高精度激光器电流驱动与交流温控系统设计

缪存孝[1],邢国柱[1],刘建丰[2],万双爱[2],杨 竞[1],闫晓强[1*]

(1. 北京科技大学 机械工程学院,北京 100083;
2. 北京自动化控制设备研究所,北京 100074)

摘 要:半导体激光器作为原子磁强计的重要组成部分,其波长和功率主要由电流和温度决定,而传统的直流温控系统会对磁强计产生磁场干扰。针对高精度电流控制、温度控制和磁场干扰问题,设计了一种激光器恒流源驱动和交流控温系统。首先,设计基于功放的高精度激光器恒流源驱动系统;然后,设计交流温度调制解调检测和交流加热驱动系统;最后,采用 STM32 控制器、高精度 AD 采集和 DA 输出结合温度模糊自适应 PID 控制算法进行高精度温度控制。实验结果表明:在 42 ℃温度下控制精度为±0.005 ℃,在 32 mA 电流下稳定度为±0.5 μA,为激光器光功率和波长稳定性奠定基础。

关键词:半导体激光器; 交流温度控制; 精密电流; 模糊自适应 PID
中图分类号:TN248.4 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0905004

Design of current drive and alternating current temperature control system for high-precision laser

Miao Cunxiao[1], Xing Guozhu[1], Liu Jianfeng[2], Wan Shuang′ai[2], Yang Jing[1], Yan Xiaoqiang[1*]

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Beijing Automation Control Equipment Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: As an important part of the atomic magnetometer, the semiconductor laser′s wavelength and power are mainly determined by current and temperature. However, the traditional DC temperature control system would cause magnetic field interference to the atomic magnetometer. Aiming at high-precision current control, temperature control and magnetic field interference, a laser constant current source driving system and Alternating Current (AC) temperature control system were developed. Firstly, a high-precision laser constant current source driving system based on power amplifier was designed. Secondly, the AC temperature modulation demodulation detection and AC heating drive system were designed. Finally, the STM32 controller, high-precision AD acquisition and DA output combined with temperature fuzzy adaptive PID control algorithm were used for high-precision temperature control. The experimental results show that the temperature control accuracy is ±0.005 ℃ at 42 ℃, and the current stability is ±0.5 μA at 32 mA, which lays a foundation for laser optical power and wavelength stability.

Key words: semiconductor laser; AC temperature control; precision current; fuzzy adaptive PID

收稿日期:2019-04-11; **修订日期**:2019-05-21
基金项目:国家自然科学基金(60277005)
作者简介:缪存孝(1981-),男,副教授,博士,主要从事为飞行器导航、制导与控制方面的研究。 Email: miao_cunxiao@163.com
通讯作者:闫晓强(1961-),男,教授,博士,主要从事为设备行为在线监测与智能控制方面的研究。 Email: yxqzhw@263.net

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

在量子传感领域，原子磁强计具有定位精度高、纯被动探测、环境适应性好等优点，已广泛应用于矿产、潜艇、水雷、地雷的探测定位等领域[1]。磁强计核心器件半导体激光器，由于体积小、效率高、波段覆盖广，可实现从紫外到红外波段的覆盖，同时满足了磁强计对激光器波长的要求，因此替代传统的染料激光器与其他类型的激光器，成为磁强计的驱动与检测激光光源[2-3]。半导体激光器的工作特性随温度变化很大。发射波长、阈值电流和工作寿命和器件温度有很大的关系，对于波长为 780 nm，光功率为 3 mW 的典型二极管激光器，发射波长的平均偏移量为 0.26 nm/℃，阈值电流的平均变化量为 0.3 mA/℃。对于波长为 1 550 nm 和光功率为 20 mW 的典型电子 DFB 激光器，发射波长平均偏移量为 0.11 nm/℃，阈值电流平均变化量为 0.2 mA/℃。此外，工作温度每上升 25 ℃，激光器的工作寿命将下降两倍[4]，因此稳定的环境温度是激光器稳定工作的必要条件。

目前，半导体激光器温度控制通常采用热敏电阻、热电偶、集成温度传感器及热电阻作为温度传感器，利用比例-积分-微分控制器(PID)计算控制量来控制直流电流 (Direct Current, DC) 驱动 TEC 实现加热和制冷[5]。传统的半导体制冷片(Thermo Electric Cooler, TEC) 作为执行器会产生磁场干扰从而影响磁强计的精度，同时由于直流电产生的低频和直流噪声，对磁强计产生干扰，而高频交流信号可在磁强计带宽以外。除此之外，温控系统的精度方面，中国科学院贺春贵等人研究的半导体激光器温度控制电路稳定度在 0.01 ℃[5]；东北石油大学姜建国等人研究的用于甲烷检测的电流驱动和温控系统，温度误差为±8 m℃，电流驱动误差为≤0.09 mA[6]；吉林大学的何启欣等人研究的多通道半导体激光器温控系统温控精度为-0.011~0.015 ℃[7]，综上所述，要想实现高精度磁强计设计，温控精度和激光器驱动电流控制精度还有待进一步提高。

