光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.021

DFB 激光器饱和吸收稳频的精密温控系统设计

张 玮，李兆隆，郭 平，赵建业*

（北京大学 信息科学技术学院，北京 100871）

摘 要： 相对于外腔半导体激光器，分布式反馈（Distributed Feedback Laser，DFB）激光器的温调率较高，为实现饱和吸收稳频，需要对激光器温度进行精密控制。分析了饱和吸收稳频系统的控温需求，基于 MAX1978 芯片设计了精密温控系统；利用恒流源对测温电桥电路进行了线性优化，利用遗传算法对模拟 PID 电路参数进行快速整定，系统最终实现 0.2 mK 的控温稳定度，比同类设计的稳定度高 1～2 个数量级，解决了饱和吸收谱线明显晃动的问题，具有广阔的应用前景。

关键词： 分布式反馈激光器；精密控温；遗传算法；MAX1978；饱和吸收稳频

中图分类号： TN248.4 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0560－06

Design of Precise Temperature Control System for Saturated Absorption Frequency Stabilization of DFB Laser

ZHANG Wei，LI Zhaolong，GUO Ping，ZHAO Jianye

（School of Electronics Engineering and Computer Science，Peking University，Beijing 100871，CHN）

Abstract： Compared with the external cavity semiconductor laser，distributed feedback laser has a higher temperature regulation rate. In order to achieve saturated absorption frequency stabilization，it is necessary to control the laser temperature precisely. In this paper，the temperature control requirements of the saturated absorption frequency stabilization system is analyzed，a precise temperature control system is designed based on MAX1978 chip. The linear optimization of the temperature bridge circuit is realized by using constant current source，and the parameters of the analog PID circuit are quickly adjusted by using genetic algorithm. Finally the temperature control stability of 0.2 mK is achieved，which is 1～2 orders of magnitude higher than that of the similar design. It solves the problem of obvious shaking of saturated absorption spectrum and has a broad application prospect.

Key words： DFB laser；precise temperature control；genetic algorithm；MAX1978；saturated absorption frequency stabilization

0 引言

近年来，光传输[1-2]、精密测量、光频标等高新技术的迅猛发展对激光器的频率稳定度提出了更高的要求[3]，传统激光器受制于线宽[4]，频率稳定度尚不能达到要求，因此必须采取措施进一步稳定激光器频率。饱和吸收稳频是一种有效的激光器稳频方案，其实质是利用具有更高稳定度的原子跃迁频率对激光器频率进行补偿与校正，从而提高激光频率的稳定度[5]。在饱和吸收稳频的实现过程中，温度控制是至关重要的步骤之一。分布式反馈（DFB）激光器温调率较高，其输出激光波长对温度变化敏感，如果温度控制不合适，就会带来饱和吸收谱观测不到、饱和吸收谱晃动等问题，造成稳频困难甚至不能实现稳频，因此必须对激光器进行精密温控。

本文在分析 DFB 激光器饱和吸收稳频温控需

收稿日期：2020－04－08.

基金项目： 国家自然科学基金项目（61535001）.

* **通信作者：**赵建业 **E-mail：** zhaojianye@pku.edu.cn

求的基础上，基于 MAX1978 芯片设计了激光器精密温控系统，采用线性优化的电桥电路进行温度测量，PID 补偿电路进行反馈控制，使用遗传算法对 PID 参数进行优化，最终控温稳定度高达 0.2 mK，很大程度地抑制了饱和吸收谱线的左右晃动，为实现激光器饱和吸收稳频提供了保证。除此之外，此温控系统同样适用于其他需要精密控温的场所，本文的设计方法也可为其他温控系统的设计提供参考。

