光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250928001

原子磁强计中垂直腔面发射激光器温控算法研究

刘　航[1*]，王其军[2]，左战春[3,4]，苏　灿[5]，周　睿[2]，王佳琪[1]

（1. 西南石油大学 电气信息学院，成都 610000；2. 西南石油大学 石油与天然气工程学院，成都 610000；3. 中国科学院物理研究所 光物理重点实验室，北京 100190；4. 中国科学院大学，北京 100190；5. 西南石油大学 机电工程学院，成都 610000）

摘　要： 温度波动对垂直腔面发射激光器（VCSEL）的波长影响显著，在外界温度骤变的复杂环境下采用传统PID进行温度控制存在超调量大、抗干扰能力弱和自适应性能差等问题。文章通过仿真分析VCSEL温控系统的三维稳态热分布特性，建立温度控制数学模型，提出一种基于反向传播（BP）神经网络优化的PID控制方法。在MATLAB/Simulink环境中，将所提出的方法与经典PID控制、模糊PID控制进行对比仿真实验。结果表明，该方法利用BP神经网络实现在线整定PID参数，有效抑制了系统超调，显著提高了系统对环境变化的适应能力与鲁棒性，从而整体提升了温控性能，能够满足高精度原子磁强计对激光器温度稳定性的严格要求。

关键词： VCSEL温控系统；常规PID控制；模糊PID控制；BP神经网络PID控制

中图分类号： TH741；TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2026)01－0149－09

Temperature Control Algorithms for Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers in Atomic Magnetometers

LIU Hang[1], WANG Qijun[2], ZUO Zhanchun[3,4], SU Can[5], ZHOU Rui[2], WANG Jiaqi[1]

(1. School of Electrical Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, CHN; 2. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, CHN; 3. Key Laboratory of Photophysics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, CHN; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, CHN; 5. College of Electromechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, CHN)

Abstract: Temperature fluctuations significantly impact the wavelength of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs). Traditional PID control in complex environments with abrupt external temperature changes suffers from issues such as large overshoot, weak disturbance rejection, and poor adaptive performance. This paper simulates the three-dimensional steady-state thermal distribution characteristics of the VCSEL temperature control system, establishes a mathematical model for temperature control, and proposes a PID control method optimized using a backpropagation (BP) neural network. Within the MATLAB/Simulink environment, the proposed method is compared with classical PID control and fuzzy PID control through simulation experiments. Results demonstrate that this approach utilizes a BP neural network to achieve online tuning of PID parameters, effectively suppressing system overshoot while significantly enhancing the system′s adaptability and robustness to environmental changes. Consequently, overall temperature control

收稿日期：2025－09－29.

基金项目：国家自然科学基金面上项目（62175254）.

*通信作者：刘　航

performance is improved, meeting the stringent requirements for laser temperature stability demanded by high-precision atomic magnetometers.

Key words: VCSEL temperature control system; conventional PID control; fuzzy PID control; BP neural network PID control

0 引言

超高灵敏度原子磁强计是基于量子相干原理的精密测量仪器,通过监测碱金属原子气室中自旋极化态对微弱磁场的量子态演化来实现磁场探测,在生物磁成像、地磁导航等前沿领域具有主要应用价值。其仪器灵敏度与长期稳定性,直接受限于激光光源的性能参数。垂直腔面发射激光器(VCSEL)凭借其特有的低功耗、天然单纵模特性以及小体积等优势,已成为实现芯片级原子磁强计的理想光源选择。然而,VCSEL的激射波长具有约0.06 nm/℃的温度敏感特性,而原子磁强计要求激光波长必须稳定在碱金属原子D线跃迁(如Cs原子D1线894.6 nm)的±0.5 nm范围内。这种严苛的波长锁定需求,本质上转化为对激光器工作温度控制精度的高标准要求,温度波动需控制在毫开尔文量级。

当前激光器温控技术研究呈现显著的不均衡,分布式反馈(DFB)激光器占主导,而VCSEL的相关研究则相对匮乏。张弛等[1]基于双气室光泵磁力仪架构,设计了注入电流调制稳频方法,实现了0.002℃的温度控制精度,并在10 s观测周期内达成4.36×10^{-10}的波长稳定度。韩天等[2]采用扰动观测器与内模控制结合的策略,在70℃温度下实现±0.003℃的控制精度,常温下控制精度提升为±0.001 5℃。骆曼箬等[3]使用数字比例积分微分控制与模糊控制算法进行激光的温度控制,使温度波动在±0.005℃内。刘宇等[4]的研究拓展了温控应用场景,基于Zynq7020芯片开发的无磁高频加热电路,采用增量式PID算法实现高频信号幅度调制,其在200 s内便可升温至80℃,且温度稳定性优于±0.003℃。

截至目前,现有商用温控方案虽可将VCSEL温度稳定在±10 mK量级,但仍难以满足下一代原子磁强计对小于1 mK级温稳、小于1 min热平衡时间及小于0.1 mW功耗的苛刻需求。因此,亟需研究面向原子磁强计应用的VCSEL高精度温度控制新机理、新结构,实现高温度稳定性和快速响应的协同优化,为芯片级原子磁强计向地磁极限灵敏度和可大规模部署迈出关键一步。

