

高精度多通道激光器恒定驱动电源研究与设计

武军凯, 茅正冲

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214000)

摘要: 为了对多个激光器进行可靠性测试, 实现分时工作, 同时降低驱动电路体积, 选用多路选择开关和多路模拟开关以实现多通道下光电二极管 PD 和雪崩光电二极管 APD 的切换, 通过设置 DAC 数模转换芯片不同工作点电压, 实现一种可以驱动多通道不同型号激光器的恒定驱动电源电路; 电路设计中利用深度负反馈原理来提高系统的稳定度, 设计了双 OPA 和 MOS 管进一步减小漏电流引起的偏差, 优化了电压-电流量线性度; 软件设计中引入强化学习 Actor-Critic 框架对 RBF-PID 算法参数自适应调整, 缩短系统动态平衡时间的同时具有智能性; 实验表明该驱动电源具有输出精度高 ($<0.1\%$), 稳定性强 (0.05%), 纹波系数低 ($<1\ \mu\text{A}$), 动态响应时间快, 抗干扰能力强等优点。

关键词: 激光器; 模拟开关; 恒定驱动电源; Actor-Critic; RBF-PID

Design and Research on Constant Driving Power Supply for High Precision Multi-Channel Lasers

WU Junkai, MAO Zhengchong

(School of Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214000, China)

Abstract: In order to achieve time-sharing operation and conduct reliability test for multiple lasers, and reduce the size of the driver circuit, multiplex selector and analog switch are chosen to realize the switching of photodiode (PD) and avalanche photodiode (APD) under multiple channels, and the digital-to-analog converter (DAC) chip with different working voltages is configured to realize the constant driving power circuit that can drive multiple channels of various laser diodes. In the circuit design, the deep negative feedback is used to improve the stability of the system, the dual operational amplifier (OPA) and MOS tubes are designed to further reduce the deviation caused by leakage current and optimize the voltage-current linearity. In the software design, the reinforcement learning Actor-Critic framework is introduced for the adaptive adjustment of the radial basis function and proportional integral derivative (RBF-PID) algorithm parameters to shorten the system dynamic balancing time. At the same time, it has an intelligence; The experimental results show that the driving power supply has the shortages of a high output precision of less than 0.1% , high stability of less than 0.05% , low ripple coefficient of less than $1\ \mu\text{A}$, quick dynamic reaction time, and strong anti-interference ability.

Keywords: laser diode; analog switch; constant drive power supply; Actor-Critic; RBF-PID

0 引言

激光器具有体积小、转换效率高、可靠性强等优点, 被广泛应用于光通信、医疗监测、精密测距、自动驾驶等领域^[1-2]。然而, 激光器的抗上电冲击能力较差, 电流的细微变化都会引起它输出功率的改变, 从而导致不可逆转的危害^[3]。因而, 实际工业应用中对激光器进行可靠性测试时必须使用恒定驱动电源, 且具有很高的精确度、稳定度及很小的纹波系数, 并具备较强的抗干扰能力和抑制瞬态电流或电压尖峰措施^[4-6]。

随着半导体技术的不断发展, 对激光器恒定驱动电源的功率和性能要求进一步提升^[7]。目前, 在微小功率的精

密恒流源领域, 主要采用线性电源以实现较高的精度, 并广泛应用于各种测量电路^[8]。然而, 线性电源功耗大且效率低, 在高功率场合下需要更大规模的散热设备^[9]。为了降低器件损耗并提升电源效率, 一些恒流源方案采用了开关电源设计, 但这种设计会对精确度和稳定性产生一定影响, 从而限制了其应用范围^[10]。

在激光器可靠性测试领域, 不仅对其驱动电源有很高的要求, 而且由于不同应用所需的激光器各不相同, 需要分时切换不同型号的激光器^[11]。以往对激光器进行可靠性测试时, 面对不同的激光器, 常采用基于电流反馈控制的电压-电流转换电路或者串联电压稳压电路进行切换, 但

收稿日期: 2023-06-29; 修回日期: 2023-07-31。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(6170185); 国家自然科学基金(61901206)。

作者简介: 武军凯(1999-), 男, 硕士研究生。

通讯简介: 茅正冲(1964-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 武军凯, 茅正冲. 高精度多通道激光器恒定驱动电源研究与设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 326-333.

这种方式会降低实时性^[12]; 面对多通道下激光器恒定驱动电源电路的设计, 往往将多个恒流源模型并联在恒压变换器之后来实现多通道下激光器的可靠性测试, 然而这样做会增加冗余性同时降低其精确度^[13]。

基于以上分析, 设计了一个基于 STM32 的高精度多通道恒定驱动电源对 PD (Photodiode) 和 APD (Avalanche Photodiode) 两种不同型号的激光器进行可靠性测试。该电源利用精密运算放大器 (OPA, operational amplifier) 和 MOSFET 实现串联负反馈电路实现电压—电流转换。为了对多通道不同型号激光器可靠性测试, 在 DAC 与恒流源电路之间加入多路模拟开关, 并用信号继电器与光耦合器进行隔离, 以提升输出精度并降低系统中的纹波噪声。反馈电压经过多路复用器和 ADC 采样后传输至 STM32 微控制器, 通过改进的自适应 PID 算法对误差进行控制, 从而提高输出电流的精度。

1 系统总体方案设计

整个高精度多通道恒定驱动电源的系统如图 1 所示, 分别由电源模块、微控制系统、DA 模块、多路模拟开关、恒流源模块、负载模块、多路复用器以及 AD 模块构成。通过 STM32 微控制器控制 16 位的 TPC116S8 高精度 DAC 芯片输出电压驱动恒流源模块, 在多通道设计时加入了多路模拟开关 ADG1634, 以实现 DAC 输出电压在 PD 和 APD 两个挡位之间的切换。恒流源模块通过精密运算放大器 OPA 和 MOSFET 实现。接着, 通过精密运算放大器对采样电阻两端电压进行采样, 通过模拟多路复用器 ADG1606 将多通道的采样电压传输至 AD7606 高精度 AD 芯片中, 再经过改进的自适应 PID 控制算法来实现对恒流源模块输出电流的精准控制^[14]。

