

一种高效数字脉冲驱动源电路的设计与实现

苏令师, 吕伟强, 王克强, 吴勇

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 随着测距测照用的固体激光器对驱动源提出小型化、高效化的更高性能要求。传统利用 MOS 管线性区控制脉冲电流的方法因热损耗过大, 导致低压大电流脉冲电源效率极低。本研究采用创新设计的 MOS 管栅极驱动电压智能控制方式, 利用 FPGA (现场可编程门阵列) 实现算法动态调整, 并结合双闭环 (电流闭环控制与基于 Cuk 电路的电压闭环控制) 控制架构, 突破传统电源效率低的瓶颈, 实现脉冲电源快速上升沿、无过冲与高效的性能。实验表明, 15 A 脉冲输出时过冲率小于 2%, 上升沿缩短至 9.92 μs , 电源效率达 90.94%。系统通过 FPGA 可编程性实现工作脉冲电流 10 ~ 50 A 可调, 步进 1 A; 重复频率 1 ~ 100 Hz 可调; 脉宽 150 ~ 400 μs 可调, 适配 8 ~ 20 V 的激光器负载。该技术以数字化控制替代模拟线性调节, 解决了动态响应与精度控制的矛盾, 为高精度脉冲电源的高效化与小型化提供新方案。

关键词: 激光电源; 现场可编程逻辑门阵列 (FPGA); MOS 管栅极驱动电压智能控制; Cuk 电路; 高效率

中图分类号: TN249; TP206 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.005

A design and implementation of a high-efficiency digital pulse driver circuit

SU Ling-shi, LV Wei-qiang, WANG Ke-qiang, WU Yong

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: As solid-state lasers for ranging and illumination demand higher performance in terms of miniaturization and efficiency from their driving sources, the traditional method of using MOSFETs in the linear region to control pulse current suffers from excessive thermal losses, resulting in low efficiency for low-voltage, high-current pulse power supplies. In this paper, an innovatively designed intelligent control method for the MOSFET gate drive voltage is implemented, utilizing an FPGA (Field-Programmable Gate Array) to achieve dynamic algorithm adjustments. Combining with a dual closed-loop control architecture (current closed-loop control and Cuk circuit-based voltage closed-loop control), the method overcomes the bottleneck of low efficiency in traditional power supplies, achieving fast rise time, no overshoot, and high efficiency in pulse power delivery. Experimental results show that at a 15 A pulse output, the overshoot rate is less than 2%, the rise time is reduced to 9.92 μs , and the power efficiency reaches 90.94%. The system leverages FPGA programmability to achieve adjustable pulse currents from 10 A to 50 A (with 1 A steps), adjustable repetition rates from 1 Hz to 100 Hz, and adjustable pulse widths from 150 μs to 400 μs , compatible with laser loads of 8 ~ 20 V. By replacing analog linear regulation with digital control, the contradiction between dynamic response and precision control is resolved. This study provides a new solution for high-efficiency and miniaturized high-precision pulse power supplies.

Keywords: laser power supply; Field-Programmable Gate Array (FPGA); intelligent MOSFET gate drive voltage control; Cuk circuit; high efficiency

1 引言

半导体激光器 (Semiconductor Laser Diode, LD) 作为一种高效、紧凑的光源,自 20 世纪 60 年代问世以来,因其波长可调谐性、高调制速率及低功耗特性,在通信、医疗、军事、工业等领域应用广泛。随着设计需求的增加,对驱动源的体积和效率提出了更高的要求^[1]。本文开展了对半导体激光器脉冲电源的小型化和高效率研究,同时要求其输出的脉冲电流上升沿迅速且无过冲。

