

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.006

基于神经网络整定的PID控制变量施药系统设计与试验

孙文峰¹ 刘海洋¹ 王润涛² 付天鹏¹ 吕金庆¹ 王福林¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 岭南师范学院信息工程学院, 湛江 524048)

摘要: 针对常规的大田喷雾装备的定量施药方式,在机具行进方向上农药雾滴分布不均导致农药有效利用率低的问题,设计了一种基于神经网络整定的PID控制变量施药系统。该系统采用多传感器实时监测车速、流量、压力等信息,并以此作为控制依据,运用神经网络自学习能力修正PID参数,精准调控药液回流量,解决了现有变量施药控制算法存在的超调量较大、稳态误差较大、响应时间较长等问题,实现了大田单位面积内施药量恒定的目标。为验证本系统算法对精准变量施药的优越性,在Simulink平台下对常规PID、模糊PID和神经网络PID控制方式进行建模仿真,结果表明,神经网络PID控制在上升时间、超调量和稳态误差方面均优于其他两种控制方式。田间试验表明,在不同车速下,液滴沉积数量标准差均小于1.4个/cm²;在不同施药量、车速随意变化的情况下,机具纵向均匀度变异系数均小于6%;车速在4~11 km/h范围内随机变化时,系统平均调节时间为0.72 s,平均超调量为2.1%,实际施药量与理论值相差1.3%。

关键词: 变量施药; 神经网络; PID; 液滴沉积; 田间试验

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0055-10

OSID:



Design and Experiment of PID Control Variable Application System Based on Neural Network Tuning

SUN Wenfeng¹ LIU Haiyang¹ WANG Runtao² FU Tianpeng¹ LÜ Jinqing¹ WANG Fulin¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. School of Information Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China)

Abstract: Aiming at the situation of pesticide residues and less spraying under the conventional field quantitative spraying method, at the same time, in order to improve the timeliness of the existing variable spray control system and solve the lag of fuzzy decision-making, the BP neural network PID variable spray system was designed. Based on the multi-sensor real-time monitoring of speed, flow rate and pressure, the system used neural network self-learning ability to modify PID parameters to precisely control the return flow of the liquid. It solved the technical problems such as large overshoot, large steady-state error and long response time in the existing variable application control algorithm, and realized the purpose of constant application amount per unit area in the field. In order to verify the superiority of the system algorithm in accurate variable application, the conventional PID, fuzzy PID and neural network control mode were modeled and simulated under the Simulink platform. Through comparison, it can be seen that the neural network PID control was superior to the other two control modes in terms of rising time, overshoot and steady-state error. The field experiment showed that the standard deviation of droplet deposition number was less than 1.4 per square centimetre, the coefficient of variation of longitudinal uniformity was less than 6%, and when the speed varied randomly in the range of 4~11 km/h, the average adjustment time of the system was 0.72 s, the average overshoot was 2.1%, and the difference between the dosage and the setting was 1.3%.

Key words: variable rate spraying; neural network; PID; droplet deposition; field experiment

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD020080709, 2018YFD0300105)

作者简介: 孙文峰(1973—),男,研究员,主要从事高效植保机械研究, E-mail: 13304508203@163.com

通信作者: 王福林(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事农业系统工程与管理工程研究, E-mail: fulinwang1462@163.com

0 引言

施用农药是防治病虫害最为快速、经济、有效的手段。由于植保机械制造及使用水平相对低下,严重影响了植保作业的效果^[1-2]。目前,大田施药仍以定量施药方式为主,车辆低速行走时易造成药害残留,车辆高速行走时易造成药液沉积少而无法有效控制病虫害。因此,农业生产中亟需能随车速变化而相应改变喷量的高效、低污染植保喷雾设备。

变量喷雾是实现精准施药的一种重要技术方式^[3]。欧美等发达国家的大田变量施药相关研究开展较早,已经取得长足的进展,相关技术已在市场上推广使用^[4-7]。变量喷雾主要通过整合机具速度和管道压力等机器信息、识别田间作物病虫害和形态等作物信息来实现变量、按需施药。按调节方法变量喷雾可分为浓度调节式、流量调节式和压力控制式^[8-12]。ELAISSAOUI 等^[13]基于电子控制系统设计了一套小型直接注入式喷雾系统,该系统能够有效提高原液利用率,且喷雾状态稳定,但药液浓度改变延时较长。NEEDHAM 等^[14]研制了一种比例电磁阀控制系统,电磁阀与喷嘴耦合,利用高频(10 kHz)脉宽调制信号占空比改变阀门开度、调节通过药液的流量。PWM 式流量调节技术对雾化效果和管道压力影响较小,但高频调节时需要优质高速电磁开关支持,低频调节时雾化状态不连续。压力控制式变量喷雾系统主要通过改变喷雾管道的控制阀开度进而实现变量喷雾。孙睿^[15]设计了一种基于 PID 模糊控制理论的压力调控变量喷雾系统,建立了以载体农机动态速度为输入变量、控制阀驱动电压为输出变量的模糊控制规则。但在模糊控制策略下,系统上升时间较长,且稳定性较低。压力调控变量喷雾系统虽然因频繁改变管道压力而影响喷雾均匀度,但该系统具有结构简单、造价低廉、应用性强等优势,因此广泛应用于大田变量喷雾作业中。国内外学者对变量施药的工作原理及应用进行了深入研究,但对现存变量施药控制算法滞后及超调优化方面的研究较少^[16-21]。

为提高作业效率和农药利用率,本文设计一种流量自适应的变量施药系统,以调控管路回流量为目的,以神经网络 PID 控制为实施算法,减少系统滞后时间及超调量,并进行相应田间试验,验证系统可行性和算法优越性。

1 系统组成与设计

1.1 系统结构组成

变量施药系统结构与组成如图 1 所示。液位传感器安装在药箱底部并与变量喷雾控制器相连,以

此监控药箱液位是否在安全范围内。药液受动力输出轴所驱动的隔膜泵作用依次流经主阀、过滤器,高压药液经手动调压阀第 1 次分流,一部分药液由调压阀流回药液箱,另一部分形成稳定压力的药液经电控调节阀第 2 次分流,一部分流回药液箱,另一部分依次流经流量传感器、分配阀、压力传感器供给到喷头处,流量传感器与压力传感器分别与变量喷雾控制器相连并实时监测系统的机器信息。本文采用霍尔型速度传感器,获取装备的实时前进速度信息^[22]。手动调压阀和电控调节阀开度均可调,其中电控调节阀为变量施药系统的主要执行部件,其安装在回流管路上,接收来自变量喷雾控制器的指令信号,通过改变系统药液回流量进而实现变量施药的工作目标。

