

基于模糊PID算法的果树精准喷施变量控制系统研究

肖珂^{1,2} 王滔¹ 张璠¹ 高冠东³

(1. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001; 2. 河北省农业大数据重点实验室, 保定 071001;
3. 中央司法警官学院信息管理系, 保定 071000)

摘要: 针对果园喷雾机在小流量喷施区间内控制精度不足、稳定性差等问题, 本文设计了基于模糊PID算法的果树精准喷施变量控制系统。通过PWM信号控制直流无刷水泵转速精确控制流量, 通过试验得到不同占空比与直流无刷水泵流量关系, 并根据数据变化趋势进行分段拟合, 得到精确的流量拟合公式。将模糊控制与传统PID控制算法结合, 采用高斯函数和非对称三角函数设计隶属度函数, 实现了模糊PID算法。为验证算法有效性, 对传统PID、模糊控制与本文算法进行了建模仿真, 试验结果表明, 本文算法在上升时间、超调量、稳态误差方面均优于其他算法。同时, 设置了非运动状态下流量控制精度、运动状态下动态流量跟随试验及液滴沉积率测试。试验结果表明, 本文算法喷施量误差控制在2%以内; 当喷施量在0.5~3 L/min范围内动态变化时, 平均超调量为2.43%, 平均调整时间为0.52 s, 液滴平均沉积率为76.89%。研究结果为智慧果园发展和应用提供了技术支持。

关键词: 精准喷施; 果树; 变量控制; 改进模糊PID

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)10-0152-12 OSID: 

Variable Control Technology for Precision Spraying of Fruit Trees Based on Improved Fuzzy PID Algorithm

XIAO Ke^{1,2} WANG Tao¹ ZHANG Fan¹ GAO Guandong³

(1. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. Hebei Key Laboratory of Agricultural Big Data, Hebei Province, Baoding 071001, China

3. Department of Information Management, The National Police University for Criminal Justice, Baoding 071000, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient control accuracy and poor stability of the orchard sprayer in the small flow spraying interval, a variable control system for precise spraying of fruit trees was designed based on the improved fuzzy proportional-integral-derivative (PID) algorithm. The system controlled the rotational speed of the DC brushless water pump through the pulse width modulation (PWM) signal to control the flow rate accurately. The flow rate relationship of the DC brushless water pump under different duty cycles was obtained through the test, and the segment fitting was performed according to the trend of the data to obtain the accurate flow rate fitting formula. Then the fuzzy control was combined with the traditional PID control algorithm, and the Gaussian function and asymmetric trigonometric function were used to design the affiliation function, which achieved the improvement of the fuzzy PID algorithm. In order to verify the effectiveness of the algorithm, the modelling simulation comparison between the traditional PID, fuzzy control and the present algorithm was carried out, and the experimental results showed that the present algorithm was better than the other algorithms in terms of rise time, response overshooting amount, and steady state error. At the same time, the comparison experiments of flow control accuracy in non-motion state, dynamic flow following in motion state and the test of droplet deposition rate were set up. The experimental results showed that the spray volume error of this algorithm was controlled within 2%; when the spray volume changed dynamically in the range of 0.5~3 L/min, the average overshooting amount was 2.43%, the average adjustment time was 0.52 s, and the average droplet deposition rate was 76.89%. The research result can provide technical support for the development and application of smart orchards.

Key words: precision spraying; fruit trees; variable control; improved fuzzy PID

收稿日期: 2025-01-19 修回日期: 2025-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801782)和河北省自然科学基金项目(C2020204055)

作者简介: 肖珂(1980—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事精准农业和计算机视觉研究, E-mail: xiaoketeaching@sina.com

0 引言

随着果树种植面积扩展和种植密度提升,病虫害问题愈发严重。果园病虫害防治是果园管护的重要环节之一^[1]。有效的防治措施包括生物防治、物理防治和化学防治等方法。目前,喷施化学农药是防治病虫害的主要方法^[2],使用设备选择是化学防治害虫的关键因素^[3]。但不当使用化学农药会导致农药浪费、环境污染和农药残留等问题^[4]。

随着精准农业发展,果园喷雾机在现代农业生产中发挥着越来越重要的作用。通过自动化喷施作业提升了防治病虫害效率,减少了农药浪费和环境污染,促进了农业可持续发展。目前,国内外主要果园喷雾机包括空气辅助喷雾机^[5-7]、静电喷雾机^[8-9]、自走式喷雾机^[10-11]、无人机喷雾机^[12-13]等。邱威等^[14]设计了一种专用于低矮果园的环流式循环风送喷雾机,通过顶置风机产生负压吸风,引导气流在树冠层内改变运动方向,实现雾滴由外向内、再由下向上的定向输送,优化了喷雾机结构和关键参数,有效提升了施药效果和农药利用率。李建平等^[15]自主设计了一种适用于 Y 形定向生长果树的梯形果园风送静电喷雾机。利用 Fluent 软件建立了空气流场、离散雾场和空间电场耦合仿真模型,优化了果园静电喷雾机工作参数,提高了雾滴穿透性。LIU 等^[16]利用单个 3D LiDAR 传感器设计了一种精准变量喷施自走式喷雾机,实现了果园中自动导航与精准喷施结合,实现了机器人沿果树行中心线导航,并根据果树冠层体积调整喷雾量,以达到减少农药使用、降低地面流失和空气漂移的目的。王大帅等^[17]设计了基于 ARM 架构单片机的植保无人机施药控制系统,采用基于脉宽调制(PWM)的施药流量控制方法,通过多传感器融合技术实现了施药参数的实时动态监测,根据飞行参数动态调整喷施流量,提高了喷施效率。

近年来,变量喷施技术逐渐成为果园喷雾设备的核心发展方向。农药喷施中,普遍存在定量、无差别喷雾的现象^[18],因此需要对喷施量进行精准变量调控^[19],流量控制是实现精确喷施的核心环节。目的在于依据作物实际需求和喷施环境,动态调节喷施量,从而实现最优的农药施用效果和资源使用效率。孙睿等^[20]设计了一种基于模糊控制理论的压力调控变量喷雾系统,开发了一种基于农机动态速度输入和控制阀驱动电压输出的模糊逻辑控制策略,但该系统在稳定性方面表现不佳。CHEN 等^[21]设计了一种基于改变电磁阀开度的喷雾机混合控制系统,通过脉宽调制信号占

空比改变电动调节阀开度调节注入农药流量,但这种控制方式流量调节精度较低,尤其在低流量调节时,电磁阀开度变化较小可能导致流量波动较大,影响喷施均匀性。BERK 等^[22]研发了一种基于模糊逻辑的智能自动化系统。通过模糊算法动态调整 PWM 占空比,控制电磁阀开关时间和喷施量,从而实现精准喷施,但当 PWM 信号频率较高时,阀门开关精度和效率降低,难以在较高频率下实现精确控制。尽管果园喷雾机近年来取得了显著进展,但在实现更高精度的喷施控制方面仍有提升空间,尤其是在较小喷施流量区间,需要进一步优化以提高流量调节精准度和稳定性。

在果园中,当遇到果树尚处在幼苗阶段或者受到的病虫害较轻,对农药需求量相对较低时,适宜采取更为精细化的喷施策略。不仅如此,果园喷雾机喷雾范围通常较广,难以精确调整喷施量,特别是在果树需要较小农药喷施量时,容易导致过量喷施。基于以上现状,本文提出一种针对小喷施量精确调节需求的果树精准喷施变量控制系统。以直流无刷水泵驱动电压为控制变量,水泵电机转速为调控对象,通过试验对脉宽调制信号占空比与对应流量进行可视化处理和拟合,得到精准的流量控制关系式,以提高流量调节精准度。在此基础上,采用模糊 PID 控制算法,减少系统滞后时间和超调量,以提升系统稳定性。最后,通过相关试验验证系统可行性与算法优越性。

