

工业级高功率半导体激光器精准控制系统研究

罗又辉, 黄彩妹, 梁其能

大族激光科技产业集团股份有限公司, 广东 深圳 518000

摘要: 本研究开发了一套创新的工业级高功率半导体激光器精准控制系统, 专用于激光精密焊接工艺。该系统基于尖端的嵌入式控制理论, 其核心硬件采用高性能 MCU 与 FPGA 的双处理器架构, 配备有全面的控制接口模块和用户友好的 PC 交互界面, 确保对激光器电源驱动与功率输出的精确、稳定调控。系统集成激光功率调制与跨时钟同步策略, 以应对工业级加工中的多元化、高精度需求, 展现出卓越的适应性和灵活性。

关键词: 半导体激光器; 精准控制; 上位机; 调制; 跨时钟同步

Research on Precision Control System for Industrial-grade High-power Semiconductor Lasers

Luo Youhui, Huang Caimei, Liang Qineng

Han's Laser Technology Industry Group Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract: This study has developed an innovative precision control system for industrial-grade high-power semiconductor lasers, specifically designed for laser precision welding processes. Based on advanced embedded control theory, the system employs a dual-processor architecture combining high-performance MCU and FPGA as its core hardware, complemented by a comprehensive control interface module and a user-friendly PC interface. This ensures precise and stable regulation of laser power drive and power output. Integrated with laser power modulation and cross-clock domain synchronization strategies, the system meets the diverse and high-precision requirements of industrial-grade processing, demonstrating exceptional adaptability and flexibility.

Keywords: semiconductor laser; precision control; host computer; modulation; cross-clock synchronization

引言

半导体激光器市场在全球范围内持续升温, 其技术进步显著, 不仅功率输出攀升, 转换效率提升, 而且在稳定性、寿命及制造工艺上取得了重大突破, 导致成本大幅下降。这一趋势促使半导体激光器渗透到更多应用领域, 包括精密的微电子制造、精确军事瞄准系统、高分辨率科研实验、航空领域的光学通信, 以及医疗设备中的手术治疗等。随着直接半导体激光加工技术的迭代创新, 国内企业自主研发的高功率半导体激光器已成为焊接工艺的优选, 逐步侵蚀 IPG、TRUMPF、LASERLINE 等国际品牌在光纤激光器市场的份额。据市场研究机构预测, 未来几年对具备高功率和卓越性能的半导体激光器的需求将以每年超过 15% 的复合增长率持续增长, 凸显出其在各行各业中不可替代的角色^[1]。

一、系统总体设计

(一) 整机系统组成

工业级高功率半导体激光器的整机系统, 是一个集成了精密控制与高效能硬件的综合体系。其中, PC 上位机作为人机交互界面, 实现远程监控与参数设置; 控制接口板承载多样化的输入输出, 确保与各组件的无缝对接; 核心板以 MCU+FPGA 为核心^[2], 高效处理实时数据与复杂控制逻辑; 电源调流板精准调控电流, 保障泵浦 LD 光引擎稳定工作^[3]; 采集板则实时监测设备状态, 确保安全运行; PSU 泵浦电源与 AUX 辅助电源供应, 为系统提供纯净、稳定的电力; 热交换器与内室空调协同工作, 维持适

宜的设备运行环境, 优化性能表现^[4]。这些组件通过精密的电气连接, 共同构建出一套高效、可靠的高功率激光解决方案。

(二) 控制系统硬件设计

采用高性能 STM32F407 MCU^[5], 该器件以其 Cortex®-M4 内核和浮点运算单元为硬件控制奠定了高效基础, 确保实时处理与高精度控制。FPGA^[6]作为并行处理单元, 灵活应对复杂逻辑运算, 两者协同, 实现了对激光器系统的精确监控与高效响应。控制接口板上, 多样化的接口设计覆盖了电源监控、激光驱动、环境传感器、模拟信号调理和数字信号处理等多个方面, 确保了系统组件间的无缝交互。其中, 智能传感器模块对环境参数的实时监测, 提升了系统稳定性; DA/AD 转换器则实现了模拟信号与

数字信号的高效转换，确保了数据处理的精确性。此外，调制电路单元对激光输出进行精细化控制，优化了激光质量。通过与上位机的通信接口，实现远程控制和信息反馈，增强了人机交互体验，使得操作更为便捷。

