

引用格式: HUANG Yi, YOU Yue, DENG Chuanlu, et al. High-stability MG-Y Laser Control System Based on Self-adaptive Current Compensation[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0214004

黄恠, 尤越, 邓传鲁, 等. 基于电流自适应补偿的高稳定度调制光栅 Y 分支型激光器控制系统[J]. 光子学报, 2023, 52(2): 0214004

基于电流自适应补偿的高稳定度调制光栅 Y 分支型激光器控制系统

黄恠, 尤越, 邓传鲁, 胡程勇, 汪立森, 张小贝, 王廷云

(上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444)

摘要:针对半导体激光器在实际应用中波长、功率稳定性较差以及控制系统复杂等问题,设计了一套高稳定度调制光栅 Y 分支型激光器控制系统。该系统利用模糊比例-积分-微分控制算法稳定功率,并通过两次正交试验优化算法参数,减小功率超调量,同时提出电流自适应补偿的波长校准算法,提升不同功率下的波长稳定性,解决电流内环反馈时引起的波长和功率交叉影响问题。结果表明,仿真优化后的激光器功率超调量从 1.528% 降低至 0.014%,系统调整次数由 21 减小至 17;测试调制光栅 Y 分支型激光器 60 min 内的功率漂移量仅为 0.004 4 mW,稳定度达到 0.060 4%,波长漂移量为 1.9 pm,稳定度达到 1.22×10^{-6} 。经校准,激光器的半导体光放大器电流在 28~78 mA 范围内,波长变化量从 23.4 pm 减小至 2.6 pm。

关键词:MG-Y 激光器;激光器控制系统;正交试验;波长校准;自适应;高稳定度

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235202.0214004

0 引言

半导体激光器具有体积小、重量轻、寿命长等优势,在分布式传感、光通信等领域具有广泛的应用前景^[1-4]。但由于半导体激光器敏感性较高^[5],在实际应用中其输出稳定性会同时受到驱动电流和温度影响,功率和波长易发生波动,严重时甚至会给激光器带来永久性损坏,因此设计相应的控制系统尤为重要。

目前,许多学者针对半导体激光器控制系统展开研究并取得成果。丛梦龙等^[6]将双 MOS 管结构和深度负反馈原理相结合,设计出数字化激光器驱动电源,电流稳定度低于 0.01%;续文敏等^[7]在设计双通道恒流源驱动电路的基础上,利用模糊比例-积分-微分(Fuzzy Proportional-Integral-Differential, Fuzzy PID)算法和 H 桥电路稳定混沌激光器温度,稳定 2 h 后光功率稳定度为 0.026%,中心波长漂移量为 7 pm;杨涛等^[8]选择现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)作为系统的主控制器,从硬件电路和闭环算法两个角度稳定激光器输出功率,1 h 内功率稳定度为 0.205%;陈子枫等^[9]以反射峰锁定技术为核心,设计出多通道干涉大范围可调谐半导体激光器控制系统,利用内环反馈算法调整相位区电流锁定波长,不同温度下波长漂移量小于 10 pm,但功率稳定度相对较差。以上学者均将电流内环反馈应用在半导体激光器控制系统中,在恒温条件下,通过控制激光器的驱动电流来稳定输出功率或波长,但电流内环反馈会引起激光功率和波长的交叉影响问题,调节激光器驱动电流时,功率和波长均会发生改变。TRICOT F 等^[10]通过声光调制器施加外环反馈稳定激光器功率,功率噪声降低 32 dB;冯保凯等^[11]将光栅衍射原理应用在外环反馈控制上,设计出自适应校准并稳定波长的微型零差干涉仪(Miniature Homodyne Interferometer, MHI),利用 PID 算法控制激光器温度以及激光光束方向,从而抑制波长漂移,经稳定后波长的稳定度为 0.9×10^{-6} 。虽然外环反馈解决了波长和功率的交叉影响问题,但是外环控制系统的结构庞大复杂,且系统性能易受到外

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61875116,62022053,62027818),上海市自然科学基金(Nos.22ZR142300,22010500100)

第一作者:黄恠,huangyi1008@shu.edu.cn

收稿日期:2022-09-27;录用日期:2022-11-01

<http://www.photon.ac.cn>

环设备影响。

为了解决控制系统内、外环反馈引起的问题,本文设计了一种基于电流自适应补偿的高稳定度调制光栅Y分支型(Modulated Grating Y-branch, MG-Y)激光器控制系统。首先,单板集成了控制系统的硬件电路部分,体积小、重量轻、功耗低;其次,使用电流内环反馈稳定激光器输出功率,选择模糊PID算法作为闭环控制算法,并通过两次正交试验优化模糊PID算法的参数,降低功率超调量,加快系统稳定速度;同时提出了电流自适应补偿的波长校准算法,减小激光器不同输出功率下的波长变化量。

1 MG-Y激光器控制系统设计

1.1 系统装置及原理

选用的MG-Y激光器型号是FINISAR公司的S7500,该激光器体积小、成本低,内置半导体制冷器(Thermo Electric Cooler, TEC),标准工作温度为 25°C ,同时受5路驱动电流控制,能够独立调整波长和功率。图1为系统框图以及MG-Y激光器结构示意图,MG-Y激光器的相位区(phase)和增益区(gain)通过多模干涉(Multimode Interference, MMI)耦合器与左、右布拉格反射器(left, right reflector)相连,激光从前反射器(integrated front reflector)经半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)放大后射出。调整两个布拉格反射器的注入电流 I_{left} 、 I_{right} 可以改变该区域的载流子浓度,控制两个梳状反射谱的位置,利用加法游标效应实现波长粗调谐,当两个反射谱重合时,输出波长即为重合峰的反射波长^[12];MG-Y激光器在谐振腔引入了相位截面,相位区电流 I_{phase} 用于调整光在相位截面中传输的延迟,通过改变腔模式以实现波长精细连续调谐,调谐精度最小为 $1\sim 2\text{ pm}$,当 I_{phase} 增大时,激光通过相位截面时的相移会减小,波长发生蓝移^[13];激光功率主要由增益区电流 I_{gain} 和半导体光放大器电流 I_{SOA} 控制^[14],固定 I_{gain} 不变,仅仅通过改变 I_{SOA} 来调整SOA的放大倍数,从而控制激光功率,这是因为激光功率随 I_{SOA} 线性增大,而 I_{gain} 与激光功率的关系曲线呈先线性后对数的增长趋势^[15],拟合效果相对较差。

