doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.018

基于TSSA-PID的果园喷雾机风幕风速调控系统研究

姜红花[1]　胡芳超[1]　白　鹏[2]　刘理民[3]　薛惠峰[1]　毛文华[4]
杜宜龙[5]　杨祥海[1]

（1. 山东农业大学信息科学与工程学院，泰安 271018；2. 山东科技大学泰安校区教务部，泰安 271018；
3. 山东农业工程学院机械电子工程学院，济南 250100；4. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；
5. 蓬莱国宾葡萄酒庄有限公司，烟台 265600）

摘要：为降低果园风送植保机械飘失量并提高冠层内部沉积量和均匀性，在果园风送式防飘喷雾机基础上提出了一种基于改进麻雀搜索算法（Tent sparrow search algorithm，TSSA）优化PID参数的调控系统。该系统通过在麻雀搜索算法中引入Tent混沌映射、随机跟随策略和逐维透镜成像反向学习，提高对PID参数的寻优能力，避免PID系统陷入局部，提高风幕风速自动化调控水平，进而降低雾滴飘失量并提高冠层沉积量和均匀性。仿真试验结果表明，该算法与对比算法相比，响应时间降低45.77%，超调量降低13.22%，具有更优的自动调节能力。田间试验结果表明，调节风幕风速平均误差和最长响应时间分别为2.11%和0.8 s，相对于其他算法分别降低24.1%和20%以上。相比于果园风送式防飘喷雾机，应用该系统后，平均雾滴飘移、地面流失量和雾滴沉积量分布变异系数分别减少13%、16.13%和29.62%，平均冠层沉积量提升11.97%。研究成果为解决果园农药飘失和冠层内部沉积问题提供了新的技术方案。

关键词：雾滴防飘；麻雀搜索算法；PID控制；果园植保
中图分类号：S435.132；S194　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S2-0177-10

Wind Curtain Speed Control System of Orchard Sprayer Based on TSSA-PID

JIANG Honghua[1]　HU Fangchao[1]　BAI Peng[2]　LIU Limin[3]　XUE Huifeng[1]　MAO Wenhua[4]
DU Yilong[5]　YANG Xianghai[1]

(1. *College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian* 271018, *China*
2. *Department of Academic Affairs, Tai'an Campus, Shandong University of Science and Technology, Taian* 271018, *China*
3. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, Ji'nan* 250100, *China*
4. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Groupe Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
5. *Penglai State Guest Winery Co., Ltd., Yantai* 265600, *China*)

Abstract: Orchard wind-sending plant protection machinery has low real-time performance, large drift, and poor environmental adaptability. To reduce the drift loss of orchard air-assisted plant protection machinery and improve the deposition amount and uniformity within the canopy, a control system based on the tent sparrow search algorithm (TSSA) to optimize PID (proportional-integral-derivative) parameters was proposed on the basis of the orchard air-assisted anti-drift sprayer. This system enhanced the optimization ability for PID parameters by introducing tent chaotic mapping, random following strategy, and dimension-by-dimension lens imaging reverse learning into the sparrow search algorithm, avoiding the PID system from falling into local minima, and improving the level of automation in wind curtain speed regulation. Consequently, it reduced the drift loss of droplets and enhanced the canopy deposition amount and uniformity. Simulation test results showed that compared with the contrast algorithms, the response time was reduced by 45.77%, and the overshoot was reduced by 13.22%, demonstrating superior automatic regulation capability. Actual test results indicated that the average error and the longest response time for adjusting the wind

收稿日期：2024-07-28　修回日期：2024-09-29
基金项目：山东省自然科学基金项目(ZR2023MC201)、山东省重点研发计划项目(2022TZXD0011)和山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ001)
作者简介：姜红花(1971—)，女，教授，主要从事物联网与自动控制研究，E-mail：j_honghua@sdau.edu.cn
通信作者：白鹏(1989—)，男，讲师，主要从事物联网与自动控制研究，E-mail：skd995695@sdust.edu.cn

curtain speed were 2.11% and 0.8 s, respectively, which were 24.1% and 20% lower than those of other algorithms. Compared with the orchard air-assisted anti-drift sprayer, after applying this system, the drift of droplets, ground loss, and the coefficient of variation of droplet deposition distribution were reduced by 13%, 16.13%, and 29.62%, respectively, while the canopy deposition amount was increased by 11.97%. This research achievement provided a technical solution for addressing the problems of pesticide drift loss and canopy internal deposition in orchards.

Key words: fog droplet anti-drift; sparrow search algorithm; PID control; orchard plant protection

0 引言

风送式喷雾机是果园施药最常用装备,但果园施药环境复杂多变,易产生农药飘移、药害污染环境、危害敏感植物,农药在果树冠层内部沉积不均匀影响防治效果[1]。目前风送式喷雾机已实现根据靶标密度、树冠尺寸及树冠有无变量控制药液喷雾量,但尚未实现风速变量控制。因此对风速实现变量控制,可提高喷雾效果,减少雾滴漂移[2-5]。

PID控制具有原理简单、适应性好、鲁棒性强等优点,在风速调控中得以应用[6-8]。MEHMET等[9]将PID控制应用于太阳能空气加热器,通过PID控制风机维持恒定风速,实现了风速环境适用性调节。冉均均等[10]采用模糊PID控制改造通风系统使最小风速由0.2 m/s提升到2.5 m/s,风速保持在2.5-3.0 m/s之间。伞红军等[11]设计了自适应模糊PID控制策略,通过PID调节变频器频率控制风机改变风速。但传统PID控制系统存在控制参数整定困难等问题[12],难以满足实时调控需求,利用群智能类算法(GWO, SSA)[13-15]、进化类算法(SGA)[16-17]和物理规则类算法[18]等智能算法能优化控制参数,可提高控制系统实时性。王新东等[19]运用灰狼优化算法(Grey wolf optimization,GWO)优化PID控制参数,将系统响应时间降至0.2 s,系统误差控制在1.32%内,实现精准稳定的变量施药控制。XU等[20]采用自适应交叉算子改进标准遗传算法(Simple genetic algorithm,SGA)优化PID控制参数,将喷雾系统超调量降至1.25%,稳态误差维持在1.21%。李雅梅等[21]采用麻雀搜索算法(Sparrow search algorithm,SSA)优化PID控制参数,提升了PID参数整定精度,并加快了被控系统达到稳定速度,但试验中发现,标准SSA算法还存在麻雀个体初始位置分布不均匀,寻优中后期容易陷入局部最优等问题。

为提高风送式喷雾机喷雾效果,减少雾滴漂移,本文在果园风送式防飘喷雾机基础上提出一种改进麻雀搜索算法(Tent sparrow search algorithm,TSSA)的风幕风速PID调控系统,该系统通过在麻雀搜索算法中引入Tent混沌映射、随机跟随策略和逐维透镜成像反向学习,使传统的SSA算法跳出局部最优,以实现全局寻优,提高风幕风速PID调控系统稳定性和动态响应能力,以期解决果园农药飘失和冠层沉积量及沉积均匀性等问题。