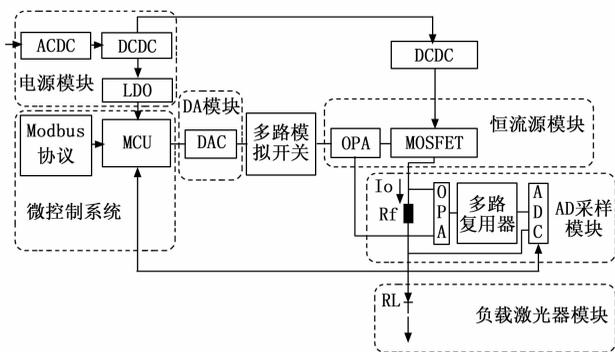


图 1 恒流源系统总体结构图

恒流源模块通过基于 OPA 和 MOSFET 组合的 V/I 转换电路实现恒定电流输出, 当采样电阻 R_i 固定时, 输出电流 I_o 。在不同激光器负载 R_L 的情况下仍能保持恒定。用户使用 Modbus 串行通信协议给该恒定驱动电源设定输出电流值, 通过 AD 采样获取采样电阻两端的电压值来计算实际输出电流值 I_o , 并与设定电流值比较, 得到输出电流的误差和误差变化率, 通过自适应 PID 控制算法子程序得到 DAC

输出的修正量, 从而微调 DAC 的输出值以实现输出电流的稳定。当设定电流值因外界干扰而变化时, 由 OPA 和 MOSFET 组成的 PI 控制器能够快速响应达到稳态输出, 从而抑制系统阶跃响应输出超调量^[15-16]。

2 系统硬件设计

2.1 DA 模块电路设计

DA 转换将数字信号转换成模拟信号, 本设计中的 DA 转换器是将 STM32 产生的电源数字信号转换为模拟信号输出至恒流源模块。该高精度多通道恒定驱动电源设计采用 TPC116S8 作为 DAC, 它是 8 通道, 16 位引脚的数模转换器, 如图 2 所示。选用该器件一次可以控制 8 个通道的模拟输出, 极大地提高了系统效率。

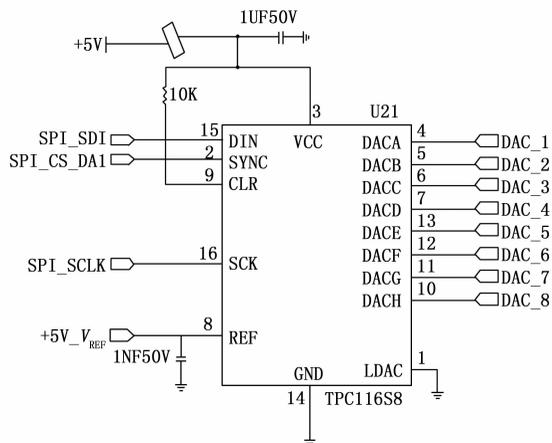


图 2 DAC 电路设计

TPC116S8 具有三线式串行接口, 与 MICROWIRE、SPI、QSPI 和 DSP 兼容。该接口提供 3 种输入: SCLK (串行时钟输入)、SYNC (片选输入) 和 DIN (串行数据输入)。当片选输入发生高电平至低电平转换后, 数据在串行时钟输入 (SCLK) 的每个下降沿同步移位并锁存到输入寄存器中。串行输入寄存器在载入 24 位数据后将内容传输至输入寄存器, 并在时钟的 24 位下降沿接收到数据后立即更新 DAC 输出。其中, 参考电压设置为 5 V, DAC 输出电压公式如下:

$$V_{out} = (code/65536) * V_{REF} \quad (1)$$

2.2 多路模拟开关电路设计

选用 ADG1634 模拟开关实现 DAC 输出电压在 PD 和 APD 两个挡位之间的切换, 且该模拟开关由 4 个独立选择的 SPDT 开关组成, 因此一次可实现对 4 个 DAC 输出电压信号的传输, 如图 3 所示。在该电路设计中, 设置最大正电位为 5 V, 最大负电位为 -12.5 V, 漏极端 D_x 作为输入, 源极端 S_x 作为输出。当逻辑控制输入值 IN_x 为 0 时 S_xA 关闭, S_xB 打开, 此时 DAC 输出电压值为 PD 档位; 当逻辑控制输入值 IN_x 为 1 时 S_xA 打开, S_xB 关闭, 此时 DAC 输出电压值为 APD 档位。工程实际中, 考虑到多个恒流源通道的设计, 使用该模拟开关会极大降低成本, 且其数据

采集精度高、稳定性好。当对 16 个独立通道下的 PD/APD 产品进行可靠性测试时，在通过 DAC 设置输出电压给到运算放大器的时候，只需要使用 4 个 ADG1634 模拟开关即可，大幅升了传输效率且降低了实际成本。

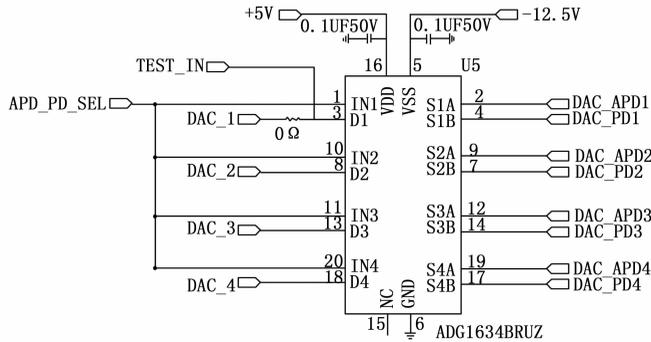


图 3 多路模拟开关电路设计

2.3 恒流源模块电路设计

图 4 展示了恒定驱动电源系统的核心部分—电压—电流转换电路。该电路用于将输入电压转换为输出电流，并确保输出电流在负载变化时保持不变，从而实现恒定的电流源输出。考虑到该电路应用于高灵敏度的激光器二极管测试中，为提高整个电流源的准确性和稳定性，引入了基于运算放大器的硬件 PI 调节器，以实现快速且稳定地调节输出电流的功能。