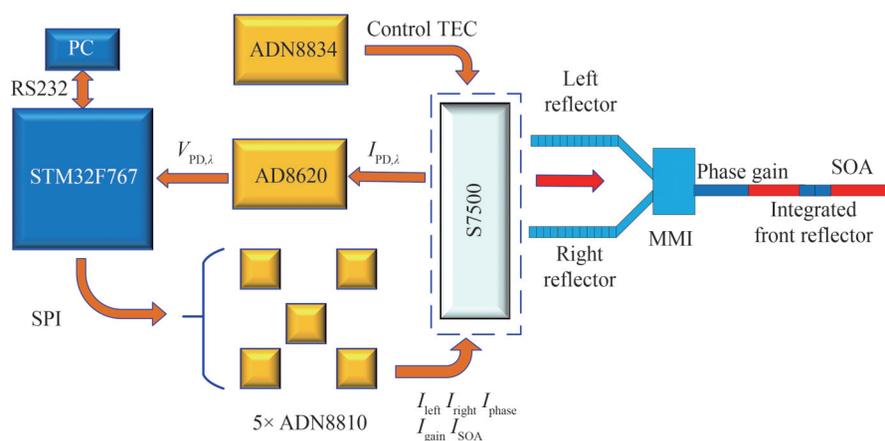


图1 系统框图以及MG-Y激光器结构示意图

Fig. 1 System block diagram and MG-Y laser structure

MG-Y激光器的波长和输出功率同时受到温度和驱动电流影响。激光器温度发生变化时,会改变其有源区禁带宽度以及内部有效折射率,因此输出波长发生漂移^[16];温度波动也会改变激光器的阈值电流,从而降低输出功率的稳定性^[17]。驱动电流产生波动时,也会直接导致激光器波长和输出功率发生漂移,因此设计激光器驱动模块尤为重要。激光器驱动模块主要由MG-Y激光器(S7500, FINISAR),主控制器ARM(STM32F767, ST)、恒流源驱动芯片(ADN8810, Analog Devices)、温度控制芯片(ADN8834, Analog Devices)以及运算放大芯片(AD8620, Analog Devices)等组成,其中,5片ADN8810芯片为激光器提供驱动电流,分别工作于激光器的左、右布拉格光栅反射区、相位区、增益区以及SOA。ADN8834芯片通过控制激光器内部的TEC使激光器稳定工作在 25°C ,激光器输出功率对应的反馈电流经电流电压转换后由AD8620放大后输入至ARM内部的模数转换器进行采样,采样结果输入上位机进行模糊PID控制,ARM根据控制结果实时调整 I_{SOA} 从而稳定功率,同时实时更新 I_{phase} 以实现自适应波长校准。

MG-Y 激光器测试系统如图 2 所示。该系统利用积分球探头(S145C, THORLABS)和光功率计(PM400, THORLABS)测量激光器的输出功率,S145C 可探测功率为 $10 \mu\text{W} \sim 20 \text{W}$ 的激光,分辨率为 1 nW ;使用布拉格光纤光栅分析仪(Fiber Bragg Grating Analyzer, FBGA, BAYSPEC)测量激光器的波长,FBGA 的波长检测范围为 $1510 \sim 1590 \text{ nm}$,分辨率为 1 pm ,最小可探测 $\pm 1 \text{ pm}$ 的波长变化;激光光谱由光谱仪(AQ6370D, YOKOGAWA)扫描采集。

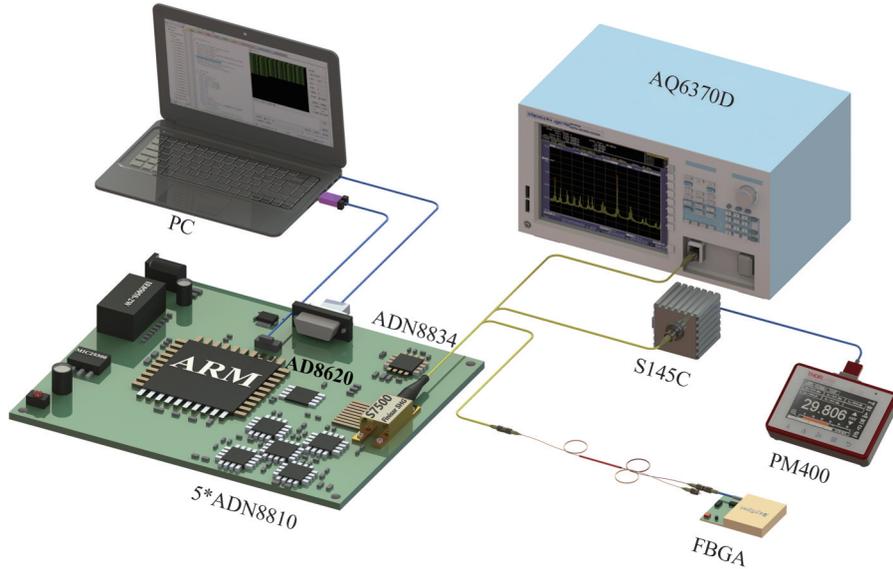


图 2 MG-Y 激光器测试系统
Fig. 2 Test system of MG-Y laser

1.2 基于正交试验的模糊 PID 控制参数优化算法

MG-Y 激光器的输出功率可以通过电流内环反馈稳定控制,本系统选用模糊 PID 算法作为闭环控制算法。相较于传统的 PID 算法,模糊 PID 算法的优势在于能够自适应调节比例系数 K_p ,积分系数 K_i ,微分系数 K_d ^[18],可以进一步增强系统的稳定性。离散位置式的 PID 控制算法表示为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