1. 单片机 MCU 的选择

STM32F407 MCU^[7]提供了工作频率为168 MHz的Cortex®-M4内核（具有浮点单元）的性能，在此频率下，从Flash存储器执行时，STM32F407能够提供210 DMIPS/566 CoreMark性能，并且利用意法半导体的ART加速器实现了FLASH零等待状态。DSP指令和浮点单元扩大了产品的应用范围。

12个USB OTG（其中一个支持HS）、2个全双工P/S、符合IEEE 1588 v2标准要求的以太网MAC10/100。

1通信接口多达15个（包括6个速度高达11.25 Mb/s的USART、3个速度高达45 Mb/s的SPI、3个PC、2个CAN和1个SDIO）。

2. 现场可编程门阵列 FPGA 的选择

FPGA采用Altera新的Cyclone IV系列^[8]，这款芯片采用经过优化的60-nm低功耗工艺，Cyclone IV E FPGA拓展了前一代Cyclone III FPGA的低功耗优势。最新一代器件降低了内核电压，与前一代产品相比，总功耗降低了25%，低成本、低功耗的FPGA架构。

（三）PC上位机设计

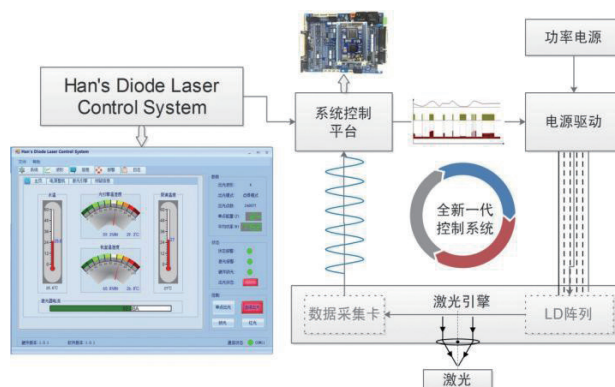
上位机运用C#编程语言构建的交互界面，具备高度专业性和用户友好性，如图1左下所示，实现了精细的触控操作与激光器的无缝对接。界面设计允许用户根据实际工作场景定制显示内容，适应多样化的焊接工艺需求^[9]。其中，系统内置的多重出光波形控制功能^[10]，可精确调节激光的输出特性，包括波形形状、能量级别、功率强度、频率分布以及出光模式，确保焊接过程的精准可控。此外，系统集成的激光PD检测技术，配合温度、湿度、电流及电源等多参数传感器，实现了全方位的实时监控。这些传感器数据有助于在不同运行阶段优化操作，并允许用户设定激光器的保护参数，以适应各种环境条件，增强设备的适应性和耐用性。这种全面的保护机制确保了激光焊接系统的稳定性，提升了系统的安全性能，降低了设备故障风险，从而保障了整个焊接作业的高效、可靠运行。

（四）控制系统工作原理

该控制系统如下图1，其核心设计理念是实现精确、实时的激光功率控制^[11]，以提升焊接工艺的稳定性 and 效率^[12]。硬件层面的实时高速出光功率控制采用先进的数字信号处理技术，与软件控制相结合，确保了能量调整的快速响应和稳定性。这种集成化的控制策略能够精准跟踪预设的激光波形，通过以太网或串行接口与上位机的高效通信，实现对激光波形的精确编程。在实际操作中，系统通过DA转换器驱动波形发生器，进一步控制电源的恒流模块，以此来调节PSU泵浦功率电源，保证激光器的LD（激光二极管）供电稳定。激光输出的能量，基于预设波形和实时监测的反馈^[13]，能够动态调整电源输出的电流，确保激光输出的精确性。这种智能调控不仅优化了激光的能量分布，也有效防止了由于电网波动和外部设备干扰导致的激光能量波动，从而增强了焊接过程的一致性，降低了不良品率。

此外，系统内置的激光能量渐变功能，允许用户对每一个焊

接点的能量输出进行精细化调整，适应各种复杂的焊接需求，无论是深度控制，还是精细焊接，都能灵活应对。通过这种全面的控制策略，本控制系统旨在提供一种高效、灵活且可靠的激光焊接解决方案，以满足工业生产中多样化和定制化的工艺需求。



