

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.

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

岑振钊, 岳学军, 王林惠, 凌康杰, 程子耀, 卢 杨
(华南农业大学 电子工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】针对传统植保无人机在定量喷施作业时由于飞行速度的变化造成施药不均匀以及传统控制算法无法满足无人机变量喷雾系统所需的实时性和稳定性等问题, 设计一种基于神经网络 PID 的自适应无人机变量喷雾系统。【方法】采用风压变送器测出无人机的飞行速度, 根据速度采用脉宽调制 (PWM) 方法进行自适应变量喷雾, 同步用流量传感器测出实际喷雾流量, 融合 BP 神经网络 PID 控制算法调节喷雾流量。由 MATLAB 构建 BP 神经网络 PID 控制算法, 并与 PID、模糊 PID 和神经元 PID 对比及分析; 田间试验过程中, 对比分析无人机定量喷雾与随飞行速度改变的变量喷雾效果, 采用水敏纸获取雾滴沉积量分布, 分别从整体区域、飞行方向和喷杆方向评价沉积量分布的均匀性。【结果】算法仿真对比试验结果表明, 与 PID、模糊 PID 和神经元 PID 相比, BP 神经网络 PID 阶跃响应上升时间分别少 28.57%、84.73% 和 31.03%, 正弦跟踪平均误差分别小 63.01%、87.03% 和 0.58%, 方波跟踪平均误差分别小 74.00%、79.53% 和 6.80%, 鲁棒性强, 无静差, 超调量为 1.20%; 喷雾对比试验结果表明, 本系统能够根据飞行速度自适应调节喷雾流量, 实际流量与目标流量的平均偏差为 8.43%, 水敏纸扫描结果表明总体区域雾滴沉积量的变异系数对比定量喷雾平均降低 26.25%, 喷杆方向平均降低 18.79%。【结论】该研究结果可为农业航空变量喷雾技术的应用提供理论基础。

关键词: 无人机; 风压变送器; 自适应变量喷雾; 神经网络 PID
中图分类号: S251.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)04-0100-09

Design and test of self-adaptive variable spray system of UAV based on neural network PID

CEN Zhenzhao, YUE Xuejun, WANG Linhui, LING Kangjie, CHENG Ziyao, LU Yang
(College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】The change of flight speed in constant flow spraying process of traditional plant protection UAVs causes nonuniform pesticide application, and the common control algorithms cannot meet the requirements of the real-time and stability that UAVs variable spray system needs. To solve these problems, we designed a self-adaptive variable spray system of UAV based on neural network PID. 【Method】The flight speed of UAV was measured by wind pressure transmitter. According to the flight speed, we used pulse width modulation (PWM) for self-adaptive variable spray. At the same time, we measured the actual spray flow with the flow sensor and adjusted the spray flow with PID control algorithm based on BP neural network. We used

收稿日期: 2018-11-08 网络首发时间: 2019-06-25 15:52:53
网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20190625.0931.002.html>
作者简介: 岑振钊 (1994—), 男, 硕士研究生, E-mail: 641086930@qq.com; 通信作者: 岳学军 (1971—), 女, 教授, 博士, E-mail: yuexuejun@scau.edu.cn
基金项目: 广东省水利科技创新项目 (2016-18); 广州市科技计划项目 (201803020022); 华南农业大学 2017 年大学生创新创业训练计划项目 (201710564483, 201710564489)

MATLAB to construct PID control algorithm with BP neural network and compared with PID, fuzzy PID and neural PID control algorithms. In the field experiment, we compared and analyzed the effects of constant spray and variable spray based on changing flight speed. We used water-sensitive paper to obtain the distribution of droplet deposition, and then evaluated the uniformity of deposition distribution from the whole area, flight direction, and spray bar direction respectively. 【Result】 The simulation result of algorithms indicated that comparing with PID, fuzzy PID and neuron PID, the rise time of step response for BP neural network PID was 28.57%, 84.73% and 31.03% shorter respectively, the average error of sinusoidal tracking was 63.01%, 87.03% and 0.58% lower respectively, the average error of square wave tracking was 74.00%, 79.53% and 6.80% lower respectively. Additionally, the BP neural network PID had strong robustness, 0 static error, and lower overshoot (1.20%). The comparison of the spray tests showed that this system can automatically adjust the spray flow according to flight speed. The average deviation between the actual flow and the set flow was 8.43%. Based on the testing results of the water sensitive paper, variable spray decreased the coefficient of variation of droplet deposition in the whole area by 26.25% and in the spray bar direction by 18.79% on average compared with constant spray. 【Conclusion】 The research results can provide a basis for the application of variable spray technology in precision agricultural aviation.

Key words: UAV; wind pressure transmitter; self-adaption variable spray; neural network PID

变量喷雾是实现精准施药的一种重要技术方式^[1]。变量喷雾可根据作业速度、作物密度及虫害程度自动调节喷雾量^[2],从而减少农作物中的农药残留和环境污染,提高农药的利用率,是施药技术的重要发展方向^[3-5]。目前,应用于无人机的喷雾系统控制方式简单,不能根据作业参数自适应变量喷雾,大部分变量喷雾系统应用于地面的喷雾设备,且变量喷雾系统的控制算法较为简单,不能很好地满足无人机作业时所需的实时性和稳定性。邱白晶等^[6]研制了一种基于地理信息系统的自动对靶变量喷雾控制装置,可以根据拖拉机的位置和速度等进行变量喷雾,但与无人机相比,拖拉机施药效率较低,且易损坏农作物和留下辙印。Shahemabadi 等^[7]基于 GPS 的变量喷雾,研究了一种改进脉宽调制(Pulse width modulation, PWM)的算法,但典型的农用 GPS 数据每秒更新 1 次,更新速度慢,实时性不好。徐兴等^[8]设计了一种小型无人机机载农药变量喷洒系统,利用 PWM 技术控制农药喷洒流量,但没有结合无人机作业参数进行变量喷雾。Lebeau 等^[9]研究了一种基于 PWM 的喷雾控制器,旨在补偿水平喷杆运动速度对喷雾沉积均匀性的影响。Fritz 等^[10]利用风洞来模拟农用飞机飞行过程中的场景,测定了不同的飞行速度对喷雾效果的影响。王大帅等^[11]设计了一种植保无人机动态变量施药系统,能够实现飞行速度和施药流量的自动匹配,但没有研究控制算法对控制效果的影响。郭娜等^[12]设计了一种基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统,将模糊