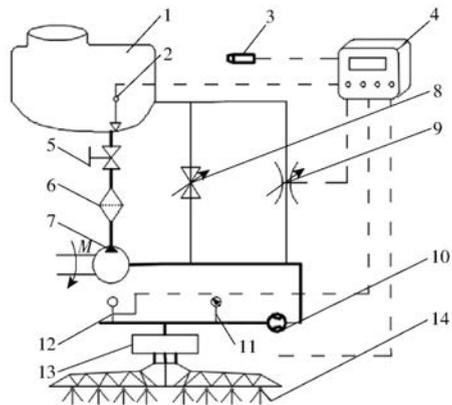


图 1 变量施药系统管路结构与组成示意图

Fig. 1 Schematic of pipeline structure and composition of variable application system

1. 1000L 药液箱
2. 投入式液位传感器
3. 速度传感器
4. 变量喷雾控制器
5. 主阀
6. 过滤器
7. 隔膜泵
8. 手动调压阀
9. 电控调节阀
10. 流量传感器
11. 压力表
12. 压力传感器
13. 分配阀
14. 扇形喷头

1.2 电控部分设计

选用的中央控制处理器为 STC12C5A60S2 型单片机,主要完成对车速、流量、液位、压力信号的处理,对键盘和控制阀的驱动以及控制 LCD12864 的显示和控制算法运行;选用 JK8002C 型霍尔速度传感器;选用检测范围为 7.5 ~ 150 L/min 的 LWGYA-20 型涡轮流量传感器,主要完成对管道流量信号的采集;选用 SC-PB800 型压力传感器,其检测范围为 0 ~ 1.6 MPa;采用 CBM-2100 型投入式静压液位计,其检测范围为 0 ~ 200 m;设计了 LM2596 电源转换模块,以保证将车载蓄电池 12 V 电压转换为稳定的 5 V 直流供电系统使用;使用 4 个 MOS 管设计成 H 桥电路来驱动电控调节阀内部电机,从而使电控调节阀开度能够按需调控。为采集系统工作信息,基于 LabVIEW 开发了上位机监测软件,同时调用

Excel 在采样周期为 1 000 ms 情况下实时记录机组信息, 系统框图如图 2 所示。

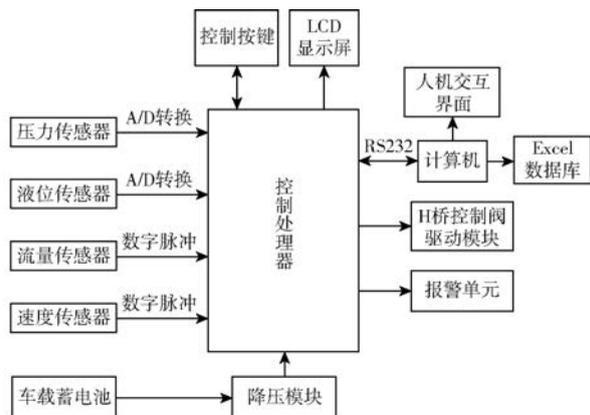


图 2 喷雾系统控制原理框图

Fig. 2 Block diagram of spray system

2 系统控制策略

变量施药系统需实现的技术目标为系统能够根据牵引机具所行进车速而实时调控施药量。因此该系统是以单片机为控制核心, 速度传感器输入数据为调控依据, 调节阀为执行机构的变量施药系统。

2.1 控制原理

农田施药是一个复杂过程, 需要控制的因素较多^[23], 本文采用的变量施药方式实质是通过变量喷雾控制器的键盘及显示屏采用人机交互方式预先设置每公顷施药量、喷头数目及喷头间距等参数。工作过程中, 控制器通过采集机具行进速度计算出当前所需流量, 与流量传感器采集的实时流量数据进行对比计算偏差, 将偏差等参数作为系统输入量, 通过神经网络 PID 控制算法修正控制参数, 根据计算输出后电压的变化实现阀门开度的调节, 改变管路药液回流量, 进而使实际施药量与目标理论流量不断接近, 达到变量施药目的。目标理论流量与作业速度关系式为

$$q_1 = \frac{Cvdm}{60\,000} \quad (1)$$

式中 q_1 ——目标理论流量, L/min

C ——每公顷施药量, L/hm²

v ——行进车速, km/h

d ——喷嘴间距, cm

m ——喷头数目

由质量守恒可知

$$q_2 = Q - q_1 \quad (2)$$

式中 q_2 ——目标回流量, L/min

Q ——主管路流量, L/min

2.2 主要参数检测

系统以多传感器的检测数据为控制依据, 处理

器对数据进行分析与计算, 并发出相应指令。过程中, 通过相应的数学模型对数据计算后推导出相应的作业参数。

2.2.1 速度检测

速度传感器安装在拖拉机后轮轴内侧, 每有一个金属元件接近时会产生一个脉冲, 通过对车轮转动时脉冲计数的方式计算当前车速, 其计算式为

$$v = \frac{24\pi r p_1}{5Nt_1} \quad (3)$$

式中 r ——车轮半径, m

N ——后轮轴上金属元件个数

p_1 ——时间间隔 t_1 时系统接收脉冲数

2.2.2 液位和压力检测

液位和压力主要为系统提供预警及监测作用且输出均为模拟量, 需经 A/D 将检测的模拟量转换为数字量, 为避免药箱内无药液进而导致隔膜泵空转, 当药箱液位低于设定值后需进行报警。由于传感器量程与其所输出模拟信号范围呈线性关系, 故液位检测值计算式为

$$H = (H_{\max} - H_{\min}) \frac{I_{Wd} - I_{W\min}}{I_{W\max} - I_{W\min}} + H_{\min} \quad (4)$$