1　激光器温控系统设计

1.1　控温需求分析

为了合理设计温控系统，首先对 DFB 激光器饱和吸收稳频系统的控温需求进行简要分析。本文采用的是 Nanoplus 公司的 DFB 激光器，可实现基于^{87}Rb 原子 D1 线跃迁频率的饱和吸收稳频。经过初步控温，在激光器温度为 34 ℃、稳定度为 2 mK 时，扫描激光器工作电流观测到饱和吸收谱（如图 1 所示）。但此时谱线有明显的左右晃动现象，晃动范围约为 100 MHz，超出^{87}Rb 原子 D1 线饱和吸收峰的带宽（约为 50 MHz），导致 DFB 激光器饱和吸收稳频环路难以被锁定，因此考虑将控温稳定度进一步提高到 0.2 mK，此时激光器的温调率[6]可由下式表示：

$$\Delta f=\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}T}\Delta T=\frac{c}{\lambda^2}\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}T}\Delta T \tag{1}$$

式中，光速 $c=3\times10^8$ m/s，波长 $\lambda=795$ nm，温调率 $\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}T}=0.05$ nm/K。当温差 $\Delta T=2\times10^{-4}$ K，温度变化引起的光谱抖动范围为 $\Delta f=4.75$ MHz，小于谱峰带宽的 1/10，可实现饱和吸收稳频。

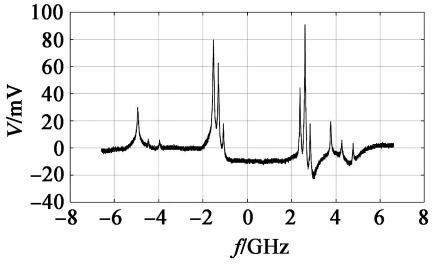


图 1　饱和吸收谱

综合上述实验与数据分析结果，得到精密控温系统设计的关键指标：控温点为 34 ℃左右，控温稳定度在 0.2 mK 以内。

1.2　温控系统设计

温控系统原理框图如图 2 所示，实验选用的激光器内部封装了热敏电阻和半导体制冷器（Thermo Electric Cooler，TEC），其中，热敏电阻作为测温元件，TEC 作为温度补偿元件。热敏电阻实时检测当前温度，并与目标温度比较，将得到的温差信号作为误差信号输入 PID 补偿电路；PID 补偿电路输出控制信号调整 PWM 控制器，驱动 TEC 实现加热或制冷，反馈调整当前温度并最终实现温度稳定。

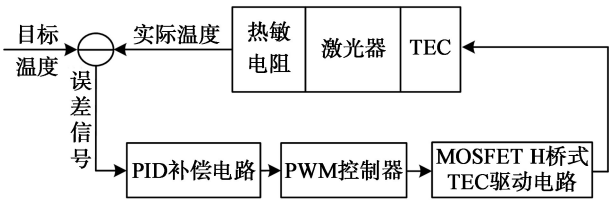


图 2　温控系统原理框图

常见的基于 TEC 控温的实现方式有两种，一种是采用分立元件实现，另一种是采用专用的集成芯片实现。前者较为繁琐，调试困难；后者操作简单，集成度高，性能更稳定，因此本文选用专用的 TEC 控温芯片。常见的 TEC 控温芯片[7]如表 1 所示。

表 1　常见 TEC 控温芯片

公司	芯片	片上资源	特点
MAXIM	MAX1968	驱动 TEC 的 MOSFET	需要外接差分运放、PID 控制运放，双向控温
	MAX1969	驱动 TEC 的 MOSFET	需要外接差分运放、PID 控制运放，单向控温
	MAX1978	差分运放、PID 控制运放、驱动 TEC 的 MOSFET	双向控温
	MAX1979	差分运放、PID 控制运放、驱动 TEC 的 MOSFET	单向控温
ANALOG	ADN8830	差分运放、PID 控制运放	需要外接驱动 TEC 的 MOSFET、控温精度低

