doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.008

基于蜣螂优化 BP－PID 的温室自主跟随平台行走速度控制研究

肖茂华[1]　陈　泰[1]　庄晓华[2]　朱烨均[1]　胡艺缤[1]　王鸿翔[3]

(1.南京农业大学工学院, 南京 210031; 2.桑普农机(常州)有限公司, 常州 213200;
3.江苏电子信息职业学院, 淮安 223003)

摘要: 针对当前温室作业环境复杂、现有机械行走稳定性差的问题,本文提出了温室自主跟随电动平台行走速度控制方法。由于该系统存在非线性和时变性的特点,传统 PID 控制算法无法实现有效控制,因此提出了一种基于蜣螂(Dung beetle optimizer,DBO)优化 BP 神经网络 PID 控制算法。该算法采用 DBO 优化算法对 BP 神经网络的权值进行优化,加快了 BP 神经网络的自学习速率,实现对温室自主跟随电动平台行走速度的快速精确控制,提高系统的响应速度并降低超调量,最后,将本文提出的行走速度控制算法与 PID 控制算法、BP－PID 控制算法、遗传算法(Genetic algorithm,GA)优化 PID 控制算法、蚁群算法(Ant colony optimization,ACO)优化 PID 控制算法对比。试验结果表明,当行走速度为 1 m/s 时,系统平均响应速度为 0.11 s,调整时间为 0.27 s,最大超调量为 2.44%;当履带线速度大小和方向发生变化时,系统依然表现出响应速度快、超调量小且稳态过程无振荡的优点。DBO－BP－PID 控制算法在控制稳定性和控制精度上表现更优,有效降低了系统时滞性和非线性影响,满足温室自主跟随电动平台行走速度控制的需求。

关键词: 温室; 自主跟随电动平台; 行走速度控制; 蜣螂优化算法; BP－PID 控制

中图分类号: S222.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0083-09　　**OSID**:

Velocity Control for Autonomous Following Platform Walking Speed Based on DBO Optimized BP－PID Algorithm

XIAO Maohua[1]　CHEN Tai[1]　ZHUANG Xiaohua[2]　ZHU Yejun[1]　HU Yibin[1]　WANG Hongxiang[3]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *Sangpu Agricultural Machinery* (*Changzhou*) *Co.*, *Ltd.*, *Changzhou* 213200, *China*
3. *Jiangsu Electronic Information Vocational College*, *Huaian* 223003, *China*)

Abstract: This study addresses the issues of complexity in greenhouse operational environments and poor stability of existing mechanical walking systems by conducting research on the autonomous following electric platform walking speed control in greenhouses. Due to the system's inherent nonlinearity and time-varying characteristics, traditional PID control algorithms fail to achieve effective control. Therefore, a dung beetle optimizer (DBO) optimized BP neural network PID control algorithm was proposed. This algorithm optimized the weights of the BP neural network by using the DBO algorithm, thereby accelerating the self-learning rate of the BP neural network. It achieved rapid and precise control of the greenhouse autonomous following electric platform walking speed, enhanced system response speed, and reduced overshoot. Experimental results demonstrated that at a walking speed of 1 m/s, the system exhibited an average response speed of 0.11 s, settling time of 0.27 s, and a maximum overshoot of 2.44%. When there were changes in track speed and direction, the system maintained advantages of fast response, minimal overshoot, and oscillation-free steady-state process. Compared with PID control algorithm, BP－PID control algorithm, GA－PID control algorithm, ACO－PID control algorithm, the DBO－BP－PID control algorithm showed superior performance in control stability and precision,

收稿日期: 2024－10－09　修回日期: 2024－11－05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001204)、常州市科技支撑计划项目(CE20232001)和江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2023－27)

作者简介: 肖茂华(1981—),男,教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: xiaomaohua@njau.edu.cn

effectively mitigating system hysteresis and nonlinear effects, thereby meeting the control requirements for greenhouse autonomous following electric platform walking speed.

Key words: greenhouse; autonomous following electric platform; walking speed control; dung beetle optimization algorithm; BP - PID control

0 引言

温室种植技术在农业中应用广泛,对于温室智能农业机械的需求也不断增加[1-3]。温室作物的中期管理、采摘和运输是温室生产的重要一环,对温室农业至关重要。传统的温室管理方式往往依赖于人工操作,不仅效率低下且容易受到外界因素的影响,存在通用性差、智能化程度低和功能性单一等问题。针对以上问题,笔者前期设计了一种基于可变式底盘的温室自主跟随电动平台,满足温室作业需求,而温室自主跟随电动平台的行走速度控制对于实现平稳跟随运动、确保温室自主跟随电动平台与被跟随目标之间的安全距离,以及灵活调整速度以使自主跟随电动平台适应各种不同的场景至关重要[4-5]。因此,对于温室自主跟随电动平台行走速度控制非常必要。

温室自主跟随电动平台行走速度控制系统存在非线性和时变性的特点,传统 PID 控制器由于存在一些局限性和缺点[6-8],无法实现预期的控制效果。在速度变化较大时,PID 控制器在调节过程中可能导致速度振荡,CHEN 等[9]以叶菜收获机为研究对象,采用 PID、自适应模糊 PID 和滑模控制技术控制行驶速度,并对自动控制系统的稳定性、控制精度和行驶速度进行了对比分析。YIN 等[10]提出了一种模糊神经网络 PID 控制算法,并将其应用于无刷直流电动机控制系统的自动速度调节器中,具有上升和调节时间短、稳态误差小、无超调等优点。PID 参数性能取决于参数的选择,而传统 PID 参数更多地依赖经验与试验,导致控制性能不佳,WANG 等[11]提出了一种基于 FPGA 的神经网络 PID 控制方法,实现了一个完整的闭环控制系统,结果表明,所设计的系统能够实现 PID 控制参数的自整定,具有性能可靠、控制效果好、鲁棒性好等特点。SOUNDIRARRAJAN 等[12]研究了蚂蚁狮子(ALO)优化 PID 控制器的参数调整,实现永磁同步电机的速度控制,并通过试验验证了该方法的有效性。DUTTA 等[13]研究了灰狼优化算法调整 PID 参数,在直流无刷电机的速度控制中表现出了良好的效果。对于存在非线性和时变性的控制系统,PID 控制器难以处理非线性因素,且可能存在响应滞后的问题,KHAN 等[14]为实现轮式移动机器人的速度控制,提出在 PID 控制器中使用社交蜘蛛优化算法(SSO),用以整定 PID 控制器参数,试验表明所提出的方法在实现机器人精确速度控制方面有效,特别是在存在干扰和不确定性的情况下。ZHANG 等[15]对草地放牧机器人控制系统进行了研究,设计了纵向恒速 PID 控制器和横向自适应模糊 PID 控制器,实现了对整个车辆的控制,有效实现对机器人速度和转向的控制。