式中 H ——液位检测值, mm

H_{\max} ——液位测量上限, mm

H_{\min} ——液位测量下限, mm

I_{Wd} ——液位采样值, mA

$I_{W\min}$ ——液位模拟量输出下限, mA

$I_{W\max}$ ——液位模拟量输出上限, mA

在实际施药过程中, 如果施药系统在流量传感器之后的管路连接处产生破损, 由于系统流出药液流量正确, 无法得知系统是否存在“漏液”现象; 当某些喷头体过滤网处产生“堵塞”现象时, 会造成其余喷头流量增大进而导致横向施药不均; 上述两种工况发生时仅从流量传感器所传输数值无法知晓, 因此系统需要通过压力传感器所传输数据判断管道压力是否在安全范围内, 进而判断是否发生上述两种现象。压力检测值计算公式为

$$p = p_{\max} \frac{I_{Yd}}{I_{Y\max} - I_{Y\min}} \quad (5)$$

式中 p ——压力检测值, MPa

p_{\max} ——压力测量上限, MPa

I_{Yd} ——压力采样值, mA

$I_{Y\max}$ ——压力模拟量输出上限, mA

$I_{Y\min}$ ——压力模拟量输出下限, mA

2.2.3 流量检测

流量传感器输出为脉冲信号, 药液流经流量传感器后全部从喷头处流出, 故流量传感器所检测数

值为实际施药量。所采用的流量传感器内部涡轮在药液作用下旋转,使其内部磁场产生变化,经由放大器作用后输出连续矩形脉冲信号,其计算公式为

$$q_3 = \frac{p_2}{f t_2} \quad (6)$$

式中 q_3 ——实际施药量, L/min

p_2 ——时间间隔 t_2 时系统接收脉冲数

f ——流量计系数,取 380 脉冲/L

2.3 控制器主程序设计

变量喷雾控制采集系统各项参数作为控制依据,利用神经网络 PID 控制策略进行参数修正。首先系统初始化并进行按键扫描,主要包括端口配置初始化、串口和定时器初始化等,与此同时调用 LCD12864 液晶显示屏的显示子程序;当选择自动模式后,检测药箱液位是否高于最低值,同时控制器发出指令,电控调节阀进行调节;之后开始检测车辆速度并实现阀门开度的调节;最后将数据发送到上位机储存在 Excel 数据库中,具体流程如图 3 所示。

以顶开防后滴装置的弹簧机构使药液得以雾化,故管路压力应不小于 0.1 MPa,需使电控调节阀保持一定开度,因此在系统刚开始启动时电控调节阀处于关闭过程中。在使用 36 套 3 号喷嘴的前提下,不同设定施药量与管路最低流量对应关系如表 1 所示。

表 1 不同施药量下管路最低流量

Tab.1 Minimum flow rate under different dosages

设定施药量/ (L·hm ⁻²)	车速小于 4 km/h 时 管路需保持流量/L	管路最小压力/ MPa
100	12	0.1
125	15	0.1
150	18	0.1

3 控制算法

常规 PID 控制存在超调大、干扰后调整时间长、稳态误差较大等问题,并不适用于变量喷雾系统调节,只有调整参数 k_p 、 k_i 、 k_d ,才能取得较优的工作结果。模糊控制虽然可以很好地解决系统的非线性模型问题,但稳定性低及学习能力差的缺点制约其在实际生产中的应用。学习算法和结构简单的 BP 神经网络已经被广泛应用于 PID 参数的整定过程中,借助其函数逼近特性及自学习能力不断地修正参数减小偏差,实现控制参数再整定,最终能够取得较好的控制效果^[24-29]。

3.1 经典增量式 PID 控制

采用经典增量式 PID 控制,其公式为^[24]

$$u(k) = u(k-1) + k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (7)$$

式中 k_p ——PID 比例控制系数

k_i ——PID 积分控制系数

k_d ——PID 微分控制系数

k ——采样序号, $k=0, 1, 2, \dots$

$u(k)$ ——第 k 次采样实际流量, L/min

$e(k)$ ——第 k 次采样流量偏差, L/min

3.2 BP 神经网络 PID 控制算法实现

采用带有动量项的 BP 网络,通过仿真表明隐含层有 5 个节点时其表现性能较好,准确度较高。设置输入神经元 $j=3$;隐含层神经元 $i=5$;输出神经元 $l=3$,输入层的输入分别为第 k 次采样时刻流量偏差、理论流量值、实际流量值,将 PID 控制器的 3 个控制系数 k_p 、 k_i 、 k_d 与输出层的 3 个输出节点相对应,由于 3 个系数均不能为负数,故输出层选用非负 Log-Sigmoid 作为激励函数^[30],其学习速率 $\eta=0.2$,惯性系数 $\alpha=0.05$,权系数初始值选取 $[-0.5,$

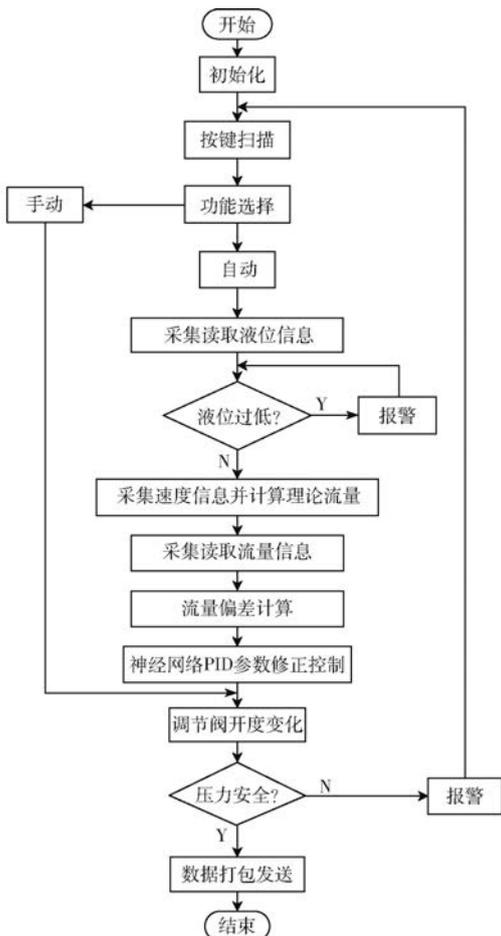


图 3 主程序流程图

Fig.3 Flow chart of main program

当车速低于 4 km/h 且不为零时,由于本系统所采用的喷头总成均带有防后滴装置,为保证压力足

0.5] 内的随机数,控制策略如图 4 所示。

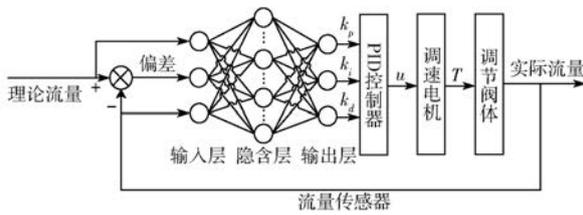


图 4 神经网络 PID 控制策略图

Fig. 4 NNPID control strategy diagram

在 BP 神经网络的正向学习阶段,理论流量 q_1 、实际流量 q_3 及流量偏差 e 作为输入信号进入输入层后经加权系数 $w_{ij}^{(2)}$ 后得到隐含层的输入信号,继续向前传播过程中又经输出层加权系数 $w_{li}^{(3)}$ 后得到输出层输出信号。