1 系统设计与原理

1.1 结构设计

果树精准喷施变量控制系统如图 1 所示。水箱配备液位传感器实时监测药液剩余量,出口设过滤器防止杂质进入水泵。系统采用可调速直流无刷水泵,通过 PWM 信号改变驱动电压精确调节水泵电机转速,实现变量施药。水泵进出口安装主阀和止

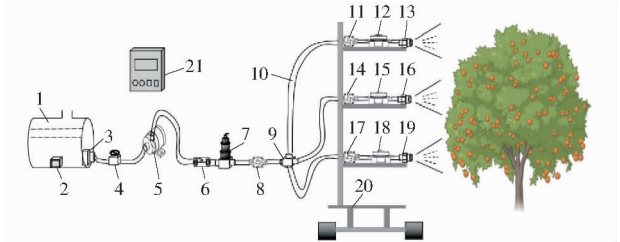


图 1 果树精准喷施变量控制系统
Fig. 1 Precision spraying variable control system of fruit trees

1. 水箱 2. 液位传感器 3. 过滤器 4. 主阀 5. 直流无刷水泵
6. 止逆阀 7. 压力传感器 8、11、14、17. 流量传感器 9. 分流管
10. 喷施管 12、15、18. 电磁阀 13、16、19. 扇形喷头 20. 喷施架 21. 控制器

逆阀,主阀控制管路通断,止逆阀防止药液倒流。药液经止逆阀流向分流管,分流至各喷施管路,以满足不同区域喷施需求。喷施管路配有电磁阀,由继电器控制,出口装有扇形喷头。主阀管路内的压力传感器和流量传感器实时监测系统状态,并将数据反

馈至变量喷施控制器,确保系统稳定运行。

1.2 硬件设计

果树精准喷施变量控制系统的硬件部分由控制模块、监测模块、输送模块、交互模块和执行模块组成,如图 2 所示。

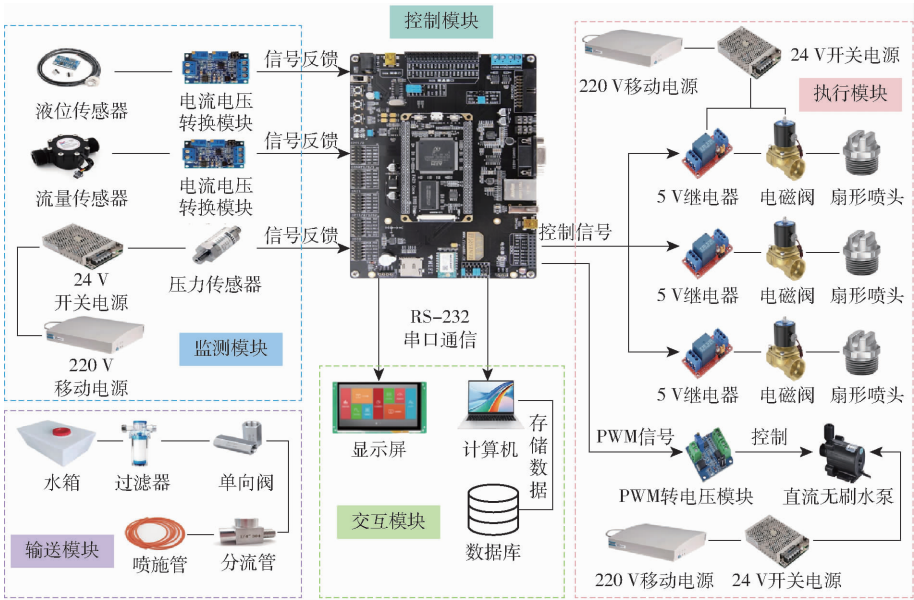


图 2 硬件结构图

Fig. 2 Hardware structure diagram

控制模块采用 STM32F407ZGT6 芯片实现数据转换和控制命令输出,负责处理液位、压力、流量信号并驱动电磁阀和直流无刷水泵。喷施作业过程中,药液不足会导致水泵空转,影响喷施效果,因此设置监测模块,包括 PT-506 型压力传感器(0 ~ 2.5 MPa)、YFS-201 型流量传感器(0 ~ 30 L/min)和 MSP20 型液位传感器(0.1 ~ 3 m),实时监控各类参数。输送模块由水箱、过滤器、单向阀和分流管等组成,负责药液存储与分配。交互模块由 LCD 显示屏和计算机构成,用于显示实时参数和数据传输与存储。执行模块通过继电器控制电磁阀,PWM 转电压模块调节驱动电压改变直流无刷水泵转速以精确控制喷施流量。

1.3 参数检测

在果树精准喷施变量控制系统中,通过液位、压力和流量等关键参数实时监测,确保系统稳定运行并快速识别阻塞或泄漏问题。液位传感器实时监测药液剩余量,控制器将其信号经过 A/D 转换单元处理,得到实际液位高度,并与预设阈值进行比较。压力传感器监测系统压力,快速发现异常,保障药液正常流动。流量传感器实时采集喷施流量,计算实际与理论喷施流量误差及变化率,作为模糊控制器输入。模糊控制器依据规则动态调整控制参数,实现精准喷施作业。

液位检测值计算式为

$$h = (h_{\max} - h_{\min}) \frac{V_{\text{out}} - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} + h_{\min} \quad (1)$$

式中 h ——液位高度,m

$h_{\max}$ ——液位测量上限,m

$h_{\min}$ ——液位测量下限,m

V_{out} ——传感器输出电压,V

$V_{\min}$ ——传感器在最低液位时输出电压,V

$V_{\max}$ ——传感器在最高液位时输出电压,V

压力检测值计算式为

$$P = \frac{I_{\text{out}} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} P_{\max} \quad (2)$$

式中 P ——压力,MPa

I_{out} ——传感器输出电流,mA

$I_{\min}$ ——最低压力时传感器输出电流,mA

$I_{\max}$ ——最高压力时传感器输出电流,mA

$P_{\max}$ ——传感器最大压力量程,MPa

流量检测值计算式为

$$Q = \frac{F}{K} \quad (3)$$

式中 Q ——流量,L/min

F ——传感器输出脉冲频率,Hz

K ——传感器校准系数,取 7.5

1.4 控制原理

果树精准喷施变量控制系统以 STM32F407ZGT6

单片机为控制器,内嵌非线性流量控制策略和模糊 PID 算法。为探究直流无刷水泵喷施流量与驱动电压之间的非线性关系,通过控制器生成不同占空比的 PWM 信号调节驱动电压,并利用流量传感器实时测量相应的喷施流量,随后对测量数据进行可视化处理。根据流量变化趋势,采用分段拟合方法,获取不同区间的拟合关系式并嵌入控制器。

在喷施操作中,系统接收设定的喷施流量 Q ,由控制器判断对应的流量拟合区间,并依据相应的拟合关系式计算 PWM 信号占空比,以转换为驱动电压调节水泵转速。同时,流量传感器实时监测当前 t

时刻实际流量 $q(t)$,并通过 ESP8266 模块将数据无线传输至便携式计算机和数据库,同时作为反馈信号输入模糊控制器。模糊控制器依据实时误差 $E(t)$ 及其变化率 $E_c(t)$,推理出优化控制参数,通过调整 PWM 信号生成对应的驱动电压 $U(t)$,实现对水泵转速精准控制,从而保证喷施量精确调节。