式中, k 代表反馈迭代次数; $e(k)$ 为设定的标准功率电压阈值与第 k 次采集到的功率反馈电压之差。

虽然选用模糊 PID 算法可以自适应调整 K_p 、 K_i 、 K_d ,但是根据经验选取的参数初值具有随机性^[19],激光器输出功率控制效果难以达到最优。此外,量化因子 k_c 、 k_{cc} 以及比例因子 k_{up} 、 k_{ui} 、 k_{ud} 也会影响模糊 PID 算法的性能^[20],其中,量化因子 k_c 、 k_{cc} 用于调整误差 e 和误差变化率 ec ;而比例因子 k_{up} 、 k_{ui} 、 k_{ud} 则用于控制 K_p 、 K_i 、 K_d 的调节量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,从而调整系统的动态性能^[21]。功率超调量(Overshoot)与量化因子和比例因子均呈正比;系统调整时间与 k_c 呈正比,与 k_{cc} 和比例因子呈反比。因此,需要结合全局最优化来确定参数。为了有效地逼近并确定最优的 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 以及量化因子、比例因子,通过正交试验优化算法参数。基于正交试验的模糊 PID 控制参数优化算法的流程如图 3 所示。

正交试验前首先要确定待优化参数的取值范围,以保证 MG-Y 激光器的输出功率是收敛的。超调量和系统调整时间是衡量模糊 PID 控制效果的重要指标^[22]。系统初步设定超调量不超过设定功率反馈电压的 10%,并使用系统的调整次数(Adjustment times)代替调整时间作为衡量指标,以保证更高的控制精度。为了提升数据的可比性,减小超调量、调整次数之间的数量级偏差带来的影响,将这两个指标的测试结果进行 Z-score 标准化^[23],即

$$x^* = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

式中, x^* 为标准化后的参数, x 为待标准化的参数, \bar{x} 为平均值, σ 为标准差。定义 R_{nr} 为第 n 次正交试验时,正

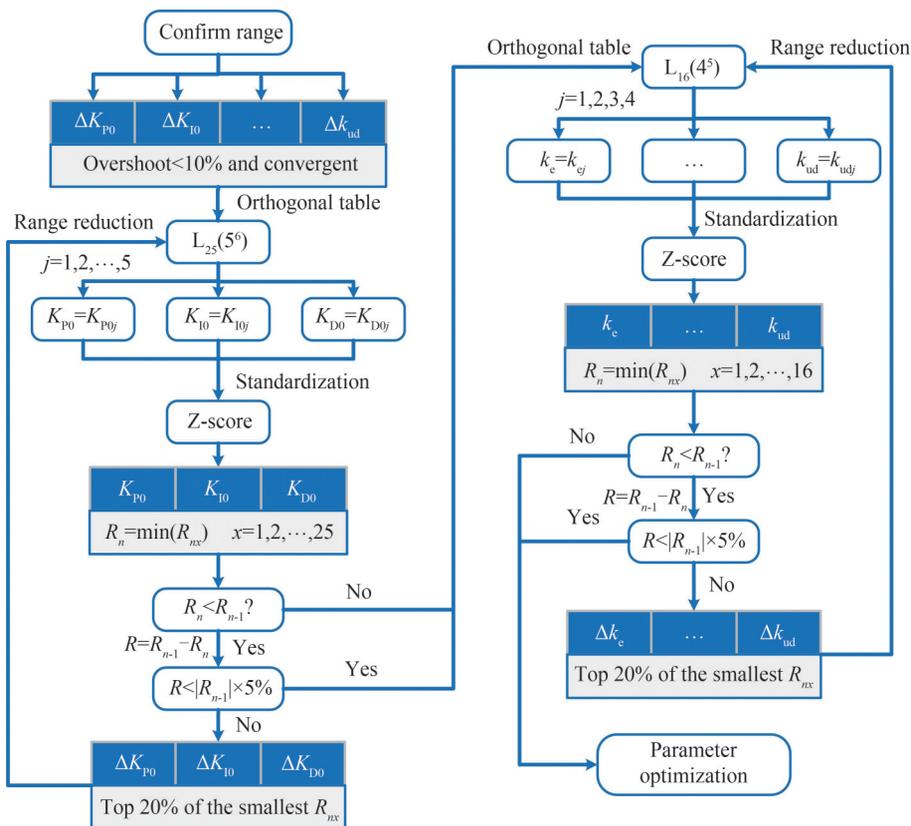


图3 基于正交试验优化的模糊PID控制算法流程
Fig. 3 Flow chart of fuzzy PID control algorithm based on orthogonal experiments

交表第 x 行标准化后的超调量和调整次数之和, R_n 为 R_{nx} 的最小值, R_n 越小, 说明控制效果越好。

确定待优化参数的取值范围后, 需要设计正交试验表, 分别对比例、积分、微分系数以及比例因子、量化因子进行正交试验, 并确定正交试验次数。对于 K_{p0} 、 K_{10} 、 K_{D0} , 选择正交表 $L_{25}(5^6)$; 对于 k_c 、 k_{ce} 、 k_{ui} 、 k_{ud} , 选择正交表 $L_{16}(4^5)$ 。规定 R 为第 $n-1$ 次正交试验的优化结果 R_{n-1} 与第 n 次的优化结果 R_n 之差, 当 R_n 小于 R_{n-1} 且 R 小于 $|R_{n-1}|$ 的 5% 时, 正交试验次数为 n 。经过多次实验, 本系统的正交试验次数确定为 2, 第 2 次正交试验时, 会根据第 1 次正交试验的结果, 对参数的取值范围进行缩减, 范围缩减规则如下: 第 1 次正交试验结束后, 将 R_{1r} 从小到大进行排序, 为了提高正交试验效率, 筛选出前 20% 的 R_{1r} 所对应的参数组合, 并将这些参数组合的最大值、最小值设定为第 2 次正交试验对应的边界值。该算法首先对 K_{p0} 、 K_{10} 、 K_{D0} 进行优化, 此时将其余各参数设定为对应取值范围的中值, 优化结束后, 固定 K_{p0} 、 K_{10} 、 K_{D0} 为最佳值, 并继续优化比例因子和量化因子。至此, 完成模糊 PID 控制算法参数优化。