针对传统 PID 控制器在速度控制过程中存在的问题,本文以温室自主跟随电动平台行走速度控制系统为被控对象,提出一种基于蜣螂算法(Dung beetle optimizer,DBO)优化 BP 神经网络 PID 控制算法。通过分析温室自主跟随电动平台工作原理,选取特定工作环境下的直流无刷电机(Brushless DC motor,BLDCM)的传递函数进行仿真试验,分析其响应时间与稳态特性,并将其应用于温室自主跟随电动平台的行走速度控制。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

针对温室种植中不同作业环境以及不同的作业功能需求[16],设计了一种温室自主跟随电动平台,整机结构如图 1 所示。

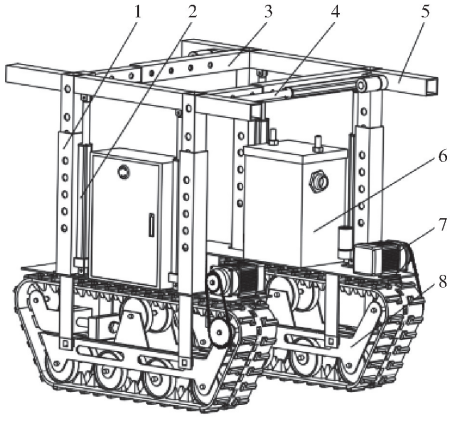


图 1 温室自主跟随电动平台结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of greenhouse autonomous following electric platform

1. 竖向支撑梁 2. 竖向电动推杆 3. 横向梁 4. 横向电动推杆 5. 纵向梁 6. 48 V 锂电池箱 7. 直流无刷电机 8. 履带底盘

温室自主跟随电动平台采用履带式底盘,并选择直流无刷电机(BLDCM)为温室自主跟随电动平台提供动力,通过链传动方式带动履带底盘行走,这

种设计可为温室自主跟随电动平台提供足够的动力和灵活性，使温室自主跟随平台能够在各种地形条件下实现稳定移动。温室自主跟随平台通过安装横向与竖向电动推杆实现轮间距和离地间隙的调节，满足不同作业环境以及作业高度的需求。此外，温室自主跟随电动平台还搭载 USB、RS485 等数据传输接口，方便与其他设备的数据交互。温室自主跟随电动平台相关参数如表 1 所示。

表 1　温室自主跟随电动平台参数

Tab. 1　Parameters of greenhouse autonomous following electric platform

参数	数值/型式
长×宽×高/(cm×cm×cm)	150×90×120
履带宽度/cm	18
锂电池容量/(A·h)	50
行走速度/($km\cdot h^{-1}$)	0～10
轮间距调节范围/cm	0～35
离地间隙调节范围/cm	0～40
信号接口	USB、RS485/232、HDMI、RJ45
电源接口电压/V	12、24、48
操作方式	手动、遥控、自动跟随
最小转弯半径/cm	150
爬坡角/(°)	>15

1.2　自主跟随工作原理

温室自主跟随电动平台采用超宽带(Ultra wide band，UWB)传感器和激光雷达实现对跟随目标位置和行为动作的识别。UWB 传感器通过 PDOA(Phase difference of arrival)算法测量电动平台与跟随目标之间的距离和相对角度，提供基础的跟随信息；激光雷达扫描周围环境获取点云数据，通过处理雷达点云数据识别跟随目标的行为动作，并实现障碍物识别。采用角度传感器测量温室自主跟随电动平台在行走过程中的姿态角和方向，使用霍尔传感器实时测量电机转速，根据测得的角度和转速数据，控制系统实时调整左右履带的速度，确保温室自主跟随电动平台行走速度的平稳和行走方向的准确性，实现良好的跟随效果。温室自主跟随电动平台控制系统根据传感器获取的被跟随目标信息，计算温室自主跟随电动平台需要采取的行动，包括前进、转弯、加速和减速等动作，通过调整两侧履带的速度和方向来实现。温室自主跟随电动平台跟随流程如图 2 所示。

温室自主跟随电动平台的控制系统基于 ROS 在工控机上运行，ROS 提供了强大的机器人软件框架，能够方便地实现运动控制和感知数据处理。工控机通过与 Arduino MEGA 2560 通信，发送 PWM 信号给电机驱动器，Arduino MEGA 2560 接收到 PWM 信号后，解析并转换为电机控制信号，通过电机驱动器控制 BLDCM 的转速和方向，实现对电机的精准控制，从而实现电动平台的灵活行走和转弯，实现温室自主跟随电动平台准确的目标跟随和运动控制。控制系统结构如图 3 所示。

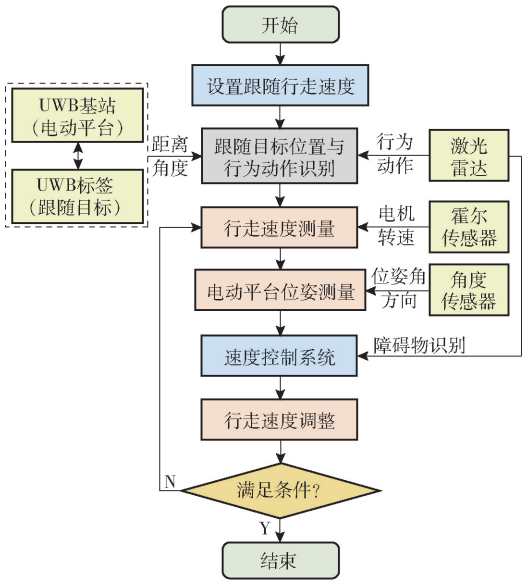


图 2　温室自主跟随电动平台跟随流程图

Fig. 2　Flowchart of autonomous following process for greenhouse electric flatform

