

引用本文:刘晨,唐壹明,吴海勇,等.基于滑模控制的半导体激光器温度控制系统[J].光通信技术,2025,49(4):14-18.

基于滑模控制的半导体激光器温度控制系统

刘晨¹,唐壹明¹,吴海勇²,王如刚¹,陈勐勐^{2,3*},徐飞³

(1.盐城工学院 信息工程学院,江苏 盐城 224000;2.南京晓庄学院 电子工程学院,南京 211171;

3.南京大学 现代工程与应用科学学院,南京 210032)

摘要:为了解决分布反馈(DFB)半导体激光器因温控电路不稳定而导致输出波长漂移的问题,设计了一种基于滑模控制的半导体激光器温度控制系统。该系统采用曲线拟合求出DFB半导体激光器内部热电冷却器的传递函数,并在Simulink中加入白噪声搭建温度仿真模型,比较比例-积分-微分(PID)控制、增量PID控制、滑模控制的可行性,最终在实验电路中对不同算法下温度控制的波形。实验结果表明:通过优化设计滑模控制系统,能有效提高激光器系统的响应速度和稳态精度,经过长时间测试,连续120 min内的温度误差小于等于0.16%。

关键词:分布反馈半导体激光器;热电冷却器;滑模控制;温度控制系统

中图分类号:TN929.1;O436 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0014-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Temperature control system for semiconductor lasers based on sliding mode control

LIU Chen¹, TANG Yiming¹, WU Haiyong², WANG Rugang¹, CHEN Mengmeng^{2,3*}, XU Fei³

(1. School of Information Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224000, China; 2. School of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211000, China; 3. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210032, China)

Abstract: To address the issue of output wavelength drift in distributed feedback (DFB) semiconductor lasers caused by unstable temperature control circuits, a temperature control system for semiconductor lasers based on sliding mode control is designed. The system employs curve fitting to derive the transfer function of the thermoelectric cooler (TEC) inside the DFB semiconductor laser. A temperature simulation model was constructed in Simulink by incorporating white noise, and the feasibility of proportional-integral-derivative (PID) control, incremental PID control, and sliding mode control is compared. Finally, the temperature control waveforms under different algorithms are compared in the experimental circuit. The experimental results show that by optimizing the design of the sliding mode control system, the response speed and steady-state accuracy of the laser system can be effectively improved. After prolonged testing, the temperature error within a continuous 120-minute period is less than or equal to 0.16%.

Key words: distributed feedback semiconductor laser, thermoelectric cooler, sliding mode control, temperature control system

0 引言

随着现代通信技术的迅猛发展,分布反馈(DFB)

收稿日期:2024-11-04。

基金项目:国家自然科学基金项目(61925502,62105157)资助;江苏省自然科学基金项目(BK20211014)资助;江苏省博士后基金项目(2021K228B)资助。

作者简介:刘晨(1996—),男,硕士研究生,主要从事激光器驱动电路设计研究,研究方向包括:驱动电路性能优化与稳定性提升、高集成度激光驱动系统设计、拓扑结构创新及控制策略优化。曾参与国家级/省部级科研项目,在激光器驱动电路设计领域具备扎实的理论与实践经验。

***通信作者:**陈勐勐(1985—),女,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感技术。



半导体激光器温度控制系统(下文简称激光器温控系统)凭借其高效、紧凑、可靠等优势,在光通信、光纤传感、工业应用及消费电子等领域得到了广泛应用^[1]。然而,激光器的中心波长对温度变化极为敏感,微小的温度波动(如0.1℃)即可导致波长显著偏移(0.2~0.5 nm)^[2],严重影响其工作稳定性。因此,高精度的温度控制技术成为保障激光器性能的关键。

目前,针对激光器的温度控制主要采用传统比例-积分-微分(PID)控制^[3]及其改进算法,如模糊PID^[4]、位置PID^[5]和增量PID^[6]等。然而,这些方法均存在一定的局限性:传统PID响应速度慢、调节精度不足且易出现超调;模糊PID设计复杂且实时性较差;位置PID存