1.3 电流自适应补偿的 MG-Y 激光器波长校准方法设计

MG-Y 激光器的 5 个驱动电流中, I_{SOA} 主要用于功率调节, 但在实际应用中发现, 仅改变 I_{SOA} 也会引起热传导效应^[24], 牺牲波长的稳定性, 引起波长和功率的交叉影响问题。使用模糊 PID 算法作为电流内环控制算法稳定激光功率, 系统根据每次采集的功率反馈电压设置对应的 I_{SOA} 调整功率, 如果不进行波长校准, 那么在功率反馈电压达到稳定状态前, I_{SOA} 将不断变化, 这将导致波长发生漂移, 降低激光器输出的稳定性。对于本系统的 MG-Y 激光器来说, 固定 $I_{gain}=98$ mA, 利用正交试验法求出边模抑制比 (Side-Mode Suppression Ratio, SMSR) 最高的两组 I_{left} 、 I_{right} 电流组合分别为: $I_{left1}=9.04$ mA, $I_{right1}=10.2$ mA; $I_{left2}=1.18$ mA, $I_{right2}=7$ mA。其中, 当 $I_{left}=9.04$ mA, $I_{right}=10.2$ mA, $I_{phase}=0$ mA, $I_{SOA}=28$ mA 时, 波长为 1 559.687 2 nm; 当 $I_{SOA}=78$ mA 时, 波长为 1 559.663 8 nm, 对应激光输出功率分别为 8.74 mW 和 18.94 mW, 功率变化 10.2 mW, 波长变化量高达 23.4 pm。波长变化会降低激光器输出稳定性, 因此设计了一种电流自适应补偿的波长校准算法, 算法流程如图 4 所示。

MG-Y 激光器的相位区电流 I_{phase} 用于波长精细连续调谐, 其最大输入为 7.5 mA, 可以实现约 0.3 nm 范

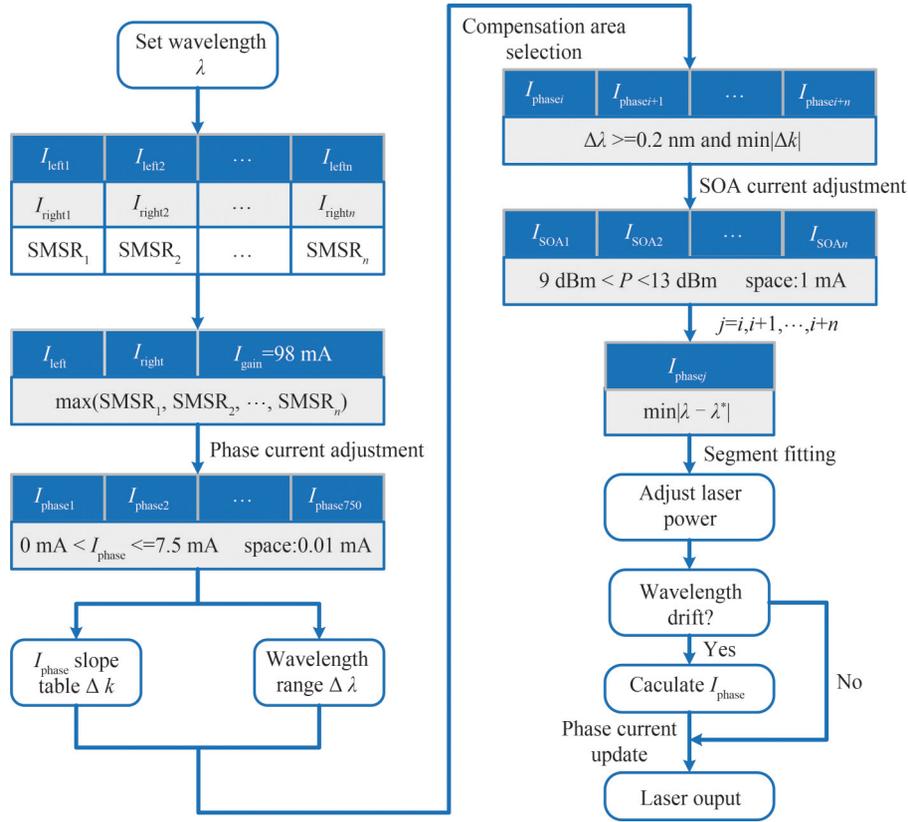


图4 波长校准流程
Fig. 4 Flow chart of wavelength calibration

围的波长连续调谐。在 I_{phase} 不超过 7.5 mA 的情况下,规定 I_{phase} 以 0.01 mA 为步长进行 0~7.5 mA 扫描,同时记录激光器对应的波长,不同反射区电流组合下 I_{phase} 的调谐特性如图 5 所示,图中有多段不同斜率的线性调谐区域,这是因为当谐振条件不满足时,波长就会发生跳变^[25]。以图 5 为例,综合整体情况来看,选取第 3 段线性区域内的数据作为补偿数据最为合适,该区域内波长覆盖范围较大,变化较为平缓,精度更高,且整体线性度较好,易于拟合补偿。

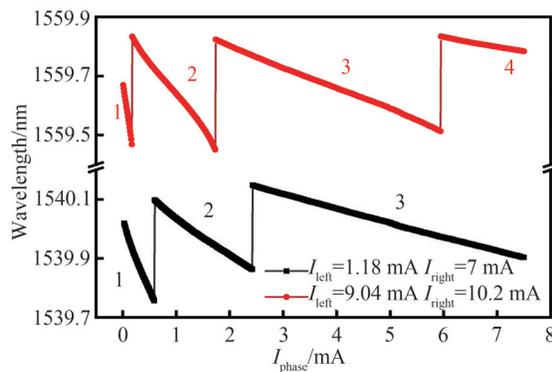


图5 I_{phase} 调谐特性
Fig. 5 Tuning characteristics of I_{phase}

电流自适应补偿的波长校准算法流程为:首先确定 MG-Y 激光器的输出波长,将此波长设定为标准波长 λ 。其次确定激光器输出该波长时 SMSR 最高的一组 $I_{\text{left}}/I_{\text{right}}$ 组合,并固定 $I_{\text{left}}/I_{\text{right}}/I_{\text{gain}}/I_{\text{phase}}$ 以 0.01 mA 为步长进行 0~7.5 mA 扫描,得到多段不同斜率 Δk 的 I_{phase} 线性调谐区域,选取波长覆盖范围大于等于 0.2 nm 且波长变化最平缓 ($|\Delta k|$ 最小) 的区域,规定该区域作为补偿数据段。接着 I_{SOA} 按照 1 mA 的步长进行扫描,直至覆盖 MG-Y 激光器输出功率 P 的范围 (9 dBm~13 dBm),同时根据补偿数据段调整 I_{phase} 得到校准后的波长 λ^* ,使 λ^*