1 VCSEL温控系统热性质的理论分析

1.1 VCSEL温控系统热量来源

温控系统主要由VCSEL激光器、热沉、半导体制冷器(TEC)和NTC热敏电阻构成。在该系统中,热量的来源主要包括VCSEL在工作过程中因载流子注入而产生的焦耳热、非辐射复合热以及有源区内部的光吸收与散射导致的发热。此外,驱动电流波动、环境温度变化以及激光器与热沉之间的接触热阻也会引入额外的热扰动。为保障VCSEL激射波长稳定锁定于Cs原子D1吸收线,必须通过TEC与热沉协同工作,实现对上述热源的高精度动态补偿,从而维持激光器工作温度的长期稳定,确保原子磁强计的探测灵敏度与信噪比。

1.1.1 VCSEL的温度

VCSEL主要由P-DBR、有源区和N-DBR构成。为实现激光发射,DBR需要具备极高的反射率(通常超过99%),以提供足够的光增益。然而,高反射率会增加器件的串联电阻,导致内部温度上升。这种自热效应会改变材料的折射率和禁带宽度,从而影响光电性能。

与边发射激光器相比,VCSEL的内部热量来源更为复杂。除有源区载流子非辐射复合所产生的热量外,P-DBR、N-DBR、欧姆接触层及衬底等结构在电流注入过程中也会因串联电阻而产生焦耳热[5]。这些热量若不能及时耗散,将在器件内部积聚,引起温度上升,进而导致激射波长漂移、阈值电流增大和输出功率波动,严重影响激光频率的稳定性,尤其在对波长稳定性要求极高的原子磁强计等应用中构成关键性能瓶颈。

在有源区,电子注入过程中会产生多种热量来源,包括非辐射复合、自发辐射复合、自由载流子吸收以及光的衍射等。焦耳热则源于VCSEL中各层结构的体电阻。当电流通过这些电阻时,会导致热

量的产生。DBR由多层介质膜组成，其电阻率受各层厚度影响。在高功率VCSEL中，P-DBR产生的焦耳热通常大于N-DBR，因此在研究VCSEL热效应时，通常重点关注有源区和P型DBR产生的热量。

1.1.2　TEC温度

TEC在温控系统中扮演着主动加热或制冷的角色，但其本身也是一个重要的热量产生源，其结构示意图如图1所示。TEC热量来源主要有两部分：首先，焦耳热（I^2R损耗）驱动TEC的电流流经其内部的半导体热电偶臂（N型和P型）时，由于材料自身的电阻，不可避免地会产生热量，这部分热量与驱动电流的平方成正比[6-7]；其次，当TEC工作时（无论是处于制冷还是加热模式），其内部会发生帕尔贴效应的逆过程热传递，同时不可避免地伴随热传导。

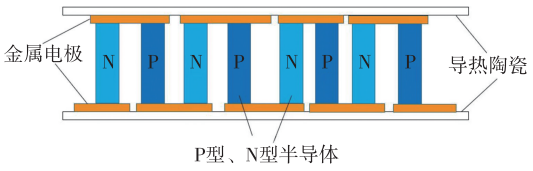


图1　TEC的结构示意图

TEC受电流驱动、实现热量从冷端向热端泵送的过程中，维持该泵热作用需消耗额外的电能，并伴随产生焦耳热。其关键热学特性在于，TEC所泵送的热量与其内部由热端向冷端传导的热量，最终均累积于热端界面并释放。因此，热端向散热系统散逸的总热量必然显著超越冷端所吸收的热量。此热量差值主要源于TEC自身消耗的电功率，以及克服内部热传导所需的等效功。该差值所代表的额外热生成，构成了系统整体热负荷的重要组成部分。

1.2　VCSEL温控系统仿分析

VCSEL的热效应是其核心物理特性之一，源于其工作时固有的多层垂直结构。当电流流经P型与N型分布式布拉格反射镜（DBR）、有源区、欧姆接触层等结构时，会因串联电阻产生焦耳热；此外，有源区内的非辐射复合过程也会将部分电能转化为热能。这些热量积累导致器件温度升高，进而引发阈值电流增大、激射波长红移、输出功率降低乃至发生功率翻转等负面效应。这也正是早期VCSEL难以实现室温连续工作的主要障碍。

VCSEL在结构上可近似为一个圆柱体，但由于其内部包含多个薄膜层，各层在材料种类、成分比例及厚度等方面均存在差异，因此在建立模型时需要确保其合理性。本文主要针对激光器在稳定工作状态下的热行为（稳态热分布）展开研究。考虑到VCSEL的有源区以及DBR均由周期性纳米级薄膜构成，单层厚度仅为几纳米至数十纳米，这为有限元建模及稳态热分析带来了较大挑战。为此，本文在仿真中采用了等效建模策略，将DBR结构简化为单层均匀材料。同时，对模型中某些较小的部分进行了合理简化与忽略：例如电极材料（如Au）通常具有较高的热导率，因此对整体热分析的影响较为有限；为了在计算复杂度和模型真实性之间取得平衡，省略了氧化限制层[8-9]。基于此简化思路在仿真软件中建立如图2所示的仿真模型。