国内外学者针对上述需求提出了多种解决方案。曹茹茹等采用级联叠加与功率 MOSFET 线性控制相结合的方法,通过 LCC 谐振充电与微小电流预启动技术抑制过冲,实现了 132.3 kW 的脉冲放电实验,效率达 85%^[2];李贺龙等采用串联 LC 谐振变换器实现高效恒流充电(最高 2.2 kV),并利用晶闸管触发 LC 临界阻尼放电电路产生高能脉冲(最高 700 J,脉宽 350 μs),最高重复频率达 10 Hz^[3];郭俊超等采用了基于超低 ESR 储能单元的前级低功率充电和后级高功率放电的技术方案,通过优化防反及缓启电路、BOOST 升压充电电路、储能单元和放电电路,实现了峰值 160 A、脉宽 230 μs 、频率 25 Hz 的脉冲电流输出^[4]。国际研究中,级联模块化设计、数字模拟混合控制及宽禁带器件(如 SiC MOSFET)的应用成为热点,例如美国某团队采用 GaN 器件将电源效率提升至 90% 以上。然而,现有方案多以复杂硬件或高昂成本,难以兼顾小型化与高性能需求。

基于电容储能的 MOS 管线性电流控制法虽能实现脉冲平滑输出,但其动态响应慢且热损耗过大。当 MOS 管工作于线性区时,漏极电流与栅极电压呈近似线性关系,但低压大电流工作下器件热效应显著,导致系统效率普遍低于 60%。研究还表明,传统开环架构缺乏对负载参数变化的适应性,在驱动不同型号的激光器时易出现峰值电流偏差,难以满足高精度应用场景需求。

针对上述问题,本研究提出一种基于 FPGA 的栅极驱动电压智能控制方式,利用算法动态调整 V_{CS} 的大小,并结合 Cuk 电路控制环路,解决传统模拟电源效率问题,将上升沿时间压缩,降低过冲率,并提升系统稳定性与效率。

2 LD 激光脉冲电源电路设计

2.1 电路结构

本系统采用模块化设计,由脉冲发生电路与 FPGA 数字控制电路构成双闭环控制架构,如图 1 所示。脉冲发生电路采用基于电容储能的线性电流控制法,功率 MOS 管工作于线性区,通过智能控制栅极电压输出脉冲电流,实现平滑脉冲电流的输出。控制电路以 FPGA 为核心,包括电压闭环控制回路、电流闭环控制回路,与运算放大电路、高精度 ADC、DAC 构成“采样-计算-驱动”全数字闭环链路,分别用于控制 Cuk 电路输出电压与实时控制脉冲输出电流的波形。

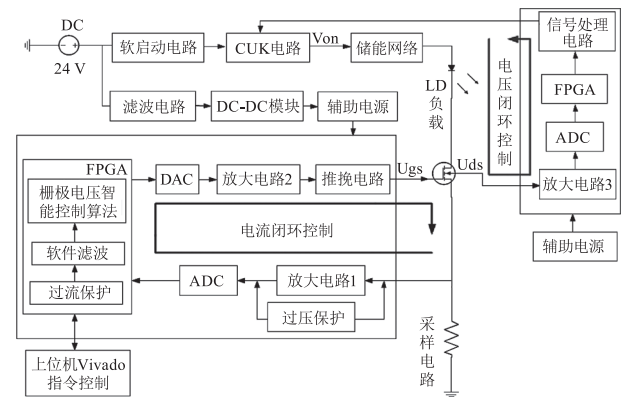


图 1 电路系统框图

Fig. 1 Circuit system block diagram

2.2 脉冲发生电路

脉冲发生电路由输入电源、软启动电路、Cuk 电路、储能电容组、功率 MOS 管以及电流采样网络构成。当功率 MOS 管截止时,脉冲发生电路处于断路状态,电路无输出,电源在此时对储能电容充电。当功率 MOS 管的栅极电压大于其开启电压时, MOS 管导通,电路导通,电容放电,实现大电流脉冲输出。

软启动电路由 RC 网络与 P 沟道 MOS 管构成,上电时缓慢拉高栅极电压,使输入电流电压缓慢上升,抑制电容初始充电浪涌电流。通过软启动电路可避免储能电容组瞬间短路导致的输入电压跌落,同时延长电容寿命。