> 图1 控制系统工作原理图

（五）激光调制技术设计

高功率半导体激光器的稳定输出，对驱动电流的精确控制至关重要。微小的电流波动将直接影响其输出光强，因此，设计中采用了数字TTL、模拟幅度光功率电调制技术^[14]、温度控制以及光功率率监测等多维度的复合调制策略。这些技术的结合，旨在确保在工业加工的复杂环境中，如多光源合束和高功率合成等应用，既能灵活调节激光功率，也能同步调整中心波长，满足精确的工艺需求。

驱动电调制电路的构建是实现稳定激光输出的关键。电路主要由四部分构成：恒流电路确保了驱动电流的高稳定性，有效防止了因电流波动导致的光强不均；软启动功能通过预设的启动程序，消除了启动瞬间的电流冲击，保护激光器免受损害；限流保护电路则在电流过大的情况下自动介入，避免了过流导致的半导体激光器损伤；调制信号产生电路则具备调制频率的可调性，以适应不同的工作模式和焊接速度。

温控设计上，采用了创新的散热结构，以粗广的水冷散热系统为基础，结合精密的TEC（热电制冷器）温度控制驱动与算法。温度控制单元内，比例积分（PI）控制技术与积分分离技术的结合，实现了对激光二极管阵列温度的精确、稳定调节，确保了在各种工作条件下的最佳激光性能。

这一系列精心设计的调制与控制技术，不仅提升了激光器的功率稳定性，也增强了设备的耐用性。通过对温度的精细控制和电流的动态调整，有效防止了因设备老化或外部环境变化导致的功率漂移，确保了焊接过程的连续性和一致性，为高精度的工业生产提供了坚实的保障。

（六）功率监测及补偿技术开发

在现有的高功率半导体激光器技术框架下，普遍采用的风冷或水冷手段，尽管能一定程度上维持LD泵浦的温度稳定，但这种方式对于功率的调控过于简单，仅通过电流变化调整激光器的功率输出。然而，这忽略了实际激光功率的监测，因为即使半导体激光LD的电学特性保持不变，其发光部件的微小损伤或光纤耦合输出的异常，都可能导致实际功率的显著变化，而这些变化无法通过现有的控制系统检测到。这种信息的缺失，直接影响了设备

的异常诊断和预警功能，从而降低了高功率半导体激光器系统的整体稳定性和可靠性。

为了解决这一问题，我们创新性地设计了一种具有补偿功能的激光输出功率检测系统，旨在提升对实际激光功率的准确检测。这一系统不仅能判断 LD 发光部件的损伤或光纤耦合的异常，还通过综合补偿算法，有效弥补了由于环境温度变化引起的功率采集误差。这一方法的引入，将有助于我们从源头上解决因功率检测不准确而导致的设备性能波动。

设计流程及设备运行的工作流程如下：

首先，设备启动后，系统会实时采集处于工作状态的输出光纤的模拟信号，包括激光输出信号和温度信号，并将这些模拟信号转换为数字形式。这一步骤至关重要，因为它为后续的精确实分析提供了基础数据。

其次，系统同步监测输出光纤工作时的环境数据，这包括但不限于环境湿度和室温。这些环境因素对激光功率的输出具有潜在影响，因此必须纳入考量。

最后，结合采集到的激光数字信号、温度数字信号以及环境数据，系统通过精心设计的算法，进行温度补偿，从而计算出校正后的实际输出功率。这一过程考虑了温度变化对激光功率输出的动态影响，提高了功率测量的精度。

通过这种方式，我们能够确保在各种工况下，对高功率半导体激光器的输出功率进行准确监测，提升了设备的自我诊断能力和稳定性，为复杂、精细的工业应用提供了坚实的保障。

（七）跨时钟域功率渐变焊接同步技术

在当前的激光焊接技术领域，尽管独立的激光器与焊接工作台系统在处理单一功率或能量需求的焊接任务时表现稳定，但在面对复杂的焊接工艺挑战时，其局限性日益凸显。这些挑战包括但不限于，产品在焊接过程中不同部位对功率或能量的差异化需求，以及对渐变焊接过程的精确控制。现有的技术往往难以在动态变化的功率或能量设定上与焊接位置实现精确匹配，导致预设的功率水平在实际操作中呈现超前或滞后，从而影响焊接质量。

为了解决这一难题，我们提出了一个创新的跨时钟域功率渐变焊接同步技术方案。这一方案的核心在于，对激光器系统进行深度设计，引入多级可渐变的功率或能量波段，确保在不同的焊接阶段能灵活调整输出。同时，我们引入了一条高速同步信号链路，将激光器与焊接工作台紧密联结，确保两者在跨时钟域操作中的同步精度。