系统结构输入层的输入为

$$O_j^{(1)} = (q_1, q_3, e) \quad (8)$$

隐含层的输入和输出为

$$net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^M w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \quad (9)$$

$$(i = 1, 2, 3, 4, 5)$$

$$O_i^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)) \quad (10)$$

隐含层激励函数为

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (11)$$

网络输出层输入和输出为

$$net_l^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^p w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (l = 1, 2, 3) \quad (12)$$

$$\begin{cases} O_1^{(3)}(k) = k_p \\ O_2^{(3)}(k) = k_i \\ O_3^{(3)}(k) = k_d \end{cases} \quad (13)$$

在 BP 神经网络误差反向传播阶段,为了使输出流量与输入流量之差均值极小,通过系统信号传播所产生的误差可计算网络内各连接权值的更新调整量,通过调整网络加权系数使输出流量无限接近理论流量。

4 仿真与分析

为了验证 BP 神经网络整定的 PID 参数控制对于农用喷雾控制的优越性,运用 Matlab/Simulink 平台引入 S 函数分别搭建了常规 PID 控制、模糊控制 PID 及 BP 神经网络 PID 的控制模型,如图 5 所示,其中对于常规 PID 控制采用试凑法分别确定其比例、积分和微分参数,通过调整最终确定 $k_p = 1.2, k_i = 0.2, k_d = 0.8$;其中对于模糊控制,采用文献[15]所建立的模糊控制原则对控制模型进行搭建。通过阶跃仿真对 3 种控制方式进行对比,结果如图 6 所示。

由表 2、图 6 可知,在阶跃信号作用下,BP - PID 决策下系统上升时间为 0.25 s,超调量为 1.30%,稳态误差为 $\pm 0.26%$ 。模糊控制 PID 上升时间为 0.64 s,超调量为 18.2%,稳态误差为 $\pm 0.94%$ 。常规 PID 控制上升时间为 0.30 s,超调量为 50.9%,稳态误差为 $\pm 1.21%$ 。综上所述,BP 神经网络 PID 控制在阶跃响应上超调量较少、上升时间较短、稳态误差较小。通过仿真可知,BP - PID 控制在所搭建的控制模型下能够较好地解决常规 PID 存在超调量大、模糊 PID 存在滞后的问题,并能够取得较好的响应效果。

5 田间试验

试验于 2020 年 7 月 14—18 日在东北农业大学

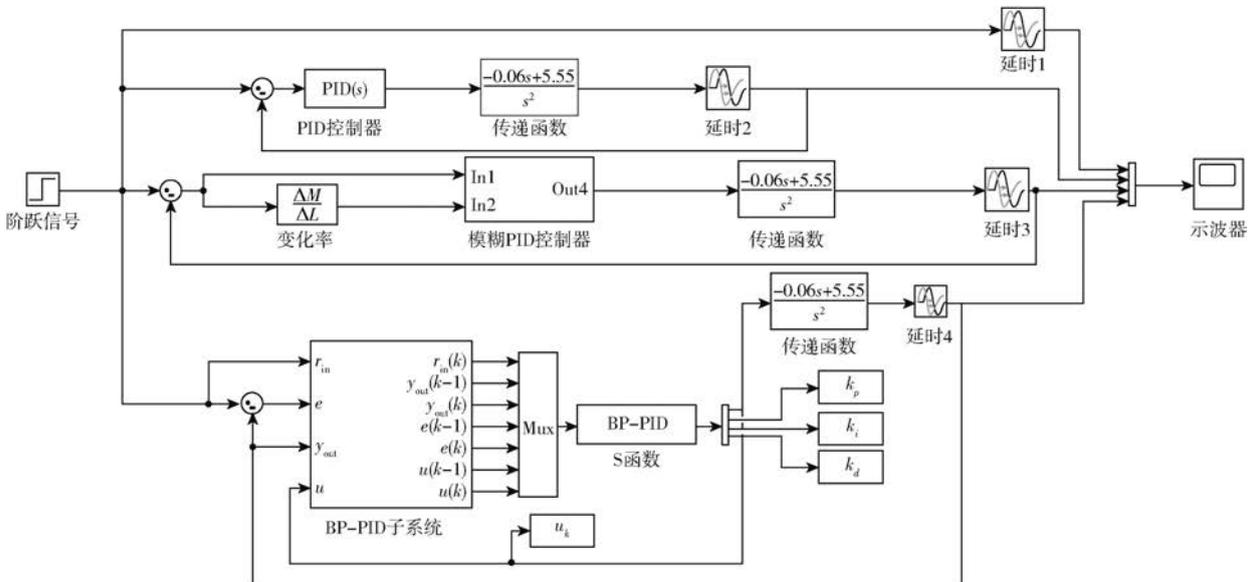


图 5 BP 神经网络 PID/模糊 PID/常规 PID 控制系统

Fig. 5 BP neural network PID/fuzzy PID/traditional PID control system

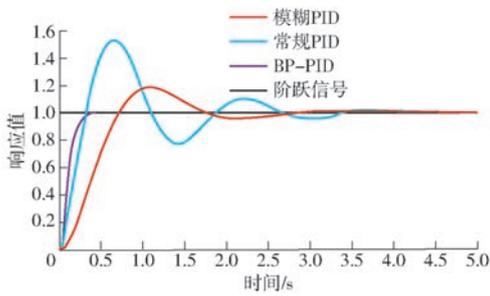


图6 阶跃跟随曲线

Fig. 6 Step following graph

表2 阶跃响应结果对比

Tab. 2 Comparison of step response results

控制决策	上升时间/s	响应超调量/%	稳态误差/%
常规 PID	0.30	50.9	± 1.21
模糊 PID	0.64	18.2	± 0.94
BP-PID	0.25	1.30	± 0.26

种植基地进行,试验地为马铃薯垄作地,以水为试验介质,由于本次试验需使用水敏纸(日本 AS ONE)探究使用变量喷雾控制系统的液滴沉积效果,应避免田间相对湿度及叶片呼吸作用对本试验的影响。故雾滴沉积效果探究试验时间选在 14:00—15:00,试验时空气相对湿度为 68%,环境温度为 27℃。喷雾装置为 3WF-1000 型悬挂式喷雾机,配有 1000 L 药液箱、MB390/3.0 型隔膜泵、TEEJET AIXR11003 型喷嘴(36 套)、液压折叠系统、幅宽 18 m 桁架,牵引机具为约翰迪尔 904 拖拉机,施药控制器为自主研制的 PW-01 型变量喷雾控制器,如图 7 所示。