2　基于蜣螂优化 BP 神经网络 PID 控制算法的速度控制

2.1　被控对象模型

通过对 BLDCM 转速的实时控制实现对温室自主跟随电动平台行走速度的控制，BLDCM 的等效电路如图 4 所示，通过调节电机驱动器的输出电压来控制电机的输入电压，从而建立电机输出角速度与输入电压之间的传递函数[17-18]。

电机定子三相绕组电压平衡方程为

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \tag{1}$$

定子三相绕组产生的电磁转矩为

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega} \tag{2}$$

转子运动方程为

$$T_e - T_L - B_v \omega = J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中　U_A、U_B、U_C——电机定子三相绕组电压，V

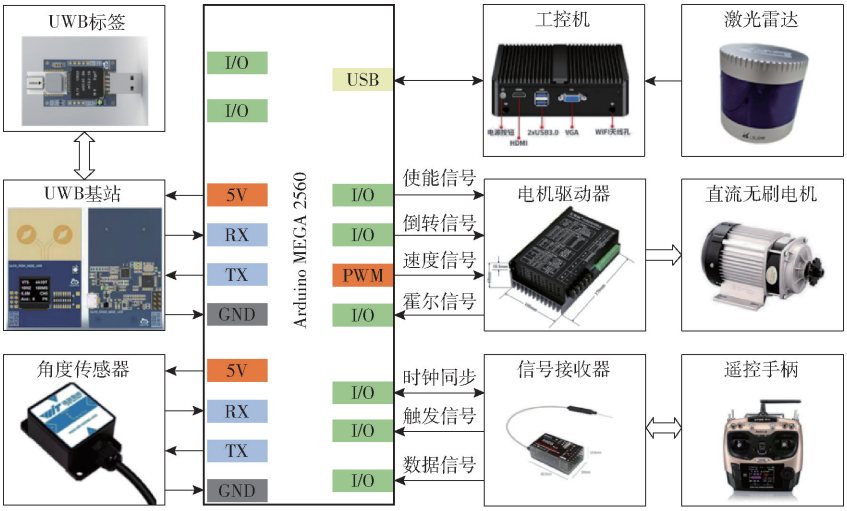


图 3 温室自主跟随控制系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of greenhouse autonomous following control system

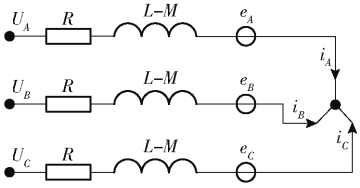


图 4 直流无刷电机等效电路

Fig. 4 Brushless DC motor equivalent circuit

R_A、R_B、R_C——电机定子三相绕组电阻,Ω

e_A、e_B、e_C——电机定子三相绕组反电动势,V

i_A、i_B、i_C——电机定子三相绕组电流,A

L_A、L_B、L_C——电机定子三相绕组电感,H

L_{AB}、L_{BA}、L_{AC}、L_{CA}、L_{CB}、L_{BC}——电机定子三相绕组互感,H

T_e——电磁转矩,N·m

T_L——负载转矩,N·m

J——电机转动惯量,kg·m^2

ω——角速度,rad/s

B_v——摩擦阻尼系数,N·s/m

当不考虑负载时,直流无刷电机传递函数为

$$G_1(s)=\frac{\omega(s)}{U_d(s)}=\frac{K_T}{L_AJs^2+(R_AJ+L_AB_v)s+R_AB_v+K_eK_T}=\frac{K_T}{R_AB_v+K_eK_T}\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_ns+\omega_n^2} \tag{4}$$

式中 K_T——电磁转矩因数,N·m/A

K_e——反电动势常数,V·s/rad

U_d——电机两端母线电压

ω_n——无阻尼自然振荡频率

ζ——阻尼比

温室自主跟随电动平台履带线速度与驱动电机之间的传递函数为

$$G_2(s)=\frac{v(s)}{n(s)}=\frac{2\pi r}{i} \tag{5}$$

式中 $v(s)$——履带线速度,m/s

$n(s)$——驱动电机转速,r/s

r——履带驱动轮半径,m

i——减速比

2.2 PID 控制算法

PID 控制算法是一种常用于工程控制系统中的控制算法,它通过测量一个过程变量(速度、位置等),并根据误差信号来调整控制器的输出,使得该过程变量达到设定值[19-21]。

在温室电动自动跟随平台行走速度控制系统中,被控对象为驱动两侧履带行走的 BLDCM,输出信号需要以离散的形式发送给执行器。增量式控制算法适用于此类非线性和时变特性的离散控制系统,能够通过计算控制量的增量来简化运算过程,减少积分累积误差,并提升系统的数值稳定性和抗干扰能力,因此选用增量式 PID 控制方式,并将连续的输出信号进行离散化处理,离散化处理后的控制信号 $u(k)$ 表达式为

$$u(k)=u(k-1)+K_P(e(k)-e(k-1))+\frac{K_IT}{2}(e(k)+e(k-1))+K_D(e(k)-2e(k-1)+e(k-2)) \tag{6}$$

式中 T——采样周期 $e(k)$——偏差

K_P——比例增益

K_I——积分时间常数

K_D——微分时间常数

虽然 PID 控制算法能够有效且稳定地完成某些被控系统的控制需求,但温室自主跟随电动平台行走速度控制系统存在非线性、时变性和滞后性等特点。为使系统能够更快地达到期望值、减少超调量

并提高系统的抗干扰能力，需要对 PID 控制算法的参数 K_P、K_I 和 K_D 进行优化，以确保控制系统具有良好的控制性能和稳定性。

2.3　BP 神经网络优化 PID 控制算法

针对温室自主跟随电动平台复杂的非线性控制系统，传统方法难以准确调整 PID 控制算法的参数，因此采用 BP 神经网络优化 PID 控制算法。由于 BP 神经网络具有一定的泛化能力，能够适应被控系统非线性、时变性和滞后性的特点，可以很好的近似被控系统的动态特性，实现实时调整和控制，因此适用于动态变化的温室自主跟随电动平台行走速度控制系统[22－23]。BP－PID 控制器结构如图 5 所示。