PID 控制和 Smith 预估控制算法结合起来,提高了变量喷药系统的适应能力和鲁棒性,但该控制算法是针对旁路节流式变量控制系统而设计的。白如月等^[13]设计了一种施药机器人,为了提高喷雾控制精度,采用模糊 PID 控制,但其针对的是恒压定量的喷雾方式。Dai 等^[14]针对谷物烘干机设计了一种遗传优化的模糊免疫 PID 控制器,该控制器采用模糊规则自动调整 PID 控制器的参数,并采用遗传算法优化控制器的初始参数,克服了常规模糊免疫 PID 控制器的不足。蔡祥等^[15]设计了一种喷嘴直接注入式农药喷洒系统,采用 PID 算法实现闭环农药注入速率控制,但 PID 参数是固定的,不能在线调整。汪少华等^[16]研究了一种基于神经网络 PID 的电控空气悬架车高调节控制方法,通过神经网络动态调整 PID 控制器的参数,能够精确地控制车身高度。鲜见将神经网络 PID 应用于无人机变量喷雾系统的文献及报道。

基于以上研究现状,针对传统植保无人机的喷雾流量不能根据作业速度自适应调整而造成施药不精准以及简单的控制算法不能很好地满足无人机变量喷雾系统所需的实时性和稳定性等问题,本研究提出了一种基于神经网络 PID 的无人机自适应变量喷雾系统,该系统利用风压变送器测量无人机的飞行速度,根据速度采用 PWM 技术调节水泵进行流量控制,实现喷雾流量根据飞行速度自适应调整,并采用拥有较强自适应能力的神经网络对 PID 控制器参数进行动态调整,提高系统的动态响

应能力和稳定性, 以期为农业航空变量喷雾技术的应用提供参考方向与决策支持。

1 系统整体设计与理论分析

1.1 系统设计

基于神经网络 PID 的无人机变量喷雾系统主

要由无人机、风压变送器、流量传感器、嵌入式开发板、微型隔膜泵和喷头等组成。喷雾系统主要获取和输出内容包括飞行速度获取、根据飞行速度解算 PWM 的占空比并输出、反馈喷雾流量和修正偏差 4 个部分。系统实物及控制结构如图 1 所示。

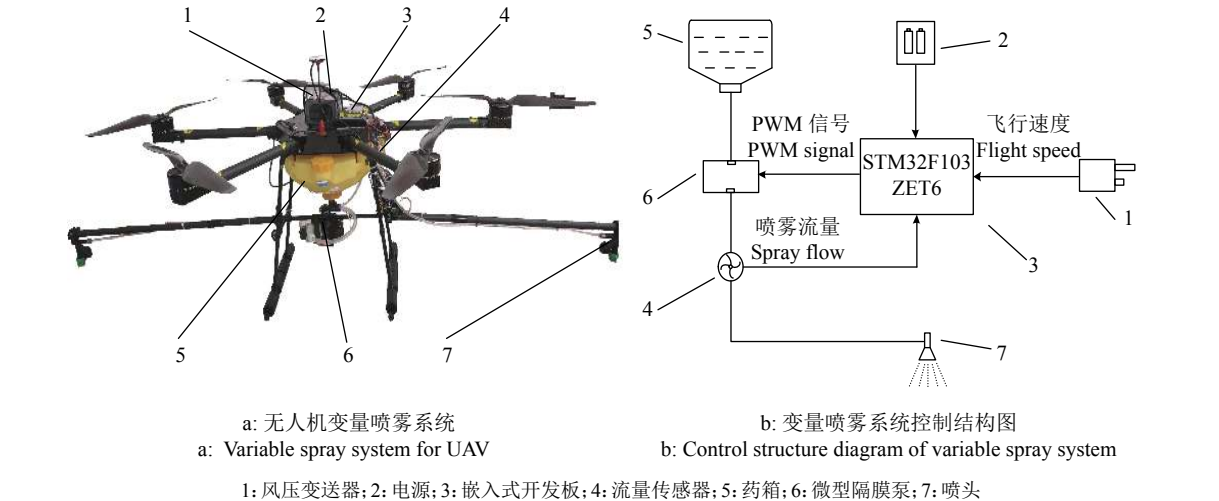


图 1 无人机变量喷雾系统实物及控制结构图
Fig. 1 Picture of variable spray system for UAV and its control structure

系统的硬件主要由传感器模块、处理模块、喷雾模块和电源模块组成。传感器模块包括风压变送器和流量传感器。该模块采用 QD-P6000 风压变送器测量无人机飞行时产生的动压, 由 OEM 硅压阻式差压芯体组装而成, 额定电压为 12 V, 量程范围为 0~50 Pa; 流量传感器型号为 MJ-HZ41C, 流量范围为 0.30~3.50 L/min, 工作电压为 5 V, 由霍尔元件的输出脉冲频率来计算水流量。处理模块采用 STM32F103ZET6 芯片作为核心, 此芯片使用高性能的 32 位 Cortex-M3 系列的 RISC 内核, 工作频率为 72 MHz。喷雾模块由微型直流隔膜水泵和喷头组成, 隔膜水泵的额定电压为 12 V, 额定功率为 45 W, 最大压力为 1.00 MPa, 最大流量为 4 L/min; 喷头为高压雾化扇形喷头, 喷嘴型号为德国 LECHLER 品牌的 ST110-03。