1 果园喷雾机风幕风速调控系统设计

1.1 系统总体设计

果园喷雾机风幕风速调控系统主要由传感器模块、控制模块、执行模块及电源模块等部分构成(图1,图中红线表示信息传递,绿线表示电源供给)。传感器模块感知环境和机体信息,其中,环境风速监测传感器安装在防飘风筒顶部,实时监测环境风;管道风速传感器安装在防飘风筒内靠近出风口处,实时获取防飘风筒出风口风速;编码器与喷雾车轮同轴安装,计算机体速度;液位检测传感器安装在药箱内,获取药液量变化;温湿度传感器安装在防飘风筒顶部,感知果园温湿度变化;电量监测装置用以获取电池电量。控制模块由STM32单片机和控制算法构成,用以处理采集的数据,并输出相应控制信号控制执行模块动作。执行模块由液晶显示屏、数字蝶阀和报警装置等组成,其中,数字蝶阀由蝶阀和数字舵机(由控制信号控制)组成,实时调控出风口风速。供电电源模块由铅酸蓄电池(DC 12 V)和稳压装置组(输出DC 3.3、5、10、12 V)等组成。

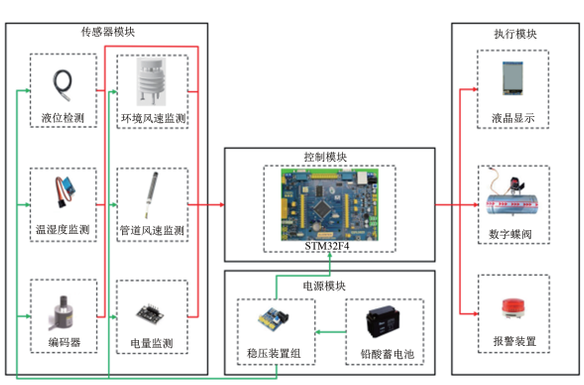


图1 果园喷雾机风幕风速调控系统总体构成图

Fig. 1 Overall composition diagram of orchard spray air curtain wind speed control system

系统工作原理为:当喷雾作业时,STM32控制器实时获取和处理环境风速,依据构建的预测模型确定最佳风幕风速下的蝶阀开度,并根据确定的最佳风幕风速与管道风速传感器检测到实际风速间偏差,利用TSSA-PID算法对蝶阀进行调整,确保输出最佳风幕风速,以防止雾滴脱靶,进而提高整个喷雾系统的防飘失能力、冠

层雾滴沉积量及沉积均匀性。

1.2　系统应用平台

将风幕风速调控系统安装于机械防飘平台上(图2，宽高为3.0 m×3.4 m)，离心风机通过发动机传动轴带动产生气流，经分配器分配输送到输送风管，最终到V形风筒，经出风口射流至空气中[22]；控制箱根据获取的传感器实时数据，制定控制策略，调整输送风管中的可控蝶阀开度，进而调控出风口风速。

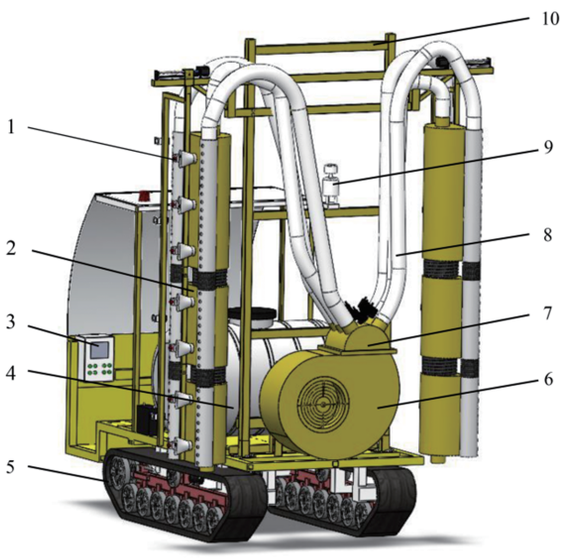


图2　果园风送式防飘喷雾机结构

Fig. 2　Structure of wind-driven anti-drift sprayers for orchards

1. V形防飘风筒　2. 主风筒　3. 控制箱　4. 药箱　5. 履带式底盘　6. 离心风机　7. 分配器　8. 输送风管　9. 环境风速传感器　10. 机架

2　雾滴飘移预测模型

杨祥海[23]通过试验得出侧风风速对雾滴飘移影响显著，而风幕辅助气流形成的风场能抑制侧风对雾滴的飘移影响。为验证试验结果的准确性，在多元回归的基础上，采用LS算法进行多元非线性回归分析，得到侧风风速和风幕风速雾滴飘移预测模型为

$$F = 15.1597 - 0.2578X^2 + 8.6752X - 0.1557XY - 0.0722Y^2 - 0.5251Y + 0.00356Y^3 \quad (1)$$

式中　F——雾滴飘移率，%

X——侧风风速，m/s

Y——风幕风速，m/s

为更直观地分析模型对试验数据的解释效果，构建雾滴飘移率对于风幕风速与侧风风速的响应曲面，如图3所示。由图3可知，随着侧风风速的增加，雾滴飘移率也不断上升；同时，在不同侧风风速下，风幕辅助气流能够有效抑制侧风导致的雾滴飘移，随着风幕风速的增加，整体雾滴飘移率先下降后缓慢回升。回升现象是由于风幕风速过高，气流被冠层反弹，阻碍了细小雾滴喷向靶标冠层，导致雾滴悬浮时间变长，易受侧风影响产生飘移[24]。故此，需制定合适的风幕决策和控制方案，来降低雾滴飘失并提高冠层内部雾滴沉积量及沉积均匀性。

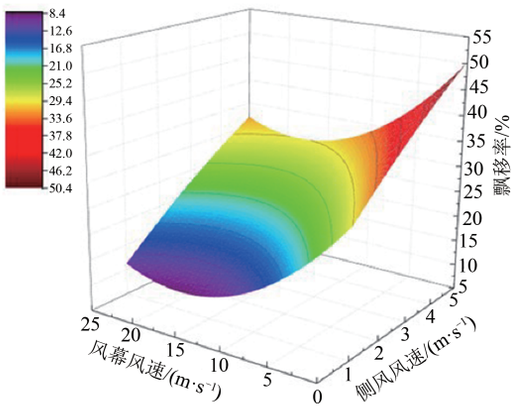


图3　综合影响下的雾滴飘移率响应曲面

Fig. 3　Fog droplet drift rate response surface under combined effects

3　调控系统算法和模型设计

调控系统控制框架使用PID控制，其最终控制效果由K_p、K_i和K_d 3个控制参数决定，通过群智能优化算法自动调整K_p、K_i和K_d可得最优解，以提高PID控制参数整定能力并降低整个控制系统响应时间。