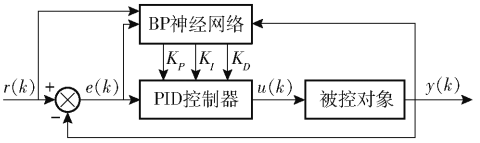


图 5　BP－PID 控制器结构图

Fig. 5　BP－PID controller structure

BP 神经网络结构为 4－3－3 型式，即 4 个输入层、3 个隐藏层和 3 个输出层。BP 神经网络输入为 $x_i(i=1,2,3,4)$，即期望值 $r(k)$、实际输出值 $y(k)$、系统偏差 $e(k)$ 和偏置项 4 个输入；输出为 PID 控制器 3 个参数：K_P、K_I 和 K_D。

使用 Sigmoid 函数作为隐藏层神经元的激活函数 $f_1(x)$。

由于输出层 3 个输出 K_P、K_I 和 K_D 非负，因此输出层神经元激活函数选择非负的 Sigmoid 函数 $f_2(x)$。

为体现系统误差的实际大小，采用在线学习的方式，以误差的二次方作为性能指标，性能指标函数为 $E(k)$，即

$$E(k)=\frac{1}{2}(r(k)-y(k))^2 \tag{7}$$

采用梯度下降法对神经网络权值进行调整，以提高 BP 神经网络的收敛速度，同时获得更好的动态特性，加入一个惯性项，作为惯性因子。根据负梯度规则，输出层连接权值调整量为

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k)=-\eta\frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}}+\alpha\Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \tag{8}$$

经过化简与近似，最终得到学习后的输出层连接权值调整量为

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k)=\alpha\Delta w_{li}^{(3)}(k-1)+\eta\delta_l^{(3)}O_i^{(2)}(k) \tag{9}$$

同理可得隐藏层与输入层之间的权值调整量为

$$\Delta w_{ij}^{(2)}(k)=\alpha\Delta w_{ij}^{(2)}(k-1)+\eta\delta_i^{(2)}O_j^{(1)}(k) \tag{10}$$

式中　η——学习速率　　α——惯性因子

$O_j^{(1)}$——BP 神经网络各层神经元的输入

$O_i^{(2)}$——隐藏层神经元的输出

通过将 BP 神经网络算法与 PID 控制算法相结合，实现了 PID 参数的持续动态优化。公式(9)与公式(10)为 BP 神经网络在 PID 控制器框架中用于计算每层级权值修正量的具体算法。利用 BP 神经网络的在线自适应学习特性，即在网络运行的同时，不断学习并及时调整 PID 控制参数，以适应系统需求的变化，从而提高温室自主跟随电动平台行走速度控制的稳定性。

BP 神经网络优化 PID 控制器参数步骤如下：

(1)定义 BP 神经网络结构，确定输入层和隐藏层的节点数，并给出合适的初始值，选择学习速率 η，惯性因子 α，$k=1$。

(2)对期望值 $r(k)$ 和实际输出值 $y(k)$ 进行采样，并计算该时刻偏差 $e(k)=r(k)-y(k)$。

(3)计算 BP 神经网络各层神经元的输入和输出。

(4)根据公式(6)计算控制器的输出信号 $u(k)$。

(5)BP 神经网络进行学习，对 BP 神经网络的权值进行修正，在线调整权值 $w_{ij}^{(2)}$ 和 $w_{li}^{(3)}$。

(6)令 $k=k+1$，并返回步骤(2)，重新开始输出层参数的自适应调整，直到误差达到要求。

2.4　基于蜣螂优化 BP－PID 控制算法

虽然 BP－PID 控制算法能够有效提升温室自主跟随电动平台行走速度控制系统的稳定性，但调整 BP 神经网络的权值和阈值时，容易出现收敛速度慢的问题，影响了 BP－PID 控制算法在实际运用中的响应速度，因此本文采用全局搜索能力更强的蜣螂优化算法对 BP 神经网络进行优化，进一步提高 BP－PID 控制器的性能。DBO－BP－PID 控制器结构如图 6 所示。

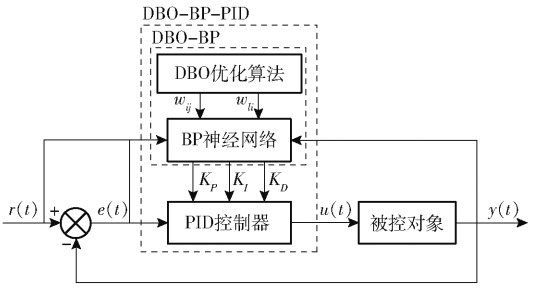


图 6　DBO－BP－PID 控制器结构图

Fig. 6　DBO－BP－PID controller structure

DBO 是一种新型的仿生启发式群体智能优化算法，它模拟了蜣螂滚球、跳舞、觅食、偷窃和繁殖等行为习性，该算法包括蜣螂滚球、蜣螂繁殖、蜣螂觅食和蜣螂偷窃 4 个优化过程，具有寻优能力强、收敛速度快等特点，广泛应用于各类优化问题中[24－26]。DBO 算法将初始种群分为 4 个子种群，分别搜索最优位置，通过比较各子种群位置，得到全局最优解，

最优解作为 BP 神经网络的权值和阈值。采用 DBO 算法对 BP 神经网络权值和阈值进行优化,提高了 BP 神经网络收敛速度,并减少了训练时间,同时得到全局最优解。