系统的具体工作过程如下, 系统通过风压变送器获取无人机动压的电压信号, 通过 AD 转换后送入单片机 CPU 进行处理, CPU 根据公式计算出飞行速度; 单片机根据空速值解算出 PWM 控制信号的占空比, 并传输给隔膜泵从而实现变量喷雾; 流量传感器实时检测喷雾流量; 单片机比较实际流量与目标流量; 通过神经网络 PID 算法不断修正偏差, 从而达到精准施药的目的。

1.2 系统自适应变量喷雾的控制原理

自适应变量喷雾的实现是通过单片机输出占空比不同的 PWM 波至微型隔膜泵, 将 PWM 控制信号频率设置为 10 Hz, 改变 PWM 控制信号的占空比, 每个占空比下持续喷雾 30 s, 用烧杯收集喷头喷出的药液并得出体积, 然后换算为流量。本文对德国 LECHLER 品牌的 4 种喷嘴 ST110-01、ST110-02、ST110-03 和 ST110-04 进行了试验, 结果如图 2 所示。

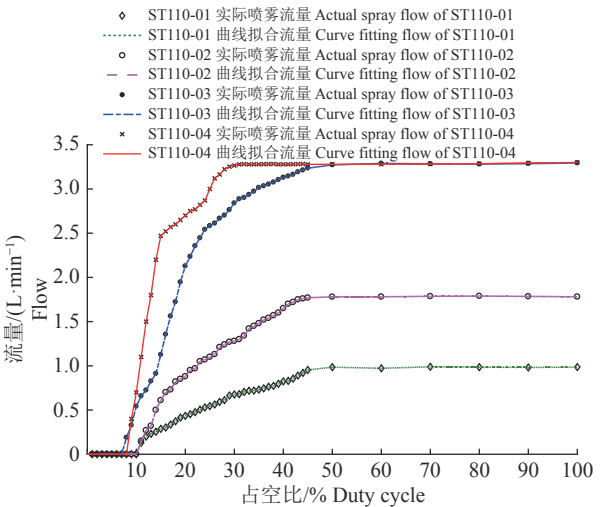


图 2 占空比与 4 种喷嘴喷雾流量关系图
Fig. 2 Relationships between duty cycles and spray flow rates of four types of nozzles

由图 2 可知, ST110-01、ST110-02、ST110-03 和 ST110-04 型喷嘴喷雾流量范围分别为 0~0.98、0~1.78、0~3.28 和 0~3.30 L/min, 占空比调节范围分别为 9%~45%、10%~46%、8%~45% 和 8%~28%, 本系统需要较宽的喷雾流量范围, 且占空比调节范围较宽时能够更加精确地调节喷雾流量, 因此本系统采用 ST110-03 型喷嘴。当占空比低于 8% 时, 隔膜泵已无法正常工作, 喷雾流量为 0, 当占空比增至 45% 时, 喷雾流量已趋于稳定, 继续增大占空比, 喷雾流量基本不变。根据本系统的需求, 对 ST110-03 型喷嘴选取占空比 10%~45% 范围进行占空比与喷雾流量的拟合与关系模型的建立, 结果如图 3 所示。

采用 3 次多项式拟合方程, 可得占空比与实际喷雾流量间的关系模型:

$$Q_{\text{yout}} = 60.46x^3 - 80.59x^2 + 36.99x - 2.63, \quad (1)$$

式中, Q_{yout} 表示实际喷雾流量, L/min; x 表示占空比。图 3 中的曲线为离散数据点的拟合曲线, 模型的决定系数(R^2)为 0.99, 拟合优度较高。

系统的喷雾流量随着飞行速度的变化进行自适应调整, 飞行速度和单位时间内的喷雾流量参考

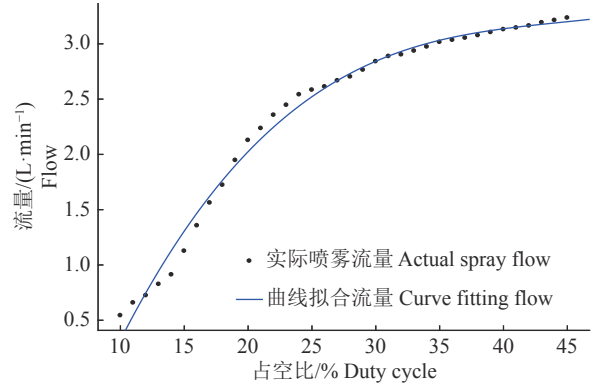


图 3 ST110-03 喷嘴占空比与实际喷雾流量的关系

Fig. 3 Relationship between duty cycle and actual spray flow rate of ST110-03 nozzle

文献 [17] 的方法表示为:

$$Q_{\text{rin}} = \frac{Nvd}{166.67}, \quad (2)$$

式中, Q_{rin} 为理论喷雾流量, L/min, N 为单位面积的农药喷施量, L/hm², v 为无人机的飞行速度, m/s, d 为喷嘴幅, m。

在本系统中, 有效喷嘴幅为 5 m, 农药喷施量设为 15 L/hm², 结合式 (1)(2) 可得飞行速度 (v) 与占空比 (x) 的关系:

$$x = \left[0.00373v + (0.00373v - 0.0264)^2 - 0.00253 \right]^{\frac{1}{3}} - 0.00652 \left/ \left[0.00373v + (0.00373v - 0.0264)^2 - 0.00253 \right]^{\frac{1}{3}} + 0.444 \right. \quad (3)$$

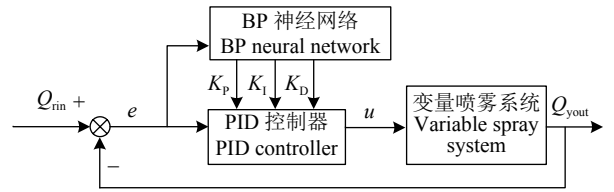
1.3 神经网络 PID 的控制算法实现

PID 控制因比较简单、稳定性好、可靠性高等优点而被广泛使用, 但采用常规参数固定的 PID 控制, 参数的确定比较困难且控制效果难以得到保证。模糊控制是实际应用最多的一种智能控制理论, 但模糊控制最大的缺点是学习能力差和稳态精度低。本研究将拥有较强自学习和自适应能力的 BP 神经网络和 PID 结合在一起, 可以在线调整 PID 控制器的参数, 以满足实时控制的要求。基于 BP 神经网络 PID 的变量喷雾系统的控制原理图, 如图 4 所示。

