

基于量子纠缠源系统的高精度数字温控仪PID算法的研究

谢金,王宁*

(山西大学 物理电子工程学院,山西 太原 030006)

摘要:量子纠缠在量子信息领域具有重要的意义,其中精准控制非线性晶体的温度是制备高质量量子纠缠的关键因素之一。为了提升量子纠缠源温控系统的智能化,本文研制开发了一种基于STM32F407Vex的数字温控仪,我们采用了遗传模糊免疫比例积分微分(Genetic Fuzzy Immune Proportional Integral Differential, GFI-PID)控制算法,它将比例积分微分(Proportional Integral Differential, PID)与模糊算法(Fuzzy Algorithm, FA)、免疫反馈机理、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)相结合,可以在线整定PID参数,克服免疫参数选取不当而导致系统超调量大、响应速度过慢的问题。结果表明:相比于PID算法和模糊免疫PID(Fuzzy Immune Proportional Integral Differential, FI-PID)算法,采用该算法后,系统的超调量分别降低了6.8%和1.8%,上升时间分别降低了5%和3%,该方法降低了系统超调量,提高了系统的收敛速度和响应度,使温控仪具有较强的自整定功能和超前的自适应能力。

关键词:量子纠缠源系统;非线性光学晶体;数字温控仪;遗传模糊免疫PID算法

中图分类号:S624.4+4

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)02-0392-09

Research on PID Algorithm of High Precision Digital Temperature Controller Based on Quantum Entanglement Source System

XIE Jin, WANG Ning*

(College of Physical and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Quantum entanglement plays an important role in the field of quantum information, among which precisely controlling the temperature of nonlinear crystals is one of the most important factors in the preparation of high-quality quantum entanglement. In order to improve the intellectualization of temperature control system of quantum entanglement source, a digital temperature controller based on STM32F407Vex is developed in this paper. We adopt the genetic fuzzy immune proportional integral differential (GFI-PID) control algorithm, which combines PID with fuzzy algorithm (FA), immune feedback mechanism and genetic algorithm (GA). The PID parameters can be set online to overcome the problems of large overshoot and slow response caused by improper selection of immune parameters. The results show that: compared with PID algorithm and fuzzy Immune PID(FI-PID) algorithm, the overshoot of the system is reduced by 6.8% and 1.8%, and the rise time is reduced by 5% and 3%, respectively. This method reduces the overshoot of the system and improves the convergence speed and responsiveness of the system, letting the temperature controller has strong self-tuning function and advanced self-adaptation ability.

Key words: entangled source system; nonlinear crystal temperature control; digital temperature controller; genetic fuzzy immune PID algorithm

收稿日期:2022-12-14;接受日期:2023-03-23

基金项目:国家自然科学基金(11904219)

作者简介:谢金(1997-),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为量子通信。E-mail:xj121288@163.com

* 通信作者:王宁(WANG Ning),E-mail:99wangning@sxu.edu.cn

引文格式:谢金,王宁.基于量子纠缠源系统的高精度数字温控仪PID算法的研究[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(2):392-400. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023072

0 引言

在量子信息领域,高性能量子纠缠源具有无条件安全性、抗额外噪声能力强、有效提高传输距离和信道容量的特点,它是实现量子通信、量子计算、量子精密测量和量子传感的关键部件之一^[1-3]。自1998年奥地利物理学家Anton Zeilinger和他的研究团队在实验中首次成功制备出了量子纠缠源之后,越来越多的实验室开始致力于制备量子纠缠源系统^[4]。有效制备量子纠缠源的方法之一是使用非线性光学晶体,通过光学参量振荡(Optical Parametric Oscillator, OPO),制备得到量子纠缠源。其中精准控制非线性光学晶体的温度又是影响系统稳定性的最关键因素之一,由于非线性晶体在实际使用中会不可避免地吸收部分激光能量并发热,导致晶体温度的不稳定而引起晶体折射率的变化,因此,需要通过温控仪来对晶体温度进行恒温控制,但当温度仪的控制精度和稳定度不够高时,会影响非线性晶体满足相位匹配条件,从而降低纠缠源系统的性能^[5],因此设计一款高稳定性、高精度的温度控制仪是非常重要的。

本文设计的温度控制系统在硬件上以STM32F407Vex为控制核心,采用基于PT1000热敏电阻的非平衡电桥电路进行测温,帕尔贴驱动模块采用大功率金属氧化物半导体场效应管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)驱动并且带光耦隔离^[6-7]。在温控算法的选择上,传统PID算法是非常经典的一种线性控制算法,它的基本原理是建立一个闭环控制回路,仅仅根据期望值与测量值的偏差调节,使偏差为零。虽然传统PID控制使用简单灵活,调节方便,但它的参数固定,环境适应差^[8]。1965年,Zadeh教授^[9]首次提出了模糊数学基础理论,之后张泾周等^[10]将理论中的模糊控制和PID控制结合提出了模糊自适应PID控制算法,其算法灵活性强、控制精度高,但模糊控制自适应能力有限。2018年,汪洋等^[11]将生物免疫反馈机理^[12]与模糊PID相结合得到模糊免疫PID算法,并应用于中频感应加热炉中,结果证明该算法对非线性、大惯性、时滞性的炉温控制模型有很好的