DBO－BP－PID 控制器工作原理如图 7 所示。

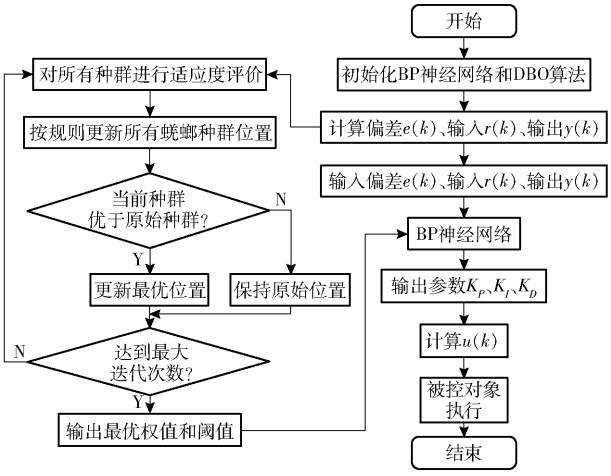


图 7 DBO－BP－PID 控制器工作原理图

Fig. 7 DBO－BP－PID controller working principle diagram

基于 DBO 优化的 BP－PID 控制算法主要由两部分组成,传统 PID 控制算法根据输入参数 $r(k)$、输出参数 $y(k)$、偏差 $e(k)$ 以及参数 K_P、K_I 和 K_D,通过控制算法输出控制量 $u(k)$,再结合被控对象的传递函数得到系统输出,实现 PID 控制器对被控对象的闭环控制;DBO－BP 算法首先将 DBO 算法代替传统 BP 神经网络的梯度下降法,进行 BP 神经网络的全部权值优化,在此过程中,DBO 算法根据误差更新 BP 神经网络各层权值 $w_{ij}^{(2)}$ 和 $w_{li}^{(3)}$,得出 BP 神经网络最佳权值;其次,DBO－BP 算法为 PID 控制算法输出 K_P、K_I 和 K_D 的最优值,最终,DBO－BP－PID 控制算法计算出控制器输出 $u(k)$,并将其传递给被控对象,从而提高控制的准确性和响应速度。

3 仿真试验

为了验证本文所提出方法的有效性,根据上述控制策略和被控模型,使用 Matlab/Simulink 分别搭建基于 PID 算法控制的电机转速仿真模型、基于 BP－PID算法控制的电机转速仿真模型、基于 GA－PID 算法控制的电机转速仿真模型、基于 ACO－PID 算法控制的电机转速仿真模型和基于 DBO－BP－PID 算法控制的电机转速仿真模型。直流无刷电机参数如表 2 所示。在相同输入情况下进行 PID 控制算法、BP－PID 控制算法、GA－PID 控制算法、ACO－PID 控制算法和 DBO－BP－PID 控制算法的仿真比较。

表 2 直流无刷电机参数

Tab. 2 Brushless DC motor parameters

参数	数值
额定电压 U/V	48
额定电流 I/A	20
额定负载 T/(N·m)	2.45
相电阻 R/mΩ	14
电磁转动因数 K_T/(N·m·A^{-1})	0.916
反电动势常数 K_e/(V·rad^{-1}·s^{-1})	0.764
极对数 P	6

基于传递函数的数学模型在自动控制领域有着非常广泛的应用,通过传递函数分析控制器的性能和稳定性是否达到了系统要求。因此本文以传递函数作为被控系统的数学模型进行仿真。在 Matlab/Simulink 仿真时,设置采样周期为 1 ms。常规 PID 控制器参数分别为 $K_P=98.77$、$K_I=200.31$、$K_D=12.65$。基于 BP 神经网络优化的 PID 控制器选择神经网络结构为 4－3－3,并设置学习速率 $\eta=0.5$,惯性因子 $\alpha=0.2$,初始权值为[－0.2,0.5]内的随机数,权值随系统动态在线调整。基于 DBO 优化的 BP 神经网络的 PID 控制器中,首先设置算法的相关参数,其中 BP 神经网络参数的设置与 BP 神将网络优化 PID 控制器一致,DBO 优化算法初始种群个数为 20,不同种类蜣螂数为:滚球蜣螂数量为 4、繁殖蜣螂数量为 4、小蜣螂数量为 5、小偷蜣螂数量为 7,设置参数 $k=0.1$,$b=0.3$,$S=0.5$,最大迭代次数设置为 20 次,采用上述参数初始化种群,找到最优值,更新后进行迭代寻优,通过 DBO 算法连续优化初始权值,并将最佳权值输入到 BP 神经网络中用于自学习调整。

为了更直观地比较不同控制器的性能,模拟温室自主跟随电动平台实际作业时的不同工况。首先,在转速一定的条件下,对 DBO－BP－PID 控制算法的控制性能进行验证。给定 BLDCM 输入期望转速为 300 r/min,选择上升时间、峰值时间、调节时间和最大超调量 4 种瞬态性能指标进行对比,设置仿真时间为 3 s。不同控制器在同一输入下的转速响应对比曲线如图 8 所示,4 种瞬态性能指标如表 3 所示。

从图 8 可以看出,DBO－BP－PID 控制算法最先达到期望值,且很快使得整体响应趋于稳定,虽然相较于 PID 控制算法和 GA－PID 控制算法上升时间差距不大,但 PID 控制算法与 GA－PID 控制算法产生了较大的超调,DBO－BP－PID 控制算法性能上占明显优势;虽然 DBO－BP－PID 控制算法相较于 BP－PID 控制算法产生了一些超调,但 BP－PID

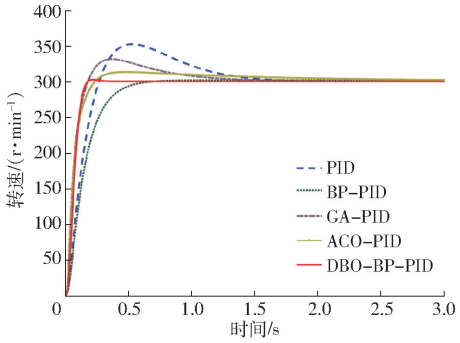


图 8　转速 300 r/min 时不同算法响应曲线

Fig. 8　Response curves of different algorithms at a speed of 300 r/min

表 3　转速 300 r/min 时不同控制算法性能指标

Tab. 3　Performance indicators of different control algorithms when motor speed was 300 r/min

控制器类型	上升时间/s	峰值时间/s	调节时间/s	最大超调量/%
PID	0. 18	0. 53	1. 39	17. 06
BP－PID	0. 29	1. 30	0. 51	0. 57
GA－PID	0. 11	0. 37	1. 08	10. 40
ACO－PID	0. 13	0. 48	1. 54	4. 40
DBO－BP－PID	0. 10	0. 22	0. 16	0. 77

控制算法较长的上升时间、峰值时间和调节时间使得其整体性能下降，劣于 DBO－BP－PID 控制算法。从表 3 可知，PID 控制算法与 ACO－PID 控制算法的 4 种瞬态性能指标均不如 DBO－BP－PID 控制算法，虽然 BP－PID 控制算法超调量为 0. 57%，优于 DBO－BP－PID 控制算法的 0. 77%，但是其上升时间与峰值时间均大于 DBO－BP－PID 控制算法。