试验参考 GB/T 20183.3—2006《植保机械 喷雾装置 农业液力喷雾机每公顷施液量调节系统试验方法》,标准要求试验时行进车速为 5.4~9 km/h。考虑到田间实际作业是在外界条件多胁迫情况下进

行,并且田间实际工作时在启车及驻车阶段(车速较低时)均会进行施药作业,故本试验行进速度范围在国家标准基础上有一定延伸,最低速度设为 0 km/h;同时由于本系统选择 3 号喷嘴,在施药量为 150 L/hm² 情况下,为保证喷嘴工作压力不高于 0.4 MPa(喷嘴优选的工作压力)^[31],以延长其使用寿命及保证喷雾作业横向均匀性,试验最高速度设为 11 km/h(喷嘴压力为 0.4 MPa),故行进速度范围为 0~11 km/h。

5.1 动态流量跟随对比试验

为更好验证所设计的 BP-PID 变量施药系统在实际作业中的实时调控优越性,采用车速随机变化的方式来验证 BP-PID 变量施药系统与模糊 PID 变量喷雾系统的动态跟随性,模糊 PID 控制系统采用课题组自行研发并已在市场推广使用的变量施药系统^[15]。设定需求喷雾量 150 L/hm²,驾驶员操控拖拉机使车速在 4~11 km/h 范围内随机变化,拖拉机启动后首先打开动力输出轴进行喷雾作业,当车速到达 4 km/h 后开启变量喷雾控制器进行施药量调节并记录;通过控制油门缓慢增速达到 11 km/h 后逐渐减速至 4 km/h 时停止施药;变量喷雾控制器通过 RS232 串行通信接口与便携式计算机相连,通过上位机监测软件实时计算并记录当前车速、压力、理论流量及实际流量。通过曲线形式在上位机展示并实时记录储存在 Excel 数据库中,模糊 PID 控制下试验结果如图 8 所示,BP-PID 控制下试验结果如图 9 所示。

由图 8 可知,变量施药系统采用模糊控制策略会产生 1~4 s 的滞后;在时刻 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 ,由于车速增加,喷雾量跟随产生上升超调,在时间段 $t_2 \sim t_5$ 内



图7 田间性能试验

Fig. 7 Field performance experiment

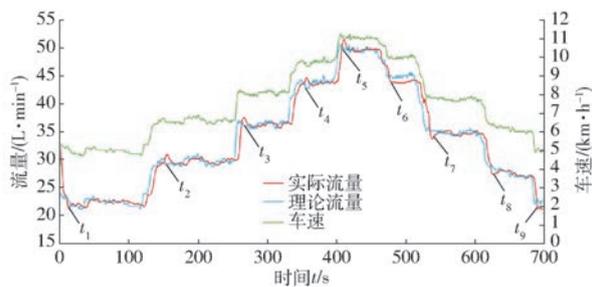


图 8 模糊 PID 控制动态跟随流量、速度响应曲线

Fig. 8 Dynamic follow flow and velocity response curves of fuzzy PID control

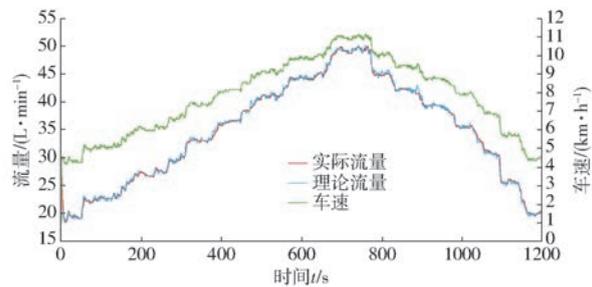


图 9 BP-PID 控制动态跟随流量、速度响应曲线

Fig. 9 BP-PID control dynamic follow flow and velocity response curves

平均施药量为 157.3 L/hm^2 , 在时刻 t_1 、 t_6 、 t_7 、 t_8 、 t_9 由于系统启动或车速下降, 喷雾量跟随产生下降超调, 在时间段 $t_6 \sim t_9$ 内平均施药量为 134.8 L/hm^2 ; 整个喷雾过程共喷洒 394.5 L , 由于增速和减速而产生的超调量为 17.6% , 平均调整时间为 2.54 s ; 利用 Excel 软件统计试验实测施药量为 142.1 L/hm^2 , 与理论值相差 5.9% 。

由图 9 可知, 变量施药系统采用 BP-PID 控制策略, 流量跟随紧密, 解决了模糊 PID 控制存在的超调及滞后问题; 整个喷雾过程共喷洒 752.3 L , 平均超调量为 2.1% , 平均调整时间为 0.72 s ; 统计试验实测施药量为 151.9 L/hm^2 , 与理论值相差 1.3% 。

5.2 流量控制精度和纵向施药均匀度试验

5.2.1 流量控制精度试验

目前我国大部分地区茎叶处理施药量为 $100 \sim 150 \text{ L/hm}^2$, 试验前设置施药量为 100 、 125 、 150 L/hm^2 。为验证所设计的 BP-PID 变量施药系统在设定施药量情况下的流量控制精度, 首先切换至手动调节模式并采用给定速度试验方式屏蔽车速传感器, 给定系统车速分别为 6 、 7 、 8 km/h , 在流量显示值稳定后记录数据; 随后系统切换至自动调节模式, 车辆田间试验时在车速 $0 \sim 11 \text{ km/h}$ 范围内随机变化, 当液位低于设定下限, 控制器报警后停止试验, 其试验结果如表 3 所示。由表 3 可知, 在进行速度给定试验时, 系统实现了“高速多喷, 低速少喷”的作业目标。且由于拖拉机未在田间行走, 降低了施药量误差, 在

速度和设定施药量各水平组合试验下, 试验误差均不大于 2% 。在进行田间行走试验时, 流量随着车速的不断改变而变化, 由于试验是在田间多因素胁迫下进行, 所以产生误差较大, 但系统总体误差仍稳定在 3% 以内。该系统可实现根据车速调节流量的变量喷雾作业目标, 且控制精度较高, 适用于大田作业。

5.2.2 纵向施药均匀度试验

提升现有施药方式纵向(机组行进方向)施药均匀度是本文的主要目标。选取表 3 中控制器处于自动调节模式下的 9 组试验数据作为 BP-PID 控制决策施药系统的样本来源, 同时采用模糊 PID 控制决策下的施药系统进行对比试验, 每组重复 3 次。以机组每行进 5 m 所喷洒区域 (90 m^2) 施药量作为计算数值, 以此探究所设计变量施药系统的纵向施药均匀度。部分喷洒区域施药量如表 4 所示。