本文采用增量式数字 PID 控制, 其计算公式为^[18]:

$$u(k) = u(k-1) + [e(k) - e(k-1)]K_P + e(k)K_I + [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]K_D, \quad (4)$$

式中, K_P 、 K_I 和 K_D 分别为 PID 控制器的比例、积分和微分系数, $e(k)$ 为 k 时刻的喷雾流量偏差, $u(k)$ 为 k 时刻 PID 控制器输出的控制电压值。本研究采用的神经网络由输入层、隐含层和输出层组成, 输入层、隐含层和输出层的神经元个数分别为 3、4 和 3, 本研究的 BP 神经网络结构如图 5 所示。



图中 Q_{rin} 为设定喷雾流量; Q_{yout} 为实际喷雾流量; e 为设定喷雾流量与实际喷雾流量的偏差; K_P 、 K_I 和 K_D 分别为 PID 控制器的比例、积分、微分系数; u 是 PID 控制器输出的控制电压值

Q_{rin} : Set spray flow; Q_{yout} : Actual spray flow; e : Deviation between set spray flow and actual spray flow; K_P , K_I and K_D are proportion, integral and derivative of PID controller respectively; u : Control voltage value of the PID controller output

图 4 基于 BP 神经网络 PID 的变量喷雾系统的控制原理图
Fig. 4 Control principle diagram of variable spray system based on BP neural network PID

如图 5 所示, 输入层的 3 个输入分别为 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$, 输出层的 3 个输出分别为 K_P 、 K_I 和 K_D ^[19], BP 神经网络具体学习方法及过程参考李小峰等^[20]的方法。控制算法的流程如图 6 所示。

本系统的控制过程如下, 通过当前采样时刻无人机的飞行速度, 系统根据式 (2) 计算出目标喷雾流量作为控制系统的设定流量, 计算实际喷雾流量

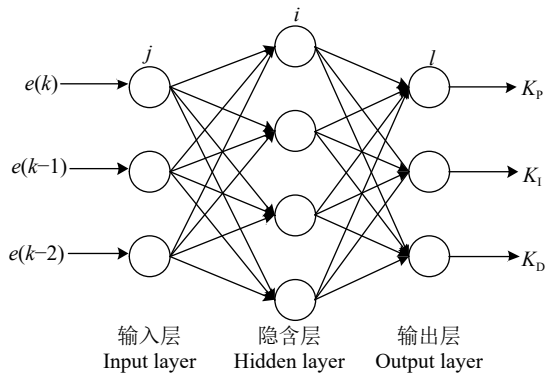


图 5 BP 神经网络结构图

Fig. 5 Structure diagram of BP neural network

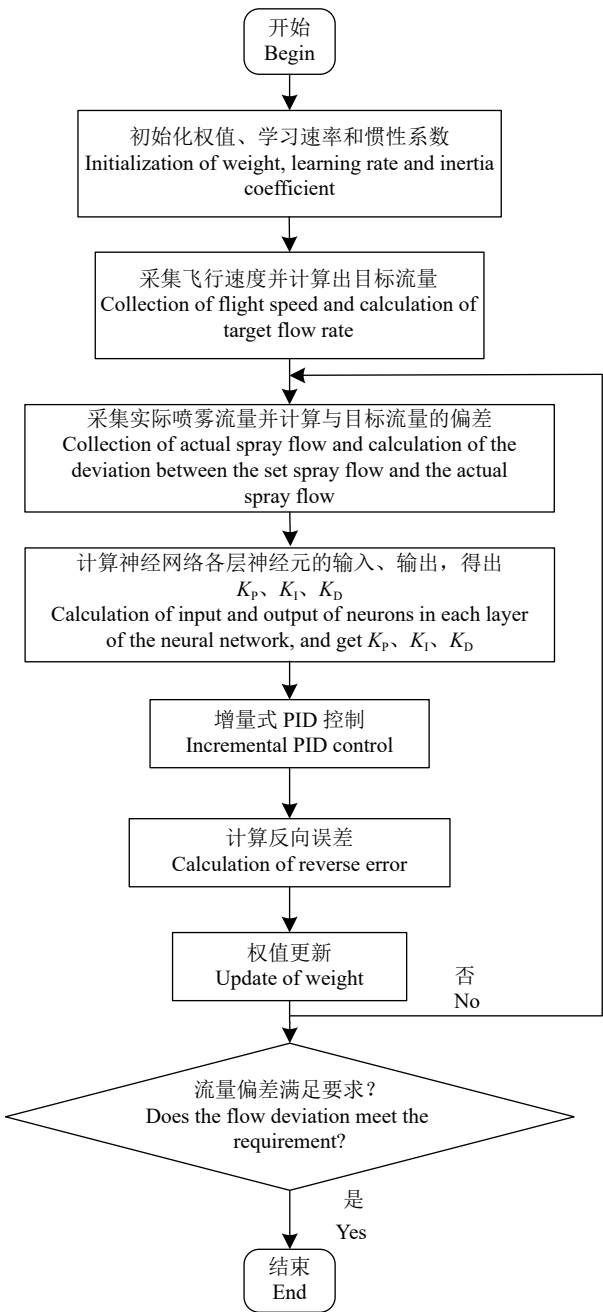


图 6 算法流程图

Fig. 6 Flow chart of algorithm

与设定流量的偏差，将偏差作为神经网络输入层的输入，通过 BP 神经网络的自整定输出 K_p 、 K_I 和 K_D 给 PID 控制器，PID 控制器输出控制电压 (u)，通过改变 PWM 波信号的占空比控制 u 值从而对流量进行调节，最后通过 BP 神经网络的自整定使得实际喷雾流量与设定流量的偏差不断减小。