3.1　常规SSA算法

SSA算法是一种群智能优化算法，具有全局搜索速度快、鲁棒性高、扩展性优等特点，采用SSA算法优化控制参数，可提高PID控制的精准性与响应速度，提升PID控制效果。SSA算法通过模拟麻雀觅食过程来实现对PID参数的寻优，麻雀集合矩阵为

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_N \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (2)$$

其中　$$x_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \cdots, x_{i,d}) \quad (3)$$

式中　N——麻雀种群数量，取500

d——变量维数，取3

麻雀适应度矩阵为

$$\boldsymbol{F}_x = \begin{bmatrix} f(x_1) & f(x_2) & \cdots & f(x_N) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (4)$$

其中　$$f(x_i) = \left(f(x_{i,1}), f(x_{i,2}), \cdots, f(x_{i,d}) \right) \quad (5)$$

$\boldsymbol{F}_x$中每个值表示个体适应度，适应度更优的麻雀率先取得食物，并成为发现者，其余为跟随者或警戒者[15]。

3.2　TSSA算法

3.2.1　混沌映射初始化种群

针对SSA种群初始化时位置分布存在不均匀问题，引入Tent混沌映射对SSA算法进行初始化，其迭代过程简单，且能生成均匀序列，以增加种群多样性，进而均匀覆盖求解空间，提高算法优化效率和准确性[25]，其数学表达式为

$$z_{i+1} = \begin{cases} 2z_i & (0 \leqslant z \leqslant \dfrac{1}{2}) \\ 2(1 - z_i) & (\dfrac{1}{2} < z \leqslant 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中　z——混沌序列　i——当前迭代次数

z_i——第i次迭代产生的序列

经伯努力移位变换后为

$$z_{i+1} = (2z_i) \bmod 1 \tag{7}$$

式中 mod1——模为1的取余运算

为了稳定算法寻优性能，在Tent混沌模型中引入随机变量rand(0, 1) $\frac{1}{N_T}$，在不破坏混沌变量随机性、遍历性的基础上避免Tent混沌序列落入不稳定周期点或小周期点，改进后为

$$z_{i+1} = (2z_i) \bmod 1 + \text{rand}(0,1)\frac{1}{N_T} \tag{8}$$

式中 rand(0, 1)——[0, 1]之间的随机数

N_T——混沌序列内粒子数量

Tent混沌映射混沌序列可分为：随机在[0, 1]区间内产生初始值Z_0，记$i = 0$；利用式(8)进行迭代，产生Z序列，i自增1；若迭代次数达到最大，则停止迭代，保留Z序列。当迭代一定代数时，系统将遍览整个求解区域，增强SSA初始种群多样性，提高对PID最优解的全局探测能力。

3.2.2 随机跟随策略

在跟随者位置更新时引入随机跟随策略，使跟随者每次位置更新都充分利用上一代个体的位置信息和概率性变化，以保证收敛性和维持种群多样性，避免SSA算法对PID参数寻优陷入局部最优，有效平衡全局搜索能力和局部搜索能力，改进后的跟随者位置为

$$X_{i,d}^{t+1} = \begin{cases} Q\exp\left(\dfrac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,d}^t}{i^2}\right) & \left(i > \dfrac{N}{2}\right) \\ X_{i,d}^t + S\text{rand}(0,1)(x_{r,j}^t - x_{i,d}^t) & \left(i \leqslant \dfrac{N}{2}\right) \end{cases} \tag{9}$$

其中 $S = \exp(f_s - f_i)$

f_s——随机选取第s只麻雀的适应度，$s \neq i$

Q——服从0~1正态分布的随机数

t——当前迭代次数

X_{worst}——全局最差位置

3.2.3 逐维透镜成像反向学习

在警戒者位置更新过程中提出一种透镜成像反向学习[26]结合逐维反向学习的策略，对每个维度的解进行反向学习，减少维度之间的相互干扰，得到更多解并选出最优解。

如图4所示，以二维空间为例，假设在X处有一高度为h的物体，该物体在透镜作用下于透镜另一侧的X^*处形成高度为h^*的倒立实像，透镜位置位于搜索范围[a, b]的中点处。由透镜成像原理可得

$$\frac{\frac{a+b}{2} - X}{X^* - \frac{a+b}{2}} = \frac{h}{h^*} \tag{10}$$

将透镜成像扩展到每维空间，对每个维度进行透镜成像反向学习，令$p = \frac{h}{h^*}$，则可得

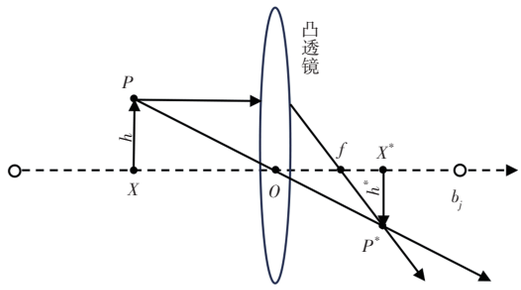


图4 透镜反向学习原理

Fig. 4 Principle of lens reverse learning

$$X_j^* = \frac{a_j + b_j}{2} + \frac{a_j + b_j}{2p} - \frac{X_j}{p} \tag{11}$$

式中 p——透镜聚焦能力，即成像比例，取0~1

j——维度

a_j——第j维下界

b_j——第j维上界

当$p = 1$时，每一维透镜成像反向学习都是一般反向学习策略，通过调整调节因子p，对算法当下解进行逐维透镜反向学习，将各维度映射到空间中得到反向解。每次迭代都通过式(11)更新警戒者位置，得到不同维度组成的新的解，通过比较各个适应度进行筛选，确定最优解。

3.3 基于TSSA-PID的调控系统模型设计

3.3.1 系统传递函数构建

调控系统控制量为风幕风速，被控对象为可控蝶阀，利用实际风幕风速与决策风幕风速间差值构建反馈控制模型，引入TSSA-PID算法矫正控制系统，最终输出适合的PWM波调控蝶阀的开度，减少风速输出误差，调控系统结构模型如图5所示。

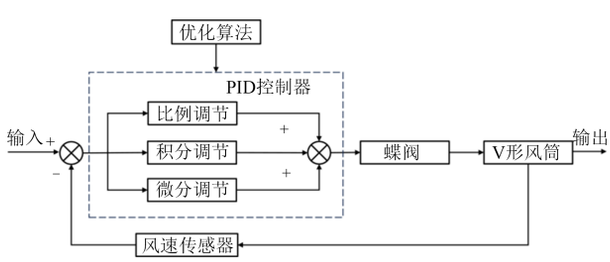


图5 风幕风速调控系统模型

Fig. 5 Model of wind curtain wind speed adjust control system

可控蝶阀中的数字舵机带动蝶阀运动进而控制出风口风速，舵机工作时处于饱和恒速状态。在实际建模时，根据舵机参数信息采用线性模型模拟逼近舵机的非线性传递函数，从侧面验证不同优化算法性能，计算式为

$$G_d(s) = H_1(s)H_2(s)H_3(s) = k\mathrm{e}^{-\tau s}\frac{1}{Ts+1} = \frac{k\mathrm{e}^{-\tau s}}{Ts+1} \tag{12}$$