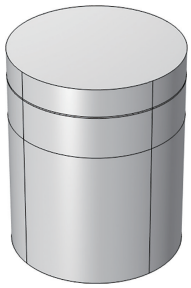


图2　简化后的VCSEL结构图

基于VCSEL内部热成机理与结构参数，构建了多物理场耦合热仿真模型。通过集成“电流场”与“固体传热”物理模块，量化分析焦耳效应及有源区热源对温度分布的影响。仿真设定中：（1）有源区简化为恒定热源，施加稳态电流激励；（2）衬底与环境温度设定为恒温边界条件（$T=25$℃）；（3）材料结构参数依据表1配置；（4）采用非结构化网络剖分后执行数值求解。

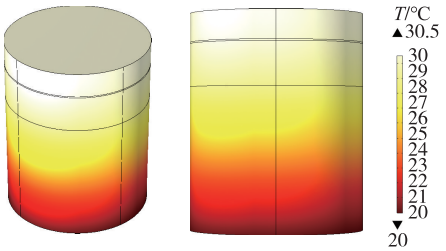
表1　模拟中使用的材料特性

材料	σ/(Ω·m^{-1})	k/(W·m^{-1}·K^{-1})	C/(J·kg^{-1}·K^{-1})	ρ/(kg·m^3)
P-DBR	1.989×10^3	64	332	4.53×10^3
Active layer	4.33×10^2	45	332	5.39×10^3
N-DBR	4.22×10^3	64	375.5	4.53×10^3
Substrate	4.5×10^7	45	327	5.32×10^3

与普通半导体激光器相比，VCSEL的热量产生机制更为复杂。当载流子进入有源区时，一部分载流子通过非辐射复合的方式进行复合，这成为主要的热量来源，器件内部产生的其他热量可以相对忽略不计。因此，主要的热量产生部分集中在图3所示的四层模型中。

仿真结果显示，有源区因热源大温度最高，顶

部DBR因势垒致电阻大温度高，有源区下方台面结构因热扩散温度也较高。因此，优化DBR层掺杂分布以降低界面势垒，在台面结构中集成微纳散热结构，可改善整体热分布均匀性，为高功率器件热可靠性设计提供理论依据。



（a）VCSEL温度分布图　　（b）有源区YZ面温度分布图

图3　VCSEL热仿真结果

此外，温度会引起谐振腔中所用材料折射率的变化，腔共振决定了VCSEL的发射波长。总之，激光器的性能取决于VCSEL的温度稳定性[10]。为了保证VCSEL的性能，围绕TEC在仿真软件中的三维稳态热-电耦合建模展开。首先，以“电热耦合”多物理场接口为核心，将固体传热与电流场双向耦合，利用温度相关的K，σ，α参数及佩尔捷-焦耳本构方程描述热电效应。其次，采用参数化几何建模，建立P型与N型半导体和陶瓷基板的实体装配体，并通过非均匀四面体网格实现臂区精细离散与基板粗化离散，完成网格无关性验证。随后，在材料库中选择相应的材料，添加到对应组分中，热端对流冷却，侧表面绝热与电绝缘，并以1.2 mA直流扫描施加电激励。求解环节利用全耦合阻尼牛顿法与自适应BDF时间步长策略，在双核并行环境下实现稳态计算。最后，通过后处理显示TEC的温度分布如图4所示，为后续器件级优化提供理论依据。

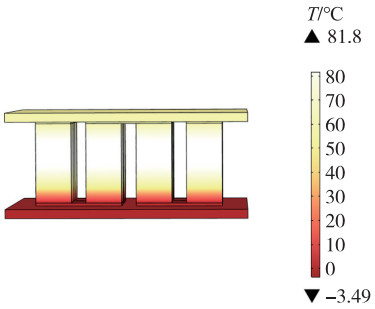


图4　TEC温度分布

1.3　VCSEL温控系统数学模型建立

为满足原子磁强计对低功耗光源的严苛需求，选用美国Vixar公司输出的单模VCSEL，其中心波长锁定于895 nm，波长容差为±0.5 nm。该器件采用TO-46封装，其内部集成热敏电阻与TEC构成温控系统以实现激光器工作温度的精确调控，内部结构如图5所示。

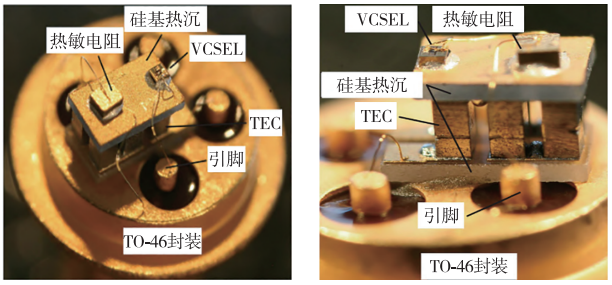


图5　VCSEL内部封装结构

VCSEL温控系统的热特性由若干储能元件共同决定，其中热沉是最大、最主要的热容，它通过吸收或释放大量的热量为整个系统提供主要的热时间常数，从而缓冲温度波动。VCSEL激光器芯片及其封装虽然热容远小于热沉，却是被控对象的核心，其温度稳定性决定系统的性能，因此其热容构成另一关键储能环节。TEC的冷端与热端具有中等规模的热容，数值介于热沉与VCSEL之间。在简化模型中常将TEC的热容并入冷端负载，但在高精度建模时应作为独立储能元件考虑其分布效应。NTC热敏电阻及其封装的热容极小，其时间常数远小于系统主导时间常数，通常可近似为纯传感器。单一材料储热物体的传热模型可以由一阶惯性模型$\frac{K}{Ts+1}$表示，针对上述VCSEL温控系统而言，系统主要由热沉、VCSEL激光器、TEC这三个储热物体构成。系统的传递函数可以等效成三个一阶惯性模型串并联而成，由如下三阶传递函数公式（1）表示：