2 室内仿真与田间试验设计

2.1 控制算法仿真

为了验证 BP 神经网络 PID 对变量喷雾系统的适用性和优越性，应用 MATLAB 软件构建了 BP 神经网络 PID 算法，对其进行了阶跃响应、正弦跟踪和方波跟踪仿真，并与传统的 PID 算法和常用的智能控制模糊 PID 和神经元 PID 进行对比。传统的 PID 控制参数取 $K_p=1.00$ 、 $K_I=0.75$ 和 $K_D=0.15$ ；模糊 PID 是在 PID 算法的基础上，以误差和误差变化率作为输入，利用模糊规则进行模糊推理进而调整参数；神经元 PID 的结构采用的是单神经元，利用 Hebb 学习规则进行权值的更新，学习速率 $\eta=0.20$ ；BP 神经网络 PID 采用 3-4-3 结构，学习速率 $\eta=0.20$ ，惯性系数 $\alpha=0.01$ ，权值的初始值选取区间 $[-1,1]$ 的随机数。

2.2 试验方案

试验地点位于广东省广州市天河区华南农业大学教学科研基地，采用 $3\text{ cm}\times 8\text{ cm}$ 的水敏纸检测喷雾量及分布均匀性，在飞行方向上间隔 5 m 均匀布置喷雾量采样点，在垂直于飞行方向间隔 1.25 m 均匀布置喷雾量采样点，1 次试验共有 5×5 个采样点，试验方案如图 7 所示。

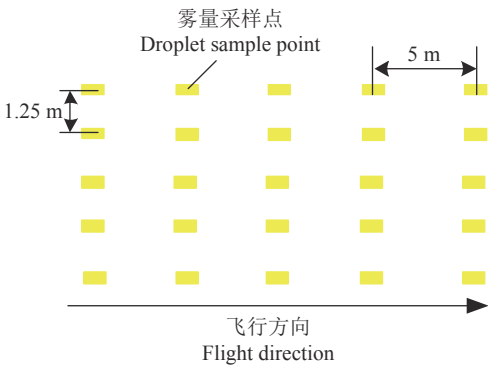


图 7 试验方案示意图

Fig. 7 Schematic diagram of test scheme

试验采用型号为 JMR-V1000 的六旋翼无人机，该无人机经济负载为 5 kg ，作业速度为 $3\sim 6\text{ m/s}$ ，续航时间为 $8\sim 13\text{ min}$ ，搭载本研究的无人机变量喷雾系统，无人机飞行时将试验数据存储于 SD 卡。

试验时间选在 09:00—12:00，天气晴朗，平均温

度为 30 ℃, 平均湿度为 45%, 风向为东南风, 风速小于 1 m/s。试验过程中, 控制植保无人机距离地面 2 m 变速飞行, 分别进行 3 次定量喷雾和 3 次变量喷雾的喷雾量采集。每次试验后收集各个采样点的水敏纸, 分别标记并封存。

2.3 喷雾量分布均匀性的分析方法

喷雾量分布均匀性是喷雾质量的重要评价指标, 为研究本变量喷雾系统的喷雾质量, 对定量喷雾和变量喷雾的雾量分布均匀性进行了对比分析。本研究喷雾量分布均匀性采用雾滴沉积量的变异系数 (CV) 来表示, 变异系数越小, 表示分布越均匀^[21]。植保无人机在实际作业过程不能保证时刻匀速飞行, 若采用定量喷雾的方式, 则以较大速度飞过的区域雾滴沉积量较小, 以较小速度飞过的区域雾滴沉积量较大, 从而导致喷雾量分布均匀性降低。通过美国农业部发布的软件 DepositScan 对每个采样点的水敏试纸进行分析得到雾滴沉积量^[22]。本研究喷雾量分布均匀性用雾滴沉积量的变异系数表示, 并由各个采样点的雾滴沉积量计算得出, 其计算参考蒋焕煜等^[23]的方法。

$$C = S / \bar{X} \times 100\%, \tag{5}$$

其中, $S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)}$, 式中, C 为变异系数, %, S 为雾滴沉积量标准差, $\bar{X}$ 为雾滴平均沉积量, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

雾滴沉积量的变异系数可以从 3 个方面进行计算, 分别是总体区域、无人机飞行方向和喷杆方向^[24]。在总体区域上, 式 (5) 的数据集为 1 次试验中每个采样点的集合, 数据量为采样点个数; 在飞行方向上, 数据集为 1 次试验中每列 (喷杆方向) 采样点的雾滴沉积量求平均值后的集合, 数据量为采样点的行数; 在喷杆方向上, 数据集为 1 次试验中每行 (飞行方向) 采样点的雾滴沉积量求平均值后的集合, 数据量为采样点的列数。

3 结果与分析

3.1 控制算法仿真试验

分别对 PID、模糊 PID、神经元 PID 和 BP 神经网络 PID 4 种控制算法进行阶跃响应仿真, 并在 3 s 处加入 1 个干扰信号, 由此来检测 4 种控制的抗干扰性。4 种控制算法的阶跃响应如图 8 所示, 由图 8 可以得出各种控制阶跃响应的主要性能指标, 如表 1 所示。

由表 1 可知, 在上升时间方面, BP 神经网络 PID 所需时间最短; 在超调量方面, 模糊 PID 的超调量最小, 但 BP 神经网络 PID 的超调量仍在本系

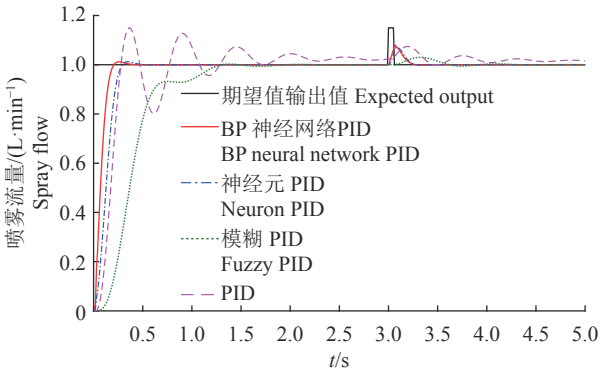


图 8 阶跃响应图
Fig. 8 Diagram of step response

表 1 阶跃响应的主要性能指标

性能指标	$t_{\text{上升}}/\text{s}$	超调量/%	稳态误差/%
Performance index	Rise time	Overshoot	Stable error
BP 神经网络 PID	0.20	1.20	0
BP neural network PID			
神经元 PID Neuron PID	0.29	1.20	0
模糊 PID Fuzzy PID	1.31	0.30	0
PID	0.28	14.90	1.30