针对以上问题，文中通过进一步分析得到激光器与温度和驱动电流的关系，然后进行电路设计。首先设计了一种基于功率放大器的恒流源电路来驱动激光器进行工作；然后设计了一种高精度的交流(Alternating Current, AC)温控系统，代替直流温控。最后，使用模糊自适应 PID 控制算法改善传统 PID 控制的响应速度。实现了高精度的激光器直流驱动和交流温度控制。

1 激光器与温度和电流的关系

激光器的波长是衡量激光器性能的重要指标，温度的变化会影响半导体 PN 结的带隙，从而影响腔增益曲线的峰值波长。780 nm 激光器温度调谐系数的典型值为 0.25 nm/℃，1 300 nm 和 1 550 nm 激光器为 0.4 nm/℃。DFB 激光器的波长变化率为 0.1 nm/℃。电流方面，驱动电流通过改变激光器的有效腔长度，可以改变激光器波长(如图 1 所示)。产生这种效应的原因是激光结中的电流密度和瞬时结温会改变 PN 结材料的折射率，从而改变有效腔长度。830 nm 激光器典型的波长与电流的调谐系数(Tuning Coefficient)为 1 pm/mA[8]。

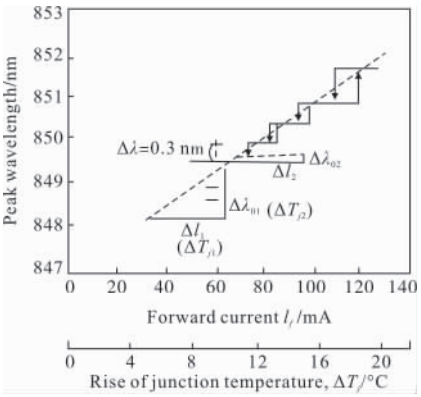


图 1 850 nm 激光正向电流和结温波长偏移

Fig.1 Forward current and junction temperature wavelength shift of the 850 nm laser

综上所述，设计高精度磁强计的前提条件是激光器在稳定的电流和温度下工作才可以保证激光器波长的稳定性，进而实现高精度的磁强计设计。

2 电路原理和设计

电路架构如图 2 所示，由温度控制回路、激光器电流回路和通讯回路 3 个模块组成。

温度控制回路部分，首先将热敏电阻接入电桥，AD698 产生差分交流激励，使用减法器转单端信号

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

后到电桥对角输入端，电桥另一对角输出端将信号放大后传回解调芯片 AD698,其将采集到的交流信号解调；然后输出一个同电桥输出成线性关系的直流电压信号,AD 采集该信号后得到电桥热敏电阻阻值和 AD 输出值之间的关系，进而得到实际温度和 AD 输出值之间的关系；最后主控芯片读取 AD 芯片寄存器数值，经过计算得到当前热敏电阻的实际温度，同时主控芯片 STM32F407 经过模糊自适应 PID 计算，将得到的控制量转换为 DA 的输出值,再用该信号与 AD698 产生的交流激励,通过乘法器,得到可以改变幅值的交流电压信号,该信号控制加热片驱动电路对激光器进行加热,实现闭环交流温度控制。

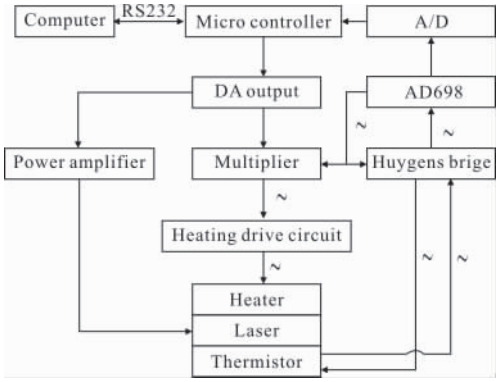


图 2 温控电路架构

Fig.2 Circuit architecture of temperature control

激光器电流回路部分，主控根据上位机设置值转换为 DA 输出值。通过使用功率放大器,搭建恒流源电路驱动激光器工作。通信回路部分，使用 LabVIEW 编写上位机程序，通过 RS232 串口与主控芯片 STM32 进行通信,使用特定的握手协议接受实验数据。

