用,本文设计的驱动电路就是采用光耦驱动电路。

本文设计的驱动电路是基于惠普公司的晶体管驱动芯片 HCPL-3120,它控制 IGBT 的导通、关断,IGBT 驱动电路如图 3 所示。本驱动电路具有过流保护功能,当 IGBT 集射极发生短路或电流过高时,发射极电压升高,输入运放 LM158J 3 脚的电压高于 2 脚,1 脚输出高电压,光耦 PS2501 导通,光耦 PS2501 4 脚输出低电平,则 54LS09 输出为低电平,IGBT 关断,从而 IGBT 得到了有效的保护。

沿和顶降等因素。经过优化设计^[12-13],选取环形铁芯,截面为 30 cm^2 。根据如下公式来确定初、次级匝数。

初级匝数的计算公式为:

$$N_1 = \frac{U_1 \times t_d}{\Delta B \times S_c} \times 10^{-2}, \quad (1)$$

式中: N_1 为初级匝数; U_1 为峰值脉冲电压(V); t_d 为脉宽(μs); S_c 为铁芯的截面积(cm^2); ΔB 为磁感应强度增量(T)。

脉冲触发系统要求输出脉冲宽度小于 $120 \mu\text{s}$,实际中按照脉宽为 $100 \mu\text{s}$ 进行设计,代

入数据得:

$$N_1 = \frac{520 \times 100}{1.2 \times 30} \times 10^{-2} = 14.44 \approx 15$$

$$n = \frac{U_2}{U_1}, \quad (2)$$

代入数据得: $n = \frac{38\,000}{520} = 73.08$, 由于变压器存在损耗,取 $n = 80$; 则次级绕组匝数为:

$$N_2 = n \times N_1, \quad (3)$$

代入数据得: $N_2 = 15 \times 80 = 1\,200$; 其中: n 为变比, N_2 为次级匝数; U_2 为输出峰值脉冲电压(V)。

3.2.2 高压脉冲变压器的分布参数设计

3.2.2.1 高压脉冲变压器简化模型确定

首先分析高压脉冲变压器的工作原理,从理论上确定脉冲波形与变压器结构参数的关系。高压脉冲变压器的等效电路图如图4所示^[14]。

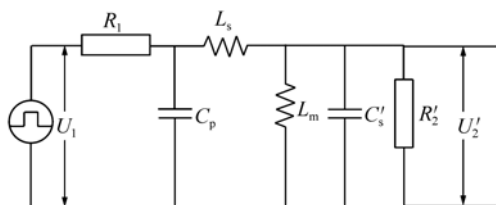


图4 脉冲变压器简化等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit of pulse transformer

其中: R_1 为脉冲源内阻; C_p 为初级回路分布电容; L_s 为漏感; L_m 为励磁电感; C_s' 为次级换算到初级的分布电容; R_2' 为次级换算到初级的负载电阻。

3.2.2.2 分布参数设计

分布参数是脉冲变压器能否实现的关键。根据以往脉冲变压器的输出参数和文献[13]中的相关设计公式,可以计算出漏感 $L_s = 34 \mu\text{H}$, 初级回路电容 $C_p = 3\,619 \text{ pF}$, 次级回路电容换算到初级电容值 $C_s' = 445 \text{ nF}$, 变压器励磁电感 $L_m = 13.5 \text{ mH}$, 将计算结果代入仿真模型,运用 PSPICE 软件仿真^[15], 得到脉冲变压器的设计输出波形。脉冲变压器仿真波形如图5所示。