在灵敏度低和积分饱和问题;增量 PID 则难以消除静态误差且实现复杂度较高。尽管这些方法在一定程度上能够满足需求,但在高精度、强抗扰动的应用场景中仍表现不足。

近年来,滑模控制理论因其响应速度快、鲁棒性强等优势^[7-9],在控制领域受到广泛关注。基于此,本文针对激光器温控系统难以维持长期稳定的问题,提出一种基于滑模控制的半导体激光器温控系统。

1 基于滑模控制的激光器温控系统

1.1 温度控制系统工作原理及系统数学模型

DFB 半导体激光器(下文简称 DFB 激光器)的温度控制系统框图如图 1 所示,主要包括以下几部分:微控制器单元(MCU)、DFB 激光器、模/数转换器(ADC)温度采样模块、DRV592 驱动芯片和显示器。由于 MCU 的输入/输出(I/O)口带载能力有限,直接由 MCU 产生的脉冲宽度调制信号(PWM)不足以驱动激光器进行有效的温度调节,因此需要通过 MCU 的 I/O 口控制 DRV592 驱动芯片来实现对激光器温度的稳定控制。为了节约成本,系统采用了 MCU 内部集成的 ADC 作为温度采集模块,而屏幕显示器主要用于提供人机交互界面。在工作过程中,MCU 首先读取设定的激光器目标温度值,并通过内置的 ADC 实时采集当前温度,形成一个负反馈回路。基于采集到的温度数据与设定的目标温度比较结果,MCU 通过特定算法调整输出的 PWM 信号宽度,从而精确控制 DRV592 驱动芯片的工作状态,使得激光器的温度保持在设定范围内,确保其工作的稳定性。

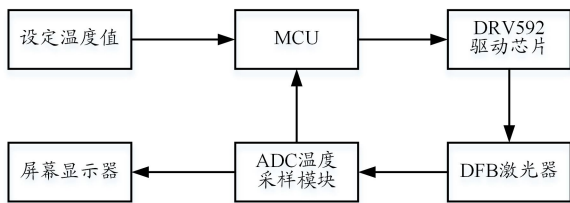


图 1 DFB 半导体激光器温控系统框图

基于实验方法建立 DFB 激光器的温控数学模型^[11],可明确表征系统特性及其输入、输出关系^[12]。该激光器采用佩尔帖效应原理^[13],通过散热片实现快速降温,热端则用于升温制热。集成在激光器内部的热电制冷器和热敏电阻具有热惯性与时滞特性,根据热力学定律可得

$$K_1 \frac{\partial(T_1 - T_0)}{\partial t} + Pa(T_1 - T_0) = \partial Q / \partial t \quad (1)$$

其中, T_0 、 T_1 分别为初始温度与加热温度, t 为时间, P 为传热系数, K_1 为热电冷却器制热系数, a 为传热面积。考虑系统动态特性,引入频域中的滞后环节 $e^{-\tau s}$ 、惯性环节 $\frac{1}{1+TS}$,得到其传递函数为

$$W(S) = \frac{K}{1+TS} e^{-\tau s} \quad (2)$$

其中, S 为拉普拉斯变换复变量, τ 为滞后时间, K 为放大系数($K=1/Pa$), T 为时间变量($T=K_1/Pa$)。

联立式(1)~式(2)可得温控系统数学模型为

$$G(S) = W(S) W_0(S) = \frac{K}{T\tau S^2 + (T+\tau)S + 1} \quad (3)$$

本文采用 ILX Lightwave 商用驱动电路,设置可变电阻(5~8 kΩ),通过监测热电冷却器引脚电压变化获取温度参数,基于 Origin 软件进行多项式拟合,结合 Simulink 参数优化获得拟合曲线图 2 所示,并由此确定传递函数如式(4)所示。其中, $Y(S)$ 、 $R(S)$ 分别为输出信号、输入信号的拉普拉斯变换。