式中 $H_1(s)$——输入输出之间比例放大环节

$H_2(s)$——舵机工作时纯延时环节

$H_3(s)$——一阶惯性环节

k——蝶阀增益，取5

T——时间常数，取0.2 s

τ——滞后时间，取0.1 s

选用JT1402型管道热敏型风速传感器为反馈模块，其传递函数为

$$H(s)=\frac{1}{\tau s+1} \tag{13}$$

依据式(12)、(13)和图5，由梅森增益公式可知风幕风速PID调控系统闭环传递函数为

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{(K_p+K_i\frac{1}{s}+K_ds)G_d(s)H(s)}{1+(K_p+K_i\frac{1}{s}+K_ds)G_d(s)H(s)}$$

$$=\frac{(K_p+K_i\frac{1}{s}+K_ds)5\mathrm{e}^{-0.1s}}{(K_p+K_i\frac{1}{s}+K_ds)5\mathrm{e}^{-0.1s}+0.02s^2+0.3s+1} \tag{14}$$

3.3.2　系统适应度函数构建

适应度函数为算法参数寻优过程中的性能评价指标，适应度越大，PID参数越优。因此，设计误差绝对值积分，并在其中加入控制输入量的平方项和惩罚机制的适应度函数，计算式为

$$F_{\text{fitness}}=\frac{1}{\int_0^{\infty}(w_1|e(t)|+w_2u^2(t)+w_4e_y(t))\mathrm{d}t+w_3t_u} \tag{15}$$

其中　　$e_y(t)=y(t)-y(t-1)$

$e_y(t)<0$

式中　$e(t)$——系统瞬时误差

$u(t)$——控制值

t_u——调节时间，s

$y(t)$——系统输出

w_1、w_2、w_3——权值，取0~1

w_4——调节时间权重，$w_4\gg w_1$

因控制目标与风幕风速的稳态误差相关，w_1取较大值0.999。为确保控制精度，并减少超调量、蝶阀动作与调节时间，w_2、w_3、w_4分别取0.001、0.05、100[17, 27]。求得的最优PID控制参数应使系统稳态控制精度小于±2%，超调量小于3%，动态调节时间小于1s。

3.4　基于TSSA算法的PID参数优化

TSSA算法与PID控制模型通过多维麻雀个体位置(即PID控制器参数)和适应度函数连接。TSSA算法优化PID参数过程如图6所示。使用Tent混沌序列初始化麻雀种群，将麻雀种群中的个体位置依次赋值给PID控制器参数K_p、K_i和K_d，依据所设计的适用度函数计算适应度并排序；接着更新发现者位置，同时依据设计的随机跟随策略更新发现者位置，逐维透镜反向学习更新警戒者位置，完成一次迭代运算，并输出新的最优适应度；最后将取得最优适应度的PID参数代入到系统数学模型中，得到该组参数的动态性能指标，若满足则输出最优适应度的PID参数，否则将进一步迭代计算。

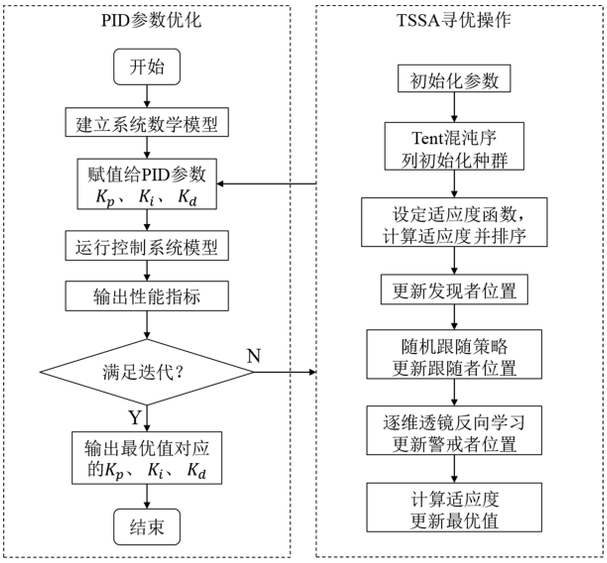


图6　TSSA-PID优化算法实现步骤

Fig. 6　Implementation steps of TSSA-PID optimization algorithm

4　仿真试验与果园试验

4.1　TSSA-PID系统仿真试验

为验证TSSA算法对PID控制参数的优化性能，分别采用传统Z-N整定法(Traditional Z-N tuning method，Tra)、TSSA、SSA、SGA、GWO算法对PID控制参数进行寻优，通过仿真试验进行验证。

4.1.1　参数设置

设定TSSA、SSA、SGA、GWO[28]算法初始参数，所有算法共有参数保持一致，种群规模N为500，迭代次数为1 000，各算法设置如表1所示，设置麻雀搜索算法中发现者p_{Num}比例为30%、警戒者S_{Num}比例为20%、安全值R_2为0.8。

表1　各算法参数设置

Tab. 1　Algorithm parameter settings

控制算法	参数
SGA-PID	交叉率P_{sc}=0.9，变异率P_{sm}=0.2
Tra-PID	P(比例环节)从1开始到500，步长为0.5
GWO-PID	a从2线性递减至0，r_1、$r_2\in[0,1]$
SSA-PID	$p_{\text{Num}}=0.3\text{NP}$，$S_{\text{Num}}=0.2\text{NP}$，$R_2=0.8$
TSSA-PID	$p_{\text{Num}}=0.3\text{NP}$，$S_{\text{Num}}=0.2\text{NP}$，$R_2=0.8$

由表2可知，不同算法求得的最优控制参数存在较大差异。因此，根据数学模型和最优PID参数，进一步在Matlab-Simulink中进行仿真。

表2　最优参数

Tab. 2　System performance indicators

控制算法	K_p	K_i	K_d
SGA-PID	57.5347	3.4800	0.1724
Tra-PID	24.1125	6.2510	1.9024
GWO-PID	27.0103	3.4999	3.8018
SSA-PID	64.9675	5.1384	1.5832
TSSA-PID	76.8915	6.3148	1.3050

4.1.2 评价指标

为反映控制模型动态性能，引入动态性能评价指标进行评估，采用超调量、上升时间和调节时间等作为控制评价指标（图7）。超调量表示输出量偏离设定值的程度，为峰值和稳定值的差值与稳定值间的比值；上升时间表示系统输出量第1次到达设定值的时间，表示消除因干扰而产生的偏差速度；调节时间表示调控系统达到设定的误差值所用时间，误差通常设定为0.02或0.05。