综合上述芯片特点，MAX1978 芯片高度定制，可提供最高为±3 V 的 TEC 双向电压来实现 TEC 的制冷或加热，其需要外接的电路少、简单实用、控温精度高、效率高[8]，因此本文选用 MAX1978 芯片来设计精密控温系统。电路框图如图 3 所示，TEC 的两端分别接在 OS1 和 OS2 引脚处；热敏电阻 R_t 一端接 FB^- 引脚，另一端接地。温度变化时测温电桥失衡，电桥两臂的压差信号经差分放大 50 倍后输入 PID 补偿电路；PID 补偿电路输出的控制信号通过 CTLI 引脚进入 PWM 控制器，进而调整流入 TEC 电流的大小和方向，最终实现温度校正。测温电路和 PID 补偿网络是本系统的设计重点，后文将进行详细介绍。

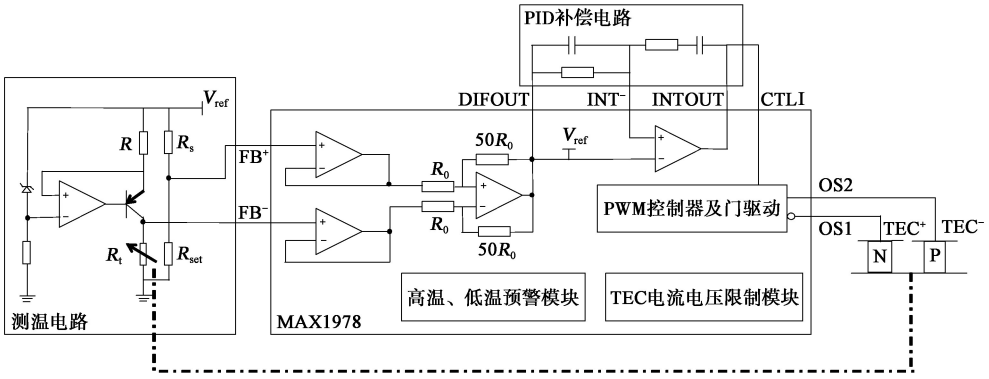


图 3 精密控温系统电路框图

2 基于线性化电桥的测温电路

常见的测温电路为惠斯通电桥电路模型。如图 4(a)所示，R_s 为分压电阻，R_t 为热敏电阻，R_{set} 阻值与目标温度下热敏电阻阻值相同。若当前温度与目标温度不等，则电桥失衡，电桥两臂出现压差，压差将反映热敏电阻阻值变化。当 $R_t=R_{set}+\Delta R$ 时，电桥两臂压差为

$$\Delta V=V_{ref}\frac{-R_s\Delta R}{(R_{set}+R_s)(R_{set}+R_s+\Delta R)} \tag{2}$$

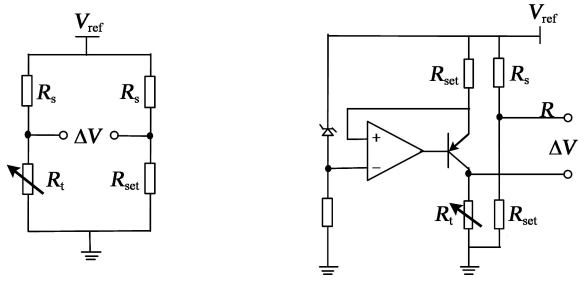
由上式可知，改进前的惠斯通电桥电路的压差与热敏电阻阻值变化成非线性关系，不方便测量和计算。为此，本文引入恒流源对电桥电路进行线性优化，如图 4(b)所示，恒流源的电流为

$$I=\frac{V_{ref}}{R}=\frac{V_{ref}}{R_{set}+R_s} \tag{3}$$

当 $R_t=R_{set}+\Delta R$，此时压差与阻值变化的关系为

$$\Delta V=V_{ref}\left(\frac{R_{set}}{R_{set}+R_s}-\frac{R_{set}+\Delta R}{R_{set}+R_s}\right)=\frac{-V_{ref}\Delta R}{R_{set}+R_s} \tag{4}$$