鲁棒性,使系统响应速度加快、稳态误差减小并具有较强的抗干扰能力。然而,模糊免疫PID算法通常使用经验试凑法来选取免疫参数,易导致参数无法实时最优化。为解决这个问题,2019年,王帅^[13]在分析模糊免疫算法的基础上,提出了一种遗传模糊免疫PID算法,用于在线整定PID参数,并将算法应用在用纸机干燥部控制系统中,运行结果表明,烘缸进出口差压波动范围和气罩零位差压波动范围得到了显著降低,较好地解决了模糊免疫算法免疫参数选取有偏差导致影响控制品质的问题,进一步提高了控制系统的品质,降低耗能。本文利用遗传算法全局寻优的特性^[14-15],采用遗传模糊免疫算法,这种算法使用模糊免疫算法在线调节比例系数 K_p ,其中遗传算法优化免疫参数 K 和 η ,模糊推理规则优化积分系数 K_i 和微分系数 K_d 。经MATLAB仿真实验验证,本算法可以弥补传统PID算法和模糊免疫算法参数选取不便的缺陷,本文提出的温度控制系统具有灵敏的反应速度、高稳定度、高精度的优越性。

1 系统总体方案

设计的量子纠缠源系统的高精度温控仪的温度控制过程分为温度采集单元、微控制器、温度控制单元、被控对象、显示面板五个部分。考虑到热敏电阻PT1000成本低、体积小、测量范围宽的特点,采用其作为温度采集单元。采用STM32F407Vex系列处理器芯片作为微控制单元(Microcontroller Unit, MCU),具有优异的处理速度。采用带光耦隔离的大功率MOSFET驱动和帕尔贴元件(TEC1-12704)用作温度控制单元,通过改变提供的电流来加热或冷却目标物体。此外,显示面板通过RS232串口通信与温度采集装置和单片机连接。温度调节系统回路框图如图1所示。

首先通过热敏电阻PT1000采集被控对象的温度信息,并通过RS232串口在上位机屏幕上显示相应的温度值。同时将该值发送到STM32单片机进行遗传模糊免疫PID计算。计算后得到脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号,并将其传输给帕尔贴驱动模块,根

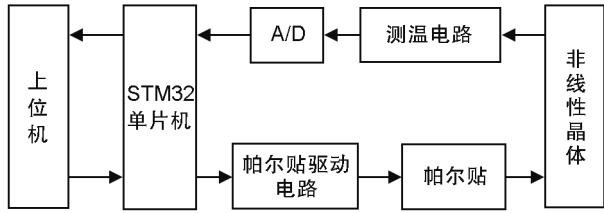


图1 温度调节系统回路框图

Fig. 1 Circuit diagram of temperature regulating system

据 PWM 信号的占空比保证提供给 TEC 的驱动器电流。一旦驱动电流加载到 TEC 上,被控对象就会被加热或冷却,因为被控对象和 TEC 通过导热硅脂紧密地连接在一起。在这种情况下,被控对象的温度会向目标温度值变化。遗传模糊免疫 PID 是整个闭环控制系统中最关键的部分,因为计算结果直接影响加载到 TEC 的驱动器电流。温度调节系统回路框图如图 1 所示。

2 系统控制算法

传统 PID 算法主要有比例系数 K_p , 积分系数 K_i 和微分系数 K_d 三个参数。调节比例系数 K_p 的作用主要是调节反应系统中给定值和实测值之差,从而减少系统偏差。调节积分系数 K_i 的作用是使反应系统消除静态误差,提高系统无差度。调节微分系数 K_d 的作用是反映系统偏差信号的变化速率,给系统一个早期的修正信号,在偏差还没有形成之前进行消除。因此,找到合适的 PID 参数对温控系统的稳定性起到至关重要的作用。一般情况下,许多控制系统都采用经验方法对 PID 三个参数进行手动调节,但这种方法不仅浪费了大量的时间,而且对不同的环境适应性差。

为了节省温控系统调节时间,提高系统的

环境适应性,以增强量子纠缠源系统的自适应能力,提高纠缠源系统的性能。本文根据量子纠缠源系统的工作状态实时调整 PID 参数,参考模糊控制规则、免疫反馈规则以及遗传优化的理论,在温度控制器中采用遗传模糊免疫 PID 算法。我们使用模糊免疫算法在线调节比例系数 K_p , 其中遗传算法进行优化免疫参数 K 和 η , 模糊推理规则进行优化积分系数 K_i 和微分系数 K_d 。遗传模糊免疫 PID 算法原理框图如图 2 所示。

2.1 模糊免疫优化的 PID 算法

模糊免疫优化的 PID 算法分为模糊推理规则算法和免疫反馈规则算法,其中免疫反馈规则是主体,免疫反馈规则具体内容如下。免疫系统可以通过免疫应答将侵入机体的抗原灭活并清除。抗原呈递细胞会监控刚进入机体的抗原,经过抗原呈递细胞刺激的 T 细胞会产生 T_h 细胞和 T_s 细胞, T_h 细胞会提高体内 B 细胞的数量,而 B 细胞产生的抗体会消灭抗原,而 T_s 细胞又对 B 细胞和 T_h 细胞有抑制作用。在机体遭遇抗原入侵前期,机体内 T_h 细胞多, T_s 细胞少,从而产生较多的 B 细胞,此时抗体浓度较高,抗体与抗原结合,消灭抗原。随着抗原的不断减少, T_s 细胞逐渐增多, T_h 细胞逐渐减少, B 细胞也在不断减少,从而抗体浓度降低,之后,免疫反馈系统在此过程中便趋于平衡了。免疫反馈机理图如图 3 所示。