控制过程中,系统通过压力传感器和液位传感器分别监测主管道实时压力 $P(t)$ 和水箱液位 $H(t)$,并设置安全阈值以确保系统稳定运行,条件为 $P(t) > 0.3 \text{ MPa}$, $H(t) > 35 \text{ mm}$ 。系统整体原理如图 3 所示。

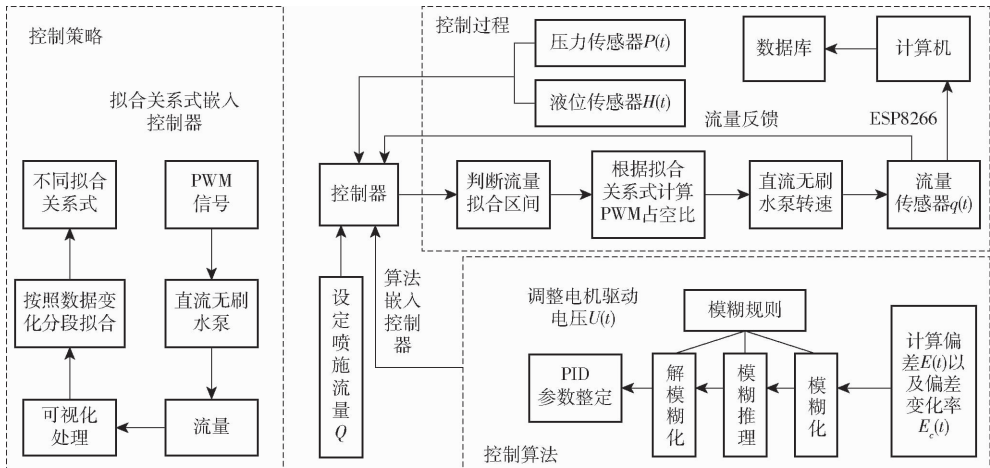


图 3 系统整体原理图

Fig. 3 Overall principle diagram of system

2 非线性控制策略

据调查,我国果园多以落叶乔木为主^[23],在果园标准化种植中,果树株高一般控制在约 2.5 m,而在幼年时期,果树株高通常为 1.5 ~ 2 m。每棵幼树药液喷施量为 2 ~ 3 L。在果树精准喷施变量控制系统中,在小流量区间使用比例阀进行流量控制时,阀门开度较小,控制精度下降,并伴随较大的滞后效应。因此,通过调整 PWM 信号占空比精确控制直流无刷水泵转速,从而实现流量精确调节。系统选用喷施流量为 0 ~ 5 L/min 的直流无刷水泵,但在实际应用中,水泵流量受到系统负载(如管道阻力、管道长度等因素)的影响,无法达到设计最大流量。此外,流量与电压之间存在非线性关系,进一步限制了流量控制精度。因此,能够获得更加精准的占空比与流量之间的关系至关重要。

2.1 占空比与对应流量

通过控制器生成不同占空比的 PWM 信号,改变水泵转速实现对流量的精确控制。试验中,设定 PWM 信号频率为 1 kHz,调节占空比并持续喷施

1 min,通过流量传感器记录不同占空比下流量,并在相同条件下进行多次重复试验,以提高结果可靠性。通过计算不同占空比下平均流量,获得水泵在不同占空比下的精确流量对应关系,结果如表 1 所示。

2.2 数据处理

为了能够更加直观地了解不同占空比与其对应流量之间的关系,将试验所获得的数据在 Matlab 软件中进行可视化处理,如图 4 所示。

通过图 4 可以观察到占空比与流量之间的非线性变化趋势。不同区间的数据展现了不同的变化趋势,表明单一函数拟合可能难以精确捕捉整个数据集的动态特征。采用分段拟合方法,则能够更准确地揭示各区间局部特征。根据各区间特性进行拟合,可以更有效地描述数据非线性变化。在第 1 区间(5% ~ 30%),数据呈明显增长趋势,使用高阶多项式拟合更为合适;在第 2 区间(30% ~ 90%),数据增长趋于平缓,较低阶多项式即可满足拟合要求;而在第 3 区间(90% ~ 100%),流量保持恒定,为一个常数值。对 3 个区间数据进行拟合,结果如图 5 所示。

表 1 不同占空比对应喷施流量

Tab.1 Different duty cycles corresponded to spray flow rates

占空比/%	流量/(L·min ⁻¹)	占空比/%	流量/(L·min ⁻¹)
3	0.28	53	2.69
5	0.68	55	2.72
8	0.88	58	2.80
10	0.96	60	2.85
13	1.22	63	2.92
15	1.28	65	2.96
18	1.45	68	3.03
20	1.52	70	3.08
23	1.68	73	3.13
25	1.76	75	3.20
28	1.85	78	3.24
30	1.96	80	3.32
33	2.06	83	3.34
35	2.15	85	3.38
38	2.24	88	3.44
40	2.32	90	3.52
43	2.38	93	3.52
45	2.50	95	3.52
48	2.53	98	3.52
50	2.64	100	3.52

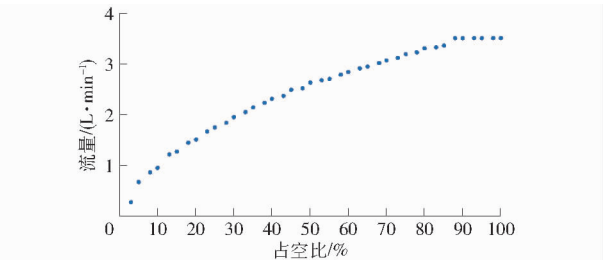


图 4 占空比与流量散点图

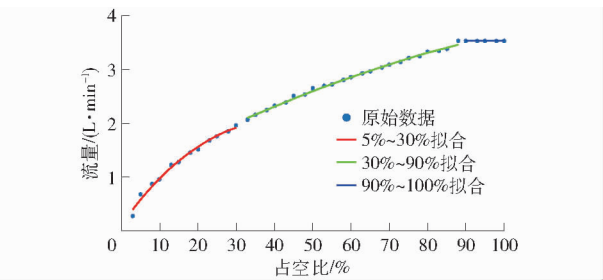


图 5 占空比与流量的拟合曲线

Fig.4 Scatter plot of duty cycle and flow rate

Fig.5 Fitting curve of duty cycle and flow rate

为了更精确地量化分段特性,针对特定区间分别构建相应的数学模型。通过对各个区间进行独立的拟合分析,得到不同区间拟合关系式,并计算每个区间决定系数 R^2 。

不同区间拟合关系式为

$$Q = \begin{cases} 75.895\,2X^3 - 50X^2 + 14.902\,9X - 0.053\,435 & (5\% \sim 30\%) \\ -1.158\,3X^2 + 3.880\,5X + 0.941\,04 & (30\% \sim 90\%) \\ 3.52 & (90\% \sim 100\%) \end{cases} \quad (4)$$

式中 X ——占空比

对于第 1 区间 (5% ~ 30%),拟合结果为三次多项式形式, $R^2 = 0.992\,27$ 。在第 2 区间 (30% ~ 90%),数据增长较为平缓,因此使用二次多项式进行拟合, $R^2 = 0.996\,56$ 。最后,在第 3 区间 (90% ~ 100%),由于流量保持恒定,因此采用常数拟合。

尽管拟合关系式及其 R^2 能够评估模型整体拟合效果,但为进一步探究拟合精度,对拟合残差进行分析。残差是模型预测值与实际观测值之间的差值,揭示了模型在不同区间的偏差情况。计算第 1 区间和第 2 区间拟合残差并绘制残差图,如图 6 所示。分析结果显示,在 5% ~ 30% 和 30% ~ 90% 区间内,残差较小,基本维持在 $-0.1 \sim 0.1\text{ L/min}$ 之间,且大部分残差接近 0,表明拟合效果良好,模型具有较强的预测性能。