温室自主跟随电动平台转弯时，一侧履带线速度变大，另一侧履带线速度变小且方向发生变化。因此，需要对 DBO－BP－PID 控制算法在转速发生变化的控制性能进行验证。输入 BLDCM 期望转速在 1. 5 s 时从 200 r/min 加速至 300 r/min，转速响应对比曲线如图 9 所示。此外，还需要验证 DBO－BP－PID 控制算法在转动方向发生变化时的控制性能，输入 BLDCM 期望转速在 1. 5 s 时从 300 r/min 变化为 －200 r/min(负号代表方向)，转速响应对比曲线如图 10 所示。

从图 9、10 可以看出，在 1. 5 s 转速发生变化时，DBO－BP－PID 控制算法响应速度最快，达到稳定状态用时最短，相比之下，BP－PID 控制算法和 ACO－PID 控制算法达到稳定时间较长，且 PID 控制算法与 GA－PID 控制算法产生了较大的超调，因此，在速度和转动方向发生变化的条件下，DBO－BP－PID 控制算法优于其余算法。通过 Matlab/Simulink 软件仿真分析可得，DBO－BP－PID 控制算法兼顾了系统响应速度和控制过程的稳定性，整体性能优越。

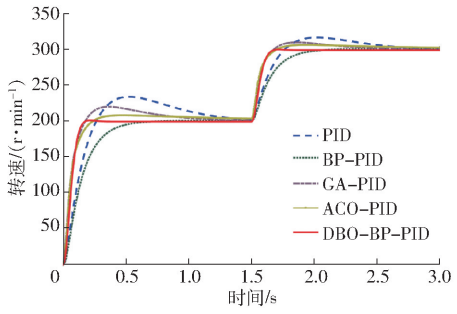


图 9　转速 200～300 r/min 时不同算法响应曲线

Fig. 9　Response curves of different algorithms at speeds ranging from 200 r/min to 300 r/min

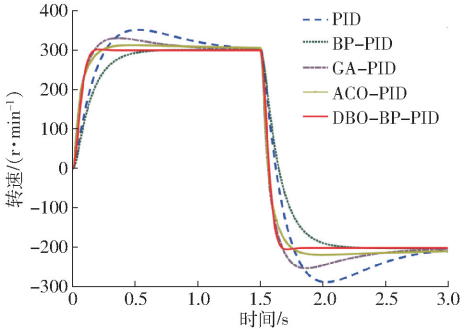


图 10　转速 300～－200 r/min 时不同算法响应曲线

Fig. 10　Response curves of different algorithms at speeds ranging from 300 r/min to －200 r/min

4　试验

为了比较实际控制温室自主跟随电动平台行走速度时，不同控制算法的速度控制效果、控制稳定性等性能，并验证仿真试验结果的准确性，将 PID 控制算法、BP－PID 控制算法和 DBO－BP－PID 控制算法分别应用于温室自主跟随电动平台两侧履带线速度的控制，并在温室中进行试验，如图 11 所示。设定温室自主跟随电动平台行走速度为 1 m/s，试验结果如图 12 所示，4 种瞬态性能指标如表 4 所示。



图 11　温室自主跟随电动平台田间试验

Fig. 11　Greenhouse autonomous following electric platform field experiment

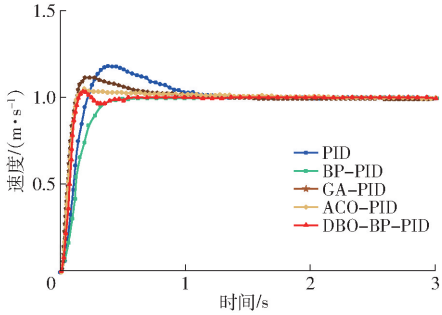


图 12 跟随速度 1 m/s 时不同算法行走速度响应曲线

Fig. 12 Travel speed response curve at 1 m/s by different algorithms

表 4 跟随速度 1 m/s 时不同控制算法性能指标

Tab. 4 Performance indicators of different control algorithms when speed was 1 m/s

控制器类型	上升时间/s	峰值时间/s	调节时间/s	最大超调量/%
PID	0.15	0.42	1.26	19.00
BP－PID	0.21	0.95	0.52	1.00
GA－PID	0.10	0.23	0.98	12.00
ACO－PID	0.11	0.21	1.25	4.90
DBO－BP－PID	0.11	0.18	0.27	2.44

从图 12 和表 4 可以看出，在以速度 1 m/s 开始跟随时，DBO－BP－PID 控制算法响应最快，最先达到预期速度，最大超调量为 2.44%，调节时间为 0.27 s。相较于 PID 控制算法和 GA－PID 控制算法，三者上升时间相差不大，但 GA－PID 控制算法的最大超调量为 12%，调节时间为 0.98 s，产生了较大的振荡和超调，因此 DBO－BP－PID 控制算法的性能优于 PID 控制算法与 GA－PID 控制算法；相较于 BP－PID 控制算法和 ACO－PID 控制算法，尽管 BP－PID 控制算法的最大超调量小于 DBO－BP－PID 控制算法，但 BP－PID 控制算法的调节时间为 0.52 s，上升时间为 0.21 s，使得 BP－PID 控制算法的响应速度较慢，而 ACO－PID 控制算法调节时间为 1.25 s，达到稳态时间较长，总体上 DBO－BP－PID 控制算法的性能更优。

当温室自主跟随电动平台转弯时，一侧履带线速度从 1 m/s 加速至 1.5 m/s，试验结果如图 13 所示；另一侧履带线速度从正转速度 1 m/s 变为倒转 0.5 m/s，试验结果如图 14 所示。从图 13、14 可以看出，当温室自主跟随电动平台转弯时，即履带线速度大小和方向发生变化，DBO－BP－PID 控制算法调节速度最快，最先达到稳定状态，相比之下，PID 控制算法和 GA－PID 控制算法产生了较大的超调，并且 PID 控制算法达到稳定状态的时间最长，虽然 BP－PID 控制算法超调量小于 DBO－BP－PID 控制算法，但与 ACO－PID 控制算法达到稳定状态的时间较长。总体而言，DBO－BP－PID 控制算法不仅可以更快地达到预期速度，且响应时间较短，表现出更优越的性能。