假设第 k 代抗原浓度为 $\epsilon(k)$, 受到 T_h 细胞的刺激为 $T_h(k)$, 受到 T_s 细胞的刺激为 $T_s(k)$, 体内 B 细胞受到的整体刺激为 $S(k)$, 则

$$T_h = K_1 \epsilon(k), \tag{1}$$

$$T_s = K_2 f(S(k), \Delta S(k)) \epsilon(k), \tag{2}$$

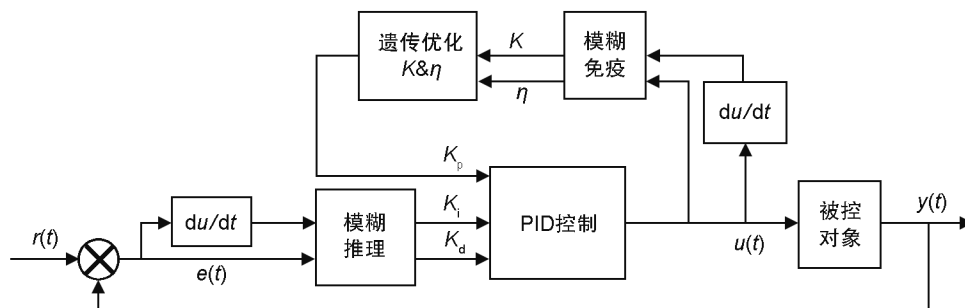


图2 遗传模糊免疫PID算法原理框图

Fig. 2 Block diagram of genetic fuzzy immune PID algorithm

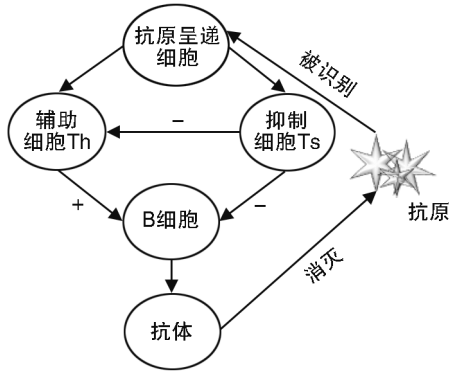


图3 免疫反馈机理图

Fig. 3 Mechanism of immune feedback

$$S(k) = T_h(k) - T_s(k), \quad (3)$$

$$S(k) = K \{1 - \eta f[S(k), \Delta S(k)]\} \epsilon(k), \quad (4)$$

其中, $\Delta S(k)$ 为 $S(k)$ 的变化量, K_1 为促进因子, K_2 为抑制因子. $f(\cdot)$ 是一个表示抑制细胞抑制程度的非线性函数.

数字PID控制通过比例(P)、积分(I)和微分(D)的线性组合,称为PID控制器,建立对预期对象的控制.离散PID的表达式如下:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j)T + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T}, \quad (5)$$

其中 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例,积分和差分系数, $e(k)$ 为输入输出差值.

将免疫反馈机理应用到PID控制中,用来整定PID的比例系数 K_p , P控制器的控制规律如下:

$$u(k) = k_p e(k). \quad (6)$$

第 k 个采样时刻给定值与输出值的差值 $e(k)$ 对应于第 k 代抗原数量 $\epsilon(k)$, 第 k 个采样时间校准器的输出参数 $u(k)$ 与第 k 代时B细胞所接受的总刺激 $S(k)$ 一致,则控制律可设计如下:

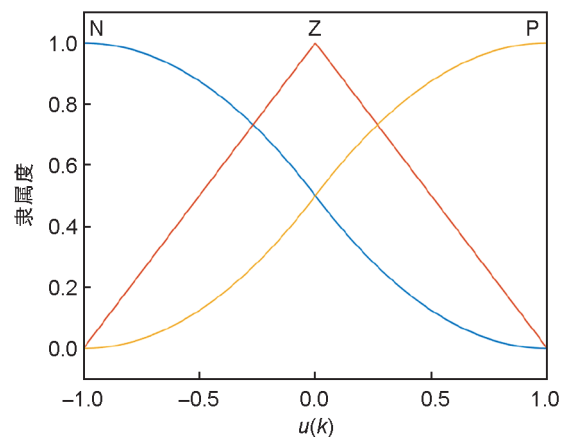
$$u(k) = K \{1 - \eta f[u(k), \Delta u(k)]\} e(k) = k_p e(k), \quad (7)$$

其中, $k_p = K \{1 - \eta f[u(k), \Delta u(k)]\}$, $K = K_1$, K_1 控制响应速度, K_1 增大响应速度会增大, $\eta = K_1/K_2$, 表示稳定效果^[16].合理地调整 K 和 η , 能使系统有较快的响应速度和较小的超调量.