统可接受的范围内; 在稳态误差方面, BP 神经网络 PID、神经元 PID 和模糊 PID 的稳态误差都为 0, 而 PID 为 1.30%; 在抗干扰性方面, 由图 8 可知 BP 神经网络 PID 和神经元 PID 区别不大, 都能快速恢复到稳定状态, 而 PID 和模糊 PID 则需要较长的时间才能恢复到稳定状态。

为了更加全面地分析这 4 种算法, 进行正弦跟踪和方波跟踪的仿真。正弦跟踪图和正弦跟踪误差图见图 9。由图 9 可知, PID 在 0.50~2.50 s 期间出现振荡, 且在幅值的顶点处会出现明显的形变, 平滑性较差, 在正弦跟踪的平均误差上, BP 神经网络 PID 为 0.017 2 L/min, 神经元 PID 为 0.018 5 L/min, 模糊 PID 为 0.095 7 L/min, PID 为 0.046 5 L/min, 模糊 PID 的正弦跟踪误差远大于 BP 神经网络 PID 和神经元 PID, BP 神经网络 PID 的平均误差最小。

方波跟踪图和方波误差跟踪图见图 10。由图 10 可知, PID 在方波跟踪上振动较大, 模糊 PID 在上升和下降阶段误差较大。在平均误差上, BP 神经网络 PID 为 0.031 5 L/min, 神经元 PID 为 0.033 8 L/min, 模糊 PID 为 0.153 9 L/min, PID 为 0.121 2 L/min, 模糊 PID 和 PID 的方波跟踪误差远大于 BP 神经网络 PID 和神经元 PID, BP 神经网络 PID 的平均误差最小。

综合 4 种控制算法在阶跃响应、正弦跟踪和方波跟踪的表现, BP 神经网络 PID 上升时间最短, 能

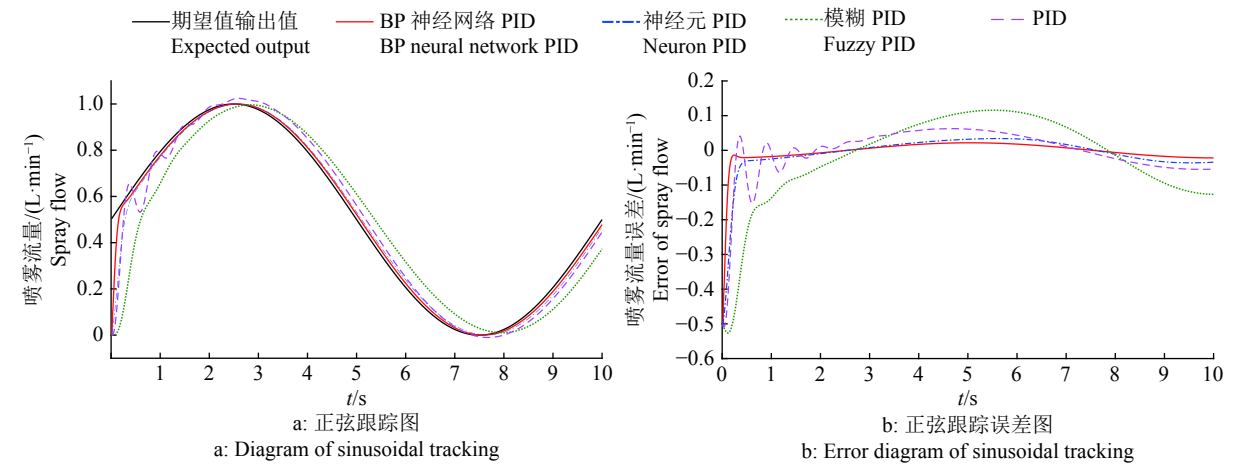


图 9 正弦跟踪及误差图
Fig. 9 Diagram of sinusoidal tracking and its error

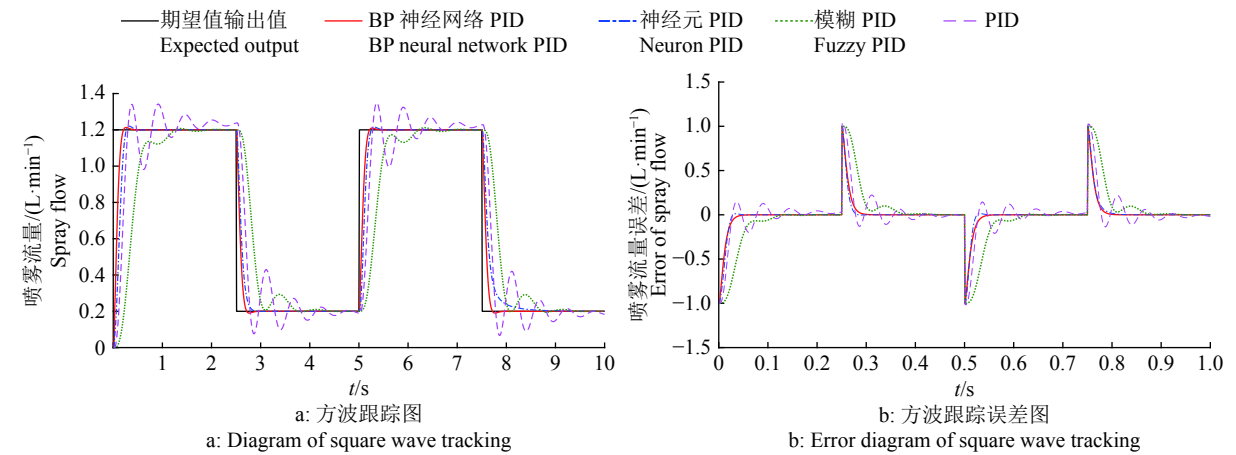


图 10 正弦跟踪及误差图
Fig. 10 Diagram of square wave tracking and its error

更好地满足自适应变量喷雾系统在无人机作业时所需的实时性,且无静差,流量平均误差最小,抗干扰性强,能提高本系统的稳定性,超调量虽比模糊 PID 大,但模糊 PID 的上升时间太长,不能很好地改善自适应变量喷雾系统的滞后性,且 BP 神经网络 PID 的超调量仅为 1.20%,仍在本系统可接受的范围内。

