



·特种电源技术·

600 A 重复频率脉冲恒流源研制*

杨振宇, 李柳霞, 张 钦, 李 化, 林福昌

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 针对国内脉冲恒流源幅值较小、重复频率较低等问题, 设计了基于电流闭环反馈控制的恒流电路, 建立了相应的数学模型, 并采用 Pspice 仿真验证了电路的功能, 最终研制了 1 台 600 A 重复频率工作的脉冲恒流电源。电源采取储能放电配合高速开关的工作模式, 使用功率场效应三极管作为线性调整开关, 可大范围自动恒流, 适用于激光二极管负载。输出的脉冲电流幅值最高 600 A, 上升时间小于 40 μs , 电压幅值最高 320 V, 脉宽 100~600 μs 可调, 工作重复频率最高 200 Hz。电源体积较小, 结构紧凑, 效率可达 90% 以上。

关键词: 脉冲恒流源; 重复频率; 场效应管; 快上升沿; 高功率脉冲电源

中图分类号: TN782

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210510

Development of 600 A repetitively pulsed constant current source

Yang Zhenyu, Li Liuxia, Zhang Qin, Li Hua, Lin Fuchang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: As the present of pulsed constant current source have problems of low amplitude and repetition frequency, we design a pulsed constant current source adopting integral feedback to get closed-loop current control, build the mathematical model and verify the function of the circuit by Pspice. The source adopts the working mode of energy storage and discharging with high-speed switch, uses MOSFET as linear adjustment switch and can be used for laser diodes loads. The maximum output current pulse is 600 A with adjustable pulse width from 100 μs to 600 μs , the largest output voltage is 320 V, the rising edge is under 40 μs and the maximum repetition frequency is 200 Hz. The structure of the source is compact, and the efficiency of the source can reach more than 90%.

Key words: pulsed constant current source, repetition frequency, MOSFET, fast rising edge, high power pulsed source

脉冲恒流源能够输出幅值恒定的脉冲电流, 使负载上的电流不随负载大小和外部电压改变而发生变化, 常作为半导体激光器的驱动电源应用于医疗、传感、测控、能源勘测等领域^[1-6]。由于半导体激光器发出的激光性能受驱动电源影响很大^[7-8], 国内现有的脉冲恒流源最高输出电流是武汉光电技术研究院设计的激光器阵列电源, 输出可达 1200 A, 但重复频率最高只有 20 Hz^[9]。查阅其他文献后发现, 现有研究存在输出电流幅值较低、重复频率较低、体积较大等缺点^[10-15]。因此, 设计一种紧凑型大电流重复频率的脉冲恒流源具有很高的价值。本文利用功率场效应三极管(MOSFET)作为线性调整开关, 设计了一种基于电流闭环反馈控制的恒流电路, 并且建立了相应的数学模型, 继而用 Pspice 仿真结果验证了其正确性, 最终研制了 1 台 600 A 可重复频率工作的脉冲恒流电源, 并进行了测试。

1 电源结构和工作原理

现有脉冲恒流源的实现方法主要有线性放大法、恒流源配合高速开关法和储能放电配合高速开关法。由于前两种方法电路复杂且不易调试, 本电源采用电容储能放电, MOSFET 作为高速开关的方式实现脉冲恒流源。

恒流源的基本电路如图 1 所示^[5], 其中 U 是充电电源, C 是充电电容, 它们用于给电路供电, 保证 MOSFET 在

* 收稿日期: 2021-11-23; 修订日期: 2022-01-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52107151)

联系方式: 杨振宇, 1140556226@qq.com。

通信作者: 李柳霞, llx@hust.edu.cn。

放电时工作在饱和区, 电容 C 可以提高充电电流和加快电流波形上升沿^[16]; VD_1 是负载二极管, 用于模拟半导体激光器负载; U_1 是产生的脉冲电压给定信号; I_1 是单电路产生的脉冲电流; R_2 , C_1 和运算放大器构成积分反馈回路, 用于提高电路稳定性和加快脉冲电流上升沿和下降沿; R_3 是采样电阻, 可以把输出的电流信号转化为电压信号输入到反馈回路中; R_1 是 MOSFET 的栅级保护电阻, 用于保护 MOSFET。