公式(7)中非线性函数 $f(\cdot)$ 的值可以通过模糊推理规则获取,模糊推理规则算法的流程主要包括模糊化、规则库、模糊推理、解模糊四部

分,模糊化是指:在模糊控制系统中,将系统当前偏差以及当前偏差与上一时刻偏差的变化率作为系统输入,然后对这两个输入量进行尺度变换,确定各输入量的模糊语言和选择相应的隶属度函数,最终将其转换为系统可识别的模糊量的过程.规则库是指根据人类专家的经验建立模糊规则库,模糊规则库包含众多控制规则,是从实际控制经验过渡到模糊控制器的关键步骤.模糊推理是指基于知识库的推理决策.这些模糊量经过规则库以及模糊推理以后得到我们所需要的输出值的模糊量,模糊推理选择Mamdani推理法.解模糊的主要作用是将推理得到的控制量转化为控制输出.所以我们的输出模糊量经过解模糊操作之后得到最终整定后的输出值,解模糊选择centroid重心法.本文中PID控制器的输出数值 $u(k)$ 、输出变化数值 $\Delta u(k)$ 作为fuzzy控制器的输入值,非线性函数的数值作为输出.根据论域和隶属度之间的关系,可以得到相应的模糊语言变量,进而确定非线性函数 $f(\cdot)$.反复调整隶属度函数,可以提高系统的控制精度. $u(k)$ 论域分为三个模糊子集并设定其范围为 $[-1, 1]$,隶属度函数为图4所示, $\Delta u(k)$ 论域分为两个模糊子集并设定其范围为 $[-1, 1]$,隶属度函数为图5所示;非线性函数 $f[u(k), \Delta u(k)]$ 论域分为三个模糊子集并设定其范围为 $[-1, 1]$,隶属度函数如图6所示.

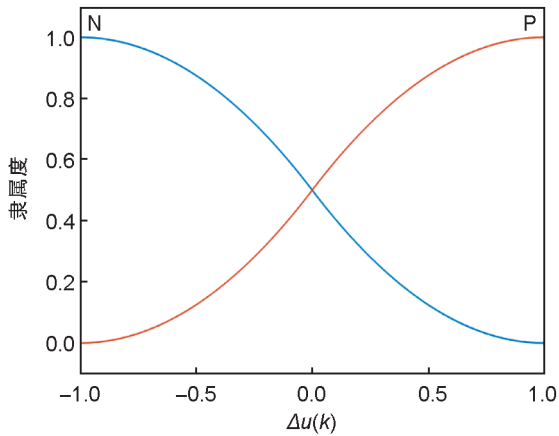
PID的积分系数 K_i 和微分系数 K_d 由模糊控



注: N、Z、P 分别表示模糊子集负、零和正.

图4 输出值 $u(k)$ 的隶属度函数图

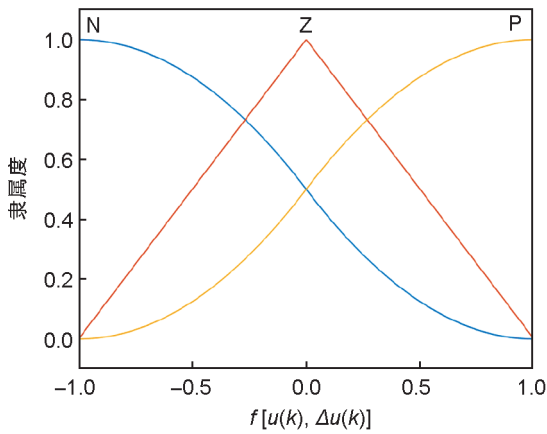
Fig. 4 Membership function graph of the output value $u(k)$



注:N、P分别表示模糊子集为负、正。

图5 输出变化量 $\Delta u(k)$ 的隶属度函数图

Fig. 5 Membership function graph of the output variation $\Delta u(k)$



注:N、Z、P分别表示模糊子集为负、零和正。

图6 非线性函数 $f[u(k), \Delta u(k)]$ 的隶属度函数图

Fig. 6 Membership functions graph for nonlinear functions $f[u(k), \Delta u(k)]$

制器来整定,模糊整定公式如下:

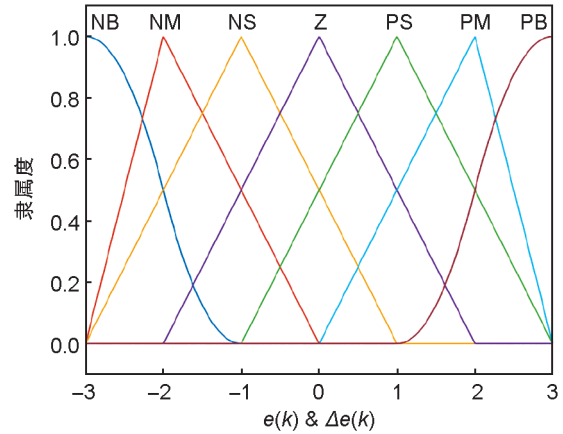
$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i, \quad (8)$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d, \quad (9)$$