3.2 田间作业

将所设计的 BP 神经网络 PID 控制算法移植到 STM32 开发板中,输入层到隐藏层的连接权值和隐藏层到输出层的连接权值分别用 2 个二维数组表示,初始值选取区间 $[-1,1]$ 的随机数,并根据控制算法流程进行在线更新。算法移植后程序占用 STM32 的 ROM 为 53.75 kb,占用率为 21%,RAM 为 2.84 kb,占用率为 5.9%,能满足系统的计算需求。

3.2.1 喷雾流量数据 在试验中改变无人机的飞行速度,并利用流量传感器实时检测实际喷雾流

量,目标喷雾流量根据式 (2) 计算得出。试验中飞行速度、实际喷雾流量和目标喷雾流量的数据如图 11 所示。由图 11 可知,本系统可根据无人机飞行速度的变化控制喷雾流量,实现变量喷雾,且无人机飞行速度越快,喷雾流量越大,反之越小。本次试验的数据中实际喷雾流量与目标喷雾流量的平均偏差为 8.43%。

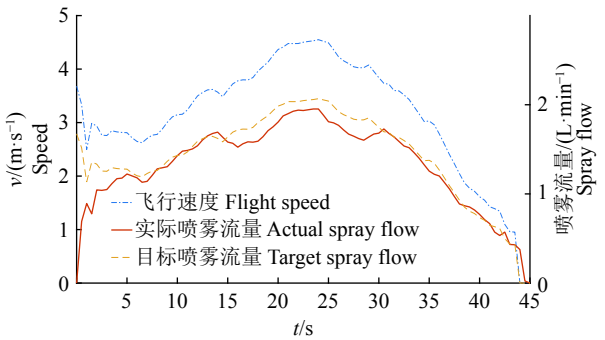


图 11 飞行速度与喷雾流量曲线
Fig. 11 Curves of UAV flight speed and spray flow rate

3.2.2 雾滴沉积量及分布均匀性 雾滴沉积特性决定着变量喷雾的药效, 研究利用 MATLAB 软件的拟合工具箱对各个采样点的沉积量进行插值拟

合, 得到 3 次定量喷雾和变量喷雾试验的雾滴沉积量的分布图 (图 12)。从图 12 可以直观地观察到雾滴沉积量的分布情况。

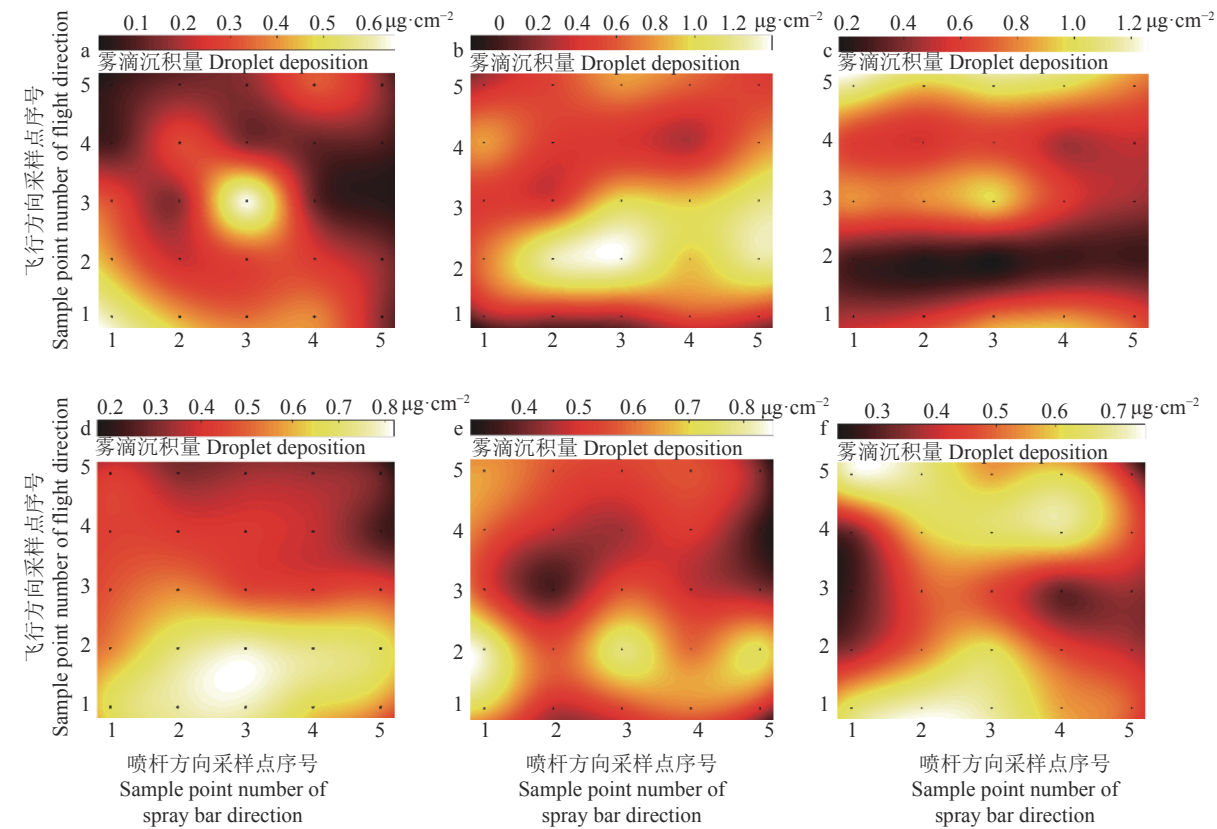


图 12 定量喷雾 (a、b、c) 和变量喷雾 (d、e、f) 试验雾滴沉积量分布图

Fig. 12 Distribution of droplet deposition in constant spray (a, b, c) and variable spray (d, e, f) test