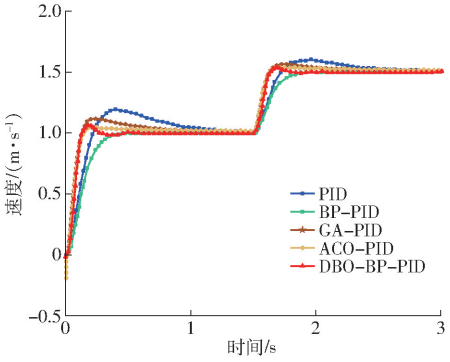


图 13 跟随速度 1.0～1.5 m/s 时不同算法行走速度响应曲线

Fig. 13 Walking speed response curves of different algorithms from 1.0 m/s to 1.5 m/s

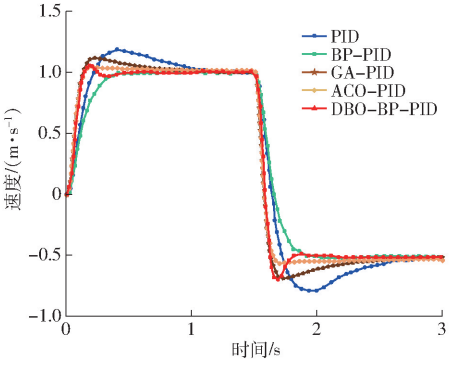


图 14 跟随速度 1.0～－0.5 m/s 时不同算法行走速度响应曲线

Fig. 14 Walking speed response curves of different algorithms from 1.0 m/s to －0.5 m/s

在试验过程中，电机链传动和履带驱动轮的物理特性会影响系统的动态响应，例如链传动可能出现滞后、驱动轮与履带之间的摩擦等因素的影响，这些因素在仿真中可能无法完全模拟或者准确描述。此外，实际系统中使用的传感器可能存在一定的误差，从而导致试验结果与仿真结果存在差异。然而，从试验结果可以看出，通过仿真试验与实机试验对比不同算法的控制效果，基于蜣螂优化的 BP 神经网络 PID 控制算法在温室自主跟随电动平台上的控制性能整体优于 PID 控制算法、BP－PID 控制算法、GA－PID 控制算法和 ACO－PID 控制算法，该算法兼顾了系统的响应速度和控制过程的稳定性，满足了实际应用中的控制需求，为非线性时滞系统的控制提供了一种可行的方法。

5 结论

(1)研究了温室自主跟随电动平台行走速度控

制系统，提出了一种基于蜣螂优化 BP 神经网络 PID 控制算法。DBO 算法具有较快的收敛速度和强大的全局搜索能力，结合 BP 神经网络的非线性拟合能力和自学习能力，提高了控制系统的响应速度和稳定性。相比于 GA－PID 算法和 ACO－PID 算法，DBO－BP－PID 算法具有更快的收敛速度，能够迅速找到最优解，从而实现了对温室自主跟随电动平台行走速度的最佳控制效果。

(2)针对本文提出的 DBO－BP－PID 算法与 PID 算法、BP－PID 算法、GA－PID 算法、ACO－PID 算法进行 BLDCM 转速控制仿真分析。当设定期望转速为 300 r/min 时，系统最大超调量为 0.77%，上升时间为 0.10 s，调节时间为 0.16 s；当电机转速大小和转动方向发生变化时，分别设定期望转速从 200 r/min 加速至 300 r/min 和期望转速从 300 r/min 变化为 －200 r/min 进行试验，仿真结果表明，DBO－BP－PID 算法的响应速度与达到稳态的速度最快。

(3)针对本文提出的 DBO－BP－PID 算法与 PID 算法、BP－PID 算法、GA－PID 算法、ACO－PID 算法进行了温室自主跟随电动平台行走速度控制实机试验。设定跟随速度为 1 m/s，系统超调量为 2.44%，上升时间为 0.11 s，调节时间为 0.27 s；在履带线速度大小和方向发生变化时，DBO－BP－PID 控制算法的调节速度最快，并最先达到稳定状态。试验结果表明，基于蜣螂优化的 BP 神经网络 PID 控制算法能够在最短时间内使得系统达到设定值，且具有较小的超调量。实机试验验证了 DBO－BP－PID 控制算法在温室自主跟随电动平台行走速度控制中的良好性能，证明了本文提出的控制算法在该系统中的适用性。

参 考 文 献

[1] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017,48(12):1－18.
LIU Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):1－18. (in Chinese)

[2] 李天华,董广胜,姚玉康,等. 连栋温室分段变距喷雾机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 170－179.
LI Tianhua, DONG Guangsheng, YAO Yukang, et al. Design and experiment of segmented and variable distance spraying robot for multi-span greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(2): 170－179. (in Chinese)

[3] 胡瑾, 杨永霞, 李远方, 等. 温室环境控制方法研究现状分析与展望[J]. 农业工程学报, 2024,40(1):112－128.
HU Jin, YANG Yongxia, LI Yuanfang, et al. Analysis and prospect of the environmental control systems for greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 112－128. (in Chinese)

[4] 毛罕平, 晋春, 陈勇. 温室环境控制方法研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报, 2018,49(2):1－13.
MAO Hanping, JIN Chun, CHEN Yong. Research progress and prospect on control methods of greenhouse environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(2):1－13. (in Chinese)

[5] 毕松,张国轩,李志军,等. 基于测距值修正的温室植保机器人定位方法[J]. 农业机械学报,2023,54(8):347－358.
BI Song, ZHANG Guoxuan, LI Zhijun, et al. Positioning method of greenhouse plant protection robot based on distance measurement value correction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):347－358. (in Chinese)

[6] KANG Jun, MENG Wenjun, ABRAHAM A, et al. An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control[J]. Neurocomputing, 2014,135:79－85.

[7] SOMWANSHI D, BUNDELE M, KUMAR G, et al. Comparison of fuzzy－PID and PID controller for speed control of DC motor using LabVIEW[J]. Procedia Computer Science, 2019,152:252－260.