其中, K_{i0} 和 K_{d0} 为PID控制器初始参数, ΔK_i 和 ΔK_d 为模糊控制器整定参数, K_i 和 K_d 为PID控制器最终参数。

模糊控制的整定原理是输入误差值 $e(k)$ 以及误差变化量 $\Delta e(k)$ 的模糊值到模糊控制器中, 这些模糊量经过模糊控制规则表查找^[17-20], 从而输出对应的 $\Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊量, 经过解模糊操作之后得到整定后的 $\Delta K_i, \Delta K_d$ 的值, 解模糊选择 centroid 重心法。根据输入误差值和误差变化量的实际变化, 输入误差值 $e(k)$ 以及误差变化量 $\Delta e(k)$ 论域同时分为七个模糊

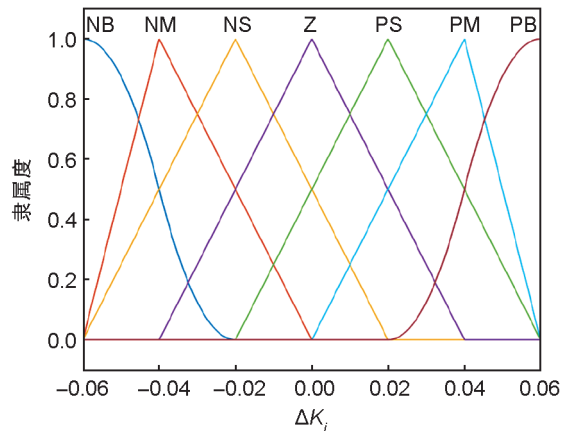
子集并设定其范围为 $[-3, 3]$, 隶属度函数为图7所示。我们将 $\Delta K_i, \Delta K_d$ 的论域变化分别设定为 $[-0.06, 0.06]$ 和 $[-3, 3]$, 这是根据它们的实际变化量决定的, 隶属度函数为图8和图9所示。



注:NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB分别表示模糊子集负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。

图7 误差值和误差变化量 $e(k)$ & $\Delta e(k)$ 的隶属度函数图

Fig. 7 Membership function graph for the error value and the amount of error change $e(k)$ & $\Delta e(k)$



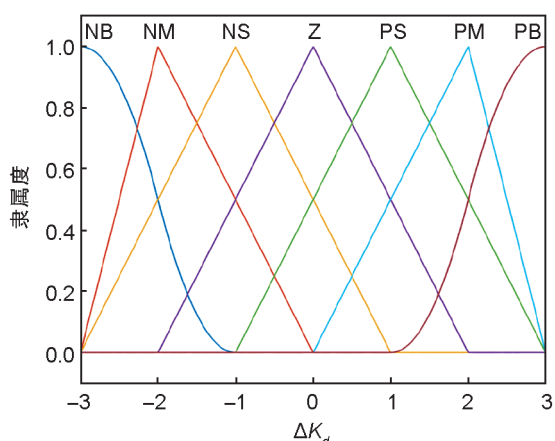
注:NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB分别表示模糊子集负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。

图8 积分系数 ΔK_i 的隶属度函数图

Fig. 8 Membership function graph graph of the integral coefficient change ΔK_i

2.2 遗传模糊免疫PID控制

在免疫公式中还存在两个参数 K 和 η , 这两个参数一般由专家整定法来确定, 但是太过于依赖专家经验, 不仅耗时过长, 而且得到的参数未必是最优值, 在此处我们使用遗传算法^[21-22]来对这两个参数进行优化, 遗传算法是



注:NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB分别表示模糊子集负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。

图9 微分系数 ΔK_d 的隶属度函数

Fig. 9 Membership function graph of the differential coefficient change ΔK_d

仿照自然生物进化过程并寻求最优解的方法。本文中遗传算法的具体执行过程是,确定两个参数 K 和 η 的初始种群,这个种群是由经过二进制编码的一定数目的个体组成,本文中设定的个体数目是50。初始种群产生之后,在每一代,根据问题域中个体的适应度情况选择优秀的个体,最优指标函数 J 是适应度函数的倒数,最优指标函数 J 越小,个体适应度越大,并借助交叉概率、变异概率对优秀的个体进行组合、交叉跟变异操作,产生出新的解集的种群,经过多次循环迭代操作,末代种群中的最优解经过解码,可以作为问题近似最优解,本文设置迭代次数为100次,经过100次的迭代操作,得出我们所需最优的 K 和 η 两个免疫参数值。遗传算法优化免疫参数 K 和 η 流程如图10所示。

在本文中,我们根据对控制性能的要求可以确定最优指标函数 J 、 P_c 交叉概率和 P_m 变异概率^[23]

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} k [\omega_1 |e(k)| + \omega_2 u^2(k)] T_s + \omega_3 T_u, \quad (10)$$

其中, $e(k)$ 为温控系统的误差量, $u(k)$ 为温控系统的输出, T_s 为采样间隔时间, T_u 为温度上升的时间, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权值, $\omega_1 = 0.999$, $\omega_2 = 0.001$, $\omega_3 = 10$ 。