$$G(s)=\frac{As^2+Bs+C}{Ds^3+Es^2+Fs+G} \tag{1}$$

由热学仿真结果可知，VCSEL温控系统的传递函数模型与前文提出的三阶模型符合。为了探讨三阶系统的具体参数，将采用系统辨识的方法，辨识出温控系统的传递函数模型。系统辨识是模型参数估计的有效方法，采用MATLAB中系统辨识工作箱来估计模型参数，辨识步骤如图6所示。

根据上文系统辨识的步骤，部分操作步骤如图7所示。首先采集VCSEL的温度数据，并利用MATLAB读取Modbus，将VCSEL的当前温度和

设定温度实时读取到MATLAB工作区。每0.05 s读取一个数据，一共采集10 001个样本，共50组系统辨识实验。每组实验前8 000个样本做系统辨识，后2 000个样本做数据验证。

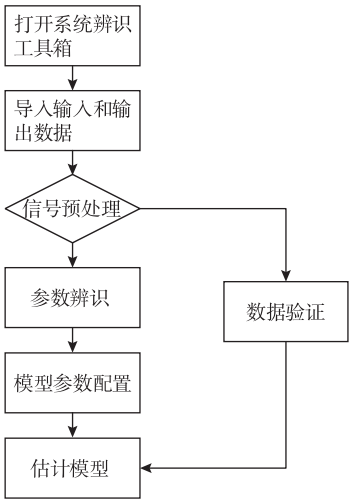
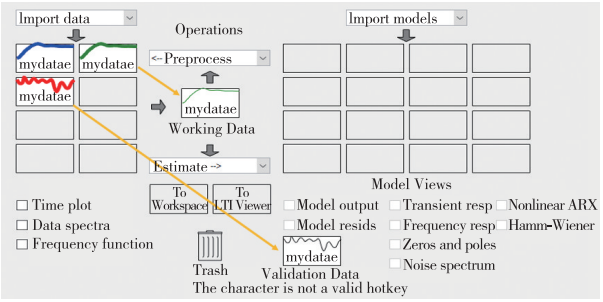
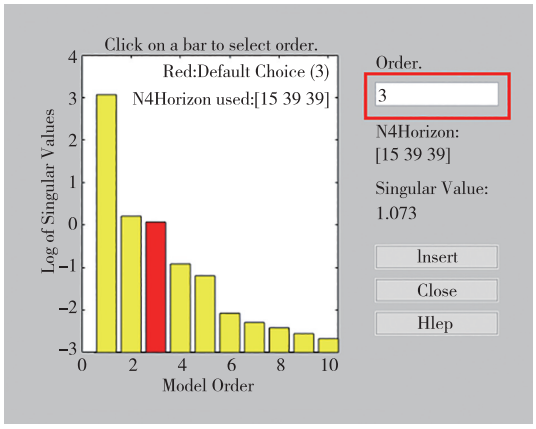


图6　系统辨识的流程图



（a）系统辨识数据处理



（b）模型阶次验证

图7　系统辨识部分操作

本实验于25℃室温环境下开展。鉴于实验环境温度存在波动，系统参数呈现可观测但幅值有限的摄动现象。经多次重复实验的统计分析表明，具体估计结果如下所示：

[0.694 7，8.026，14.778，1.0，6.013 8，21.34，14.778]

对比其中一组数据，残差平方和J=25.220 1，残差值如图8所示。

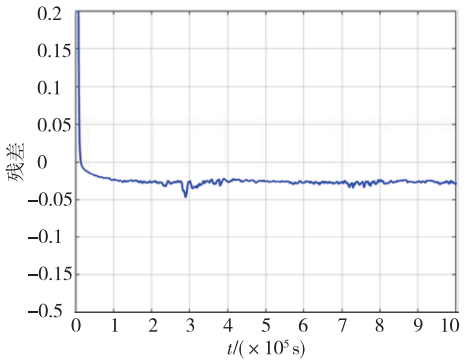


图8　模型估计残差

2　控制算法设计

2.1　常规PID控制

比例-积分-微分（PID）控制算法凭借其结构简洁、鲁棒性强、可靠性高及参数易整定等优势，在工程控制领域获得广泛应用[11]。该算法通过比例（P）、积分（I）与微分（D）环节的线性组合生成控制量，其控制框图如图9所示。

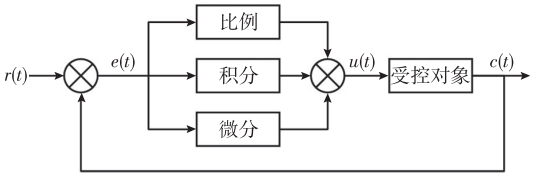


图9　PID控制算法框图

PID控制算法的数学描述如公式（2）所示：

$$u(t)=k_p e(t)+k_i\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+k_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \quad (2)$$