2.1 激光器恒流源电路设计

上位机通过串口将激光器电流设置值传入单片机,经过计算,单片机将电流值转换为 DA 输出的电压值 LD1_SET，经过如图 3 所示的功放恒流源电路,进而输出稳定的电流值。图 3 所示电路一共由两部分组成:功率放大器输出和跟随器采样,其中 R56 用于确定恒流源电路中电流值和 DA 设置值之间的关系,因此采用 5 ppm/℃的低温漂系数电阻。通过使用功率放大器 N1(图 3 所示)构成的运算放大电路驱动激光器，该电路通过硬件闭环实现激光器电流的稳定输出。较于传统的运算放大器加三极管的驱动电路，专用的高精度功率放大器电路输出的电流更加稳定,同时大大减小了电路占用的布局空间。最后为采集稳定的激光器电流值,使用 N2(如图 3 所示)组成跟随电路将负载连接到 AD 输入端进行电压采集。激光器电流值和 DA 设定值关系如下：

$$I_{out}=\frac{V_{set}}{R} \tag{1}$$

式中:I_{out} 为激光器电流值;V_{set} 为 DA 设定值;R 为高精密、低温漂电阻阻值(图 3 中 R56)。

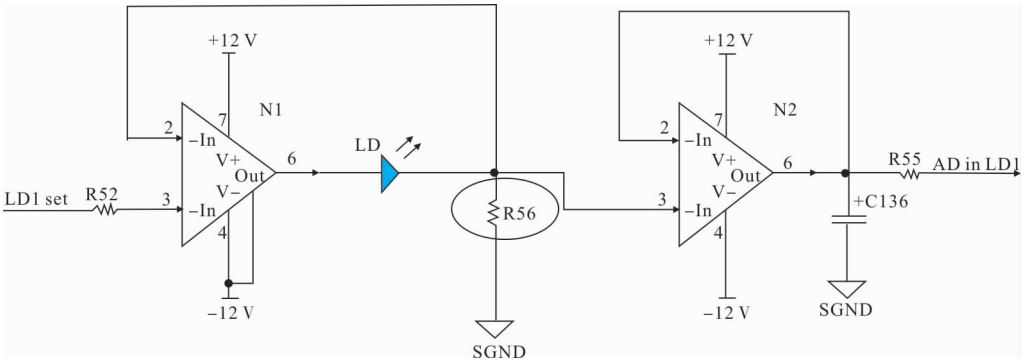


图 3 激光器恒流源电路

Fig.3 Circuit of laser current source

2.2 温控电路设计

交流温控的难点是交流电桥输出的交流信号，必须解调为与其相关的直流信号，才能得到温度和电桥输出电压之间的关系。目前常见的解决方法有两种:(1) 通过高速和高分辨率 ADC,采集交流模拟信号,单片机将采集的交流周期信号进行数字积分,求得该信号的有效值;(2) 利用模拟电路将交流信号解调为对应有效值后输出,AD 对该信号进行采集,

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

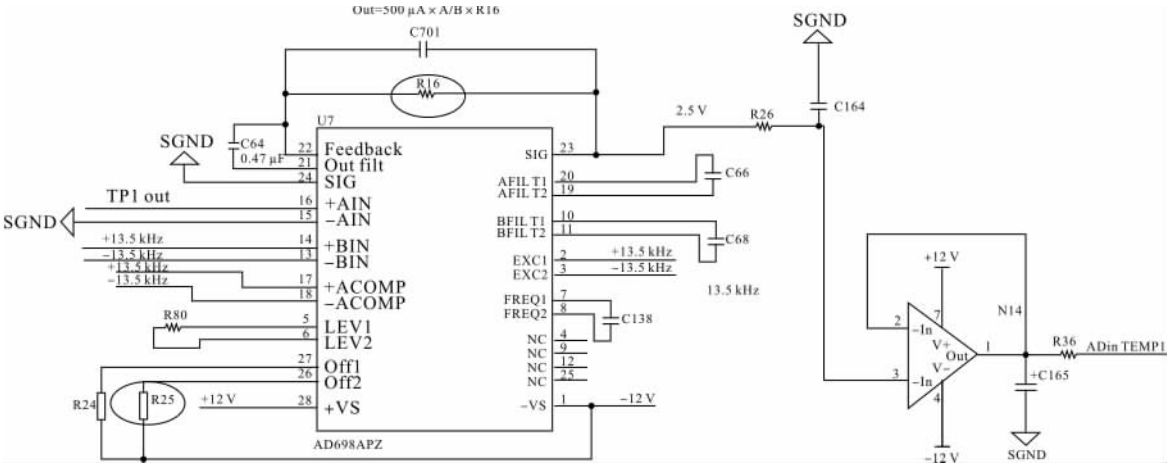
得到对应的有效值。方法 (1) 因占用单片机资源太多、计算量大、功耗大而不容易实现。因此一款解调交流信号输出对应直流信号的芯片将更加经济和高效。ADI 公司的基于 LVDI 位移传感器设计的调制解调芯片恰好满足本设计应用。