根据运算放大器的虚短、虚断的特性, 有 $U_2=U_1$, 而 U_S 初始状态是 0 V , 则电阻 R_2 两端电压不同, 产生电流 I_2 , I_2 通过电容 C_1 积分后使运算放大器的输出电压 U_G 升高, MOSFET 栅源电压 $U_{GS}=U_G-U_S$ 增大。由于 MOSFET 管工作在饱和区, 电流 I_1 也会相应增大, 最终使采样电阻 R_3 上电压 U_S 增大。这个过程直到 $U_S=U_1$ 结束, 此时 $I_2=0$, 因此稳态时有

$$I_1 = I_3 = \frac{U_S}{R_3} = \frac{U_1}{R_3} \quad (1)$$

因此稳态时脉冲电流 I_1 与 U_1 成正比, 当采样电阻 R_3 阻值不变时, 可以通过改变输入的脉冲电压参数调整输出的脉冲恒流。

由于本电源输出最高 600 A , 远高于 MOSFET 的单管通流, 实际采取三模块并联工作的方式, 电源的基本结构如图 2 所示。首先由用户输入期望脉冲电流的幅值、脉宽和频率, 然后由单片机产生相对应的脉冲电压, 输入到并联工作的 3 个相同的脉冲电流产生电路, 将输出叠加到负载上, 得到脉冲电流。其中脉冲电压信号的产生实现起来较为容易, 可以使用各类微控制器、FPGA、数字集成电路实现。

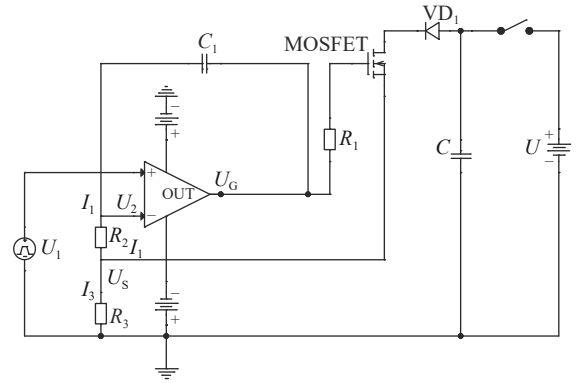


Fig. 1 Schematic diagram of the circuit

图 1 脉冲电流产生电路原理图

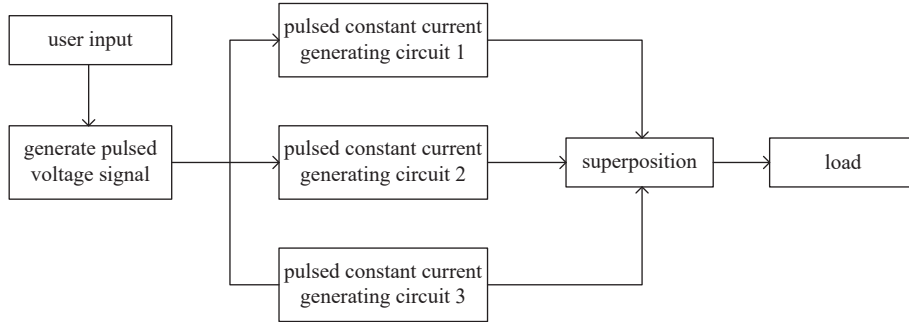


Fig. 2 Basic structure of pulse constant current source

图 2 脉冲恒流源基本结构

2 脉冲电源的数学模型

在电流稳态值确定后, 应研究影响电流上升沿和下降沿的因素, 这就需要关注电路工作的动态过程。在电流上升和下降过程中可以得到

$$I_2 = \frac{U_1 - U_S}{R_2} \quad (2)$$

为了使采样电压能实时反映脉冲电流 I_1 的大小, R_2 取值通常较大, $I_1 \gg I_2$, 从而

$$I_1 = I_3 - I_2 \approx I_3 = \frac{U_S}{R_3} \quad (3)$$

根据 MOSFET 饱和区的导通特性, 在其栅源电压 U_{GS} 到达开启电压后, 有

$$I_1 = K(U_{GS} - U_{GSth})^2 = K(U_G - U_S - U_{GSth})^2 \quad (4)$$

式中: K 是 MOSFET 的电导参数, U_{GSth} 是开启电压, 它们的取值可通过查看 MOSFET 饱和区工作特性曲线得到; U_G 是 G 级电压; U_S 是 S 级电压。