无限逼近 λ ,得到 $I_{\text{SOA}}-I_{\text{phase}}$ 查找表。将查找表中的 $I_{\text{SOA}}、I_{\text{phase}}$ 进行分段拟合烧写至ARM中,ARM利用拟合后的关系根据 I_{SOA} 自适应调整 I_{phase} 实现波长校准。

2 MG-Y激光器控制系统仿真与测试

2.1 模糊PID算法仿真与功率稳定性测试

为了验证基于正交试验的模糊PID控制参数优化算法的正确性,首先对传统PID、模糊PID、两次正交试验优化后的模糊PID这三种算法的性能进行仿真。 $K_{\text{P0}}、K_{\text{I0}}、K_{\text{D0}}$ 以及量化因子、比例因子的取值范围如表1所示。其中传统PID、模糊PID的初始参数、比例因子、量化因子选取为取值范围的中值,即 $K_{\text{P0}}=2、K_{\text{I0}}=17、K_{\text{D0}}=5、k_{\text{e}}=3.5、k_{\text{ec}}=3.5、k_{\text{up}}=20、k_{\text{ui}}=20、k_{\text{ud}}=20$ (传统PID仅设置 $K_{\text{P0}}、K_{\text{I0}}、K_{\text{D0}}$)。经过两次正交试验优化后,各参数的取值为 $K_{\text{P0}}=3、K_{\text{I0}}=15、K_{\text{D0}}=1、k_{\text{e}}=5.44、k_{\text{ec}}=0.1、k_{\text{up}}=22、k_{\text{ui}}=13、k_{\text{ud}}=31$,仿真结束后,对激光器实际性能进行测试。仿真对比数据如表2所示,仿真与实际测试性能对比如图6所示。

表1 模糊PID各参数取值范围
Table 1 Parameter value range of fuzzy PID

	K_{P0}	K_{I0}	K_{D0}	k_{e}	k_{ec}	k_{up}	k_{ui}	k_{ud}
Min	0.1	11	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Max	4	23	9	7	7	40	40	40

表2 三种算法仿真结果
Table 2 Simulation results of three algorithms

Method	Adjustment times	Overshoot/%
Conventional PID	26	6.800
Fuzzy PID	21	1.528
Fuzzy PID based on orthogonal experiments	17	0.014

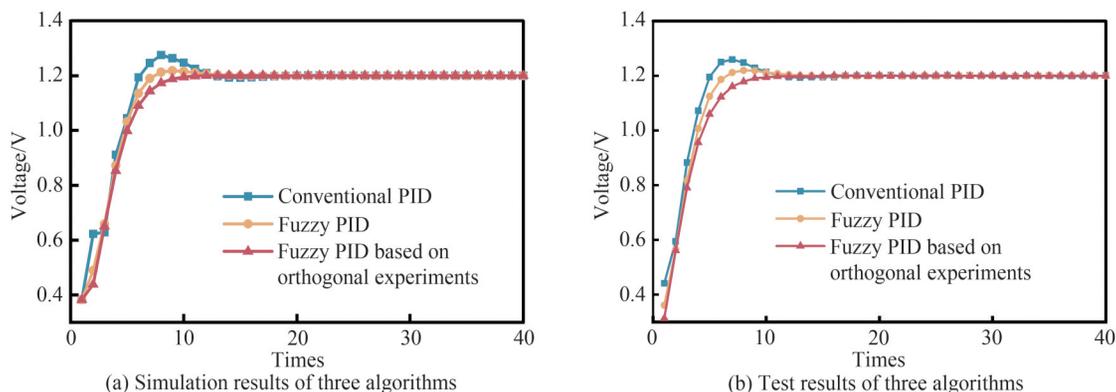


图6 三种算法性能仿真与测试结果

Fig. 6 Simulation and test results of three algorithms

从图6(a)、(b)可以看出,仿真和测试结果具有高度一致性。经过两次正交试验优化模糊PID参数后,功率超调量仅为0.014%,相比于未优化时明显降低,意味着进一步降低了激光器损害的风险,系统的调整次数也从21减小至17,说明激光器能够更快达到稳定状态,验证了基于两次正交试验优化模糊PID初始参数算法的准确性和必要性。

对MG-Y激光器的功率稳定性也进行了测试。激光器的预热时间为30 min,输出功率稳定前后的变化情况如图7所示。输出功率稳定前,对其进行3 000次采样(约60 min),最大漂移量为0.021 9 mW,稳定度为0.269 8%。输出功率稳定后,其最大漂移量仅为0.004 4 mW,稳定度为0.060 4%,测试结果表明,该控制系统和控制算法起到良好的功率稳定效果。定义稳定度 S 为

$$S = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \quad (3)$$

式中, ΔX 为最大波动量, \bar{X} 为平均值。

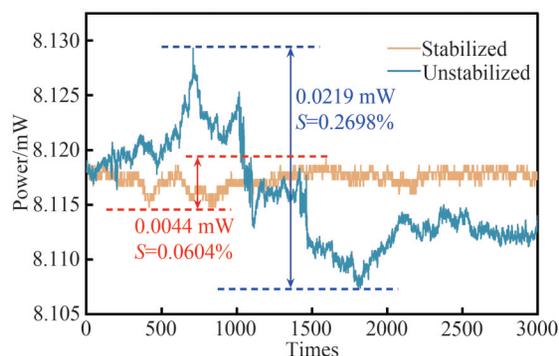


图7 MG-Y激光器60 min内输出功率稳定性
Fig. 7 Stability of MG-Y laser output power in 60 min

2.2 波长稳定性与波长校准性能测试

采用BAYSPEC公司的FBGA模块对MG-Y激光器的波长稳定性进行测试。将FBGA和激光器预热30 min后,在室温环境下对波长进行180次采样(采样间隔为20 s,约60 min),采样结果如图8所示,激光器波长最大为1 559.675 6 nm,最小为1 559.673 7 nm,波长漂移量为1.9 pm,稳定度为 1.22×10^{-6} ,体现了MG-Y激光器常态工作时输出波长良好的稳定性。