仿真结果显示:(1) 高压脉冲变压器的输出电压压缩幅值约为 500 V , 满足 $U_2' \geq \frac{U_2}{n} =$

$\frac{38000}{80} = 475 \text{ V}$; 说明脉冲变压器的实际设计留有

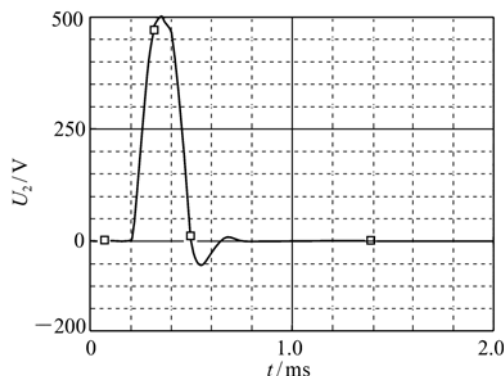


图5 脉冲变压器仿真波形

Fig.5 Output waveforms of pulse transformer through simulation

一定的裕量,保证变压器的输出大于 38 kV , 火花开关能可靠的触发;(2) 脉冲变压器的输出脉宽约为 $100 \mu\text{s}$ 。

3.3 高压脉冲触发系统的电磁兼容及保护设计

3.3.1 电磁兼容设计

大功率 CO₂ 激光器工作时会产生强烈的电磁干扰。在高压脉冲触发系统中,适时地采用了隔离和接地等方法,并使用了滤波器、压敏电阻、TVS 等器件,且特殊制作了屏蔽罩,有效地抑制了电磁干扰。

3.3.2 IGBT 保护电路

图3显示了 IGBT 的驱动电路具有过流保护功能。但当旋转火花开关导通后,次级电路电流发生突变,反馈到脉冲变压器初级的电流会突变,又由于脉冲变压器初级电感的续流能力,IGBT 集电极将产生很高的尖峰电压和大电流,会导致

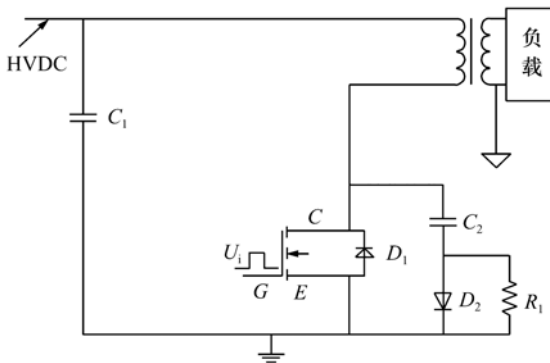


图6 IGBT 的过压保护电路

Fig.6 Over-voltage protection circuit of IGBT

IGBT 损坏。为此设计了 IGBT 的过压保护电路,如图 6 所示。RCD 电路的工作原理为:当旋转火花开关导通后,IGBT 集电极会产生很高的电压和很大的电流,使电容 C_2 迅速导通,经过快速恢复二极管 D_2 把能量释放到大地,从此 IGBT 得到了可靠的保护。

4 实验过程及结果分析

采用 TEK TDS3052B 示波器和 PVM-1 高压探头对高压脉冲触发系统进行了详细的性能测试。测试点选为高压脉冲变压器的输出电压和旋转火花开关的触发电极,得到如下测试波形(图 7 ~ 11)。

对比高压脉冲变压器的仿真波形(图 5)和实验波形(图 7)可知,高压脉冲变压器实际输出的电压波形与通过 PSPICE 软件仿真设计得到的输出波形基本一致。高压脉冲变压器实际输出的电压波形中的前沿尖峰电压后的瞬间下降是由旋转火花开关的触发放电引起的,高压脉冲变压器实际输出同样有反摆。高压脉冲变压器的设计实践表明:应用 PSPICE 软件仿真能够理论指导和简化高压脉冲变压器的具体设计,但是,实际制作高压脉冲变压器的工艺缺陷导致输出波形的畸变同样不可避免。