对于积分反馈回路, 列写微分方程表示 I_2 和 U_G 的关系为

$$I_2 = C_1 \frac{dU_G}{dt} \quad (5)$$

联立式(1)~(5)可得到关于电流 I_1 的微分方程

$$\left(C_1 R_2 R_3 + \frac{C_1 R_2}{2\sqrt{KI_1}} \right) \frac{dI_1}{dt} = U_1 - I_1 R_3 \quad (6)$$

此微分方程无法直接求出脉冲电流 I_1 的表达式,但可以研究在一定的 I_1 时 dI_1/dt 随其他参数的变化情况,从而反映 I_1 的变化速度。在电压脉冲 U_1 是正电压时,因 U_1 高于 $I_1 R_3$,有 $dI_1/dt > 0$, I_1 从 0 上升至峰值 U_1/R_3 ;在电流下降过程中,电压脉冲 $U_1=0$, $dI_1/dt < 0$, I_1 从峰值下降至 0。由于电流上升过程和下降过程中总变化值不变,电流变化速度越快则上升和下降时间越短,故 dI_1/dt 可以反映 I_1 上升沿和下降沿,由表达式可知减小 R_2 、减小 C_1 、增大 K 均可以提高脉冲电流变化速度。其中增大 R_2 、减小 C_1 是加快积分过程,提高电流反馈速度,减小 K 是使用性能更好的 MOSFET。为了验证结果的正确性,使用 Matlab 的 Simulink 仿真功能建立图 3 所示的数学模型,模拟单个脉冲恒流产生电路的工作情况。

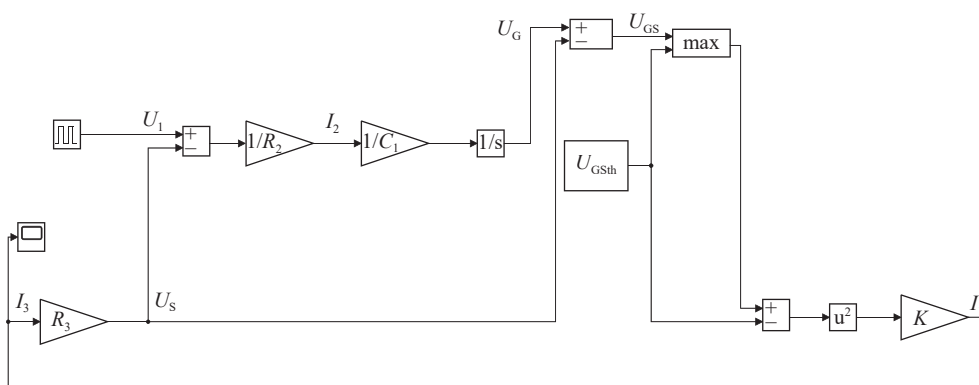


Fig. 3 Mathematical model of the circuit

图 3 脉冲电流产生电路数学模型

其中 Max 模块可以在 MOSFET 的栅源电压差 U_{GS} 高于开启电压 U_{GSth} 时正常输出 U_{GS} ,从而通过计算得到电流 I_1 ; 低于开启电压时输出 U_{GSth} ,使 MOSFET 电流为 0,等效于没有导通。设置合适的脉冲电压 U_1 值,在代码中改变 R_2 , C_1 , K 和 U_{GSth} 的值,使用示波器观察得到的电流波形。结果表明,减小 R_2 和 C_1 、增大 K 均可以提高脉冲电流变化速度,而 U_{GSth} 与电流变化速度无关。理论上通过不停减小 R_2 和 C_1 ,增大 K 值可以缩短电流的上升时间和下降时间,但实际上为了不对采样电压造成干扰, I_2 不能太大, R_2 也不能过小, K 值受 MOSFET 性能限制,不能无限增大,更多的是通过调整电容 C_1 来改变电流上升沿和下降沿。最终选择一个极小的 C_1 值后,数学模型观察到的恒流波形如图 4 所示。输出电流上升后恒定在 200 A,将图像展开后可观察到上升沿和下降沿约为 $3 \mu s$ 。说明从数学上分析,单个脉冲恒流产生电路可以正常工作,输出电流具有良好的稳定性和较快的上升速度。