为保证每个脉冲周期内储能电容组能够实现大电流脉冲输出,储能电容的容量需要根据电源电路参数以及所需的输出参数进行计算^[5]。根据脉冲放电能量守恒公式:

$$\frac{1}{2}CV_1^2 - \frac{1}{2}CV_2^2 = IV_1t_w \quad (1)$$

式中, V_1 为电容充满电后的电压, 根据输入电源电压可设为 30 V; V_2 为电容放电后的电压, 假设允许的电容器最大压降为 10%, 则可知 V_2 为 27 V; 根据输出指标, 设计电流最大值 I 为 50 A, 最大脉宽 $T_w = 400 \mu\text{s}$ 。代入公式计算可得 $C \approx 7.018 \text{ mF}$, 考虑实际情况, 因此可采用两个容值为 4.7 mF 的铝电解电容进行并联。

根据脉冲发生电路输出指标, 功率 MOS 管选用 IXTK200N10L2, 其漏极可通过持续最大电流为 200 A, 漏源电压为 100 V。功率 MOS 管工作于线性区, 当 U_{DS} 很小时, 其漏极电流与栅源电压近似满足:

$$I_D = \mu_n C_{\text{ox}} \frac{Z}{L} \left[(U_{\text{GS}} - U_{\text{th}}) U_{\text{DS}} - \frac{1}{2} U_{\text{DS}}^2 \right],$$

$$U_{\text{DS}} \ll (U_{\text{GS}} - U_{\text{th}}) \quad (2)$$

其中, I_D 是漏极电流; μ_n 是沟道电子迁移率; C_{ox} 是单位面积的栅氧化层电容; Z 是 MOS 管的沟道宽度; L 是 MOS 管的沟道长度; U_{th} 是阈值电压^[6]。

当 U_{DS} 较低时, I_D 与 U_{GS} 呈准线性关系, 通过改变栅极电压的大小, 可以实现不同大小的脉冲电流输出。

2.3 FPGA 数字控制电路

本系统采用全数字化双闭环控制架构, 以 Xilinx XC7A200T-2FBG484I 为控制核心, 实现双闭环全链路高精度调控。

2.3.1 基于 Cuk 电路的电压闭环控制

为降低 MOS 管源漏极电压, 减小其热效应, 提升电源系统效率, 本研究通过 Cuk 斩波电路调整储能网络充电电压。Cuk 斩波电路可实现升降压效果, 其电路原理图如图 2 所示。

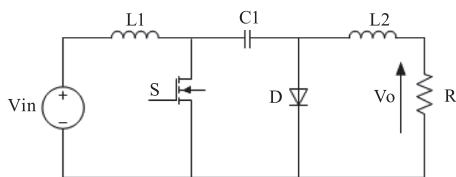


图 2 Cuk 电路原理图

Fig. 2 Cuk circuit schematic diagram

当开关管 S 处于通态时, $V_{in} - L_1 - S$ 回路和 $R - L_2 - C_1 - S$ 回路分别流过电流, V_{in} 向电感 L_1 提供能量, 使其电流上升。同时, C_1 向负载 R 和 L_2 提供能量, C_1 上的负电压使二极管 D 承受反向电压关断。当 S 处于断态时, $V_{in} - L_1 - C - D$ 回路和 $R - L_2 - D$ 回路分别流过电流, V_{in} 和 L_1 的反电动势共同给

电容充电, 同时二极管导通, L_2 经 D 向负载提供能量^[7]。

其输出电压 V_o 与电源电压 V_{in} 的关系如式:

$$V_o = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_{in} \quad (3)$$

通过改变占空比 α 的值, 可以得到高于输入电压或低于输入电压的值。

本研究在负载确定的情况下, 通过上位机 Vivado 软件控制 Cuk 电路中开关管的占空比, 即调节开关管的导通时间, 使其输出一个固定电压值。而后在脉冲发生电路输出不同电流值时, 基于 U_{DS} 反馈输入至 FPGA 中, 进而调节 Cuk 电路中开关管的占空比, 使 U_{DS} 能保持在一个较小值, 提升电源系统的效率。