[8] 王宏志, 王婷婷, 胡黄水, 等. 基于 Q 学习优化 BP 神经网络的 BLDCM 转速 PID 控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021,51(6):2280－2286.
WANG Hongzhi, WANG Tingting, HU Huangshui, et al. PID control based on BP neural network optimized by Q-learning for speed control of BLDCM[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021,51(6):2280－2286. (in Chinese)

[9] CHEN Wenming, WANG Gongpu, HU Lianglong, et al. Research on the control strategy of leafy vegetable harvester travel speed automatic control system[J]. AgriEngineering, 2022,4(4):801－825.

[10] YIN Hongqiao, YI Wenjun, WU Jintao, et al. Adaptive fuzzy neural network PID algorithm for BLDCM speed control system [J]. Mathematics, 2022,10(1):118.

[11] WANG Jun, LI Moudao, JIANG Weibin, et al. A design of FPGA-based neural network PID controller for motion control system[J]. Sensors, 2022,22(3):889.

[12] SOUNDIRARRAJAN N, SRINIVASAN K. Performance evaluation of ant lion optimizer-based PID controller for speed control of PMSM[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2021,49(2):1104－1118.

[13] DUTTA P, NAYAK S K. Grey wolf optimizer based PID controller for speed control of BLDC motor[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021,16(2):955－961.

(下转第 154 页)

[24] RIBEIRO A M, FIORAVANTI A R, MOUTINHO A, et al. Nonlinear state-feedback design for vehicle lateral control using sum-of-squares programming[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(3): 743 - 769.
[25] SHAO P, MA X, YAN B, et al. Structural state feedback gain-scheduled tracking control based on linear parameter varying system of morphing wing UAV[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024,362(1): 107355.
[26] 白晓平,胡静涛,高雷,等.农机导航自校正模型控制方法研究[J].农业机械学报,2015,46(2):1 - 7.
BAI Xiaoping, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Self-tuning model control method for farm machine navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(2):1 - 7. (in Chinese)
[27] 陈仲举,谢斌,罗振豪,等.无人驾驶电动拖拉机犁耕机组路径跟踪与耕深模糊控制策略[J].农业机械学报,2024,55(12):491 - 504.
CHEN Zhongju,XIE Bin,LUO Zhenhao,et al. Fuzzy control strategy for path tracking-tillage depth of unmanned electric tractor ploughing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(12):491 - 504. (in Chinese)
[28] 王辉,王桂民,罗锡文,等.基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J].农业工程学报,2019,35(4):11 - 19.
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(4):11 - 19. (in Chinese)
[29] 张培培,杨自栋,赵相君.拖拉机-牵引式农机具的运动建模与跟踪控制[J].中国农机化学报,2021,42(4):128 - 133.
ZHANG Peipei, YANG Zidong, ZHAO Xiangjun. Motion modelling and tracking control of tractor - drawn agricultural implements[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2021,42(4):128 - 133. (in Chinese)
[30] 陈亮,秦兆博,孔伟伟,等.基于最优前轮侧偏力的智能汽车 LQR 横向控制[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(9):906 - 912.
CHEN Liang,QIN Zhaobo,KONG Weiwei,et al. Lateral control of intelligent vehicle LQR based on optimal front wheel lateral deflection[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition),2021,61(9):906 - 912. (in Chinese)

(上接第 91 页)

[14] KHAN L, KHATOON A, GAUR P, et al. Speed control of wheeled mobile robot by nature-inspired social spider algorithm-based PID controller[J]. Processes, 2023,11(4):1202.
[15] ZHANG Hongyuan, HAN Mingjuan, MI Yajie, et al. Research and implementation of intelligent control system for grassland grazing robotic vehicle[J]. Electronics, 2023,12(14):3078.
[16] 秦贵, 刘晓明, 郭建业, 等. 大棚蔬菜生产栽植机械化技术试验示范[J]. 农业工程, 2014,4(增刊 2):41 - 44,48.
QIN Gui, LIU Xiaoming, GUO Jianye, et al. Experiment and demonstration of planting mechanization technology for greenhouse vegetable production[J]. Agricultural Engineering, 2014,4(Supp. 2):41 - 44,48. (in Chinese)
[17] KUMMUAL B N, KOTA V R. Design of MFA - PSO based fractional order PID controller for effective torque controlled BLDC motor[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022,49:101644.
[18] ELTOUM A M, HUSSEIN A, ABIDO M A. Hybrid fuzzy fractional-order PID-based speed control for brushless DC motor[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021,46(10):9423 - 9435.
[19] 许景辉, 王雷, 谭小强, 等. 基于 SOA 优化 PID 控制参数的智能灌溉控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(4): 261 - 267.
XU Jinghui, WANG Lei, TAN Xiaoqiang, et al. Application of PID control based on SOA optimization in intelligent irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4):261 - 267. (in Chinese)
[20] ZHENG Haiyan, ABID Y. Optimization algorithm for PID control parameters of electrical equipment in rural electric drainage and irrigation stations[J]. Mobile Information Systems, 2022,2022:4268662.
[21] ZHANG Zhizhou, LI Yang. An AEFA-based optimum design of fuzzy PID controller for attitude control flywheel with BLDC motor[J]. Aerospace, 2022,9(12):789.
[22] 曾雄飞. 基于粒子群算法优化 BP 神经网络的 PID 控制算法[J]. 电子设计工程,2022,30(11):69 - 73,78.
ZENG Xiongfei. The PID control algorithm based on partie swarm optimization optimized BP neural network[J]. Electronic Design Engineering, 2022,30(11):69 - 73,78. (in Chinese)
[23] XUE Huan, LI Tao, LI Jie, et al. Multi-objective optimization for turning process of 304 stainless steel based on dung beetle optimizer-back propagation neural network and improved particle swarm optimization[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024,33(8):3787 - 3800.
[24] XUE Jiankai, SHEN Bo. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023,79(7):7305 - 7336.
[25] HE Jiachen, FU Lihui. Robot path planning based on improved dung beetle optimizer algorithm[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024,46(4):235.
[26] GUO Xinhua, QIN Xiao, ZHANG Qing, et al. Speaker recognition based on dung beetle optimized CNN[J]. Applied Sciences, 2023,13(17):9787.