文中介绍的温控电路由热敏电阻、前置放大器、解调芯片 AD698、STM32 内部 PID 温度控制程序、功率放大器电路、加热片 6 部分构成。AD698 输出固定频率的交流激励信号给电桥，为了实现高精度的温控系统，热敏电阻选用灵敏度较高的 10k3CG，40~50 ℃范围内阻值随温度的变化率约为 200 Ω/℃，热敏电阻阻值变化引起的电桥输出电压变化，该信号通过电桥前置放大器放大 10 倍后输入到 AD698 解调芯片，解调后得到相应的直流量，AD 采集该信号到主控，主控经过 PID 计算得到加热片驱动电流大小，控制 DA 间接控制功放改变驱动电流大小进行加热，或者关闭功放输出电流为零进行制冷，实现控制激光器温度。

2.2.1 温度采集电路

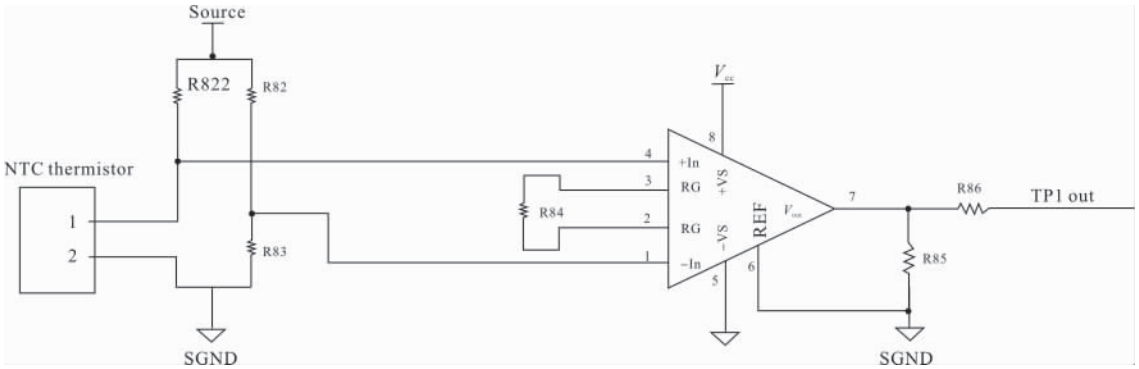
温度采集电路采用 AD698 输出固定频率和大小的差分交流正弦信号，通过减法器转单端信号输送到电桥。电桥采用全桥模式如图 4(b)由 4 个桥臂组成，其中 3 个桥臂用固定电阻，另外 1 个桥臂使用热敏电阻，电桥输出经过仪表放大器放大 10 倍后输出给 AD698 采集，并将接收的信号和输出到电桥的激励进行解调得到与电桥输出成线性关系的直流信号，通过配置 AD698 和前放将的输出范围控制在 0~2.5 V，经过运放 N14 跟随到参考电压为 2.5 V 的 24 位高精度 ADC 采集，求得实际温度。若输入信号的有效值记为和，则 AD698 解调出的输出电压：

$$V_0 = I_{ref} \times \frac{A}{B} \times R \tag{2}$$



(a) 调制解调电路

(a) Circuit of modulation and demodulation



(b) 惠更斯电桥电路

(b) Circuit of Huygens bridge

图 4 温度采集电路

Fig.4 Circuit of temperature acquisition

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中：A 为输入的正弦信号有效值；B 为输入 AD698 的激励信号有效值；R 为比例系数；I_{ref} 为参考电流大小；V_0 为 AD698 输出的电压值。

通过配置 R1和 R2 的大小可以配置电压偏置值：

$$V_{offset}=1.2V\times R\times\left(\frac{1}{R1+2k\Omega}-\frac{1}{R2+2k\Omega}\right) \tag{3}$$