式中，$e(t)$是系统误差，$e(t)=r(t)-c(t)$；k_p是比例系数；积分系数$k_i=K_p/T_i$；微分系数$k_d=k_pT_d$。

通过拉普拉斯变换，PID控制算法传递函数为：

$$G(s)=\frac{U(s)}{E(s)}=K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}+T_d\right) \quad (3)$$

2.2　模糊PID控制

模糊PID控制通过引入模糊推理机制，实现了对经典PID参数的动态优化，其控制器结构如图10所示。该策略以系统偏差e及其变化率ec为输入，利用模糊规则库实时推断比例、积分与微分增益的调整量[12]，使控制器在运行过程中能够自适应地修正其参数，从而兼顾动态响应与稳态精度。

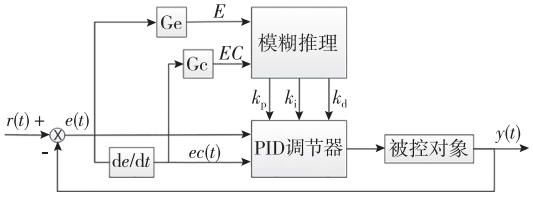


图10 模糊PID控制器结构

为优化系统动态响应性能，采用在线自适应PID参数整定策略。模糊规则控制表的构建基于领域专家经验知识库，通过归纳历史工况数据建立映射关系。模糊控制器通过实时解析输入变量在模糊论域中的隶属度分布，依据预设规则库执行连续推理决策，依次来调整Δk_p，Δk_i，Δk_d。模糊控制规则由多个相互连续隶属度组合而成，本文应用的模糊控制规则如表2所示。

表2 $\Delta k_p/\Delta k_i/\Delta k_d$模糊控制规则

$\Delta k_p/\Delta k_i/\Delta k_d$		e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ec	NB	NB/ZO/PS	NB/ZO/NS	NB/ZO/NB	NM/ZO/NB	NS/ZO/NB	NS/ZO/NM	ZO/ZO/PS
	NM	NB/NM/PS	NB/NM/NS	NM/NS/NM	NM/NS/NM	NS/NS/NM	ZO/ZO/ZO	PS/ZO/ZO
	NS	NM/NM/NS	NM/NM/NM	NS/NM/NM	ZO/NM/NM	PS/ZO/ZO	PM/ZO/PS	PB/ZO/PS
	ZO	NM/NB/ZO	NM/NM/NS	NS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	PS/PS/NS	PM/PS/ZO	PB/PS/PS
	PS	NS/ZO/PS	NS/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO	PS/PS/ZO	PS/PS/PS	PM/PS/PS	PB/PS/PB
	PM	NS/ZO/PB	ZO/ZO/PS	PS/PS/PS	PS/PS/PB	PM/PS/PS	PM/PM/PS	PB/ZO/PB
	PB	ZO/ZO/PB	PS/ZO/PM	PS/ZO/PM	PM/ZO/PM	PM/ZO/PS	PB/ZO/PS	PB/ZO/PB

根据具体的温度误差和误差变化率，查找对应的模糊规则，可以确定控制器的参数调整量，即Δk_p，Δk_i，Δk_d。这些参数调整量将被用于更新PID控制器的增益，以实现对温度的精确控制。

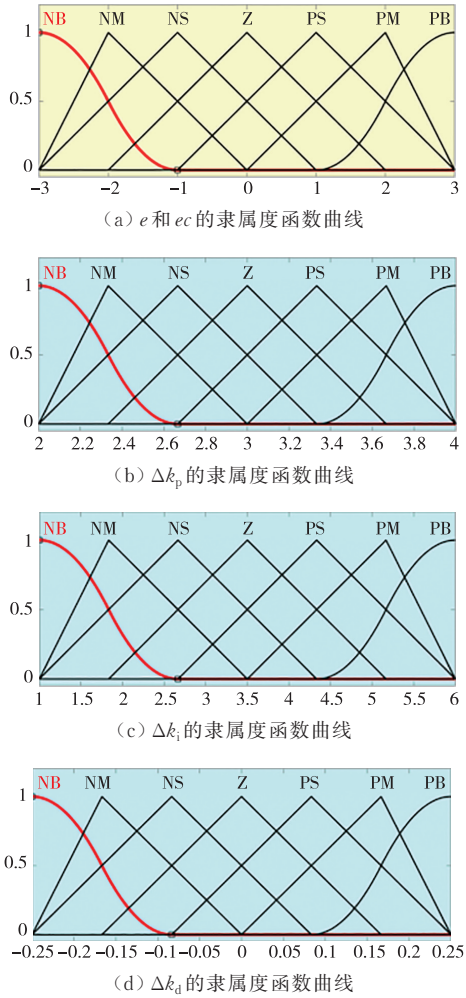
本系统定义温度误差e及其变化率ec的模糊论域为{−3，3}，PID参数增量Δk_p，Δk_i，Δk_d的论域分别为{2，4}，{1，6}，{−0.25，0.25}，语言变量采用七级语义分割：{负大（NB）、负中（NM）、负小（NS）、零（ZO）、正小（PS）、正中（PM）、正大（PB）}。隶属度函数选用三角形与高斯混合模型，其响应特性如图11所示。