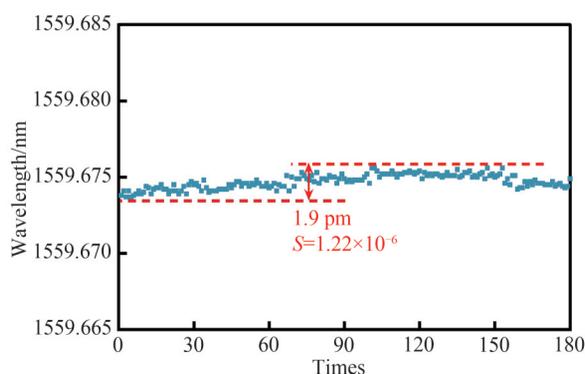


图8 MG-Y激光器30 min内波长稳定性
Fig. 8 Stability of MG-Y laser wavelength in 30 min

此外,为了验证波长校准的重要性,使用FBGA模块对波长校准前后的结果进行测量分析。固定 I_{gain} 为98 mA,将 I_{SOA} 从28 mA以10 mA的步长增加至78 mA,校准激光器输出波长 λ 为1 559.68 nm,期间逐一记录激光器波长数据。 I_{SOA} 与波长的对应数据如表3所示。经过波长校准后,不同功率下波长的变化量已从23.4 pm减小至2.6 pm,其结果证明波长校准算法能有效解决MG-Y激光器波长和功率的交叉影响问题,提升了波长的稳定性。

表3 波长校准后 I_{SOA} 与波长的对应数据

Table 3 I_{SOA} and wavelength corresponding data after wavelength calibration

I_{SOA}/mA	Wavelength/nm	I_{SOA}/mA	Wavelength/nm
28	1 559.680 4	58	1 559.679 3
38	1 559.680 6	68	1 559.678 2
48	1 559.679 9	78	1 559.680 8

MG-Y激光器为可调谐激光器,为进一步验证电流自适应补偿的波长校准算法的准确性,以1 nm步长设定激光器波长从1 531 nm增加至1 569 nm, I_{SOA} 的调节步长固定为10 mA,使用光谱仪AQ6370D采集激光

器的输出光谱图,图9(a)、(d)分别给出波长校准前后C波段的输出光谱。从图9(a)中发现,波长校准前,激光器在不同输出功率下均有不同程度的波长漂移,其中在1553 nm、1555 nm处波长变化量较大,分别为76 pm和91 pm,这两处局部放大后的光谱分别如图9(b)和(c)所示。以1555 nm处为例,当 I_{SOA} 以10 mA步长从28 mA增加至48 mA时,波长漂移4 pm,当 I_{SOA} 继续增加至58 mA时,波长发生跳变,此时激光器输出波长为1554.913 nm,与设定值相差了87 pm,波长稳定性大幅下降,分析其原因是所选的 I_{left} 、 I_{right} 分别位于激