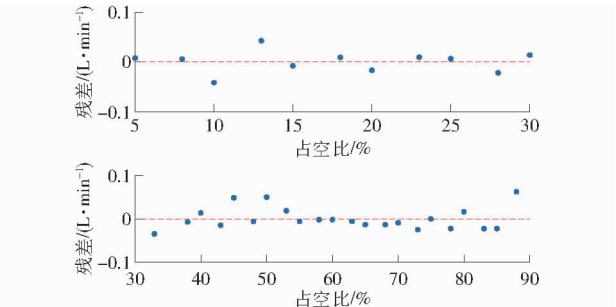


图 6 第 1、2 区间拟合残差

Fig.6 The first and second interval fitting

3 控制算法

PID(比例-积分-微分)控制算法是一种经典的反馈控制方法,基本原理是通过调整 PID 参数,使系统输出尽可能接近目标值。PID 控制性能依赖于参数 (K_p 、 K_i 、 K_d) 的设置,但这些参数通常固定。然而,在果树喷施等实际应用中,系统动态特性(如喷施流量变化、环境因素波动等)会发生变化,导致固定参数难以在不同工作条件下保持输出量精准性和稳定性。

为解决这一问题,将模糊控制算法引入传统 PID 控制,通过模糊逻辑实时调整 PID 参数,优化系统动态特性,提高控制精度和响应速度。模糊控制基于模糊集合理论,擅长处理不确定性和非线性问题,通过将经验规则转换为数学形式进行推理和决策,提高系统适应性和鲁棒性,优化性能。

3.1 模糊 PID 控制器系统

模糊 PID 控制系统由误差计算、模糊化处理、模糊推理、解模糊化、PID 控制器、参数调整模块和执行机构组成,形成一个闭环控制系统,实现对喷施流

量的精准控制,如图 7 所示。

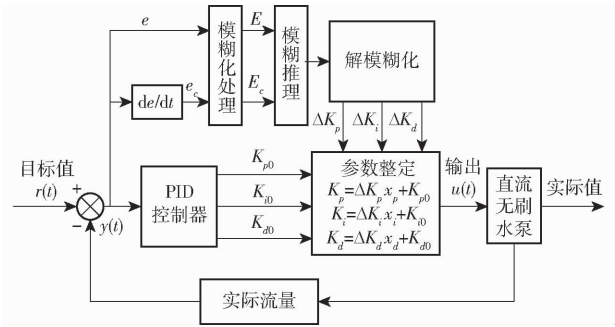


图 7 模糊 PID 控制系统

Fig. 7 Fuzzy controller structure

3.2 模糊化处理

根据目标流量 $r(t)$ 与实际喷施流量反馈量 $y(t)$ 计算当前误差 $e(t)$ 和误差变化率 $de(t)/dt$, 并将其作为模糊控制输入量。通过隶属度函数将误差和变化率转换为模糊变量, 分别划分为“负大 (NB)”“负中 (NM)”“负小 (NS)”“零 (ZO)”“正小 (PS)”“正中 (PM)”“正大 (PB)”等模糊集合。在设计隶属度函数过程, 通常全部采用三角隶属度函数^[24-26]或高斯隶属度函数^[27]。然而在果树幼苗期或病虫害发生较轻微的情况下, 对农药需求量相对较低时, 模糊控制器设计应注重精细化调节。采用高斯隶属度函数和三角隶属度函数组合, 以平衡响应灵敏度和控制平滑性。在误差较小区域 (如 ZO、NS、PS 模糊集合) 使用高斯隶属度函数, 因其渐进性和对微小误差的高敏感度, 能够实现喷施流量的精细调整, 避免过度修正带来的波动。而在误差较大区域 (如 NB、NM、PM、PB 模糊集合) 使用三角隶

属度函数, 凭借其明确的边界和线性特性, 快速响应较大误差, 确保系统快速调节。

为了进一步提高对小流量区间的精细化调节能力, 设计了非对称三角函数, 以便在不同误差区间实现更为精准的控制。在 PM、NM 2 个过渡模糊集合的隶属度函数设计中, 采用非对称设计方式, 即根据实际应用场景调整隶属度函数形状、斜率和中心点等参数, 优化误差区间内的调节精度。对于 PM 模糊集合, 靠近 PB 模糊集合的一侧隶属度函数加大斜率, 使得在大误差时更为敏感; 而靠近 PS 模糊集合的一侧隶属度函数设计成较小的斜率, 控制输出变化更加平缓。输入变量 e 隶属度函数如图 8 所示。

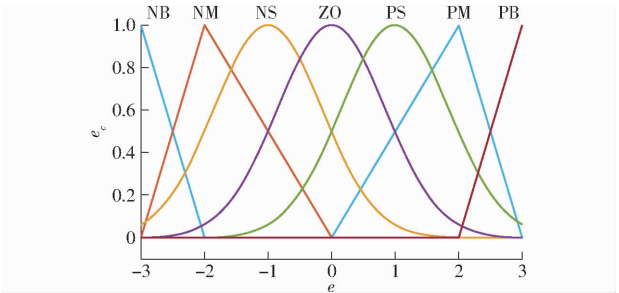


图 8 输入变量 e 的隶属度函数

Fig. 8 Membership function of input variable e

3.3 模糊推理

经模糊化处理后的模糊变量 E 和 E_c 会进入模糊推理系统根据预设的模糊规则库进行推理。为了确保系统输出性能达到最佳, 总结在工程实践中积累的 PID 调整经验得到模糊推理规则, 如表 2 所示。

表 2 输出变量 $\Delta K_p \backslash \Delta K_i \backslash \Delta K_d$ 模糊推理规则

Tab. 2 Fuzzy inference rules for output variables $\Delta K_p \backslash \Delta K_i \backslash \Delta K_d$

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
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\NB	NS\NS\NM	NS\NS\NM	ZO\ZO\NS	PS\ZO\ZO
NS	NM\NB\ZO	NM\NM\NS	NM\NS\NM	NS\NS\NM	ZO\ZO\NS	PS\PS\NS	PS\PS\ZO
ZO	NM\NB\ZO	NM\NM\NS	NS\NS\NS	ZO\ZO\NS	PS\PS\NS	PM\PM\NS	PM\PM\ZO
PS	NS\NS\ZO	NS\NS\ZO	ZO\ZO\ZO	PS\PS\ZO	PS\PS\ZO	PM\PM\ZO	PM\PM\ZO
PM	NS\ZO\PB	ZO\ZO\NS	PS\PS\PS	PM\PS\PS	NM\PS\PS	PM\PM\PS	PB\PM\PM
PB	ZO\ZO\PB	PS\ZO\PM	PM\ZO\PM	PM\ZO\PM	PM\ZO\PS	PM\ZO\PS	PB\ZO\PB

根据表 2 先计算第 $j(j=1,2,\cdots,49)$ 条模糊规则对应 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 模糊隶属度 $\mu_{Kp(j)}$ 、 $\mu_{Ki(j)}$ 、 $\mu_{Kd(j)}$ 。