基于VCSEL温控系统的控制律设计需求，构建了模糊控制规则集。该规则集通过建立温度误差e及其变化率ec与控制参数间的非线性映射关系，形成完备的模糊规则。依照模糊控制表，如图12所示，逐条输入，总共需要输入49条语句。

如图13所示，分别是Δk_p，Δk_i，Δk_d的特性曲面，在“FIS Editor”界面的“View Surface”中查看，这是根据模糊规则自动生成的。

2.3 基于BP神经网络PID控制

为实现良好的PID控制效果，需合理协调比例、积分和微分三种控制作用之间的关系，该关系往往呈现复杂的非线性特性。BP神经网络具备逼近非线性函数的能力，因此可借助学习机制，动态优化PID控制参数k_p，k_i，k_d的组合，从而实现基于BP神经网络整定的自适应PID控制[13-14]。该类控制器结构如图14所示，其核心是通过神经网格实时调整PID参数，以适应系统动态变化。



（a）e和ec的隶属度函数曲线

（b）Δk_p的隶属度函数曲线

（c）Δk_i的隶属度函数曲线

（d）Δk_d的隶属度函数曲线

图11 隶属度函数选取曲线

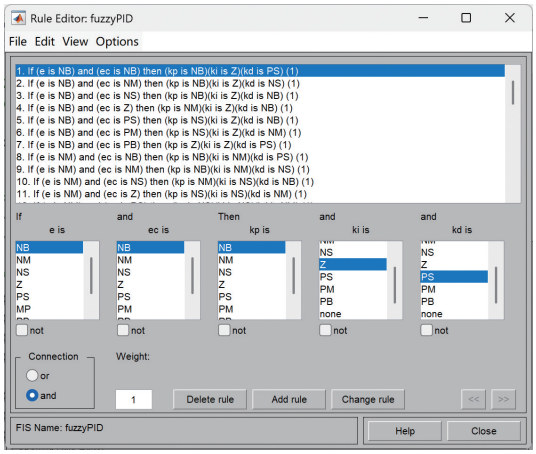
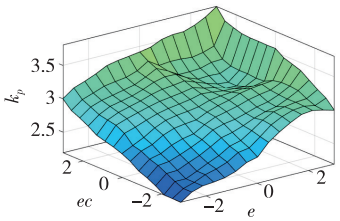
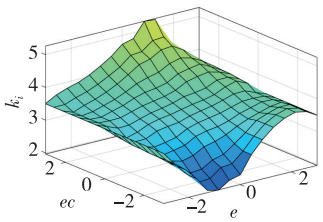


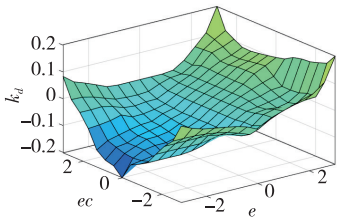
图 12　模糊规则界面



（a）Δk_p 特性曲面



（b）Δk_i 特性曲面



（c）Δk_d 特性曲面

图 13　模糊特性曲面

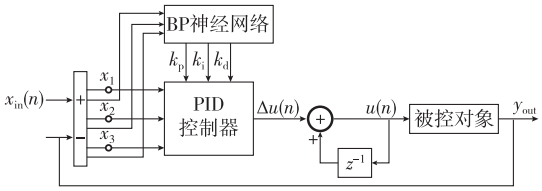


图 14　BP 神经网络 PID 控制器结构图

控制器首先根据系统误差信号构造神经网络的输入。设当前时刻误差 $e(n)=x_{in}(n)-y_{out}(n)$，则输入层的三个节点分别对应：

$$\begin{cases} x_1(n)=e(n)-e(n-1) \\ x_2(n)=e(n) \\ x_3(n)=e(n)-2e(n-1)+e(n-2) \end{cases} \tag{4}$$

隐含层的诱导局部域及输出分别为：

$$v_j^1(n)=\sum_{i=0}^{M} w_{ji}^1(n)O_i^0(n),O_j^1(n)=\varphi[v_j^1(n)],j=1,2,\cdots,Q \tag{5}$$

输出层则生成 PID 的可调参数：

$$v_k^2(n)=\sum_{j=0}^{Q} w_{kj}^2(n)O_j^1(n),O_k^2(n)=f[v_k^2(n)],k=1,2,3 \tag{6}$$

式中，$O_1^2(n)=k_p$，$O_2^2(n)=k_i$，$O_3^2(n)=k_d$。最终控制量由下式确定：

$$u(n)=u(n-1)+\Delta u(n)=u(n-1)+\sum_{k=1}^{3} x_k(n)\cdot O_k^2(n) \tag{7}$$

为优化网络权值，采用带动量项的 BP 算法，以误差函数 $\varepsilon(n)=\frac{1}{2}e^2(n)$ 为优化目标。输出层权值调整量为：

$$\Delta w_{kj}^2(n)=\eta\delta_k^2(n)O_j^1(n)+\alpha\Delta w_{kj}^2(n-1) \tag{8}$$

其中，局部梯度 $\delta_k^2(n)$ 由下式估计：

$$\delta_k^2(n)=e(n)\cdot\mathrm{sgn}\left[\frac{\partial y_{out}(n)}{\partial\Delta u(n)}\right]\cdot x_k(n)\cdot f'[v_k^2(n)] \tag{9}$$