式中：V_{offset} 为输出电压偏置值；R1、R2 为偏置比例系数。AD698 最终的输出电压：

$$V_{out}=V_0+V_{offset} \tag{4}$$

式中：V_{out} 为 AD698 实际输出值。

2.2.2 加热片驱动电路

加热片驱动电路如图 5 所示，通过 PID 计算得到 DA 的输出值，DA 输出值与固定交流信号（由 AD698 产生）经过乘法器 U16 转换为可经过 DA 控制幅值的交流信号，然后为减小因温度变化，改变加热片阻值对输出电流造成影响，采用经过 N4 设计的恒流源电路驱动加热片输出稳定的交流电流，驱动加热片工作，最终实现温度闭环控制。计算公式为：

$$\text{TEMP2_SIN}=((\sin_{+}-\sin_{-})\times \text{TEMP2_SET}/10\times\frac{(R45+R47)}{R45} \tag{5}$$

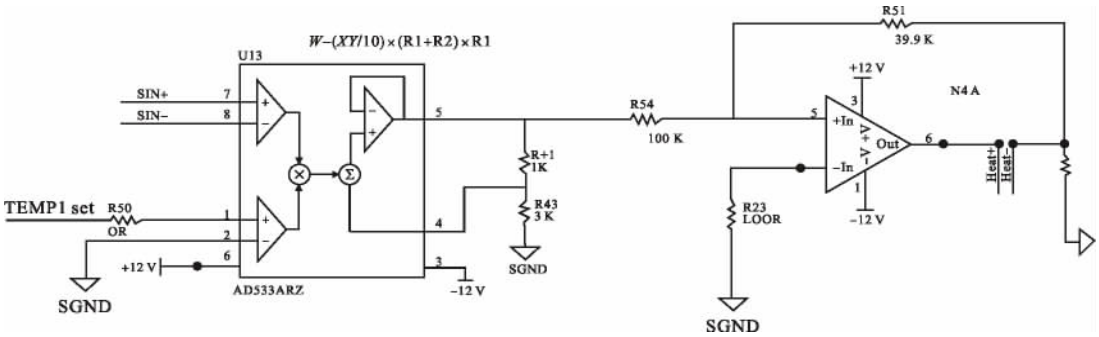


图 5 恒流源加热电路

Fig.5 Heating circuit of current source

$$I_{heat2}=-\text{TEMP2_SIN}\times\left(1+\frac{R61}{R67}\right)\times\frac{1}{R64} \tag{6}$$

式中：TEMP2_SET 为 DA 输出值；TEMP2_SIN 为乘法器输出值；$\sin_{+}-\sin$ 为由 AD698 产生的固定频率和幅值的正弦信号；I_{heat2} 为加热片驱动电流的大小。

3 控制方法

温控系统在设定值改变时超调较大，过大的超调引起的高温对激光器寿命有害。为了提高系统响应速度，降低超调，选取调节时间较短，抗干扰能力和鲁棒性较好的模糊自适应 PID 控制方法。通过将误差值和误差的变化速率作为输出参数经过模糊处理输出 K_p、K_i、K_d 的递增量 $\triangle K_p$、$\triangle K_i$、$\triangle K_d$，对 PID 参数进行修正，得到对误差和误差变化率自适应的 PID 参数。传统的温控 PID 控制参数一旦整定后，整个系统在运行过程中不进行修改，当面对一些时变系统、大滞后系统的时候，传统的 PID 参数不能满足良好的性能。同时不变的 PID 参数在变化的环境温度下响应慢。因此对于温控系统而言，采用具有自适应的 PID 控制器能够改善温度的控制效果。

模糊自适应原理见图 6，在传统的 PID 基础上利用误差和误差的变化率作为输入，进行模糊推理后得到模糊修正值 K_p、K_i、K_d，对 PID 参数进行实时修正。

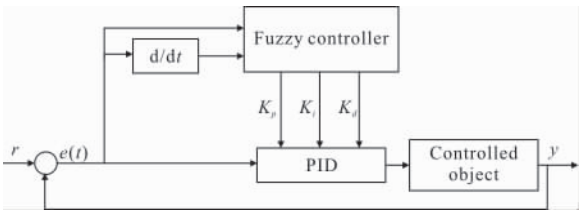


图 6 模糊自适应架构图

Fig.6 Architecture diagram of fuzzy adaptive

3.1 模糊控制表设计

首先将温度误差 $e(t)$ 和对其求导得到的温度误差变化率 $\dot{e}(t)$ 作为模糊控制器输入量；然后对 $e(t)$、$\dot{e}(t)$、PID 参数进行模糊化，其模糊子集为 $e\ (t), \dot{e}(t)=\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM,\ PB\}$，$k_p$，$k_i$，$k_d=\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM,\ PB\}$。文中对所有的模糊语言变量都采用均匀分布的三角形隶属函数，它的特点是运算量小、数据存储量小、便于调整。最后，选择变量的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