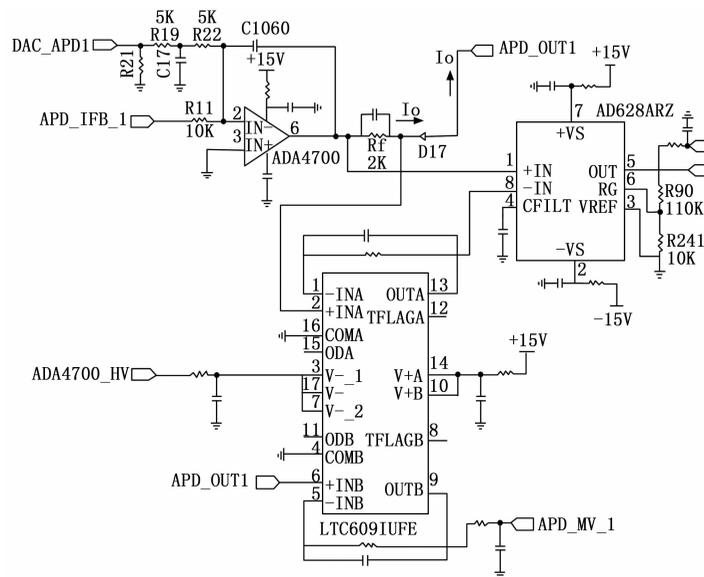


图 4 恒流源模块电路设计

结合工程实际应用，选用高精密运算放大器 ADA4700 和 R_{11} 、 C_{1060} 组成 PI 调节器，DAC _ APD1 为输入电压 U_i ， R_{21} 和 C_{17} 组成 RC 滤波器，滤除噪声后的 DAC 输入电压值连接到运放的反相输入端。该运算放大器的输出端接一个阻值为 2 kΩ 的采样电阻 R_f ，APD _ OUT1 即为提供给负载的输出电流，采样电阻 R_f 的左端接入差分放大器 AD628 的

同相输入端，右端接入一个带 RC 滤波电路的电压跟随器，该电压跟随器的输出端接到差分放大器的反相输入端。AD628 对采样电阻两端电压进行采样；经过增益后的输出反馈电压 APD _ IFB _ 1 送到运算放大器 ADA4700 的输入端与输入电压 DAC _ APD1 进行比较，构成串联电压负反馈电路，从而实现恒流源的设计。实际应用开发中，还需要监控该驱动电源在正常工作时候是否有正确的回读电压和回读电流，因此在该驱动电源设计中，还在实际负载输出之后接了一个电压跟随器，通过串联分压的形式读取回读电压/采样电压 APD _ MV _ 1，同理，回读电流/采样电流 APD _ MI _ 1 接在反馈电压之后。

下面通过计算来说明 V/I 转换电路的工作原理：

设流经采样电阻 R_f 两端的输出电流为 I_o ，则采样电阻两端电压 U_f 为：

$$U_f = I_o * R_f \quad (2)$$

设采样电阻两端采样电压 U_f 经过精密差分放大器 AD628 增益之后得到的反馈电压 APD _ IFB _ 1 为 V_{fb} ，则有：

$$V_{fb} = U_f * G \quad (3)$$

该精密差分放大器的增益方程为：

$$G = 0.1 * (1 + R_{90}/R_{241}) = 1.2 \quad (4)$$

将式 (2) ~ (4) 整理，得到反馈电压 V_{fb} 为：

$$V_{fb} = U_f * G = I_o * R_f * 1.2 \quad (5)$$

根据运算放大器“虚短”“虚断”的原理，流过 R_{19} 、 R_{22} 、 R_{11} 的电流是相同的，即得：

$$\frac{U_i - 0}{R_{19} + R_{22}} = \frac{0 - V_{fb}}{R_{11}} \quad (6)$$

电路中，设置 R_{19} 和 R_{22} 为 5 kΩ， R_{11} 为 10 kΩ，将式 (5) 代入式 (6)，整理得到输出电流 I_o 为：

$$I_o = \frac{-U_i}{R_f * 1.2} \quad (7)$$

由式 (7) 可知，当 R_f 的阻值固定时，输出电流 I_o 与输入电压 U_i 成一定线性关系，而与负载激光器 R_L 变化无关。因此当负载激光器在合适的工作范围内，输出电流为一恒定值。

2.4 负载输出模块电路设计

图 5 为负载输出模块，采用信号继电器 G6K-2F-Y 实现 PD 和 APD 之间的信号切换。该继电器具有两个接触极，可以同时切换通道 1 和通道 2 的 PD 输出或 APD 输出。当继电器线圈通电时，衔铁吸合，使常闭触点分离，常开触点闭合，连接到 APD 的输出电流档位；断电时，继电器复位，常闭触点再次接触，连接到 PD 的输出电流档位，从而有效实现 PD 和 APD 两个不同输出信号的切换。

考虑到运算放大器温度升高、电压突变等因素可能对 PD/APD 输出的电信号产生不确定影响，以及 PD/APD 作为高灵敏度的半导体激光器，微弱的电压电流变化都可能