隐含层权值调整公式为：

$$\Delta w_{ji}^1(n)=\eta\delta_j^1(n)O_i^0(n)+\alpha\Delta w_{ji}^1(n-1) \tag{10}$$

局部梯度为：

$$\delta_j^1(n)=\varphi'[v_j^1(n)]\sum_{k=1}^{3}\delta_k^2(n)w_{kj}^2(n) \tag{11}$$

根据上文原理，采用 MATLAB S 函数框架建立 VCSEL 温控系统的 BP-PID 控制器。该控制器以后馈神经网络为核心，采用 3-3-3 拓扑结构，其输入为 e、误差变化率 ec 及误差积分 ei，隐含层使用 tanh 激活函数，输出层经 Sigmoid 函数映射后生成 PID 参数 k_p，k_i，k_d。网络权重通过 Xavier 方法初始化，并通过前向传播与反向传播实现在线调整，学习率固定为 0.2。控制系统以误差平方作为性能指标，借助梯度下降法更新权重，并将输出控制量经饱和处理后作用于被控对象，从而实现闭环自适应整定。

3　控制算法仿真分析

在 MATLAB 的 simulink 中搭建的运行模块，通过不同的算法在仿真模型中进行验证。根据文

献[15]给出VCSEL温控系统温度期望值为80℃的初始值，并在8 s的时间加入干扰，通过三种不同算法检验系统达 到期望值的时间、超调量、稳定时间。三种控制算法仿真结果如图15所示。

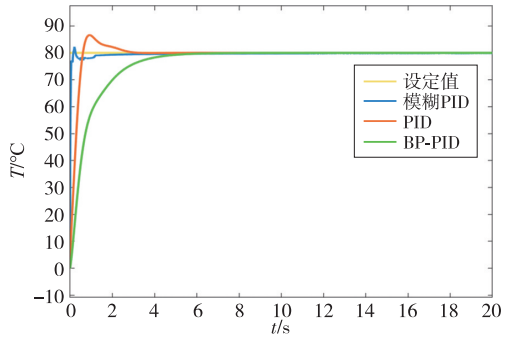


图15 三种控制方式仿真结果比较图

根据表3的数据分析，三种PID控制方法的性能差异明显。常规PID控制方法的超调量为8.236%，调节时间为2.956 s，上升时间为0.610 s，表现出较大的超调量和较长的调节时间。模糊PID控制方法在超调量和调节时间均优于常规PID，分别为2.175%和1.463 s，显示出更好的控制效果。然而，BP神经网络PID控制方法在超调量方面表现最佳，达到0%，且调节时间为4.084 s，上升时间为2.257 s，显示其动态收敛过程相对缓慢。分析认为，BP-PID调节时间较长的主要原因在于其控制律依赖于神经网络的在线学习与权值调整过程，系统在动态响应初期需经历一定的学习周期，导致收敛速度下降。综合分析，BP神经网络PID控制方法在VCSEL温控系统中具有优越的性能，尤其在控制过程中表现出快速的反应速度、良好的稳定性和高精度。

表3 三种控制方法比较数据统计表

控制方式	超调量/%	调节时间/s	上升时间/s
常规PID	8.263	2.946	0.610
模糊PID	2.175	1.463	0.152
BP神经网络PID	0	4.084	2.257

在8 s时刻加入1℃干扰，系统响应如图16所示。实验在8 s处通过阶跃式升高环境温度引入扰动，以评估不同控制策略的鲁棒性。由图16、表4所示的瞬态响应可见，BP-PID神经网络算法在扰动发生后能够迅速抑制输出偏差，其动态过程的超调量与调节时间均显著优于常规PID及模糊PID方案，从而验证了该算法在VCSEL温控系统抗干扰性能上的优势。

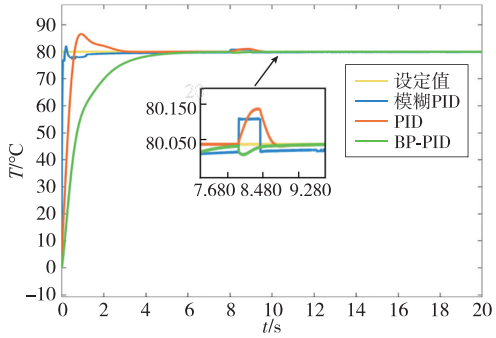


图16 加入扰动时三种控制方式仿真结果比较图

表4 加入扰动三种控制方式比较数据统计表

控制方式	超调量/%	调节时间/s
常规PID	1.350	2.258
模糊PID	0.975	1.009
BP神经网络PID	0	0.686

4 结论

本文基于有限元仿真揭示了VCSEL温控系统的三维热分布特性，并推导出其传递函数表征，进一步借助MATLAB系统辨识工具箱对模型未知参数进行估计，建立了可复现的系统数学模型。在此基础上，系统对比分析了常规PID、模糊PID与基于BP神经网络的PID三种控制策略在设定值跟踪与抗干扰性能方面的表现。仿真实验结果表明，所提出的BP神经网络PID控制算法在多项关键指标上均优于传统方法：其超调量为0%，显著低于常规PID的8.263%与模糊PID的2.175%；在施加干扰的条件下，该算法的调节时间仅为0.686 s，显著优于常规PID的2.258 s和模糊PID的1.009 s，表现出更优的动态响应性能和鲁棒性。综上所述，基于BP神经网络的PID控制策略有效提升了VCSEL温控系统的控制精度与稳定性，满足高精度原子磁强计对温度控制的严格要求，具备良好的工程应用潜力。