$$\frac{Y(S)}{R(S)} = \frac{0.2978}{6.018S^2 + 3.699S + 0.3483} \quad (4)$$

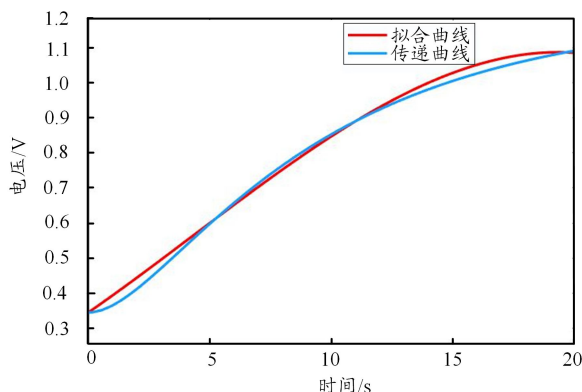


图 2 热电冷却器引脚电压变化拟合曲线

1.2 滑模控制

滑模控制器通过引导系统沿预设的切换超平面向原点运动,实现对系统的鲁棒控制。其鲁棒性源于基于系统动态特性设计的切换超平面,且不依赖系统参数。假设给定系统状态空间方程为

$$\dot{x} = S(x) \quad (5)$$

其中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为状态变量^[14], $\dot{x}$ 为 x 的一阶导数。滑模面 $S(x)=0$ 位于状态空间中,如图 3 所示。切换面上的运动点可分为 3 类:通常点(A)、起始点(B)和终止点(C)。

A 点和 B 点对应系统发散状态(不稳定),仅 C 点对应收敛状态(稳定)。当系统轨迹趋近于 C 点时,将

刘晨,唐壹明,吴海勇,等:基于滑模控制的半导体激光器温度控制系统

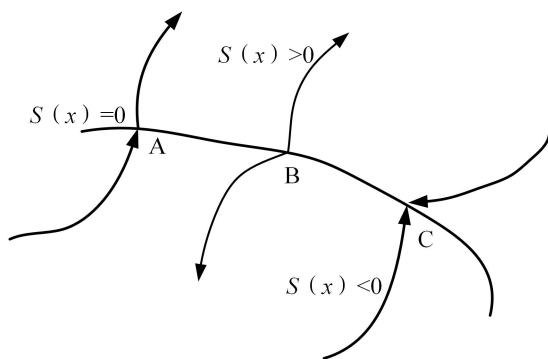


图3 切换面上3种点

被吸引至该区域并维持运动,满足式(6)的系统运动称为滑模运动^[15]。

$$\lim_{s \rightarrow 0} s\dot{s} \leq 0 \quad (6)$$

设滑模面为 s , 则有式(7)成立

$$s = cx_1 + x_2 \quad (7)$$

其中, x_1 为误差, x_2 为误差导数, c 为待定比例系数。滑模控制律设计为

$$\dot{s} = -M_s \text{sign}(s) - qs \quad (8)$$

其中, M_s 为正的控制增益, $\text{sign}(s)$ 为符号函数, q 为滑模面斜率。

对式(4)进行拉普拉斯反变换, 得到系统动态方程为

$$6.018\ddot{y} + 3.699\dot{y} + 0.3483y = 0.2978 \quad (9)$$

其中, y 为系统的输出量, $\dot{y}$ 、 $\ddot{y}$ 分别为 y 的一阶导数、二阶导数。

结合式(4)、式(7)、式(9), 推导系统状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

其中, $a=0.0579$, $b=0.6147$, 控制输入 $u=0.579y^*-0.0495r$, y^* 为期望温度值, r 为滑模函数输出。

综合式(6)~式(10), 得到滑模控制的状态方程 r 为

$$r = M_s \text{sign}(s) + qs + cx_2 + 0.6147\dot{y} + 0.0579 \quad (11)$$

本文基于式(11), 在 Matlab/Simulink 中搭建了半导体激光器温控系统仿真模型, 并引入噪声模拟环境电磁干扰。

2 温度控制系统仿真结果

为了使仿真结果更贴近实际环境, 本文在 Matlab/Simulink 仿真中引入噪声以干扰系统, 模拟现实生活中的电磁干扰。在确保仿真系统稳定之后加入干扰信号, 以此判断系统的稳定性。干扰仿真图如图4所示,