观察上式可知，改进后的线性电桥电路压差与热敏电阻的阻值变化成线性关系。需要注意的是，为保证控温精度，尽可能降低噪声，本系统选用高精度、低温漂（2×10^{-6}/℃）、低噪声（1 $\mu V_{p\text{-}p}$）的 ADR4520BRZ 电源芯片产生的 2.048 V 电压作为电桥电路参考电压，电桥电阻选用低温漂（5×10^{-6}/℃）、高精度（0.01%）的金属膜电阻。考虑 34 ℃的控温需求、热敏电阻温度和阻值关系以及金属膜电阻可选电阻值等因素，最终选择 $R_{set}=6.75$ kΩ，$R_s=10$ kΩ。



(a) 传统惠斯通电桥电路 (b) 线性化后的电桥电路

图 4 优化前后的测温电路

3 基于遗传算法的 PID 参数整定

PID 补偿电路如图 5 所示，由于其具有简单易用、鲁棒性好等特点，被广泛应用于自动控制领域。本文中，芯片 MAX1978 外接的 PID 补偿电路是整个系统最重要的部分，PID 参数的整定效果直接决定控温的精度和稳定度[9]。通常，PID 控制方程[10]可表示为

$$u(t)=K_Pe(t)+K_I\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+K_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中，$u(t)$为控制信号，$e(t)$为误差信号，K_P 为比例系数，K_I 为积分系数，K_D 为微分系数，可分别表示为 $K_P=-\left(\frac{R_2}{R_1}+\frac{C_1}{C_2}\right)$，$K_I=-\frac{1}{R_1C_2}$，$K_D=-R_2C_1$。

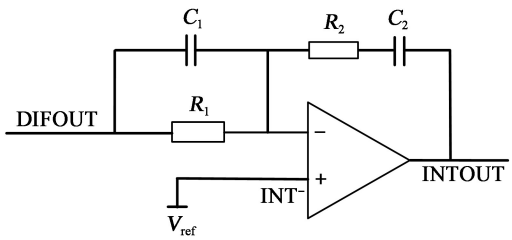


图 5 PID 补偿电路示意图

对于模拟 PID 网络，常用的 PID 参数整定方法

有 Z-N 临界比例度法[11]、衰减曲线法和经验整定法等，这些整定方法通常需要多次实验，调试周期一般较长，过程比较繁琐，要求调试人员具有丰富的调试经验，因而调试结果受调试人员主观因素影响大。为了在短时间内获得最优的 PID 参数，本文使用遗传算法进行搜寻。

遗传算法是一种模拟自然选择和生物进化机制随机搜索找寻全局最优解的算法[12]。它将问题编码为群体，将适应度函数作为评价群体中个体优劣的标准，采用遗传算子构建新群体，在群体迭代过程中，个体逐渐接近适应度函数最小值，最终获得问题的最优解。不同于传统优化算法的单点搜索，遗传算法是对群体进行搜索，故具有隐含的并行性，搜索范围广，速度快。本文利用 Matlab 中的 ga 函数实现遗传算法，工作流程如图 6 所示。

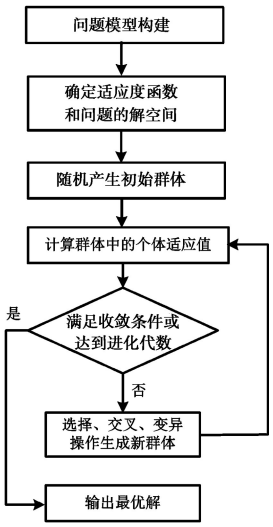


图 6　遗传算法工作流程框图

具体分析如下：(1)为了对系统进行定量分析，需要构建出系统的数学模型。本系统的 S 域模型如图 7 所示，其中受控对象模型通常是带有纯延时的一阶迟滞系统[13]，其参数获取方法是将 PID 网络断开，在 MAX1978 的 CTLI 引脚输入阶跃信号，可通过观测热敏电阻两端电压的阶跃响应曲线得到。