2.3.2 栅极驱动电压智能控制

为精准地控制输出脉冲电流, 本研究采用创新式的栅极驱动电压智能控制方式, 利用 FPGA 实时调整 U_{GS} , 使电源系统能够在较小的 U_{DS} 情况下输出一个具有快速上升沿、无过冲且平顶稳定的脉冲电流。

电流闭环控制回路通过高精度采样电阻获取负载电流信号, 经运算放大器放大后, 由 12 位高精度 ADC 完成模数转换。FPGA 通过 LVDS 接口同步触发 ADC 采样, 确保时序一致性, 并利用内部数字滤波模块(基于移动平均算法)抑制高频噪声, 提高响应速度与电流检测分辨率。转换后的数字信号输入 FPGA, 利用控制算法动态调整 FPGA 输出控制量, 再经 12 位 DAC 转换为模拟电压, 随后经运算放大器以及推挽电路放大, 形成驱动功率 MOS 管的栅极电压, 实现对输出电流的控制。当电流过大时, FPGA 根据电流采样反馈的数值触发过流保护, 使电源强制停机。

MOSFET 作为整个电源的核心器件, 同时起到了电流控制与恒流输出的作用。要使其获得最佳的电流输出, 需对其栅极电压进行合理的控制。传统的控制方法虽能对 MOSFET 进行较好的栅极电压控制, 如 PID 控制, 通过反馈的误差量进行调节, 但其输出电流仍不太理想, 依旧存在较大的过冲, 且上升沿缓慢。并且由于 MOSFET 工作在线性区使得 U_{DS} 对其也存在较大的影响, 导致电源效率低。因此本文采用创新式的智能控制算法, 利用 FPGA 对栅极驱动电压进行实时精准调节, 达到输出电流能够快速上升, 过冲很小的恒流输出效果。其控制流

程图如图 3 所示。

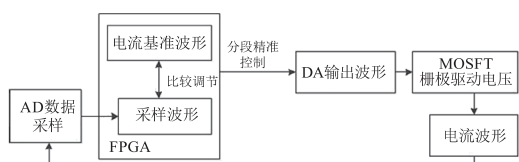


图 3 栅极驱动电压智能控制流程图

Fig. 3 Intelligent MOSFET gate drive voltage control flow diagram

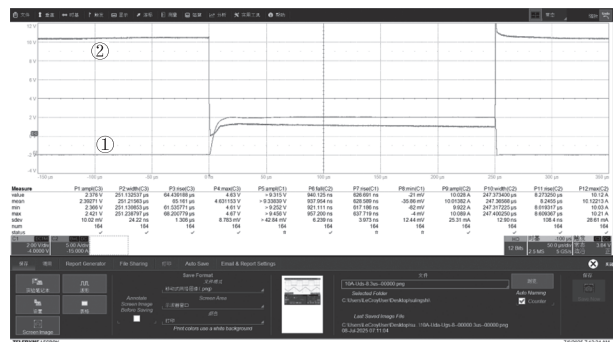
3 实验验证

为了便于调试,本次实验采用与 LD 激光器伏安特性相近的二极管阵列作为假负载。

MOSFET 正常工作时,其栅极电压要大于开启电压,因此可在上位机 Vivado 软件中提前设定一个直流偏置,使 DA 芯片持续输出略小于 MOSFET 的电压。此预触发模式可为后续电流波形的快速上升以及减小过冲有一定作用。

电源输入电压 24 V,在上位机 Vivado 软件中设定频率、脉宽、幅值不同的输出电流值以及 Cuk 电路输出电压值,并通过示波器采集相关的波形。

采用二极管阵列作为负载,将重复频率设定为 4 Hz,脉冲宽度为 250 μ s,电流大小设定为 10 A 进行脉冲输出测试,其电流波形与 MOS 管漏极电压波形如图 4 所示。