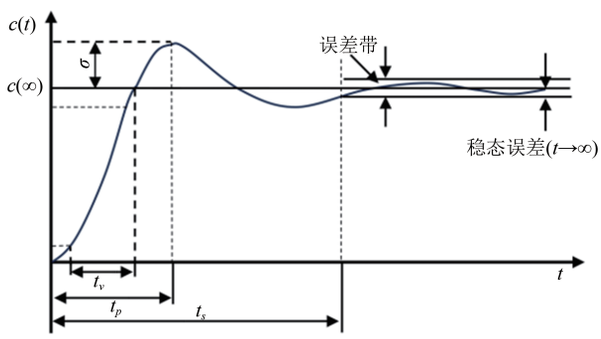


图7 控制评价指标

Fig. 7 Control evaluation indicators

4.1.3 仿真结果

果园施药作业过程中，为应对行间环境风的变化，需根据喷雾机和行间风的速度变化调控风幕风速。因此，在阶跃响应1.5、3.3 s处，设定变化幅值为0.05、-0.05、持续时间为0.8 s的阶跃波动，用以模拟施药作业过程中的行间环境风变化，以验证5种算法调控系统对波动的响应性能。5种算法调控系统动态性能参数如表3所示，动态响应曲线如图8所示。

表3 控制性能对比

Tab 3 Control performance comparison

控制算法	响应			波动		
	超调量/%	调节时间/s	RMSE	超调量/%	调节时间/s	RMSE
Tra-PID	10.81	1.256	0.893 4	11.68	1.266	0.901 2
SGA-PID	8.90	0.884	0.868 9	9.12	0.864	0.883 6
GWO-PID	1.29	1.288	0.843 7	1.45	1.298	0.852 7
SSA-PID	1.21	0.638	0.854 9	1.33	0.618	0.863 8
TSSA-PID	1.05	0.346	0.731 2	0.96	0.336	0.723 4

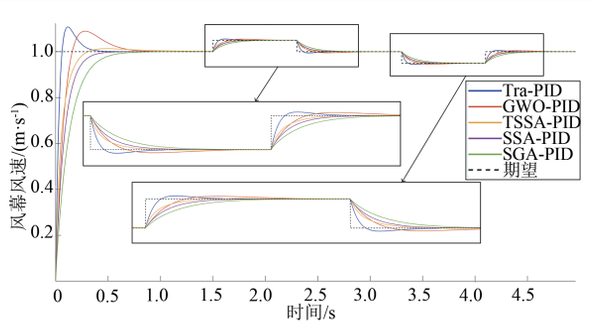


图8 系统响应曲线及波动仿真控制对比

Fig. 8 System response curves and comparison of fluctuation simulation control

由图8、表3可知，5种算法超调量、调节时间和RMSE，在响应和波动阶段均有差异。Tra-PID算法动态响应能力最差，超调量、调节时间和RMSE的值均最大，分别为10.81%、1.256 s和0.893 4，其中超调量不满足设定指标（3%）；SGA-PID算法超调量同样不满足设定指标，而其他因为超调量会造成出风口风速在某个瞬间过大，加剧雾滴飘移的风险，所以，Tra-PID算法和SGA-PID算法不适用。TSSA-PID算法的所有动态响应指标都最优，超调量、调节时间和RMSE均最小，分别为1.05%、0.346 s和0.731 2，说明该算法下的出口风速调节速度快且稳定。TSSA-PID算法相比于Tra-PID、SGA-PID、GWO-PID和SSA-PID算法，超调量、调节时间和RMSE在响应阶段分别降低90.27%、88.20%、18.60%和13.22%，72.45%、60.86%、73.14%和45.77%，18.16%、15.85%和14.47%；在波动阶段分别降低91.78%、89.47%、33.79%和27.82%，73.46%、61.11%、74.11%和45.63%，19.73%、18.13%、15.16%和16.25%。

4.2 TSSA-PID系统试验验证

为验证果园喷雾机TSSA-PID风幕风速调控系统的性能，在果园防飘喷雾机[24]的控制器中分别运行5种算法进行风幕风速控制误差试验和系统响应时间试验。试验时通过向控制器发送控制指令，并采集管道风速传感器的实际风速数据和达到稳态风速过程中的时间。

4.2.1 风幕风速控制试验

文献[29]规定喷洒作业时自然风速应小于3.5 m/s（3级风），前期研究结果表明：0~5 m/s侧风下的最佳风幕风速为10~25 m/s，蝶阀全开时最高风幕风速为25 m/s[24, 30]。因此，以增幅4 m/s将决策风幕风速范围分为4个控制等级（等级分别为10、14、18、22 m/s），通过单片机指令设定决策风幕风速进行风幕风速控制试验，探究果园喷雾机TSSA-PID风幕风速调控系统控制效果。

试验分别采用5种算法进行风幕风速控制试验。系统风幕风速控制误差计算式为

$$E_R = \frac{|S_F - J_F|}{J_F} \times 100\% \tag{16}$$

式中 S_F——实际风幕风速，m/s

J_F——决策风幕风速，m/s

E_R——风幕风速误差，%

不同算法风幕风速误差曲线如图9所示。由图9可知，5种算法的相对误差均随决策风幕风速的增大而降低，且Tra-PID算法实际风幕风速相对误差最大，TSSA-PID算法相对误差最小，两者平均误差分别是9.04%和2.11%。TSSA-PID算法相比于Tra-PID、SGA-PID、GWO-PID和SSA-PID算法，平均相对误差分别降低76.66%、73.69%、48.16%和24.10%。

4.2.2 系统响应时间试验

系统响应曲线如图10所示，图中阴影部分为调控系统5%的误差带。

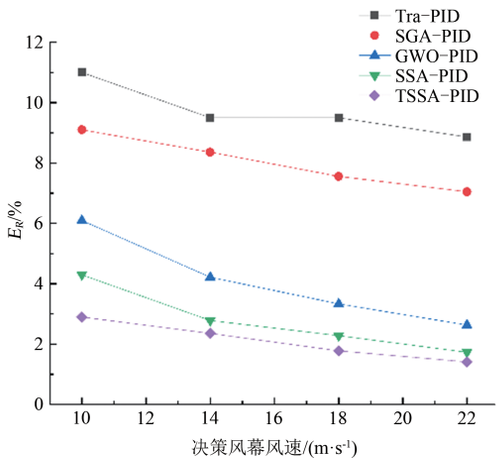
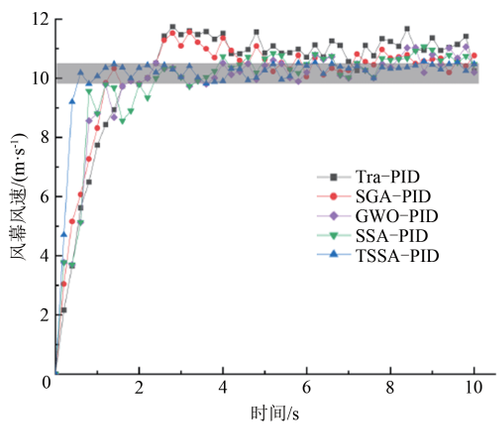
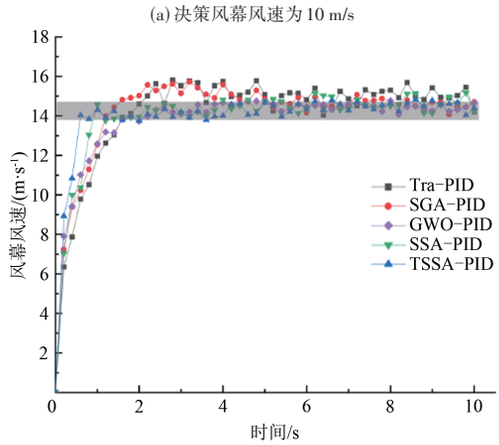