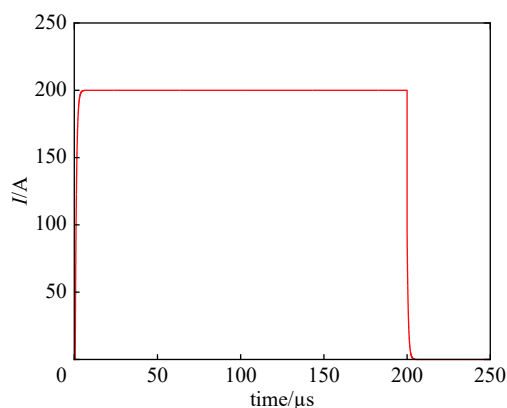


Fig. 4 I_1 in mathematical model

图 4 数学模型电流 I_1 波形

3 Pspice 仿真测试

使用 Pspice 对电路进行仿真,仿真电路与原理图相同,电阻和电容参数按照数学模型的仿真结果设置, MOSFET 选择参数与数学模型相似的参数。设置 3 个相同的脉冲恒流产生电路,将输出叠加进行仿真,使用电流探针测量总电流 I_1 ,以验证电路是否能产生 600 A 恒流输出。测试发现能够输出 600 A 电流,电流上升沿虽然只有 $3 \mu s$,但会产生超调,严重影响输出电流的性能。

这是因为积分速度过快时,调整幅度过大,不仅会产生超调,还可能让电路工作不稳定。因此,选择增大 R_2 和

C_1 , 减慢积分速度, 观察电流波形, 最终选择了合适的积分参数, 使得超调消失, 积分速度过快和积分速度合适时电流波形如图 5 所示。由图 5 可以看出, 调整后电流上升沿约为 $30 \mu\text{s}$ 。由于充电电压 U 需要提供负载电压和 MOSFET 漏极和源极之间的压降, 因此不能太低。在满足这个条件时, 改变负载二极管的个数、改变充电电压 U 的大小, 负载上电流 I_1 稳定值基本不变, 保持在 600 A , 且 I_1 的上升沿基本不变, 验证了电路的功能。

4 电源组装和测试

4.1 电源组装

本电源主要由控制电路、充电电路和脉冲电流主电路构成。控制电路使用单片机产生与期望输出电流相对应的脉冲电压。充电电路中由于电源在重频工作的每一个工作周期内, 采取先给电容充电, 再利用电容放电的工作方式。为了维持电容电压的稳定, 充电电容不能太小, 且充电电源的功率需高于电路的平均功率。为输出 600 A 的大电流, 脉冲电流主电路使用多块电路板并联工作。各元件选型方面, 运算放大器应选择失调电压小、温漂小、增益大、速度高的, MOSFET 选择 K 值较大(即漏源电流随栅源电压变化快)、耐压高的。采样电阻 R_3 需要使用无感或低感电阻, 否则会减慢脉冲电流的上升速度。其他元件参数与 Pspice 仿真模型中的相同。电源各模块装箱完成后如图 6 所示, 尺寸为 $445 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。

4.2 负载测试

使用电流源进行二极管负载的测试。首先使用二极管负载串联进行测试, 实验中 MOSFET 的压降需高于 20 V 才能稳定工作, 因此设定充电电压比二极管负载压升高 20 V 。通过改变脉冲电压给定, 分别在不同脉宽下输出 600 A 电流(见图 7), 在 $600 \mu\text{s}$ 脉宽下输出不同大小电流(见图 8)。说明此电源输出电流幅值最高 600 A , 脉宽 $100 \sim 600 \mu\text{s}$ 可调, 上升时间小于 $40 \mu\text{s}$, 波动小于 1% 。改变串联二极管的个数, 电流波形保持不变。