参考文献：

[1] 张 弛，李绍良，赵擎阳，等. 面向双气室铯光泵磁力仪的VCSEL稳频研究[J]. 激光杂志，2024，45(4)：26-34.
Zhang Chi, Li Shaoliang, Zhao Qingyang, et al. VCSEL frequency stabilization research for dual-cell Cs optical pumping magnetometer[J]. Laser Journal, 2024, 45(4): 26-34.

[2] 韩 天，张雨霖，缪存孝，等. VCSEL激光器抗干扰温度控制[J]. 红外与激光工程，2020，49(7)：20190461.
Han Tian, Zhang Yulin, Miao Cunxiao, et al. Anti-interference temperature control for VCSEL laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 20190461.

[3] 骆曼箬，李绍良，黄艺明，等. 光泵磁力仪中垂直腔面发射激光器激光波长锁定[J]. 上海交通大学学报，2024，58(4)：438-448.
Luo Manruo，Li Shaoliang，Huang Yiming，et al. Wavelength locking of vertical-cavity surface-emitting laser in optically pumped magnetometer[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University，2024，58(4)：438-448.

[4] 刘　宇，荀宇洁，曾中明，等. 基于VCSEL的无磁温控系统设计[J]. 激光杂志，2025，46(1)：16-22.
Liu Yu，Xun Yujie，Zeng Zhongming，et al. Design of non-magnetic temperature control system based on VCSEL[J]. Laser Journal，2025，46(1)：16-22.

[5] 宋依依. 垂直腔面发射半导体激光器阵列热特性分析与设计[D]. 长春：长春理工大学，2023.
Song Yiyi. Thermal characterization and design of vertical cavity surface emitting semiconductor laser arrays[D]. Changchun：Changchun University of Science and Technology，2023.

[6] 张秋波. 808nm VCSEL阵列的热特性研究[D]. 长春：长春理工大学，2020.
Zhang Qiubo. Study on thermal characteristics of 808nm VCSEL array[D]. Changchun：Changchun University of Science and Technology，2020.

[7] 董　建. 高速850nm垂直腔面发射激光器的设计与研制[D]. 北京：北京工业大学，2017.
Dong Jian. Design and study of high speed 850nm vertical cavity surface emitting lasers[D]. Beijing：Beijing University of Technology，2017.

[8] Yuan C，Li Y，Wang Y，et al. Thermal management of high-power vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. IEEE Transactions on Electron Devices，2023，70(12)：6421-6426.

[9] Hao C P，Yu Q Q，Yuan C Q，et al. Herriott-cavity-assisted closed-loop Xe isotope comagnetometer[J]. Physical Review A，2021，103(5)：053523.

[10] 程雨露，李　隆，余天锡，等. 激光去除钢材表面漆层的温度场分析[J/OL]. 光电子·激光，1-12[2025-09-28].
Cheng Yulu，Li Long，Yu Tianxi，et al. Temperature field analysis of laser removal of paint layer on steel surface[J/OL]. Optoelectronics-Laser，1-12[2025-09-28].

[11] 王晨龙. 基于微生物燃料电池的PID控制器设计及参数优化[D]. 济南：齐鲁工业大学，2025.
Wang Chenlong. PID controller design and parameter optimization based on microbial fuel cell[D]. Jinan：Qilu University of Technology，2025.

[12] 张曼玉，贺高红，李新华，等. 基于模糊控制的闪蒸罐PID控制器设计与仿真[J]. 化工自动化及仪表，2024，51(1)：48-55.
Zhang Manyu，He Gaohong，Li Xinhua，et al. Design and simulation of PID controller for flash tank based on fuzzy control[J]. Control and Instruments in Chemical Industry，2024，51(1)：48-55.

[14] 宋智勇. 基于神经网络PID的单晶提拉炉温度控制研究[D]. 南昌：南昌大学，2022.
Song Zhiyong. Research on temperature control of single crystal czochralski furnace based on neural network PID[D]. Nanchang：Nanchang University，2022.

[13] 文志远. 粒子群优化BP神经网络及其在气体流量PID控制中的应用[D]. 武汉：武汉工程大学，2024.
Wen Zhiyuan. Particle swarm optimization BP neural network and its application in gas flow PID control[D]. Wuhan：Wuhan Institute of Technology，2024.

[15] 彭　翔，郭　弘. 光泵原子磁力仪技术[J]. 导航与控制，2022，21(5)：101-121，198.
Peng Xiang，Guo Hong. Techniques in optically-pumped atomic magnetometer[J]. Navigation and Control，2022，21(5)：101-121，198.

作者简介：

刘　航(1999—)，男，四川省成都市人，硕士研究生，主要研究方向为精密仪器控制；

王其军(1982—)，男，四川省简阳市人，教授级高级实验师，硕士生导师，主要研究方向为自动控制及仪器仪表。