图9　风幕风速误差曲线

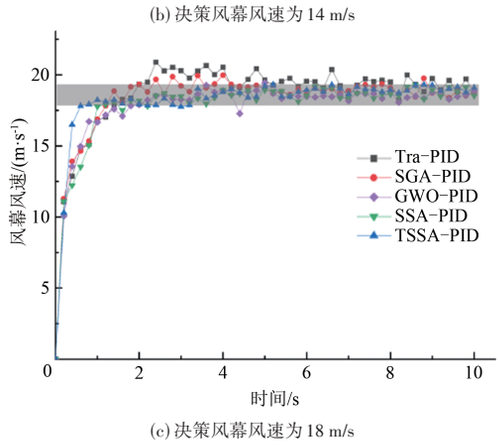
Fig. 9　Wind curtain wind speed error curves



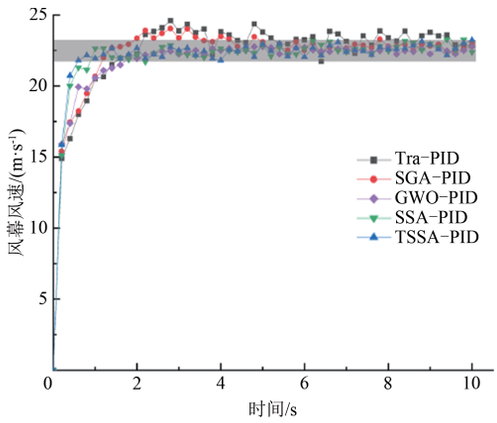
(a) 决策风幕风速为10 m/s



(b) 决策风幕风速为14 m/s



(c) 决策风幕风速为18 m/s



(d) 决策风幕风速为22 m/s

图10　系统响应曲线

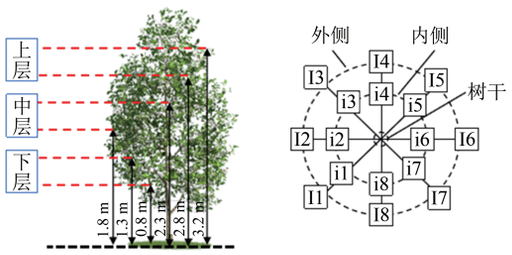
Fig. 10　System response curves

由图10可知，随着决策风幕风速增大，5种算法系统响应时间逐渐增大，说明决策风幕风速对系统响应时间具有较大影响。在决策风幕风速为22 m/s时，GWO-PID算法的响应时间最长为1.8 s，TSSA-PID算法的响应时间最长为0.8 s，相比于Tra-PID、SGA-PID、GWO-PID和SSA-PID算法分别降低50%、33.33%、55.56%和20%，表明TSSA-PID算法的控制系统到达稳定状态的时间短、控制误差小、实时性好，可用于田间实际作业环境。

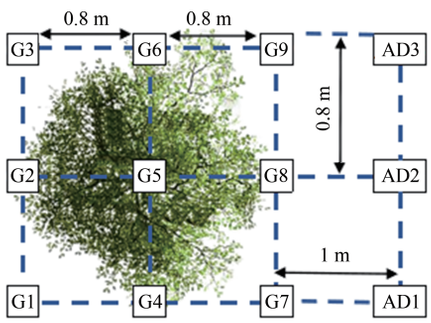
4.2.3　果园喷雾试验

为验证果园喷雾机TSSA-PID风幕风速调控系统的防飘失及冠层沉积性能，进行果园喷雾验证试验。试验地点位于山东农业大学泮河校区实验站矮砧密植苹果园，环境温度22~33℃，环境相对湿度46%~75%，试验对象为果实膨大期矮砧密植苹果树，树高3.5 m（修剪后）、冠径1.6 m、行距4 m和株距2 m。根据文献[24, 30-31]，设置喷雾机喷雾气流为15 m/s、喷雾压力为0.5 MPa，喷头到果树冠层距离为0.5 m，以清水为喷雾介质，机具行进速度为1 m/s。根据文献[29, 31]分别在行间相对风速稳定值为1.5、2.5、3.5、4.5 m/s时进行对比试验。

试验采样布置点如图11所示，对果树冠层的上、中、下部的雾滴沉积分布、地面雾滴流失、冠后空中飘移量进行试验。以3棵非连续果树作为代表性测试对象，设置每棵果树上、中、下3层，每层2个高度布置水敏纸测试雾滴沉积分布。如图11a所示，采样高度分别为下层（0.8、1.3 m）、中层（1.8、2.3 m）、上层（2.8、3.2 m），每个采样高度均分为外侧（I1~I8，距冠层边缘30 cm）、内侧（i1~i8，距树桩边缘30 cm）和树干3部分共计17个位置，每个位置用回形针固定1张水敏纸在叶片上。如图11b所示，在果树冠层下等间隔布置9张水敏纸（G1~G9），并分为左（G3、G6、G9）、中（G2、G5、G8）、右（G1、G4、G7）3组，用于地面流失采样。冠层后设置3处（AD1~AD3）飘移采样点，飘移采样点采用5 m高的立杆，每隔0.5 m布置水敏纸，共9层，从上到下每3张水敏纸为1组，每杆分为上、中、下3组[32-33]。试验时，机具分别在应用风幕风速



(a) 冠层内部采样点



(b) 地面流失与冠后飘移采样点



(c) 试验现场

图11 采样点布置示意图

Fig. 11 Sampling point layout diagrams

调控系统前后从I8驶向I4。每次试验结束后,地面干燥的水敏纸按照左、中、右分组收集,冠层及空中飘移处水敏纸按照上、中、下分组收集,编号存放入塑封袋,带回实验室分析。使用DCP-1618W型扫描仪对试验后的水敏纸扫描,利用重庆六六山下植保科技有限公司的雾滴分析软件获取水敏纸上的雾滴参数[24, 30]。按照试验设置对水敏纸数据计算分析,得到系统应用前后雾滴飘移量、地面雾滴流失量、冠层雾滴沉积量如图12~14所示。