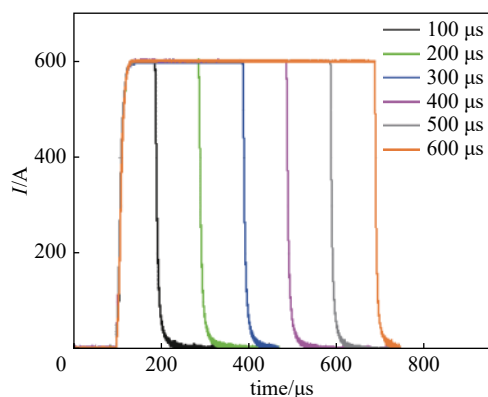


Fig. 7 600 A current output with different pulse width

图 7 不同脉宽下 600 A 电流输出

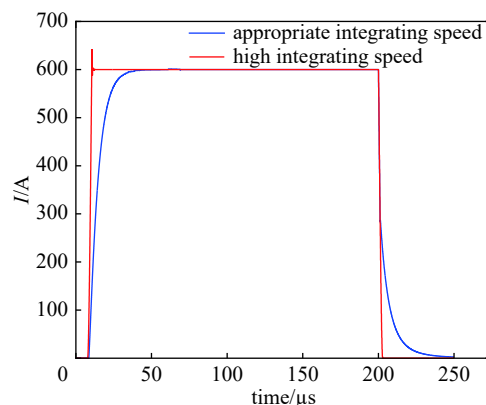


Fig. 5 I_1 with different integrating speed

图 5 不同积分速度下 I_1 波形

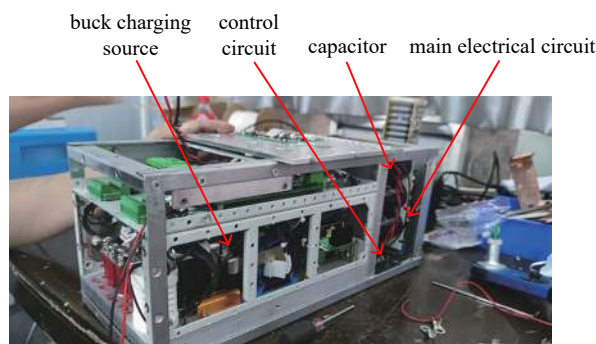


Fig. 6 Shape of the power supply

图 6 电源外观

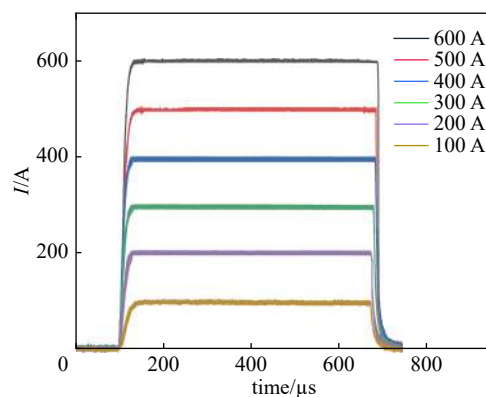


Fig. 8 Different current output with $600 \mu\text{s}$ pulse width

图 8 $600 \mu\text{s}$ 脉宽下不同电流输出

4.3 重频工作测试

由于目前所使用的 Buck 电源最高输出电压 320 V , 最高充电电流约 100 A , 为保证重频下稳定工作, 在每个工作周期内 Buck 电源为放电电容器补充的电荷需要等于恒流源输出导致的电荷损失, 因此电源最高可以在 200 Hz 下输出 320 V 电压和脉宽 $600 \mu\text{s}$ 、幅值 600 A 的电流。为检验充电过程是否会对放电过程有干扰及充电电源功率是否足够电路使用, 需检验电路在重复频率下的工作波形。输入重复频率 200 Hz 的脉冲电压, 使用电流线圈测量

负载上的电流如图9所示。由图9可知, 电流波形正常, 电源每次都有稳定的恒流输出, 在工作30 s后 MOSFET 发热, 后续将加入散热装置以提高运行时间。由于电源工作时最高输出电压320 V, 而 MOSFET 压降只有20 V, 电源的效率达到90%以上。

5 结 论

通过建立恒流源的数学模型进行参数选取, 使用 Pspice 仿真验证原理, 通过实验测试恒流源的效果, 说明本脉冲恒流源在二极管负载下有较好的输出波形。输出电压最高320 V, 输出电流最高600 A, 可以200 Hz 重复频率工作, 是一款紧凑型重复频率脉冲恒流源。