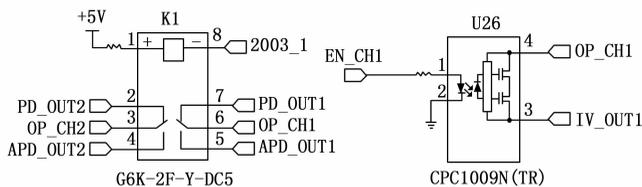


图 5 负载输出模块电路设计

引起损坏, 所以并不能直接将该输出电压/电流传递给 PD/APD。为解决这个问题, 结合实际工程应用, 引入了光电耦合器 CPC1009N。该光电耦合器的作用是在输入端受到强电压冲击时, 通过光耦隔离机制, 保护产品 PD/APD 一侧的输出电压/电流免受影响, 有效实现冲击防护。

2.5 AD 模块电路设计

为了实现多通道设计, 使用 ADG1606 模拟多路复用器对恒流源系统内的回读电压采样, 如图 6 所示。该器件内置了 16 个单通道输入, 根据 4 位二进制地址线 (A0、A1、A2 和 A3) 确定的地址, 将其中一路切换到公共输出。该设计中, 源极 S1~S16 为输入端, 即 APD 通道 1~16 的采样电压; 漏极 D 为输出端。通过单片机内部的逻辑控制输入 A3-A0 的设置, 开关可以接到相应的源极, 例如当 A3-A0 位为“0000”时, 开关连接到源极 S1, 从而对通道 1 的 APD 产品进行电压采样; 反之, 当 A3-A0 位为“1111”时, 开关连接到源极 S16, 对通道 16 的 APD 产品进行电压采样, 如此类推。

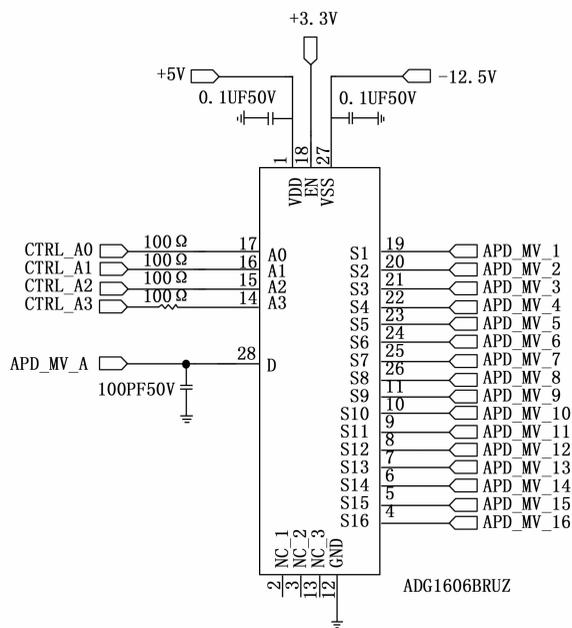


图 6 模拟多路复用器电路设计

ADC 芯片为 AD7606, 它采用高速、低功耗、电荷再分配逐次逼近型模数转换器的数据采集系统, 可以对 8 个模拟输入通道进行同步采样, 且模拟输入信号可以接受真双极性输入信号, 如图 7 所示。

本恒定驱动电源设计采用 5 V 单电源供电, 并通过将 RANGE 引脚连接到逻辑低电平来设置模拟电压输入范围为 ±5 V。逻辑电源输入与单片机内部电源电压相同, 为 +3.3 V, 基准电压输入为 +2.5 V。每个采样保持放大器在 CONVSTx 上升沿时对其各自输入进行同步采样。通过设计, 保证了一个器件的所有 8 个采样保持放大器以及不同器件的采样保持放大器的孔径时间严格匹配。因此, 可以实现多片 AD7606 在一个系统中的同步采样。

本设计通过串行接口从 AD7606 回读数据, 将 PAR/SER/BYTE_SEL 引脚连接高电平, CS 和 SCLK 信号用来传输数据。转换期间, 通道 V1~V4 的转换结果出现在 DOUTA 上, 通道 V5~V8 出现在 DOUTB 上。CS 下降沿使数据输出线路 DOUTA 和 DOUTB 脱离三态, 并逐个输出转换结果的最高有效位 (MSB)。而 SCLK 上升沿将随后的所有数据位逐个送至串行数据输出 DOUTA 和 DOUTB。

3 系统软件设计

3.1 整体软件结构设计

软件系统在整个电路系统中起着核心作用。基于现有的硬件电路, 需要设计一个合理的软件系统, 以按照所需的流程和逻辑来操作电路结构。

本研究采用多核控制的多线程操作, 通过显控平台、多核控制模块、恒定电源输出模块和回读测量模块之间的互联和协调来构建软件系统, 如图 8 所示。显控平台实现人机交互、电路模块状态检测与数据显示、命令下发和配置资源下发等功能。多核控制模块作为控制核心, 负责数据处理、电路控制和数据交互等关键过程。电源输出模块和回读测量模块是软件系统的控制对象, 主要完成自身配置和工作状态及数据上传。各模块之间的软件协作保证了整个系统运行的有序性和良好性能。

3.2 反馈误差算法设计

3.2.1 PID 控制器设计

本系统中 ADC 模块是整个系统的反馈元件, 高精度多通道恒定驱动电源电路为被控对象。STM32 单片机为比较元件, 且是整个自适应 PID 控制系统的核心, 它将 AD7606 采样得到的值转换为电流与用户设定值进行比较得到一个差值 $e(t)$, 也就是误差信号。然后将误差信号进行 PID 运算, 得到的输出量传递给 DA 模块修正输出电压并驱动恒流源电路, 直至达到用户设定的恒流源值。其控制信号如下:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (8)$$

其中: K_p 是比例常数, K_i 是积分常数, K_d 是微分常数。

为了将 PID 控制器应用到计算机上, 需要将上式的连续时间方程转换为离散形式^[17]。为此, 使用有限差分对积分和导数进行近似。其位置形式如下:

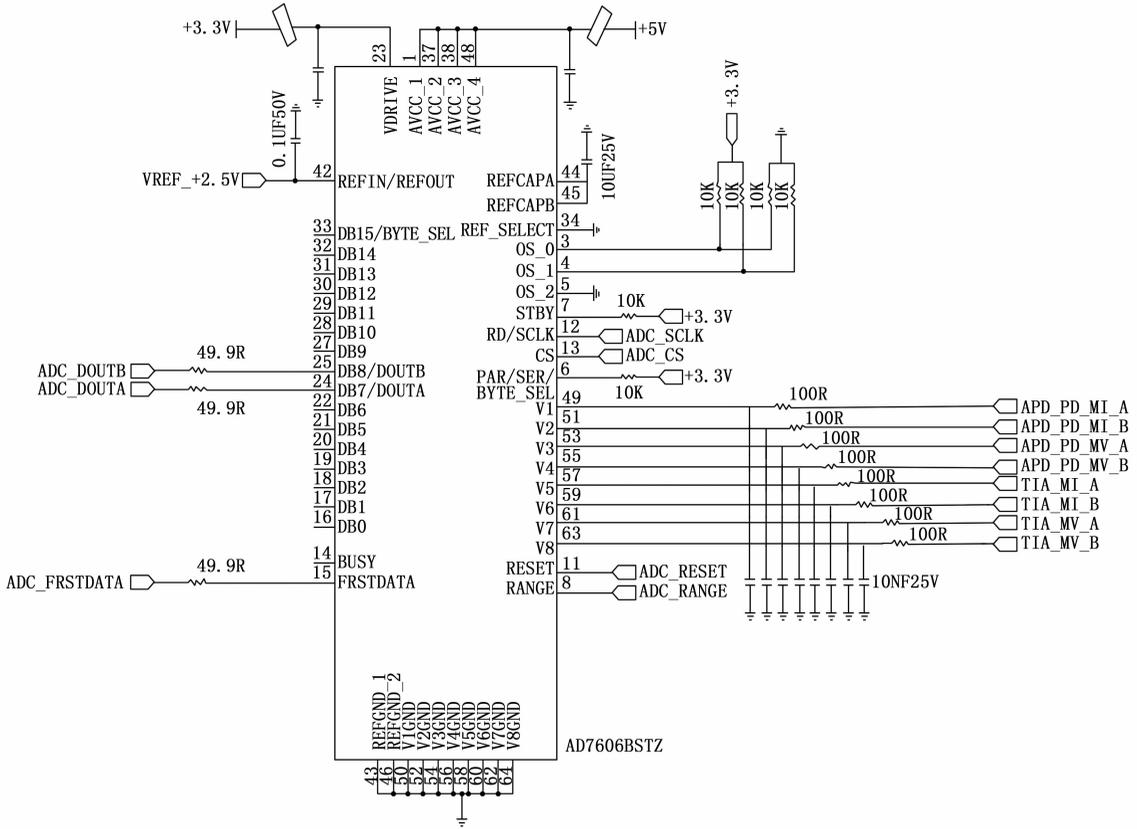


图 7 ADC 电路设计

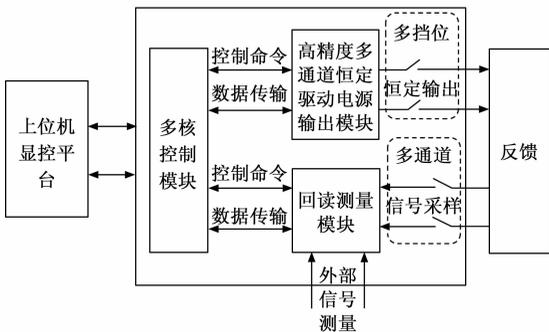


图 8 整体软件结构设计

$$u_n = K_p e_n + K_i \sum_{k=1}^n e_k + K_d \frac{e_n - e_{n-1}}{T} \quad (9)$$

对于该位置形式的前一个时间步骤，可以写出：

$$u_{n-1} = K_p e_{n-1} + K_i \sum_{k=1}^{n-1} e_k + K_d \frac{e_{n-1} - e_{n-2}}{T} \quad (10)$$

为了提高该激光器恒流源控制系统的稳定性和响应速度，将式 (12) 和式 (13) 两个位置形式的 PID 控制器相减，得到其速度形式的 PID 控制器。使用该速度形式的 PID 控制器可以提高系统的相位裕度^[18]，其形式如下：

$$u_n = u_{n-1} + K_p [e_n - e_{n-1}] + K_i e_n + K_d \frac{e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}}{T} \quad (11)$$

最后，将该速度形式的 PID 控制器应用到激光器恒流源控制系统上，得到其控制信号对应公式为：

$$u_t = u_{t-1} + K_i e(t) - K_p \Delta y(t) - K_d \Delta y^2(t) \quad (12)$$

其中： $e(t) = y(t) - y(t-1)$ ， $\Delta y(t) = y_d(t) - y(t)$ ， $\Delta y(t)^2 = y(t) - 2y(t-1) + y(t-2)$ ， $y(t)$ 为统的实际输出， $y_d(t)$ 为期望输出。

得到的误差信号定义如下：

$$E(t) = [e(t), -\Delta y(t), -\Delta y^2(t)]^T \quad (13)$$

因此，将该恒流源系统对应的公式重写为：

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) = K(t)E(t) \quad (14)$$

其中： $K(t) = [K_i(t), K_p(t), K_d(t)]$ 是该控制参数的一个向量并作为自适应控制器的输出。

3.2.2 基于强化学习的 RBF-PID 控制器设计

上述 PID 控制器的 3 个参数需要依靠经验调整，且不能适用于对输出电流精度要求较高的激光器恒流源驱动系统。因此，使用 RBF 神经网络的非线性逼近能力和 PID 控制的稳定性能够实现对系统的高精度控制，而 RBF-PID 算法需要获取和处理大量训练数据，不易实现。因此，引入强化学习 Actor-Critic 框架优化 RBF 自适应 PID 控制器，如图 9 所示。