由图12~14可知,系统应用后雾滴飘移量明显减少(图12),地面流失量远小于系统应用前(图13),而冠层沉积量(图14)和均匀性(表4)增加。其中,平均雾滴飘

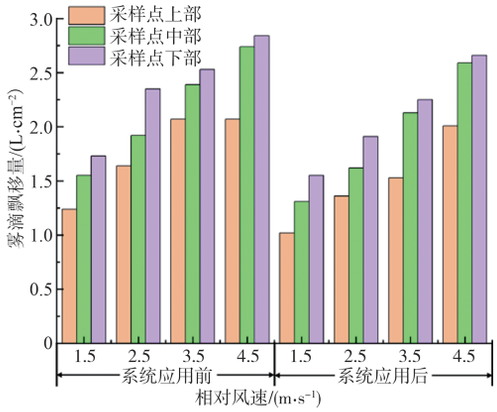


图12 雾滴飘移量对比

Fig. 12 Comparison of airborne mist droplet drift volume

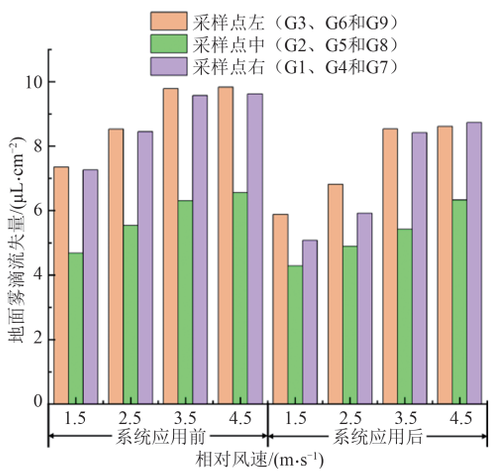


图13 地面雾滴流失量对比

Fig. 13 Comparison of ground mist droplet loss

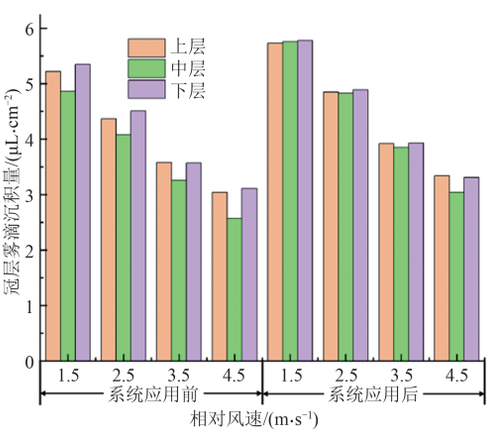


图14 冠层雾滴沉积量对比

Fig. 14 Comparison of canopy fog droplet deposition

表4 冠层雾滴沉积量统计结果

Tab. 4 Canopy fog droplet deposition uniformity

风速/(m·s⁻¹)	系统应用前			系统应用后		
	平均值/(μL·cm⁻²)	标准差/(μL·cm⁻²)	变异系数/%	平均值/(μL·cm⁻²)	标准差/(μL·cm⁻²)	变异系数/%
1.5	1.71	0.67	39.2	1.92	0.53	27.6
2.5	1.44	0.63	44.0	1.62	0.51	31.7
3.5	1.16	0.51	44.3	1.30	0.43	33.4
4.5	0.97	0.51	52.9	1.08	0.36	33.7

移量、地面流失量和雾滴沉积量分布变异系数分别减少13%、16.13%和29.62%，平均冠层沉积量增加11.97%。这表明该系统防飘失作用明显，且增加了冠层内部的雾滴沉积和沉积均匀性。随着相对风速的增加，雾滴受到胁迫作用偏离靶标冠层，雾滴飘移量逐渐增加（图12）。在同一风速时，发现随着高度的增加雾滴飘移量减小，这可能是因为飘移雾滴在重力、行间风和机具行进产生的横向风作用下做抛物线运动，使得雾滴沉积在中下层。随着相对风速的增加，雾滴地面流失量逐渐增加，同一相对风速时，中间雾滴沉积量要小于左右两列，这可能是因为中列雾滴地面流失采样点布置在果树冠层最繁茂处，此处喷雾雾滴被冠层承接，而左右两列采样点上方冠层较中间稀疏，造成了地面飘移流失严重现象（图13）。中层采样点提升效果最为明显（图14）。这主要是由于系统应用后根据相对风速调整最佳抑制雾滴飘移的风幕风速，避免了风幕风速过大在茂密冠层处反弹带来的雾滴飘移变大的问题，提高了冠层雾滴沉积量。由表4可知，系统应用后，在不同侧风风速下，雾滴沉积量分布变异系数[24, 32]分别降低29.53%、28%、24.68%和36.24%，平均降低29.62%，表明该系统提高冠层雾滴分布均匀性。

5　结论

（1）针对传统PID控制超调量较大、响应时间较长等问题，在SSA算法中引入Tent混沌映射、随机跟随策略和逐维透镜成像反向学习，解决SSA算法全局和局部搜索能力不平衡的问题。

（2）设计的TSSA-PID算法的风幕风速调控系统具有较高的控制精度和稳定性。在Matlab/Simulink环境中的仿真结果表明：基于TSSA-PID风幕风速调控模型比Tra-PID、SGA-PID、GWO-PID和SSA-PID算法模型响应时间减少72.45%、60.86%、73.14%和45.77%，超调量降低90.29%、88.2%、19.83%和13.22%。

（3）设计的TSSA-PID算法的风幕风速调控系统具有良好的控制性能和实用性。田间试验结果表明，TSSA-PID算法系统风幕风速平均误差比基于SSA-PID算法系统低24.1%，平均响应时间减少20%，系统应用后平均雾滴飘移量、地面流失量和雾滴沉积量分布变异系数分别比系统应用前减少13%、16.13%和29.62%，平均冠层沉积量提高11.97%。

参　考　文　献

[1] 姜红花，杨祥海，丁睿柔，等. 基于改进ResNet18的苹果叶部病害多分类算法研究[J]. 农业机械学报，2023，54(4)：295－303.
JIANG Honghua，YANG Xianghai，DING Ruirou，et al. Identification of apple leaf diseases based on improved ResNet18[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(4)：295－303.(in Chinese)

[2] 刘晓慧，袁亮亮，石鑫，等. 植保施药机械喷雾雾滴飘移研究进展[J]. 农药学学报，2022，24(2)：232－247.
LIU Xiaohui，YUAN Liangliang，SHI Xin，et al. Research progress on spray drift of droplets of plant protection machainery[J]. Chinese Journal of Pesticide Science，2022，24(2)：232－247.(in Chinese)

[3] 边永亮，李建平，薛春林，等. 果园风送式喷雾机智能化发展现状与前景分析[J]. 东北农业大学学报，2020，51(2)：86－94.
BIAN Yongliang，LI Jianping，XUE Chunlin，et al. Analysis on status quo and prospects of intelligent development of airfeed sprayer in orchard[J]. Journal of Northeast Agricultural University，2020，51(2)：86－94.(in Chinese)

[4] 姜业元，曹佃龙，高磊，等. 果园精准施药技术的现状与发展趋势分析[J]. 南方农机，2021，52(15)：44－46.