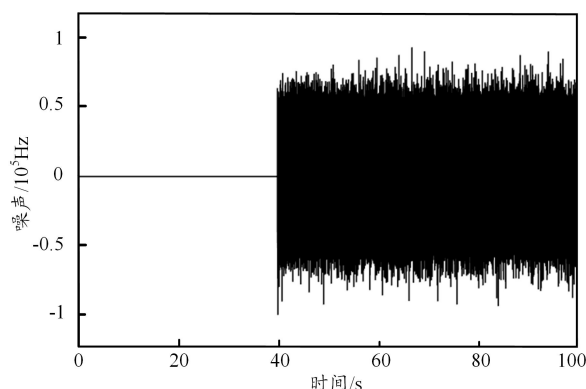


图4 干扰仿真图

在时间为 40 s 时向系统加载噪音信号。本文使用传统 PID 控制方法, 通过不断调节 PID 参数, 得到波形如图5所示。根据图形分析可知, 系统存在超调现象, 达到稳态所需的时间也较长。当在 40 s 引入噪声后, 可以观察到温度系统变得不稳定, 最低温度降至 5 °C 以下, 最高可达 40 °C。

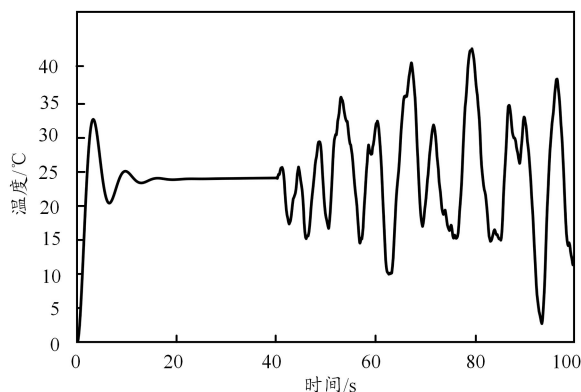


图5 传统PID控制下的曲线图

图6是增量式PID控制下的曲线图。可以看出, 增量式PID控制器能够减小超调量, 降低温度控制系统的震荡。然而, 在 40 s 内引入噪声后, 仍然可以看到温度系统的不稳定性, 最低温度降至 15 °C 以下, 最高

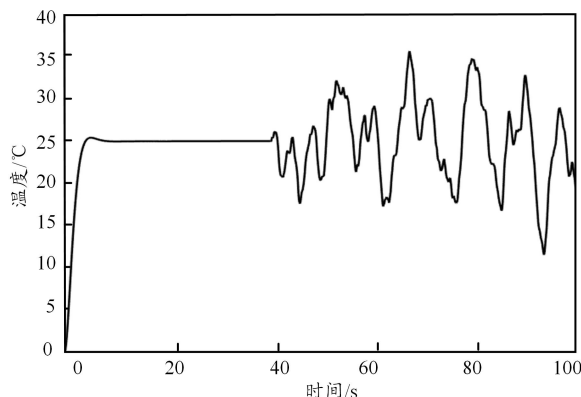


图6 增量式PID控制下的曲线图

达到 35 ℃,比传统 PID 控制效果好。尽管如此,相较于传统 PID 控制,增量式 PID 实现起来更复杂,主要体现在需要维护历史控制量输出和误差的累积状态。

图 7 是滑模控制曲线图。可以看出,该控制系统不存在超调和震荡,并且能迅速使系统达到稳定状态,为后续的数控恒温提供了有力支持。在 40 s 内引入噪声后,可以发现温度系统表现出极高的稳定性,温度维持在 25 ℃左右。