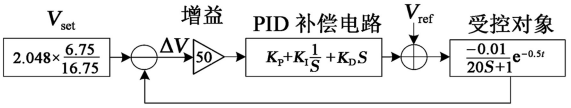


图 7　控温系统 S 域模型

(2)遗传算法的目的是找到最优的代表问题的解的矢量，使适应度函数的值取全局最小[13]，本文选择 K_P，K_I，K_D 作为解矢量，由于本温控系统强调稳态值波动小，超调也尽量小，因此设置适应度函数中的稳态值权重为 1 500，超调量权重为 100。适应度函数如下：

```
J=0 %适应度函数输出值
for i=1:L
err=(yd-y(i))*50;%误差
if(i<50)
  J1=J1+i*abs(err); %初始权重低
else
  J1=J1+1500*err^2;%稳定后权重高
    end
end
J=J1+100*pos;%pos 为超调量
```

(3)遗传算子的作用是基于旧群体产生新群体，包括选择算子、交叉算子、变异算子。选择算子是按照一定规则将旧群体中适应度高的个体选择出来；交叉算子是将两父子个体编码互换一部分形成子个体；变异算子将子个体的部分编码改变，产生变异个体。Matlab 为 ga 函数提供了预实现的遗传算子，本文选用 selectionstochunif 作为选择算子、crossoverscattered 作为交叉算子、mutationgaussian 作为变异算子。

(4)当最优个体适应度达到阈值或群体适应度，不再上升或者迭代次数达到阈值，算法终止[14]。最终仿真得到的最优解为 $K_P=0.1$，$K_I=0.073\ 8$，$K_D=0.05$。由于噪声的存在、电容电阻的可选值有限等原因，实际系统与构建的模型仍有一定差距，PID 参数需要进行微调。经过调整，最终确定 $R_1=1.5\ \mathrm{M\Omega}$，$R_2=75\ \mathrm{k\Omega}$，$C_1=0.47\ \mu\mathrm{F}$，$C_2=10\ \mu\mathrm{F}$，此时 $K_P=0.097$，$K_I=0.067$，$K_D=0.035\ 25$。

4　实验结果

为测试控温效果，本实验采用安捷伦的六位半数字万用表测量热敏电阻两端的电压变化曲线，进而计算出温度的变化范围。实际操作过程中，将万用表接在 FB^- 引脚处即可。作为对照，实验先测量了没有控温时(温控板不连接激光器 TEC) MAX1978 芯片 FB^- 引脚的电压变化(图 8)；之后，对激光器进行控温(温控板连接激光器 TEC)，分别测量了 FB^- 的电压变化(图 9)和 FB^- 与 FB^+ 的压差曲线(图 10)。由测试结果可得，温控前，激光器的温度沿着一个方向漂移且变化范围较大；控温后，

激光器的温度趋于稳定，热敏电阻的压差变化稳定在 5 μV 以内。

热敏电阻阻值随温度变化的关系式和线性电桥分压关系分别可表示为

$$R_t = R_0 \cdot \exp\left[B\left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \tag{6}$$

$$R_t = \frac{V}{V_{ref}} \cdot (R_{set} + R_s) \tag{7}$$

式中，$B = 3\,930$，$R_0 = 10\ \text{k}\Omega$，$T_0 = 298.15\ \text{K}$，$V_{ref} = 2.048\ \text{V}$，$V$ 为热敏电阻电压，R_t 为热敏电阻在温度为 T_t 时的阻值。由式(6)～(7)可得：当 $V \in [0.817\,826, 0.817\,831]$ V，$T \in [34.382\,535, 34.382\,712]$ ℃，即温度变化范围为 0.177 mK(如图 11 所示)，达到预期目标。经观测，此时饱和吸收谱的谱线晃动范围明显减小，约为 5 MHz，满足稳频的要求。后续实验也成功在此控温条件下实现了 DFB 激光器的饱和吸收稳频。