论域 $e(t),\dot{e}(t)$ 为[−6, 6],其模糊论域为[−3, 3],k_p 的基本论域为[−300, 300],k_i 的基本论域为[−60, 60],k_d 的基本论域为[−6, 6],其模糊论域都为[−3, 3]。量化因子和比例因子为:K_{ep}=0.01,K_{ei}=0.05,K_{ed}=0.5,K_e=0.5,K_{ec}=0.5。

3.2 PID 参数修正

通过质心法去模糊计算得到模糊控制对 PID 参数的修正量,将修正量代入公式(7)进行计算:

$$\begin{cases} K_p=K_{p0}+\triangle K_p \\ K_i=K_{i0}+\triangle K_i \\ K_d=K_{D0}+\triangle K_d \end{cases} \tag{7}$$

式中:K_p、K_i、K_d 为 PID 控制参数;K_{p0}、K_{i0}、K_{D0} 为初始 PID;$\triangle K_p$、$\triangle K_i$、$\triangle K_d$ 为模糊自适应修正值。

4 实验验证

4.1 实验平台

为了检测文中系统的正确性,搭建温度控制实验平台,实验设备连接图如图 7(a)所示,包括外部线性供电电源、控制电路、前放电桥、激光器热沉模块、万用表检测装置、RS232 通信线和上位机电脑。其中,线性电源给系统供电,电路板采集热敏电阻温度,使用 RS232 串口线将数据传入 PC 上位机,万用表检测装置使用安捷伦的 34 980A,精度为 6 位半,采样频率为 10 Hz。该万用表检测的温度传感器和激光器温控采用的传感器贴片方式,图 7(b)为热沉机械结构图,将加热片贴在凹型热沉下方进行加热,热敏电阻贴在凹槽内,用于控制的热敏电阻与检测所用的热敏电阻相邻贴放,这样减小了温度梯度带来的误差,激光器通过支架悬于凹槽中央。上位机采用 LabVIEW 编写,包括激光器的电路和温度显示、串口设置、PID 参数设置、温度设置、电流设置。串口波特率设置为 115 200,8 位数据位、1 位停止位、无校验位。

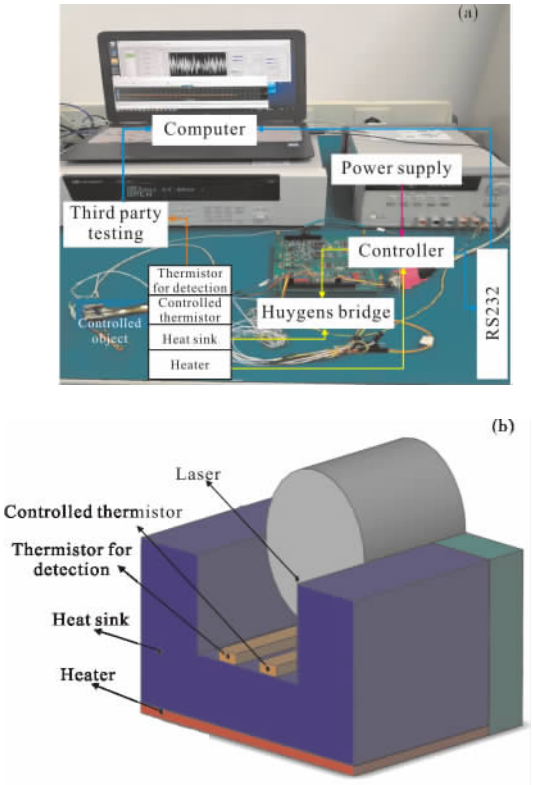


图 7 实验平台

Fig.7 Experimental platform

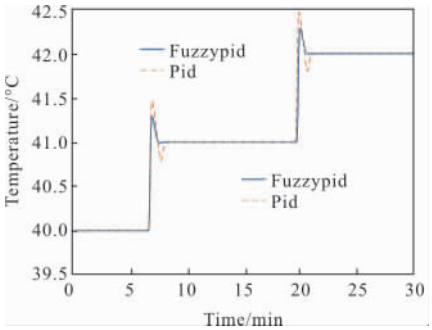
4.2 实验过程与结果

实验环境选择在室温 20 ℃左右的室内进行,为防止气流的影响,实验前将热沉装入密封的环境中。分别采用模糊自适应 PID 和传统 PID 温度控制进行实验。实验过程如下:首先使用传统 PID 控制程序,将温度设置为 40 ℃,稳定后继续采样 5 min;然后设定值改为 41 ℃稳定后继续采样 10 min,最后温度设定为 42 ℃,稳定后继续采样 10 min。使用模糊自适应 PID,重复上述操作,将两组实验数据进行对比,结果如图 8 所示。从图 8(b)可以看出,模糊自适应 PID 在期望值改变的时候可以抑制超调的影响,同时温度响应更快。