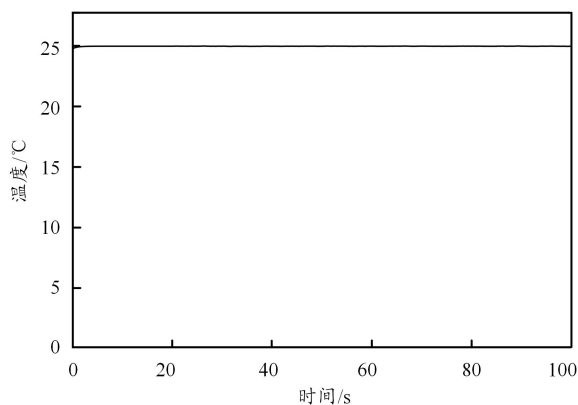


图 7 滑模控制曲线图

3 温度控制系统实验结果

为了快速调节激光器中心波长并使其达到稳定状态,本文在温度控制激光器电路板背面加入了金属材质的散热片。通过热传导方式迅速消散热量,从而实现快速稳定的波长调节效果。采用滑模控制,并与市面上常用的 2 种方法(传统 PID 控制、增量 PID 控制)进行对比,分别应用于所设计的半导体激光器温度控制系统电路中,以观察其稳定性。实验初始条件设置如下:激光器的初始温度为 25 ℃,驱动电流为 50 mA。在激光器温度上升并稳定于 25 ℃后,进行了长达 120 min 的测试。利用上位机软件随机选取这段时间内的温度变化数据,并导入 Matlab 绘制出温度变化曲线,如图 8~图 10 所示。可以看出,3 种控制方法对应的温度范围分别为:24.800 0~25.200 0 ℃(传统 PID 控制)、24.850 0~25.149 6 ℃(增量 PID 控制)、24.980 0~25.020 0 ℃(滑模控制)。由此可见,发现滑模控制的温度波动最小,表明其在保持激光器温度稳定方面优于其它 2 种控制方法。为了更直观地比较每种算法的稳定性,本文计算了各算法的稳定性指标 γ ,如式(12)所示。

$$\gamma = \frac{\Delta T}{T} \times 100\% = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T} \times 100\% \quad (12)$$

其中, $T=25$ ℃, $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为采样温度最大值、最小值, ΔT 为温度差。计算结果显示,滑模控制的温度误

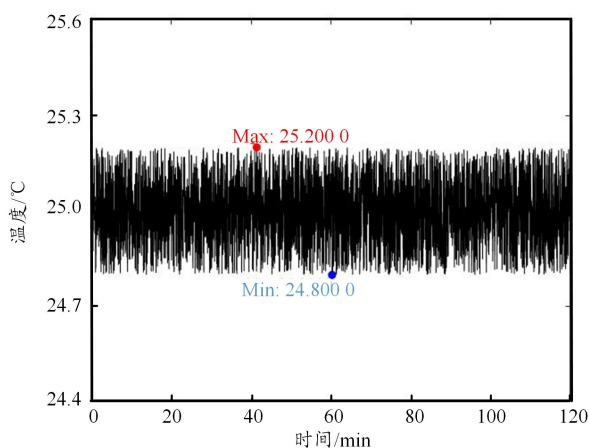


图 8 传统 PID 温控曲线图

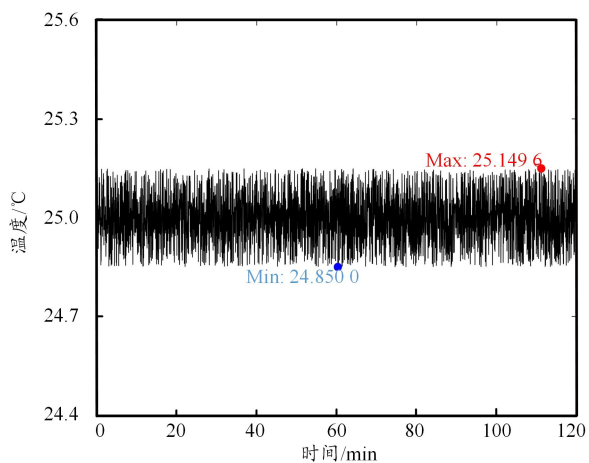


图 9 增量 PID 温控曲线图

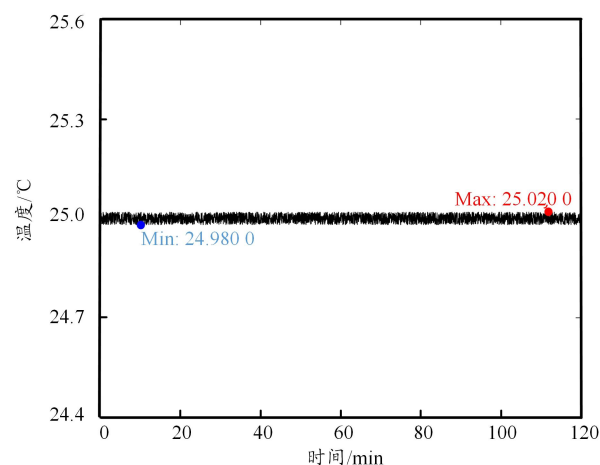


图 10 滑模控制温控曲线图

差小于等于 0.16%,明显优于 PID 控制的 1.6%和增量 PID 控制的 1.198 4%。

4 输出光谱测试

完成温度稳定性测试后,本文使用光谱仪对半导体激光器的输出波长稳定性进行了测试。实验初始条

刘晨,唐壹明,吴海勇,等:基于滑模控制的半导体激光器温度控制系统

件设置为:激光器的初始温度为 25 ℃,驱动电流设定为 50 mA。输出光谱曲线如图 11 所示。可以看出,红色曲线比蓝色曲线更窄,这表明基于滑模控制理论设计的激光器输出波形具有更高的稳定性和更窄的线宽,优于参考波形。实验结果证明,采用滑模控制的驱动电路能够有效地提升激光器输出波长的稳定性。