为了更加全面的分析雾滴沉积量的分布均匀性, 对每次试验分别从总体区域、无人机飞行方向和喷杆方向计算雾滴沉积量的变异系数, 计算结果如表 2 所示。

表 2 喷雾试验雾滴沉积量的变异系数
Table 2 Variation coefficient of droplet deposition in spray test %

试验序号 ¹⁾	总体区域	飞行方向	喷杆方向
Test number	Whole area	Flight direction	Spray bar direction
1	64.45	30.27	38.13
2	32.37	9.10	32.32
3	51.56	19.08	43.19
4	21.29	13.01	16.29
5	43.25	10.57	42.61
6	26.85	15.32	18.94

1) 1、3 和 5 分别表示第 1、2、3 次定量喷雾; 2、4 和 6 分别表示第 1、2、3 次变量喷雾

1) 1, 3 and 5 represent the first, second and third quantitative spray respectively; 2, 4 and 6 represent the first, second and third variable spray respectively

由表 2 可知, 变量喷雾相较于定量喷雾在总体区域和喷杆方向均能降低雾滴沉积量的变异系数, 总体区域的变异系数平均降低 26.25%, 喷杆方向的变异系数平均降低 18.79%。在飞行方向上第 1 次试验变量喷雾的雾滴沉积量的变异系数比定量喷雾降低 21.17%, 第 2 次试验降低 6.07%, 第 3 次试验提升了 4.66%, 考虑原因是无人机喷施过程中雾滴的漂移导致喷雾在飞行方向上没有达到预期的效果。

4 结论

1) 提出了一种基于神经网络 PID 的无人机变量喷雾系统, 能根据无人机的飞行速度自适应调节喷雾流量, 试验数据表明实际喷雾流量与目标喷雾流量的平均偏差为 8.43%。

2) 构建了 BP 神经网络控制算法, 并利用 MATLAB 分别对 PID、模糊 PID、神经元 PID 和 BP 神经网络 PID 4 种控制算法进行了阶跃响应、正弦跟踪和方波跟踪仿真, 仿真结果表明 BP 神经网络 PID 控制算法控制效果最好, 能够更好地满足无

人机自适应变量喷雾系统所需的实时性和稳定性。

3) 将本系统挂载于无人机上, 分别进行了 3 次无人机定量喷雾和变量喷雾, 采用水敏纸检测雾滴沉积量, 试验结果表明总体区域的雾滴沉积量变异系数平均降低 26.25%, 喷杆方向上平均降低 18.79%, 喷杆方向上喷雾均匀性没有得到较好的改善, 还需要考虑雾滴漂移等因素。

4) 在未来的研究中, 可以采用性能更高的处理器来进行控制算法的研究, 且根据更多的参数进行变量喷雾, 研究风速、风向和雾滴漂移对雾滴分布均匀性的影响。本研究为农业航空变量喷雾技术的应用提供了基础。

参考文献:

[1] 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 59-72.

[2] 沈成杰. 变量喷雾系统设计及喷雾流量控制特性试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.

[3] 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 13-15.

[4] 王林惠, 甘海明, 岳学军, 等. 基于图像识别的无人机精准喷雾控制系统研究 [J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 23-30.

[5] 魏新华, 蒋杉, 张进敏, 等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 87-92.

[6] 邱白晶, 李佐鹏, 吴昊, 等. 变量喷雾装置响应性能的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 148-152.

[7] SHAHEMABADI A R, MOAYED M J. An algorithm for pulsed activation of solenoid valves for variable rate application of agricultural chemicals[C]// International Symposium on Information Technology 2008, Malaysia: Putra University, Department of Electrical and Instrumentation Engineering, 2008: 1-3.

[8] 徐兴, 徐胜, 刘永鑫, 等. 小型无人机机载农药变量喷洒系统设计 [J]. 广东农业科学, 2014, 41(9): 207-210.

[9] LEBEAUF, EL B L, DESTAIN M F, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. Comput Electron Agr, 2004, 43(2): 149-161.

[10] FRITZ B K, HOFFMANN W C, BAGLEY W E. Effects of spray mixtures on droplet size under aerial application conditions and implications on drift[J]. Appl Eng Agric, 2010, 26(1): 21-29.

[11] 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.

[12] 郭娜, 胡静涛. 基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 56-64.

[13] 白如月, 汪小岳, 鲁伟, 等. 施药机器人对行施药系统的设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(5): 101-109.

[14] 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(99): 14981-14990.

[15] 蔡祥, MARTIN W, MALTE D, et al. 喷嘴直接注入式农药喷洒系统控制方法研究 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 100-105.

[16] 汪少华, 窦辉, 孙晓强, 等. 电控空气悬架车高调节与整车姿态控制研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 335-342.

[17] 玄子玉. 喷雾机同步喷雾控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009.

[18] 涂川川, 朱凤武, 李铁. BP 神经网络 PID 控制器在温室温度控制中的研究 [J]. 中国农机化, 2012(2): 151-154.

[19] 谢炜. 基于 BP 神经网络 PID 算法的多电机同步控制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.

[20] 李小峰, 于慧彬. 基于 BP 神经网络的船舶航向智能 PID 控制研究 [J]. 山东科学, 2018, 31(4): 8-14.

[21] 张利君. 基于动态 PWM 变量喷雾系统的雾量分布均匀性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

[22] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 82-90.

[23] 蒋焕煜, 周鸣川, 李华融, 等. PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 73-77.

[24] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 41-46.

【责任编辑 霍 欢】