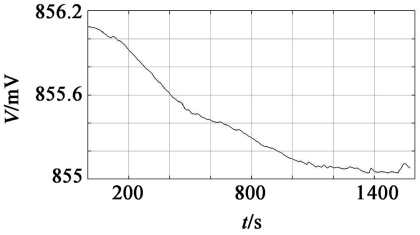


图 8 控温前热敏电阻电压变化曲线

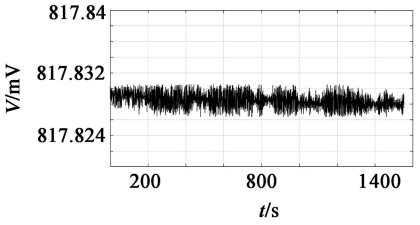


图 9 控温后热敏电阻电压变化曲线

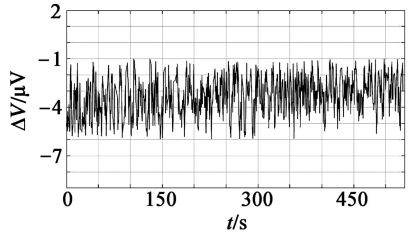


图 10 FB^- 与 FB^+ 压差曲线

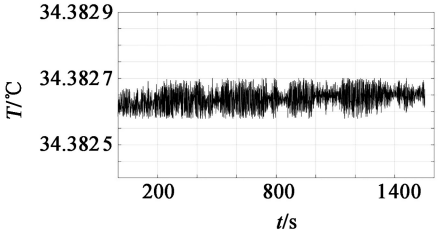


图 11 温度变化曲线

5 结论

本文基于 DFB 激光器饱和吸收稳频的控温需求，详细讨论了精密控温系统的设计过程，包括控温需求分析、元器件选型、电路设计与优化、PID 参数的整定以及系统测试。不同于传统的基于 MAX1978 芯片的控制系统，本文对测温电路进行了线性优化并选用高精度的参考电压和精密电阻电容器件，有利于提高测量精度和控温精度。为缩短 PID 补偿电路参数的调试时间，本文构建了系统数学模型，利用遗传算法快速搜寻最优 PID 参数。经测试，本系统控温稳定度在 0.2 mK 以内，相比同类基于 MAX1978 控温系统设计[15-16]的稳定度提高了 1～2 个数量级。测量结果表明，本系统足以满足饱和吸收稳频的应用需求，能够尽可能降低外界温度对激光器输出波长、输出功率和线宽的影响。本控温系统在非线性光学[17]、光谱测量[18]、原子物理等领域有广阔的应用前景；由本系统精密控温的 DFB 激光器也可用于激光冷却[19]、冷原子 CPT[20]等精密物理实验。

参考文献：

[1] Hou D, Li P, Liu C, et al. Long-term stable frequency transfer over an urban fiber link using microwave phase stabilization[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 506-511.

[2] Ning B, Hou D, Zheng T, et al. Hybrid analog-digital fiber-based radio-frequency signal distribution[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2013, 25(16): 1551-1554.

[3] 陈 超，张 剑，刘新元，等. 原子饱和吸收谱谐波稳频短期稳定度研究[J]. 光学学报，2004，24(12)：1649-1652.
Chen Chao, Zhang Jian, Liu Xinyuan, et al. Study on short-term stability[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1649-1652.

[4] Urick V J, Williams K J, Mckinney J D. Fundamentals of Microwave Photonics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

[5] 张 靖，陶 桦，卫 栋，等. Rb 原子饱和吸收稳频半导体激光器系统[J]. 光学学报，2003，23(2)：197-201.
Zhang Jing, Tao Hua, Wei Dong, et al. Rb atom saturated absorption stable frequency semiconductor laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 197-201.