模糊隶属度计算式为

$$\mu_{\Delta Kp(j)} = \min \{ \mu_r(E), \mu_r(E_c) \} \tag{5}$$

$$\mu_{\Delta Ki(j)} = \min \{ \mu_r(E), \mu_r(E_c) \} \tag{6}$$

$$\mu_{\Delta Kd(j)} = \min \{ \mu_r(E), \mu_r(E_c) \} \tag{7}$$

式中 $\mu_r(E)$ ——误差 E 对应的隶属度
 $\mu_r(E_c)$ ——变化率 E_c 对应的隶属度

3.4 解模糊化

为了将模糊控制系统产生的模糊输出转换为清晰值, 使得控制器能够实际应用输出值, 需进行解模糊操作。采用重心法, 即加权平均法^[28]。

解模糊公式为

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} (\Delta K_p(j) \mu_{\Delta K_p(j)})}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{\Delta K_p(j)}} \tag{8}$$

$$\Delta K_i = \frac{\sum_{j=1}^{49} (\Delta K_i(j) \mu_{\Delta K_i(j)})}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{\Delta K_i(j)}} \tag{9}$$

$$\Delta K_d = \frac{\sum_{j=1}^{49} (\Delta K_d(j) \mu_{\Delta K_d(j)})}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{\Delta K_d(j)}} \tag{10}$$

式中 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ——整定后比例、积分、微分修正系数

$\Delta K_p(j)$ 、 $\Delta K_i(j)$ 、 $\Delta K_d(j)$ ——第 j 条模糊规则输出量隶属度

解模糊化得到的增量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 分别乘以相应的比例因子调整 PID 控制器 3 个参数,使控制器能够根据系统状态的变化自适应地优化控制效果。

调整后 PID 参数计算式为

$$\begin{cases} K_p = \Delta K_p x_p + K_{p0} \\ K_i = \Delta K_i x_i + K_{i0} \\ K_d = \Delta K_d x_d + K_{d0} \end{cases} \tag{11}$$

式中 K_p 、 K_i 、 K_d ——整定后比例、积分、微分系数
 x_p 、 x_i 、 x_d ——比例、积分、微分系数比例因子
 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} ——比例、积分、微分系数初始值

通过自适应调整 PID 控制器比例(K_p)、积分(K_i)和微分(K_d)系数,系统能够实时优化控制效果。调整后 PID 参数用于生成精确的控制信号 $u(t)$,精确驱动直流无刷水泵调节喷施流量,从而确保喷施系统在状态变化或外部干扰下稳定高效地运行,实现精准的变量喷施。

3.5 仿真与分析

在设计果树精准喷施变量控制系统控制策略

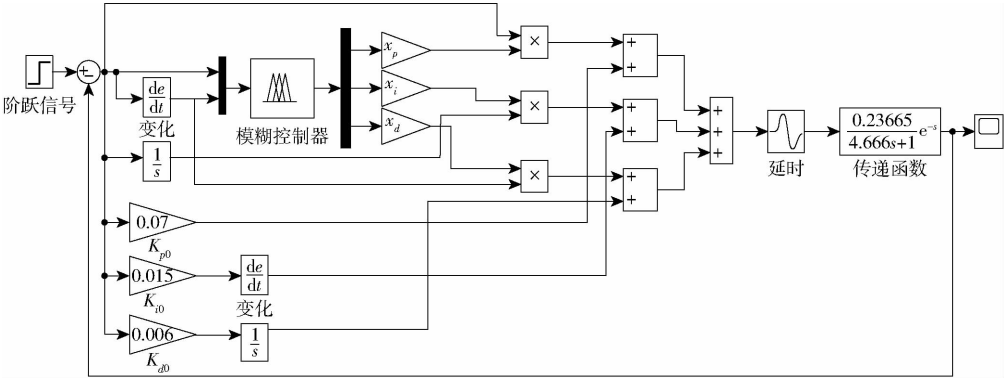


图 9 模糊 PID 算法仿真模型

Fig. 9 Simulation of improved fuzzy PID algorithm

时,受控对象是直流无刷水泵转速。由于水泵响应特性中存在延迟,因此采用一阶惯性加纯滞后函数描述其传递函数。其关系式为

$$G_1(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s} \tag{12}$$

式中 $G_1(s)$ ——直流无刷水泵传递函数
 k ——系统增益
 T ——时间常数
 τ ——纯滞后时间

PWM 占空比信号经过 PWM 转电压模块后,转换成 0 ~ 5 V 的模拟电压信号,以此对直流无刷水泵进行精准调速控制。该模块输入与输出模拟信号之间转换比例为 0.05,控制策略采用比例控制方式。传递函数表示为

$$G_2(s) = \frac{V_{out}}{D_n} \tag{13}$$

式中 $G_2(s)$ ——PWM 转电压模块传递函数
 V_{out} ——输出模拟信号
 D_n ——输入 PWM 占空比信号

通过试验测量直流无刷水泵在不同输入电压下流量,建立输入电压和输出流量之间的关系。通过 Matlab 系统辨识工具箱计算出传递函数参数直流无刷水泵增益 k 为 4.733,时间常数 T 为 4.666, τ 为 1。因此整个系统传递函数表达式为

$$G(s) = G_1(s) G_2(s) = \frac{0.23665}{4.666s + 1} e^{-s} \tag{14}$$

为了验证模糊 PID 算法对果树喷施控制的优越性,在 Matlab 的 Simulink 仿真平台中,基于系统传递函数,搭建传统 PID、模糊控制和模糊 PID 算法仿真模型,如图 9 所示。传统 PID 算法采用试凑法^[29]确定其比例、积分、微分系数, $K_{p0} = 0.07$ 、 $K_{i0} = 0.015$ 、 $K_{d0} = 0.006$ 。改进模糊 PID 算法经模糊控制器输出增量乘以相应的比例因子再与传统 PID 系数相加得到整定后比例、积分、微分系数。对 3 种控制方式进行阶跃响应仿真^[30],结果如图 10 所示。

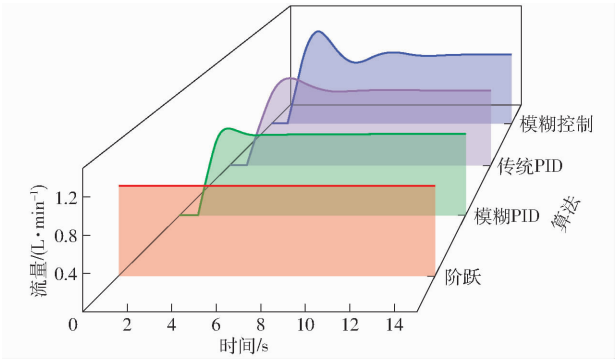


图 10 阶跃响应曲线

Fig. 10 Step follow curves

由图 10 和表 3 可知,模糊 PID 算法上升时间为 0.87 s,优于模糊控制算法(0.90 s)和传统 PID 算法(1.34 s),表明响应更快。在超调量方面,模糊 PID 算法(6.89%)远低于传统 PID(15.50%)和模糊控制(32.12%),显示出更好的稳定性和准确性。此外,模糊 PID 算法稳态误差为 ±0.02%,小于传统 PID(±0.12%)和模糊控制(±0.17%),表明在长时间运行后能更精准地维持设定值。综上所述,模糊 PID 算法在响应速度、超调抑制和稳态精度方面表现出显著优势。通过仿真结果可看出,模糊 PID 算法有效解决了传统 PID 算法存在的滞后时间较长和模糊控制超调量较大的问题,且在所构建的控制模型中展示了较好的控制效果。

表 3 阶跃响应结果
Tab.3 Step response results

控制策略	上升时间/s	超调量/%	稳态误差/%
传统 PID 算法	1.34	15.50	±0.12
模糊控制算法	0.90	32.12	±0.17
模糊 PID 算法	0.87	6.89	±0.02

4 非运动状态下喷施精准度测试

4.1 试验条件

为了评估果树精准喷施变量控制系统 3 种控制算法(传统 PID 算法、模糊控制算法、模糊 PID 算法)在设定施药量情况下的流量控制精度,基于搭建的硬件试验平台在河北农业大学校园空旷处进行试验,如图 11 所示,时间为 2024 年 10 月 8 日,环境在标准大气压下,温度 16 ~ 20℃,风速 0 级。试验时使用清水进行喷施,避免药液对试验设备和试验场地污染。