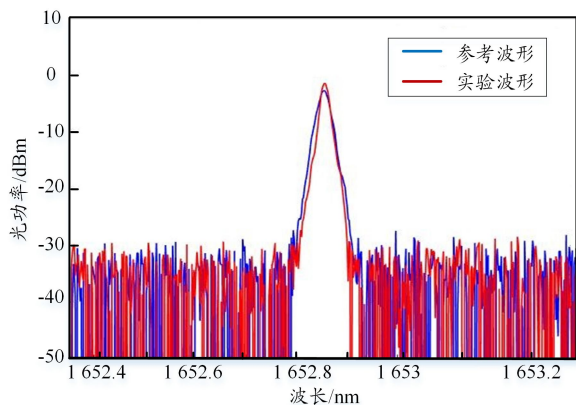


图 11 输出光谱曲线图

5 结束语

为了解决半导体激光器因温控电路不稳定而导致输出波长漂移的问题,本文提出了一种基于滑模控制的半导体激光器温度控制系统。通过一系列针对该温度控制系统的仿真与实验研究,验证了滑模控制在激光器温度调控中的优越性能。实验结果表明,滑模控制实现了 0.16% 的温度稳定性,显著优于 PID 控制的 1.6% 和增量 PID 控制的 1.198 4%。这种改进不仅能够提供更加稳定的温度环境,有助于提升激光器的工作效率和延长其使用寿命;同时,在精确控制需求方面,滑模控制相较于传统 PID 控制提供了更可靠的解决方案。因此,本文所提出的滑模控制系统对于优

化 DFB 激光器的性能具有重要意义,并为其在高精度应用领域中的使用奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 李明,傅婧,蒋君贤,等. 单片集成式高响应光电探测器件设计[J]. 半导体光电, 2024, 45(5): 687-692.
- [2] ZHAO Y, TIAN Z, FENG X, et al. High-precision semiconductor laser current drive and temperature control system design[J]. Sensors, 2022, 22(24): 9989-9989.
- [3] 苏浩,朱学华,刘闯闯. 高精度半导体激光器恒流恒温驱动电路设计[J]. 应用激光, 2022, 42(8): 139-148.
- [4] 张安迪,张艳荣,李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 153-161.
- [5] 敬奕艳. 一种大功率 TEC 温控系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(11): 106-110.
- [6] 张大路,李宜雯,晏晨,等. 基于改进 PSO 的蝶形半导体激光器温控系统的设计[J]. 光电子技术, 2024, 44(2): 133-139.
- [7] 程启明,赖宇生,李剑辉,等. 基于六边形变换器的无源滑模控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4323-4337.
- [8] 单文桃,李永俊,刘新,等. 基于双滑模控制的 PMSS 直接转矩调速系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(1): 3-7, 101.
- [9] GAMBIRE S J, KISHORE D R, LONDHE P S, et al. Review of sliding mode based control techniques for control system applications[J]. International Journal of dynamics and control, 2021, 9(1): 363-378.
- [10] 王双争,于松群,高志坚,等. 一种高电压大功率半导体激光器驱动电路的设计[J]. 激光杂志, 2023, 44(6): 13-16.
- [11] 李亚男. 应用于海水流速测量的半导体激光器控制系统的研究[D]. 济南:山东大学, 2022.
- [12] 袁子晴,周乐意,刘蓉,等. 基于 MAX1968 的半导体激光电源设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(13): 180-183.
- [13] 井李强,李维康,邵捷,等. 一种用于半导体泵浦激光器的 TEC 温度控制系统[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(4): 14-20.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真: 基本理论与设计方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2019.
- [15] WU L, LIU J, VAZQUEZ S, et al. Sliding mode control in power converters and drives: a review[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 9(3): 392-406.