为测量系统长期工作的稳定性,将该交流温控系统的温度设定在 42 ℃,连续工作 20 h,控制点和监测点温度曲线如图 8(c)所示。将激光器电流设定值为 32 mA 工作连续工作 20 h,采用安捷伦的 6 位半电流表进行验证,对万用表采集到的数据进行处理,稳定度曲线如图 9(a)所示。同时,采集激光器波长数据见图 9(b)。

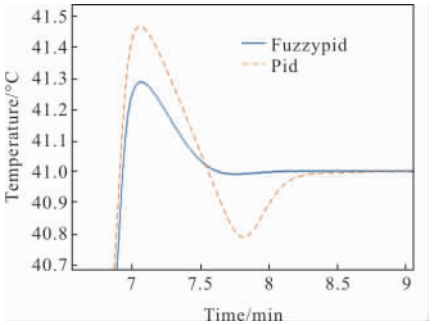
从图 8(c)的实验结果可知,用于 PID 闭环的被控点稳定在 42 ℃,稳定度为±0.001 ℃。从图 8(d)结果可知,由于监测点与被控点在实际环境中不能完全重合,存在有温度梯度,因此,监测点稳定在±0.005 ℃以内。从图 9 可以看出,激光器电流稳定性在 32 mA 稳定度为±0.5 μA;激光器波长在 795 nm 下,稳定度在±0.15 μm。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



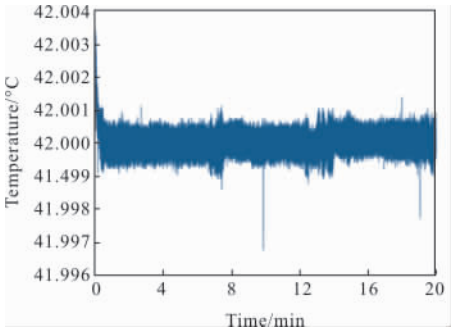
(a) 不同控制方法下的温度曲线

(a) Temperature curve of different control methods



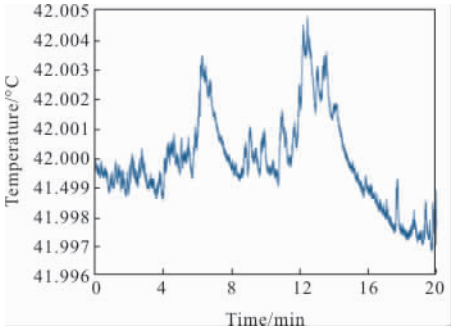
(b) 温度超调的局部放大图

(b) Partial enlargement of temperature overshoot



(c) 被控温度

(c) Controlled temperature

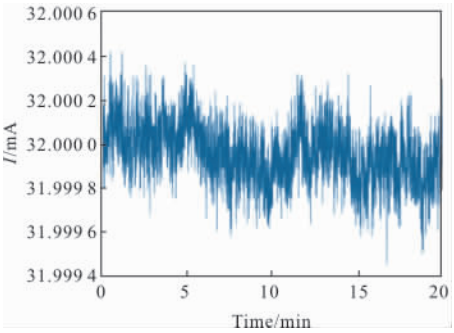


(d) 实际观测温度

(d) Actual observed temperature

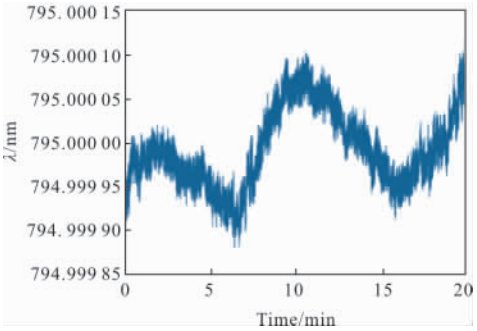
图 8 20 h 温控曲线

Fig.8 Curve of temperature controller for 20 hours



(a) 电流曲线

(a) Curve of current



(b) 波长曲线

(b) Curve of wavelength

图 9 激光器电流和波长的稳定度

Fig.9 Stability of laser current and wavelength

为验证交流温控对磁场的干扰，通过磁通门采集直流温控信号和交流温控信号，对比在上电、更改加热电流和稳态时磁场大小变化，为了便于观察，对实验数据采用截止频率为 50 Hz 低通滤波，实验数据如图 10 所示，可以看出直流低频信号会产生固定大小磁场信号，影响磁强计测量，交流信号几乎没有干扰。