4.2 试验方法

通过占空比与对应流量的试验结果可知,喷施流量为 0 ~ 5 L/min 的直流无刷水泵在实际应用中喷施流量为 0 ~ 3.52 L/min。为了全面分析变量施药系统在小范围喷施流量情况下的控制精度,将理论



图 11 硬件试验平台

Fig. 11 Hardware experiment platform

流量按照固定步长均匀划分,在流量 0 ~ 3.52 L/min 内,将水泵实际喷施流量范围进一步细分为小流量区间(0 ~ 1.17 L/min)、中等流量区间(1.17 ~ 2.34 L/min)和大流量区间(2.34 ~ 3.52 L/min)。在每个区间内,按照固定步长选取 4 个具有代表性的理论喷施量进行试验。每个理论喷施量设喷施时间为 30 s,通过量筒收集实际喷施液体,记录喷施液体总体积。为确保试验结果可靠性,每个试验点重复测试 3 次,并计算平均实际流量,用于计算理论流量与实际流量之间误差,结果如表 4 所示。

表 4 流量控制精度试验结果

Tab.4 Experimental results of flow control accuracy

喷施 流量 区间	理论值/ (L·min ⁻¹)	实际流量/(L·min ⁻¹)			相对误差/%		
		传统	模糊	模糊	传统	模糊	模糊
		PID 算法	控制 算法	PID 算法	PID 算法	控制 算法	PID 算法
小	0.29	0.34	0.36	0.30	17.24	24.14	3.45
	0.58	0.62	0.53	0.57	6.90	-8.62	-1.72
	0.87	0.90	0.91	0.89	3.44	4.60	2.30
	1.17	1.25	1.29	1.20	6.83	10.26	2.56
中	1.46	1.41	1.35	1.44	-3.42	-7.53	-1.40
	1.76	1.78	1.79	1.75	1.14	1.70	-0.57
	2.05	2.01	2.10	2.07	-1.46	2.44	0.98
	2.34	2.38	2.37	2.36	1.71	1.28	0.85
大	2.64	2.69	2.71	2.68	1.02	2.65	1.52
	2.93	2.99	3.12	2.97	2.05	6.48	1.37
	3.22	3.28	3.35	3.27	1.87	4.04	1.55
	3.52	3.52	3.52	3.52	0	0	0
平均相对误差绝对值/%					3.92	6.15	1.52

4.3 试验结果分析

由表 4 可知,3 种控制算法在不同流量区间的表现存在明显差异。在小流量区间内,模糊 PID 算法相对误差优于其他 2 种算法,尤其在理论喷施量为 0.29、1.17 L/min 时,模糊 PID 算法误差分别为 3.45% 和 2.56%,远低于传统 PID 算法 17.24% 和 6.83%,以及模糊控制算法 24.14% 和 10.26%。在中等流量区间内,传统 PID 算法和模糊控制算法的误差有所减小,但模糊 PID 算法依然表现出最高的精确度。在大流量区间,模糊 PID 算法相对误差保持在 0% ~ 1.55% 之间,而模糊控制算法相比误差

最高达到 6.48%，传统 PID 算法相对误差最高也达到 2.05%。总体来看，无论是在小流量、中等流量还是大流量区间，模糊 PID 算法均表现出了更高的流量控制精度，其平均相对误差绝对值仅为 1.52%，显著低于传统 PID 算法（3.92%）和模糊控制算法（6.15%）。

5 运动状态下喷施稳定性测试

5.1 试验条件

为了验证模糊 PID 算法对于变量喷施控制系统控制效果以及变量喷施控制系统液滴沉积效果，将搭建的喷施精准度测试试验硬件平台放置在移动平台上，移动平台采用 R550 PLUS ROS 型机器人，在移动状态下模拟果园喷雾机在果树行间直线行驶、掉头等实际喷施场景。在河北农业大学校园空旷处进行动态流量跟随试验验证以及雾滴沉积测试，如图 12 所示。试验选取 3 棵仿真桃树模拟果园真实环境中不同生长状态的果树，仿真桃树高 1.5 m，树冠直径 1 m。时间为 2025 年 1 月 10 日，环境在标准大气压下，温度 0~3℃，风速 1 级。



图 12 运动状态下的稳定性测试及雾滴沉积测试
Fig. 12 Stability test under motion and droplet deposition test

5.2 试验方法

为模拟果树实际环境中的变量喷施需求，将 3 棵仿真桃树划分为 6 个区域，如图 13 所示。喷施过程，移动平台以速度 30 cm/s 移动，每个区域喷施距离为 3 m，覆盖直线行驶和掉头等场景。不同区域喷施时间均为 10 s，针对小喷施流量精细调节需求，设置对应理论喷施流量为 1、2、3、2.5、1.5、0.5 L/min。将水敏纸固定在仿真桃树叶片上，为了更全面地评估和理解喷施系统在不同高度的喷施效果，在每个区域树冠冠层顶层、中层、底层布置水敏纸。控制器通过调整 PWM 信号占空比，每 10 s 切换理论喷施流量，模拟变量喷施过程。试验采用传统 PID、模糊控制和模糊 PID 算法，实时调节设备输出流量以实现目标喷施量。流量传感器以 0.1 s 间隔采集实际

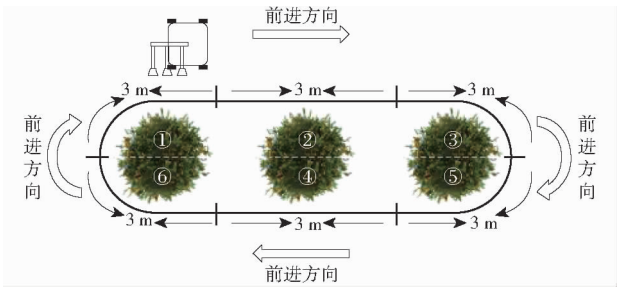


图 13 运动状态下试验示意图
Fig. 13 Schematic of experiment in motion

流量，并通过 ESP8266 模块将数据无线传输至便携式计算机，由上位机监测软件动态记录理论与实际流量变化，同时实时存储数据至数据库。获得的实时喷施量与理论喷施量、误差响应曲线如图 14、15 所示。

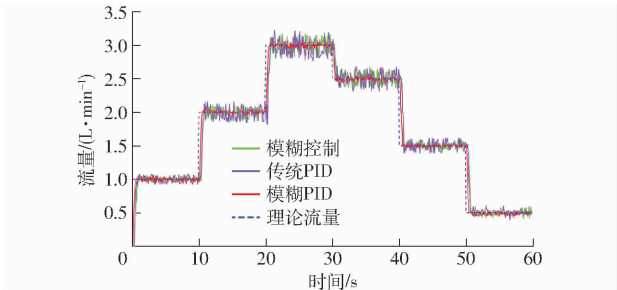


图 14 实时喷施量与理论喷施量
Fig. 14 Real time and theoretical application

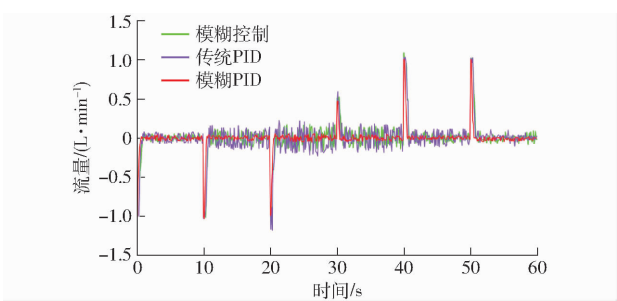


图 15 误差响应曲线
Fig. 15 Error response curves

喷施结束后，将水敏纸收集并放入干燥袋中，随后进行分类和标号整理。使用扫描仪获取水敏纸图像，并通过 ImageJ 软件对图像进行灰度化处理，如图 16 所示。通过该处理，识别液滴沉积区域，并计