由表 4 可知, BP-PID 控制决策下的施药系统在整个施药作业过程中, 施药控制误差最小为 $-4.5\% \sim 14\%$, 控制精度较差, 而当工作过程中车速大于等于 4 km/h 时, 施药控制误差稳定在 $-5\% \sim 5\%$ 之间, 控制精度较好, 由于当车速低于 4 km/h 时, 为保证管路压力足以顶开防后滴装置进行喷雾作业, 从而使此区域施药量较高 ($0 \sim 5 \text{ m}$ 区域启车阶段, $3215 \sim 3220 \text{ m}$ 区域驻车阶段); 当工作过程中车速大于等于 4 km/h 时, 计算不同设定施药量各喷洒区域施药量变异系数均小于 6% , 且组间平均值为 5.1% 。对于模糊 PID 控制决策下的施药系统, 当工作过程中车速大于等于 4 km/h 时, 施药控制误差最小为 $-6.3\% \sim 7.4\%$; 当工作过程中车速大于等于 4 km/h 时, 计算不同设定施药量各喷洒区域施药量变异系数最小值为 6.9% , 且组间平均值为 8.1% , 相较采用 BP-PID 控制决策下的施药系统高 3 个百分点, 原因是由于模糊 PID 控制在实际工作中产生的超调及滞后。综上所述, 说明本文所设计的变量施药系统的纵向施药均匀度较好, 性能稳定。

5.3 雾滴沉积性能试验

将水敏纸均固定在植株上端叶片, 为避免由于采集时间过长而造成水敏纸局部甚至整张变色, 同时为减少试验误差, 各个车速下随机设置 6 个水敏纸取样区域, 每个取样区域面积为 1 m^2 , 区域间隔保持 5 m 以上, 各取样区域内采用五点取样法选取 5 株植株作为取样点, 将水敏纸使用订书器固定在叶片上。在田间设置车速区段提示物及车速变化缓冲带, 经过提示物时驾驶员操纵手动油门适时增速或减速。为了便于数据分析, 取因素水平分别为 5 、

表3 喷雾试验结果
Tab.3 Spray test results

试验组别	流量显示值/ (L·min ⁻¹)	速度/ (km·h ⁻¹)	设定施药量/ (L·hm ⁻²)	实际施药量/ (L·hm ⁻²)	施药量误差/ (L·hm ⁻²)	施药量控制误差/ %
给定速度试验	18.0	6	100	101.4	1.4	1.4
	21.0	7	100	102.0	2.0	2.0
	24.0	8	100	98.2	-1.8	-1.8
	22.5	6	125	126.5	1.5	1.2
	26.3	7	125	127.3	2.3	1.8
	30.0	8	125	123.4	-1.6	-1.3
	27.0	6	150	152.2	2.2	1.5
	31.5	7	150	151.8	1.8	1.2
	36.0	8	150	148.2	-1.8	-1.2
田间试验			100	102.8	2.8	2.8
		0~11	100	98.1	-1.9	-1.9
			100	102.2	2.2	2.2
			125	127.1	2.1	1.7
		0~11	125	127.6	2.6	2.1
			125	122.4	-2.6	-2.1
			150	151.9	1.9	1.3
		0~11	150	147.1	-2.9	-1.9
			150	146.4	-4.8	-2.4

表4 纵向施药均匀度试验结果

Tab.4 Longitudinal application uniformity test results

控制决策	设定施药量/ (L·hm ⁻²)	行进5 m 区域理论 施药量/L	区域实际施药量/L						施药 控制误 差/%	车速大于等于 4 km/h时施药 控制误差/%	变异 系数/ %	车速大于等于 4 km/h 变异 系数/%
			0~ 5 m	5~ 10 m	800~ 805 m	1 605~ 1 610 m	2 410~ 2 415 m	3 215~ 3 220 m				
BP-PID	100	0.9	1.123	0.934	0.915	0.91	0.863	1.005	-4.7~25	-4.7~5.0	7.4	5.9
	100	0.9	1.084	0.858	0.933	0.909	0.905	1.025	-4.8~21	-4.8~4.9	6.8	5.6
	100	0.9	1.095	0.917	0.914	0.939	0.911	1.018	-4.7~22	-4.7~4.8	5.8	4.2
	125	1.125	1.313	1.079	1.135	1.165	1.154	1.203	-4.5~17	-4.5~4.7	7.2	5.8
	125	1.125	1.282	1.177	1.145	1.085	1.135	1.215	-4.6~14	-4.6~4.8	5.1	4.5
	125	1.125	1.367	1.171	1.132	1.108	1.182	1.232	-4.7~22	-4.7~4.7	6.6	5.2
	150	1.35	1.645	1.284	1.415	1.356	1.343	1.502	-4.8~22	-4.8~4.9	6.7	5.2
	150	1.35	1.62	1.367	1.319	1.29	1.335	1.552	-4.8~20	-4.8~4.7	6.2	4.9
	150	1.35	1.581	1.308	1.403	1.286	1.338	1.485	-4.9~18	-4.9~4.6	6.0	5.0
模糊PID	100	0.9	1.141	0.923	0.856	0.908	0.933	0.989	-6.3~27	-6.3~8.9	8.9	8.1
	100	0.9	1.122	0.927	0.985	0.904	0.875	0.995	-7.2~25	-7.2~9.8	9.8	9.0
	100	0.9	1.045	0.835	0.885	0.936	0.942	1.002	-7.5~16	-7.5~7.8	7.6	7.2
	125	1.125	1.342	1.125	1.205	1.015	1.135	1.199	-9.9~19	-9.9~8.5	9.8	9.2
	125	1.125	1.275	1.164	1.213	1.078	1.112	1.201	-6.9~13	-6.9~9.6	9.4	8.5
	125	1.125	1.323	1.176	1.085	1.130	1.088	1.209	-7.6~18	-7.6~8.2	8.2	7.5
	150	1.35	1.655	1.356	1.295	1.435	1.369	1.480	-6.5~23	-6.5~7.4	7.7	6.9
	150	1.35	1.523	1.405	1.348	1.336	1.305	1.476	-7.0~13	-7.0~9.0	9.5	8.6
	150	1.35	1.573	1.240	1.272	1.399	1.416	1.486	-9.6~17	-9.6~8.2	8.6	7.8