Critic 学习价值函数 $V(t)$ ，用于评估当前状态下 RBF-PID 参数所带来的长期回报。Actor 则利用 Critic 学习到的

价值函数来更新策略, 选择最优的 PID 参数^[19]。控制过程中, 智能体不断与环境交互, 观察当前状态和奖励信号, 从而优化自适应 PID 控制器。

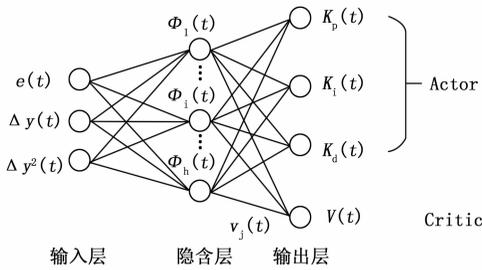


图 9 基于 Actor-Critic 的 RBF-PID 控制结构图

采用基于 Actor-Critic 的 RBF-PID 算法步骤如下:

1) 定义价值函数为:

$$V(t) = \sum_{i=t}^{\infty} \gamma^{i-t} r[x(i), u(i)] \quad (15)$$

其中: γ 是折现因子, $u(t)$ 是控制信号, 函数 $r[x(i), u(i)]$ 被称为强化信号^[20]。

为了避免未来时间段价值函数评估中的无限求和, 可以利用控制信号得到价值函数的贝尔曼方程为:

$$V(t) = r[x(t), u(t)] + \gamma V(t+1) \quad (16)$$

根据得到的贝尔曼方程, 基于使用奖励和价值函数两端的差异, 计算时间差分误差 (TD error), 具体计算方法如下:

$$\delta_{TD}(t) = r[x(t), u(t)] + \gamma V(t+1) - V(t) \quad (17)$$

2) 在本设计中, 输入层包括可用的过程测量和系统状态, 输出层由 Actor-Critic 共同组成, 控制信号和价值函数由隐含层中的单元相关函数值的加权和得到。隐含层中 $\varphi_j(t)$ 是包含元素 $[\varphi_1(t), \dots, \varphi_h(t)]$ 的向量, 其中 h 是隐含层单元的数量。该 RBF 网络隐含层的核函数使用的是高斯函数, 因此, $\varphi_j(t)$ 表示如下:

$$\Phi_j(t) = e^{-\frac{\|\theta(t) - \mu_j(t)\|^2}{2\sigma_j(t)}}, j = 1, 2, 3, \dots, h \quad (18)$$

其中: μ_j 和 σ_j 分别是隐含层单元的中心值和宽度值。

3) 定义强化信号如下:

$$r[x(t), u(t)] = \frac{1}{2} [y_d(t+1) - y(t+1)]^2 \quad (19)$$

根据此公式计算 TD 误差为:

$$\delta_{TD}(t) = \frac{1}{2} [y_d(t+1) - y(t+1)]^2 + \gamma V(t+1) - V(t) \quad (20)$$

4) 定义该控制器的性能函数:

$$J(t) = \frac{1}{2} \delta_{TD}^2(t) \quad (21)$$

根据该性能函数计算 RBF 神经网络的参数, 并通过 TD 误差分别更新 Actor 和 Critic 的权重值, 具体计算如下:

$$\omega_j^p(t+1) = \omega_j^p(t) - \alpha_\omega \frac{\partial J(t)}{\partial \omega_j^p(t)} \quad (22)$$

$$\nu_j(t+1) = \nu_j(t) + \alpha_\nu \delta_{TD}(t) \Phi_j(t) \quad (23)$$

其中: $\alpha_\omega, \alpha_\nu$ 为指定的学习因子。

5) 计算隐含层单元的中心值和宽度值:

$$\mu_{ij}(t+1) = \mu_{ij}(t) + \alpha_\mu \delta_{TD}(t) \nu_j(t) \Phi_j(t) \frac{\psi_i(t) - \mu_{ij}(t)}{\sigma_j(t)} \quad (24)$$

$$\sigma_j(t+1) = \sigma_j(t) + \alpha_\sigma \delta_{TD}(t) \nu_j(t) \Phi_j(t) \frac{\|\psi_i(t) - \sigma_j(t)\|^2}{\sigma_j(t)} \quad (25)$$

6) 最后, 计算输出层 Actor 值和 Critic 值:

Actor:

$$K_{p,i,d}(t) = \sum_{j=1}^h \omega_j^{p,i,d}(t) \Phi_j(t) \quad (26)$$

其中: ω_j 为第 j 个隐含层单元与 Actor 输出层单元的权重值。

Critic:

$$V(t) = \sum_{j=1}^h \nu_j(t) \Phi_j(t) \quad (27)$$

其中: ν_j 为第 j 个隐含层单元与 Critic 输出层单元的权重值。

4 实验结果与分析

4.1 输出电流与输入电压线性度关系测试

考虑到激光器价格昂贵且易损坏, 测试时用光电二极管代替, 同样也可以得到良好的测试效果。试验用直流电源, 拨到 5 V 挡, 首先用万用表测量多路模拟开关 ADG1634 引脚 2 的电压值, 即输入电压 U_i 值; 接着测量 2 k Ω 采样电阻两端电压值, 通过欧姆定律得到该恒流源电路输出电流 I_o 值。最终可以得到的输出电流与输入电压的线性度关系测试图如图 10 所示。