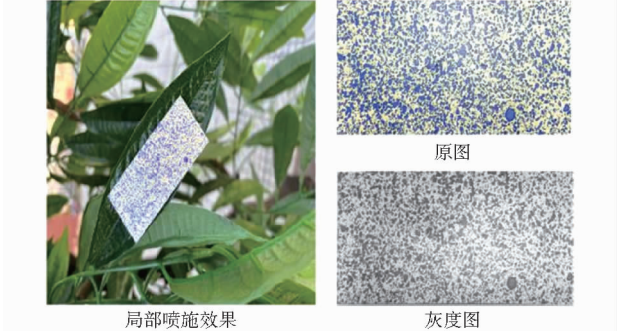


图 16 水敏纸喷施效果与处理
Fig. 16 Spraying effect and treatment of water-sensitive paper

算液滴沉积率,结果如表 5 所示。

表 5 水敏纸沉积率计算结果
Tab.5 Calculation results of deposition rate of water-sensitive paper

控制算法	喷施区域	water-sensitive paper				整体平均沉积率/%
		顶层水敏纸沉积率	中层水敏纸沉积率	底层水敏纸沉积率	平均沉积率	
传统 PID	①	58.24	63.30	55.32	59.36	63.46
	②	62.68	69.86	66.83	66.04	
	③	69.25	76.00	71.19	72.48	
	④	63.46	72.25	66.46	67.81	
	⑤	57.38	65.82	58.58	60.56	
	⑥	50.34	60.10	54.20	55.33	
模糊控制	①	64.29	75.00	67.37	69.46	68.78
	②	70.47	77.70	72.82	74.09	
	③	75.30	80.32	74.15	76.99	
	④	69.56	74.84	65.50	70.52	
	⑤	63.46	58.36	61.50	61.22	
	⑥	59.37	66.00	55.20	60.39	
模糊 PID	①	69.60	75.72	67.92	71.71	76.89
	②	75.20	80.36	76.87	77.76	
	③	85.36	84.28	80.10	83.09	
	④	80.28	82.36	78.46	80.46	
	⑤	77.27	79.45	75.28	77.50	
	⑥	69.12	72.18	70.85	70.85	

5.3 试验结果分析

由图 14、15 可知,采用模糊 PID 算法的变量喷施控制系统在试验过程中流量跟随紧密,解决了传统 PID 算法和模糊控制算法存在的超调及滞后问题。模糊 PID 算法平均超调量为 2.43%,平均调整时间为 0.52 s;相比之下,传统 PID 算法平均超调量为 7.72%,平均调整时间为 0.78 s,模糊控制算法平均超调量为 5.35%,平均调整时间为 0.90 s。为了进一步验证模糊 PID 算法在果树喷雾控制系统中的优越性,基于表 5 数据,对顶层、中层和底层沉积率进行单因素方差分析。设立以下假设:零假设(H_0)认为不同控制算法对喷雾沉积率的影响无显著差异,即各控制方法沉积率均值相同;备择假设(H_1)则认为不同控制方法对喷雾沉积率的影响存在显著差异,即至少有 1 种控制方法沉积率均值不同。通

过 Matlab 中 anova1 函数对数据进行分析,结果显示顶层 p 为 0.002 2,中层 p 为 0.038,底层 p 为 0.004 6,均小于显著性水平($p=0.05$)。因此,拒绝零假设,表明不同控制方法之间的差异具有统计学意义。在不同喷施流量需求,不同高度喷施位置的情况下,模糊 PID 算法整体平均液滴沉积率相比于传统 PID 算法和模糊控制算法分别提高 13.43、8.11 个百分点。综上所述,通过对比方差分析结果和整体平均沉积率,可知模糊 PID 算法在小流量喷施区间展现了更加精细的调节效果和更加稳定的喷施表现,充分证明了在果树喷雾控制系统中的优越性。

6 结论

- (1)设计了果树精准喷施变量控制系统。通过改变 PWM 信号占空比,改变直流无刷水泵电压实现流量精准调节。通过试验测得占空比与流量之间的对应关系,并根据流量趋势将其划分为不同的区间进行拟合,解决了电压与流量之间非线性关系的限制。提高了调节精度和稳定性,实现了连续且线性的流量调节。
- (2)为了提高变量喷施系统时效性和稳定性,设计了模糊 PID 算法,将模糊控制算法与传统 PID 算法相结合,实现了参数自整定。在模糊控制器设计中,将三角隶属度函数与高斯隶属度函数相结合,并对部分三角隶属度函数进行了非对称设计。有效减少了系统响应时间,提升了系统稳定性。
- (3)在 Matlab 软件的 Simulink 仿真环境中分别对 3 种算法进行建模仿真,结果表明,模糊 PID 算法上升时间、超调量、稳态误差分别为 0.87 s、6.89%、 $\pm 0.02\%$,明显优于其他 2 种控制算法。
- (4)流量控制精度试验和移动状态下动态流量跟随对比试验结果表明,在设定的流量任意区间内,模糊 PID 算法的喷施量误差控制在 2% 以内;在动态流量跟随对比试验中,模糊 PID 算法平均超调量为 2.43%,平均调整时间为 0.52 s,液滴平均沉积率为 76.89%。并通过统计学检验证明了算法是显著的,显示出良好的调节效果和稳定性。

参 考 文 献

[1] 李文伟,江世界,徐平凡,等.丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(9):188-197.
LI Wenwei,JIANG Shijie,XU Pingfan,et al. Design and experiment of self-propelled small target following sprayer for hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):188-197. (in Chinese)

[2] 兰玉彬,闫瑜,王宝聚,等.智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势[J].农业工程学报,2022,38(20):30-40.
LAN Yubin,YAN Yu,WANG Baoju,et al. Current status and future development of the key technologies for intelligent pesticide spraying robots[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(20):30-40. (in Chinese)

[3] 边永亮,李建平,王鹏飞,等.3WPZ-300 喷杆喷雾机甘蓝地施药作业性能试验研究[J].河北农业大学学报,2023,46(5):96-101.