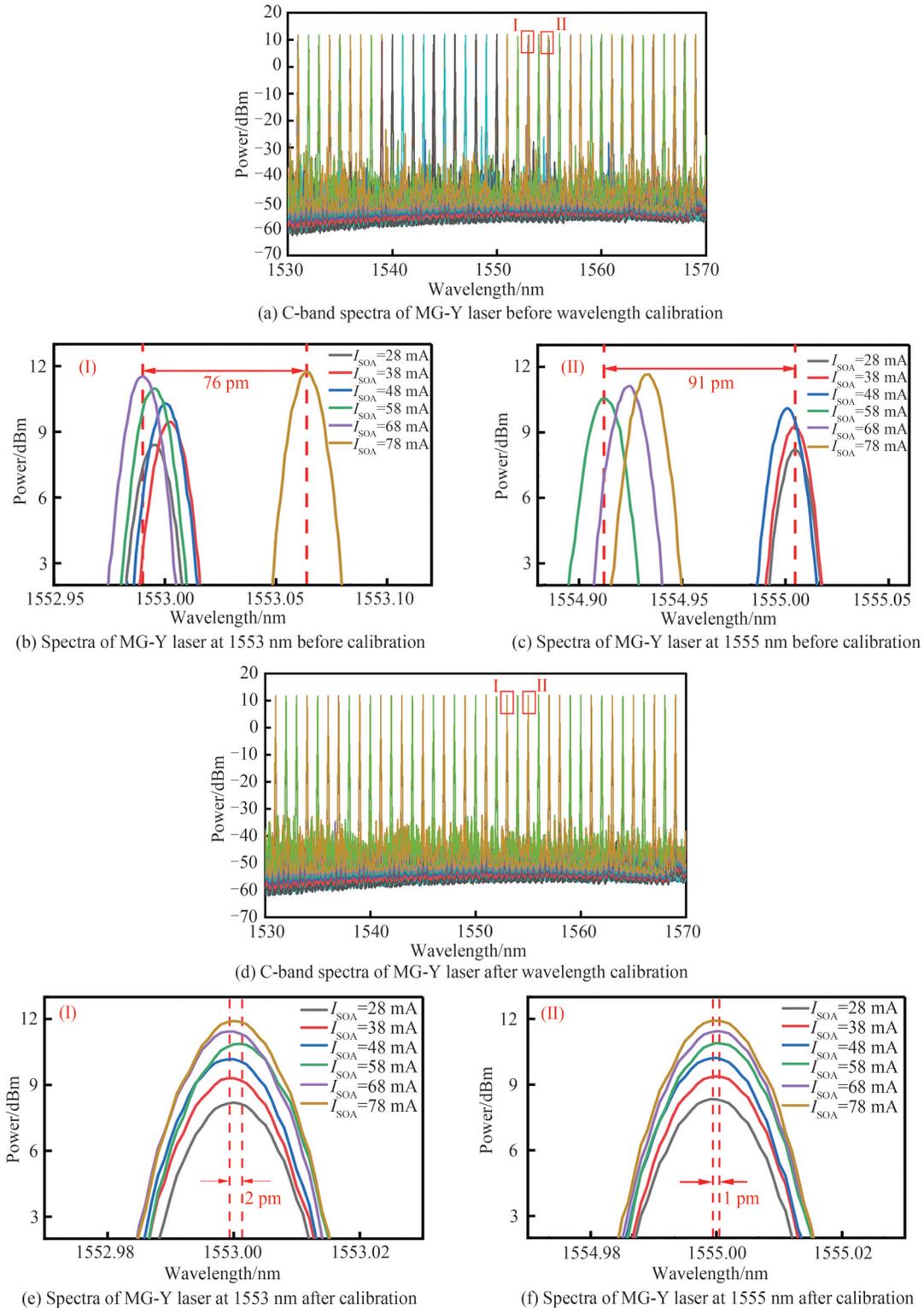


图9 波长校准前后MG-Y激光器的光谱

Fig. 9 Spectra of MG-Y laser before and after wavelength calibration

光器电流调谐区域的边界处,波长稳定性较差,改变 I_{SOA} 时波长有发生跳变的可能。而经过波长校准后,从图9(d)中观察得知,整个C波段在不同功率下的波长变化量大幅减小,1 553 nm和1 555 nm处的光谱放大图如图9(e)和(f)所示,观察得知校准后波长没有发生明显跳变,变化量分别减小至2 pm和1 pm,激光器的波长稳定性大幅提升。

3 结论

本文设计了基于电流自适应补偿的高稳定度MG-Y激光器控制系统。硬件方面,设计了恒流源驱动电路、温度控制电路以及功率反馈电路等;软件方面,设计两次正交试验优化模糊PID算法初始参数,降低激光器功率超调量,减小系统调整次数,同时设计了电流自适应补偿的波长校准算法解决电流内环反馈引起的波长和功率交叉影响问题,减小激光器在不同功率下的波长变化量,波长可以根据激光器输出功率实时校准。本文对激光器控制系统的性能进行了仿真与测试,结果表明,优化后功率超调量从1.528%降低至0.014%,系统调整次数由21减小至17;对激光器输出功率进行3 000次采样(约60 min),功率漂移量仅为0.004 4 mW,稳定度为0.060 4%,对激光器波长进行180次采样(采样间隔为20 s,约60 min),波长漂移量为1.9 pm,稳定度为 1.22×10^{-6} ,波长校准后,激光器不同输出功率下的波长变化量从23.4 pm减小至2.6 pm,验证了电流自适应补偿的波长校准算法的正确性与普适性。结果表明,该控制系统能够显著提升激光器的输出稳定性,扩大MG-Y激光器的应用场景。

参考文献

- [1] WANG Qiming. The breakthrough and development of semiconductor laser in China[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2190-2197.
王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2190-2197.
- [2] WANG De, LI Xueqian. New progress in semiconductor lasers and their applications[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 279-283.
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.
- [3] GENG Sujie, WANG Lin. The semiconductor laser and its applications in military[J]. Laser and Infrared, 2003, 33(4): 311-312.
耿素杰, 王琳. 半导体激光器及其在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2003, 33(4): 311-312.
- [4] CHEN Lianghui, YANG Guowen, LIU Yuxian. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 13-31.
陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 13-31.
- [5] ZHONG Qirun, JIANG Haiming, DAI Junke, et al. Development situations of semiconductor laser controllers[J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(5): 52-54.
钟奇润, 姜海明, 戴俊珂, 等. 半导体激光器控制器的发展现状[J]. 光通信技术, 2016, 40(5): 52-54.
- [6] CONG Menglong, LI Li, CUI Yansong, et al. Design of high stability digital drive power supply for diode laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1629-1636.
丛梦龙, 李黎, 崔艳松, 等. 控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1629-1636.
- [7] XU Wenmin, YANG Qiang, WANG Xing, et al. Design of high stability control system for chaotic semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 278-292.
续文敏, 杨强, 王兴, 等. 面向混沌半导体激光器的高稳定控制系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 278-292.
- [8] YANG Tao, LI Wusen, CHEN Wenjian. Design of new-style driving and temperature control circuit for low power diode laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(2): 144-151.
杨涛, 李武森, 陈文建. 新型小功率半导体激光器驱动及温控电路设计[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 144-151.
- [9] CHEN Zifeng, WANG Kuankuan, JIANG Chun, et al. Control system of multi-channel interference widely tunable laser (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2): 0251207.
陈子枫, 王宽宽, 蒋春, 等. 多通道干涉大范围可调谐激光器控制系统(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(2): 0251207.
- [10] TRICOT F, PHUNG D H, LOURS M, et al. Power stabilization of a diode laser with an acousto-optic modulator[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(11): 113112.
- [11] CAI Yindi, FENG Baokai, SANG Qi, et al. Real-time correction and stabilization of laser diode wavelength in miniature homodyne interferometer for long-stroke micro/nano positioning stage metrology[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(20): 4587.

- [12] MARVIN C, GUSTAVO F, LAUREANO A, et al. Y-branch tunable laser design: modeling, control and experimental validation[J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 140: 107040-107054.
- [13] HEININGER H. Longitudinal cavity mode referenced spline tuning for widely tunable MG-Y branch semiconductor laser [J]. *Radio Engineering*, 2014, 23(1): 496-503.
- [14] LIU Jia, ZHU Lianqing, HE Wei, et al. Research on optical interrogation system based on MG-Y tunable diode laser[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 87-96.
刘佳, 祝连庆, 何蔚, 等. 基于 MG-Y 型可调谐半导体光源的光纤光栅解调系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3): 87-96.
- [15] HU Huanpeng, LIANG Lei, WU Song, et al. Simulation of modulated grating Y-branch laser based on transmission line laser mode[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2022, 33(9): 911-919.
胡欢鹏, 梁磊, 吴崧, 等. 基于传输线激光器模型的调制光栅 Y 分支激光器仿真[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(9): 911-919.
- [16] YOO S, LEE J K, KIM K. Suppression of thermal wavelength drift in widely tunable DS-DBR laser for fast channel-to-channel switching[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30406-30417.
- [17] LI Jianglan, SHI Yunbo, ZHAO Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1745-1749.
李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1745-1749.
- [18] OUYANG Xinchuan, YANG Bowen, WAN Jinyin, et al. Self-adaptive laser power stabilization system based on fuzzy control[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 49-55.
欧阳鑫川, 杨博文, 万金银, 等. 基于模糊控制的自适应激光功率稳定系统研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 49-55.
- [19] ZHOU Haibo, CHEN Rui, ZHOU Shun, et al. Design and analysis of a drive system for a series manipulator based on orthogonal-fuzzy PID control[J]. *Electronics*, 2019, 8(9): 1051-1065.
- [20] ZHANG Lanchun, LIU Sen, SHEN Hongsheng, et al. Study on Fuzzy-PID control for SM-CVT speed ratio based on PSO algorithm[J]. *Journal of Computational Methods in Sciences & Engineering*, 2017, 17(3): 1-12.
- [21] LI Lina, LIU Hongyi, LUO Zhong, et al. Study on improved fuzzy-PID composite control arithmetics and its applications [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2009, 30(2): 274-278.
李丽娜, 柳洪义, 罗忠, 等. 模糊 PID 复合控制算法改进及应用[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(2): 274-278.
- [22] WANG Shuyan, SHI Yu, FENG Zhongxu. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(1): 166-172.
王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(1): 166-172.
- [23] GAO Zhirong, DING Lixin, XIONG Qiming, et al. Image compressive sensing reconstruction based on z-score standardized group sparse representation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 90640-90651.
- [24] HAN Ximeng, GAO Jinwei, WANG Hao, et al. Thermal analysis of an SOA integrated in SG-DBR laser module[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48: 147.
- [25] LIU Qiang, JING Zhenguo, LI Ang, et al. Quasi-continuous tuning characteristics of modulated grating Y-branch lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 263-271.
刘强, 荆振国, 李昂, 等. 调制光栅 Y 分支激光器准连续调谐特性[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 263-271.