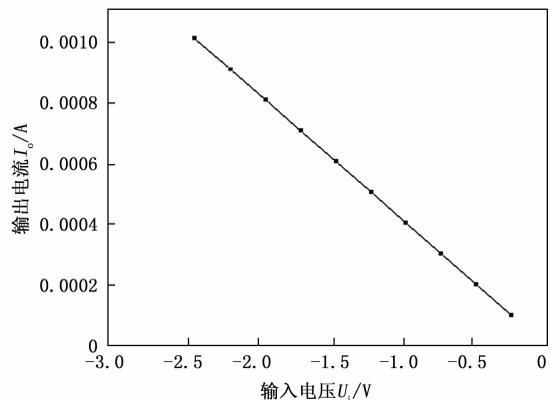


图 10 输出电流与输入电压线性关系图

从图 10 中可以看出输出电流与输入电压线性关系较明显, 与式 (7) 的比例关系相比, 误差达到 0.002%, 满足恒流源电路的设计要求。

4.2 恒流源输出稳定度测试

恒流源输出稳定度是该激光器恒定驱动电源的输出电

流值在一段时间内维持稳定的重要指标，表现出整个仪器的可靠性和稳定性。恒流源输出稳定度的计算公式如式(28)所示：

$$S_I = (I_{\max} - I_{\min}) \times 100\% \quad (28)$$

其中： S_I 代表电流输出稳定度， I_{\max} 和 I_{\min} 分别表示电源电流在 3 分钟内的最大值和平均值，按照正确的方式搭建好硬件测试环境，设定恒流源输出电流值为 1 mA，采样间隔为 5 s，测量激光器 APD 在通道 1 内每隔一段时间的电流量，得到测试结果如图 11 所示。

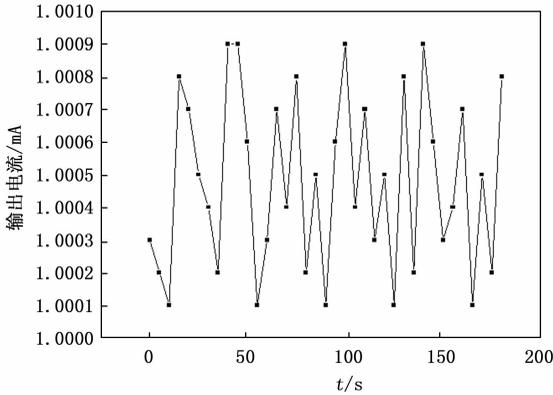


图 11 电流稳定度测试

由图 11 可知，当输出电流为 1 mA 时，可得到输出电流最大值与设定值偏差为 0.000 9 mA，平均值为 1.000 4 mA，利用式(28)计算得到恒流源输出电流稳定度为 0.05%，满足对激光器可靠性测试的恒流源设计要求。

4.3 恒流源输出精度测试

恒流源的输出精度指的是测试的实际输出数据与设定值的偏离程度，它反映的是系统的误差。此次测试中，恒流源输出电流精确度的计算如下：

$$\gamma_I = \frac{|I_{\text{set}} - I_{\text{act}}|}{I_{\text{set}}} \quad (29)$$

其中： γ_I 为恒流源输出电流值的精确度， I_{set} 和 I_{act} 分别代表输出电流大小的设定值和实际输出电流值。精确度的硬件测试环境和测量步骤与稳定度测试类似，其测试结果如表 1 所示。

表 1 输出电流精确度测试表

量程/ μA	$I_{\text{set}}/\mu\text{A}$	$I_{\text{act}}/\mu\text{A}$	精确度/%	纹波/ μA
1	0.5	0.500 365	0.073	0.7
	1	1.000 86	0.086	0.8
10	5	5.003 8	0.076	0.7
	10	10.009 2	0.092	0.6
100	50	50.032 5	0.065	0.6
	100	100.063	0.063	0.5
1 000	500	500.285	0.057	0.5
	1 000	1 000.55	0.055	0.4

由表 1 的测试结果可以看出，输出电流的精确度均小

于 0.1%，纹波均小于 1 μA ，符合激光器恒定驱动电源的设计要求。

4.4 恒流源驱动不同负载测试

为验证该恒定驱动电源在驱动不同负载激光器 (APD 和 PD) 情况下可靠性测试的效果，设定测试时间 60 s，采样间隔为 2 s，分别测试 APD 和 PD 两种不同激光器的工作电流稳定度和精确度，测试结果如图 12 所示。

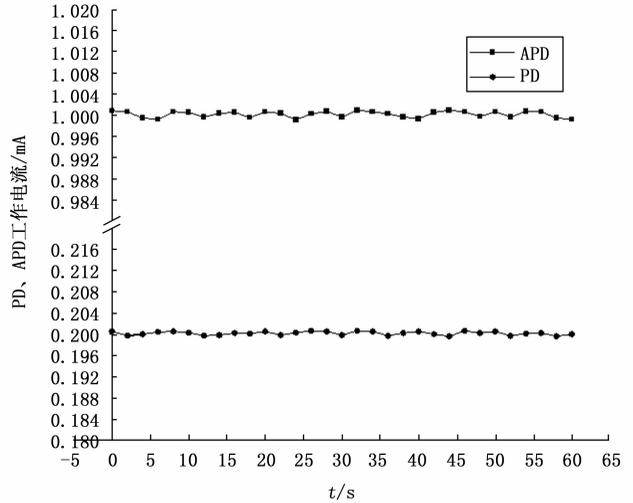


图 12 驱动不同负载电流测试

由图 12 可知，该激光器恒定驱动电源的输出电流驱动 APD 和 PD 两种激光器均能稳定输出且精度较高，使两种激光器输出功率稳定，实现了光源的稳定输出。

4.5 恒流源多通道输出电流测试

实际工业应用对激光器进行可靠性测试时，为提升效率并节约成本往往需要对多个通道同时测试，为验证本文所设计的高精度多通道激光器恒定驱动电源在同一时刻多个通道输出电流的稳定度及精确度，选取激光器 APD 并设定输出电流为 1 mA，并在同一时刻对 CH1、4、8、12、16 共 5 个通道进行输出电流测试，测试结果如表 2 所示。

表 2 多通道输出电流精确度测试表

测量通道	I_{set}/mA	I_{act}/mA	精确度/%
CH1	1.000 0	1.000 8	0.08
CH4	1.000 0	1.000 6	0.06
CH8	1.000 0	0.999 2	0.08
CH12	1.000 0	0.999 5	0.05
CH16	1.000 0	1.000 7	0.07