- BIAN Yongliang, LI Jianping, WANG Pengfei, et al. Experimental research on the performance comparison between multirotor electric UAV and boom sprayer[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2023, 46(5): 96 – 101. (in Chinese)
- [4] 郑加强, 徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 1 – 16.
- ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1 – 16. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 张佳琛, 邓巍, 宋晓庆, 等. 恒压变流果园风送式喷雾机雾滴沉积试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 196 – 201.
- ZHANG Jiachen, DENG Wei, SONG Xiaoqing, et al. Experiment on droplet deposition of constant pressure variable flow orchard air spray[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 196 – 201. (in Chinese)
- [7] 王鹏飞, 徐硕, 杨欣, 等. 塔形喷雾机风送系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 342 – 351, 390.
- WANG Pengfei, XU Shuo, YANG Xin, et al. Optimization design and test of air delivery system for tower sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 342 – 351, 390. (in Chinese)
- [8] XUE X, ZENG K, LI N, et al. Parameters optimization and performance evaluation model of air-assisted electrostatic sprayer for citrus orchards[J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1498.
- [9] 张亚莉, 黄鑫荣, 王林琳, 等. 国外农业航空静电喷雾技术研究进展与借鉴[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 50 – 59.
- ZHANG Yali, HUANG Xinrong, WANG Linlin, et al. Progress in foreign agricultural aviation electrostatic spray technologies and references for China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 50 – 59. (in Chinese)
- [10] FU Q, LI X, ZHANG G, et al. Improved greenhouse self-propelled precision spraying machine—multiple height and level (MHL) control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107265.
- [11] 李文伟, 江世界, 徐平凡, 等. 丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 188 – 197.
- LI Wenwei, JIANG Shijie, XU Pingfan, et al. Design and experiment of self-propelled small target following sprayer for hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 188 – 197. (in Chinese)
- [12] 王昌陵, 何奎奎, 曾爱军, 等. 基于仿真果园试验台的植保无人机施药雾滴飘移测试方法与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 56 – 66.
- WANG Changling, HE Xiongkui, ZENG Aijun, et al. Measuring method and experiment on spray drift of chemicals applied by UAV sprayer based on an artificial orchard test bench[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 56 – 66. (in Chinese)
- [13] SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ L, BARRERA M, MARTÍNEZ-GUANter J, et al. Drift reduction in orchards through the use of an autonomous UAV system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107981.
- [14] 邱威, 孙浩, 孙玉慧, 等. 低矮果园环流式循环风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 18 – 25.
- QIU Wei, SUN Hao, SUN Yuhui, et al. Design and test of circulating air-assisted sprayer for dwarfed orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 18 – 25. (in Chinese)
- [15] 李建平, 茹煜, 倪佳胜, 等. 梯形果园风送静电喷雾机仿真分析及试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 45 – 51.
- LI Jianping, RU Yu, NI Jiasheng, et al. Simulation analysis and experiment of trapezoidal orchard air delivery electrostatic spray machine[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2023, 44(1): 45 – 51. (in Chinese)
- [16] LIU L, LIU Y, HE X, et al. Precision variable-rate spraying robot by using single 3D LiDAR in orchards[J]. Agronomy, 2022, 12: 2509.
- [17] 王大帅, 张俊雄, 李伟, 等. 植保无人机动态变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 86 – 93.
- WANG Dashuai, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Design and test of dynamic variable spraying system of plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 86 – 93. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 翟长远, 张焱龙, 邹伟, 等. 基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 160 – 169.
- ZHAI Changyuan, ZHANG Yanlong, ZOU Wei, et al. Design and test of precision variable-rate spray monitoring and control system based on pesticide spraying traceability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 160 – 169. (in Chinese)
- [20] 孙睿, 欧阳斌林, 孙文峰, 等. 专家模糊控制器在液肥流速控制中的应用[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 242 – 245.
- SUN Rui, OUYANG Binlin, SUN Wenfeng, et al. Expert fuzzy controller in fertilizer flow rate control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5): 242 – 245. (in Chinese)
- [21] CHEN Y, CHEN Y, GUO P, et al. Design and experimentation of direct injection in-line mixing control system for sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109304.
- [22] BERK P, BELŠAK A, STAJNKO D, et al. Intelligent automated system based on a fuzzy logic system for plant protection product control in orchards[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(3): 92 – 102.

[23] 肖珂,郝毅,高冠东. 果园自动变距精准施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):137 – 145.
XIAO Ke,HAO Yi,GAO Guandong. Design and experiment of automatic ariable-distance precison spraying system in orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):137 – 145. (in Chinese)

[24] 薛冰,周利明,牛康,等. 基于自适应模糊 PID 的小麦播深控制系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):93 – 102.
XUE Bing,ZHOU Liming,NIU Kang,et al. Sowing depth control system of wheat planter based on adaptive fuzzy PID [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 1):93 – 102. (in Chinese)

[25] FU C, MA X, ZHANG L. Fuzzy-PID strategy based on PSO optimization for pH control in water and fertilizer integration[J]. IEEE Access, 2021, 10: 4471 – 4482.

[26] SONG L, HUANG J, LIANG X, et al. An intelligent multi-sensor variable spray system with chaotic optimization and adaptive fuzzy control[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2954.

[27] 汤春球,刘凤来,余自良. 基于模糊 PID 的水肥一体化灌溉控制系统设计[J]. 数字制造科学,2023,21(4):293 – 296.
TANG Chunqiu,LIU Fenglai,YU Ziliang. Design of integrated water and fertilizer irrigation control system based on fuzzy PID [J]. Digital Manufacture Science,2023,21(4):293 – 296. (in Chinese)

[28] 姚颖飞,陈学庚,纪超,等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(6):12 – 21.
YAO Yingfei,CHEN Xuegeng,JI Chao,et al. Design and experiments of the single driver for maize precision seeders based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(6):12 – 21. (in Chinese)

[29] VERMA B, PADHY P K. Robust fine tuning of optimal PID controller with guaranteed robustness[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(6): 4911 – 4920.

[30] 朱凤磊,张立新,胡雪,等. 基于蝙蝠优化 BP – PID 算法的精准施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):135 – 143,171.
ZHU Fenglei,ZHANG Lixin,HU Xue,et al. Precision fertilizer application control system based on ba optimization BP – PID algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 1):135 – 143,171. (in Chinese)

(上接第 76 页)

[22] 刘霓红,蒋先平,程俊峰,等. 国外有机设施园艺现状及对中国设施农业可持续发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 1 – 9.
LIU Nihong, JIANG Xianping, CHENG Junfeng, et al. Current situation of foreign organic greenhouse horticulture and its inspiration for sustainable development of Chinese protected agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 1 – 9. (in Chinese)

[23] 白帆,吴昊,肖冰,等. 国内外林木育苗生产技术装备概述[J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(1): 4 – 12.
BAI Fan, WU Hao, XIAO Bing, et al. Overview of tree seedling production technology and equipment at home and abroad [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(1): 4 – 12. (in Chinese)

[24] YULIANTO D, RAIBHU S. Design of semi-automatic plant media bagging machine for container plant nursery[J]. Journal of Advanced Agricultural Technologies, 2018, 5(1): 36 – 40.

[25] 张洋,范开钧,初麒,等. 育苗纸钵自动装盘装置的试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 180 – 183.
ZHANG Yang, FAN Kaijun, CHU Qi, et al. Experiment study on seedling paper-pot automatic feeding device for plug tray [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 180 – 183. (in Chinese)

[26] 渠聚鑫,郭克君,汤晶宇,等. 林业育苗穴盘基质装填机结构设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(5): 88 – 91.
QU Juxin, GUO Kejun, TANG Jingyu, et al. Structural design of substrate filling machine for forestry nursery plug [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(5): 88 – 91. (in Chinese)

[27] 韩绿化,毛平平,严蕾,等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J]. 农业机械学报,2015,46(7):23 – 30.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):23 – 30. (in Chinese)

[28] 惠云婷,席军辉,王俊武,等. 面向等离子体苜蓿种子处理的均匀布料系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(11):184 – 193.
HUI Yunting, XI Junhui, WANG Junwu, et al. Design and experiment of uniform distribution system for plasma treatment of alfalfa seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(11):184 – 193. (in Chinese)

[29] 梁树建,刘立晶,刘芳建,等. 菠菜根土复合体离散元模型建立与标定试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(5): 38 – 49.
LIANG Shujian, LIU Lijing, LIU Fangjian, et al. Establishment and calibration experiment of the discrete element model for spinach root-soil complex[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(5): 38 – 49. (in Chinese)

[30] 何林,蒋杰,李家操,等. 柑橘育苗钵装填成穴生产线的设计与试验[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 108 – 121.
HE Lin, JIANG Jie, LI Jiacao, et al. Design and test of seedling pot filling and hole punching processing line for citrus[J]. Journal of Southwest University(Natural Science), 2023, 45(5): 108 – 121. (in Chinese)

[31] 李旺霞,陈彦云. 土壤水分及其测量方法的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014(10): 335 – 339.