交叉概率:

$$P_c = \frac{1}{1 + e^{-\alpha_1 \Phi}}, \quad (11)$$

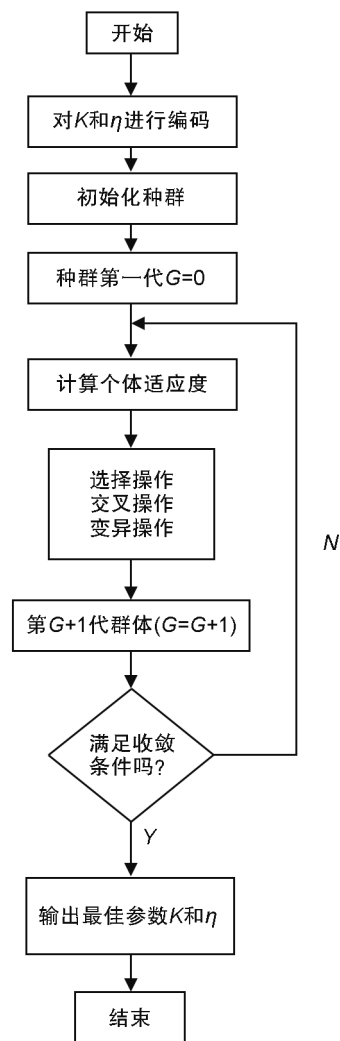


图10 遗传算法优化免疫参数流程图

Fig. 10 Flow chart of immune parameter optimization by genetic algorithm

变异概率:

$$P_m = 1 - \frac{1}{1 + 0.1 \times e^{-\alpha_2 \Phi}}, \quad (12)$$

其中, α_1 、 α_2 是概率调整概率,这里 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。 Φ 是优良个体趋同度。

3 仿真结果

根据系统原理,又由于晶体的温度具有非线性以及滞后性的特点。可得出系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s}, \quad (13)$$

其中 K 为放大增益, T 为时间常数, τ 为滞后时间,根据温控装置实际电路图以及相关测量的数据,设置 $K = 1$, $T = 60$, $\tau = 80$ 。代入(13)

式可以得到一阶滞后环节系统模型:

$$G(s) = \frac{1}{60s + 1} e^{-80s} \quad (14)$$

针对温控系统数学模型,遗传算法优化给出的最优指标的曲线如图 11,免疫算法的参数变化曲线如图 12,我们将遗传算法优化参数和专家经验法整定参数方法进行比较,结果如表 1 所示。

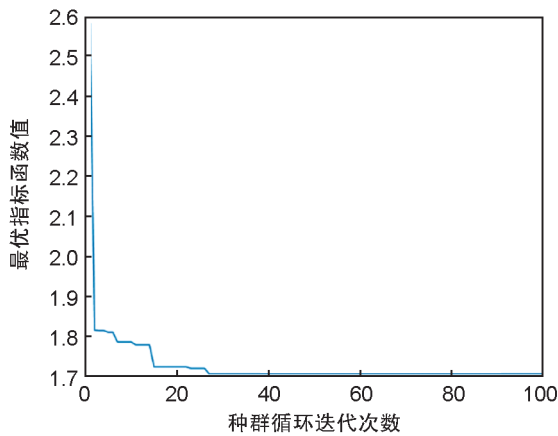


图 11 最优指标函数值的曲线图

Fig. 11 A graph of the value of the optimal index function

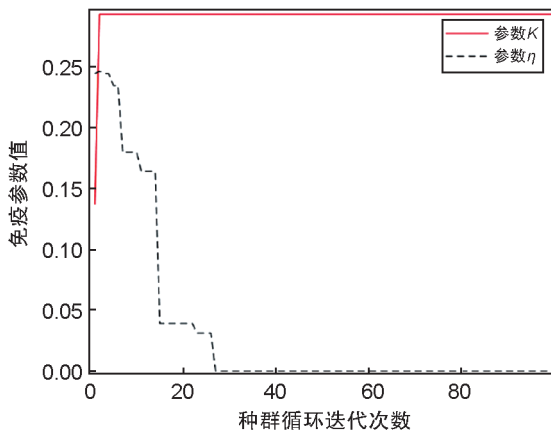


图 12 遗传优化的 K 和 η 曲线变化图

Fig. 12 Optimized K and η curves

针对上述温控系统数学模型,我们把遗传模糊免疫 PID 算法和普通 PID 算法,模糊免疫 PID 算法进行性能比较,给控制系统添加阶跃信号,共设置 2 000 个采样点且每个采样点的采样时间为 1 s。其中,普通 PID 的三个系数分别为 $K_p = 0.4, K_i = 0.007, K_d = 0$,模糊免疫 PID 和遗传模糊免疫 PID 的两个参数的初始值 $K_{i0} = 0.0063, K_{d0} = 1.6826$,主要从调整速度和超调量这两个指标来进行对比,通过 MATALB

软件得到仿真曲线如图 13 所示。通过对仿真结果的分析,可根据性能参数的定义计算出控制系统的性能参数值如表 2 所示。

其中, t_r 是瞬态过程中首次达到 95% 稳态的时间, $y(t_p)$ 表示系统响应的第一个峰值, $y(\infty)$ 表示系统响应的稳态值,最大超调量 $\delta\% = (y(t_p) - y(\infty))/y(\infty)$, t_s 是从第一个峰值 $y(t_p)$ 到稳定值 $y(\infty)$ 所需要的时间,该稳定值落在容许的偏差(0.5%)之间,并保持在容许的范围内。从表中可以明显看出遗传模糊免疫 PID 算法的控制效果优于其他两种算法。