6、7、8、9、10 km/h。喷雾机作业后取下水敏纸,带回实验室进行分析,试验取每平方厘米雾滴沉积数为试验指标,将每个取样区域内5个取样点水敏纸雾滴沉积数量统计并取平均值作为该取样区域数值进行分析。每个车速下取样区域序号为1、2、3、4、5、6^[32-33]。采用样条插值法绘制车速动态变化下液滴

沉积数量如图10所示。

采用文献[34]的计算方法,取各车速下液滴沉积数量平均值作为对比数据。随着车速不断增加,液滴沉积数量呈减少趋势,原因可能是由于压力增加后液滴粒径尺寸变小,并且拖拉机高速行驶时后方流场作用和相对风速增加而加剧了飘移,但极差

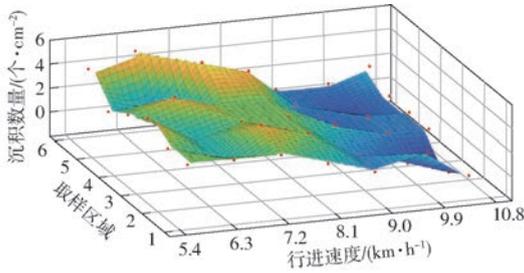


图 10 车速动态变化下液滴沉积数量

Fig. 10 Droplet deposition under dynamic change of vehicle speed

为 $3.1 \text{ 个}/\text{cm}^2$, 表明数据变化浮动不大。变量喷雾系统在车速变化时药液沉积数量较稳定。

对每个车速下的各取样点计算雾滴沉积数量标准差。由图 11 可知, 随着车速增加, 雾滴沉积数量标准差并无明显变化趋势, 均小于 $1.4 \text{ 个}/\text{cm}^2$ 。说明变量喷雾系统在各个车速下雾滴沉积数量较稳定, 并无明显差异。

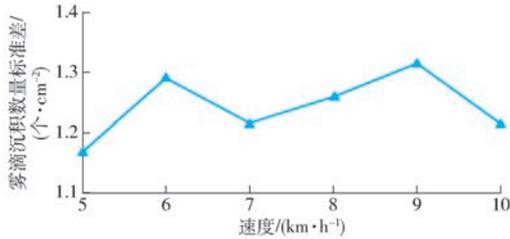


图 11 各车速下雾滴沉积数量标准差

Fig. 11 Standard deviation curve of droplet deposition number at different speeds

图 12 为喷雾作业后沉积效果, 国家标准要求进行防虫或防病喷雾作业时, 作物上沉积液滴数量最低为 $30 \text{ 个}/\text{cm}^2$ 。结合试验数据分析, 本系统工作时单位面积最低沉积数量为 38 个, 作业效果高于国家标准^[31]。综上所述, 采用本文设计的变量喷雾施药方式下液滴沉积密度符合国家标准, 其变异系数低, 适用于大田作业。



图 12 喷雾作业后水敏纸液滴沉积效果

Fig. 12 Water-sensitive paper droplet deposition after spray operation

6 结论

(1) 针对常规大田定量喷雾方式下容易产生药害残留及少喷的情况, 同时为了提高现有变量喷雾控制系统的时效性, 解决模糊决策的滞后性问题, 设计了 BP 神经网络 PID 变量喷雾系统。

(2) 运用 Matlab 分别对 3 种控制策略进行建模仿真, 结果表明, 基于 BP-PID 控制的上升时间、超调量、稳态误差分别为 0.25 s 、 1.30% 、 $\pm 0.26\%$, 明显优于其他 2 种常规控制方式。

(3) 在马铃薯大田中分别进行了神经网络 PID 变量喷雾系统的动态流量跟随试验、流量控制精度试验、纵向施药均匀度试验和沉积性能试验。当车速在 $4 \sim 11 \text{ km/h}$ 范围内随机变化时, 试验实测喷雾量为 $151.9 \text{ L}/\text{hm}^2$, 与理论值相差 1.3% , 系统平均调节时间为 0.72 s , 平均超调量为 2.1% ; 在进行田间行走试验时, 施药控制误差稳定在 3% 以内; 当车速大于等于 4 km/h 时, 施药量控制误差稳定在 $-5\% \sim 5\%$ 之间, 且变异系数均小于 6% ; 各速度下雾滴沉积数量标准差均小于 $1.4 \text{ 个}/\text{cm}^2$, 且雾滴沉积数量高于国家标准。说明所设计变量施药系统纵向施药均匀度较好、性能稳定。

参 考 文 献

- [1] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 133-146. HE Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133-146. (in Chinese)
- [2] 孙文峰, 王立君, 陈宝昌, 等. 农药喷施技术国内外研究现状及发展[J]. 农机化研究, 2009, 31(9): 225-228. SUN Wenfeng, WANG Lijun, CHEN Baochang, et al. The present situation and development of study on the pesticide applying technology at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(9): 225-228. (in Chinese)
- [3] 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 59-72. QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable spray technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009. (in Chinese)
- [4] TACKENBERG M, VOLKMAR C, SCHIRRMANN M, et al. Impact of sensor-controlled variable-rate fungicide application on yield, senescence and disease occurrence in winter wheat fields [J]. Pest Management Science, 2018, 74(6): 1251-1258.
- [5] KEVIN G P, GILES D K, SLAUGHTER D C, et al. Injection and fluid handling system for machine-vision controlled spraying [C]. ASAE Meeting, 2011: 011114.