①输出电流 10 A ②MOSFET 漏极对地电压,包含采样电压

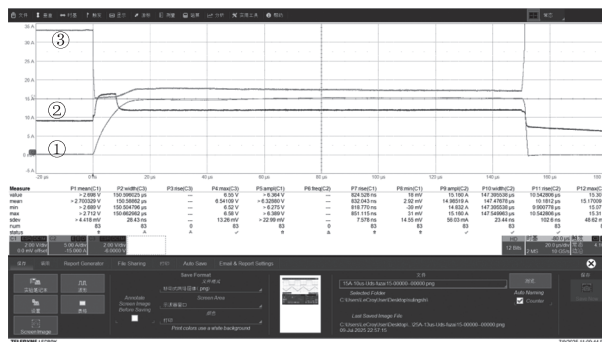
图 4 输出电流 10 A 时电流波形与漏极电压波形

Fig. 4 Waveforms of drain current and drain voltage under 10 A output current condition

从图中的相关波形可以读出,输出电流波形上升沿为 8.28 μ s,电流过冲小于 2%,MOSFET 漏极对地电压为 1 V。从图中可以看出,输出电流波形不仅具有快速上升沿,且有效减小了电流过冲。Cuk 电路输出电压为 10.5 V,负载电压为 9.5 V,电源整机效率达 87.3%。

采用二极管阵列作为负载,将重复频率设定为 100 Hz,脉冲宽度为 150 μ s,电流大小设定为 15 A

进行脉冲输出测试,其电流波形、栅极电压波形与漏极电压波形如图 5 所示。



①输出电流 15 A ②MOSFET 栅极电压 ③MOSFET 漏极对地电压

图 5 输出电流 15 A 时电流波形、栅极电压波形与漏极电压波形

Fig. 5 Waveforms of drain current, gate voltage waveform, and drain voltage under 15 A output current condition

从图中可以读出,输出电流上升沿为 9.92 μ s,电流过冲小于 2%,MOSFET 漏极对地电压为 1 V。此时,Cuk 电路输出电压为 16 V,负载电压为 15 V,电源效率达 90.94%。

采用二极管阵列作为负载,将重复频率设定为 1 Hz,脉冲宽度为 400 μ s,电流大小设定为 20 A 进行脉冲输出测试,其电流波形与 MOS 管漏极电压波形如图 6 所示。



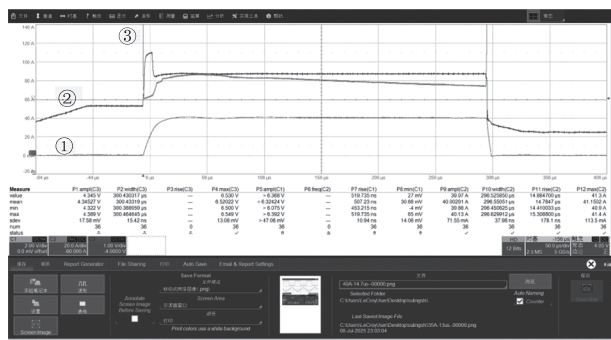
①输出电流 20 A ②MOSFET 漏极对地电压

图 6 输出电流 20 A 时电流波形与漏极电压波形

Fig. 6 Waveforms of drain current and drain voltage under 20 A output current condition

从图中可以读出,输出电流上升沿为 8.45 μ s,电流过冲小于 2%,MOSFET 漏极对地电压为 1.46 V。此时,Cuk 电路输出电压为 11.96 V,负载电压为 10.5 V,电源效率达 85.166%。

采用二极管阵列作为负载,将重复频率设定为 1 Hz,脉冲宽度为 300 μ s,电流大小设定为 40 A 进行脉冲输出测试,其电流波形、栅极电压波形与漏极电压波形如图 7 所示。



①输出电流40 A ②MOSFET栅极电压 ③MOSFET漏极对地电压

图7 输出电流40 A时电流波形、栅极电压波形与漏极电压波形

Fig.7 Waveforms of drain current, gate voltage waveform, and drain voltage under 40 A output current condition