由表 2 的测试结果可以看出，该多通道下的输出电流精确度仍小于 0.1% 且互不影响，满足激光器恒定驱动电源的设计要求，可以对多个通道下的激光器同时进行可靠性测试。

5 结束语

针对多通道下不同型号激光器可靠性测试时工作电流

的特定需求, 设计了一种基于 STM32 的高精度多通道激光器恒定驱动电源, 该电源选用多路模拟开关和多路复用器实现多通道下 PD 和 APD 的切换, 通过设置 DAC 不同工作点电压驱动多通道不同型号激光器进行可靠性测试。恒流源电路的设计上, 采用 OPA 和 MOSFET 组成 V/I 转换电路以实现恒定电流输出。最后通过实验测试, 表明该电源的输出电流精度 $< 0.1\%$, 稳定性为 0.05% , 两种激光器的输出功率稳定, 同一激光器多通道下的电流输出精度仍满足设计要求。在后续工作中, 还会加入程控直流电压源的模块组合成直流电流电压源系统以及多通道温度控制电路。

参考文献:

- [1] LEMMETTI J, SORRI N, KALLIONIEMI I, et al. Long-range all-solid-state flash LiDAR sensor for autonomous driving [C] // High-Power Diode Laser Technology XIX. SPIE, 2021, 11668: 99-105.
- [2] NANVER L, KNEZEVIC T. Optical detectors [J]. Advances in Semiconductor Technologies: Selected Topics Beyond Conventional CMOS, 2022: 211-229.
- [3] 孔市委, 任乾钰, 王 军, 等. 基于 FPGA 的可调谐激光器控制电路设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 120-125.
- [4] 戴冬冰, 冯冬梅, 张 军, 等. 高精度大功率恒流源在微小电阻测试中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2022, 41 (5): 173-178.
- [5] GEMBUKH P I, TRIGUB M V. The semiconductor power supply for copper bromide laser excitation [C] // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials. IEEE, 2022: 348-351.
- [6] 许 源, 王 武, 倪小龙, 等. 一种 GaN FET 的窄脉冲激光器驱动电源系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 272-279.
- [7] 杨江涛, 王健安, 王 银, 等. 新型高性能半导体激光器电源的设计与研究 [J]. 电子器件, 2021, 44 (4): 817-823.
- [8] ZHAO Y, TIAN Z, FENG X, et al. High-precision semiconductor laser current drive and temperature control system design [J]. Sensors, 2022, 22 (24): 9989.
- [9] TEODORESCU L, BREZEANU G. High efficiency low noise linear power supply for high power measurement systems [C] // 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). IEEE, 2014: 1-5.
- [10] VOGEL D, BECKER T. Case study: power supply units: fine-tunable switching power supplies as laser drivers [J]. Photonics Views, 2023, 20 (1): 70-72.
- [11] 梅剑春, 叶 青, 田建国. 多路半导体激光器驱动电路设计 [J]. 激光技术, 2018, 42 (2): 245-248.
- [12] 杨仕轩, 赵柏秦, 王立晶, 等. 采用 GaN HEMT 的可调窄脉冲激光器驱动电路 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (10): 136-143.
- [13] KOKKONDA R K, BHATTACHARYA S, VELIADIS V, et al. A SIC based two-stage pulsed power converter system for laser diode driving applications [C] // 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2022: 1-8.
- [14] 刘丽飞, 吕卫星, 武 超, 等. 基于 TEC 和 PID 的恒温控制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (2): 137-144.
- [15] 赵 恒. 基于 ARM 的高功率半导体激光器电源的设计 [J]. 电子世界, 2017 (2): 63-64.
- [16] HUANG H, NI J, WANG H, et al. A novel power stability drive system of semiconductor laser diode for high-precision measurement [J]. Measurement and Control, 2019, 52 (5/6): 462-472.
- [17] MISHRA D P, RAUT U, GAUR A P, et al. Particle swarm optimization and genetic algorithms for PID controller tuning [C] // Proceedings of the 2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), IEEE, 2023.
- [18] JABEUR C B, SEDDIK H. Optimized neural networks-PID controller with wind rejection strategy for a Quad-Rotor [J]. Journal of Robotics and Control (JRC), 2022, 3 (1): 62-72.
- [19] SHALABY R, HOSSAINY M, ZALAM B, et al. Optimal fractional-order PID controller based on fractional-order actor-critic algorithm [J]. Neural Computing and Applications, 2023, 35 (3): 2347-2380.
- [20] 段友祥, 任 辉, 孙歧峰, 等. 基于异步优势执行器评价器的自适应 PID 控制 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 70-73.
- [12] 燕雪峰. 面向任务的体系效能评估 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [13] 赵曰强, 安 实, 麦 强. 基于 ADC 法的防空导弹武器系统效能建模 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (9): 2003-2012.
- [14] 孟庆德, 张 俊, 魏军辉, 等. 基于 ADC 法的舰炮武器系统作战效能评估 [J]. 火炮发射与控制学报, 2015, 36 (1): 73-76.
- [15] 徐 鑫, 张恒喜, 李寿安. 基于 ADC 模型的地地导弹武器系统作战效能评估 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25 (2): 201-203.
- [16] 李春臻, 刘婵媛, 高文霞, 等. 基于 ADC 方法的炮射导弹系统效能评估 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (4): 142-148.
- [17] 吕久明, 刘国良, 王洪仑. 靶场导弹武器系统体系作战试验 [J]. 国防科技, 2016, (1): 107-113.
- [18] 张 亮, 赵振南, 王 利. 基于体系作战效能的武器装备体系评估 [J]. 四川兵工学报, 2013 (3): 50-58.
- [19] 刘 鹏, 赵丹玲, 谭跃进, 等. 面向多任务的武器装备体系贡献度评估方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41 (8): 1763-1769.
- [20] 李小波, 林 木, 束 哲. 体系贡献率能效综合评估方法 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30 (12): 4520-4535.

(上接第 318 页)