- [6] BAKKER T, ASSELT K, BONTSEMA J, et al. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding[J]. *Journal of Terramechanics*, 2010, 47(2):63-73.
- [7] TEWARI V K, KUMAR A A, NARE B, et al. Microcontroller based roller contact type herbicide applicator for weed control under row crops [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 104:40-45.
- [8] 郭娜, 胡静涛. 基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计及试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(8):56-64.
GUO Na, HU Jingtao. Design and experiment of variable rate spaying system on Smith-Fuzzy PID control[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(8):56-64. (in Chinese)
- [9] 沈景新, 孙永佳, 孙宜田, 等. 3WP-650 型智能变量喷杆喷雾机的设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(6):238-242.
SHEN Jingxin, SUN Yongjia, SUN Yitian, et al. Design and test of 3WP-650 type intelligent variable spray rod spray machine [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(6):238-242. (in Chinese)
- [10] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1):70-76.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Design and experiment of auto-matic profiling orchard sprayer based on variable airvolume and flow rate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(1):70-76. (in Chinese)
- [11] 蒋焕煜, 张利君, 刘光远, 等. 基于 PWM 变量喷雾的单喷头动态雾量分布均匀性实验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4):41-46.
JIANG Huanyu, ZHANG Lijun, LIU Guangyuan, et al. Experiment on dynamic spray deposition uniformity for PWM variable spray of single nozzle[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4):41-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170405&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.005. (in Chinese)
- [12] 吴吉麟. 变量喷雾装置喷雾特性及其控制系统的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
WU Jilin. Variable-rate spraying control system design and test research[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [13] ELAISSAOUI A, LEBEAU F, ELBAHIR L, et al. A feasibility study of developing direct injection spraying technology for small scall farms[J]. *Synergy in the Technical of Agriculture and Food Industry*, 2011, 10:9-15.
- [14] NEEDHAM D L, HOLTZ A J, GILES D K. Actuator system for individual nozzle control of flow rate and spray droplet size [J]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2012, 55(2):379-386.
- [15] 孙睿. 农作物喷雾机控制器的研究与设计及非行走试验分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
SUN Rui. Research and design and cropspray controllers non-walking test analysis [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [16] AL-GAAD K A, AYERS P D. Monitoring controller-based field sprayer performance[J]. *Appl. Eng. Agric.*, 1994, 10(2):205-208.
- [17] ROCKWELL A D, AYERS P D. A variable rate direct nozzle injection field sprayer[J]. *Appl. Eng. Agric.*, 1996, 12(5):531-538.
- [18] SHARDA A, FULTON J P, MCDONALD P, et al. Real-time nozzle flow uniformity when using automatic section control on agricultural sprayers [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 79(2):169-179.
- [19] 徐艳蕾, 包佳林, 付大平, 等. 多喷头组合变量喷药系统的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17):47-54.
XU Yanlei, BAO Jialin, FU Daping, et al. Design and experiment of variable spraying system based on multiple combined nozzles[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(17):47-54. (in Chinese)
- [20] 刘洋洋, 茹煜, 陈青, 等. 无人机变量施药实时监控系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(7):91-99.
LIU Yangyang, RU Yu, CHEN Qing, et al. Design and test of real-time monitoring system for UAV variable spray [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7):91-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200711&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.011. (in Chinese)
- [21] 王新东, 徐艳蕾, 孟笑天, 等. 基于 BAS-PID 控制的精准变量施药系统仿真与试验[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(3):62-66.
WANG Xindong, XU Yanlei, MENG Xiaotian, et al. Simulation and experiment of precision variable spraying system based on BAS-PID control[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(3):62-66. (in Chinese)
- [22] 孟志军, 刘卉, 付卫强, 等. 农田作业机械测速方法试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6):141-145.
MENG Zhijun, LIU Hui, FU Weiqiang, et al. Evaluation of ground speed measurements for agricultural machinery [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6):141-145. (in Chinese)
- [23] 邵陆寿, 戴之祥, 崔怀雷, 等. 基于模糊控制的变量施药控制系统[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(11):116-118.
SHAO Lushou, DAI Zhixiang, CUI Huailei, et al. Study on a pesticide system spraying with changeable quantity based on fuzzy control [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(11):116-118. (in Chinese)
- [24] 王相友, 胡周勋, 李学强, 等. 多回流式变量喷药控制系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(2):123-131.
WANG Xiangyou, HU Zhouxun, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of multi-reflux variable spraying control system [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2):123-131. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190213&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.013. (in Chinese)

- [17] DAMORA D, PANDEY K P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed and fertilizer drills[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 34(1): 127 - 139.
- [18] 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38 - 42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38 - 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130208&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.008. (in Chinese)
- [19] 西涅阿科夫 R H, 潘诺夫 N M. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.
- [20] 马云海. 农业物科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [21] 张学军, 杨莹, 周岭. 滚筒式穴播器的重要参数选择与确定[J]. 农业机械学报, 1998, 29(增刊): 63 - 66.
ZHANG Xuejun, YANG Ying, ZHOU Ling. Selection and definitiveness on main parameters of bunch planting cyling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp.): 63 - 66. (in Chinese)
- [22] 黄钢, 周鹏. 地膜播种机分种器的改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 145 - 146, 144.
- [23] 汪遵元, 胡敦俊, 黄聿荣. 滚轮式膜上打孔精量播种机[J]. 农业机械学报, 1988, 19(1): 88 - 95.
WANG Zunyuan, HU Dunjun, HUANG Yurong. The precision roller type hill-drop drill with the punching device on film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1988, 19(1): 88 - 95. (in Chinese)
- [24] 李革, 艾力·哈斯木, 康秀生, 等. 地膜播种机螺旋覆土滚筒的参数优化[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 135 - 138.
LI Ge, AILI · H, KANG Xiousheng, et al. Parametric optimization of the spiral cylinder of a plastic-film mulch seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 135 - 138. (in Chinese)
- [25] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.

(上接第 64 页)

- [25] 岑振钊, 岳学军, 王林惠, 等. 基于神经网络 PID 的无人机自适应变量喷雾系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 100 - 108.
CEN Zhenzhao, YUE Xuejun, WANG Linhui, et al. Design and test of self-adaptive variable spray system of UAV based on neural network PID[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 100 - 108. (in Chinese)
- [26] DAI A, ZHOU X, LIU X. Design and simulation of a genetically optimized fuzzy immune PID controller for a novel grain dryer[J]. IEEE Access, 2017, 5: 14981 - 14990.
- [27] 龚菲, 王永骥. 基于神经网络的 PID 参数自整定与实时控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(10): 69 - 71.
GONG Fei, WANG Yongji. PID parameter self-tuning and real-time control based on neural networks[J]. Journal of Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2002, 30(10): 69 - 71. (in Chinese)
- [28] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [29] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [30] 李砚浓, 李汀兰, 姜艺, 等. 基于 RBF 神经网络自适应 PID 四旋翼飞行器控制[J]. 控制工程, 2016, 23(3): 378 - 382.
LI Yannong, LI Tinglan, JIANG Yi, et al. Adaptive PID control of quad rotor based on RBF neural network[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(3): 378 - 382. (in Chinese)
- [31] GB/T 17997—2008 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定[S]. 2008.
- [32] 兰玉彬, 张海艳, 文晟, 等. 静电喷雾雾化特性与沉积效果试验分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 130 - 139.
LAN Yubin, ZHANG Haiyan, WEN Sheng, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics and spray deposition of electrostatic nozzle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 130 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.015. (in Chinese)
- [33] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 86 - 93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.010. (in Chinese)
- [34] 程焯焯, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 22 - 29.
CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 22 - 29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004. (in Chinese)