在实际焊接过程中，这一同步信号如同精确的指挥棒，引导激光器按照预设的渐变功率波段适时调整输出，以适应产品在焊接过程中不断变化的需求。这一创新技术不仅提升了焊接工艺的灵活性，也确保了在复杂、多变的焊接条件下，功率控制的精确性和实时性，从而满足了现代工业对多样化、复杂化和精细化焊接工艺的高要求。

二、实验与分析

为了全面评估高功率半导体激光焊接系统的性能，我们进行了深入的实验，聚焦于其在 SUS316L 奥氏体不锈钢焊接中的应

用。实验结果显示，激光焊接过程中，由于匙孔效应的产生，焊接过程展现出显著的穿透性，最大熔深达到 2.3mm，熔宽达到 3.57mm，体现了设备的高效能量传输能力^[15]。

进一步观察发现，当保持其他焊接参数恒定时，随着激光功率的线性增长，焊缝的熔深和熔宽呈现渐进式增加的态势。功率阈值达到 1500W 时，这种增长速率显著加快，揭示了从常规热熔焊向深熔焊模式的转变，这与激光功率对焊接热输入的直接影响密切相关。

在功率的不同阶段，深宽比表现出了明显的变化规律。在功率低于 1500W 的区间，深宽比稳定在约 0.25，体现了焊接过程的稳定性和控制精度。然而，当功率超过 1500W，深宽比经历了一个快速上升然后趋于平缓的过程，最终稳定在约 0.7，这表明在高强度功率下，焊接过程的动态调整机制能有效维持熔池形状的稳定。

三、结语

系统核心采用尖端的高性能 MCU 与 FPGA 协同设计，构建一体化主控与保护机制，革新性地克服了传统系统中控制响应迟缓、保护措施不足以及电气布线易受噪声影响的难题。新型波形生成与多元光束调制技术在控制层面的应用，显著提升了对复杂工艺参数的快速优化能力，确保了工艺的精准执行。在保护层面，引入了阵列电流均衡保护策略和环境温湿度监控，显著增强了系统的稳定性和耐用性。

在焊接工艺研发中，我们自主研发的高功率半导体激光焊接技术展现出卓越性能，焊缝表面平滑，焊道形态美观，焊接过程稳定性极高，且具备显著的穿透深度，这得益于对激光功率与焊接过程精确控制的深入理解和技术创新。这些创新不仅提升了焊接效率，更确保了焊接质量的一致性和可靠性，为实现精密制造中的复杂焊接需求提供了强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 韦欣, 李明, 李健, 等. 几种新体制半导体激光器及相关产业的现状、挑战和思考[J]. 中国工程科学, 2020, 22(03): 21-28.
- [2] 马超. 高精度半导体激光器控制系统的设计与实现[D]. 曲阜师范大学, 2014.
- [3] 刘谈平. 大功率半导体激光驱动电源关键技术研究[D]. 中北大学, 2014.
- [4] 齐莹莹. 大功率半导体激光器温控系统设计[D]. 长江大学, 2019.
- [5] 黄斐, 周郑, 郭汉明. 基于 STM32 的半导体激光器驱动电路设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(01): 7-11.
- [6] 万妍君. 基于现场可编程门阵列的半导体激光器控制技术[D]. 大连理工大学, 2020.
- [7] 意法半导体. STM32F407 数据手册[R]. 北京: 意法半导体, 2013.
- [8] Altera Cyclone® IV FPGA, Device Datasheet, CYIV-53001-2.0.
- [9] 王峰. 智能化半导体激光器驱动器设计[D]. 华中科技大学, 2017.
- [10] 薛文. DDS 任意波形发生器的设计与实现[D]. 南京理工大学, 2004.
- [11] 范桂东. 半导体激光器功率控制系统的研究[D]. 西安理工大学, 2016.
- [12] 李峻灵. 半导体激光器功率稳定性的研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2007.
- [13] 宋敬卫, 付广春, 马献国等. 基于 STM32 的多路电压采集研究[J]. 电子研究, 2013, (12): 55-56.
- [14] 黄小帅. 基于 FPGA 的半导体激光器光电锁相非线性校正[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [15] 王智勇, 曹银花等. 高光束质量千瓦直接半导体激光器研究[J]. 2009 激光焊接国际论坛, 2009.5.