从图中可以读出,输出电流上升沿为 $14.7 \mu\text{s}$, 电流过冲小于 2% , MOSFET 漏极对地电压为 2 V 。此时, Cuk 电路输出电压为 14 V , 负载电压为 12 V , 电源效率达 85% 。

采用二极管阵列作为假负载, 重复频率为 1 Hz , 脉宽 $250 \mu\text{s}$ 时, 电源整机效率随电流变化的关系图如图8所示。

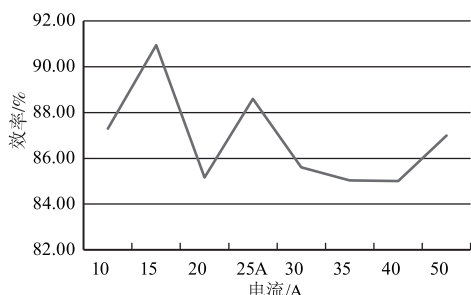


图8 电源整机效率与电流变化折线图

Fig.8 Line chart of power supply efficiency vs. output current variation

从图中可以看出,随着电流的变化,电源整机效率均大于 85% , 且最大效率可达 90.94% 。

4 结论

本文介绍了一种高效半导体激光器脉冲驱动电源的系统框架与具体电路设计, 并通过制作的样机验证了设计的可行性。利用 Cuk 电路调节供电电压到所需的目标电压, 为脉冲恒流高效转换电路提供了能实现高效转换的电压。同时, 根据输出电流采样反馈信号在 FPGA 中对 MOSFET 的栅极电压进行精确的高速控制, 再通过 DA 输出与放大电路实

现对 MOSFET 的精准驱动, 实现上升快, 过冲小的恒流高效输出, 实现了脉冲电源的高效化。制作的数字脉冲电源样机效率在全负载范围内达 85% 以上, 可实现电流 $10 \sim 50 \text{ A}$ 可调、步进 1 A , 脉宽 $150 \sim 400 \mu\text{s}$, 重复频率 $1 \sim 100 \text{ Hz}$ 可调的多参数可设定脉冲输出, 且适用于多种负载。

参考文献:

[1] Qiu H R, Liu C J, Gan Y J, et al. Overview of semiconductor pulse lasers development [J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(10): 1-6. (in Chinese)
丘焕然, 刘德嘉, 甘育娇, 等. 半导体脉冲激光器发展综述 [J]. 光通信技术, 2021, 45(10): 1-6.

[2] Cao R R. Research on the pulse power supply for high-power semiconductor laser diode arrays [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)
曹茹茹. 大功率半导体激光器脉冲电源研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.

[3] Li H L, Xu J, Yang Z Q, et al. Design of high-power repetitive pulse laser power supply [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(5): 56-61. (in Chinese)
李贺龙, 徐健, 杨之青, 等. 大功率高能脉冲激光电源设计 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(5): 56-61.

[4] Guo J C, Han Y F, Zhang X H, et al. Design of a pulsed driver for LDA of airborne 130 mJ laser director [J]. Laser Journal, 2024, 45(9): 14-18. (in Chinese)
郭俊超, 韩耀锋, 张晓辉, 等. 机载 130 mJ 激光照射器的脉冲驱动电源设计 [J]. 激光杂志, 2024, 45(9): 14-18.

[5] Xu Y F, Shi Y J, Shao J Z, et al. Design of high-precision pulse power supply for high-power semiconductor laser [J]. Laser Technology, 2023, 47(1): 108-114. (in Chinese)
徐一帆, 施阳杰, 邵景珍, 等. 大功率半导体激光器的高精度脉冲电源设计 [J]. 激光技术, 2023, 47(1): 108-114.

[6] Sze S M, Ng K K. Physics of semiconductor devices [M]. Ge L, Zhang R Z, translated. 3rd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008. (in Chinese)
施敏, 伍国珏. 半导体器件物理 [M]. 耿莉, 张瑞智, 译. 3 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.

[7] Wang Z A, Liu J J. Power electronics [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2019. (in Chinese)
王兆安, 刘进军. 电力电子技术 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2019.