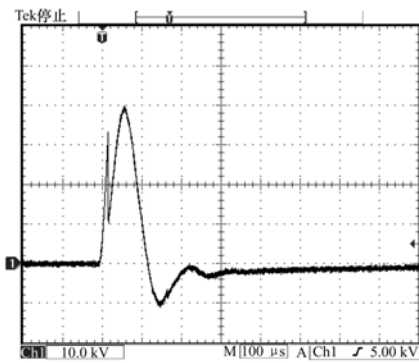


图 7 500 Hz 时脉冲变压器输出电压波形

Fig. 7 Output waveforms of pulse transformer at 500 Hz

500 Hz 重频条件下,触发电极两端电压波形如图 8 所示。由图 9、图 10 和图 11 可见,触发系统在 200、400、500 Hz 等重频条件下都能够稳定

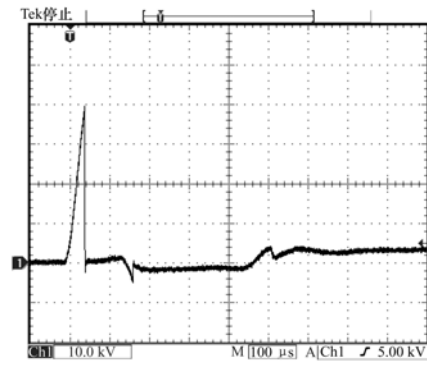


图 8 500 Hz 时触发电极电压波形

Fig. 8 Output waveforms of trigger electrode at 500 Hz

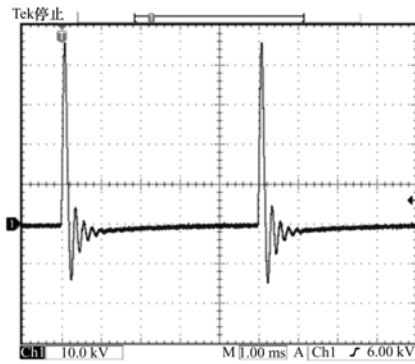


图 9 200 Hz 重频下触发系统输出波形

Fig. 9 Output waveforms of trigger system at 200 Hz

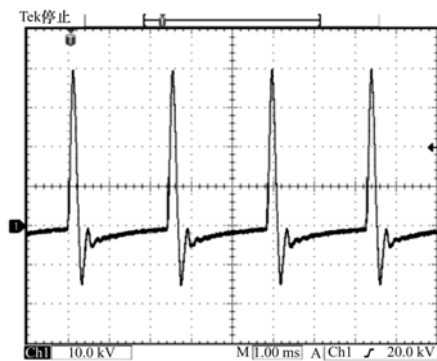


图 10 400 Hz 重频下触发系统输出波形

Fig. 10 Output waveforms of trigger system at 400 Hz

输出大于 38 kV 的高压。同时,由图 11 右侧“Ch1 + 宽度 102 μs”可以读出触发系统输出脉宽为 102 μs,满足设计指标,触发系统能可靠地触发旋转火花开关。

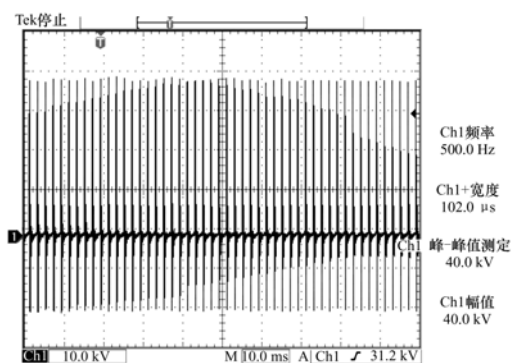


图 11 500 Hz 时触发电极电压多周期波形

Fig. 11 Multi-period output waveforms of trigger electrode at 500 Hz

5 结 论

本文根据旋转火花开关稳定可靠触发的要求,设计了一套高压脉冲触发系统,提出了一种 IGBT 驱动与保护的方法,并介绍了旋转火花开关的工作环境。实验结果表明:在 500 Hz 重频工作条件下,触发系统输出电压大于 38 kV,输出脉宽小于 120 μs ,能够可靠触发 CO₂ 激光器旋转火花开关,系统的性能和指标满足设计指标的要求。

参考文献:

- [1] WITTEMAN W J. *The CO₂ Laser* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [2] HASSON V. Review of design concepts and diagnostics for 100 kW class repetitive pulsed CO₂ laser [J]. *SPIE*, 2003, 5120: 717-730.
- [3] 黄磊,朱海红,程祖海,等. 用于激光推进的球隙火花开关放电特性的研究 [J]. *激光推进技术*, 2007, 28(5): 561-565.
HUANG L, ZHU H H, CHENG Z H, *et al.*. Investigation of discharge characteristics of the high-voltage trigatron switch for laser propulsion [J]. *J. Propulsion Technology*, 2007, 28(5): 561-565. (in Chinese)
- [4] 贺臣. 重复频率长寿命气体火花开关的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
HE CH. Study on the repetition-rate long-lifetime gas spark switch [D]. Wuhan: Hua zhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [5] 谭景国. 高功率 TEA CO₂ 激光器脉冲激励电源的研制 [J]. *真空电子技术*, 2007(5): 63-65.
TAN J G. Researches on pulse excited power supplies for high output power TEA CO₂ laser [J]. *Vacuum Electronics*, 2007(5): 63-65. (in Chinese)
- [6] 邱毅,李育德,冯国英. 轴对称折叠组合腔 CO₂ 激光器的实验研究 [J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(6): 66-69.
QIU Y, LI Y D, FENG G Y. Experimental research on the axisymmetric folded-combination CO₂ laser [J]. *Opt. & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(6): 66-69. (in Chinese)
- [7] 孟范江,郭立红,杨贵龙,等. 大功率 TEA CO₂ 激光器系统中电磁干扰的抑制 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 177-181.
MENG F J, GUO L H, YANG G L, *et al.*. Suppression of electromagnetic interference in high power TEA CO₂ laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 177-181. (in Chinese)
- [8] 李世明,李殿军,杨贵龙,等. 大功率 TEA CO₂ 激光器旋转火花开关电极的烧蚀实验 [J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(3): 263-268.
LI SH M, LI D J, YANG G L, *et al.*. Erosion experiment of rotated spark switching system of high-power TEA CO₂ laser [J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(3): 263-268. (in Chinese)
- [9] KIM S C, NAM S H, KIM S H, *et al.*. High power density, high frequency, and high voltage pulse transformer [J]. *IEEE*, 2001, 1: 808-811.
- [10] FILCHEV T, CARASTRO F, WHEELER P, *et al.*. High voltage high frequency power transformer for pulsed power application [J]. *J. Energy and Power Eng.*, 2011(10): 960-965.
- [11] 蒋云峰,梅建伟,曾凡煜,等. 高压高频脉冲变压器的研究 [C] // 2006 中国电工技术学会电力电子学会第十届学术

- 年会,陕西,西安,2006-09-23-26. 2006:104.
- JIANG Y F, MEI J W, ZENG F Y, *et al.*. Research of high-voltage and high-frequency pulse transformer[C]//10th Annual Meeting of Power Electronics Society of CES, Xian, Shanxi, Sept 23-26. 2006:104. (in Chinese)
- [12] 王瑞华. 脉冲变压器的设计[M]. 北京:科学出版社,1987.
- WANG R H. *Design of Pulse Transformer*[M]. Beijing:Science Press,1987. (in Chinese)
- [13] 管金云. 变压器铁心最佳截面计算[J]. 变压器,2001,38(7):18-22.
- GUAN J Y. Calculation of optimal cross section of transformer core[J]. *Transformer*,2001,38(7):18-22. (in Chinese)
- [14] 变压器制造技术丛书编审委员会. 电子变压器手册[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1999.
- Transformer manufacturing pipeline committee. *Electronic Transformer Manual*[M]. Shenyang:Liaoning Science and Technology Publishing House,1999. (in Chinese)
- [15] 周润景,张丽娜,王志军. PSPICE 电子电路设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- ZHOU R J, ZHANG L N, WANG ZH J. *Electronic Circuit Design and Analysis Using PSPICE*[M]. Beijing:Mechanical Industry Press,2011. (in Chinese)

作者简介:张兴亮(1986—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要从事高压充电电源及脉冲功率技术方面的研究。

E-mail:zxliang1987@163.com

郭立红(1964—),女,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事激光对抗、计算机应用、天文惯导等方面的研究。E-mail:guolh@ciomp.ac.cn