该实验为验证温控和电流系统的可行性，通过对温控系统使用安捷伦万用表仪器对温度、电流和波长进行 20 h 的长时间实验。最终，温度在 42 ℃下精度为(42±0.005) ℃；电流在 32 mA 下精度为(32±0.5) mA；激光器输出波长在 795 nm 条件下，稳定度达到±0.15 μm。同时，交流温控降低了直流温控的磁场干扰。

结果表明，文中采用的交流温控方案和功放电流源电路，改善了直流温控的磁场干扰，同时控制精度可以到达预期的要求，较目前的控制精度都有可观的提升。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

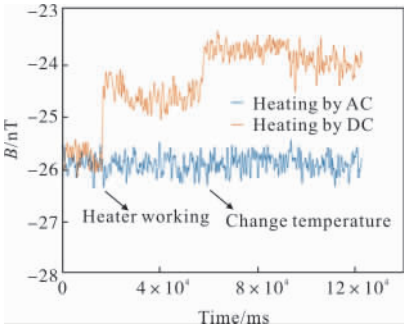


图 10 交流温控和直流温控磁场信号

Fig.10 Magnetic field signal of AC temperature control and DC temperature control

5 结 论

为了降低干扰,提高原子磁强计精度,针对激光器工作性能的问题, 文中设计了使用功率放大器实现激光器电流驱动的方案, 同时设计了采用交流电采集和控制的激光器温度控制方案。该方案首先使用高精度的功率放大器驱动激光器, 其次巧妙的使用了解调芯片 AD698,通过交流信号实现对热敏电阻阻值的采集和计算,最后,针对被控对象超调大,存在滞后性的问题, 使用模糊自适应 PID 控制。最终,解决了激光器工作电流大、要求精度高和磁强计直流温控带来干扰的问题, 同时该系统实现了高精度的电流控制和高精度、低超调、快速响应的温度控制。实验结果表明,激光器精度进一步提高,驱动电流的精度达到(32±0.5) μA,温度控制精度达到(42±0.005) ℃,满足激光器的工作精度要求,验证了该功放电流驱动和交流温控方案的可行性和有效性。

参考文献:

[1] Wan Shuang′ai, Qin Jie, Wang Shilin, et al. Technology and progress of atomic magnetometer based on 3He [J]. ***Navigation Positioning and Timing***, 2015, 2 (3): 85–89. (in Chinese)

[2] Chen Botao. Development of a liquid–state zero–field nuclear magnetic resonance spectrometer based on SERF atomic mag–netometer [D]. Wuhan: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)

[3] Allred J C, Lyman R N, Kornack T W, et al. High–sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin–exchange relaxation [J]. ***Physical Review Letters***, 2002, 89(13): 130801.

[4] Johnson L A. Controlling temperatures of diode lasers and detectors thermoelectrically [J]. ***Laser & Optronics Opto–elect***, 1988: 109–114.

[5] He Chungui. Design and experimental study on temperature control circuit of semi– conductor laser [J]. ***Electronic Measurement Technology***, 2017(8): 32–36. (in Chinese)

[6] Jiang Jianguo. A laser drive current and temperature control system for TDLAS methane detection[J]. ***Journal of Chongqing University***, 2018, 41(2): 53–60. (in Chinese)

[7] He Qixin, Liu Huifang, Li Bin, et al. Multi–channel semiconductor laser temperature control system [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2017, 37(11): 187–194. (in Chinese)

[8] Liu Baolin, Zhang Peng, Sun Fuzhong, et al. Development of high precision temperature control device for large aperture frequency doubling crystal [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(4): 0420001. (in Chinese)

[9] Chen Chen, Qin Jianan, Zhang Xue, et al. Temperature controller for DFB laser utilized in SERF atomic magnetometer [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 4(12): 1205004. (in Chinese)

[10] Zhang Kefei, Jiang Tao, Shao Long, et al. Research on precision temperature control of laser diode based on the novel fuzzy–PID control unit [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25(3): 648–655. (in Chinese)

[11] Jia Fangxiu, Ding Zhenliang. Temperature control system supplied by pulse–drive current for laser range finder [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009, 17 (9): 2128–2135. (in Chinese)

[12] Cong Haibing, Ning Yongqiang, Zhang Xing, et al. Brightness characteristics of 980 nm high power VCSEL [J]. ***Chinese Optics***, 2010, 3(6): 637–642. (in Chinese)

[13] Huang Haihua, Liu Yun, Qin Li, et al. Temperature characteristics of 850 nm tapered semiconductor lasers [J]. ***Chinese Optics***, 2016, 6(2): 201–207. (in Chinese)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net