[6] DFB laser diodes from 760 nm to 830 nm[EB/OL]. (2020-04-08) https://nanoplus.com/fileadmin/user_upload/Data_sheets/nanoplus_DFB_760-830 nm.pdf.

[7] 贺驰光. 非制冷红外焦平面温控电路设计[D]. 武汉：华中科技大学，2013.
He Chiguang. The design of temperature control circuit of

uncooled infrared focal plane arrays[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[8] MAX1979Datasheet-MaximIntegratedProducts [EB/OL]. [2020-04-08]. http://html.alldatasheetcn.com/html-pdf/73010/MAXIM/MAX1978/25712/MAX1978.html.

[9] 阙　旻，蒋　宁，刘子骥，等. 基于MAX1978的非致冷红外焦平面温度控制系统[J]. 红外，2010，31(11)：20-24.
Que Min, Jiang Ning, Liu Ziji, et al. MAX1978-based temperature control system for uncooled infrared focal plane [J]. Infrared, 2010, 31(11): 20-24.

[10] Li Y, Ang K H, Chong C C Y. PID control system analysis and design-problems, remedies and future directions[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2006, 26(1): 32-41.

[11] Zhuang M, Atherton D P. Automatic tuning of optimum PID controllers[J]. Control Theory & Applications IEEE Proceedings D, 1993, 140(3): 216-224.

[12] 陈　丹，方康玲，陈乔礼. 遗传算法在PID参数优化中的应用[J]. 微计算机信息，2007，23(7)：42-43，75.
Chen Dan, Fang Kangling, Chen Qiaoli. The application of float-point genetic algorithm in the PID parameter optimization [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(7): 42-43, 75.

[13] 徐　晶. 基于嵌入式温度实验系统的PID控制[D]. 南京：南京理工大学，2005.
Xu Jing. PID control based on embedded temperature experimental system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.

[14] 谷　克. 遗传算法在公路路线智能决策系统中的应用研究[D]. 陕西：长安大学，2008.
Gu K. Application of genetic algorithm in intelligent decision system of highway route[D]. Shaanxi: Chang'an University, 2008.

[15] 严建锁，李少甫，刘先勇，等. 光声检测用半导体激光器温度控制电路[J]. 西南科技大学学报，2010，25(1)：60-63.
Yan Jiansuo, Li Shaofu, Liu Xianyong, et al. Semiconductor laser temperature control circuit for photoacoustic detection[J]. J. of Southwest University of Science and Technology, 2010, 25(1): 60-63.

[16] 谭中奇，龙兴武，李发明. 痕量气体光谱法检测用半导体激光器温度控制电路[J]. 仪器仪表学报，2006，27(Z3)：1909-1910.
Tan Zhongqi, Long Xingwu, Li Faming. Temperature control circuit of semiconductor laser for the spectroscopy detection of trace gas[J]. Chinese J. of Scientific Instrumentation, 2006, 27(Z3): 1909-1910.

[17] Peters E, Diddams S A, Fendel P, et al. A deep-UV optical frequency comb at 205 nm[J]. Opt. Express, 2009, 17(11): 9183-9190.

[18] 李华康. 基于半导体激光器阵列的相干光谱测量研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019.
Li Huakang. Research on coherent spectroscopy measurement based on semiconductor laser array [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[19] Raab E L, Prentiss M, Cable A, et al. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure[J]. Physical Rev. Lett., 1988, 59(23): 2631-2634.

[20] Liu X, Ivanov E, Kitching J, et al. Frequency Shift Mitigation in A Cold-atom CPT Clock[C]// 2016 IEEE Inter. Frequency Control Symp., 2016: 154-156.

作者简介：

张　玮(1995—)，女，河南省信阳市人，在读硕士研究生，主要研究方向为电路与系统的分析与设计、原子钟等；

赵建业(1972—)，男，江苏省徐州市人，博士，教授，主要研究方向为电路与系统的分析与设计、光频标、原子钟等。