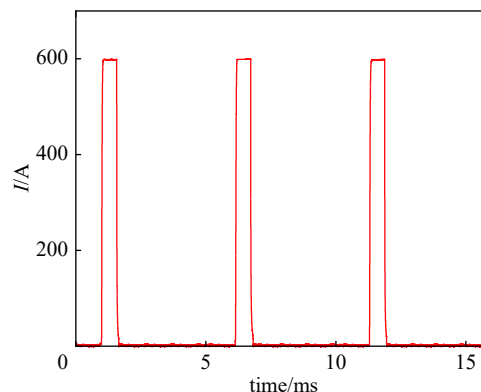


Fig. 9 Current waveform with repetitive frequency

图9 重复频率电流波形

参考文献:

- [1] 马天翔. 50A大功率脉冲恒流源技术与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2012. (Ma Tianxiang. Research and implementation of 50A high-power pulse constant current supply[D]. Changchun: Jilin University, 2012)
- [2] 王德, 李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(3): 279-283. (Wang De, Li Xueqian. New progress in semiconductor lasers and their applications[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 279-283)
- [3] 杨燕, 俞敦和, 吴姚芳, 等. 新型窄脉冲半导体激光器驱动电源的研制[J]. 中国激光, 2011, 38: 0202003. (Yang Yan, Yu Dunhe, Wu Yaofang, et al. Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38: 0202003)
- [4] 黄德修, 刘雪峰. 半导体激光器及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (Huang Dexiu, Liu Xuefeng. Semiconductor lasers and their applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999)
- [5] Zhao Qinglin, Li Shu, Cao Ruru, et al. Design of pulse power supply for high-power semiconductor laser diode arrays[J]. IEEE Access, 2019, 7: 92805-92812.
- [6] Molina L L, Mar A, Zutavern F J, et al. Sub-nanosecond avalanche transistor drivers for low impedance pulsed power applications[C]//PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers (Cat. No. 01CH37251). 2001: 178-181.
- [7] Yue Yubo, Yang Xu, Rui Li. A new type of semiconductor laser power supply[J]. Advanced Materials Research, 2012, 472/475: 3121-3124.
- [8] Dong Chuanjie, Huang Hong. Analysis and design of high-current constant-current driver for laser diode bar[C]//IEEE International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). 2011: 1321-1324.
- [9] 孙斌, 初华, 黎伟, 等. 高功率脉冲半导体泵浦激光器阵列电源的设计[J]. 电子技术应用, 2015, 41(3): 145-146,150. (Sun Bin, Chu Hua, Li Wei, et al. Design of high-power pulsed diode-pumped laser array power supply[J]. Application of Electronic Technique, 2015, 41(3): 145-146,150)
- [10] 郭俊超, 韩耀锋, 侯风乾, 等. 钕玻璃激光测距机的脉冲恒流式驱动电源设计[J]. 激光杂志, 2021, 42(8): 23-27. (Guo Junchao, Han Yaofeng, Hou Fengqian, et al. Design of a driving power supply outputting pulse constant current used for erbium glass laser rangefinder[J]. Laser Journal, 2021, 42(8): 23-27)
- [11] 冉建, 曹飞, 姜俊, 等. 大电流、高稳定脉冲激光器驱动电路设计与数学分析[J]. 红外与激光工程, 2020, 49: 20200184. (Ran Jian, Cao Fei, Jiang Jun, et al. Design and mathematic analysis of large current and high stability driving circuit for pulse laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49: 20200184)
- [12] 陈海滨, 吕文涛, 王可宁. 大功率半导体激光器脉冲式恒流驱动电路设计[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 129-133. (Chen Haibin, Lü Wentao, Wang Kening. Design of pulsed constant current driver for high power semiconductor laser[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 129-133)
- [13] 张瑞峰, 崔佳敏. 一种脉宽可调的窄脉冲激光器驱动电路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58: 2114001. (Zhang Ruifeng, Cui Jiamin. Design of a narrow pulse laser drive circuit with adjustable pulse width[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58: 2114001)
- [14] 张龙, 陈建生, 高静, 等. 大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47: 1005003. (Zhang Long, Chen Jiansheng, Gao Jing, et al. Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47: 1005003)
- [15] 王德寿, 习友宝. 具有快速脉冲沿的脉冲电流发生器的设计[J]. 测控技术, 2017, 36(3): 155-158. (Wang Deshou, Xi Youbao. Design of precise current pulse generator with short rise/fall time[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(3): 155-158)
- [16] Fulkerson E S, Telford S, Deri R, et al. Pulsed power system for the HAPLS diode pumped laser system[C]//2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC). 2015: 1-6.