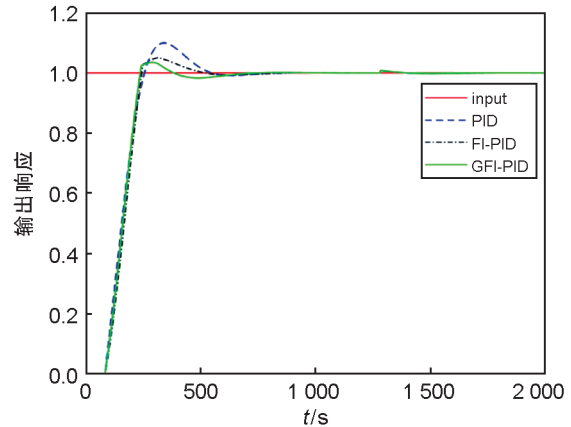


图 13 仿真曲线图

Fig. 13 Simulated curve

通过对性能参数的分析可以看出遗传模糊免疫 PID 控制器超调量比模糊免疫 PID 降低 1.8%,比普通 PID 降低 6.8%。以调节时间为指标,遗传模糊免疫 PID 控制器比模糊免疫 PID 降低 133 s,比普通 PID 降低 125 s。明显低于其他两个仿真控制器,控制稳定性好。此外,与一般 PID 控制器和模糊免疫 PID 控制器相比,遗传模糊免疫 PID 控制器的上升时间分别降低了约 5% 和 3%,并且该控制器的抗扰动能力优于其他比较控制器,能够快速稳定地将输出调节到目标值。

4 结论

本文设计了一种基于 STM32F407Vex 的高精度数字温控仪,采用遗传模糊免疫 PID 控制算法,该算法可以克服模糊免疫 PID 控制器的缺陷,动态精确调整 PID 参数,实现自整定智能化的晶体温度控制,进一步推进量子纠缠光源

表1 两种方法的参数性能比较

Table 1 Comparison of parameter performance between the two methods

系统模型	算法	K (免疫参数1)	η (免疫参数2)	最优指标函数 J
一阶惯性加上时滞	经验法	0.225 7	0.050	$1.903\ 6 \times 10^4$
	遗传算法	0.293 2	0.001	$1.706\ 8 \times 10^4$

表2 控制系统的性能参数值表

Table 2 Performance parameter values of the control system

控制器算法	超调量 $\delta/\%$	第一个峰值 $y(t_p)$	t_r	t_s	稳态值 $y(\infty)$
遗传模糊免疫PID	3.7%	1.034 5	227	266	0.995 0
模糊免疫PID	5.5%	1.049 5	234	399	0.995 0
PID	10.5%	1.099 0	239	391	0.995 0

的控制系统智能化。结果显示,该控制器能够快速精准地将温度调节至目标值,从而将晶体精准控制在最佳温度,达到纠缠光源纠缠品质的最优化。下一步将对免疫反馈机理进行更深入的研究,充分结合免疫系统中其他因素,建立更加完善的免疫反馈机理,另外也将计划研究采用FPGA的基于深度神经网络算法的腔长锁定、相对相位锁定等电控制系统。

参考文献:

- [1] WANG N, DU S N, LI Y M. Compact 6 dB Two-color Continuous Variable Entangled Source Based on a Single Ring Optical Resonator[J]. *Appl Sci*, 2018, **8**(3): 330. DOI: 10.3390/app8030330.
- [2] WANG N, DU S N, LIU W Y, *et al.* Generation of Gaussian-modulated Entangled States for Continuous Variable Quantum Communication[J]. *Opt Lett*, 2019, **44** (15): 3613–3616. DOI: 10.1364/OL.44.003613.
- [3] WANG N, DU S N, LIU W Y, *et al.* Long-distance Continuous-variable Quantum Key Distribution with Entangled States[J]. *Phys Rev Applied*, 2018, **10**(6): 064028. DOI: 10.1103/physrevapplied.10.064028.
- [4] 王武楠,王海龙,石岩,等.量子纠缠源制备方法[J].光通信技术, 2021, **45**(11): 45–52. DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.11.009.
WANG W N, WANG H L, SHI Y, *et al.* Methods for Production of Quantum Entanglement Sources[J]. *Opt Commun Technol*, 2021, **45**(11): 45–52. DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.11.009.
- [5] 任乐燕.非线性晶体温度控制系统的研究[D].武汉:华中科技大学, 2008: 4–12.
REN L Y. Research on Nonlinear Crystal Temperature Control System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 4–12.
- [6] 雷祝兵,孙云飞,潘欣裕,等.快速变温的帕尔贴元件PCR温控模块设计[J].单片机与嵌入式系统应用, 2020, **20**(2): 52–56.
LEI Z B, SUN Y F, PAN X Y, *et al.* Design of PCR Temperature Control Model Based on Rapid Temperature Change Peltier[J]. *Microcontrollers Embed Syst*, 2020, **20** (2): 52–56.
- [7] 熊伟,耿琅环. STM32帕尔贴加热器软件的模块化设计[J].单片机与嵌入式系统应用, 2017, **17**(7): 67–70.
XIONG W, GENG L H. Software Modular Design of Peltier Heater Based on STM32[J]. *Microcontrollers Embed Syst*, 2017, **17**(7): 67–70.
- [8] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M].2版.北京:电子工业出版社, 2004.
LIU J K. MATLAB Simulation of Advanced PID Control [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [9] ZADEH L A. Fuzzy Sets[J]. *Inf Control*, 1965, **8**(3): 338–353. DOI: 10.1016/s0019-9958(65)90241-x.
- [10] 张泾周,杨伟静,张安祥.模糊自适应PID控制的研究及应用仿真[J].计算机仿真, 2009, **26**(9): 132–135. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2009.09.037.
ZHANG J Z, YANG W J, ZHANG A X. Research on Fuzzy Self-adaptive PID Control and Its Emulation[J]. *Comput Simul*, 2009, **26**(9): 132–135. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2009.09.037.
- [11] 汪洋,王琪.基于模糊免疫PID的中频感应加热炉温度控制系统[J].实验技术与管理, 2018, **35**(6): 60–62. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2018.06.016.
WANG Y, WANG Q. Temperature Control System of Medium Frequency Induction Heating Furnace Based on Fuzzy Immune PID[J]. *Exp Technol Manag*, 2018, **35** (6): 60–62. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2018.06.016.
- [12] TAKAHASHI K, YAMADA T. Application of an Immune Feedback Mechanism to Control Systems[J]. *JSME Int J, Ser C*, 1998, **41**(2): 184–191. DOI:

- 10.1299/jsmec.41.184.
- [13] 王帅. 模糊免疫PID算法研究及其在生活用纸机干燥部中的应用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019: 23-37.
WANG S. Research on Fuzzy Immune PID Algorithm and Its Application in Drying Department of Household Paper Machine[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2019: 23-37.
- [14] 王佩艳, 赵晨, 耿小亮, 等. 基于改进自适应遗传算法的层合板铺层顺序优化方法[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(6): 336-340. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.06.054.
WANG P Y, ZHAO C, GENG X L, *et al.* Stacking Sequence Optimization of Composite Laminates Based on a Modified Adaptive Genetic Algorithm[J]. *Sci Technol Eng*, 2018, **18**(6): 336-340. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.06.054.
- [15] 李艳生, 万勇, 张毅, 等. 基于人工蜂群-自适应遗传算法的仓储机器人路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2022, **43**(4): 282-290. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108514.
LI Y H, WAN Y, ZHANG Y, *et al.* Based on Artificial Bees-warehouse Robot Path Planning of Adaptive Genetic Algorithm[J]. *J Sci Inst*, 2022, **43**(4): 282-290. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108514.
- [16] 刘宝, 叶会会, 蔡梦迪. 基于免疫调节机制的参数自整定模糊控制器设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, **50**(4): 881-891. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.04.016.
LIU B, YE H H, CAI M D. Design of Parameter Self-tuning Fuzzy Controller Based on Immune Regulation Mechanism[J]. *J Central South Univ Sci Technol*, 2019, **50**(4): 881-891. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.04.016.
- [17] HE M D, RUI S Z, HE M J, *et al.* Research on the Special Chiller for Semiconductor Industry Based on Fuzzy PID Control[C]//2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC). 2021: 1306-1310. DOI: 10.1109/IPEC51340.2021.9421152.
- [18] WU X F, WU J T, LI D M. Designation and Simulation of Environment Laboratory Temperature Control System Based on Adaptive Fuzzy PID[C]//2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2018: 583-587. DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577618.
- [19] LIU R Y, HU E D, ZHU Z Y, *et al.* Study on Temperature Control System of Ceramic Kiln Based on Fuzzy PID Cascade[C]//2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). 2020: 1769-1772. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085049.
- [20] WU X Y, WANG X N, HE G G. A Fuzzy Self-tuning Temperature PID Control Algorithms for 3D Bio-printing Temperature Control System[C]//2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2020: 2846-2849. DOI: 10.1109/CCDC49329.2020.9164054.
- [21] 刘萍, 俞焕. 一种改进的自适应遗传算法[J]. 舰船电子工程, 2021, **41**(6): 101-104. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9730.2021.06.025.
LIU P, YU H. An Improved Adaptive Genetic Algorithm [J]. *Ship Electron Eng*, 2021, **41**(6): 101-104. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9730.2021.06.025.
- [22] 孙涵, 江剑, 丁良华, 等. 基于改进遗传算法的田间路径导航点提取研究[J]. 测试技术学报, 2020, **34**(3): 227-232. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2020.03.008.
SUN H, JIANG J, DING L H, *et al.* Research on Field Path Navigation Point Extraction Based on Improved Genetic Algorithm[J]. *J Test Meas Technol*, 2020, **34**(3): 227-232. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2020.03.008.
- [23] 汤伟, 王帅, 王玲利. 基于遗传模糊免疫算法的比例-积分-微分参数整定优化[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(31): 152-159. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.31.024.
TANG W, WANG S, WANG L L. Parameters Optimization of Proportional Integral Differential Based on Genetic Fuzzy Immune Algorithm[J]. *Sci Technol Eng*, 2018, **18**(31): 152-159. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.31.024.