[5] 徐陶，吕晓兰，祁雁楠，等. 我国果园风送式喷雾装备与技术研究进展[J]. 中国农机化学报，2023，44(7)：69－77.
XU Tao，LU Xiaolan，QI Yannan，et al. Research status on equipment and technology of orchard air-assisted sprayer in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(7)：69－77.(in Chinese)

[6] 蒋仲安，杨向东. 基于环境参数协同预测风速的掘进面智能变频通风控制系统[J]. 金属矿山，2023(7)：57－65.
JIANG Zhong'an，YANG Xiangdong. Intelligent variable frequency ventilation control system for excavation face based on collaborative prediction of wind speed by environmental parameters[J]. Metal Mine，2023(7)：57－65.(in Chinese)

[7] 洪瑶，康建宏，符策基. 基于PID方法的倾斜隧道中火灾烟气控制数值模拟[J]. 中国矿业大学学报，2021，50(4)：701－708.
HONG Yao，KANG Jianhong，FU Ceji. Numerical simulation on control of fire smoke ininclined tunnels based on the PID method[J]. Journal of China University of Mining &.Technology，2021，50(4)：701－708.(in Chinese)

[8] 于保才，邵良杉. 矿井主风机不停风倒机系统最优控制研究[J]. 中国安全生产科学技术，2022，18(2)：119－124.
YU Baocai，SHAO Liangshan. Study on optimal control of non-stop switchover system of mine main fan[J]. Journal of Safety Science and Technology，2022，18(2)：119－124.(in Chinese)

[9] MEHMET D，MURAT C，OERDAL A，et al. Impacts of use PID control and artificial intelligence methods for solar air heater energy performance[J]. Journal of Building Engineering，2023，65：105809.

[10] 冉均均，袁磊. 基于模糊PID的矿井不停风倒机通风系统设计[J]. 煤炭技术，2022，41(7)：188－190.
RAN Junjun，YUAN Lei. Design of ventilation system of mine non-stop air blower based on fuzzy-PID[J]. Coal Technology，2022，41(7)：188－190.(in Chinese)

[11] 伞红军，陈浩，陈明方，等. 基于自适应模糊PID的风速控制系统设计[J]. 中山大学学报(自然科学版)，2019，58(4)：153－158.
SAN Hongjun，CHEN Hao，CHEN Mingfang，et al. Design and analysis of wind speed control system based on adaptive fuzzy PID[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni，2019，58(4)：153－158.(in Chinese)

[12] ESKI, KUŞ Z. Control of unmanned agricultural vehicles using neural network-based control system[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(1): 583 - 595.
[13] JIANG F, XIA Haiying, ANH TRAN Quang, et al. A new binary hybrid particle swarm optimization with wavelet mutation[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 130: 90 - 101.
[14] MIRJALILI S, MIRJALILI S, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Adv. Eng. Softw., 2014, 69: 46-61.
[15] XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering An Open Access Journal, 2020, 8(1): 22 - 34.
[16] KARIMI H, KANI I. finding the worst imperfection pattern in shallow lattice domes using genetic algorithms[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 23: 107 - 113.
[17] HOLLAND J .Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with application to biology[J].Control & Artificial Intelligence, 1975.6(2): 126 - 137.
[18] SARDARI F, MOGHADDAM M. An object tracking method using modified galaxy-based search algorithm[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2016, 30: 27 - 38.
[19] 王新东,徐艳蕾,张奇,等. 基于灰狼优化PID控制的变量喷药系统研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 114 - 119.
WANG Xindong, XU Yanlei, ZHANG Qi, et al. Development of orchard crawler multifunctional working machine[J]. Junrnal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 114 - 119.(in Chinese)
[20] XU Yanlei, WANG Xindong, ZHAI Yuting, et al. Precise variable spraying system based on improved genetic proportional-integral-derivative control algorithm[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43: 3255 - 3266.
[21] 李雅梅,张恒. 基于Levy-SSA的分数阶PID控制方法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(8): 68 - 70.
LI Yamei, ZHANG Heng. Fractional PID control method based on Levy-SSA[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(8): 68 - 70.(in Chinese)
[22] XU Yanlei, WANG Xindong, ZHAI Yuting, et al. Precise variable spraying system based on improved genetic proportional-integral-derivative control algorithm[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(14): 3255 - 3266.
[23] 杨祥海. 果园防飘喷雾控制技术的研究与实现[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
[24] 樊桂菊,牛成强,张震明,等. 多气流协同式果园V形防飘喷雾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 138 - 147.
FAN Guiju, NIU Chengqiang, ZHANG Zhenming, et al. Design and experiment of v-shaped orchard anti-drift spray device with multi-airflow cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 138 - 147.(in Chinese)
[25] 吕鑫,慕晓冬,张钧,等. 混沌麻雀搜索优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1712 - 1720.
LU Xn, MU Xiaodong, ZHANG Jun, et al. Chaos sparrow search optimization algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(8): 1712 - 1720.(in Chinese)
[26] 龙文,伍铁斌,唐明珠,等. 基于透镜成像学习策略的灰狼优化算法[J]. 自动化学报, 2020, 46(10): 2148 - 2164.
LONG Wen, WU Tiebin, TANG Mingzhu, et al. Grey Wolf optimizer algorithm based on lens imaging learning strategy[J]. acta automatica sinica, 2020, 46(10): 2148 - 2164.(in Chinese)
[27] 刘遥. 基于粒子群优化算法的精准施药过程自抗扰控制研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2021.
[28] 顾清华,李学现,卢才武,等. 求解高维复杂函数的遗传-灰狼混合算法[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1191 - 1198.
GU Qinghua, LI Xuexian, LU Caiwu, et al. Hybrid genetic grey wolf algorithm for high dimensional complex function optimization[J]. Control and Decision, 2020, 35(5): 1191 - 1198.(in Chinese)
[29] NY/T 2849—2015 风送式喷雾机施药技术规范[S]. 北京:农业部农业机械化管理司,2015.
[30] 姜红花,牛成强,刘理民,等. 果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 298 - 307.
JIANG Honghua, NIU Chengqiang, LIU Limin, et al. Design and experiment of air volume control system of orchard multi-pipe air sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 298 - 307.(in Chinese)
[31] 周瑞琼,张慧春,周宏平,等. 喷雾参数间互作效应对农药雾滴飘移的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(7): 612 - 617.
[32] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 56 - 63.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 56 - 63.(in Chinese)
[33] Crop protection equipment. Field measurement of spray distribution in tree and bush crops[S]. ISO International standard, 2007.