High-stability MG-Y Laser Control System Based on Self-adaptive Current Compensation

HUANG Yi, YOU Yue, DENG Chuanlu, HU Chengyong, WANG Lisen,
ZHANG Xiaobei, WANG Tingyun

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The output stability of semiconductor lasers is simultaneously affected by current and temperature, and the power and wavelength of lasers are prone to fluctuations in practice, which may even damage lasers permanent. In this paper, a high-stability Modulated Grating Y-branch (MG-Y) laser control system based on self-adaptive current compensation is proposed to address the problems of poor stability of wavelength and power as well as the complexity of the laser control system. The whole system

is integrated into a printed circuit board with a small size, light weight and low power consumption. Based on the current inner loop feedback, we optimize the parameters of Fuzzy Proportional-Integral-Differential (PID) algorithm by orthogonal experiments and propose a wavelength calibration algorithm based on self-adaptive current compensation.

The high-stability MG-Y laser control system is described in detail. Firstly, we introduce the system device and principle of operation. MG-Y laser is controlled by 5 currents and operates at 25°C. Left reflector current (I_{left}), right reflector current (I_{right}), and phase section current (I_{phase}) are used for wavelength adjustment, while the power is adjusted by the gain section current (I_{gain}) and the semiconductor optical amplifier current (I_{SOA}). The control system is mainly composed of MG-Y laser, constant current source chip ADN8810, temperature control chip ADN8834, and operational amplifier chip AD8620. Secondly, in terms of power stability, a Fuzzy PID control parameter optimization algorithm based on orthogonal experiments is proposed to reduce both the overshoot of laser power and adjustment times of control system. The number of orthogonal experiments and the range of Fuzzy PID parameters need to be confirmed, then we design the orthogonal tables by screening the value range of each control parameter. The algorithm can effectively approach the optimal value of each parameter and also improve the performance of the laser control system. In the wavelength calibration part, we propose a wavelength calibration algorithm based on self-adaptive current compensation to reduce the central wavelength drift of MG-Y laser at different power levels. The algorithm takes advantage of the wavelength fine-tuning characteristics of the phase section current I_{phase} , by adjusting I_{phase} from 0 to 7.5 mA, continuous tuning of wavelength in the range of about 0.3 nm is possible. After setting a standard wavelength λ , the I_{phase} region with stable wavelength variation and broad coverage is selected as linear compensation data region. I_{SOA} scans in 1 mA steps until the range of the laser output power is fully covered, while the calibrated wavelength λ^* is obtained by updating I_{phase} according to the compensation data region so that λ^* is infinitely close to λ . We establish the look-up table for I_{SOA} and I_{phase} and also fit the data in the table into segments. When the laser changes its power, the system adaptively calculates the corresponding I_{phase} according to I_{SOA} and sets the wavelength to the standard wavelength λ adaptively. The algorithm solves the cross-influence problem between wavelength and power caused by current inner loop feedback, and improves the output stability of the MG-Y laser.

The simulation and test results of the whole laser control system are shown at last, including the laser output power stability and wavelength drift. First, the performance of Fuzzy PID parameters optimization algorithm based on orthogonal experiments is simulated, and the results show that the overshoot of the laser power is reduced from 1.528% to 0.014% after optimization, and adjustment times of control system are lowered from 21 to 17. Then, we test the performance of MG-Y laser, and the results are almost consistent with the simulation results. The power stability is measured by the optical power meter PM400 and integrating sphere probe S145C. Before power stabilization, the output power fluctuation of 3 000 samples (about 60 min) is 0.021 9 mW, and the stability is 0.269 8%. In comparison, the maximum fluctuation of laser power is 0.004 4 mW, and the stability can reach 0.060 4% in 60 min after stabilization. Finally, the wavelength stability is measured by fiber Bragg grating analyzer FBGA. The wavelength drift is 1.9 pm within 60 min. After wavelength calibration, the wavelength drift at different power levels is reduced from 23.4 pm to 2.6 pm at 1 559.68 nm. In order to verify the accuracy of the wavelength calibration method, the output wavelength of the laser is increased from 1 531 nm to 1 569 nm with a step of 1 nm, and the output spectrum of the MG-Y laser was collected by spectrometer AQ6370D. Before wavelength calibration, the wavelength fluctuated at 1 553 nm and 1 555 nm where the drifts were as high as 91 pm and 76 pm respectively. After wavelength calibration, the wavelength drifts at 1 553 nm and 1 555 nm are lowered to 2 pm and 1 pm separately. The stability of wavelength under different output power is greatly improved. The simulation and test results show that the laser control system has excellent control capability and expands the application scenarios of MG-Y laser.

Key words: MG-Y laser; Laser control system; Orthogonal experiments; Wavelength calibration; Self-adaptive; High-stability

OCIS Codes: 250.5960; 250.3140; 140.3425